



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi del thermal comfort per l'edificio residenziale pubblico oggetto di diagnosi energetica di riferimento nella zona climatica Sud Italia (zona B: $600 < GG \leq 900$)

Giulia Centi, Luigi Marletta, Gianpiero Evola



Dipartimento di
Ingegneria Elettrica,
Elettronica e Informatica

ANALISI DEL THERMAL COMFORT PER L'EDIFICIO RESIDENZIALE PUBBLICO OGGETTO DI DIAGNOSI ENERGETICA DI RIFERIMENTO NELLA ZONA CLIMATICA SUD ITALIA (ZONA B: $600 < GG \leq 900$)

Luigi Marletta, Gianpiero Evola, Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Elettronica e Informatica,
Università degli Studi di Catania)

Giulia Centi (ENEA)

Dicembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2018

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

Progetto: Studi sulla riqualificazione energetica del parco esistente di edifici pubblici (scuole, ospedali, uffici della PA centrale e locale) mirata a conseguire il raggiungimento della definizione di edifici a energia quasi zero (nZEB)

Obiettivo: Studio di un edificio di edilizia residenziale pubblica di riferimento nella zona climatica (zona B: $600 < GG \leq 900$)

Responsabile di Progetto: Domenico Iatauro, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Analisi del thermal comfort dell'edificio oggetto di diagnosi energetica in Zona B" (zona B: $600 < GG \leq 900$)"

Responsabile scientifico ENEA: ing. Giulia Centi

Responsabile scientifico UNICT: Prof. Ing. Luigi Marletta

Indice

SOMMARIO	2
1 IL CASO STUDIO: EDIFICIO PUBBLICO AD USO RESIDENZIALE.....	4
1.1 TOPOLOGIA	4
1.2 DATI COSTRUTTIVI	5
1.3 PLANIMETRIE E PROSPETTI	5
1.4 CARATTERISTICHE TERMO-FISICHE DELL'INVOLUCRO EDILIZIO	11
2 INTERVENTI DI RIQUALIFICAZIONE IMPORTANTE DI PRIMO LIVELLO.....	14
2.1 INTERVENTI SULLE PARETI ESTERNE	14
2.2 INTERVENTI SULLE PARTIZIONI VERTICALI	16
2.3 INTERVENTI SUI SOLAI	16
2.4 INTERVENTI SUI SERRAMENTI	17
3 SIMULAZIONE DINAMICA DELL'EDIFICIO	19
3.1 IL MODELLO DI CALCOLO DINAMICO: ENERGYPLUS.....	19
3.2 INPUT DEL PROGRAMMA	21
3.3 CHIUSURE OPACHE E TRASPARENTI	22
3.4 VENTILAZIONE NATURALE E PERMEABILITÀ DELL'INVOLUCRO.....	25
3.5 CARICHI ENDOGENI.....	27
3.6 DATI CLIMATICI.....	29
4 ANALISI DI SENSITIVITÀ E VALIDAZIONE	32
4.1 TEMPERATURA DEGLI AMBIENTI AL PIANO TERRA	32
4.2 POTENZA ELETTRICA INSTALLATA	33
4.3 OSTRUZIONI ESTERNE	34
4.4 INFLUENZA DEI DATI CLIMATICI.....	34
4.5 VALIDAZIONE DEL MODELLO.....	36
5 LA VALUTAZIONE DEL COMFORT TERMICO	39
5.1 IL MODELLO DI FANGER	39
5.2 IL MODELLO ADATTIVO.....	40
5.3 DEFINIZIONE DELLA METODOLOGIA DI ANALISI	42
6 RISULTATI: VALUTAZIONE DEL COMFORT TERMICO.....	44
6.1 L'ANDAMENTO DELLE TEMPERATURE OPERATIVE	44
6.2 ANALISI DELL'INTENSITY OF THERMAL DISCOMFORT (ITD).....	50
6.3 ANALISI DELLA FREQUENZA DEL DISCOMFORT (FD)	52
7 STRATEGIE DI VENTILAZIONE	56
8 IL RUOLO DELLO SPESSORE DI ISOLANTE	60
9 CONCLUSIONI.....	62
10 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	65
11 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI	66
12 AUTORI	67

ALLEGATO I – Dettagli costruttivi

ALLEGATO II - Temperatura operativa nel mese di Agosto: PRIMO PIANO

ALLEGATO III - Temperatura operativa nel mese di Agosto: PIANO INTERMEDIO

ALLEGATO IV - Temperatura operativa nel mese di Agosto: ULTIMO PIANO

Sommario

La presente relazione riporta i risultati dello studio condotto dal Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Elettronica ed Informatica (DIEEI) dell'Università degli Studi di Catania, responsabile il Prof. Ing. Luigi Marletta, nell'ambito del Piano Annuale di Realizzazione 2017 (PAR 2017), per quanto attiene all'Area D "Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici", ed in particolare:

- **tema di ricerca D.2:** Edifici a energia quasi zero (nZEB)
- **progetto D.2.1:** Studi sulla riqualificazione energetica del parco esistente di edifici pubblici (scuole, ospedali, uffici della PA centrale e locale) mirata a conseguire il raggiungimento della definizione di edifici a energia quasi zero (nZEB)
- **obiettivo:** Studio di un edificio di edilizia residenziale pubblica di riferimento nella zona climatica (zona B: $600 < GG \leq 900$).

Il programma prevede l'individuazione di edifici esistenti di proprietà pubblica, sufficientemente rappresentativi del patrimonio edilizio italiano. Per tali edifici devono essere valutate opportune soluzioni per la riqualificazione energetica, che nel complesso si configurino come intervento di *ristrutturazione importante di primo livello* in grado di trasformare l'edificio in un nZEB.

L'edificio oggetto di studio fa parte di un complesso residenziale realizzato nei primi anni '60 dall'Istituto Autonomo Case Popolari (IACP), ed è situato in via Aurora 10, Catania (zona climatica B). Esso ospita ventotto appartamenti, distribuiti su sette piani fuori terra. Il manufatto presenta allo stato attuale delle prestazioni energetiche scadenti. In un precedente Report di Ricerca di Sistema Elettrico (PAR 2017) sono già state analizzate le soluzioni per la *ristrutturazione importante di primo livello*, in grado di trasformare l'edificio in un nZEB a fronte di un investimento sostenibile in quanto caratterizzato da tempi di ritorno nell'ordine dei dieci anni.

In particolare, l'intervento di riqualificazione proposto prevede – insieme ad altre misure relative agli impianti termici, quali l'adozione di una pompa di calore aria-acqua reversibile e l'installazione di moduli fotovoltaici monocristallini in copertura – la coibentazione delle superfici disperdenti verticali ed orizzontali opache e la sostituzione dei serramenti esistenti con serramenti ad elevate prestazioni. Tali interventi sono in grado di ridurre significativamente il fabbisogno energetico per la climatizzazione invernale dei locali, e di soddisfare le verifiche di legge introdotte dal Decreto "Requisiti Minimi" del 26 giugno 2015.

Nella stagione estiva, però, l'incremento dell'isolamento termico dell'involucro edilizio può determinare un considerevole surriscaldamento dei locali, soprattutto in località dal clima caldo come in zona climatica B. Nelle ore serali o notturne, infatti, la temperatura esterna è inferiore a quella interna, ma l'elevata resistenza termica dell'involucro rende arduo l'efficace smaltimento verso l'esterno degli apporti termici accumulati durante il giorno dalle strutture. Ciò potrebbe comportare un incremento del numero di ore in cui sarà necessario attivare l'impianto di climatizzazione estiva per garantire il comfort termico degli occupanti.

Lo studio descritto in questo Report di Ricerca è dunque finalizzato a verificare se l'intervento di riqualificazione energetica proposto comporta per gli impianti di climatizzazione estiva una più lunga attivazione rispetto allo stato di fatto al fine di garantire il comfort termico, o addirittura se gli impianti di climatizzazione estiva dovranno essere utilizzati anche in periodi in cui normalmente non si richiede la climatizzazione dei locali (ad esempio nei mesi di Maggio e Ottobre).

Le analisi saranno condotte per mezzo del software di simulazione dinamica EnergyPlus, in grado di determinare l'andamento orario della temperatura operativa dei locali. I valori di temperatura operativa saranno confrontati con le soglie di comfort termico proposte dalla nota teoria del comfort elaborata dal Prof. Ole Fanger e recepita nelle norme UNI EN ISO 7730 e UNI EN ISO 10551, e con quelle della più moderna *teoria adattiva*, descritta nello standard UNI 15251:2007. Il risultato di tali indagini sarà presentato valutando le ore di discomfort ed il valore di opportuni indici di discomfort descritti in letteratura, quali la Frequenza del Discomfort (FD) l'*Intensity of Thermal Discomfort* (ITD).

Il modello per la simulazione dinamica dell'edificio è stato inoltre soggetto a validazione, tramite una campagna di misure sperimentale condotta a Settembre in uno degli appartamenti al quinto piano. I valori rilevati della temperatura interna sono stati confrontati con i risultati delle simulazioni dinamiche, testimoniando l'affidabilità del modello.

Il presente lavoro è mirato anche a valutare l'efficacia di opportune strategie di ventilazione naturale notturna, considerando che questa pratica è particolarmente efficace nel facilitare lo smaltimento del calore endogeno durante le ore più fresche. Per la definizione delle strategie di ventilazione notturna si è tenuto conto della possibilità di ridurre la durata e l'intensità del discomfort termico, senza però dar luogo a correnti d'aria che comportino fastidi per i residenti. Infine, ulteriori indagini hanno riguardato l'effetto dell'utilizzo di isolanti termici di tipo o spessore diverso.

Le simulazioni dinamiche hanno dimostrato che la soluzione di riqualificazione energetica proposta, in quanto comprensiva di un alto livello di isolamento termico, comporta l'aumento delle ore di potenziale discomfort estivo per gli occupanti, ovvero l'aumento del numero di ore in cui gli occupanti vorranno ricorrere agli impianti di climatizzazione estiva.

La ventilazione naturale notturna si dimostra però un'efficace strategia di mitigazione, in grado di contrastare gli effetti negativi dell'isolamento termico. A tal fine, però, è richiesta agli occupanti una opportuna modalità di apertura delle superfici finestrate, tale da garantire una portata di ventilazione sufficiente senza tuttavia determinare fastidiose correnti d'aria.

Infine, la scelta dello spessore di isolante sembra essere determinante per il comfort e per il rispetto delle verifiche di legge. In zona climatica B è conveniente limitarsi a spessori non eccessivi e comunque strettamente necessari per abbassare i fabbisogni energetici a valori appena inferiori ai limiti di legge.

1 Il caso studio: edificio pubblico ad uso residenziale

1.1 Topologia

Il fabbricato oggetto di studio è un edificio a destinazione d'uso residenziale, situato in Via Aurora 10, nel comune di Catania, ed in particolare nel quartiere San Leone, facente parte della V circoscrizione. L'edificio fa parte di un complesso realizzato tra la fine degli anni '50 e l'inizio degli anni '60 dall'Istituto Autonomo delle Case Popolari (IACP): esso è quindi rappresentativo dell'edilizia residenziale pubblica, anche se alcune delle unità abitative presenti sono state di recente riscattate dagli affittuari.

Il lotto a cui appartiene l'edificio è di forma rettangolare con lati di settanta e ottanta metri, e si affaccia su due arterie, Corso dei Mille a sud e Via Aurora (ex via Antonino Giusti) a ovest, tramite le quali si accede al complesso edilizio (Figura 1 e Figura 2).



Figura 1. Planimetria generale



Figura 2. Vista satellitare del lotto.

1.2 Dati Costruttivi

L'edificio è stato costruito tra la fine degli anni '50 e l'inizio degli anni '60, anche se non si hanno notizie certe circa la data di completamento dei lavori. Esso presenta una struttura costituita da scheletro portante in calcestruzzo armato e tamponature realizzate con blocchi forati di calcestruzzo. Non è presente l'isolamento né sulle pareti verticali, né sul solaio di copertura realizzato con pignatte in laterizio e soletta in calcestruzzo armato. Gli infissi sono in alluminio senza taglio termico e con vetro semplice da 4 mm.

Come si evince dalla descrizione dell'edificio, esso non presenta alcun accorgimento che possa soddisfare le prestazioni di risparmio energetico, requisito che, ai tempi della costruzione del manufatto, non veniva tenuto in debita considerazione. In Figura 3 si riporta il rilievo fotografico dei quattro prospetti dell'edificio.



Figura 3. Rilievo fotografico dei quattro prospetti

1.2.1 Planimetrie e prospetti

Il fabbricato si presenta come un parallelepipedo di altezza pari a 27.5 m, maggiore di quella degli edifici adiacenti, e base pressoché quadrata ($20 \times 21 \text{ m}^2$) i cui fronti sono tutti liberi e privi di ostruzioni esterne. È formato da otto piani fuori terra e destinato per la quasi totalità a residenze, fatta eccezione per il piano terra in cui sono situate due attività commerciali e i garage di pertinenza delle unità abitative, a cui si accede da Corso dei Mille (Figura 5). Il transito pedonale invece avviene da via Aurora ed è affidato ad una passerella che collega tutti gli edifici del complesso. Data l'orografia del terreno, i due accessi sono posti a quote differenti: quello veicolare a quota zero, quello pedonale a +4.30 m.

I piani residenziali sono messi in comunicazione tra loro sia dal vano scala, sia dall'ascensore e sono tutti composti da quattro unità abitative, disposte secondo l'asse di simmetria nord-sud: due trivani (46.44 m^2 di superficie utile) esposti a nord-est e nord-ovest e denominati nel seguito U1 ed U4 (Figura 4), e due quadrivani (88.93 e 84.33 m^2 di superficie utile) esposti a sud-est e sud-ovest e denominati nel seguito U2 ed U3. La distribuzione degli alloggi è analoga per tutti i piani; l'unica differenza è da rintracciare nelle superfici a confine dei trivani: esclusivamente al primo piano la chiusura verticale ad est dell'unità U1 e quella ad ovest dell'unità U4 confinano con il vano scala (Figura 6), mentre ai piani successivi dispongono di affaccio diretto

all'esterno (Figura 7 e Figura 8). Da tale configurazione derivano migliori condizioni di illuminazione e ventilazione per i locali dei piani successivi al primo.

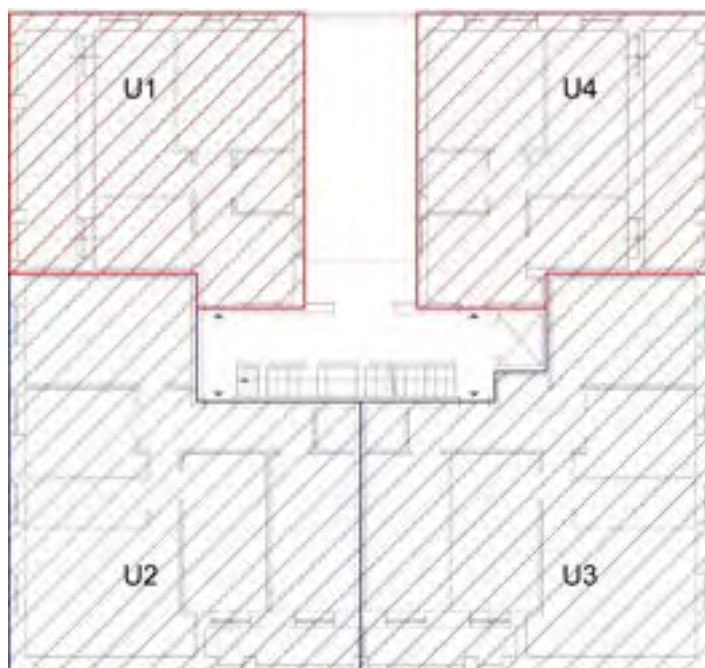


Figura 4. Distribuzione tipologica degli alloggi



Figura 5. Pianta del piano terra

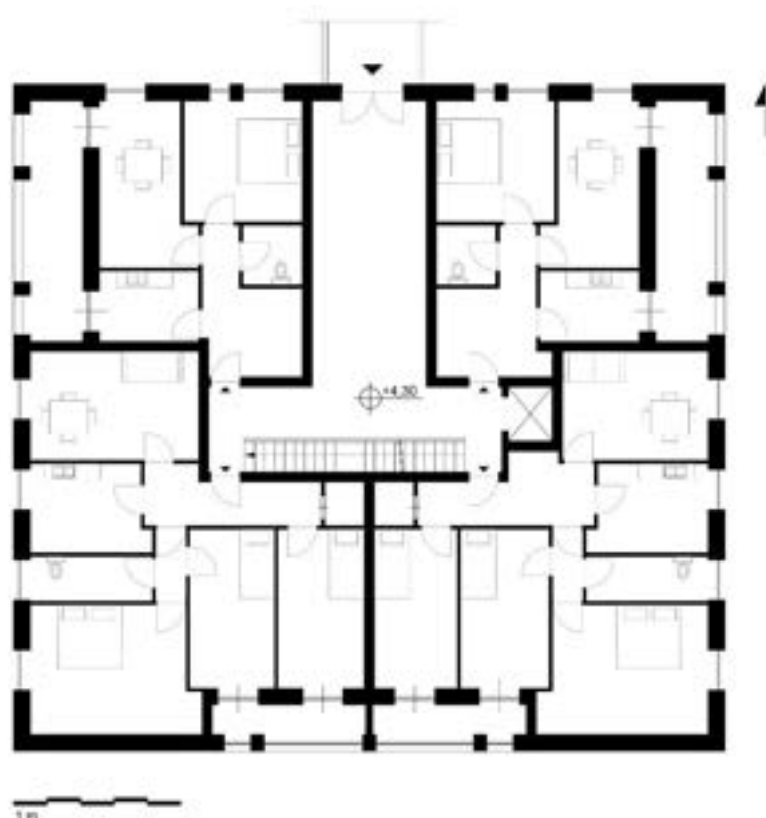


Figura 6. Pianta del primo piano

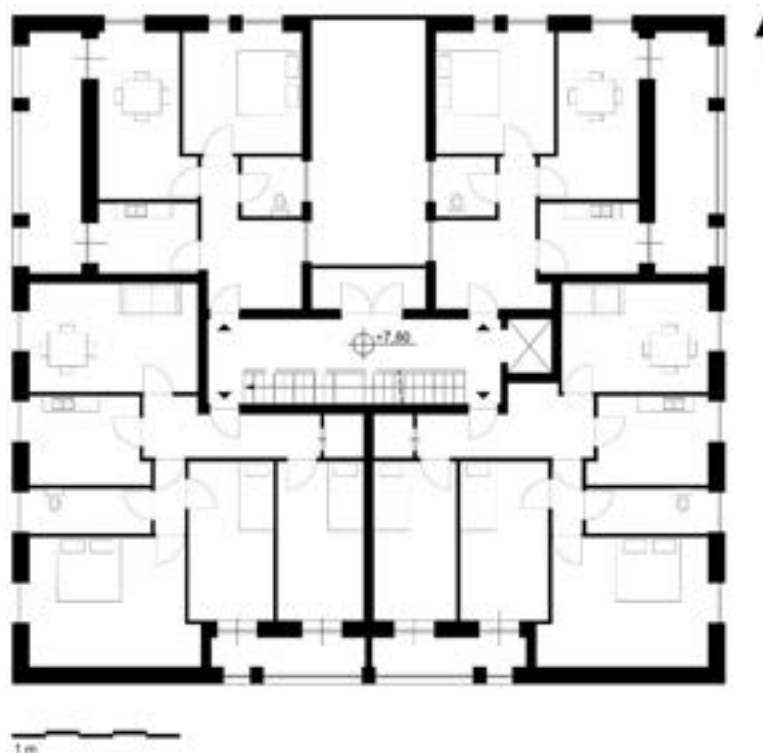


Figura 7. Pianta del piano tipo

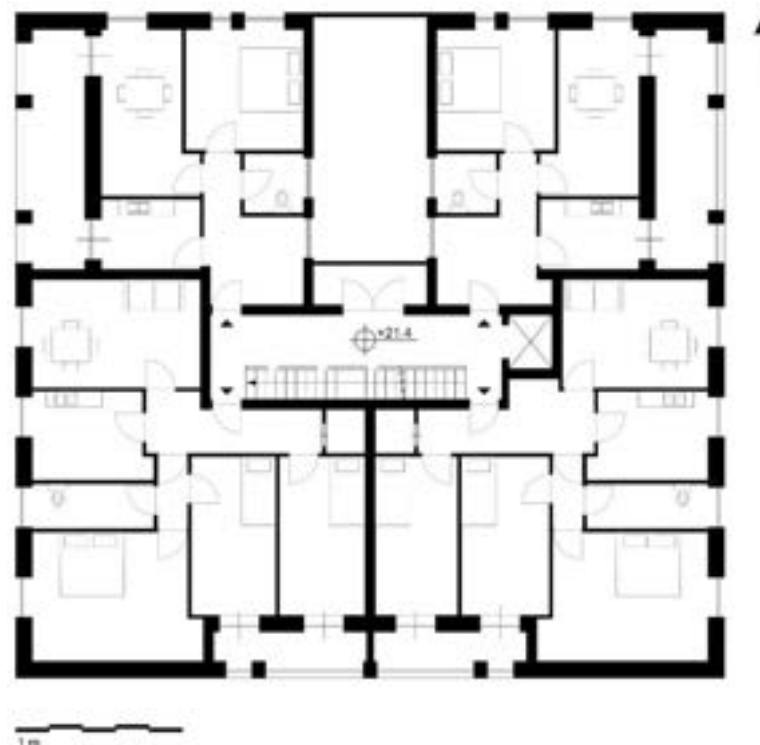


Figura 8. Pianta dell'ultimo piano

In Tabella 1 si riportano nel dettaglio le superfici ed i volumi dei locali e delle unità immobiliari. Tutti i locali hanno altezza netta pari a 3 metri. La superficie utile netta è di circa 46 m² per le unità più piccole, denominate U1 ed U4, e di poco inferiore agli 85 m² per le unità più grandi, denominate U2 ed U3. La superficie utile complessiva dell'immobile ammonta a 1835 m², il volume netto complessivo a 5505 m³.

	Superficie [m ²]	Volume [m ³]
Camera da letto	12.83	38.49
Camera da pranzo	12.77	38.31
Bagno	3.18	9.54
Disimpegno	2.90	8.7
Salotto	7.93	23.79
Cucina	6.83	20.49
TOTALE	46.44	139.32

Tabella 1. Superfici e volumi dei locali – unità U1 ed U4

	Unità U2		Unità U3	
	Superficie [m ²]	Volume [m ³]	Superficie [m ²]	Volume [m ³]
Camera da pranzo	16.37	49.11	14.63	43.89
Cucina	9.07	27.21	9.07	27.21
Bagno	4.91	14.73	4.91	14.73
Disimpegno	9.60	28.8	10.74	32.22
Ripostiglio	1.97	5.91	1.97	5.91
Camera da letto A	18.66	55.98	18.66	55.98
Camera da letto B	12.09	36.27	12.09	36.27
Camera da letto C	12.26	36.78	12.26	36.78
TOTALE	84.93	254.79	84.33	252.99

Tabella 2. Superfici e volumi dei locali – unità U2 ed U3

La copertura dell'edificio è costituita da una chiusura orizzontale piana calpestabile, occupata da un corpo di altezza 2.20 m e collocato in corrispondenza del vano scala. Dalle foto planimetriche è stato possibile individuare la posizione dei pluviali e ricostruire l'andamento delle pendenze necessarie per il corretto smaltimento delle acque meteoriche (Figura 9).

L'involucro, dalle finiture di colore medio, è piuttosto compatto e non presenta grossi elementi di discontinuità, se non per la presenza di pilastri in calcestruzzo e di balconi a sud, est e ovest; è anche presente un elemento aggettante, posto all'ultimo piano, che consente di ombreggiare le parti sottostanti.

Ogni fronte dispone di marcapiani che definiscono in altezza l'organizzazione del volume e tracciano quindi il confine dei vari piani. Dai rilievi in sito non sono stati riscontrati evidenti segni di degrado, ad esclusione di vernici vandaliche apposte al piano terra del prospetto sud.

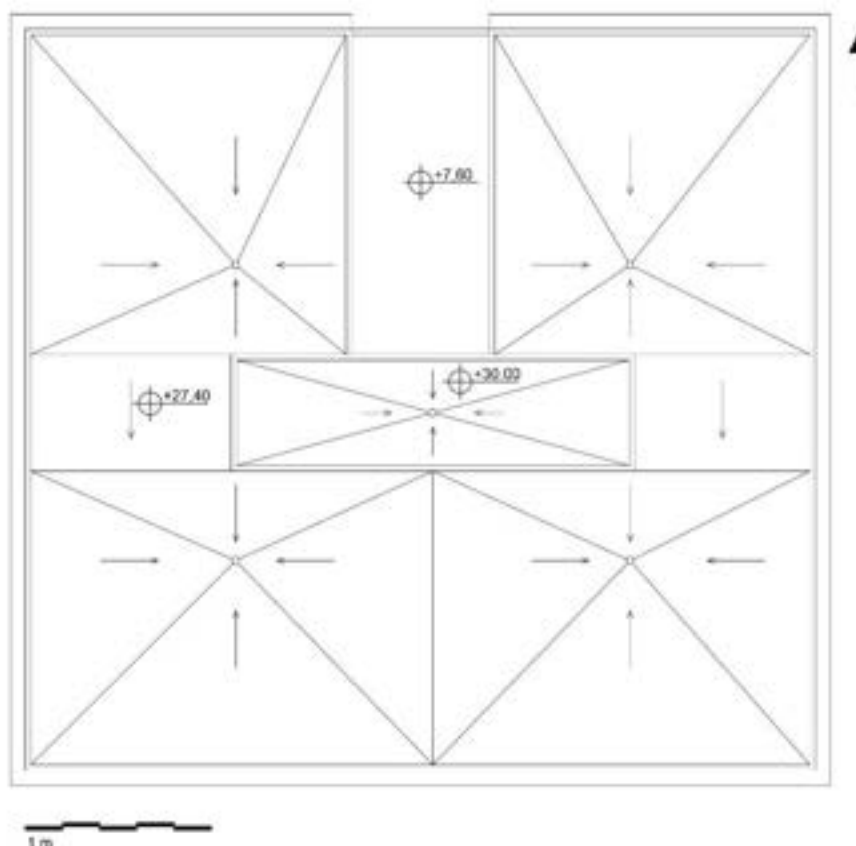


Figura 9. Pianta della copertura



Figura 10. Prospetto Nord (a sinistra) e Sud (a destra)



Figura 11. Prospetto Ovest (a sinistra) ed Est (a destra)

1.3 Caratteristiche termo-fisiche dell'involucro edilizio

È stato possibile risalire alle stratigrafie delle chiusure verticali ed orizzontali tramite sopralluoghi ed ipotesi conformi alle tecniche costruttive impiegate a Catania nel periodo in cui è stato progettato l'edificio, cioè alla fine degli anni Cinquanta.

L'ossatura portante è costituita da uno scheletro in calcestruzzo armato, con tamponature verticali di due diverse tipologie. In particolare, le pareti che si affacciano sulla buca in corrispondenza del prospetto Nord sono realizzate con blocchi forati di calcestruzzo da 25 cm intonacati da ambo i lati, mentre le tamponature esterne che costituiscono le facciate principali ricalcano la tipologia "a cassetta" con blocchi forati di calcestruzzo ed intercapedine d'aria, per uno spessore totale di circa 45 cm. Le corrispondenti stratigrafie sono riportate in Tabella 3 e Tabella 4. I valori di trasmittanza sono pari a $1.96 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ per la tipologia monostrato e $1.17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ per la tipologia a cassetta.

Per quanto riguarda le partizioni interne, sono anche in questo caso presenti due tipologie: quelle di separazione tra le unità immobiliari e quelle interne agli appartamenti. In entrambi i casi sono utilizzati blocchi forati di calcestruzzo intonacati; le due tipologie di partizione presentano però spessore diverso, come riportato in Tabella 5 e Tabella 6.

	s [m]	λ [W/m·K]	R_T [m ² K/W]	C [J/kg·K]	ρ [kg/m ³]
Strato liminare interno			0,13		
INTONACO INTERNO di calce e gesso	0,02	0,70		1010	1400
BLOCCHI DI CALCESTRUZZO	0,25	0,90		840	820
INTONACO ESTERNO calce e cemento	0,03	0,90		710	1800
Strato liminare esterno			0,04		
Trasmittanza U = $1,96 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$					

Tabella 3. Stratigrafia chiusure verticali esterne monostrato - spessore 30 cm

	s [m]	λ [W/m·K]	R_T [m ² K/W]	C [J/kg·K]	ρ [kg/m ³]
Strato liminare interno			0,13		
INTONACO INTERNO di calce e gesso	0,02	0,70		1010	1400
BLOCCHI DI CALCESTRUZZO	0,12	0,55		840	890
MALTA DI CEMENTO	0,01	1,40		670	2000
INTERCAPEDINE ARIA	0,17	-	0,18	-	-
BLOCCHI DI CALCESTRUZZO	0,12	0,55		840	890
INTONACO ESTERNO calce e cemento	0,03	0,90		710	1800
Strato liminare esterno			0,04		
Trasmittanza U = $1,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$					

Tabella 4. Stratigrafia chiusure verticali esterne a cassetta - spessore 47 cm

	s [m]	λ [W/m·K]	R_T [m ² K/W]	C [J/kg·K]	ρ [kg/m ³]
Strato liminare interno			0,13		
INTONACO INTERNO di calce e gesso	0,02	0,70		1010	1400
BLOCCHI DI CALCESTRUZZO	0,25	0,90		840	820
INTONACO INTERNO di calce e gesso	0,02	0,70		1010	1400
Strato liminare interno			0,13		
Trasmittanza U = $1,68 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$					

Tabella 5. Stratigrafia partizioni verticali tra unità immobiliari (o tra unità e vano scala)

	s [m]	λ [W/m·K]	R_T [m² K/W]	C [J/kg·K]	ρ [kg/m³]
Strato liminare interno			0,13		
INTONACO INTERNO di calce e gesso	0,01	0,70		1010	1400
BLOCCHI DI CALCESTRUZZO	0,08	0,44		840	1040
INTONACO INTERNO di calce e gesso	0,01	0,70		1010	1400
Strato liminare interno			0,13		
Trasmittanza U = 2,12 W/(m²·K)					

Tabella 6. Stratigrafia partizioni verticali interne alle unità immobiliari

	s [m]	λ [W/m·K]	R_T [m² K/W]	C [J/kg·K]	ρ [kg/m³]
Strato liminare interno			0,10		
INTONACO INTERNO di calce e gesso	0,02	0,70		1010	1400
SOLAIO IN LATERO CEMENTO	0,26	0,74		840	1200
MASSETTO in calcestruzzo	0,10	0,66		880	1200
MASSETTO ripartizione dei carichi	0,05	1,16		880	2000
MALTA CEMENTIZIA	0,01	1,40		670	2000
MATTONELLE IN CEMENTO	0,02	1,40		880	2000
Strato liminare esterno			0,04		
Trasmittanza U = 1,36 W/(m²·K)					

Tabella 7. Stratigrafia chiusura orizzontale di copertura

	s [m]	λ [W/m·K]	R_T [m² K/W]	C [J/kg·K]	ρ [kg/m³]
Strato liminare interno			0,10		
INTONACO INTERNO di calce e gesso	0,02	0,70		1010	1400
SOLAIO IN LATERO CEMENTO	0,22	0,67		840	1000
MASSETTO in calcestruzzo	0,05	0,66		880	1200
MALTA CEMENTIZIA	0,01	1,40		670	2000
MATTONELLE IN MARMO	0,01	3,00		700	2700
Strato liminare esterno			0,10		
Trasmittanza U = 1,55 W/(m²·K)					

Tabella 8. Stratigrafia chiusura orizzontale intermedia

Anche le chiusure orizzontali, prive di opportuno isolamento, presentano valori di trasmittanza elevati: $U = 1,36 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ nel caso della chiusura orizzontale di copertura (Tabella 7) e $U = 1,55 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ nel caso della chiusura orizzontale intermedia (Tabella 8). Le pareti perimetrali e la copertura presentano finiture superficiali di colore medio, alle quali è stato attribuito un coefficiente di assorbimento solare pari a 0.6.

Per quanto concerne i serramenti, ne sono stati riscontrati di tre diverse dimensioni. Tutti i serramenti presentano comunque telai metallici senza taglio termico – la cui trasmittanza, ai sensi della UNI 10077-1, è considerata pari a $7,00 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ – e vetri semplici da 4 mm, con trasmittanza $U = 5,70 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$; i telai occupano il 30% della dimensione totale dei serramenti. Inoltre, le superfici finestrate presentano sistemi oscuranti ed avvolgibili, con cassonetti non isolati di trasmittanza $U = 1,65 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$.

In Figura 12 si riporta l'abaco degli infissi presenti nell'edificio oggetto di intervento. Le trasmittanze complessive dei singoli serramenti raggiungono il valore di $6,12 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$.

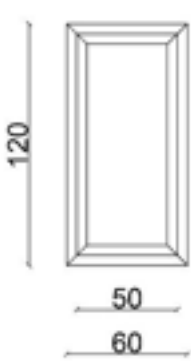
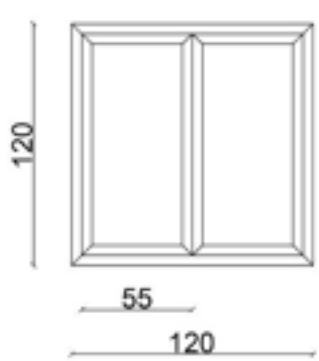
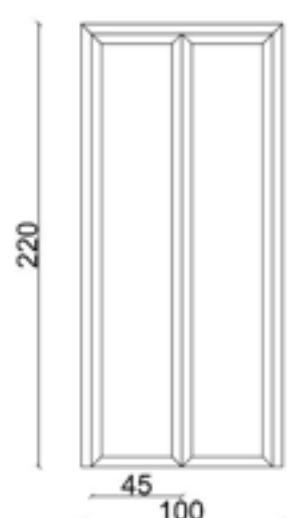
F1-FINESTRA AD ANTA SINGOLA	F2-FINESTRA A DOPPIA ANTA	PF-PORTAFINESTRA A DOPPIA ANTA
		
Af: 0.72 m ² Ag: 0.23 m ² Aw: 0.49 m ² Lpsi: 3.04 m Frame: Alluminio senza taglio termico Glass: Vetro semplice 4mm	Af: 2.20 m ² Ag: 0.72 m ² Aw: 1.48 m ² Lpsi: 9.68 m Frame: Alluminio senza taglio termico Glass: Vetro semplice 4mm	Af: 2.20 m ² Ag: 0.72 m ² Aw: 1.48 m ² Lpsi: 9.68 m Frame: Alluminio senza taglio termico Glass: Vetro semplice 4mm
Ut: 5.70 W/m ² K Ug: 7 W/m ² K Uw: 6.12 W/m ² K Psi: 0 E: 0.837 ggl,n: 0.85 ggl,shggi: 0.8	Ut: 5.70 W/m ² K Ug: 7 W/m ² K Uw: 6.12 W/m ² K Psi: 0 E: 0.837 ggl,n: 0.85 ggl,shggi: 0.8	Ut: 5.70 W/m ² K Ug: 7 W/m ² K Uw: 6.12 W/m ² K Psi: 0 E: 0.837 ggl,n: 0.85 ggl,shggi: 0.8

Figura 12. Abaco degli infissi

Si riportano infine in Tabella 9 i valori delle caratteristiche dinamiche per gli elementi dell'involucro opaco, calcolate ai sensi della norma UNI EN ISO 13786. A causa dei valori di sfasamento Φ particolarmente bassi, è possibile concludere che le prestazioni dinamiche delle pareti verticali sono scadenti; il solaio di copertura, invece, presenta uno sfasamento prossimo alle 12 ore, che ne rende le prestazioni dinamiche sufficienti.

Anche i valori della trasmittanza termica periodica Y_{IE} risultano particolarmente deludenti: si consideri a tal proposito che, nel caso di edifici di nuova costruzione o di ristrutturazioni importanti di I livello, il DM 26/06/2015, noto come "Decreto Requisiti Minimi", prescrive per questo parametro valori inferiori a 0.10 W/(m²K) per le pareti verticali, e inferiori a 0.18 W/(m²K) per i solai di copertura. È dunque evidente come le caratteristiche inerziali dell'edificio siano ben lontane dagli attuali standard di qualità.

	f_d [-]	Φ [h]	Y_{IE} [W m ⁻² K ⁻¹]	Requisiti di legge
Parete verticale monostrato	0.630	5.5	1.238	< 0.10 W/(m ² K ¹)
Parete verticale a cassetta	0.466	7.9	0.545	
Partizione tra unità immobiliari	0.519	6.2	0.873	
Partizione interna alle unità immobiliari	0.824	3.1	1.753	< 0.18 W/(m ² K ¹)
Chiusura orizzontale di copertura	0.222	11.8	0.302	
Chiusura orizzontale interpiano	0.435	7.8	0.674	
f_d = fattore di attenuazione, Φ = sfasamento, Y_{IE} = trasmittanza termica periodica				

Tabella 9. Caratteristiche dinamiche dell'involucro opaco (UNI EN ISO 13786)

2 Interventi di riqualificazione importante di primo livello

Nelle condizioni attuali l'involucro edilizio dell'edificio oggetto di studio è privo di isolamento esterno od interno, e pertanto la sua prestazione è scadente. A ciò si aggiunge la presenza di serramenti costituiti da vetro singolo con infissi in alluminio senza taglio termico.

Al fine di favorire la riduzione dei consumi energetici e di ottenere una performance in linea con lo standard nZEB, sono stati ipotizzati degli interventi di ristrutturazione sull'involucro edilizio che prevedono:

- Isolamento delle chiusure verticali esterne tramite cappotto termico con pannelli in fibra di legno;
- Isolamento delle partizioni verticali tra diverse unità immobiliari e verso il vano scala, anche in questo caso tramite pannelli in fibra di legno;
- Isolamento delle partizioni orizzontali (solai) tra diverse unità immobiliari tramite controsoffitto in cartongesso accoppiato a pannello in fibra di legno;
- Isolamento del solaio di copertura tramite pannelli in EPS;
- Sostituzione degli attuali serramenti con nuovi serramenti aventi telai in PVC e vetrocamera con lastra interna basso-emissiva ($\epsilon \leq 0,05$)

Gli interventi previsti si configurano, nel complesso, come *intervento di ristrutturazione importante di primo livello* ai sensi del Decreto 26/06/2015, e garantiscono il raggiungimento dello standard nZEB per tutte le unità abitative presenti nell'edificio. Nei paragrafi successivi si riporta la descrizione dettagliata degli interventi di ristrutturazione proposti; i dettagli tecnici sono disponibili nell'Allegato I.

2.1 Interventi sulle pareti esterne

La chiusura verticale esterna, per via dell'intercapedine d'aria presente al suo interno, si presterebbe all'inserimento di materiale isolante tramite insufflaggio, soluzione pratica e poco dispendiosa. Questa soluzione è stata però scartata perché non in grado di agire efficacemente anche sui ponti termici; si è reputato pertanto opportuno operare tramite un isolamento "a cappotto" in fibra di legno intonacabile dello spessore di 10 cm. Tale intervento, oltre ad abbassare il valore di trasmittanza sotto i limiti consentiti, permette di risolvere buona parte dei ponti termici, che incidono in maniera notevole sulle dispersioni complessive dell'involucro.

Il prodotto individuato a tal fine è FiberTherm Protect® di BetonWood, caratterizzato da elevata densità, elevata resistenza a compressione e marcata idrorepellenza. In particolare, si riscontrano le seguenti caratteristiche:

- Conducibilità termica $\lambda = 0.048 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- Spessore = 100 mm
- Densità $\rho = 265 \text{ kg/m}^3$
- Classe di reazione al fuoco E (ignifugo)

La scelta della fibra di legno come materiale isolante è dettata dalle eccellenti prestazioni acustiche e dalla sua sostenibilità ambientale. Altri materiali idonei alla realizzazione di un cappotto termico, quale ad esempio il polistirene espanso (EPS), pur avendo conducibilità termica più bassa rispetto alla fibra di legno, avrebbero avuto impatto negativo sulla qualità acustica ed ambientale dell'edificio. Si segnala inoltre che, ai fini del calcolo della trasmittanza, la conducibilità termica dichiarata è incrementata del 10%, per tenere conto del possibile peggioramento delle prestazioni in opera.

A finitura dell'intervento di coibentazione a cappotto è inoltre previsto un intonaco di colore chiaro con le seguenti caratteristiche:

- Coefficiente di assorbimento solare = 0.3
- Conducibilità termica $\lambda = 0.3 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- Spessore = 20 mm
- Densità $\rho = 1300 \text{ kg/m}^3$

Per la realizzazione del cappotto termico si è ritenuto di poter mantenere lo strato d'intonaco esistente, che si presenta in buono stato. Ciò permette di risparmiare i notevoli costi da sostenere per la sua rimozione e lo smaltimento in discarica. Su di esso sarà dunque necessario procedere alla stesura di una malta adesiva con funzione di collante (2), su cui verranno posati i pannelli in fibra di legno (3), successivamente fissati tramite tasselli ad espansione di lunghezza non inferiore ai 135 mm (7), in numero non inferiore ai 6 tasselli al m². Sui pannelli in fibra di legno verrà applicato un rasante minerale da 4 mm di spessore ed una rete in fibra di vetro con grammatura circa 160 g/m² (4). Infine, un altro strato di rasante (5) ed il primer pigmentato di colore analogo a quello della finitura ai silossani (6).

In Tabella 10 e Tabella 11 si riporta la nuova stratigrafia delle pareti esterne (per semplicità non sono stati inclusi il primer ed il collante, che hanno effetto trascurabile sul calcolo della trasmittanza). Grazie all'applicazione del cappotto termico, la trasmittanza delle pareti esterne si riduce ad $U = 0,41 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ nel caso delle pareti con singoli blocchi di calcestruzzo, e ad $U = 0,36 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ nel caso delle pareti a cassetta.

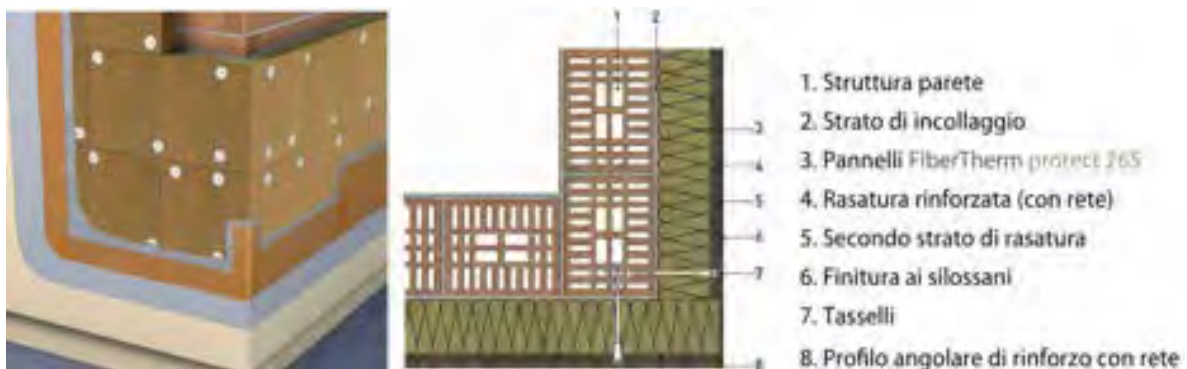


Figura 13. Componenti del sistema cappotto con pannelli in fibra di legno

	s [m]	λ [W/m·K]	R_T [m ² K/W]	C [J/kg·K]	ρ [kg/m ³]
Strato liminare interno			0,13		
INTONACO INTERNO di calce e gesso	0,02	0,70		1010	1400
BLOCCHI DI CALCESTRUZZO	0,25	0,90		840	820
INTONACO calce e cemento	0,03	0,90		710	1800
Pannello in FIBRA DI LEGNO	0,10	0,053		2100	265
INTONACO PLASTICO per cappotto	0,02	0,30		840	1300
Strato liminare esterno			0,04		
Trasmittanza $U = 0,41 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$					

Tabella 10. Chiusure verticali esterne monostrato – nuova stratigrafia (spessore 40 cm)

	s [m]	λ [W/m·K]	R_T [m ² K/W]	C [J/kg·K]	ρ [kg/m ³]
Strato liminare interno			0,13		
INTONACO INTERNO di calce e gesso	0,02	0,70		1010	1400
BLOCCHI DI CALCESTRUZZO	0,12	0,55		840	890
MALTA DI CEMENTO	0,01	1,40		670	2000
INTERCAPEDINE ARIA	0,17	-	0,18	-	-
BLOCCHI DI CALCESTRUZZO	0,12	0,55		840	890
INTONACO calce e cemento	0,03	0,90		710	1800
Pannello in FIBRA DI LEGNO	0,10	0,053		2100	265
INTONACO PLASTICO per cappotto	0,02	0,30		840	1300
Strato liminare esterno			0,04		
Trasmittanza $U = 0,36 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$					

Tabella 11. Chiusure verticali esterne a cassetta – nuova stratigrafia (spessore 55 cm)

2.2 Interventi sulle partizioni verticali

Le partizioni verticali verso ambienti non riscaldati e le partizioni che separano due diverse unità abitative sono anch'esse oggetto d'intervento. Il Decreto "Requisiti Minimi" impone, al fine del raggiungimento dello standard nZEB, che la trasmittanza di tali partizioni non superi il limite di $0.8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

L'intervento ipotizzato in questa sede prevede l'utilizzo della fibra di legno, ma con caratteristiche e modalità di applicazione diverse da quanto previsto per le tamponature esterne. Si utilizzeranno infatti i pannelli FiberTherm Flex® di BetonWood, con densità circa $60 \text{ kg}/\text{m}^3$, accoppiati a lastre in cartongesso da 13 mm. Rispetto ai pannelli FiberTherm Protect®, i FiberTherm Flex® presentano una più bassa conducibilità dichiarata ($\lambda = 0.038 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$), che anche in questo caso sarà maggiorata del 10% ai fini del calcolo della trasmittanza.

I pannelli saranno applicati in maniera differente a seconda che si agisca su una parete divisoria tra unità immobiliari o su una parete di separazione tra unità abitative ed ambienti non climatizzati (vano scala): nel secondo caso si applicheranno 40 mm di isolante dalla parte dell'ambiente non riscaldato (Tabella 12), mentre nel primo caso l'isolante sarà distribuito da ambo i lati con eguale spessore da 20 mm (Tabella 13), in modo da provocare una uguale riduzione di volumetria nei locali delle due unità immobiliari. In entrambi i casi si raggiungerà la trasmittanza $U = 0,62 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Si segnala inoltre come l'intervento proposto comporti un netto miglioramento del potere fonoisolante dei divisori, grazie alle eccellenti proprietà acustiche della fibra di legno.

	s [m]	λ [W/m·K]	R_T [m² K/W]	C [J/kg·K]	ρ [kg/m³]
Strato liminare interno			0,13		
INTONACO INTERNO di calce e gesso	0,02	0,70		1010	1400
BLOCCHI DI CALCESTRUZZO	0,25	0,90		840	820
INTONACO INTERNO di calce e gesso	0,02	0,70		1010	1400
Pannello in FIBRA DI LEGNO	0,04	0,042		2100	60
CARTONGESSO in lastre	0,013	0,25		1000	900
Strato liminare interno			0,13		
Trasmittanza $U = 0,62 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$					

Tabella 12. Partizioni verticali tra unità immobiliari e vano scala – nuova stratigrafia

	s [m]	λ [W/m·K]	R_T [m² K/W]	C [J/kg·K]	ρ [kg/m³]
Strato liminare interno			0,13		
CARTONGESSO in lastre	0,013	0,25		1000	900
Pannello in FIBRA DI LEGNO	0,02	0,042		2100	60
INTONACO INTERNO di calce e gesso	0,01	0,70		1010	1400
BLOCCHI DI CALCESTRUZZO	0,25	0,90		840	820
INTONACO INTERNO di calce e gesso	0,01	0,70		1010	1400
Pannello in FIBRA DI LEGNO	0,02	0,042		2100	60
CARTONGESSO in lastre	0,013	0,25		1000	900
Strato liminare interno			0,13		
Trasmittanza $U = 0,62 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$					

Tabella 13. Partizioni verticali tra le unità immobiliari – nuova stratigrafia

2.3 Interventi sui solai

Anche nel caso della chiusura orizzontale di copertura è stato necessario prevedere un opportuno isolamento termico, al fine di ridurre la trasmittanza. In questo caso, a differenza dei paramenti verticali, si è scelto di applicare uno strato di 5 cm di EPS tipo Knauf Therm Tetto®, di conducibilità dichiarata $\lambda = 0.034 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$; come sempre la conducibilità dichiarata è stata maggiorata del 10% ai fini del calcolo della trasmittanza. La scelta di preferire l'EPS al posto della fibra di legno deriva dal fatto che, per il solaio di copertura, le prestazioni acustiche sono meno rilevanti rispetto alle facciate.

La pavimentazione della copertura esistente è costituita da uno strato di mattonelle in cemento che dovranno essere rimosse, insieme al sottostante massetto, al fine di permettere l'inserimento dello strato isolante. A copertura dei pannelli in EPS verrà posata una guaina impermeabilizzante e quindi verrà realizzato un nuovo massetto in calcestruzzo alleggerito; infine verrà ripristinata la pavimentazione con mattonelle in cemento, con interposizione di malta di allettamento. Come mostrato in Tabella 14, dove per brevità non è riportata la guaina impermeabilizzante, la trasmittanza conseguita è $U = 0,45 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$.

Per quanto riguarda i solai interpiano si è preferito minimizzare l'impatto delle lavorazioni, evitando qualsiasi intervento di demolizione e ricostruzione di massetti e pavimentazioni. Per questo motivo l'isolante sarà installato all'intradosso del solaio, all'interno di un controsoffitto realizzato con lastra di cartongesso da 13 mm (Tabella 15); questo tipo intervento è reso possibile dall'elevata altezza netta dei locali nello stato di fatto. L'isolante utilizzato sarà la fibra di legno del tipo FiberTherm Flex® di BetonWood da 30 mm, con eccellenti proprietà fonoisolanti. La trasmittanza conseguita è $U = 0,71 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$.

	s [m]	$\lambda \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$	$R_T \text{ [m}^2\text{K/W]}$	C [J/kg·K]	$\rho \text{ [kg/m}^3]$
Strato liminare interno (inferiore)			0,10		
INTONACO INTERNO di calce e gesso	0,02	0,70		1010	1400
SOLAIO IN LATERO CEMENTO	0,26	0,74		840	1200
MASSETTO DELLE PENDENZE	0,10	0,66		880	1200
Polistirene espanso (EPS)	0,05	0,037		1250	30
Massetto in calcestruzzo alleggerito	0,05	0,30		1000	1400
MALTA CEMENTIZIA	0,01	1,40		670	2000
MATTONELLE IN CEMENTO	0,02	1,40		880	2000
Strato liminare esterno (superiore)			0,04		
Trasmittanza $U = 0,45 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$					

Tabella 14. Chiusura orizzontale di copertura – nuova stratigrafia

	s [m]	$\lambda \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$	$R_T \text{ [m}^2\text{K/W]}$	C [J/kg·K]	$\rho \text{ [kg/m}^3]$
Strato liminare interno (inferiore)			0,10		
CARTONGESSO in lastre	0,013	0,25		1000	900
Pannello in FIBRA DI LEGNO	0,03	0,042		2100	60
INTONACO INTERNO di calce e gesso	0,02	0,70		1010	1400
SOLAIO IN LATERO CEMENTO	0,22	0,67		840	1000
MASSETTO in cls	0,05	0,66		880	1200
MALTA CEMENTIZIA	0,01	1,40		670	2000
MATTONELLE IN MARMO	0,01	3,00		700	2700
Strato liminare interno (superiore)			0,10		
Trasmittanza $U = 0,71 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$					

Tabella 15. Chiusura orizzontale intermedia – nuova stratigrafia

2.4 Interventi sui serramenti

Le chiusure trasparenti, sebbene permettano di garantire un adeguato livello di illuminazione naturale all'interno dei locali, contribuiscono significativamente alla dispersione termica invernale ed al surriscaldamento estivo. Gli attuali serramenti saranno dunque sostituiti con nuovi serramenti con telaio in PVC e vetrocamera 4-20-4 riempita con argon e lastra interna basso-emissiva ($\epsilon \leq 0,05$). Le trasmittanze così ottenute, riportate in Tabella 16, sono notevolmente inferiori rispetto allo stato di fatto.

	Esistenti [W m ⁻² K ⁻¹]	Nuovi [W m ⁻² K ⁻¹]
F01	6.12	1.65
F02	6.12	1.63
F03	6.12	1.63

Tabella 16. Trasmittanza dei serramenti (confronto tra stato di fatto e nuovi serramenti).

L'intervento sui serramenti riguarda anche la sostituzione delle schermature mobili e degli oscuranti. Nello stato di fatto erano presenti tende bianche interne e avvolgibili esterni in legno; al loro posto saranno previsti nuovi avvolgibili in legno a bassa permeabilità, simulati costantemente aperti durante il giorno e chiusi durante la notte, e veneziane bianche esterne, poste a filo con la superficie vetrata e abbassate solo durante l'estate, al posto delle tende interne.

La presenza delle schermature mobili esterne (veneziane bianche) consente di ridurre l'aliquota di radiazione solare in ingresso, migliorando le prestazioni dell'involucro durante l'estate senza alterare il coefficiente di scambio termico per trasmissione. Per quanto riguarda invece gli oscuranti (persiane), essi contribuiscono ad abbassare il valore della trasmittanza in regime notturno, quando risultano chiuse; in questa circostanza, dalla parte esterna del serramento si ha una resistenza termica aggiuntiva legata alla camera d'aria tra il serramento e la persiana stessa.

3 Simulazione dinamica dell'edificio

La simulazione dinamica delle prestazioni energetiche degli edifici (Building Energy Performance Simulation) è una disciplina che, nata negli anni '80 nelle sedi accademiche, ha avuto nell'ultimo decennio importanti sviluppi. Attualmente i software commerciali di simulazione energetica degli edifici più avanzati si basano infatti su un calcolo dinamico, e consentono di studiare il comportamento termo-energetico dell'edificio con step temporali orari o addirittura inferiori, a differenza del calcolo quasi-stazionario che mira a determinare una performance media mensile o annuale.

Grazie al ridotto step temporale ed alla possibilità di inserire dati di input molto dettagliati, i software di calcolo dinamico riescono ad approssimare il comportamento reale dell'edificio meglio di quanto sia possibile con un calcolo quasi-stazionario, comunemente utilizzato ai fini della Certificazione Energetica. Essi inoltre riescono a tener conto in modo rigoroso delle caratteristiche inerziali dei materiali da costruzione, e risultano particolarmente efficaci qualora si vogliano effettuare indagini per la valutazione del comfort termico in edifici passivi o non dotati di impianti di climatizzazione.

3.1 Il modello di calcolo dinamico: EnergyPlus

In questo studio il software utilizzato per eseguire le analisi energetiche dinamiche è EnergyPlus (versione 8.6), programma gratuito open-source sviluppato dall'US Department of Energy (DOE). La modellazione geometrica dell'edificio da sottoporre a simulazione dinamica con EnergyPlus può essere effettuata tramite SketchUp, software per la modellazione architettonica tridimensionale distribuito da Trimble. Grazie al plug-in gratuito Open Studio, anch'esso sviluppato dall'U.S. Department of Energy, il modello geometrico può essere quindi importato su EnergyPlus, includendo anche informazioni sulle caratteristiche dell'involucro edilizio.

L'interfaccia di Energy-Plus (Figura 14) è organizzata in tre parti:

- in alto a sinistra le schede attivate, in cui è possibile impostare i parametri necessari alla simulazione;
- in basso gli input riguardanti la singola scheda selezionata;
- sulla destra la descrizione del campo selezionato ed i suggerimenti per la sua compilazione.

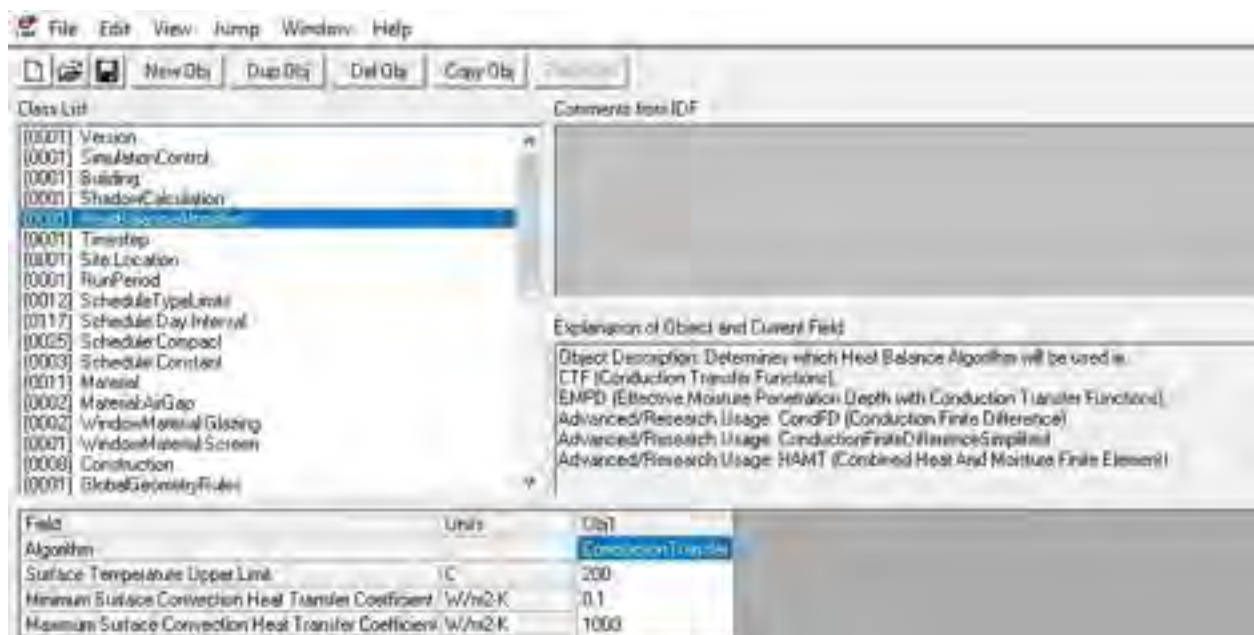


Figura 14. Interfaccia grafica di Energy-Plus

L'edificio è costituito da sette piani fuori terra ad uso residenziale; ai fini del calcolo sono stati modellati e simulati interamente solo il primo piano, un piano tipo e l'ultimo piano. La procedura di simulazione prevede innanzitutto l'individuazione dei confini delle zone termiche. Ciascuna zona termica corrisponde in linea generale ad un vano, caratterizzato da specifiche condizioni al contorno:

- i locali del piano primo confinano dal lato inferiore con ambiente non climatizzato;
- i locali del piano tipo con ambienti ad uguale temperatura, e pertanto le superfici orizzontali di separazione sono valutate come adiabatiche;
- i locali dell'ultimo piano con l'esterno.

Rispetto alla suddivisione degli spazi descritta al paragrafo 1.2.1, sono state apportate delle leggere modifiche alla geometria dei locali per semplificarne la modellazione e la simulazione: in primo luogo sono state allineate le partizioni, quindi sono stati inglobati in un unico ambiente i locali caratterizzati da uguali o simili destinazioni d'uso e condizioni al contorno (ad esempio sono state accorpate le camere da letto B e C delle unità abitative U2 e U3). Nel complesso, le zone termiche simulate presentano superfici e volumi riportate in Tabella 17.

	Superficie [m ²]		Volume [m ³]	
	Netta	Lorda	Netto	Lordo
Unità 1	46.4	57.1	139.2	197
Unità 2	84.9	105	254.7	362.25
Unità 3	84.4	104.5	253.2	360.52
Unità 4	46.4	57.1	139.2	197

Tabella 17. Superfici lorde e volumi delle zone termiche

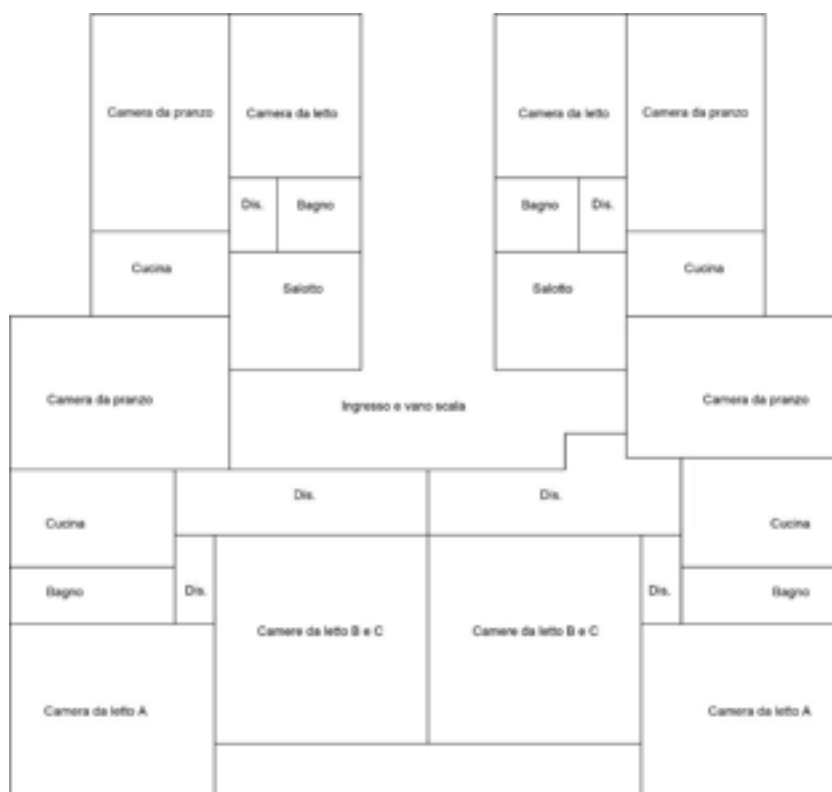


Figura 15. Suddivisione degli ambienti ai fini della modellazione su SketchUp.

Una volta definiti i confini delle zone termiche, queste sono state modellate su SketchUp (Figura 16) ed opportunamente rinominate. A ciascuna superficie è associata una condizione al contorno: nel caso in cui

avvenga il contatto con un'altra superficie (tipico caso di pareti o solai condivisi tra due o più ambienti) il comando *"Surface Matching"* esegue in automatico l'accoppiamento delle condizioni al contorno. Il plug-in consente, inoltre, di inserire le stratigrafie di tutte le strutture modellate e di verificare che le informazioni siano state lette correttamente dal programma; ad esempio tramite il comando *"Render by Boundary Condition"* si assegna, ad ogni superficie, un colore identificativo della condizione al contorno che la caratterizza.

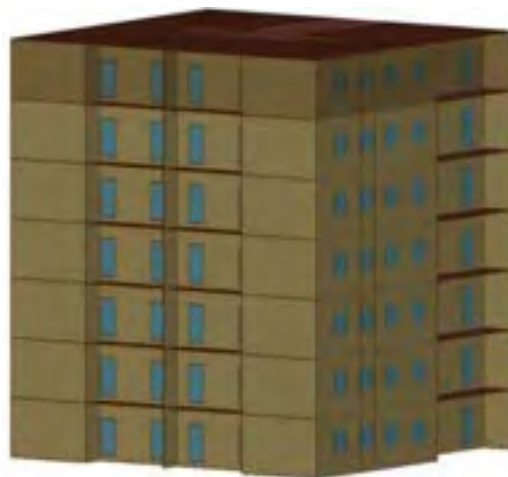


Figura 16. Modello 3D dell'edificio

3.2 *Input del programma*

Energy-Plus consente di ottenere informazioni circa il fabbisogno di energia per la climatizzazione estiva ed invernale e di valutare il comfort termico interno ai locali, espresso in termini di temperatura operativa, in funzione del profilo di utilizzazione degli ambienti e in base alle caratteristiche stesse dell'edificio. Preliminare all'ottenimento di questi dati è l'impostazione, all'interno di opportune schede, di tutti i dati relativi a:

- Caratteristiche delle chiusure verticali opache;
- Caratteristiche delle chiusure verticali trasparenti;
- Caratteristiche delle chiusure orizzontali intermedie e di copertura;
- Carichi endogeni associati all'illuminazione artificiale e all'occupazione degli utenti;
- Profilo di ventilazione e infiltrazione;
- Condizioni climatiche esterne

Nel seguito si procederà alla descrizione dei dati impostati per la simulazione dell'edificio oggetto di studio nel suo stato attuale. Per la simulazione dell'edificio in seguito alla ristrutturazione importante di primo livello, saranno semplicemente modificati i dati riguardanti la stratigrafia dell'involucro, coerentemente con quanto descritto al Capitolo 2.

Preliminarmente alla descrizione delle impostazioni è opportuno introdurre il concetto di *"Schedule: Compact"*. Tramite questa funzione del software è possibile impostare dei profili orari personalizzati, da applicare per esempio al numero di occupanti presenti all'interno dei locali, al funzionamento degli apparecchi o al tasso di ventilazione garantito tramite l'apertura delle finestre.

L'impostazione di un profilo orario prevede la definizione dei mesi dell'anno, dei giorni e delle ore in cui la grandezza da controllare assume opportuni valori, o frazioni di un valore nominale.

La Tabella 18 mostra, per esempio, il profilo di apertura/chiusura degli avvolgibili applicati alle finestre esposte a nord: per tutto l'anno (Through: 12/31) e per ogni giorno (For: AllDays) gli avvolgibili sono abbassati (valore 1) dalle 00.00 alle 7.00, aperti (valore 0) dalle 7.00 alle 21.00 e ancora abbassati dalle 21.00 alle 24.00.

Field	Obj
Name	AVVOLGIBILE NORD
Schedule Type	Fraction
Field 1	Through: 12/31
Field 2	For: AllDays
Field 3	Until: 7:00
Field 4	1
Field 5	Until: 21:00
Field 6	0
Field 7	Until: 24:00
Field 8	1

Tabella 18. Schedule Compact - esempio

Gli output restituiti dal software possono essere molteplici. In questa sede si è scelto di valutare esclusivamente l'andamento delle temperature operative all'interno dei diversi appartamenti nel periodo compreso da Maggio ad Ottobre, con l'obiettivo di verificare come le strategie progettuali necessarie per raggiungere lo standard di nZEB possano influenzare il comfort termico durante la stagione estiva.

3.3 Chiusure opache e trasparenti

Le caratteristiche dei materiali opachi sono racchiuse nella scheda *Material* (Tabella 19). Qui è possibile impostare, per ciascun materiale, il valore delle principali proprietà termofisiche (conducibilità, densità, calore specifico), nonché la rugosità (necessaria per il calcolo del coefficiente convettivo), il coefficiente di assorbimento nel solare e l'emissività termica. Queste ultime grandezze sono pertinenti solo per i materiali di finitura superficiale, quali gli intonaci e le piastrelle.

In regime dinamico è inoltre fondamentale assegnare la corretta posizione ai materiali all'interno dell'involucro edilizio; perciò, individuati e descritti tutti i materiali presenti negli elementi di fabbrica, questi vanno organizzati per ricostruire le stratigrafie esistenti. A tal fine, nella Scheda *Construction* (Tabella 20) vengono impostate tutte le stratigrafie presenti: ciascuno dei "Layer" appartenenti ad una stratigrafia corrisponde al nome di uno dei materiali impostati nella scheda "Material".

Field	Units	Obj1	Obj 2
Name		BLOCCHI cemento	BLOCCHI cemento
Roughness		Rough	Rough
Thickness	m	0.12	0.25
Conductivity	W/mK	0.55	0.902
Density	Kg/m ³	890	820
Specific Heat	J/kgK	840	840
Thermal Absorptance		0.9	0.9
Solar Absorptance		0.7	0.7
Visible Absorptance		0.7	0.7

Tabella 19. Scheda Material - esempio

Field	Obj1	Obj 2
Name	PARETE interna	SOLAIO base
Outside Layer	INTONACO tramezzi	INTONACO calce e gesso
Layer 2	BLOCCHI cemento e pomice (8x50x25)	SOLAIO laterocemento intermedio
Layer 3	INTONACO tramezzi	MASSETTO sottofondo
Layer 4		MALTA di cemento
Layer 5		PAVIMENTAZIONE in marmo

Tabella 20. Scheda Construction - esempio

Le informazioni sulle chiusure trasparenti, invece, sono gestite dalle seguenti schede:

- *Window Material Glazing* (per i vetri);
- *Window Property Frame and Divider* (per i telai);
- *Window Material Screen e Shading Control* (per le schermature mobili).

Le prestazioni energetiche dei vetri dipendono da diversi fattori, tra cui la loro capacità di trasmettere il calore per conduzione e la loro trasparenza alla radiazione solare. In particolare, la radiazione solare incidente viene in parte riflessa dal vetro, in parte assorbita e in parte trasmessa verso l'ambiente interno. I coefficienti che quantificano questi tre processi sono rispettivamente denominati *reflectance*, *absorptance* e *transmittance*. Essi dipendono dalle caratteristiche del vetro e dall'angolo di incidenza della radiazione solare, e la loro somma è pari all'unità.

I serramenti presenti nello stato di fatto sono costituiti da vetro semplice dello spessore di quattro millimetri. Come indicato in Tabella 21, la conducibilità termica assegnata al vetro è $0.9 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$; altra proprietà dei vetri è l'emissività, che per i vetri semplici vale 0.837.

Inoltre, per un vetro semplice la *transmittance* (t) tende ad 1, mentre *absorptance* (a) e *reflectance* (r) sono molto basse. I valori impiegati ai fini della simulazione sono i seguenti (vedere Tabella 21):

$$t = 0.86 \quad a = 0.06 \quad r = 0.08$$

Le caratteristiche dei telai, invece, sono impostate nella scheda *Window Property Frame and Divider* (Tabella 22). In questo caso gli infissi sono costituiti da telaio in alluminio senza taglio termico, al quale viene attribuita una trasmittanza termica pari a $7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Nella scheda è inoltre possibile specificare le dimensioni dei telai e degli eventuali divisori orizzontali e verticali presenti, oltre al coefficiente di assorbimento solare del materiale che costituisce il telaio.

Field	Units	Obj1
Name		VETRO SEMPLICE
Optical Data Type		SpectralAverage
Thickness	m	0.004
Solar Transmittance at Normal Incidence	-	0.86
Front Side Solar Reflectance at Normal Incidence	-	0.08
Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence	-	0
Visible Transmittance at Normal Incidence	-	0.898
Front Side Visible Reflectance at Normal Incidence	-	0.081
Back Side Visible Reflectance at Normal Incidence	-	0
Infrared Transmittance at Normal Incidence	-	0
Front Side Infrared Hemispherical Emissivity	-	0.837
Back Side Infrared Hemispherical Emissivity	-	0.837
Conductivity	W/mK	0.9
Solar Diffusing		No

Tabella 21. Scheda Window Material Glazing

Field	Units	Obj1	Obj 2
Name		ANTA SINGOLA	DOPPIA ANTA
Frame Width	m	0.07	0.07
Frame Outside Projection	m	0.05	0.05
Frame Inside Projection	m	0.016	0.016
Frame Conductance	W/m ² K	7	7
Ratio of Frame-Edge Glass Conductance to Center Of Glass Conductance		1	1
Frame Solar Absorptance		0.7	0.7
Frame Visible Absorptance		0.7	0.7
Frame Thermal Hemispherical Emissivity		0.9	0.9
Divider Type		DividerLite	DividerLite
Divider Width	m	0	0.07
Number of Horizontal Dividers		0	0
Number of Vertical Dividers		0	1
Divider Outside Projection	m	0.05	0.05
Divider Inside Projection	m	0.016	0.016
Divider Conductance	W/m ² K	7	7
Ratio of Divider-Edge Glass Conductance to Center Of Glass Conductance		1	1
Divider Solar Absorptance		0.7	0.7
Divider Visible Absorptance		0.7	0.7
Divider Thermal Hemispherical Emissivity		0.9	0.9

Tabella 22. Scheda *Window Property Frame and Divider*

Infine, le ultime due schede riguardano le caratteristiche delle schermature mobili. La scheda *Window Material Screen* (Tabella 23) racchiude le proprietà geometriche ed energetiche degli elementi schermanti, mentre la scheda *Window Property Shading Control* (Tabella 24) consente di definire il tipo di schermatura, la sua posizione e la strategia di controllo. Sebbene siano presenti sia degli avvolgibili esterni sia delle tende interne, nelle simulazioni dello stato di fatto viene considerato esclusivamente il contributo degli avvolgibili.

Al fine della definizione della strategia di controllo da richiamare nella scheda *Window Property Shading Control*, nella scheda Compact sono impostati i profili di apertura e chiusura degli avvolgibili (Tabella 18). Sebbene non sia possibile affermare con certezza quali siano le ore del giorno in cui gli utenti tengono chiuse o aperte le schermature, è stato ipotizzato un profilo di apertura in funzione del diagramma solare e, di conseguenza, della radiazione solare che raggiunge ogni superficie. In particolare, le schermature a nord sono aperte tutti i giorni dell'anno dalle 07:00 alle 21:00 per facilitare l'ingresso della luce naturale; quelle a sud per tutto il periodo invernale come quelle a nord, per massimizzare gli apporti solari gratuiti, mentre nella stagione estiva (1 giugno – 30 settembre) rimangono chiuse tra le 11:00 e le 16:00, per evitare un eccessivo surriscaldamento dei locali. Le schermature dei serramenti sulla facciata est sono aperte durante l'inverno dalle 7:00 alle 21:00, mentre d'estate sono aperte solo dopo le 11:00; infine quelle dei serramenti ad ovest seguono il profilo già descritto per il periodo invernale, e durante l'estate rimangono chiuse dalle 14:00 in poi.

Field	Units	Obj1
Name		Avvolgibile
Reflected Beam Transmittance Accounting Method		ModelAsDiffuse
Diffuse Solar Reflectance		0.2
Diffuse Visible Reflectance		0.2
Thermal Hemispherical Emissivity	-	0.9
Conductivity	W/mK	0.1
Screen Material Spacing	m	0.05
Screen Material Diameter	m	0.045
Screen to Glass Distance	m	0.025

Tabella 23. Scheda *Window Material Screen*

Field	Units	Obj1
Name		AVVOLGIBILE sud
Shading Type		Exterior Screen
Construction with Shading Name		FINESTRA con oscurante
Shading Control Type		OnifScheduleAllows
Schedule Name		AVVOLGIBILE SUD
Setpoint	W/m ² or deg	200
Shading Control Is Scheduled		YES
Glare Control is Active		NO
Type of slat angle Control for Blinds		FixedSlatAngle

Tabella 24. Scheda *Window Property Shading Control*

A tutte le superfici, opache o trasparenti, modellate su SketchUp e lette dal programma, devono infine essere assegnate le condizioni al contorno. Alle pareti esterne vengono associate le condizioni al contorno di tipo *Outdoors*; alle pareti interne confinanti con altri ambienti aventi uguali temperatura interna vengono normalmente attribuite le condizioni al contorno di tipo *Adiabatic*.

Diverso è il caso delle superfici verso ambienti non climatizzati di cui non si conosca con esattezza la temperatura (per esempio il vano scala o il piano terra). In questo caso viene utilizzata l'opzione *OtherSide Coefficient* (Tabella 25), che consente di attribuire alla temperatura dell'ambiente non climatizzato un valore variabile in funzione, per esempio, delle temperatura esterna e delle temperatura dei locali climatizzati, secondo degli opportuni coefficienti di pesatura. In Tabella 25, ad esempio, viene attribuito un peso del 70 % alla temperatura esterna e del 30 % alla temperatura dei locali climatizzati.

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		SEMINTERRATO	INGRESSO
Combined Convective/Radiative Film Coefficient	W/m ² K	6	6
Constant Temperature	°C		
Constant Temperature Coefficient	-		
External Dry-Bulb Temperature Coefficient	-	0.7	0.7
Ground Temperature Coefficient	-		
Wind Speed Coefficient	-		
Zone Air Temperature Coefficient	-	0.3	0.4

Tabella 25. Scheda *Surface Property Other Side Coefficient*

3.4 Ventilazione naturale e permeabilità dell'involucro

La ventilazione dei locali costituisce uno strumento indispensabile per garantire la qualità dell'aria negli ambienti di vita. L'introduzione di aria esterna può avvenire in maniera volontaria, ad esempio tramite l'apertura delle finestre, oppure in maniera involontaria attraverso fessure, giunti, infissi e cavedi: in quest'ultimo caso è più corretto utilizzare il termine *infiltrazioni*. In ogni caso, in presenza di aperture, avventizie o appositamente predisposte, si stabilisce un flusso d'aria uscente (o entrante) provocato dal gradiente di pressione tra ambiente esterno e ambiente interno.

L'entità delle infiltrazioni dipende, in generale, dalla qualità dell'involucro: se questo ha una bassa permeabilità, cioè una buona tenuta all'aria, si avrà un ingresso d'aria piuttosto basso con notevoli benefici per l'edificio e per gli occupanti, in quanto si evita il deterioramento dei materiali, si riduce la trasmissione del rumore e si assicura un ottimale funzionamento dei sistemi di ventilazione controllata. In realtà, però, valori nulli delle infiltrazioni sono impossibili da raggiungere e in ogni caso è auspicabile avere un minimo di ricambi d'aria per permettere di rinnovare l'aria interna, diluire gli inquinanti e ridurre l'umidità relativa.

Sia in caso di ventilazione naturale che d'infiltrazioni, è possibile valutare le portate d'aria che attraversano l'involucro edilizio secondo l'equazione seguente, in cui n è il numero di ricambi orari e V_n il volume netto dei locali:

$$Q = n \cdot V_n$$

Secondo questo approccio è necessario conoscere a priori il valore dei ricambi orari n . In tal senso, è stato ipotizzato un numero di ricambi d'aria costante $n = 0.3 \text{ h}^{-1}$ durante l'inverno, mentre in regime estivo è stata ipotizzata una soluzione differente, che prevede un valore di base pari a $n = 0.5 \text{ h}^{-1}$ o l'eventuale aumento dei ricambi orari ($n = 2 \text{ h}^{-1}$) nelle stanze da letto durante le ore serali (dalle 20:00 alle 06:00).

È bene tuttavia sottolineare che, in assenza di sistemi di ventilazione meccanica controllata, le portate di rinnovo garantite dalla ventilazione naturale saranno in realtà variabili nel tempo, e dipenderanno dal comportamento degli occupanti (apertura delle finestre) e dalle condizioni al contorno (velocità del vento e temperatura esterna). Le simulazioni preliminari condotte sotto le ipotesi precedenti saranno quindi affiancate da simulazioni più raffinate, in cui si valuterà l'impatto delle strategie di ventilazione sul comfort termico degli occupanti.

In questa nuova serie di simulazioni la portata d'aria immessa attraverso le aperture di dimensioni non trascurabili ($> 10 \text{ mm}$) saranno calcolate tramite la formula seguente:

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}$$

Il *coefficient of discharge* vale tipicamente $C_d = 0.61$; la differenza di pressione Δp tra l'interno e l'esterno è calcolata dinamicamente da EnergyPlus in funzione della velocità e della direzione del vento incidente sulle diverse facciate. Per quanto riguarda la sezione A delle aperture è invece possibile impostare per ciascuna finestra la percentuale di superficie aperta ed attribuire eventualmente a questo parametro dei profili orari.

Le infiltrazioni attraverso le aperture di dimensione limitata possono essere invece calcolate tramite il metodo dell'*Effective Leakage Area*, secondo la relazione:

$$Q = 3.6 \cdot A_L \cdot \sqrt{a \cdot \Delta T + b \cdot v^2}$$

Secondo tale approccio tutte le fonti di infiltrazione d'aria vengono concentrate in un'unica apertura fittizia di area A_L , detta appunto "*effective leakage area*". I coefficienti a (*stack coefficient*) e b (*wind coefficient*) tengono conto rispettivamente dell'azione delle forze di galleggiamento e dell'azione del vento. Questi due parametri dipendono da diversi fattori, quali l'altezza dell'alloggio rispetto alla quota del terreno e le caratteristiche del sito (Tabella 26 e Tabella 27). Coerentemente, il Wind Coefficient utilizzato è diverso in funzione del piano simulato; lo Stack Coefficient dipende dallo sviluppo verticale della singola unità, e poiché nel nostro caso tutte si sviluppano su un solo piano il valore da utilizzare è sempre 0.000145.

Infine, i valori di Effective Leakage Area sono stati determinati in modo che l'entità delle infiltrazioni, in ciascun locale, corrisponda ad una permeabilità $n_{50} = 6 \text{ h}^{-1}$, come suggerito dalla norma UNI 11300/1 per edifici residenziali con permeabilità medio-alta.

WIND COEFFICIENT			
CLASSE	QUOTA DEI LOCALI		
	Primo piano	Secondo piano	Terzo piano (o oltre)
I (assenza di ostruzioni)	0.000319	0.000420	0.000494
II (poche ostruzioni)	0.000246	0.000325	0.000382
III (prossimità di edifici di simile altezza)	0.000174	0.000231	0.000271
IV (prossimità di edifici di altezza maggiore)	0.000104	0.000137	0.000161
V (aree urbane ad alta densità)	0.000032	0.000042	0.000049

Tabella 26. Valori di letteratura per il Wind Coefficient (b)

STACK COEFFICIENT	
Un piano	0.000145
Altezza dei locali Due piani	0.000290
Tre piani	0.000435

Tabella 27. Valori di letteratura per lo Stack Coefficient (a)

3.5 Carichi endogeni

I carichi endogeni di un locale dipendono dalle sue condizioni di occupazione, ed in particolare dal numero di persone e dalla potenza elettrica assorbita dai sistemi di illuminazione artificiale e da tutte le apparecchiature elettriche presenti. In EnergyPlus questi contributi possono essere impostati tramite le schede “People” e “Lights”, oltre alla scheda “Compact” in cui è possibile definire opportuni profili di variazione temporale per le grandezze rilevanti.

Negli edifici residenziali la presenza e la modalità di utilizzazione delle apparecchiature elettriche rappresentano variabili molto aleatorie e impossibili da prevedere con precisione; nelle simulazioni sono stati quindi ipotizzati due diversi profili di utilizzo, replicati per tutte le unità dell’edificio, ma distinguendo comunque fra trivani e quadrivani, occupati rispettivamente da due e quattro persone, e tenendo conto delle differenti condizioni di utilizzo tra i giorni feriali e festivi.

L’obiettivo delle ipotesi introdotte è quello di emulare in maniera attendibile le abitudini di una famiglia (quadrivani) e di una coppia di studenti (trivani); ogni locale ha un profilo orario diverso.

In particolare, nei trivani le stanze da letto raggiungono picchi di utilizzazione durante la notte, la cucina durante le prime ore del mattino e della sera, così come la sala da pranzo, ed infine i locali secondari come bagno e disimpegno sono considerati sempre vuoti, in quanto l’utilizzo è frequente ma limitato a intervalli di tempo ridotti. Per i giorni festivi lo stato di occupazione è differente: in base all’utenza è infatti verosimile che durante i fine settimana o le festività gli alloggi rimangano vuoti. I profili orari dell’illuminazione ricalcano quelli dell’occupazione, a meno di locali come salotto o cucina, in cui è prevista una quota minima costante di utilizzo di apparecchiature elettroniche come elettrodomestici.

I quadrivani sono invece gli alloggi più grandi, occupati da quattro persone. Rispetto ai trivani è presente una seconda stanza da letto, che sarà parzialmente utilizzata anche durante il pomeriggio. In cucina si raggiunge la massima occupazione durante le prime ore della mattina e la sera, con valori medi (due persone) durante il pomeriggio (Figura 17); analoga impostazione vale per la sala da pranzo. Anche in questo caso per i locali di servizio si prevede un profilo di utilizzo costantemente nullo. Durante i giorni festivi è probabile che le stanze da letto siano utilizzate qualche ora in più durante la mattina e rimangano vuote durante la restante parte della giornata, mentre più alta è la permanenza nei locali della zona giorno (Figura 18).

L’utilizzo di lampade e altre apparecchiature elettriche è coerente con i profili di occupazione ipotizzati per i locali; in aggiunta è garantita una percentuale minima di potenza elettrica installata in cucina anche nelle ore notturne. Il valore di picco, corrispondente ad una frazione di utilizzo unitaria, è pari a 4 W/m².

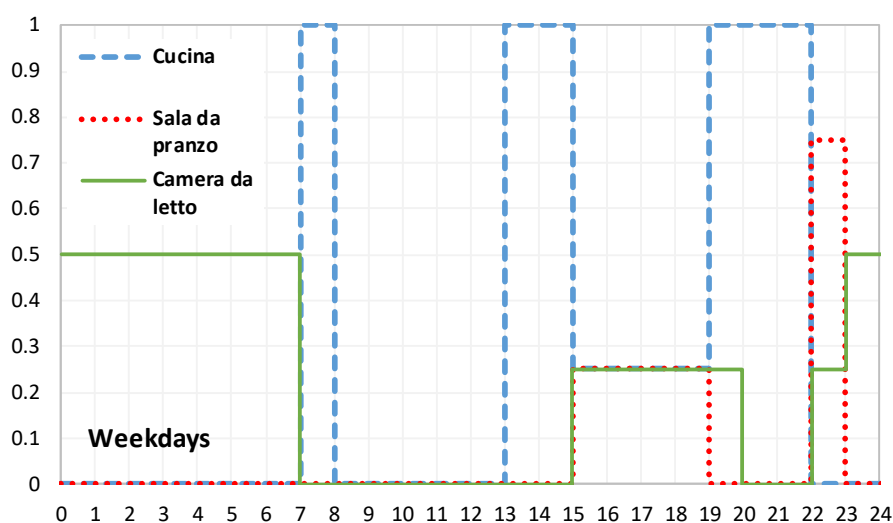


Figura 17. Profili orari di occupazione per i giorni feriali, riferiti ad alcuni locali dei quadrivani

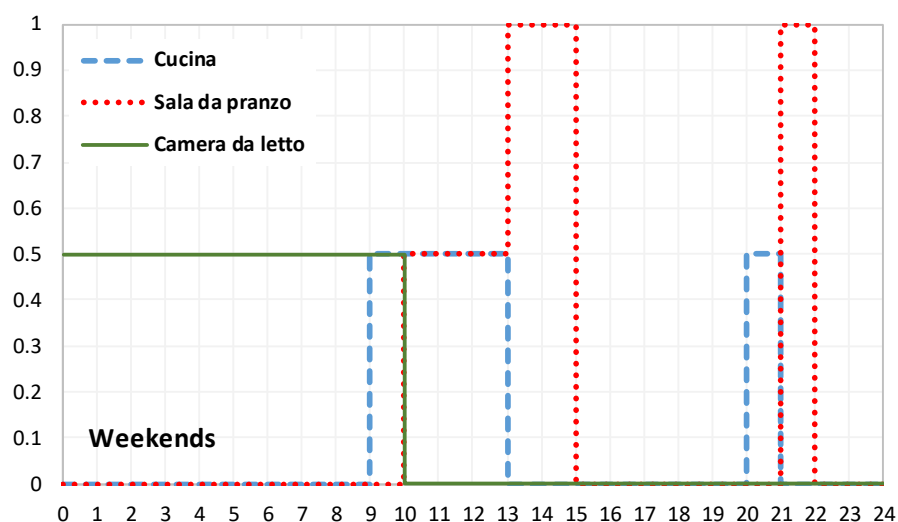


Figura 18. Profili orari di occupazione per il weekend, riferiti ad alcuni locali dei quadrivani

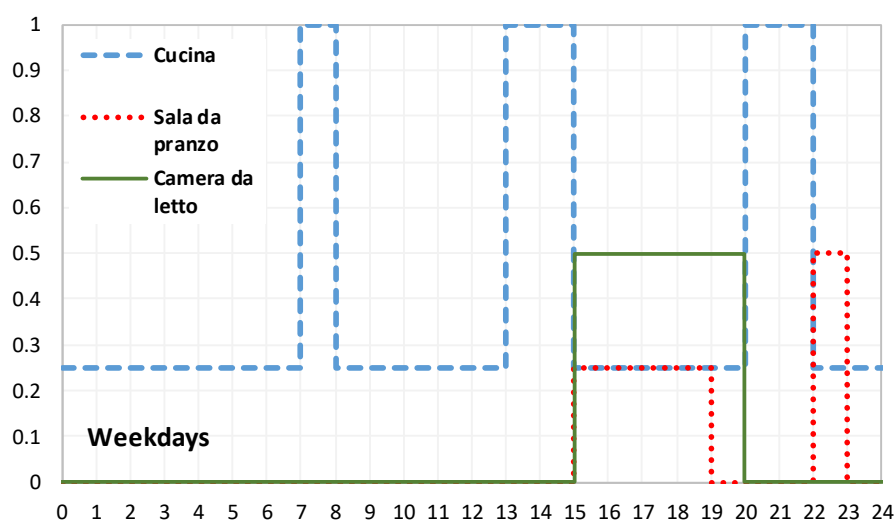


Figura 19. Profili orari di illuminazione per i giorni feriali, riferiti ad alcuni locali dei quadrivani

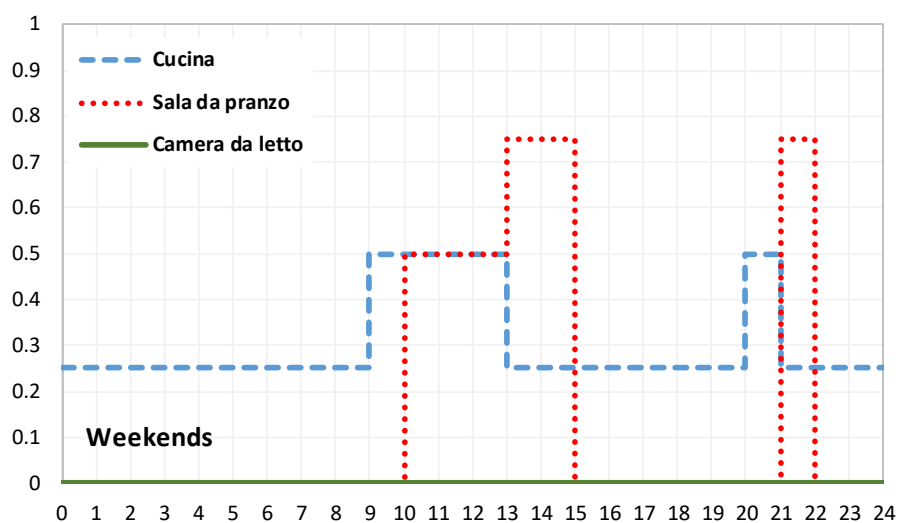


Figura 20. Profili orari di illuminazione per il weekend, riferiti ad alcuni locali dei quadrivani

3.6 Dati climatici

Le simulazioni dinamiche richiedono l'utilizzo di dati climatici disponibili con frequenza oraria: insieme alle proprietà intrinseche degli edifici, è soprattutto l'affidabilità di questi dati climatici ad influenzare i risultati delle simulazioni. I dati climatici da utilizzare per le simulazioni sono normalmente disponibili in opportuni database, e fanno riferimento a valori statistici ricavati da misure sperimentali condotte su lungo periodo presso stazioni meteorologiche situate nelle periferie. Ad esempio, per la città di Catania il database a corredo di EnergyPlus contiene un file climatico relativo all'aeroporto di Fontanarossa, stazione di riferimento per il Servizio meteorologico dell'Aeronautica Militare.

La stazione meteorologica è dunque collocata in ambiente rurale: qui le caratteristiche climatiche sono però completamente diverse da quelle che possono verificarsi all'interno della città, dove normalmente si raggiungono temperature più elevate. Questo fenomeno è noto come *effetto isola di calore* (indicato anche come UHI, dall'acronimo del termine inglese *Urban Heat Island*), ed è determinato principalmente dalle caratteristiche termiche e radiative dei materiali che costituiscono le superfici urbane (in primo luogo, asfalto e cemento), per i quali l'assorbimento della radiazione solare è particolarmente rilevante.

Anche le attività umane che si concentrano nelle città e nelle loro immediate vicinanze contribuiscono al surriscaldamento delle aree urbane, attraverso le attività industriali, il traffico veicolare, gli impianti di riscaldamento e raffrescamento. Un altro aspetto di primaria importanza è rappresentato dalla vegetazione: tramite processi di evapotraspirazione, questa permette di sottrarre calore all'aria esterna e di mitigare gli effetti del surriscaldamento urbano.

Il fenomeno dell'isola di calore, inducendo delle variazioni sulle condizioni climatiche esterne, influenza in maniera rilevante la valutazione del comfort termico negli edifici, soprattutto nella stagione estiva. Per questo motivo è fondamentale eseguire simulazioni dinamiche a partire da dati climatici che siano rappresentativi delle condizioni di temperatura nei centri urbani; solitamente, però, nella progettazione degli edifici non si tiene conto dell'effetto isola di calore, a seguito della mancanza di tali informazioni o di software che possano fornirle.

Solo negli ultimi anni sono stati definiti degli strumenti in grado di tener conto di questo effetto. Uno di questi è *Urban Weather Generator* (UWG), sviluppato nel 2012 al Massachusetts Institute of Technology. UWG è un tool basato su un algoritmo che predice in modo efficace la temperatura dell'aria nell'ambiente urbano utilizzando le informazioni meteorologiche misurate nelle stazioni climatiche di riferimento e convertendole in un altro file climatico, in base ad informazioni che riguardano le tipologie di edifici presenti, la densità edilizia e la vegetazione presente nell'area considerata.

Tramite UWG è stato quindi simulato l'isolato in cui si trova l'edificio oggetto di studio, riportando nel programma le seguenti caratteristiche:

- Altezza media degli edifici = 15 m
- Superficie laterale degli edifici/area del sito = $1.06 \text{ m}^2/\text{m}^2$;
- Densità edilizia = $0.35 \text{ m}^2/\text{m}^2$;
- Calore sensibile associato ad attività antropiche = $20 \text{ W}/\text{m}^2$;
- Albedo del manto stradale = 0.2;
- Albedo della vegetazione = 0.25 (presente durante tutto l'anno);
- Percentuale di copertura della vegetazione = 8 %;
- Tipi edilizi presenti = 100 % edifici residenziali di media altezza.

Al fine di considerare l'effetto isola di calore nel dettaglio, è necessario fornire inoltre ad UWG indicazioni sulle caratteristiche dei materiali che compongono i fabbricati. Data la complessità degli algoritmi impiegati e la difficoltà incontrate nell'inserire tutte le informazioni nel dettaglio, si è preferito ricorrere a stratigrafie preimpostate. Sebbene tali ipotesi introducano una certa approssimazione nei risultati, esse consentono comunque di stimare in modo affidabile l'entità della variazione della temperatura esterna.

I risultati dell'operazione di "adattamento" dei dati climatici sono di seguito commentati facendo riferimento alla differenza tra i valori orari di temperatura del file climatico "corretto" ed i valori riferiti

all'aeroporto di Catania Fontanarossa. Questa differenza, che è possibile definire *intensità dell'isola di calore*, si attesta su valori medi mensili compresi tra 1 °C e 2 °C, ma i valori massimi possono invece superare i 7 °C (Figura 21). I profili orari dell'intensità dell'isola di calore per un giorno tipo dei vari mesi dell'anno sono invece riportati in Figura 22: qui si evince che il fenomeno dell'UHI è particolarmente evidente nelle ore serali e notturne, a causa dell'energia solare accumulata durante il giorno dalle superfici costruite e poi rilasciata convettivamente nelle ore a seguire.

Come già evidenziato in altri studi, è quindi possibile affermare che i file climatici normalmente utilizzati per le simulazioni energetiche degli edifici sottostimano le effettive temperature dell'aria nelle zone urbane: dunque l'operazione preliminare condotta con UWG è indispensabile per ottenere risultati più accurati.

Coerentemente, il file climatico ottenuto con UWG è stato utilizzato come input per le simulazioni dinamiche oggetto di questo studio.

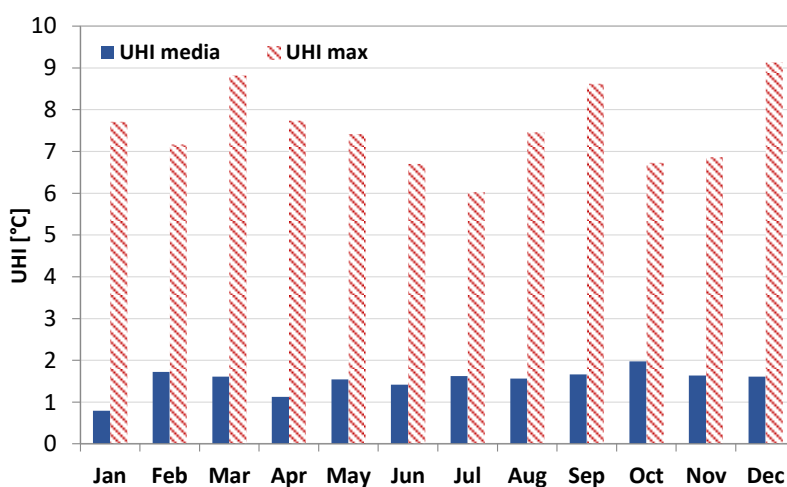


Figura 21. Valori medi e massimi mensili per l'intensità dell'isola di calore.

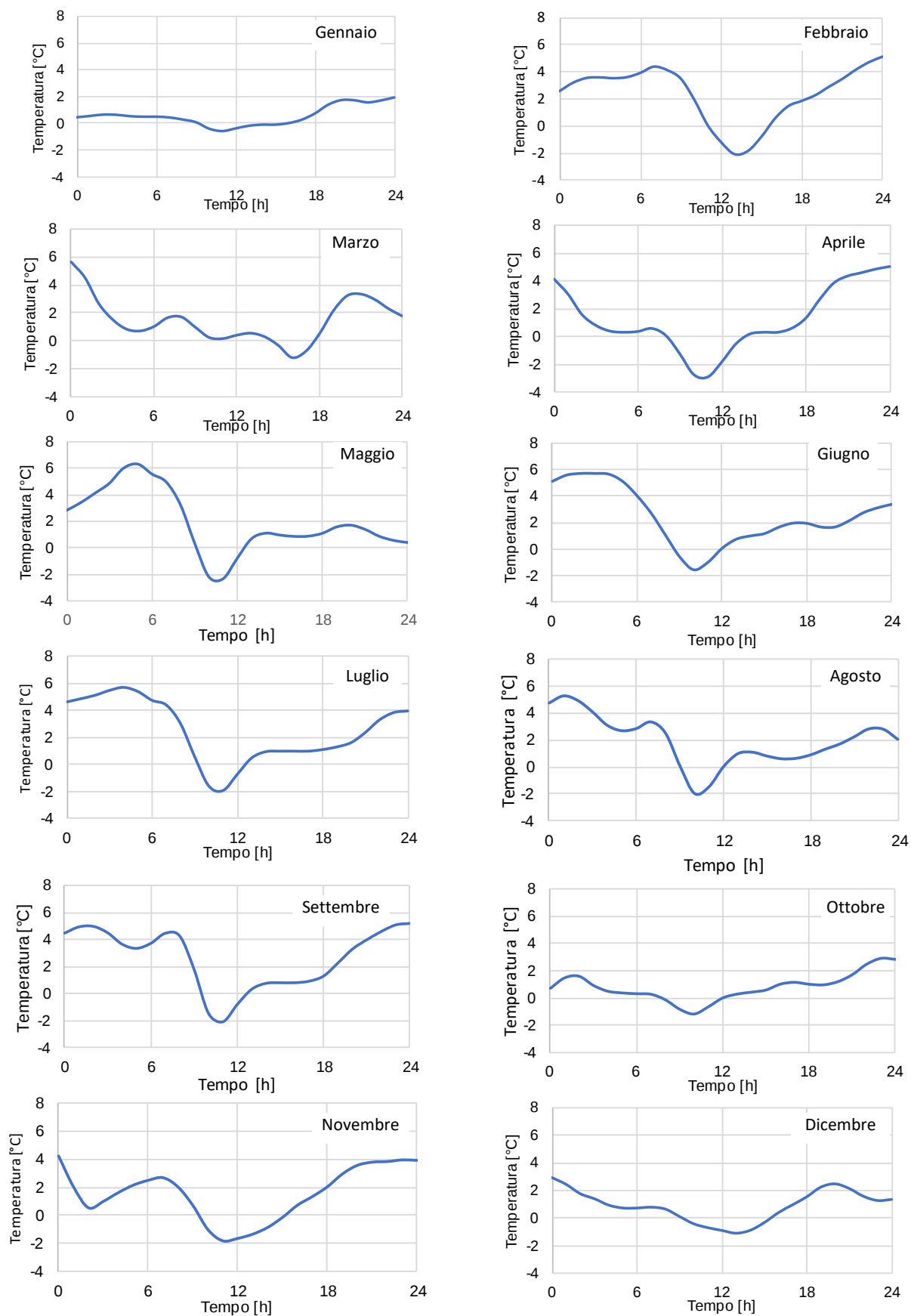


Figura 22. Profili orari dell'intensità dell'isola di calore per un giorno tipo di tutti i mesi dell'anno

4 Analisi di sensitività e validazione

Preliminarmente alle simulazioni dinamiche volte a valutare il comfort termico nell'edificio oggetto di studio è stata effettuata un'analisi della sensitività del modello ad alcuni dati di input di cui non si ha certezza, e che è stato quindi necessario ipotizzare al momento di definire le impostazioni del modello.

In particolare, tra i dati sottoposti ad analisi di sensitività si segnalano:

- temperatura degli ambienti non climatizzati posti al piano terra (paragrafo 4.1);
- potenza elettrica delle lampade e delle altre apparecchiature elettriche (paragrafo 4.2);
- dati climatici (paragrafo 4.3)
- presenza di eventuali ostruzioni esterne (paragrafo 4.4).

Infine, nel paragrafo 4.5 si riportano i risultati di una campagna di misure sperimentale condotta in uno degli appartamenti al quarto piano. I valori rilevati della temperatura interna sono stati confrontati con i risultati delle simulazioni dinamiche, al fine di verificare l'affidabilità del modello e di quantificarne l'eventuale imprecisione.

4.1 Temperatura degli ambienti al piano terra

Il piano terra, con destinazione d'uso differente da quella residenziale, ospita garage e botteghe. Esso non può quindi essere considerato un ambiente climatizzato. Inoltre, per semplicità, si è scelto di non includere i locali del piano terra nel modello geometrico costruito su SketchUp: è quindi necessario introdurre delle ipotesi riguardanti la temperatura di questi locali, così da definire le condizioni al contorno per i solai del primo piano.

EnergyPlus consente di definire la temperatura di un ambiente non climatizzato in funzione di dati noti, quali la temperatura esterna e degli ambienti climatizzati adiacenti: la temperatura di un locale non climatizzato può essere espressa come funzione lineare di queste. In tal senso sono state introdotte due ipotesi, per comprendere come la scelta del profilo della temperatura nei locali al piano terra influenzi le temperature operative dei locali del primo piano.

La prima ipotesi prevede che la temperatura degli ambienti non climatizzati dipenda in misura maggiore dalla temperatura esterna, secondo la seguente equazione, in cui T_{NC} rappresenta la temperatura del piano terra (non climatizzato), mentre T_E e T_A sono la temperatura esterna e quella interna:

$$T_{NC} = 0.7 \cdot T_E + 0.3 \cdot T_A$$

Nella seconda ipotesi la temperatura T_{NC} è invece calcolata come media aritmetica tra la temperatura esterna T_E e la temperatura interna T_A :

$$T_{NC} = 0.5 \cdot T_E + 0.5 \cdot T_A$$

La Figura 23 mostra l'andamento della temperatura operativa in un giorno particolarmente caldo in due locali appartenenti al primo piano, alla luce delle due ipotesi discusse in precedenza. Aver supposto una temperatura degli ambienti non climatizzati più vicina a quella dei locali climatizzati (seconda ipotesi) comporta l'aumento della temperatura operativa durante l'estate, con variazioni dell'ordine di 0.2 °C rispetto alla prima ipotesi. In assenza di riscontri sperimentali, la prima ipotesi sembra più plausibile ed è stata mantenuta per le simulazioni successive.

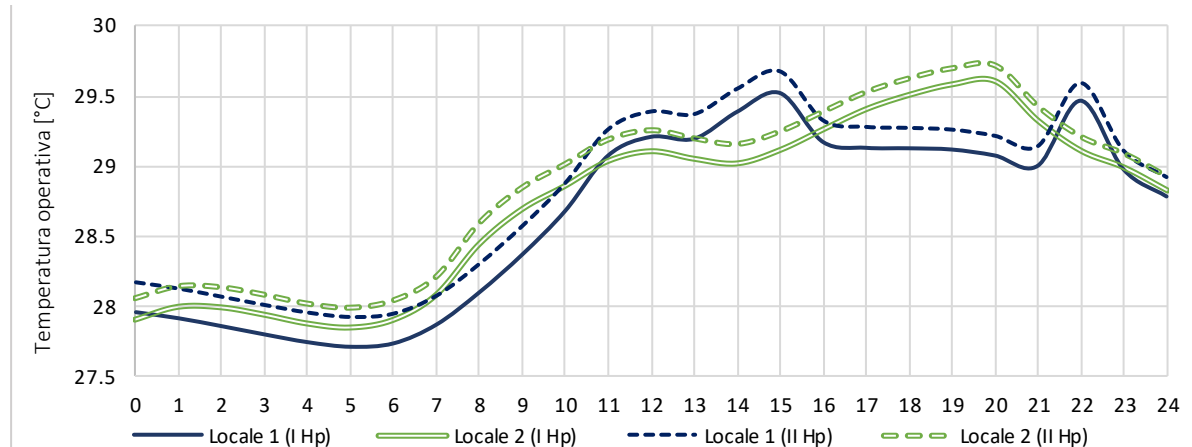


Figura 23. Andamento della temperatura operativa al variare dell'*Other Side Coefficient*

4.2 Potenza elettrica installata

In presenza di utenze eterogenee non è possibile ricostruire con esattezza il profilo di utilizzazione di lampade e altre apparecchiature elettriche. Pertanto, anche questo dato è stato sottoposto ad analisi di sensitività, variando l'entità della potenza elettrica installata nei diversi locali.

In prima battuta è stato ipotizzato un valore massimo di 4 W/m^2 per tutti i locali. Verosimilmente, però, gli ambienti più utilizzati e dotati di un numero elevato di apparecchiature richiedono potenze maggiori: la seconda ipotesi prevede quindi l'aumento della potenza installata fino a 6 W/m^2 . In Figura 24 si riportano i risultati ottenuti nei due casi, con riferimento a due locali rappresentativi dei piani intermedi.

L'aumento della potenza elettrica (seconda ipotesi) genera un incremento della temperatura operativa pari a circa 0.1 °C . Poiché entrambe le ipotesi forniscono risultati molto simili, si è scelto di mantenere la prima ipotesi. Ulteriori approfondimenti hanno riguardato il valore dei carichi endogeni associati alla sola occupazione dei locali, aumentando arbitrariamente il numero degli utenti presenti. I risultati ricalcano quelli ottenuti nel caso di aumento della potenza elettrica installata, con variazioni quasi impercettibili sull'andamento della temperatura operativa.

Da questi risultati emerge che le condizioni interne sono principalmente determinate dalle scarse prestazioni dell'involucro edilizio, più che dal livello di occupazione o dalle apparecchiature elettriche presenti all'interno degli alloggi.

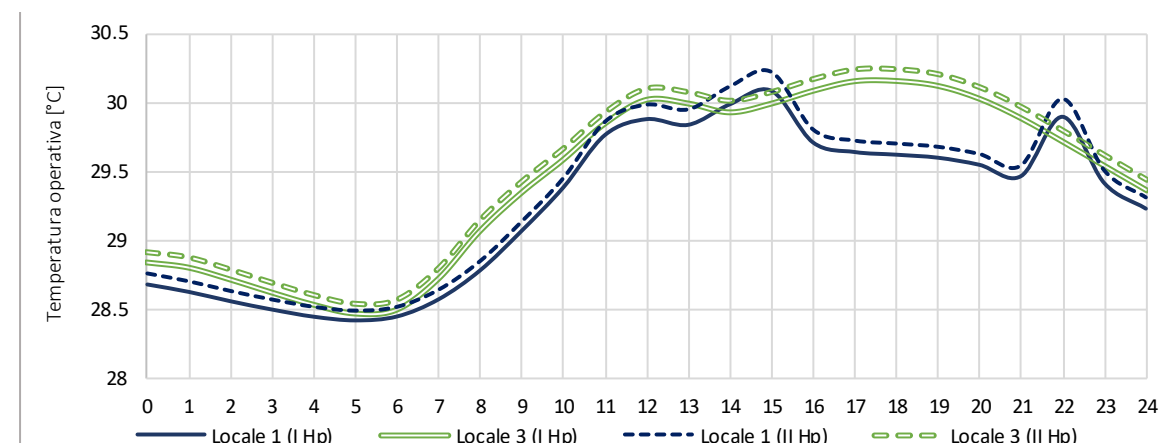


Figura 24. Andamento della temperatura al variare della potenza elettrica installata

4.3 Ostruzioni esterne

L'edificio in esame fa parte di un complesso edilizio inserito all'interno di un contesto fortemente urbanizzato: per questo motivo, le sue prestazioni energetiche potrebbero essere influenzate da eventuali ostruzioni esterne.

Per avere risultati quanto più conformi alla realtà sono state rappresentate, nel modello 3D costruito su SketchUp, tutte le superfici che possono proiettare la loro ombra sull'edificio analizzato. Data l'elevata distanza degli edifici a sud e l'altezza ridotta di quelli a est, l'unico edificio in grado di proiettare la sua ombra sull'immobile esaminato è quello collocato ad ovest. Di seguito si presentano i risultati ottenuti in assenza (prima ipotesi) ed in presenza (seconda ipotesi) dell'edificio ombreggiante (Figura 25 e Figura 26).

L'ostruzione provoca variazioni non trascurabili della temperatura operativa dei locali nelle unità abitative che si affacciano sul fronte ovest (U1 e U2); infatti, per via dell'ombra proiettata dall'edificio su questi alloggi, la temperatura operativa raggiunge valori più bassi anche di 1 °C, soprattutto al primo piano. Data la forte influenza delle ostruzioni, nelle simulazioni queste saranno considerate in modo rigoroso.

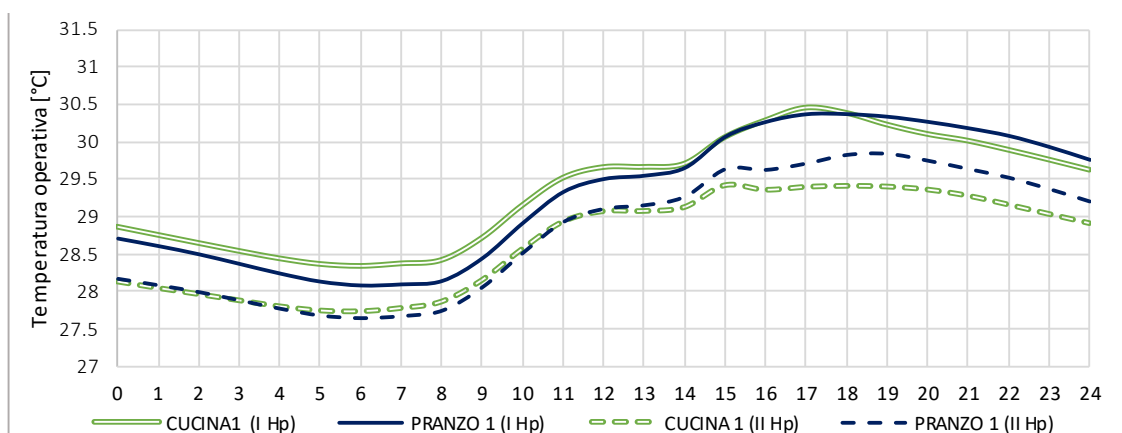


Figura 25. Andamento della temperatura operativa in presenza di ostruzioni (primo piano)

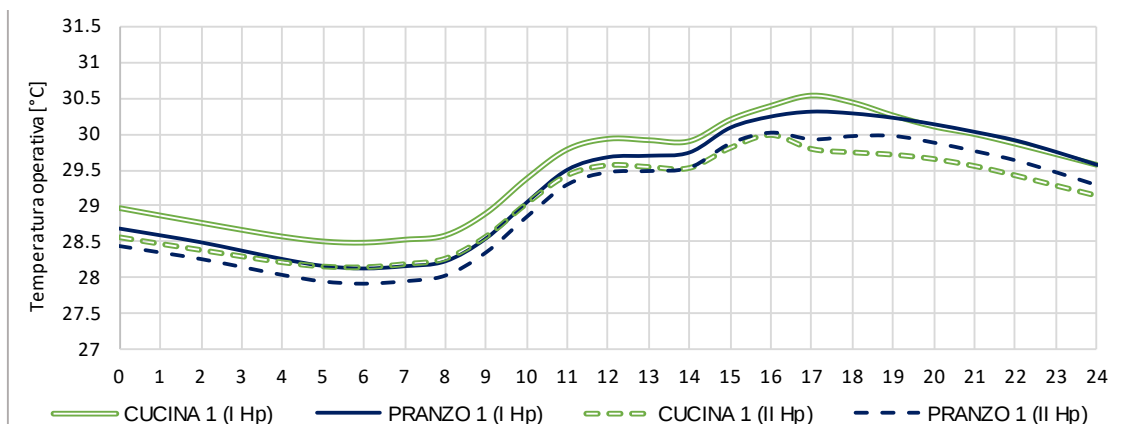


Figura 26. Andamento della temperatura operativa in presenza di ostruzioni (piano tipo)

4.4 Influenza dei dati climatici

L'effetto isola di calore descritto al paragrafo 3.6 implica variazioni considerevoli delle temperature esterne: ciò influenzerà significativamente gli scambi termici tra interno ed esterno. Per questo motivo sono stati confrontati gli esiti delle simulazioni effettuate utilizzando i dati climatici derivanti dalla stazione meteorologica di Catania Fontanarossa (prima ipotesi) e quelli modificati con UWG (seconda ipotesi).

I risultati, riportati in Figura 27 - Figura 29, suggeriscono che un valore più alto della temperatura esterna provoca una maggiore temperatura operativa interna, con aumenti anche di 1 °C.

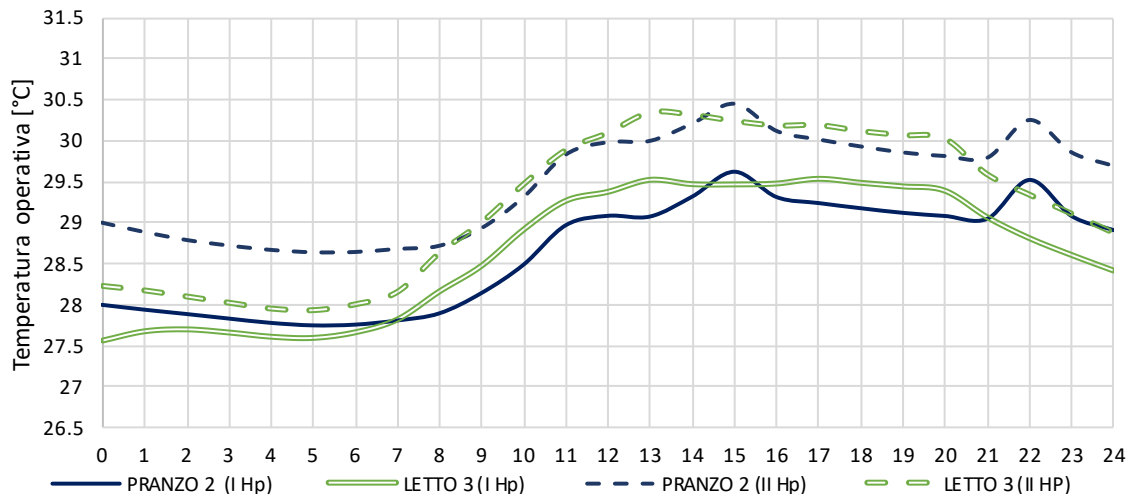


Figura 27. Andamento della temperatura operativa in funzione dei dati climatici (primo piano)

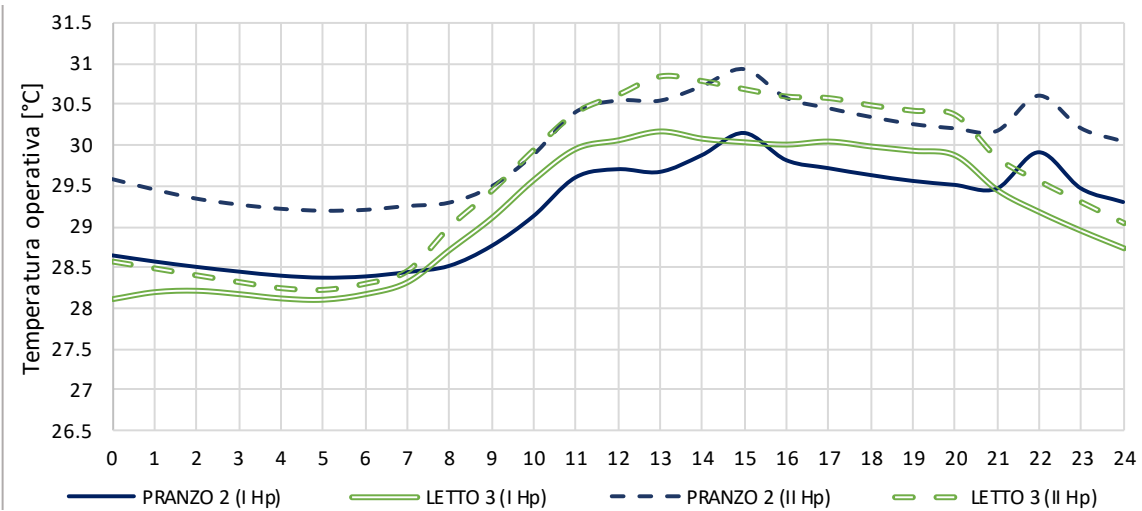


Figura 28. Andamento della temperatura operativa in funzione dei dati climatici (piano tipo)

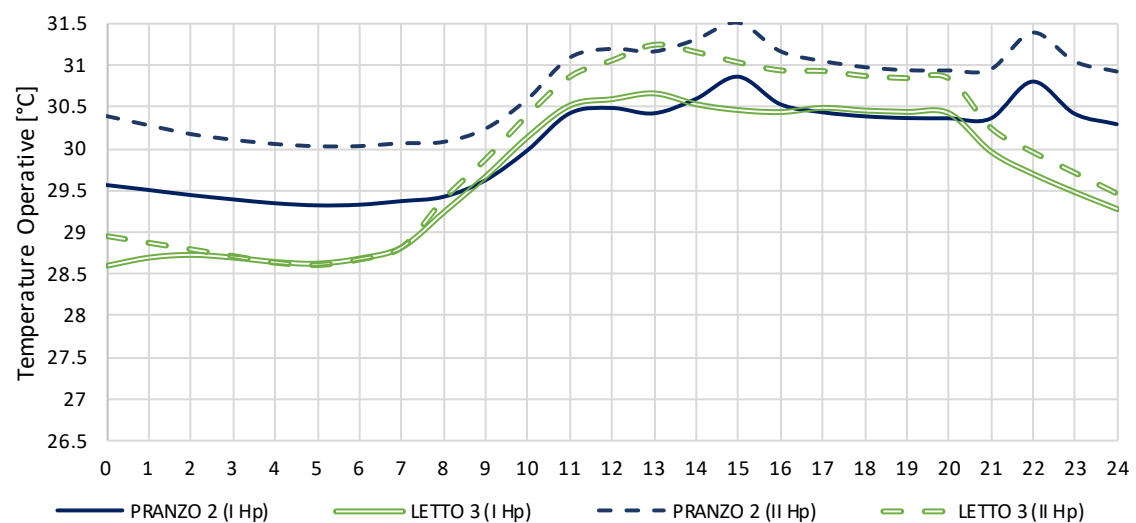


Figura 29. Andamento della temperatura operativa in funzione dei dati climatici (ultimo piano)

In conclusione, le analisi di sensitività hanno dimostrato la necessità di descrivere con esattezza le condizioni al contorno dell'edificio da simulare al fine di ottenere risultati più accurati; al contrario, le caratteristiche intrinseche dell'edificio possono essere affette da un certo grado di approssimazione. Ciò è vero particolarmente nel caso di edifici non isolati e fortemente influenzati dalle forzanti esterne, per cui è determinante avere informazioni dettagliate riguardo all'ambiente esterno in cui l'edificio è collocato.

Per tali ragioni, tutte le simulazioni saranno eseguite utilizzando i dati climatici ricavati dal tool UWG per l'area urbana in cui è sito l'edificio, e tenendo conto dell'edificio ombreggiante posto ad ovest del fabbricato.

4.5 Validazione del modello

Al fine di verificare l'affidabilità del modello per la simulazione dinamica dell'edificio è stata eseguita una validazione fondata su una campagna di misure sperimentali. In particolare, sono stati acquisiti i valori della temperatura dell'aria a bulbo secco all'interno di due locali dell'appartamento U3 al quarto piano (Figura 34), gentilmente messo a disposizione dal proprietario. L'appartamento risultava non occupato, in quanto sfritto, nei giorni della campagna di misure (dal 14 al 19 settembre 2018).

Le misure nel punto A sono state eseguite tra il 14 ed il 16 settembre 2018, mentre le misure nel punto B hanno avuto luogo nei tre giorni a seguire. La sonda per la misura della temperatura interna è una sonda IAQ della TESTO, con risoluzione di 0.1 °C e precisione pari a ± 0.5 °C (Figura 30). I valori misurati dalla sonda sono stati memorizzati da una centralina multicanale TESTO 480; questa è stata utilizzata anche per registrare l'andamento della temperatura esterna, misurata da una termocoppia Pt100 posta all'esterno (Figura 31).

Le acquisizioni sono state eseguite con passo temporale di 5 minuti. La strumentazione utilizzata è di proprietà del Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Elettronica ed Informatica dell'Università di Catania.



Figura 30. Posizioni utilizzate per la misura della temperatura interna al quarto piano



Figura 31. A sinistra: sonda per la misura della temperatura interna (punto B). A destra: centralina di acquisizione

In Figura 32 si riportano i valori della temperatura esterna acquisiti dalla centralina, che testimoniano come, nei giorni considerati, le condizioni climatiche siano state serene, con temperature tipiche della stagione estiva per un centro urbano sito in zona climatica B, ma relativamente moderate. Le temperature dell'aria esterna acquisite dalla centralina sono state quindi sovrascritte nel file climatico da utilizzare per la simulazione dinamica, al fine di condurre le simulazioni con le reali condizioni al contorno.

Le simulazioni dinamiche sono state condotte in assenza di impianti di climatizzazione e secondo le impostazioni già descritte al Capitolo 3. Il contributo dei carichi endogeni è stato però annullato, coerentemente con le condizioni di misura. Inoltre, poiché le finestre sono state mantenute chiuse durante le misure, è stato annullato anche il contributo della ventilazione. Infine, gli avvolgibili sono stati mantenuti costantemente aperti, sia nella realtà sia nelle simulazioni.

I profili temporali della temperatura interna restituiti dalle simulazioni sono stati quindi confrontati con i valori misurati nei due locali (Figura 33). Le curve di temperatura previste dalle simulazioni presentano una dinamica meno marcata rispetto ai profili reali, e non riescono a descrivere con esattezza i picchi di temperatura diurni e i minimi notturni. Nel complesso, comunque, l'esito è senz'altro soddisfacente: le simulazioni descrivono con sufficiente dettaglio l'evoluzione della temperatura, presentando uno scarto istantaneo raramente superiore a 0.5 °C, cioè all'incertezza dello strumento di misura.

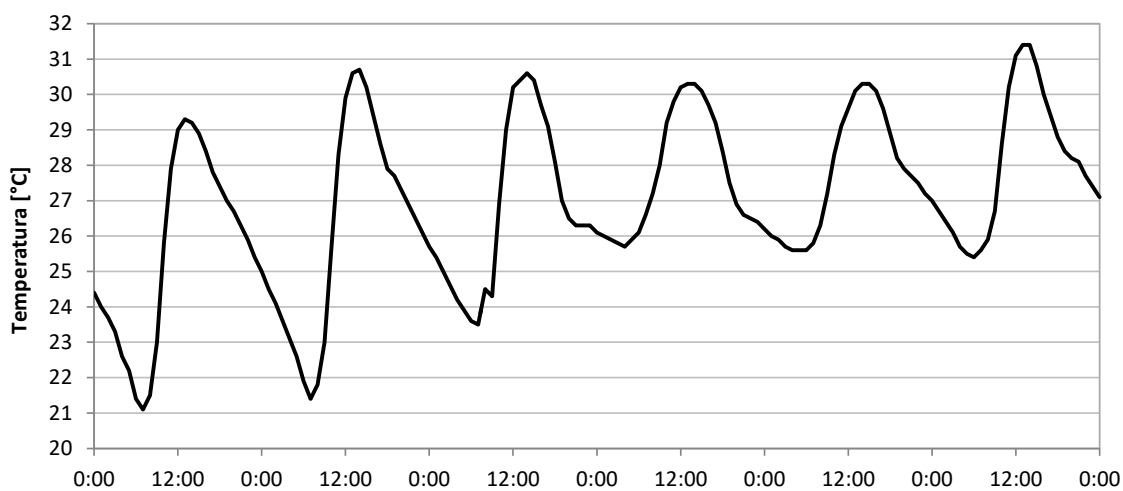


Figura 32. Valori della temperatura esterna rilevati dal 14 al 19 settembre.

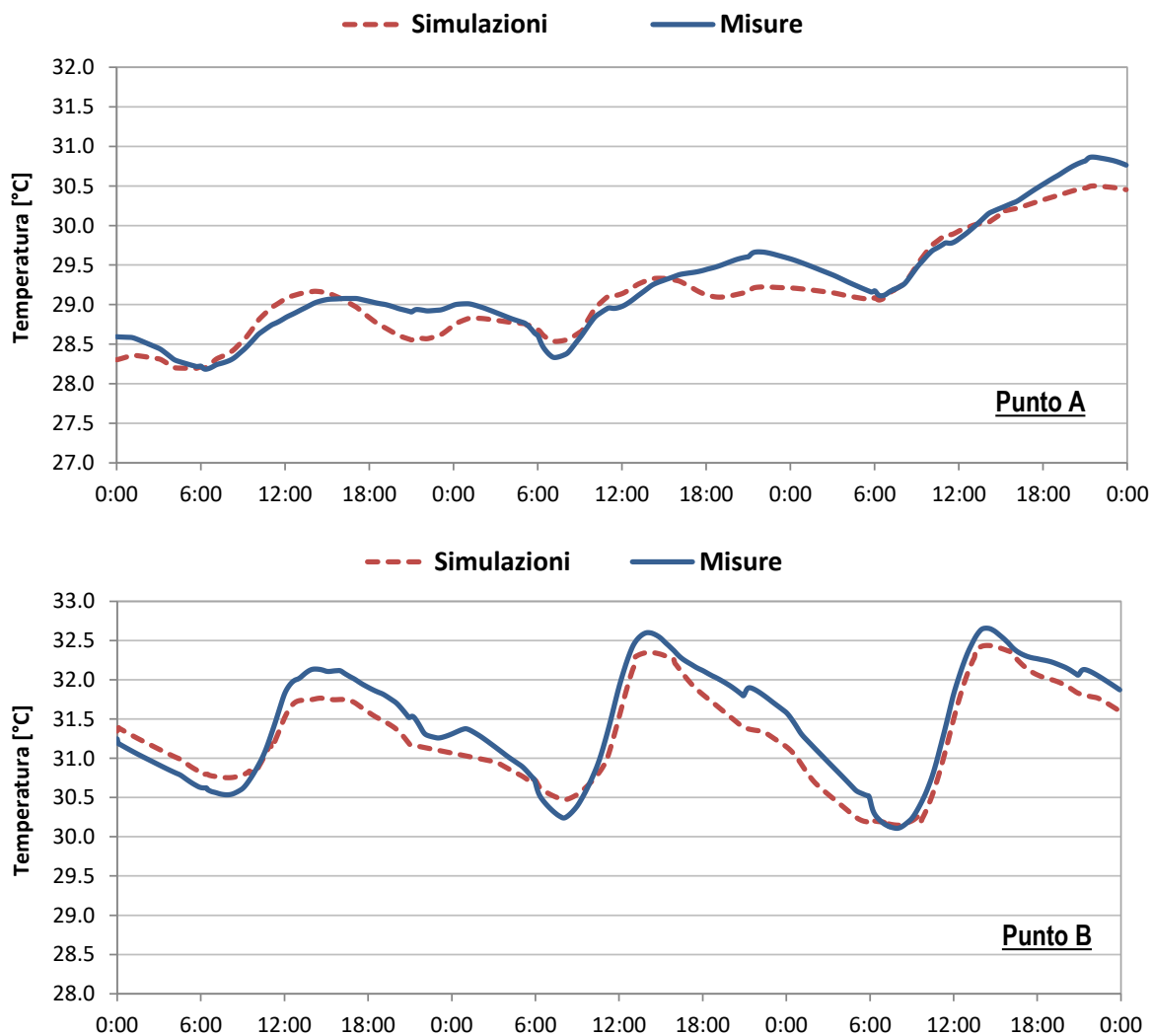


Figura 33. Temperatura interna a bulbo secco: confronto tra valori misurati e simulati
(Punto A: 14-16 settembre; Punto B: 17-19 settembre)

L'esito positivo della validazione testimonia dunque la capacità del modello numerico di descrivere la risposta dinamica dell'edificio alle forzanti esterne. Partendo da questa base, sarà poi possibile introdurre nelle simulazioni altre variabili, quali i carichi endogeni: la capacità di EnergyPlus nel simulare correttamente l'effetto dei carichi sensibili generati all'interno dei locali è comunque ampiamente testimoniata in letteratura.

5 La valutazione del comfort termico

Il benessere termoigrometrico o *thermal comfort* è definito dall'American Society of Heating Ventilation and Air-conditioning Engineers (ASHRAE) come “*quel particolare stato della mente che esprime soddisfazione con l'ambiente circostante*”.

Gli studi condotti in letteratura hanno evidenziato come in edifici residenziali con scadenti condizioni di comfort termoigrometrico il rischio di malattie polmonari sia molto alto; le indagini condotte su edifici per uffici dimostrano inoltre che il discomfort termoigrometrico crea un significativo abbattimento del grado di attenzione e del rendimento.

Per la valutazione del comfort termoigrometrico esistono diversi modelli, basati su aspetti fisiologici e comportamentali e su analisi statistiche, in modo da tener conto della diversa sensibilità dei soggetti coinvolti. I modelli ad oggi più utilizzati per valutare il comfort termico sono:

- modello di Fanger
- modello adattivo

Il modello di Fanger è lo standard principale cui si rifanno le principali norme tecniche. Esso deriva da studi statistici condotti in laboratorio e dalla soluzione di bilanci termici applicati al corpo umano; è idoneo per ambienti condizionati meccanicamente. Il modello adattivo è più recente e deriva da studi statistici condotti in edifici reali; è meno restrittivo rispetto al modello di Fanger, e permette di ottenere comfort a costi energetici inferiori. Il modello adattivo si applica ad ambienti senza condizionamento meccanico.

Nel paragrafo seguente si analizzano più nel dettaglio i due approcci, definendo le basi metodologiche per le valutazioni analitiche che saranno presentate nel Capitolo 6.

5.1 Il modello di Fanger

Il modello di comfort più noto è quello sviluppato dal Prof. P. Ole Fanger negli anni Sessanta presso l'International Centre for Indoor Environment and Energy della Technical University of Denmark.

Fanger partì dal presupposto che l'omeotermia, cioè la capacità di mantenere costante la temperatura corporea, è condizione necessaria affinché un essere umano possa percepire una sensazione di comfort termico. Il corpo umano reagisce agli stimoli esterni per garantire questa condizione; quando però gli stimoli esterni sottopongono l'organismo a stress, inducendolo ad attuare meccanismi di termoregolazione quali la sudorazione o un'intensa vasocostrizione, non è più possibile parlare di comfort termico.

Procedendo alla scrittura del bilancio energetico sul corpo umano in condizioni di neutralità termica, ed includendo la potenza termica generata dall'attività metabolica e della resistenza termica del vestiario, Fanger riuscì a dimostrare che la condizione di comfort è funzione di soli sei parametri (Tabella 28).

Egli sottopose quindi più di mille individui adulti ed in buona salute ad una serie di test. All'interno di una camera climatica venivano ricreate opportune condizioni termoigrometriche; gli occupanti dovevano quindi esprimere un giudizio circa il loro livello di gradimento tramite una scala a sette valori, variabili da -3 (molto freddo) a +3 (molto caldo), come in Figura 34. Per ogni condizione di prova, si calcolava quindi la media dei giudizi espressi dagli individui, che andava a costituire il cosiddetto PMV (Voto Medio Previsto).

Sigla	Denominazione	Unità di misura
T_a	temperatura interna a bulbo secco	[°C]
T_{mr}	temperatura media radiante	[°C]
UR	umidità relativa	[%]
v	velocità dell'aria	[m/s]
I_{cl}	resistenza del vestiario	[clo]*
M	attività metabolica degli occupanti	[met]*

* 1 clo = 0,155 m²°C/W; 1 met = 58,2 W/m²

Tabella 28. Variabili che influenzano il comfort termico secondo il modello di Fanger

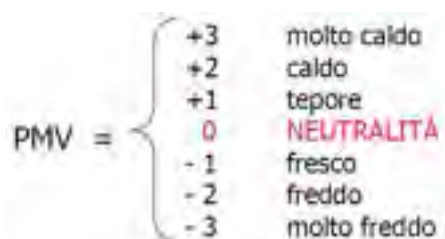


Figura 34. Scala di valori per il Voto Medio Previsto (PMV)

La ricerca condusse alla definizione di relazioni analitiche in grado di calcolare con buona affidabilità il PMV in funzione delle sei variabili di Tabella 28. Al PMV è inoltre legato un altro parametro, il cosiddetto PPD, che indica la percentuale prevista di persone insoddisfatte: a PMV = 0 corrisponde comunque una minima percentuale di insoddisfatti (PPD = 5 %).

Il modello del comfort di Fanger consente quindi di determinare opportuni valori delle variabili elencate in Tabella 28 tali da garantire agli occupanti di un ambiente un PMV = 0. Le norme tecniche che hanno adottato tale approccio, quali lo standard EN 15251:2007, ritengono comunque accettabile un PMV compreso tra - 0,5 e + 0,5, valori entro i quali si garantisce un PPD non superiore al 10 %.

E' inoltre il caso di osservare che gli effetti della temperatura interna a bulbo secco e della temperatura media radiante possono essere combinati in un unico parametro, chiamato *temperatura operativa*. Si definisce temperatura operativa la temperatura uniforme di un ambiente fittizio in cui un individuo scambierebbe lo stesso flusso termico totale (radiativo e convettivo) scambiato effettivamente nell'ambiente reale. In ambienti caratterizzati da aria in quiete ($v < 0.1$ m/s), risulta:

$$T_{op} = \frac{T_{mr} + T_A}{2}$$

Nel caso esaminato in questo studio, in cui si intende valutare il comfort termico garantito nella stagione estiva all'interno di un edificio residenziale, sono stati assunti per le variabili di Tabella 28 i seguenti valori:

- Resistenza del vestiario: $I_{cl} = 0.5$ clo (abbigliamento estivo)
- Attività metabolica: $M = 1.2$ met (attività sedentaria)
- Velocità dell'aria: $v < 0.1$ m/s (aria in quiete)
- Umidità relativa: $UR = 60$ %

Sotto queste ipotesi, la temperatura operativa ottimale da garantire all'interno dei locali, qualora in essi siano in funzione sistemi attivi di climatizzazione, è di 26 °C.

5.2 Il modello adattivo

Negli stessi anni in cui il Prof. Fanger sviluppava il suo modello del comfort termico, i ricercatori Fergus Nicol and Michael Humphreys dell'Oxford Institute for Sustainable Development ponevano le basi della loro *teoria adattiva* (Nicol e Humphreys, 1972).

Essi partirono dall'idea che le persone possano reagire ad una variazione delle condizioni termoigrometriche mettendo in atto opportune azioni quali la modifica del proprio vestiario o del proprio grado di attività, il controllo della ventilazione naturale tramite l'apertura delle finestre ed il controllo degli apporti solari tramite la chiusura delle schermature mobili. Ciò permette agli occupanti di un locale di adattarsi alle nuove condizioni termoigrometriche, rendendo quindi accettabile ai fini del comfort un più ampio range di temperature interne di quanto non sia suggerito dal modello stazionario alla base degli studi di Fanger. Altri ricercatori (De Dear e Brager, 2002) rilevarono inoltre che le persone che vivono o lavorano in edifici ventilati naturalmente, ed in cui è possibile aprire liberamente le finestre, possono abituarsi a variazioni del campo di temperatura interno che riflettano profili tipici del clima locale.

In definitiva, mentre il modello di Fanger postula la necessità di introdurre un impianto che provveda al mantenimento di specifiche e rigide condizioni termoigrometriche di comfort, l'approccio adattivo definisce un più ampio range all'interno del quale gli occupanti possono trovare il comfort senza l'intervento di impianti di climatizzazione. Tali considerazioni non possono però applicarsi nei casi in cui agli occupanti non sia consentito agire liberamente, a causa per esempio di codici di abbigliamento rigidi o in assenza di aperture di ventilazione (o qualora esse non siano facilmente raggiungibili).

Analizzando un numero considerevole di interviste condotte su scala mondiale in edifici reali privi di impianti di climatizzazione, Nicol e Humphreys (Nicol e Humphreys, 2002) giunsero infine ad indentificare una chiara correlazione tra la temperatura operativa di comfort e la media dei valori di temperatura esterna rilevati nei sette giorni precedenti. Ciò permise loro di asserire che, in assenza di controllo della temperatura interna, le condizioni di comfort termico possono essere valutate in funzione della sola temperatura operativa, cioè trascurando le altre variabili considerate nel modello di Fanger; queste, infatti, possono comunque essere modificate dagli occupanti tramite opportune azioni di carattere adattivo.

Nello studio di edifici passivi o ad energia quasi zero il modello adattivo sembra particolarmente appropriato, postulando una stretta interazione tra gli occupanti e l'edificio in funzione della variazione delle condizioni climatiche. L'importanza di tale approccio e la sua accettazione nella comunità scientifica sono testimoniati dalla sua implementazione nello standard ASHRAE 55 del 2004 e, più recentemente, nello standard EN 15251 del 2007.

In particolare, lo standard EN 15251 introduce le soglie di accettabilità per la temperatura operativa. Le soglie sono definite in funzione del valore medio corrente della temperatura esterna; quest'ultima deve essere calcolata, per ogni giorno del periodo in esame, eseguendo una media pesata delle temperature medie giornaliere T_{Em} nei sette giorni precedenti, ed attribuendo un peso decrescente ai giorni più lontani:

$$T_{mc}(\tau) = (1 - \alpha) \cdot \sum_{j=1}^7 [T_{Em}(\tau - j) \cdot \alpha^{j-1}]$$

Nell'equazione precedente si ponga $\alpha = 0.8$. Lo standard EN 15251:2007 introduce tre diverse categorie di comfort: la prima categoria è la più restrittiva e deve essere applicata ad edifici con elevate esigenze di comfort, occupati da persone disabili, malate o anziane (Figura 35). La formulazione analitica delle soglie inferiori e superiori della prima categoria è riportata di seguito:

$$T_{lim_inf} = 0.33 \cdot T_{mc} + 16.8$$

$$T_{lim_sup} = 0.33 \cdot T_{mc} + 20.8$$

E' interessante osservare come anche la categoria di comfort più restrittiva presenti un'ampiezza di ben 4 °C, coerentemente con le ipotesi alla base del modello adattivo. Le soglie della seconda categoria si distanziano di 1 °C da quelle relative alla prima categoria, e vanno utilizzate nel caso di edifici generici di nuova costruzione o soggetti ad interventi di ristrutturazione. Le soglie della terza categoria sono ulteriormente traslate di 1 °C, e si riferiscono ad edifici esistenti non oggetto di interventi. Le soglie di Figura 35 non sono state validate sperimentalmente oltre la temperatura $T_{mc} = 30$ °C.

Il modello adattivo, così come formulato da Nicol e Humphreys, può applicarsi solo nei casi di attività sedentaria da parte degli occupanti, con tassi metabolici compresi tra 1 met ed 1.3 met, e nell'ipotesi che essi siano liberi di variare il proprio abbigliamento in base alle esigenze di comfort. Deve essere inoltre garantita la possibilità di operare sulle aperture di ventilazione e sulle schermature mobili.

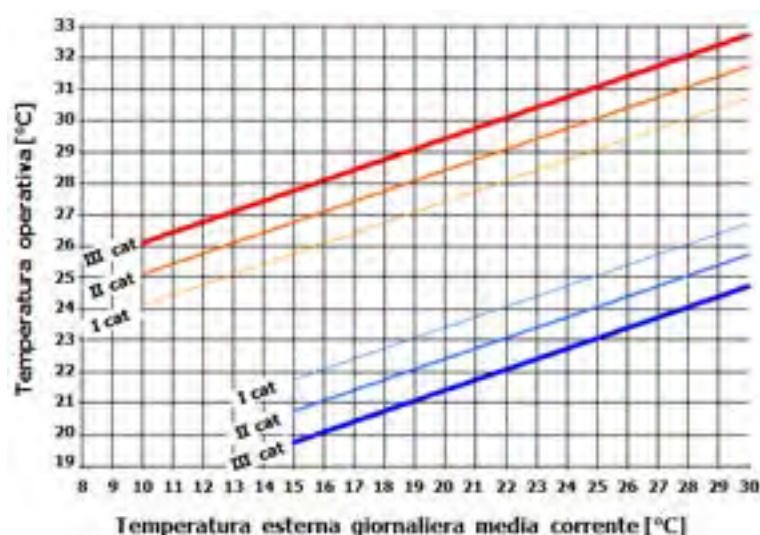


Figura 35. Modello adattivo - soglie di comfort per la temperatura operativa (EN 15251:2007)

5.3 Definizione della metodologia di analisi

In questo report la valutazione del comfort termico estivo all'interno dell'edificio in esame sarà effettuata basandosi sul modello adattivo: tutte le ipotesi alla base di questa teoria sono infatti verificate.

Le simulazioni dinamiche condotte con EnergyPlus restituiranno, per ciascuna zona termica di tutte le unità immobiliari esaminate, i profili orari della temperatura operativa interna. Tali valori saranno quindi confrontati con le soglie di comfort introdotte dalla EN 15251:2007; in particolare, si farà riferimento alla II categoria, valida per edifici generici di nuova costruzione o soggetti ad interventi di ristrutturazione. Si ricordi che i valori di soglia variano di giorno in giorno, in funzione della media corrente della temperatura esterna.

In Figura 36 si riportano due esempi dei diagrammi utilizzati per un'efficace rappresentazione grafica delle condizioni di comfort. Per ogni giorno del mese, in ascissa, sono riportati i ventiquattro valori orari della temperatura operativa rilevata all'interno di un locale tipo; nel diagramma, tali valori sono rappresentati dagli indicatori circolari. Analizzando la posizione di tali indicatori rispetto alle soglie di comfort (curve continue) sarà possibile verificare la frequenza con cui si manifesteranno eventuali situazioni di discomfort, nonché lo scarto tra le temperature operative e la soglia massima di accettabilità.

Il diagramma di sinistra in Figura 36, qui riportato solo a titolo di esempio, è rappresentativo di una situazione caratterizzata da un marcato discomfort termico dovuto al surriscaldamento dei locali; i valori della temperatura operativa si mantengono, infatti, costantemente sopra la curva limite superiore per la II categoria. Il diagramma di destra rappresenta invece un ambiente caratterizzato da comfort termico: infatti, la temperatura operativa si mantiene molto spesso all'interno della fascia di comfort di II categoria.

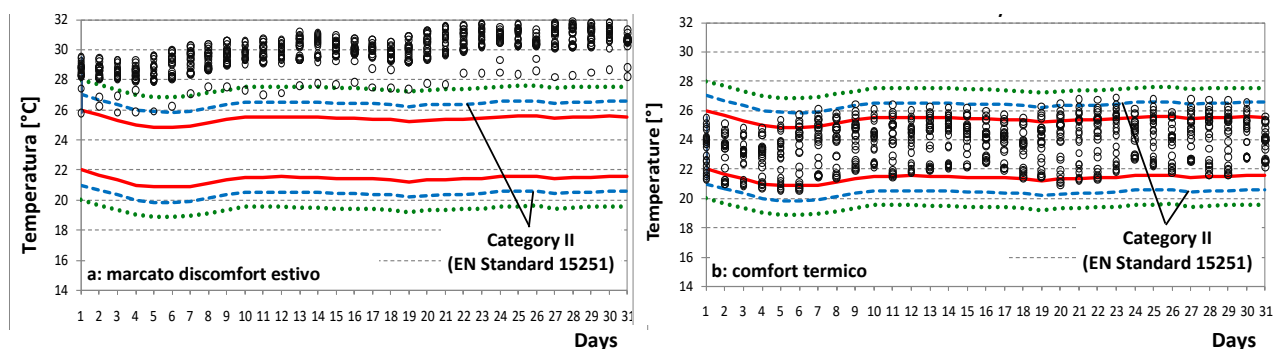


Figura 36. Rappresentazione grafica dell'evoluzione temporale del comfort termico

Volendo inoltre introdurre degli indicatori che possano rappresentare in maniera sintetica ma efficace la frequenza (ovvero la durata) e l'intensità delle condizioni di discomfort termico che si determinano nell'arco di periodi temporali rilevanti (per esempio, un giorno, un mese o l'intera stagione di climatizzazione), si è stabilito di utilizzare i seguenti indici:

- Frequenza di discomfort (FD): è la frazione del tempo totale in cui la temperatura operativa di un locale supera la soglia superiore di comfort per la II categoria.
- Intensità del discomfort termico (ITD): è il valore dell'integrale, esteso all'intero periodo in esame, degli scarti positivi tra la temperatura operativa (T_{op}) e la soglia superiore di comfort della II categoria (T_{lim}):

$$ITD = \int_P \Delta T^+(\tau) \cdot d\tau \quad \text{con } \Delta T^+(\tau) = \begin{cases} T_{op}(\tau) - T_{lim} & \text{se } T_{op}(\tau) \geq T_{lim} \\ 0 & \text{se } T_{op}(\tau) < T_{lim} \end{cases}$$

L'integrale per il calcolo dell'ITD deve essere esteso all'intero periodo di occupazione quotidiana dei locali; nel caso di edifici residenziali questo può essere posto pari a $P = 24$ ore. L'indice ITD può essere calcolato su base mensile o stagionale; esso tiene conto, con un solo numero, sia della durata sia dell'intensità della sensazione di discomfort termico, e permette agevoli confronti tra diverse soluzioni progettuali.

6 Risultati: valutazione del comfort termico

6.1 L'andamento delle temperature operative

Le simulazioni dinamiche condotte in questo studio hanno l'obiettivo di verificare con quale frequenza, nell'arco della stagione estiva e dei mesi di Maggio e Ottobre, siano soddisfatte le condizioni interne per il comfort termico, sia nello stato di fatto che in seguito all'intervento di ristrutturazione proposto.

A tal fine sono stati individuati quattro locali rappresentativi (Figura 37), uno per ogni esposizione dell'edificio, e per questi locali è stato valutato l'andamento temporale della temperatura operativa, confrontandolo con le soglie di comfort introdotte dal modello adattivo e dal modello di Fanger.

Le analisi sono state ripetute per tutti i piani dell'edificio (primo piano, piano intermedio ed ultimo piano). Inoltre, gli indicatori FD ed ITD, definiti al paragrafo 5.3, sono stati calcolati con riferimento a ciascun appartamento, combinando opportunamente i valori associati ai singoli locali.



Figura 37. Locali rappresentativi selezionati per l'analisi del comfort termico

In primo luogo è stato analizzato l'andamento della temperatura operativa nei locali esposti a Sud, prima e dopo l'intervento di retrofit, in una settimana particolarmente calda del mese di Luglio, confrontando i risultati ottenuti per il primo piano, il piano intermedio e l'ultimo piano. In questa fase, tutte le simulazioni sono state condotte mantenendo una portata di ventilazione costante pari a 0.5 h^{-1} .

Nello stato di fatto (Figura 38), le curve di temperatura operativa per i vari piani presentano profili omotetici; la temperatura operativa aumenta però nei piani superiori, fino a raggiungere i valori più elevati all'ultimo piano, con picchi di 33°C , a causa delle scarse condizioni di isolamento del solaio. Al primo piano, invece, si ottengono valori più bassi, e la temperatura operativa è costantemente inferiore di circa 1°C rispetto all'ultimo piano, grazie allo scambio termico con i locali non climatizzati al piano terra. Il piano intermedio, infine, ha un comportamento prossimo a quello dell'ultimo piano, essendo penalizzato dalle ridotte superfici disperdenti, che non facilitano lo smaltimento dei carichi interni.

Le strategie di intervento proposte, descritte nel Capitolo 2, modificano le prestazioni termiche dell'edificio in regime estivo (Figura 39). L'applicazione dell'isolante sul solaio di copertura limita gli effetti della radiazione solare assorbita dalla copertura, riducendo significativamente i valori della temperatura operativa per il locale dell'ultimo piano esposto a Sud nella settimana considerata: la massima temperatura operativa è adesso 31°C , cioè circa 2°C inferiore allo stato di fatto, dove l'isolamento è assente. Al primo piano, e soprattutto nei piani intermedi, si assiste invece ad un sensibile aumento delle temperature operative rispetto allo stato di fatto, ed i valori di picco crescono di quasi 0.5°C .

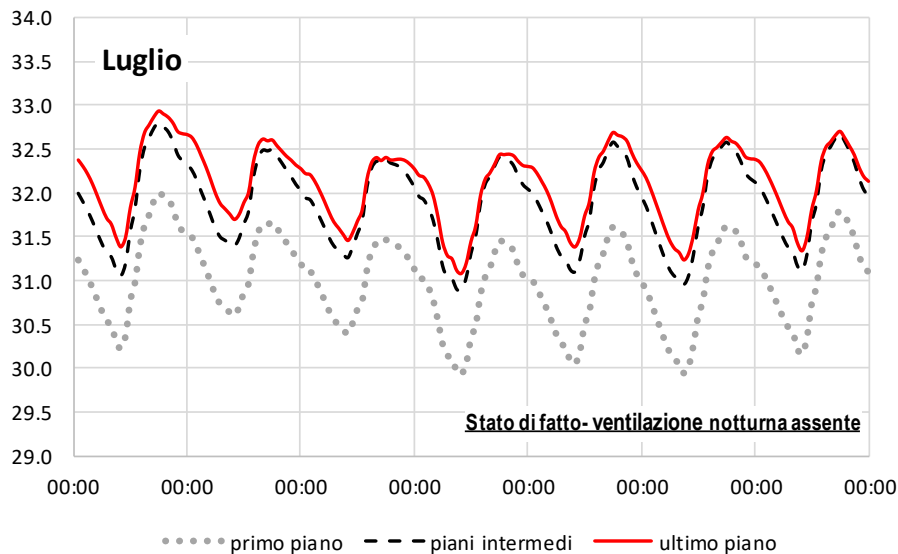


Figura 38. Andamento della temperatura operativa in una settimana di Luglio (stato di fatto)

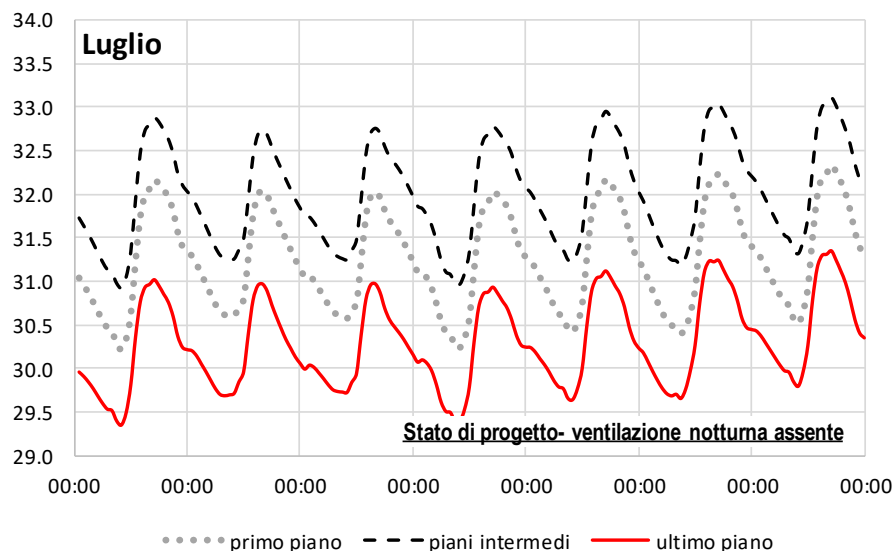


Figura 39. Andamento della temperatura operativa in una settimana di Luglio (post-intervento)

L'isolamento dell'involucro edilizio può inoltre avere come conseguenza l'eccessivo surriscaldamento degli ambienti interni durante i mesi intermedi, implicando l'utilizzo degli impianti di climatizzazione anche in periodi in cui si presuppone che questi non siano attivi. Per questo motivo si è pensato di analizzare i profili delle temperature operative per tutti i piani anche nei mesi di Maggio ed Ottobre, in modo da verificare che le soluzioni proposte non compromettano la vivibilità dei locali in questi mesi.

Per il mese di Maggio, ad esempio, nello stato di fatto il comportamento dell'edificio ricalca quanto già descritto, con profili di temperatura più elevati in copertura e più moderati al primo piano. Le temperature operative sono variabili in un range compreso tra 23 °C e 29 °C, quindi notevolmente inferiori rispetto a quanto riscontrato nel mese di Luglio (Figura 40).

A seguito dell'intervento di ristrutturazione (Figura 41), il picco della temperatura operativa all'ultimo piano si abbassa di quasi 3 °C, passando dai 29 °C dello stato di fatto a circa 26.5 °C: anche in questo caso, quindi l'ultimo piano trae beneficio dall'intervento di ristrutturazione. Al primo piano e al piano tipo la situazione è invece ben diversa: gli interventi proposti determinano costantemente un incremento della temperatura di circa 1 °C, passando da massimi di 27 °C e 28 °C, rispettivamente, a massimi di 28 °C e 29 °C.

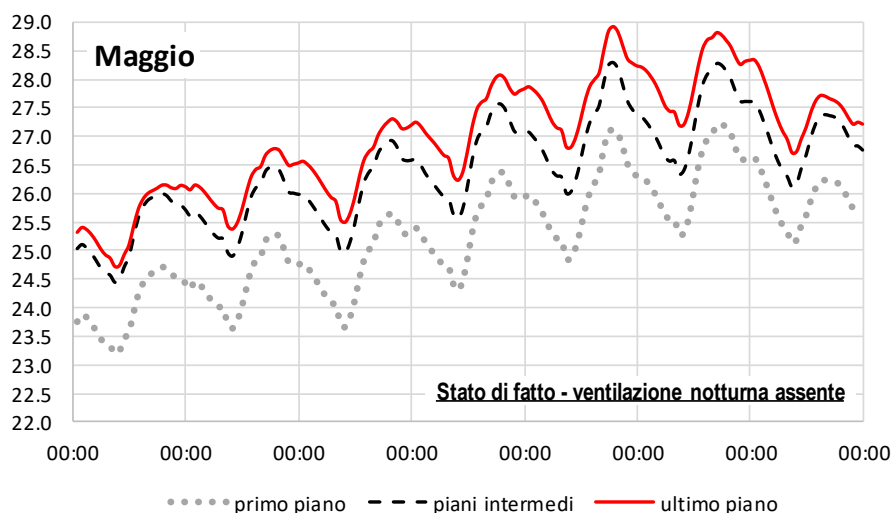


Figura 40. Andamento della temperatura operativa in una settimana di Maggio (stato di fatto)

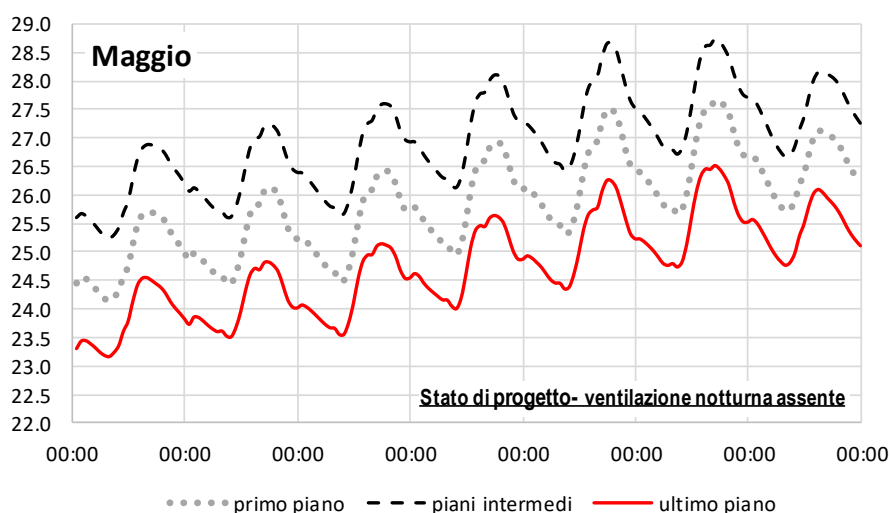


Figura 41. Andamento della temperatura operativa in una settimana di Maggio (post-intervento)

I diagrammi precedenti dimostrano che l'isolamento termico dell'involucro edilizio può comportare, in località dal clima caldo come in zona climatica B, un considerevole aumento delle temperature operative interne, sia nei mesi estivi sia a Maggio. Fanno però eccezione i locali posti all'ultimo piano: in questo caso, infatti, l'isolamento termico della copertura ha effetti benefici, con notevoli riduzioni della temperatura operativa.

I risultati commentati si riferiscono però solo a due settimane rappresentative nei mesi di Maggio e Luglio, ed ai locali esposti a Sud. Essi inoltre non forniscono informazioni dirette sul comfort termico percepito dagli occupanti. Nel seguito verranno dunque commentati i risultati per le altre esposizioni e per gli altri mesi, e saranno introdotti i confronti con le soglie di comfort, secondo le modalità di rappresentazione descritte al paragrafo 5.3.

In particolare, a titolo di esempio nei diagrammi seguenti si riporteranno i valori orari delle temperature operative per tutti i giorni del mese di Agosto e di Maggio, con riferimento ad una serie di locali rappresentativi per il piano intermedio, caratterizzati da esposizioni diverse (evidenziati in Figura 37). Ogni giorno del mese è caratterizzato da una nuvola di punti (24 valori orari), così da rappresentare l'escursione termica giornaliera, legata alle condizioni di occupazione degli ambienti. I risultati per i locali esposti ad Ovest sono molto simili a quelli ottenuti per l'esposizione Est, pertanto non verranno riportati nei diagrammi.

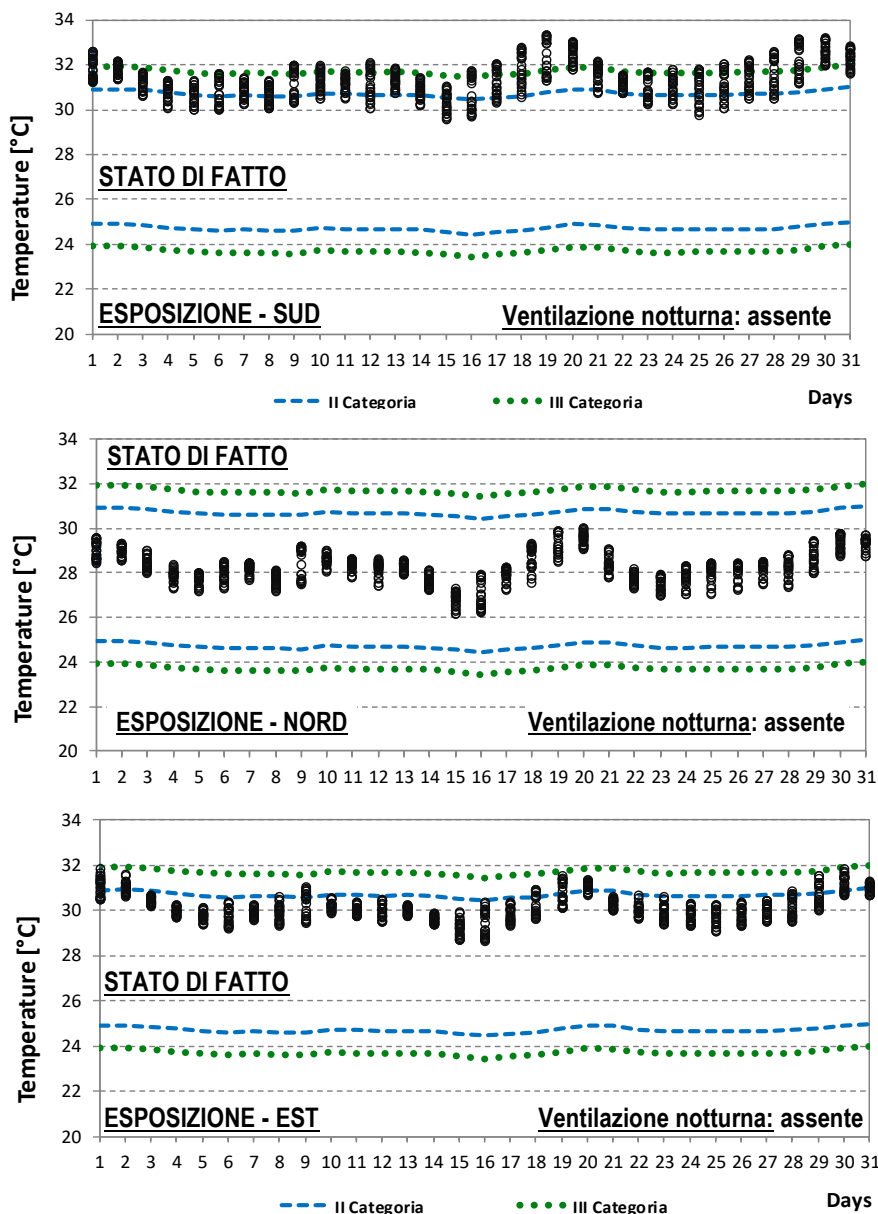


Figura 42. Temperatura operativa ad Agosto per lo stato di fatto (piano intermedio, ventilazione notturna assente)

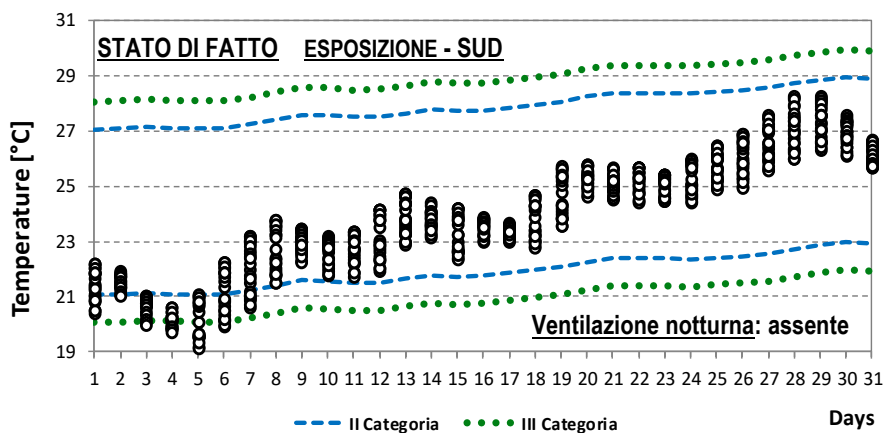


Figura 43. Temperatura operativa a Maggio per lo stato di fatto (piano intermedio, ventilazione notturna assente)

La Figura 42 e la Figura 43 si riferiscono allo stato di fatto. Si può innanzitutto osservare che, indipendentemente dall'esposizione del locale, le temperature operative ad Agosto sono sempre superiori al limite di 26 °C suggerito dal modello di Fanger: alla luce di questo modello, nei locali non sarebbe mai garantito il comfort termico, e sarebbe sempre necessario attivare gli impianti di climatizzazione.

Il riferimento al modello adattivo, invece, porta a conclusioni differenti: nello stato di fatto, per i locali esposti a Nord e ad Est i valori orari della temperatura operativa rimangono molto frequentemente all'interno della fascia di comfort associata alla seconda categoria, che costituisce ai sensi della UNI 15251:2007 il riferimento da considerare nei casi di edifici ristrutturati. Nei locali esposti a Sud, invece, le temperature operative superano frequentemente il limite della seconda categoria, ed in alcuni casi anche della terza, con valori massimi giornalieri prossimi ai 34 °C.

La Figura 43 si riferisce invece al mese di Maggio ed al solo locale esposto a Sud (piano intermedio). Con riferimento al modello adattivo i valori si attestano stabilmente sotto la soglia della seconda categoria, e addirittura in alcuni giorni si raggiungono temperature troppo basse, di circa 19°C. Anche secondo il modello di Fanger per buona parte del mese sussistono le condizioni per il comfort, eccezion fatta per l'ultima settimana in cui il profilo delle temperature supera il limite dei 26 °C.

In Figura 44 e Figura 45 si riportano inoltre i risultati riguardanti gli stessi locali del piano intermedio, ottenuti in seguito agli interventi di ristrutturazione importante di primo livello. Le strategie progettuali proposte determinano un aumento generale delle temperature operative per tutte le esposizioni: se a Nord i valori della temperatura operativa si mantengono ancora all'interno della II categoria del modello adattivo, nei locali esposti ad Est le temperature operative sono frequentemente superiori. Nei locali esposti a Sud la soglia del comfort adattivo viene sempre superata.

Anche per il mese di Maggio l'intervento di ristrutturazione comporta sistematicamente l'innalzamento del profilo delle temperature: queste rientrano comunque costantemente all'interno delle soglie della seconda categoria per il modello adattivo, e sono solo occasionalmente superiori alla soglia dei 26 °C individuata dal modello di Fanger.

Considerato l'andamento delle temperature durante i mesi più caldi si è deciso di valutare l'efficacia di eventuali strategie di ventilazione notturna al fine di migliorare il comfort termico estivo. E' infatti plausibile che gli occupanti, soprattutto nelle ore in cui la temperatura esterna è più bassa, aprano le finestre per agevolare il raffrescamento dei locali; ciò è peraltro coerente con le ipotesi su cui si basa il modello adattivo. Ai fini delle simulazioni è stata quindi impostata, in via preliminare, una portata di ventilazione notturna pari a due ricambi orari ($n = 2 \text{ h}^{-1}$), dalle ore 21:00 alle ore 07:00. I risultati di queste simulazioni, per il locale del piano intermedio con esposizione Sud, sono riportati in Figura 46, con riferimento allo stato di fatto ed allo stato di progetto.

Confrontando i diagrammi di Figura 46 con le figure precedenti relative al locale esposto a Sud, si può notare una considerevole riduzione delle temperature operative grazie allo sfruttamento della ventilazione notturna. Ad esempio, per lo stato di fatto si osserva una riduzione di circa 1 °C per le temperature di picco rispetto all'andamento di Figura 42; di conseguenza, si riduce anche la frequenza con cui vengono superate le soglie della seconda e della terza categoria di comfort. Nello stato di progetto la riduzione delle temperature operative è ancora più evidente: rispetto ai dati di Figura 44, i valori di picco giornalieri si abbassano di quasi 2 °C, e le temperature rimangono spesso sotto la soglia imposta dal modello adattivo.

I risultati presentati costituiscono solo un estratto delle analisi eseguite, ma consentono di evidenziare i principali trend osservati. I diagrammi riferiti al mese di Agosto, per tutti i piani dell'edificio e per tutte le esposizioni, sono riportati negli Allegati II, III e IV.

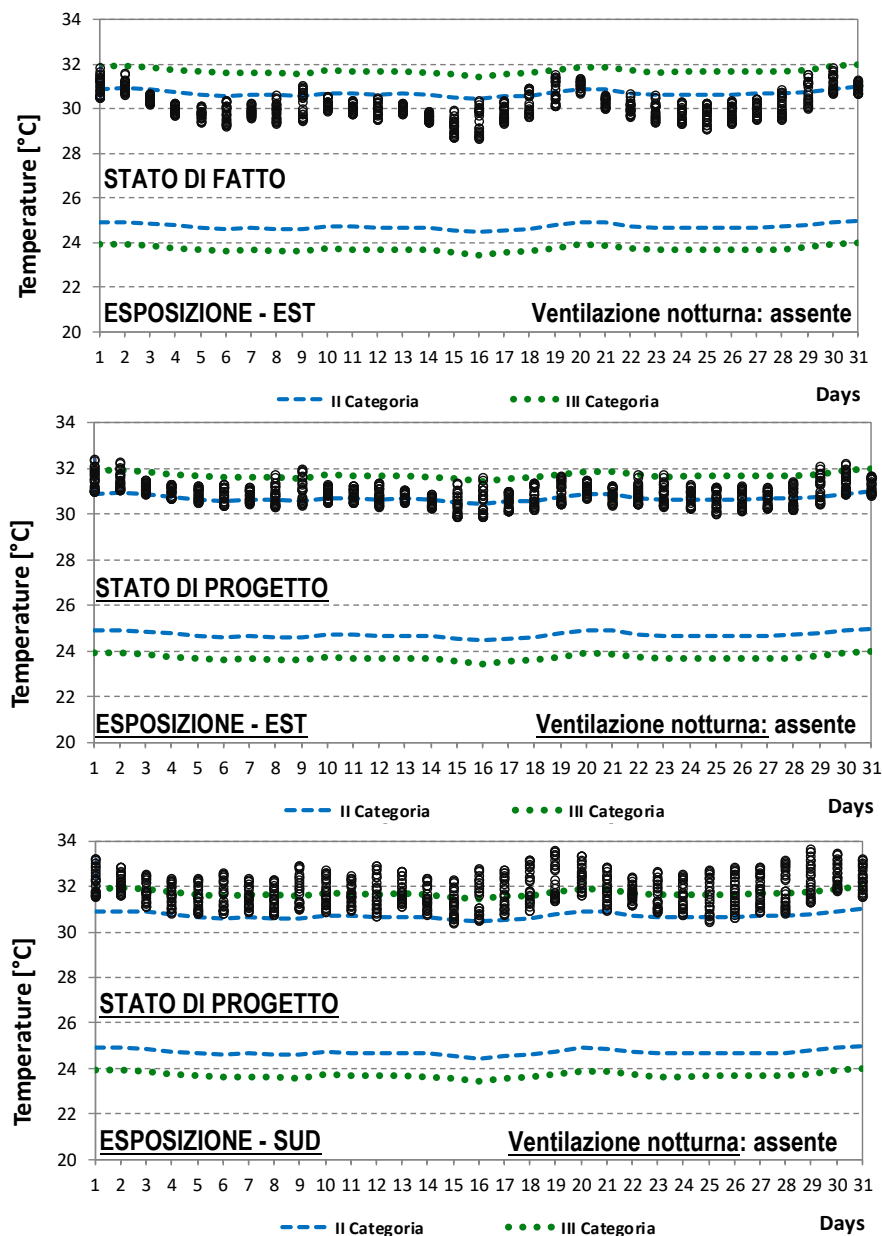


Figura 44. Temperatura operativa ad Agosto per lo stato di progetto (piano intermedio, ventilazione notturna assente)

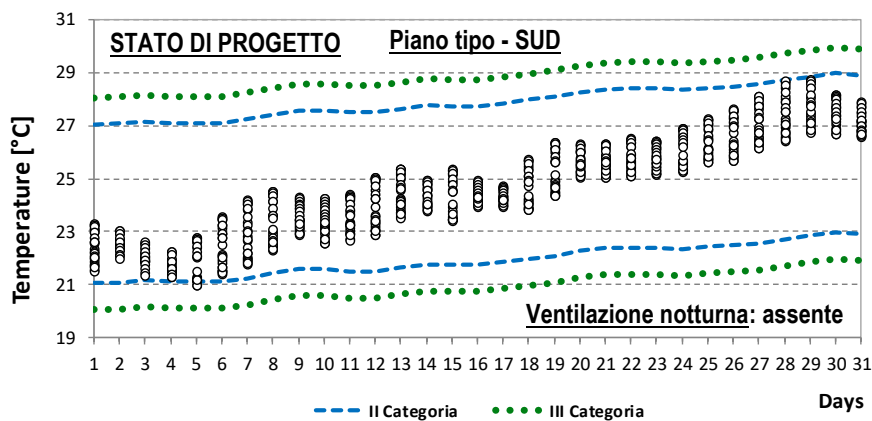


Figura 45. Temperatura operativa a Maggio per lo stato di progetto (piano intermedio, ventilazione notturna assente)

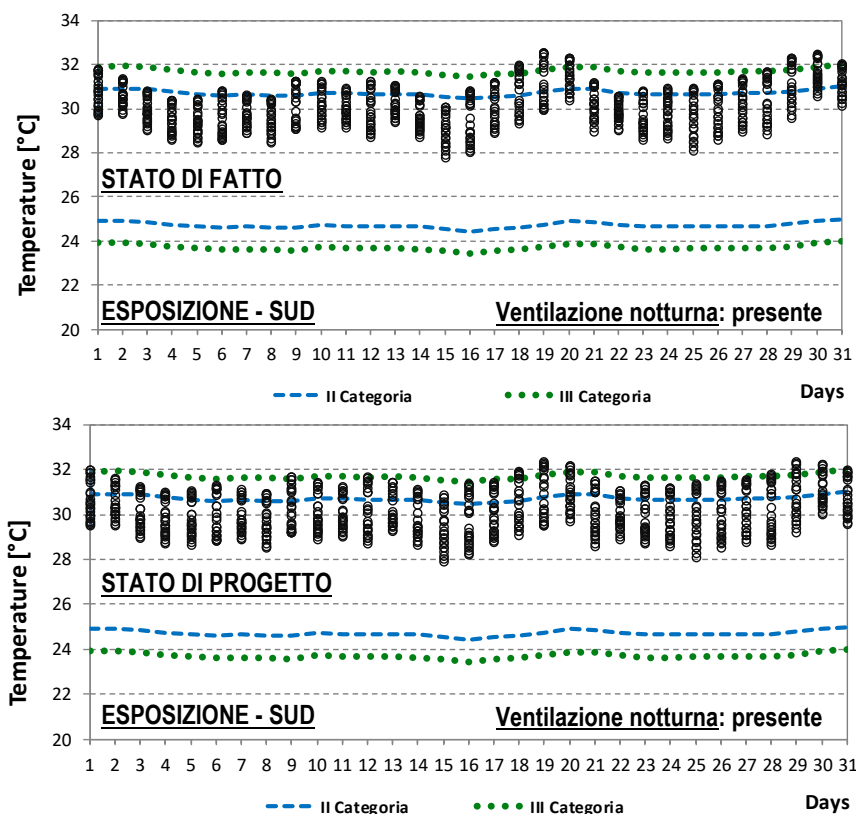


Figura 46. Temperatura operativa ad Agosto (piano tipo, esposizione Sud, ventilazione notturna presente)

In ogni caso, le principali considerazioni derivanti da questa prima indagine sono le seguenti:

- I locali esposti a Sud presentano una più elevata frequenza del discomfort, mentre i locali esposti a Nord presentano condizioni più favorevoli;
- Nei mesi estivi, gli interventi di riqualificazione proposti comportano una più elevata frequenza ed intensità delle condizioni di discomfort termico “da caldo” all’interno dei locali;
- Le strategie di ventilazione notturna sono in grado di migliorare notevolmente il comfort termico, bilanciando gli effetti negativi dell’isolamento termico dell’involucro;
- L’utilizzo del modello di Fanger penalizza eccessivamente la valutazione delle condizioni di comfort all’interno dei locali, in quanto non tiene in debito conto la possibilità da parte degli occupanti di mettere in atto strategie adattive quali la ventilazione e la modifica del vestiario.

6.2 Analisi dell’Intensity of Thermal Discomfort (ITD)

L’andamento mensile della temperatura operativa discusso al paragrafo precedente fornisce informazioni sul comportamento dei singoli locali in un determinato periodo, ma non permette di avere una visione globale della situazione per tutti gli appartamenti e per l’intera stagione estiva. Per questo motivo è opportuno analizzare i risultati delle simulazioni anche alla luce dell’indice ITD (Intensity of Thermal Discomfort).

In Figura 47 ed in Figura 48 si riportano i valori totali di ITD per tutte le unità immobiliari del primo piano, del piano intermedio e dell’ultimo piano, nello stato di fatto e nello stato di progetto. I diagrammi considerano inoltre i due regimi di ventilazione ipotizzati, cioè assenza di ventilazione notturna o presenza di una ventilazione notturna pari a due ricambi orari.

I fattori principali che influenzano il comfort sono la collocazione dei locali all’interno dell’edificio e la loro esposizione. Allo stato di fatto, nei locali posti all’ultimo piano si ottengono i valori più alti di ITD (Figura 47); il piano intermedio ha un comportamento leggermente migliore, ma comunque caratterizzato da valori

di ITD molto elevati. Infine, al primo piano si generano le condizioni più favorevoli, con valori massimi di circa 500 °C·h nell'unità U3: ciò significa che, mediamente, gli occupanti di questa unità immobiliare percepiranno delle temperature operative superiori di 1 °C rispetto alla soglia di discomfort per un totale di 500 ore l'anno.

Le unità più sfavorite sono sistematicamente quelle esposte a Sud ed Est (unità U3), seguite dalle unità U2, con esposizione Sud ed Ovest. Le due unità più piccole (U1 e U4), che presentano diversi locali esposti a Nord, hanno valori di ITD notevolmente inferiori, con un leggero vantaggio per l'unità U1. Questo risultato è da attribuire alla presenza dell'edificio adiacente a quello analizzato sul lato Ovest, che non consente alla radiazione solare di raggiungere direttamente gli appartamenti U1 e U2.

Osservando la Figura 48, relativa allo stato di progetto, si comprende come la ristrutturazione dell'involucro comporti l'incremento dell'intensità del discomfort termico al primo piano e soprattutto al piano intermedio. Ad esempio, per l'unità U3 del piano intermedio l'ITD aumenta del 40 % rispetto al diagramma di Figura 47, mentre l'aumento ammonta al 34 % per la stessa unità del primo piano. Al contrario, gli interventi di ristrutturazione riducono l'ITD all'ultimo piano in maniera considerevole, quasi fino ad annullarlo: ad esempio, il valore di ITD nell'unità abitativa U3 è solo il 5 % del valore nello stato di fatto. Questi risultati confermano che le condizioni al contorno dei piani intermedi, soprattutto dopo gli interventi, rendono questi alloggi fortemente penalizzati rispetto agli altri piani.

Dalle Figura 47 e Figura 48, è possibile inoltre individuare quali siano i mesi che contribuiscono maggiormente all'intensità del discomfort percepito dagli occupanti: si tratta di Luglio ed Agosto, seguiti da Settembre in misura minore. Ad esempio, per l'unità U3 del piano intermedio, nello stato di progetto il contributo percentuale sull'ITD totale è del 27% a Luglio, del 51% ad Agosto e del 21% a Settembre. Il contributo percentuale per i mesi di Maggio ed Ottobre è assolutamente trascurabile, per cui l'eventuale discomfort occasionalmente riscontrato in questi mesi non costituisce un problema rilevante.

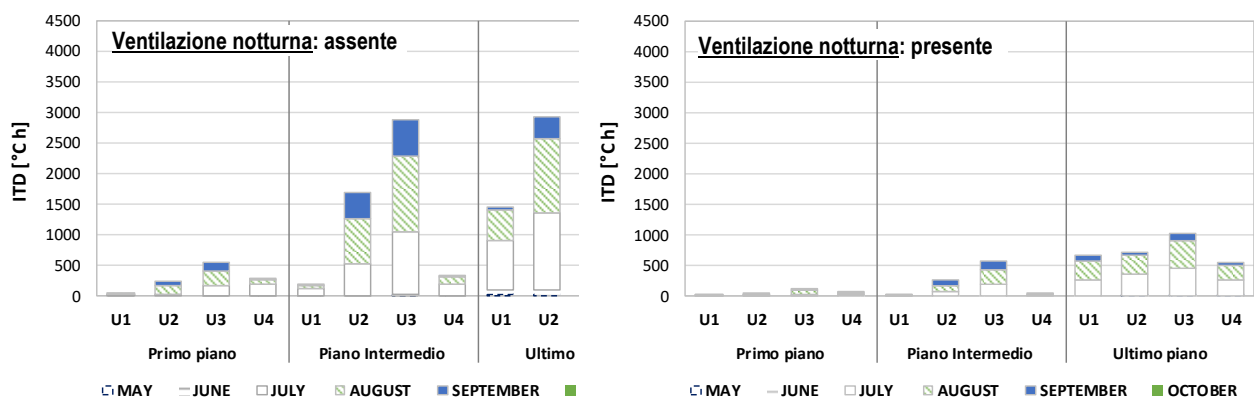


Figura 47. Valori di ITD per appartamento (stato di fatto)

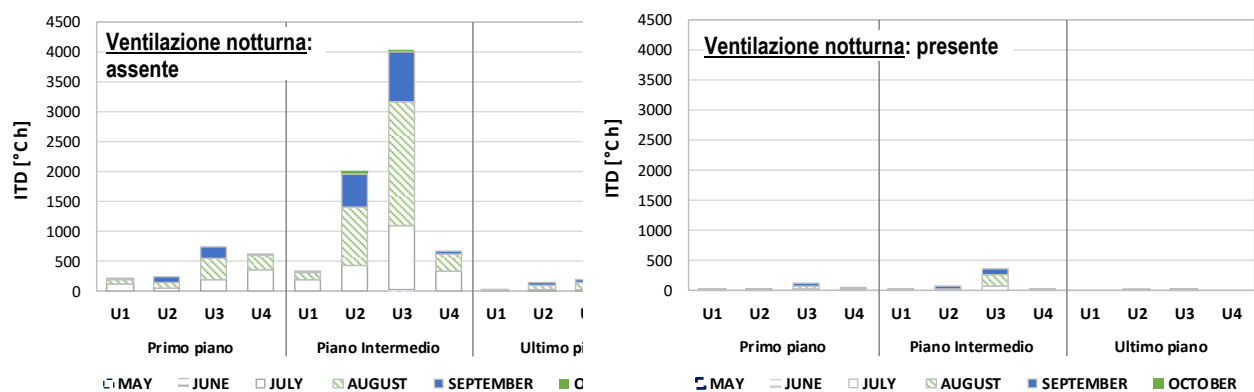


Figura 48. Valori di ITD per appartamento (stato di progetto)

In conclusione, è dunque confermata la necessità, già evidenziata nel paragrafo precedente, di provvedere con delle misure efficaci allo smaltimento del calore accumulato. Per questo è stato ricalcolato l'ITD, sia nello stato di fatto che nello stato di progetto, nell'ipotesi in cui venga garantita la ventilazione notturna. I risultati dimostrano che, in tutti i casi, la ventilazione dei locali nelle ore serali limita fortemente il discomfort termico, azzerandolo addirittura nello stato di progetto per i locali all'ultimo piano e al primo piano. La soluzione, in effetti, ha un effetto benefico anche al piano intermedio: ad esempio, nell'unità abitativa U3 dello stato di progetto, l'ITD nel caso di ventilazione notturna è pari solo al 9% del valore ottenuto senza ventilazione notturna.

6.3 Analisi della Frequenza del Discomfort (FD)

La Frequenza di Discomfort termico (FD) è definita come il rapporto tra le ore in cui si manifesta discomfort (ossia $ITD > 0$) e le ore totali di occupazione dei locali. In questa sezione si riferisce delle indagini effettuate per valutare la FD, in tutti i mesi tra Maggio e Ottobre. Nelle Figure da 49 a 52 viene quindi mostrata, mese per mese, la percentuale di ore di discomfort, calcolata sia alla luce del modello adattivo sia in relazione al modello di Fanger, nello stato di fatto e di progetto, con e senza ventilazione notturna. In questa fase sono presentati i risultati di due sole unità (U1 e U3) per tutti i piani: esse rappresentano rispettivamente il caso migliore ed il caso peggiore, mentre le altre unità mostrano prestazioni intermedie.

Le frequenze di discomfort sono fortemente influenzate dal modello di comfort utilizzato. Secondo il modello di Fanger, durante i mesi più caldi, nello stato di fatto la frequenza del discomfort è pari sempre al 100 % (Figura 49). Per l'unità U1 nel mese di Giugno la frequenza di discomfort varia tra il 40 % (piano intermedio) e il 60 % (ultimo piano), a Settembre tra il 50 % e il 65 %, è nulla nel mese di Ottobre e può arrivare al 20 % nel mese di Maggio.

Risultati analoghi si hanno per l'unità abitativa U3, in cui anche a Ottobre si riscontra $FD = 28\%$ per il piano intermedio. Il modello di Fanger suggerisce quindi che, in tutti gli appartamenti, gli impianti di climatizzazione dovrebbero rimanere in funzione per la totalità dei mesi più caldi (Luglio ed Agosto) e per buona parte di quelli intermedi.

Al contrario, il modello adattivo suggerisce che il periodo di accensione degli impianti può essere ridotto notevolmente. Infatti, anche durante i mesi più caldi si ottengono valori contenuti di FD: nell'unità U1, e soltanto all'ultimo piano, si ottiene $FD = 40\%$ a Luglio ed $FD = 30\%$ ad Agosto (Figura 49). Durante gli stessi mesi la frequenza del discomfort per il piano intermedio rimane inferiore al 10 %, ed è quasi trascurabile in tutti i piani durante gli altri mesi.

Nell'unità U3 si ottengono risultati peggiori, soprattutto al piano intermedio e all'ultimo piano durante i mesi caldi, con percentuali comprese tra $FD = 50\%$ ed $FD = 70\%$. Al primo piano invece le percentuali sono più basse e non superano il 20 %. Durante i mesi di Maggio, Giugno e Ottobre la frequenza di discomfort è quasi nulla, ad eccezione dell'ultimo piano in cui si raggiunge $FD = 10\%$ nel mese di Giugno.

La ventilazione notturna non porta a risultati sensibilmente migliori secondo il modello di Fanger. Durante i mesi caldi, ed in entrambe le unità abitative, per la quasi totalità del tempo sembra comunque necessario fare impiego di sistemi attivi per la climatizzazione (Figura 50). Anche durante i mesi di Giugno e Settembre la frequenza è elevata: ad esempio, in entrambi gli alloggi all'ultimo piano si raggiunge $FD = 60\%$. Nei mesi di Maggio ed Ottobre i valori di FD sono trascurabili.

Facendo invece riferimento al modello adattivo, la frequenza di discomfort con ventilazione notturna è pressoché nulla per gli appartamenti di tipo U1, a meno dei locali all'ultimo piano. Alla luce di questo modello, il miglioramento delle condizioni di comfort indotto dalla ventilazione è notevole, come rilevabile dal confronto tra Figura 49 e Figura 50.

Questi risultati confermano peraltro che nello stato di fatto i locali più sfavoriti sono quelli all'ultimo piano, mentre il primo piano è quello più avvantaggiato in quanto a contatto con il piano terra, ad uso non residenziale.

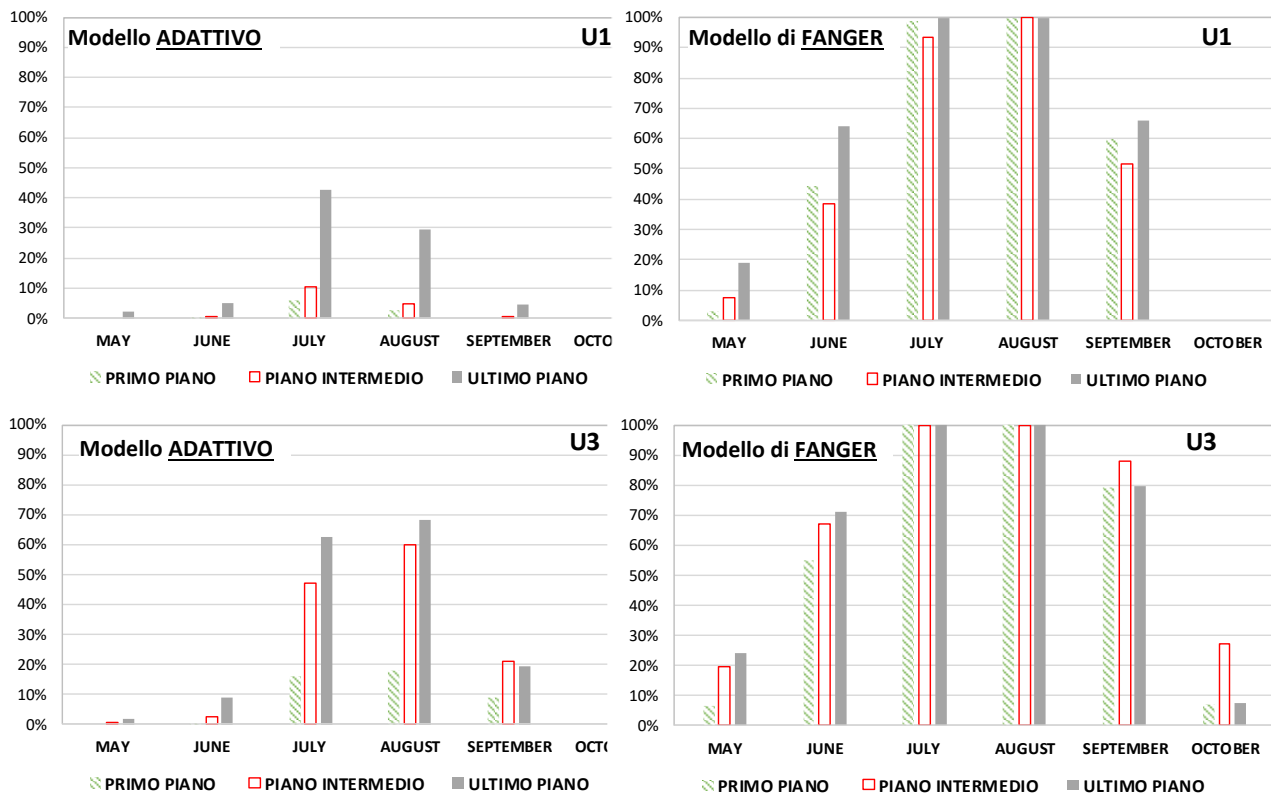


Figura 49. Frequenza del discomfort termico (stato di fatto – senza ventilazione notturna)

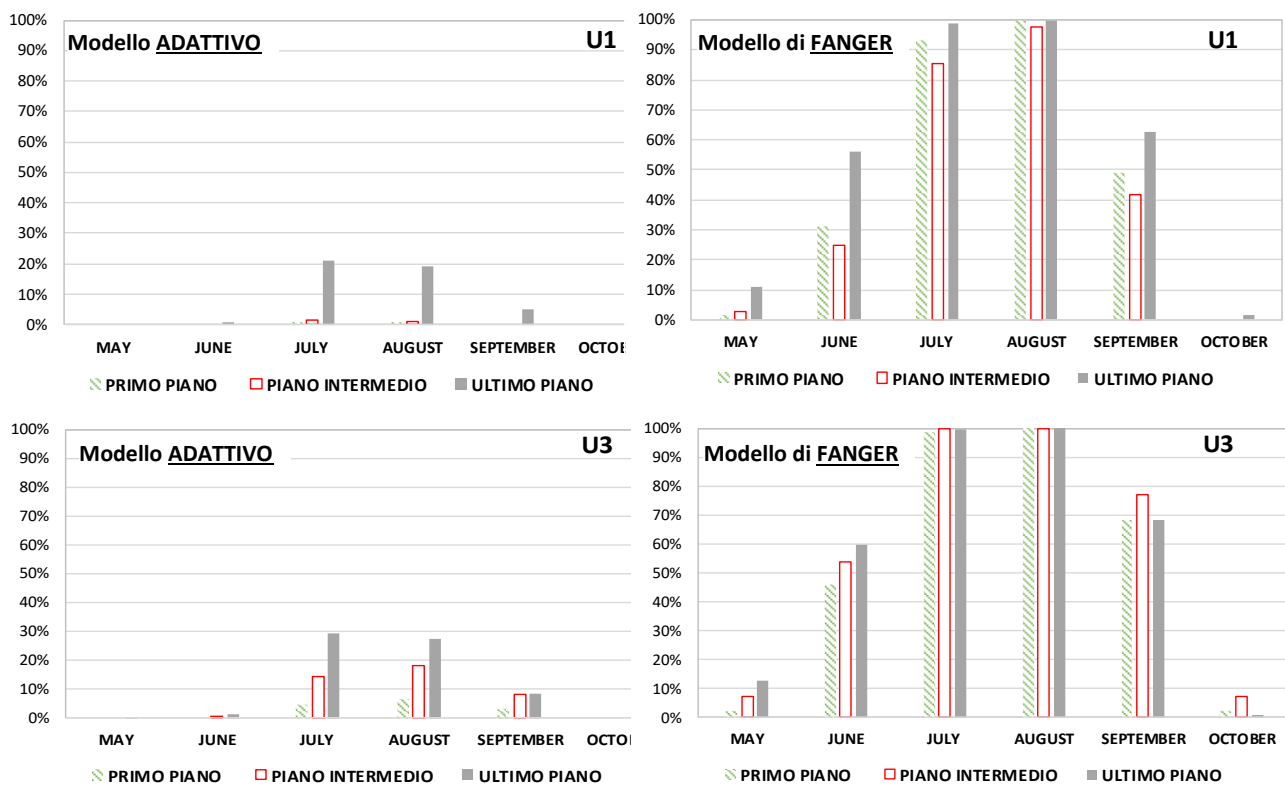


Figura 50. Frequenza del discomfort termico (stato di fatto – con ventilazione notturna)

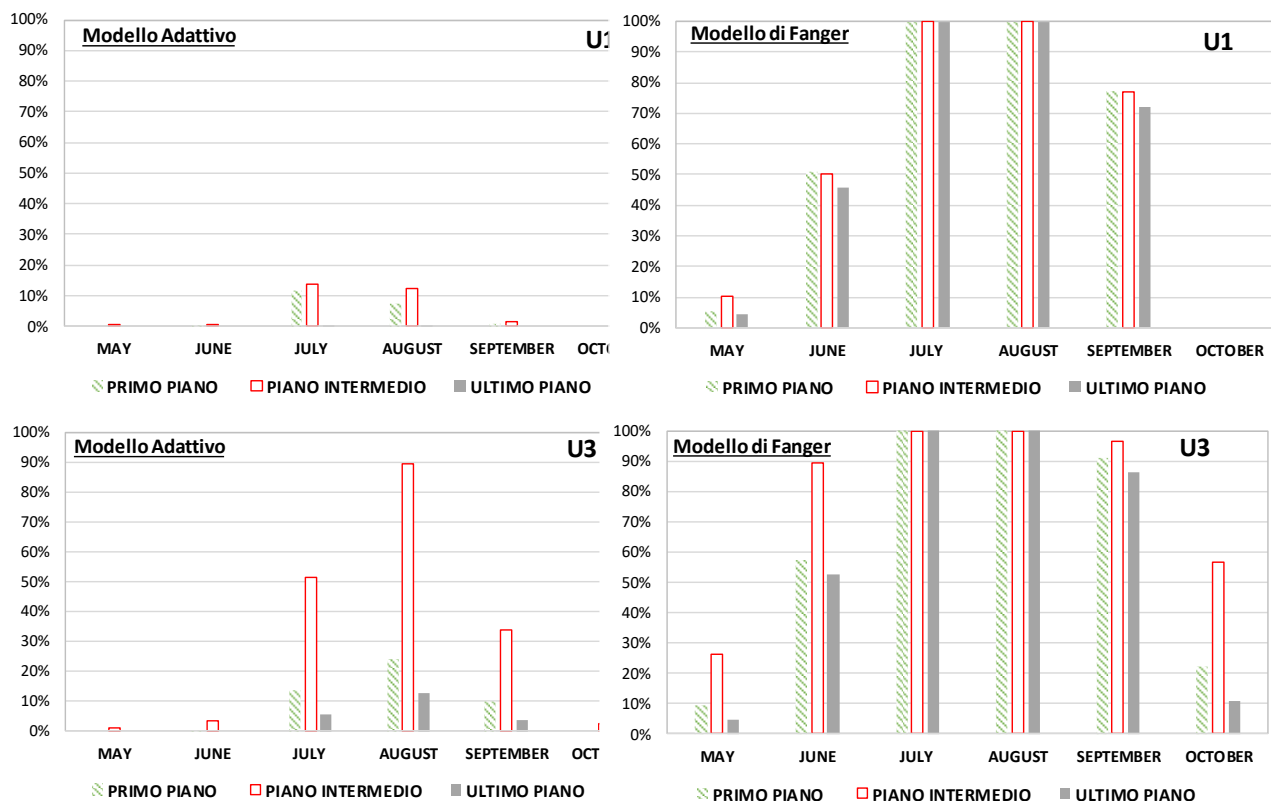


Figura 51. Frequenza del discomfort termico (stato di progetto – senza ventilazione notturna)

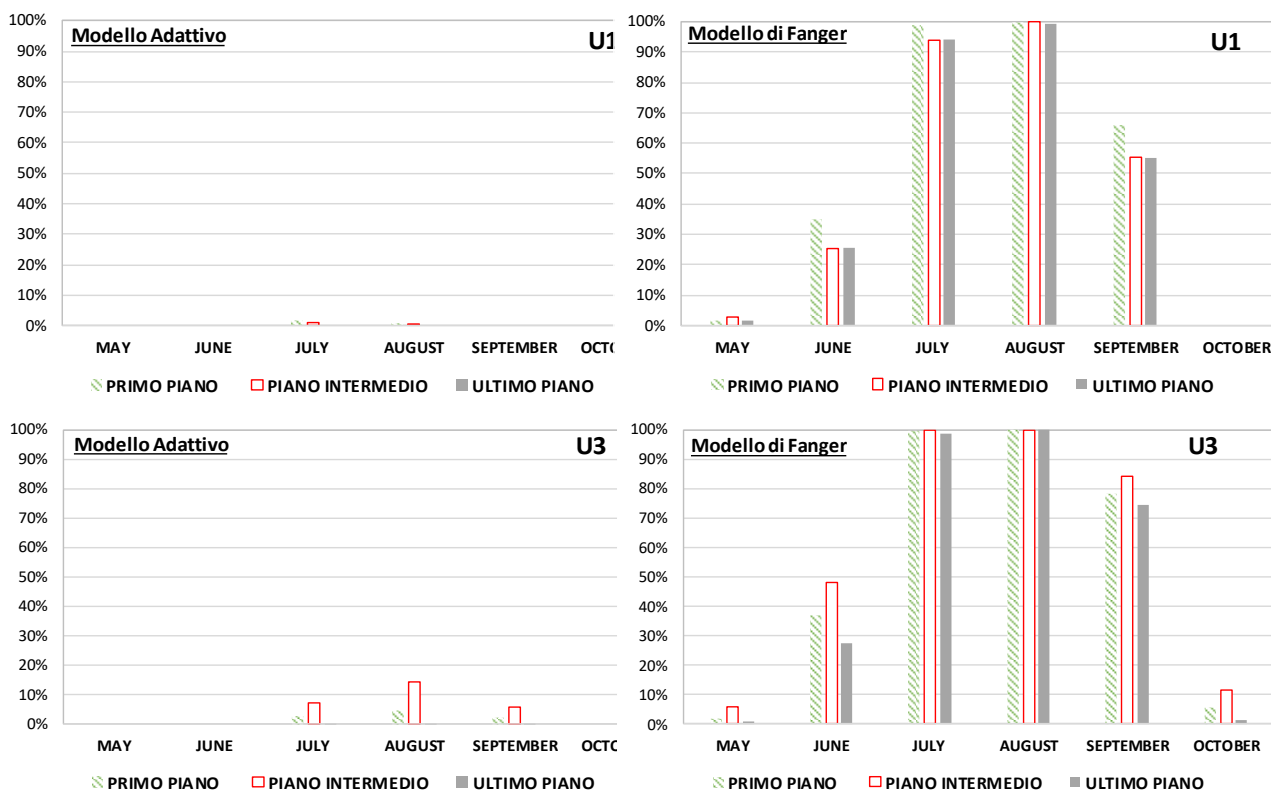


Figura 52. Frequenza del discomfort termico (stato di progetto – con ventilazione notturna)

Passando adesso ai risultati di Figura 51 relativi alle simulazioni per l'edificio ristrutturato, si noti come in seguito agli interventi sull'involucro, ed in assenza di ventilazione notturna, la frequenza di discomfort peggiori sensibilmente al piano intermedio, soprattutto nei mesi più caldi. Nell'unità U3, ad esempio, si arriva addirittura ad $FD = 90\%$ ad Agosto. All'ultimo piano, invece, la frequenza di discomfort diviene trascurabile, con valori massimi del 10% nell'unità U3 ad Agosto.

Al contrario, il modello di Fanger continua ad indicare frequenze di discomfort molto elevate in tutti i piani, ed in molti casi prossime al 100% . Anche nei mesi di Giugno e Settembre le frequenze sono rilevanti. Secondo il modello di Fanger, dunque, anche nello stato di progetto gli impianti di climatizzazione estiva dovrebbero restare in funzione costantemente durante i mesi più caldi ed in buona parte degli altri mesi.

Infine, la presenza della ventilazione notturna risulta anche in questo caso benefica secondo il modello adattivo (Figura 52), annullando in tutte le unità la Frequenza di Discomfort a meno dell'unità U3 del piano intermedio, in cui comunque rimangono valori modesti persino nei mesi più caldi ($FD < 15\%$). Al contrario, secondo il modello di Fanger si continuerebbero ad avere valori di FD prossimi al 100% a Luglio ed Agosto, e valori non trascurabili a Giugno e Settembre.

In conclusione, i risultati sin qui ottenuti riguardo alla temperatura operativa, all'intensità e alla frequenza del discomfort dimostrano la necessità di sfruttare opportune strategie di ventilazione notturna per migliorare le condizioni di comfort estivo all'interno dei locali.

Ciò diventa particolarmente rilevante nel caso in cui siano applicati gli interventi di isolamento termico volti a rendere l'edificio in esame un net-ZEB. In questo caso, infatti, i locali dei piani intermedi – e specialmente quelli con esposizione Sud ed Est – soffrirebbero di un notevole surriscaldamento in assenza di ventilazione notturna, con Frequenze di Discomfort superiori al 50% a Luglio e ad Agosto.

L'isolamento termico della copertura migliora invece le condizioni di comfort nei locali dell'ultimo piano, abbassando la Frequenze di Discomfort al 10% nei locali esposti a Sud per il mese più sfavorito (Agosto) ed annullandola altrove. I locali dell'ultimo piano non necessiterebbero quindi di ventilazione notturna: essa rimane comunque una strategia valida per abbassare ulteriormente le temperature operative.

Infine, il comfort termico durante i mesi di Maggio e Ottobre non è compromesso dalle ipotesi di ristrutturazione proposte, quindi non sarà necessario utilizzare sistemi attivi per la climatizzazione in questi mesi in cui è lecito supporre che essi siano spenti.

E' però opportuno ricordare che tali conclusioni si basano sull'adozione del modello adattivo per la determinazione del comfort termico. Il modello di Fanger restituisce invece risultati molto meno lusinghieri, segnalando frequenze di discomfort elevatissime in tutti i mesi estivi, anche in presenza di ventilazione notturna. Il modello adattivo è però ormai ampiamente riconosciuto a livello normativo internazionale, ed è assolutamente coerente con le modalità di occupazione dell'edificio in esame. Infatti, è verosimile supporre che gli occupanti siano liberi di modificare il proprio abbigliamento o aprire e chiudere le finestre. In tali circostanze le condizioni termigrometriche interne ai locali sono dunque accettabili.

7 Strategie di ventilazione

I risultati ottenuti nel capitolo precedente dimostrano la necessità di garantire la ventilazione notturna, cioè l'immissione di un'idonea portata d'aria esterna, per smaltire efficacemente il calore accumulato all'interno dei locali durante i mesi più caldi.

In prima approssimazione è stata ipotizzata nelle precedenti simulazioni una portata di ventilazione pari a due ricambi orari ($n = 2 \text{ h}^{-1}$). E' adesso necessario comprendere in che modo si possa garantire tale risultato: per questo motivo, sono state messe a punto ulteriori simulazioni, tenendo conto di diverse possibili modalità di apertura delle finestre da parte degli occupanti.

Il regime di ventilazione che si instaura in un locale in seguito all'apertura delle finestre è strettamente legato alla percentuale di superficie finestrata aperta, nonché alla collocazione ed al numero di aperture. In tal senso, è possibile individuare due principali schemi di ventilazione: *single-sided ventilation* e *cross ventilation* (Figura 53). Nel primo caso si presuppone la presenza di un'unica finestra, attraverso cui ha luogo sia l'ingresso sia l'uscita dell'aria; nel secondo caso, invece, si ipotizza la presenza di più aperture poste su pareti diverse, anche in diversi locali, a patto che le porte intermedie siano aperte e permettano il transito del flusso d'aria da una stanza all'altra.

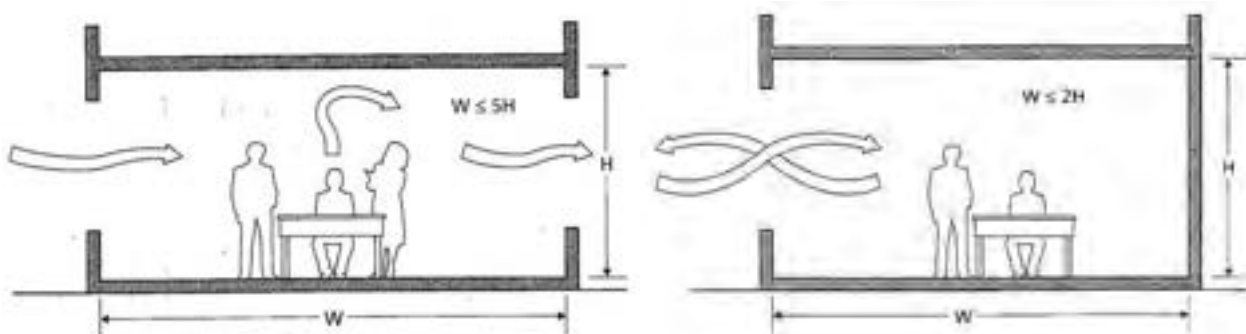


Figura 53. Esempi di cross ventilation (a sinistra) e single-sided ventilation (a destra)

Le nuove simulazioni tengono conto di entrambi i regimi di ventilazione, per valutare quali percentuali di apertura delle finestre siano necessarie per ottenere i ricambi orari desiderati. EnergyPlus è infatti in grado, in funzione della quota di un'apertura, della sua dimensione, della direzione e della velocità istantanea del vento, di calcolare la portata d'aria che verrà immessa attraverso di essa secondo entrambi gli schemi di ventilazione.

In ogni caso si presuppone che la ventilazione dei locali avvenga solo quando ricorrono opportune condizioni:

- Temperatura interna non inferiore ai 23 °C;
- Temperatura esterna minore della temperatura interna;
- Velocità del vento non superiore a 3 m/s.

Tali condizioni hanno l'obiettivo di simulare il comportamento degli occupanti, che chiuderebbero le finestre qualora la temperatura interna fosse troppo bassa o in presenza di eccessiva ventosità.

In Figura 54 sono riportati i ricambi orari medi che si generano, piano per piano, all'interno dei quattro locali selezionati con differenti esposizioni, secondo le simulazioni effettuate nell'ipotesi di cross ventilation. I diagrammi proposti si riferiscono a percentuali di apertura delle finestre differenti, rispettivamente 10 % e 5 %. Il numero dei ricambi orari aumenta nei piani superiori, in virtù della proporzionalità tra altezza e velocità del vento. La percentuale di apertura corrispondente al 10 % fornisce ricambi orari eccessivi, soprattutto nei locali con esposizione Nord e Sud, raggiungendo valori medi anche dell'ordine di 5 h^{-1} . Si ritiene dunque più significativa la simulazione che prevede un'apertura del 5 %.

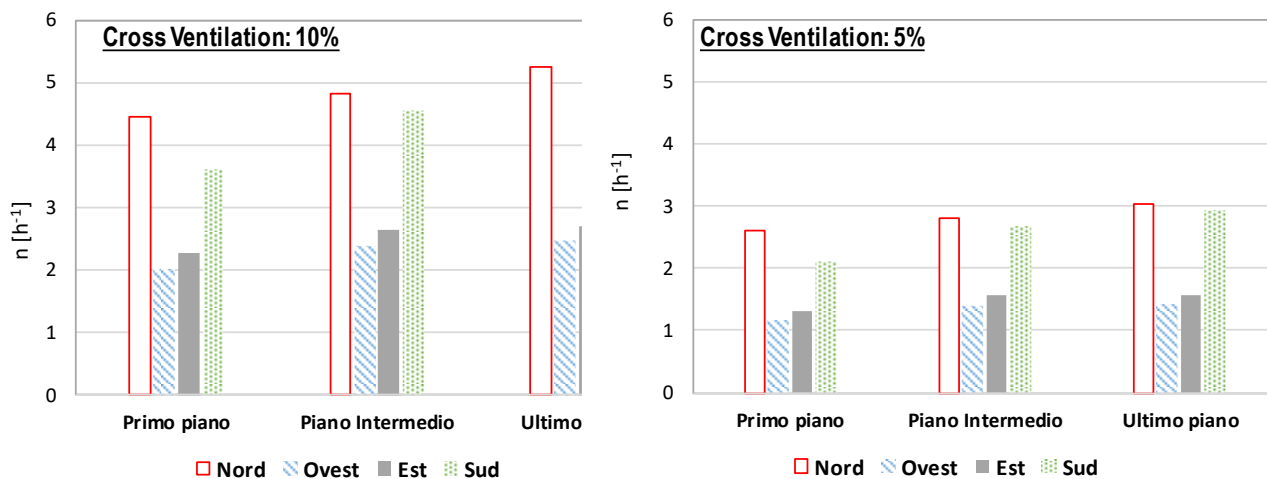


Figura 54. Ricambi orari medi realizzati in cross ventilation.

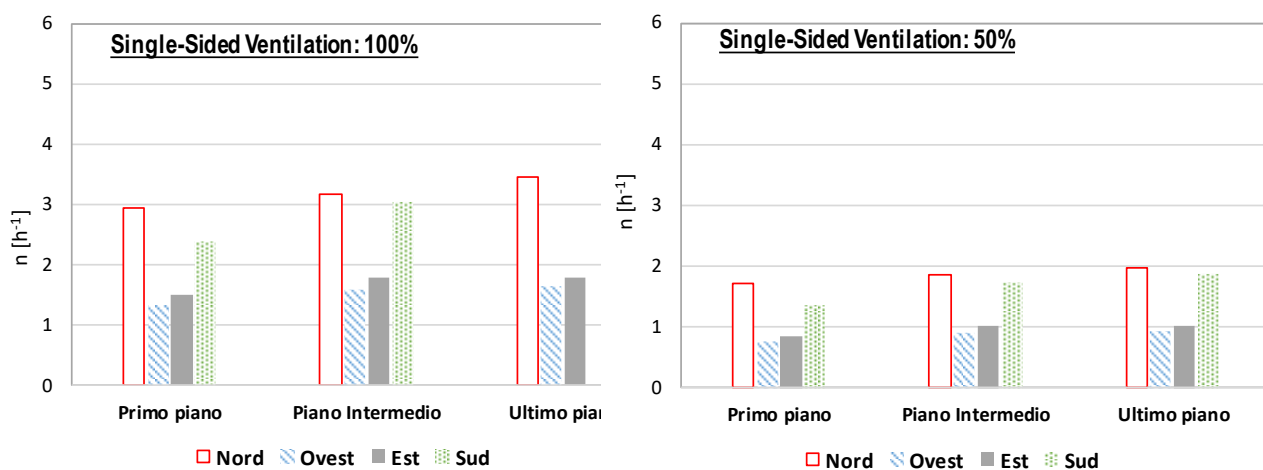


Figura 55. Ricambi orari medi realizzati in single-sided ventilation.

Nel caso di single-sided ventilation, invece, è stata ipotizzata una maggiore percentuale di apertura delle finestre (50 % e 100 %). I risultati sono diagrammati in Figura 55: rispetto al caso precedente la portata di ventilazione è in questo caso più modesta, ma comunque in linea con le ipotesi effettuate al capitolo 6. Nel caso di apertura al 100 % si raggiungono al massimo i tre volumi orari per i locali esposti a Nord.

E' bene sottolineare come, in entrambi i diagrammi, nei locali esposti ad Est e Ovest il numero dei ricambi orari sia più basso rispetto alle altre esposizioni: in base alla geometria dell'edificio e alla direzione principale dei venti nel sito, non si può dunque individuare un'unica percentuale di apertura delle finestre che determini la stessa portata d'aria in ingresso per tutti i locali.

Da questa indagine è possibile evincere che le strategie ottimali di apertura delle finestre per la ventilazione notturna prevedono una percentuale di apertura del 5 % in cross ventilation, ed una percentuale compresa tra il 50 % ed il 100 % in single-sided ventilation. Ai fini dello studio del comfort termico, i cui risultati sono esposti di seguito, si considererà una percentuale del 75 %.

Dopo avere individuato le strategie di ventilazione notturna più opportune, in virtù delle quali si riescono a conseguire ricambi d'aria dell'ordine di due volumi l'ora, sono state ricalcolate le temperature operative, e di seguito l'ITD e la frequenza del discomfort.

In questa trattazione ci si limita a riportare i risultati ottenuti per i locali del piano intermedio esposti a sud. Si è già dimostrato, infatti, che solo questi locali presentano importanti problemi di surriscaldamento e discomfort nell'edificio soggetto a ristrutturazione importante, e richiedono opportune strategie di ventilazione notturna.

Gli istogrammi di Figura 56 riassumono i valori dell'ITD per i due appartamenti esposti a sud del piano intermedio (U2 e U3), mettendo a confronto i risultati dello stato di progetto in assenza di strategie di ventilazione, in presenza di cross ventilation (5% di apertura) e di single-sided ventilation (75% di apertura). I diagrammi forniscono anche il valore della frequenza del discomfort FD per il mese di Agosto.

L'ITD per lo stato di progetto e in assenza di ventilazione notturna è elevato per entrambe le unità abitative, con valori rispettivamente di 2000 e 4000 °C·h. Le strategie di ventilazione proposte abbassano l'intensità del discomfort di oltre il 90 %: ad esempio, nell'unità U3 in cross ventilation si ottiene un ITD = 93 °C·h, mentre in single-sided ventilation si ha ITD = 140 °C·h. Anche la frequenza del discomfort, calcolata nel mese di Agosto, è molto elevata in assenza di ventilazione (FD = 89 % in U3), ma diventa trascurabile negli altri casi in entrambi gli appartamenti.

In Figura 57 sono riportati i profili della temperatura operativa in un locale esposto a sud del piano intermedio dello stato di progetto, nei tre regimi di ventilazione analizzati. Coerentemente con i risultati sull'intensità del discomfort, la ventilazione consente di abbassare il profilo della temperatura operativa. In assenza di ventilazione notturna, infatti, la temperatura sarebbe sempre superiore alla soglia della seconda categoria del comfort. Negli altri due casi, invece, le temperature si abbassano di circa 2 °C, con picchi di circa 32 °C, e le curve sono quasi sempre interne al range della seconda categoria.

Il riferimento al modello di Fanger invece, suggerisce ancora che ad Agosto è necessario fare impiego degli impianti tecnici per la climatizzazione estiva, anche quando si sfrutti la ventilazione notturna.

Il risultato più importante cui si perviene in seguito alle nuove analisi è che, in presenza delle strategie di ventilazione descritte, anche nei mesi più caldi è possibile raggiungere condizioni termiche accettabili ai fini del confort termico. In ogni caso, negli altri mesi e in tutti i locali degli altri piani, il comfort viene garantito sempre anche in assenza di particolari accorgimenti sulla ventilazione estiva.

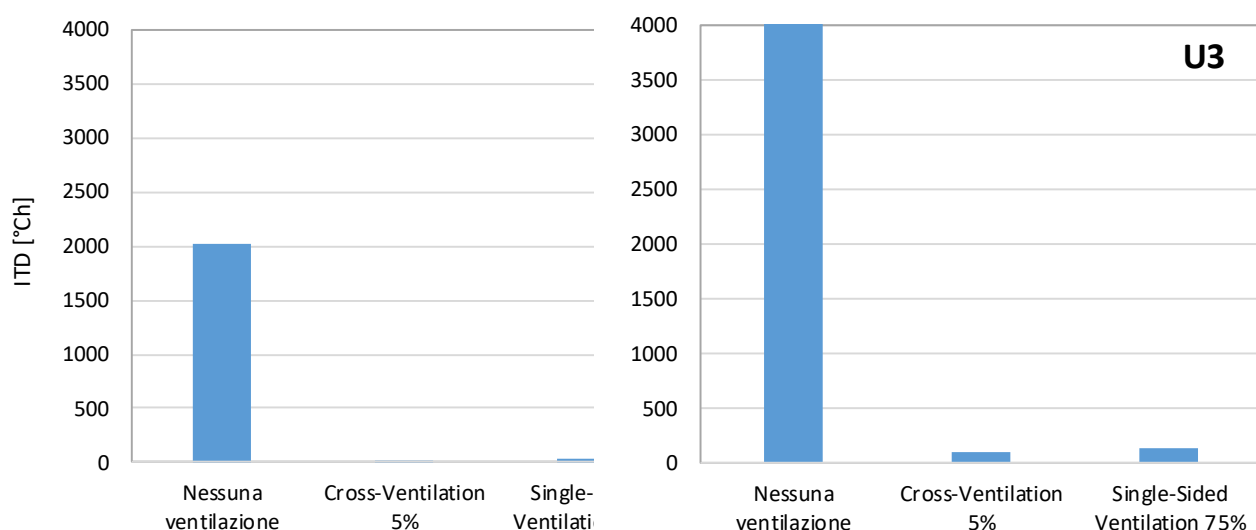


Figura 56. Confronto dell'ITD per lo stato di progetto per le diverse strategie di ventilazione (piano intermedio)

	U2	U3
Nessuna ventilazione	57 %	89 %
Cross Ventilation	1 %	4 %
Single-Sided Ventilation	1 %	5 %

Tabella 29. Frequenza del discomfort durante il mese di Agosto per le diverse strategie di ventilazione

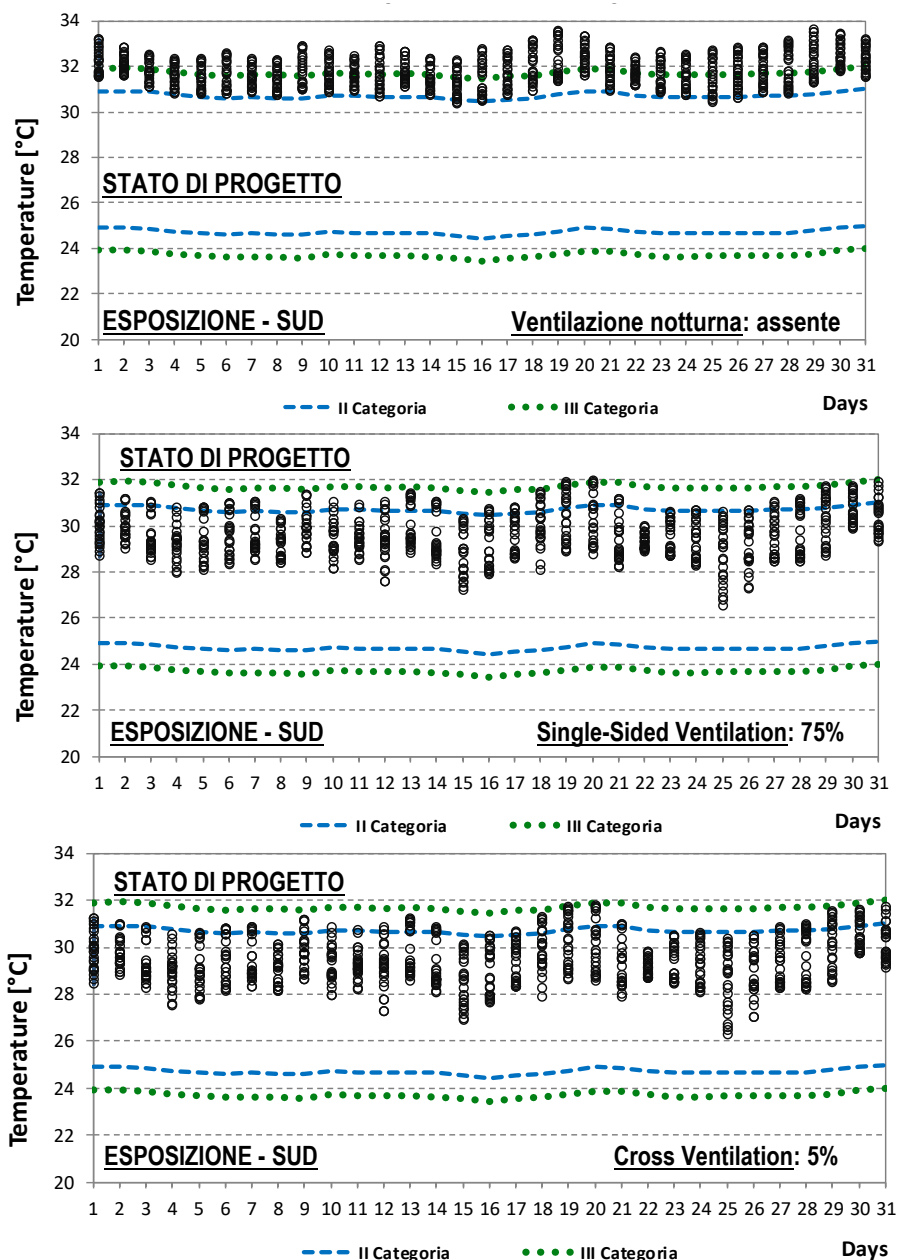


Figura 57. Andamento della temperatura operativa (stato di progetto, piano intermedio, esposizione Sud)

8 Il ruolo dello spessore di isolante

Le proposte di ristrutturazione, descritte al Capitolo 2, prevedono interventi sull'involucro edilizio, quali l'isolamento delle chiusure verticali ed orizzontali e la sostituzione degli infissi. In particolare, per le chiusure verticali esterne è stato previsto l'utilizzo di isolante in fibra di legno da applicare a cappotto sul lato esterno della parete. Lo spessore di isolante adottato è di 10 cm, grazie al quale il valore della trasmittanza U delle pareti esterne si riduce a $0.36 \text{ W/m}^2\text{K}$; tale spessore è necessario per soddisfare tutte le verifiche imposte dal DM 26/6/2015 per il raggiungimento dello standard nZEB.

Bisogna comunque osservare che un ulteriore aumento dello spessore dell'isolante comporterebbe il miglioramento delle prestazioni energetiche in regime invernale, ma anche il peggioramento della performance estiva, che si manifesta soprattutto nell'aumento del fabbisogno di energia utile per il raffrescamento ($EP_{c,nd}$).

Ad esempio, a parità di tutti gli altri interventi proposti, qualora si adottasse uno spessore di 14 cm di lana di legno la trasmittanza si abbasserebbe a $0.28 \text{ W/m}^2\text{K}$, ma non tutte le unità abitative dell'edificio verificherebbero i requisiti nZEB poiché verrebbe meno, appunto, la verifica sul parametro $EP_{c,nd}$.

Il peggioramento delle prestazioni estive trova conferma nelle analisi sul comfort termico riepilogate in Figura 58 e in Figura 59. È stata, infatti, calcolata l'intensità del discomfort termico (Figura 58) in tutti gli alloggi dell'edificio ristrutturato, a differenti spessori di isolante: 10 cm e 14 cm. Si ricorda che i risultati con spessore di 10 cm sono quelli analizzati al Capitolo 6.

In entrambi i casi, l'intensità del discomfort è trascurabile all'ultimo piano, ed aumenta invece al primo piano e nei piani intermedi. Tra le quattro unità abitative di ogni piano, l'appartamento U3 è quello in cui si generano le condizioni peggiori. Il risultato più interessante, in questo contesto, è comunque il sistematico aumento dell'ITD causata dal maggiore spessore di isolante: l'aumento è di circa il 12 % nell'unità U3, e di circa il 20 % per l'appartamento U2.

La frequenza del discomfort (Figura 59), in linea con l'ITD, aumenta sistematicamente con lo spessore di isolante durante i mesi più caldi in tutti i piani. Tale aumento è particolarmente rilevante al piano tipo, soprattutto nel mese di Agosto, in cui si registra una FD pari al 14 % circa nel caso in cui lo spessore sia 10 cm, e pari al 16 % nell'altro caso.

Durante i mesi intermedi, invece, la frequenza del discomfort e l'intensità del discomfort sono nulli ovunque: dunque, nonostante l'aumento di isolante provochi degli aumenti sistematici su ITD e FD durante la stagione estiva, nei mesi intermedi comunque permangono le condizioni per il comfort termico. In ogni caso, anche nei mesi di Maggio e Ottobre si riscontrano dei lievi aumenti delle temperature interne.

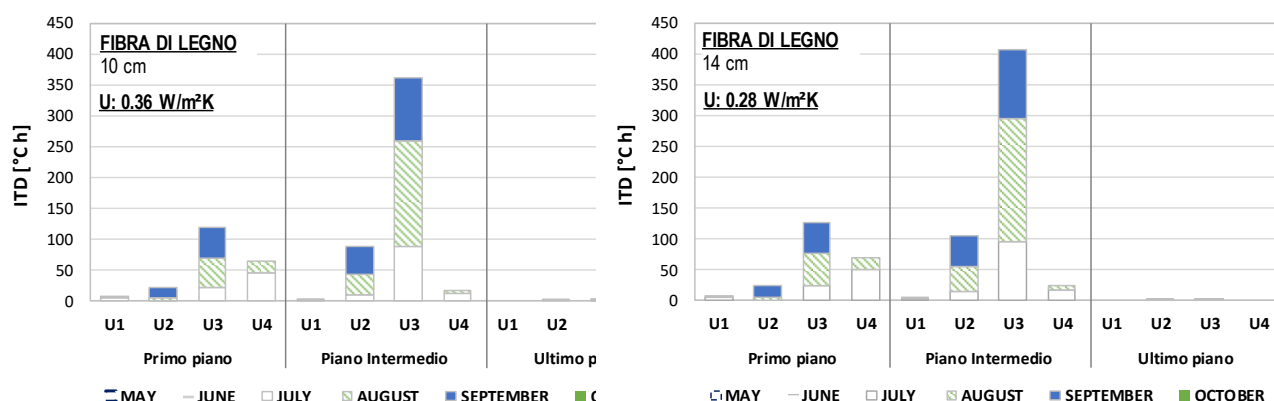


Figura 58. Valori di ITD per differenti spessori di isolante (10 cm e 14 cm)

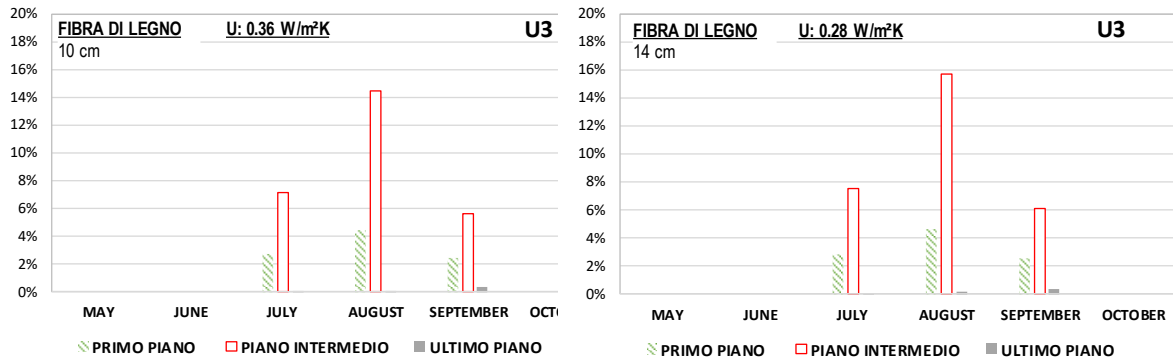


Figura 59. Frequenza del discomfort termico (stato di progetto con 10 cm e 14 cm di isolante)

Dalla Figura 60 emerge come in ogni caso i due profili della temperatura operativa, corrispondenti ai casi con 10 cm e 14 cm di isolante, siano al di sotto della soglia limite della seconda categoria individuata dal modello adattivo. La variazione dello spessore, rispetto al caso iniziale con 10 cm, comporta però un aumento sistematico dei valori della temperatura (in media, di circa $0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

Impiegare un isolante di spessore maggiore influenza anche il costo totale dell'investimento, poiché aumenta il costo unitario del materiale utilizzato. Si è stimato a grandi linee che impiegare lo stesso isolante ma di uno spessore maggiore comporti un aumento del 14% sul costo totale dell'intervento sulle chiusure verticali esterne.

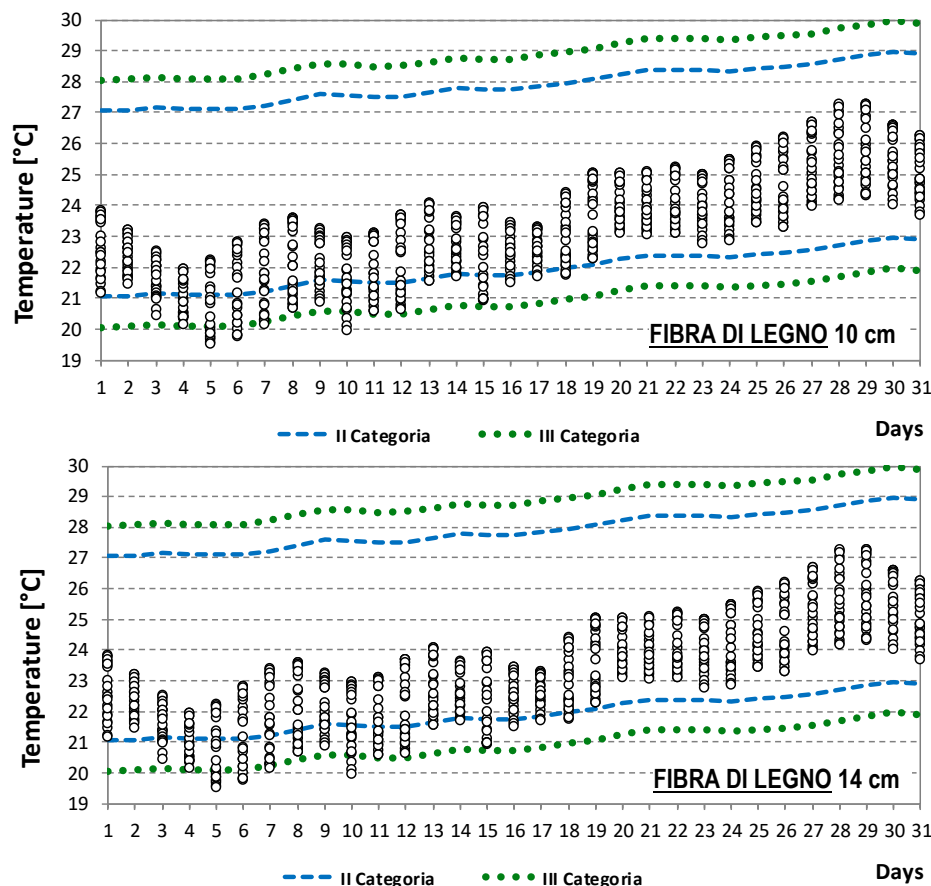


Figura 60. Temperatura operativa nel mese di Maggio con differenti spessori di isolante (10 cm e 14 cm)

9 Conclusioni

Lo studio descritto nel presente documento è relativo ad una proposta di intervento di ristrutturazione importante di primo livello per un edificio residenziale di proprietà pubblica sito in Catania (zona climatica B). L'edificio in esame, costruito nei primi anni '60 e costituito da un'ossatura in calcestruzzo armato e muratura di mattoni di cemento, presenta allo stato attuale delle prestazioni energetiche scadenti, legate principalmente ad un involucro non isolato e caratterizzato da trasmittanze molto elevate. Alle basse prestazioni contribuiscono anche gli infissi, poco performanti, costituiti da vetro singolo e alluminio senza taglio termico. A partire dalla valutazione delle condizioni attuali sono state individuate alcune proposte di intervento, grazie alle quali è possibile trasformare l'edificio in esame in un *edificio a energia quasi zero* (nZEB), in conformità con il Decreto 26/06/2015.

Le ipotesi progettuali prevedono:

1. Isolamento delle chiusure verticali esterne tramite cappotto termico realizzato con pannelli in fibra di legno di spessore 100 mm;
2. Isolamento delle chiusure verticali verso il vano scala tramite controparete in cartongesso da 13 mm con pannelli in fibra di legno di spessore 20 mm, da realizzare da ambo i lati;
3. Isolamento del solaio di copertura tramite pannelli di polistirene espanso estruso da 50 mm;
4. Isolamento delle chiusure orizzontali interpiano tramite controsoffitti in cartongesso con pannelli in fibra di legno di spessore 30 mm;
5. Sostituzione degli attuali serramenti con nuovi serramenti aventi telaio in PVC e vetrocamera con lastra interna basso-emissiva ($\epsilon \leq 0,05$);

Grazie al software EnergyPlus per la simulazione dinamica, è stato possibile poi valutare il comfort termico interno ai locali sia nello stato attuale che in seguito alle ipotesi di intervento effettuate. Tale analisi permette di comprendere in che misura gli interventi proposti incidano sulle condizioni interne compromettendo la vivibilità degli ambienti.

E' infatti noto che l'isolamento dell'involucro edilizio ne migliora le prestazioni invernali, ma può avere come conseguenza un eccessivo surriscaldamento interno, soprattutto nei mesi intermedi (Maggio ed Ottobre), rendendo pertanto necessario l'utilizzo di impianti di climatizzazione anche in periodi in cui si presuppone che questi non siano richiesti. Il periodo estivo è quello che risente negativamente delle nuove condizioni di isolamento e, pertanto, è quello considerato per le valutazioni effettuate in questa trattazione.

Preliminarmente alla simulazione è stato necessario effettuare alcune ipotesi, in quanto per gli edifici residenziali con utenza eterogenea non sono noti con certezza i valori di parametri quali l'occupazione dei locali, il calore endogeno o la temperatura degli ambienti non climatizzati. Questi termini sono stati quindi sottoposti ad analisi di sensitività, dalla quale è emerso che la loro incidenza sui risultati è trascurabile se paragonata al ruolo delle caratteristiche costruttive dell'involucro. Non è trascurabile invece l'impatto dell'edificio adiacente, posto ad Ovest di quello esaminato e che costituisce un elemento ombreggiante. In tal modo la facciata esposta ad Ovest non riceve la radiazione solare diretta, comportandosi di fatto come se fosse esposta a Nord.

Le simulazioni dinamiche richiedono inoltre l'inserimento dei dati climatici del sito. I file climatici più comuni sono ricavati da misure sperimentali presso stazioni meteorologiche poste in periferia, in cui le condizioni climatiche sono spesso alquanto diverse da quelle che si verificano all'interno della città. I centri urbani sono influenzati dall'effetto isola di calore (UHI) in virtù del quale si raggiungono temperature esterne più elevate. Per tener conto di queste variazioni, i dati climatici sono stati modificati, tramite opportuni software, al fine di procedere con analisi più accurate e ottenere risultati più attendibili. Si è stimato quindi che l'impiego di file climatici corretti porti a valori differenti della temperatura operativa, con aumenti anche di 1 °C.

Il modello così individuato è stato sottoposto a validazione tramite misure sperimentali eseguite nel mese di Settembre all'interno di alcuni locali di un appartamento tipo, finalizzate al rilievo della temperatura dell'aria a bulbo secco. La strumentazione impiegata ha permesso di ricavare i profili della temperatura

interna e di confrontarli con quelli restituiti dalle simulazioni in EnergyPlus. Sebbene i profili derivanti dalle misure sperimentali descrivano con maggiore esattezza i picchi di temperatura diurni e i minimi notturni, i profili ottenuti dalla simulazione descrivono con sufficiente dettaglio l'andamento della temperatura, con scarti non superiori a 0.5 °C e comunque confrontabili con l'incertezza degli strumenti di misura utilizzati. A questo punto, grazie alla validazione del modello, è stato possibile eseguire le simulazioni dinamiche dell'edificio individuando:

- I profili delle temperature operative di alcuni locali rappresentativi;
- L'intensità del discomfort termico per le varie unità immobiliari;
- La frequenza di discomfort termico.

Dal confronto tra i profili delle temperature operative per lo stato attuale e per lo stato di progetto è emerso che gli interventi proposti modificano il comportamento dell'edificio in regime estivo. In particolare, l'applicazione dell'isolante in copertura limita gli effetti del surriscaldamento prodotto dalla radiazione solare incidente, determinando una riduzione della temperatura operativa nei locali dell'ultimo piano anche dell'ordine di 2 °C. Negli altri piani invece, in seguito alle soluzioni proposte, si assiste ad un sensibile aumento delle temperature operative, dell'ordine di 0.5 °C.

L'interpretazione dei risultati però dipende anche dalla scelta di un modello per la valutazione del comfort termico. Tra i modelli esistenti, i più comuni sono quello di Fanger e quello adattivo, fondati su aspetti fisiologici e comportamentali che tengono conto della sensibilità dei soggetti coinvolti.

Il modello di Fanger individua una temperatura operativa ottimale da garantire all'interno dei locali pari a 26°C. Il modello adattivo, invece, parte dalla considerazione che le persone possano adattarsi alla variazione delle condizioni termoisometriche se lasciate libere di modificare il proprio vestiario o il proprio grado di attività, o di controllare la ventilazione tramite l'apertura delle finestre. Ragionando in tali termini è possibile per l'occupante, ai fini del comfort, accettare un più ampio range di temperature interne.

Nella verifica delle condizioni per il comfort termico, il riferimento ai due modelli porta a considerazioni diverse. Ad esempio, ragionando ancora in termini di temperatura operativa, durante i mesi più caldi è sempre superato, ovunque e per qualsiasi esposizione, il limite di 26 °C imposto dal modello di Fanger. Alla luce di questo modello, il comfort non sarebbe mai garantito e risulterebbe sempre necessario fare uso di sistemi attivi per il raffrescamento.

Le soglie per il comfort individuate dal modello adattivo risultano invece meno stringenti. Di conseguenza, nei locali esposti a Nord, Est e Ovest i valori della temperatura operativa rimangono molto frequentemente all'interno della fascia di comfort, mentre solo nei locali a Sud le temperature sono spesso abbondantemente superiori alla suddetta soglia, con picchi di 34 °C.

Durante i mesi intermedi, sia in riferimento al modello adattivo che a quello di Fanger, per buona parte del tempo le temperature sembrano garantire il comfort interno ai locali.

In base ai risultati ottenuti, particolarmente sfavorevoli per i locali esposti a Sud in cui si raggiungono temperature operative elevate, sono state ipotizzate delle strategie di ventilazione notturna con l'obiettivo di migliorare il comfort termico. E' lecito supporre infatti, coerentemente con il modello adattivo, che gli occupanti provvedano all'apertura delle finestre durante le ore più fresche per favorire il raffrescamento degli ambienti.

Sono state definite quindi nuove simulazioni, nell'ipotesi in cui durante la notte si abbia una portata d'aria esterna in ingresso costante e pari a due volumi orari. Questa soluzione comporta notevoli miglioramenti nei locali esposti a Sud, in cui la temperatura operativa si riduce anche di 2 °C rispetto al caso in cui non si preveda la ventilazione notturna. In questa configurazione è possibile impiegare i sistemi attivi per il raffrescamento solo per brevi periodi durante i mesi più caldi (15 % del tempo circa). Tale considerazione deriva dal riferimento al modello adattivo: il modello di Fanger suggerisce piuttosto un uso ridotto degli impianti nei mesi intermedi ma molto frequente durante la stagione estiva.

La portata d'aria in ingresso ipotizzata è però associata alle modalità di apertura delle finestre messe in atto da parte degli occupanti. È stato stimato che un ricambio di 2 volumi orari si genera con percentuali di apertura diverse a seconda del regime di ventilazione. Ad esempio, in regime di cross ventilation, cioè nel

caso in cui siano presenti più aperture poste in pareti diverse, si richiedono percentuali di apertura contenute, dell'ordine del 5 %. Diversamente, la single-sided ventilation – che presuppone la presenza di un'unica finestra attraverso cui ha luogo sia l'ingresso che l'uscita dell'aria – richiede percentuali di apertura molto elevate, anche del 75 %.

Infine, sono state effettuate ulteriori considerazioni in merito allo spessore d'isolante. La proposta di intervento prevede l'utilizzo della fibra di legno di spessore 10 cm, da applicare a cappotto sulle chiusure verticali esterne. Un eventuale aumento dello spessore di isolante abbasserebbe la trasmittanza: aumentando di 4 cm lo spessore si passa da valori di 0.36 W/m²K a 0.28 W/m²K.

Se ciò migliora la situazione durante l'inverno, di contro la peggiora in estate: infatti, aumenta in maniera non trascurabile la frequenza del discomfort. Inoltre va ricordato che l'aumento dello spessore di isolante comporta aumenti del costo totale dell'investimento, e che variando lo spessore di isolante si corre il rischio di compromettere la verifica sul fabbisogno di energia utile per il raffrescamento. Per questo motivo, in zona climatica B non risulta conveniente spingersi oltre determinati spessori.

10 Riferimenti bibliografici

1. Decreto Interministeriale del 26 giugno 2015, "Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici".
2. Decreto Interministeriale del 26 giugno 2015, "Adeguamento del decreto del Ministro dello sviluppo economico, 26 giugno 2009 - Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici".
3. UNI TS 11300-1:2014. Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale.
4. UNI TS 11300-2:2014. Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l'illuminazione in edifici non residenziali.
5. J.F. Nicol, M.A. Humphreys, Thermal comfort as part of a self-regulating system, Proceedings of the CIB Symposium on Thermal Comfort, Watford, UK: Building research Establishment, 1972.
6. R.J. de Dear, G.S. Brager, Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55, *Energy and Buildings*, 34 (2002), 549-561.
7. J.F. Nicol, M.A. Humphreys, Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings, *Energy and Buildings*, 34 (2002), 563-572.
8. ASHRAE Standard 55, 2004, Thermal Environmental Condition for Human Occupancy, Atlanta, ASHRAE Inc.
9. EN Standard 15251, 2007, Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics.

11 Abbreviazioni ed acronimi

a	coefficiente di assorbimento, -
A	area, m^2
C	calore Specifico, $J/(kg\ K)$
f_d	fattore di attenuazione, -
n	numero di ricambi orari, h^{-1}
Q	portata volumetrica, $m^3\ h^{-1}$
p	pressione, Pa
r	coefficiente di riflessione, -
R_T	resistenza termica, $m^2\ K/W$
s	spessore, m
t	coefficiente di trasmissione, -
T	temperatura, $^{\circ}C$
U	trasmittanza termica, $W/(m^2\ K)$
v	velocità del vento, $m\ s^{-1}$
V_n	volume netto, m^3
Y_{IE}	trasmittanza termica periodica, $W/(m^2\ K)$
ϕ	sfasamento, h
λ	conducibilità termica, $W/(m\ K)$
ρ	densità, kg/m^3

Autori

PROF. ING. LUIGI MARLETTA

E' Professore Ordinario di Fisica Tecnica Ambientale presso il Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Elettronica e Informatica (DIEEI) dell'Università degli Studi di Catania, dove insegna Fisica Tecnica presso il corso di laurea a ciclo unico in Ingegneria Edile-Architettura, e Sustainable Energy Conversion Techniques presso il corso di laurea specialistica in Ingegneria Chimica. E' stato Coordinatore del Dottorato Internazionale di Energetica dell'Università degli Studi di Catania.

Svolge attività di ricerca scientifica dal 1979 nel campo delle energie rinnovabili, della termofisica degli edifici, dell'acustica applicata e dell'illuminotecnica. Ha partecipato alla redazione del Piano Energetico Regionale della Regione Sicilia. E' stato *Invited Lecturer* presso l'Università del Comahue (Buenos Aires, Argentina), presso l'Università di Vienna e presso l'Università di Malta. E' delegato regionale dell'Associazione Italiana di illuminazione (AIDI), ed è stato delegato territoriale dell'Associazione Italiana del condizionamento dell'aria (AICARR). E' stato responsabile di progetti di ricerca CNR, PON, POR, ENEA, MURST 60% e 40%. E' autore di cinque opere didattiche e di oltre duecento comunicazioni a congressi e pubblicazioni scientifiche su riviste nazionali ed internazionali.

DOTT. ING. GIANPIERO EVOLA

E' Ricercatore di Fisica Tecnica Ambientale presso il Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Elettronica e Informatica (DIEEI) dell'Università degli Studi di Catania. Ha conseguito l'Abilitazione Nazionale per Professore di II fascia per il raggruppamento disciplinare ING-IND 11 (Fisica Tecnica Ambientale).

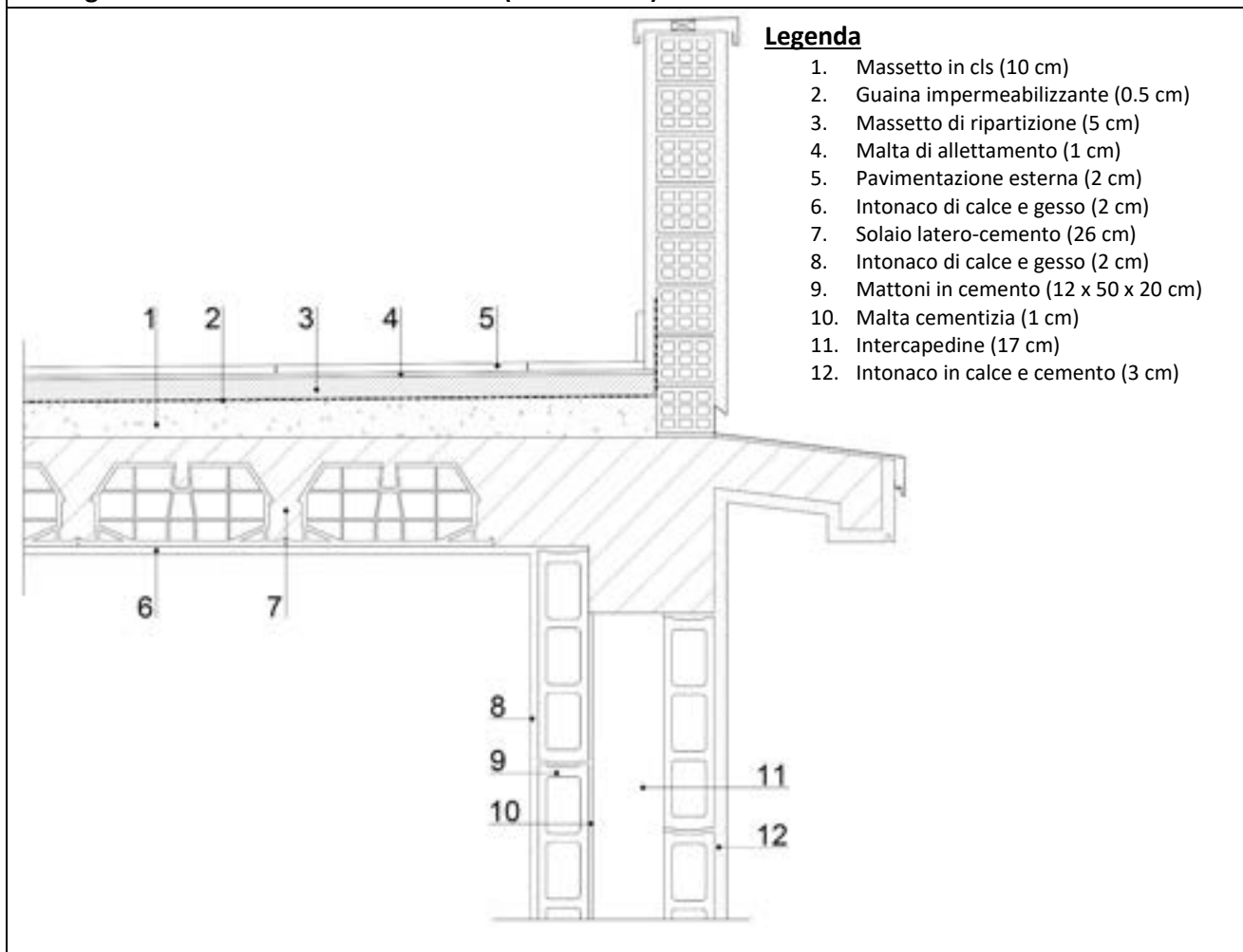
Ha svolto attività di ricerca, sia in Italia che presso istituti di ricerca esteri, su tematiche relative alle prestazioni energetiche dinamiche degli edifici e all'utilizzo delle energie rinnovabili in ambito residenziale. In particolare, si è occupato della modellazione dinamica di sistemi di climatizzazione elio-assistiti, delle performance di materiali a cambiamento di fase in edilizia, della costruzione di modelli matematici per lo studio del transitorio termico di pareti multistrato. Ha esperienza progettuale pluriennale nel campo dell'impiantistica termotecnica, nonché dell'acustica edilizia ed ambientale. E' autore di oltre quaranta lavori su riviste nazionali ed internazionali, e di quattro capitoli di libri sulle tematiche della Fisica Tecnica Ambientale.

ALLEGATO I

Dettagli costruttivi

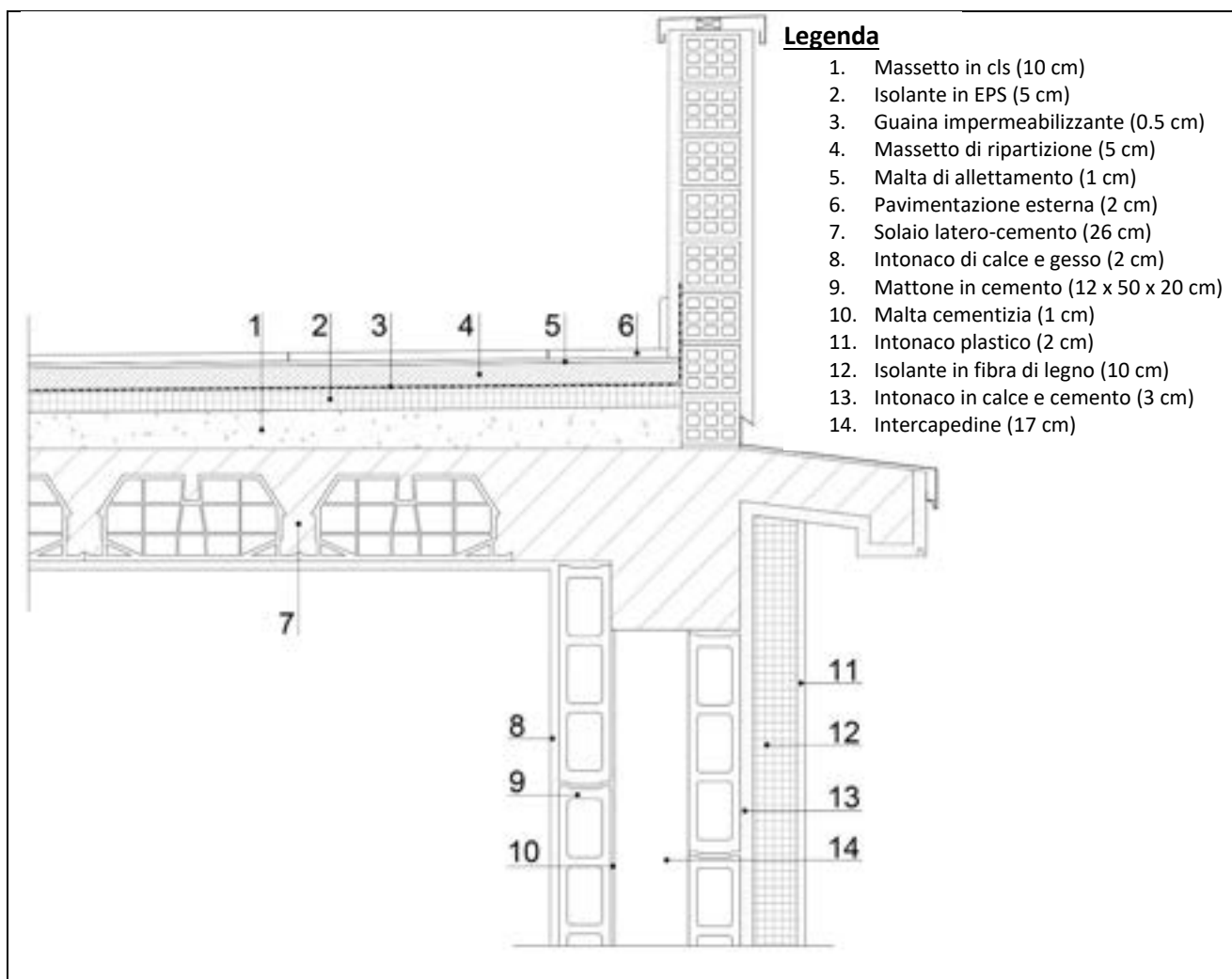
STATO DI FATTO

Dettaglio CHIUSURA VERTICALE ESTERNA (a "cassetta") - CHIUSURA ORIZZONTALE DI COPERTURA



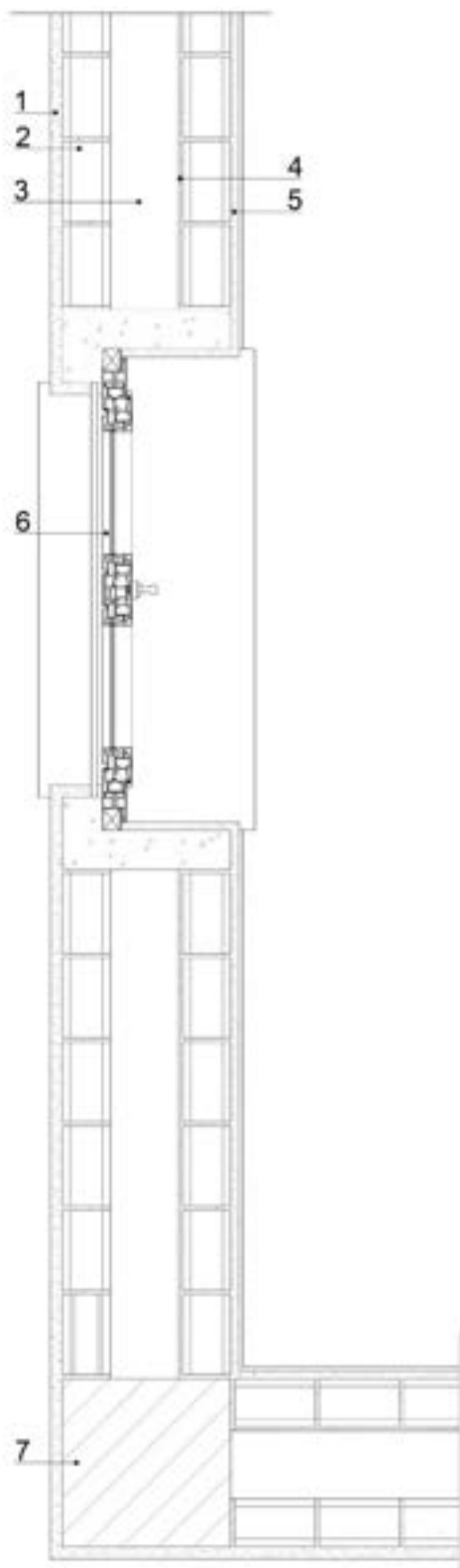
STATO DI PROGETTO

Dettaglio CHIUSURA VERTICALE ESTERNA (a "cassetta") - CHIUSURA ORIZZONTALE DI COPERTURA



STATO DI FATTO

CHIUSURA VERTICALE ESTERNA (a "cassetta") - INFISSO

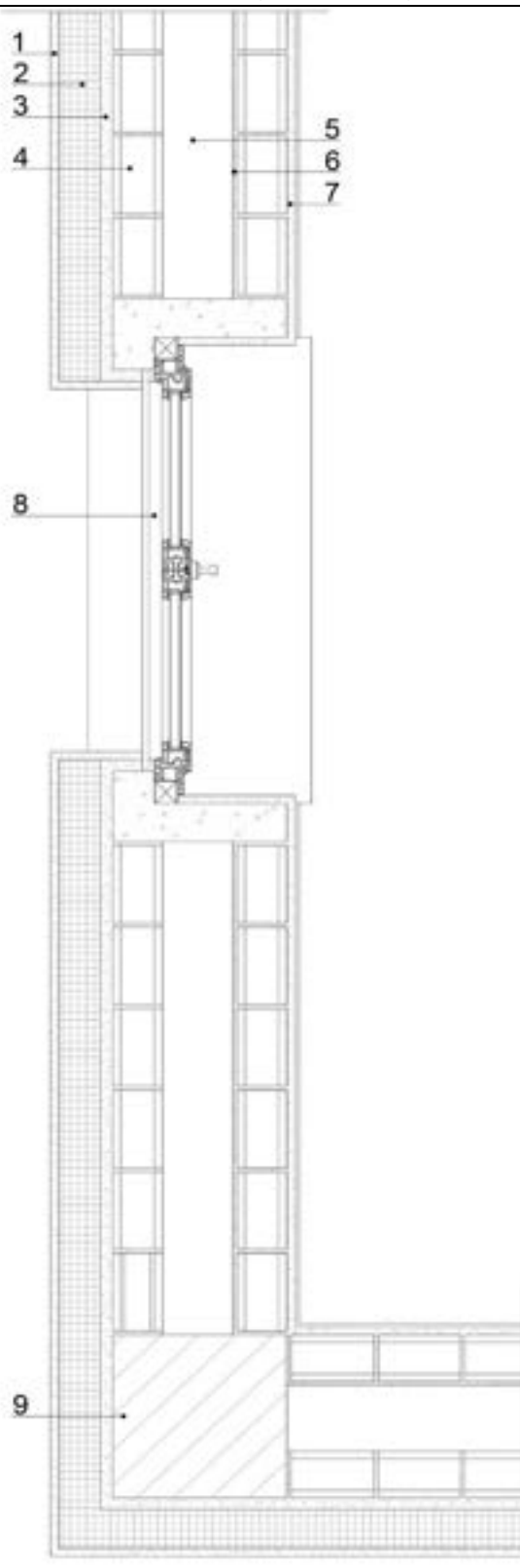


Legenda

1. Intonaco di calce e cemento (3 cm)
2. Mattone in cemento (12 x 50 x 20 cm)
3. Intercapedine (17 cm)
4. Malta cementizia (1 cm)
5. Intonaco interno in calce e gesso (2 cm)
6. Infisso in alluminio senza taglio termico e vetro semplice (4 mm)
7. Pilastro in cls

STATO DI PROGETTO

CHIUSURA VERTICALE ESTERNA (a "cassetta") - INFISSO

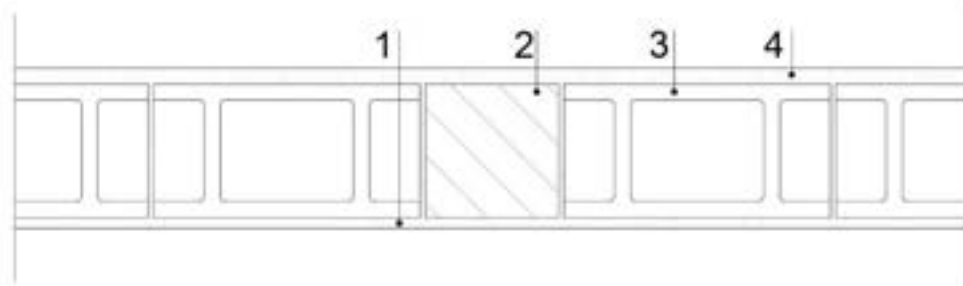


Legenda

1. Intonaco plastico per cappotto (2 cm)
2. Isolante in fibra di legno (10 cm)
3. Intonaco di calce e cemento (3 cm)
4. Mattone in cemento (12 x 50 x 20 cm)
5. Intercapedine (17 cm)
6. Malta cementizia (1 cm)
7. Intonaco interno in calce e gesso (2 cm)
8. Infisso in pvc e vetrocamera basso emissiva
9. Pilastro in cls

STATO DI FATTO

CHIUSURA VERTICALE ESTERNA (monostrato)

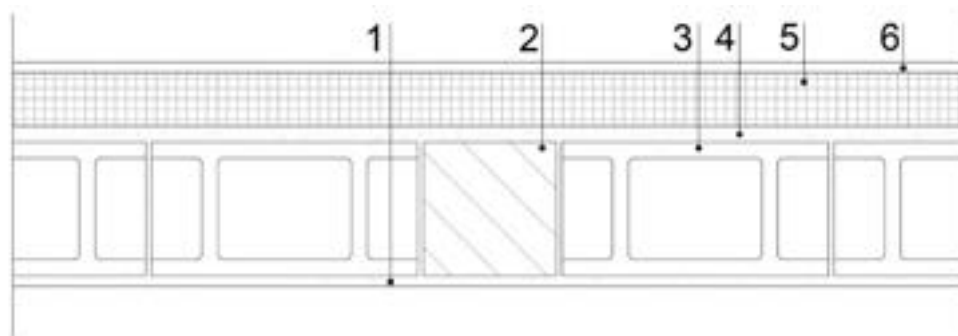


Legenda

1. Intonaco di calce e gesso (2 cm)
2. Pilastro in cls
3. Mattone in cemento (25 x 50 x 25 cm)
4. Intonaco di calce e cemento (3 cm)

STATO DI PROGETTO

CHIUSURA VERTICALE ESTERNA (monostrato)

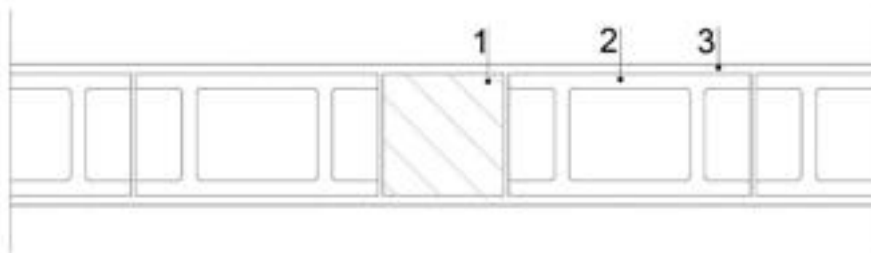


Legenda

1. Intonaco di calce e gesso (2 cm)
2. Pilastro in cls
3. Mattone in cemento (25 x 50 x 25 cm)
4. Intonaco di calce e cemento (3 cm)
5. Isolante in fibra di legno (10 cm)
6. Intonaco plastico per cappotto (2 cm)

STATO DI FATTO

CHIUSURA VERTICALE INTERMEDIA



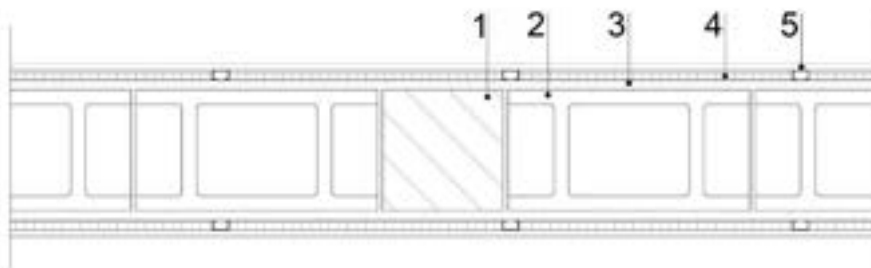
Legenda

1. Pilastro in cls
2. Mattone in cemento (25 x 50 x 25 cm)
3. Intonaco di calce e gesso (2 cm)

STATO DI PROGETTO

CHIUSURA VERTICALE INTERMEDIA

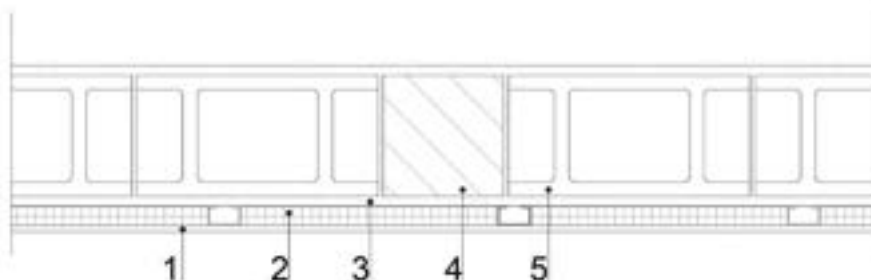
Tipologia A - Chiusura verticale di separazione tra unità immobiliari



Legenda

1. Pilastro in cls
2. Mattone in cemento (25 x 50 x 25 cm)
3. Intonaco di calce e gesso (2 cm)
4. Isolante in fibra di legno (2cm)
5. Lastre di cartongesso con struttura metallica di supporto (1.3 cm)

Tipologia B - Chiusura verticale verso ambienti non climatizzati

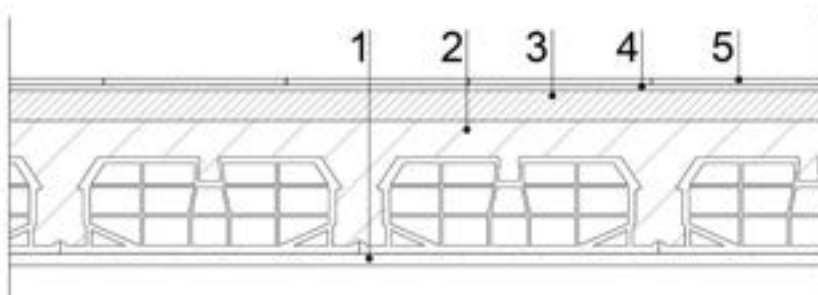


Legenda

1. Lastre di cartongesso con struttura metallica di supporto (1.3 cm)
2. Isolante in fibra di legno (4 cm)
3. Intonaco di calce e gesso (2 cm)
4. Pilastro in cls
5. Mattone in cemento (25 x 50 x 25 cm)

STATO DI FATTO

CHIUSURA ORIZZONTALE INTERMEDIA

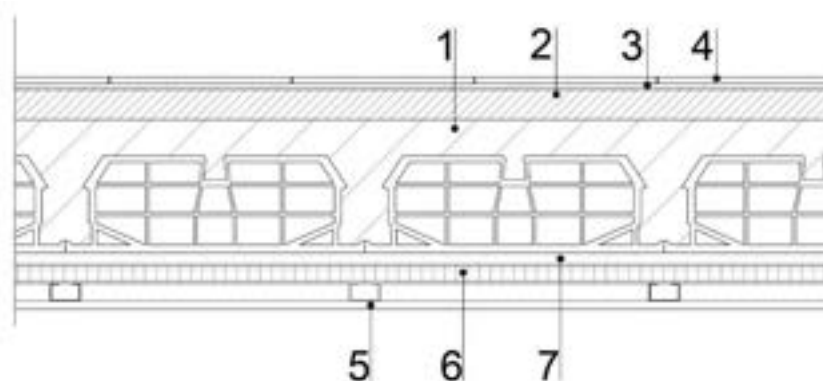


Legenda

1. Intonaco di calce e gesso (2 cm)
2. Solaio in latero-cemento (22 cm)
3. Massetto in cls (5 cm)
4. Malta di allettamento (1 cm)
5. Pavimentazione in marmo (1 cm)

STATO DI PROGETTO

CHIUSURA ORIZZONTALE INTERMEDIA



Legenda

1. Solaio in latero-cemento (22 cm)
2. Massetto in cls (5cm)
3. Malta di allettamento (1 cm)
4. Pavimentazione in marmo (1 cm)
5. Lastre di cartongesso con struttura metallica di supporto (1.3 cm)
6. Isolante in fibra di legno (3 cm)
7. Intonaco di calce e gesso (2 cm)

ALLEGATO II

Temperatura operativa nel mese di Agosto
PRIMO PIANO

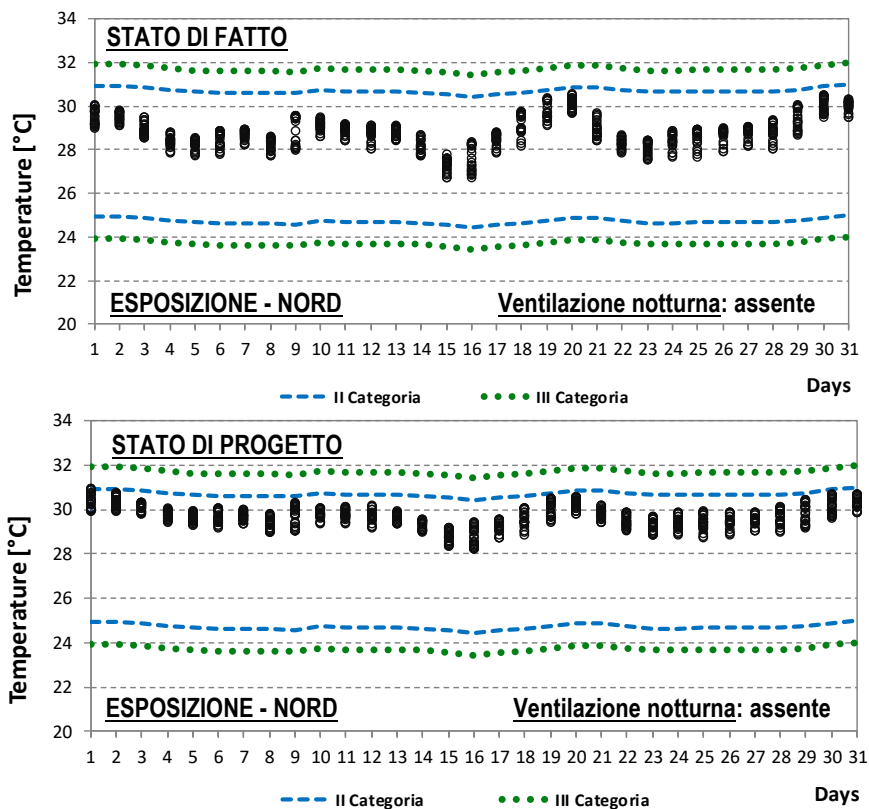


Figura A1. Temperatura operativa nel mese di Agosto (primo piano, esposizione Nord, ventilazione assente)

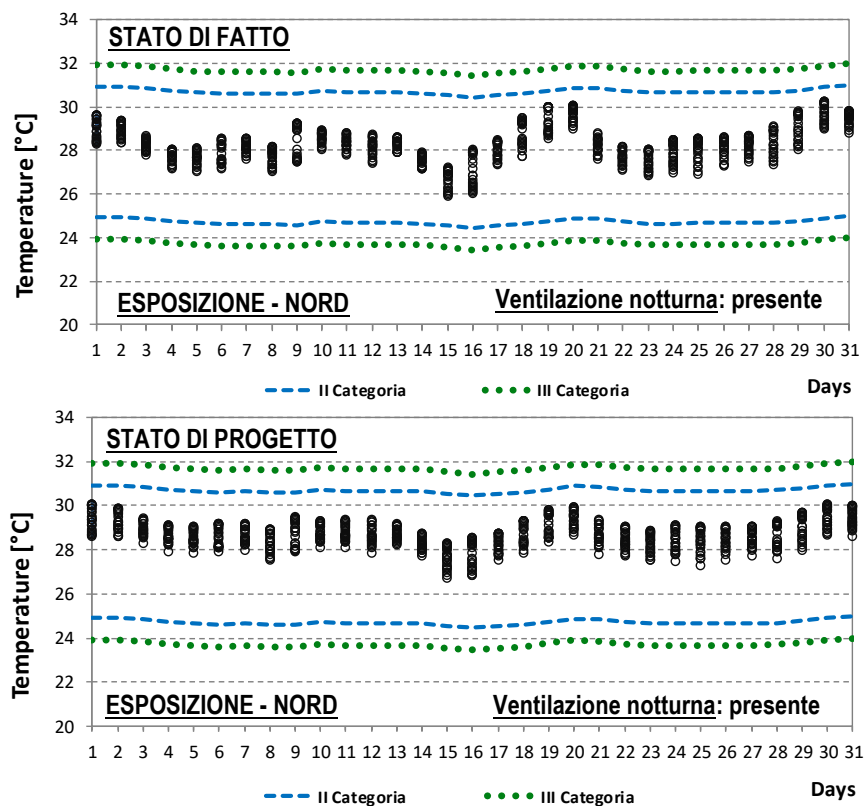


Figura A2. Temperatura operativa nel mese di Agosto (primo piano, esposizione Nord, ventilazione presente)

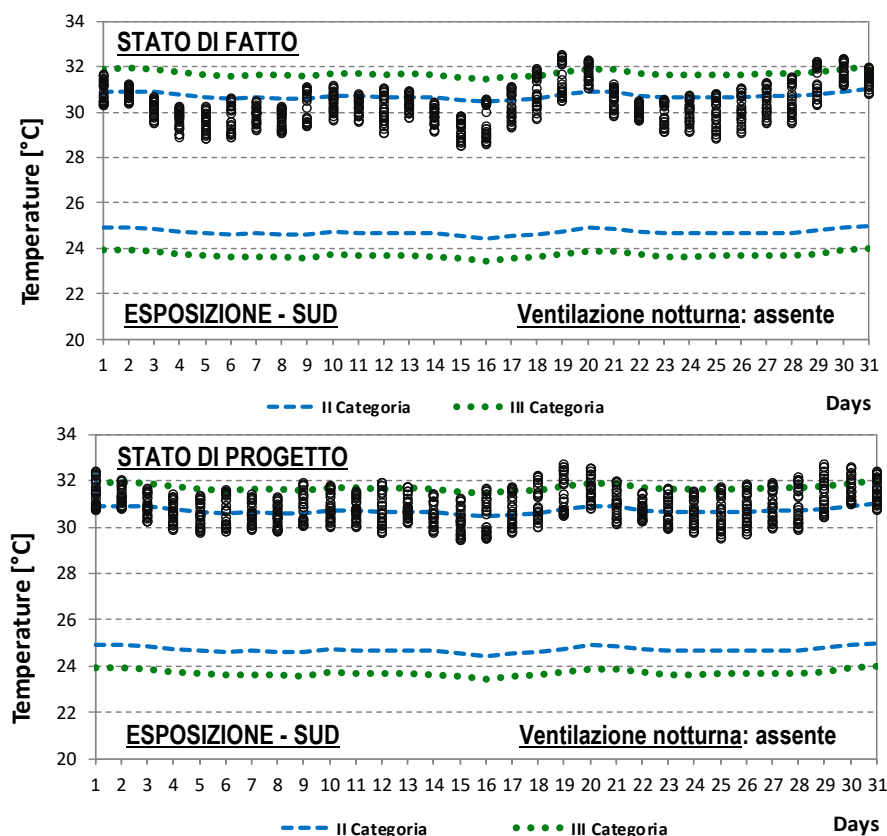


Figura A3. Temperatura operativa nel mese di Agosto (primo piano, esposizione Sud, ventilazione assente)

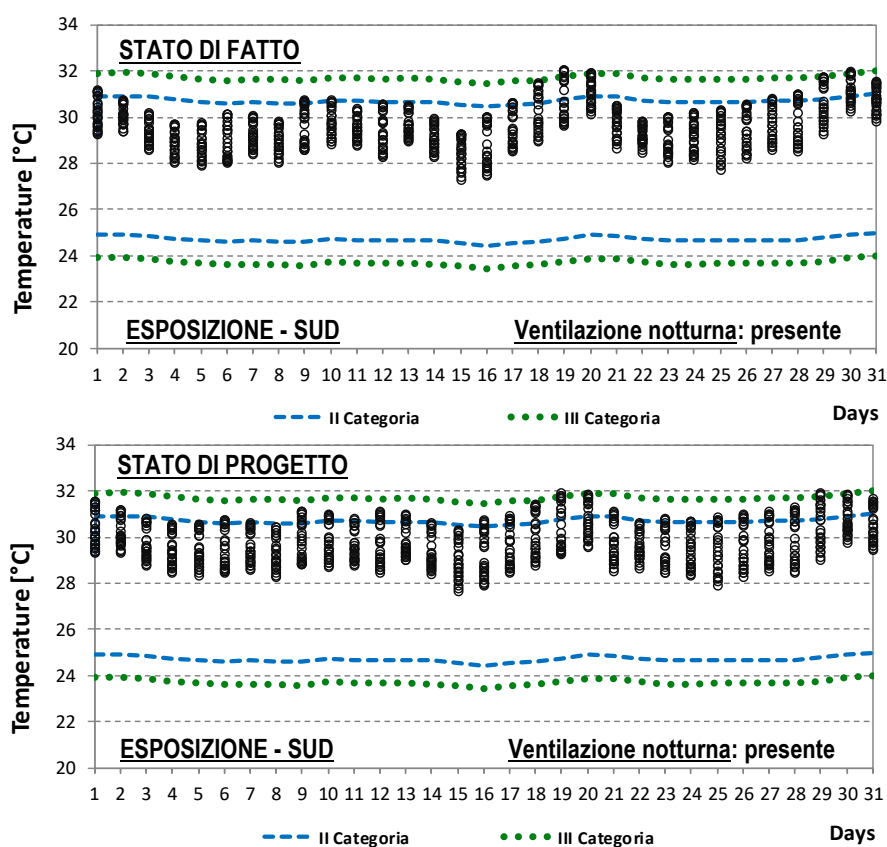


Figura A4. Temperatura operativa nel mese di Agosto (primo piano, esposizione Sud, ventilazione presente)

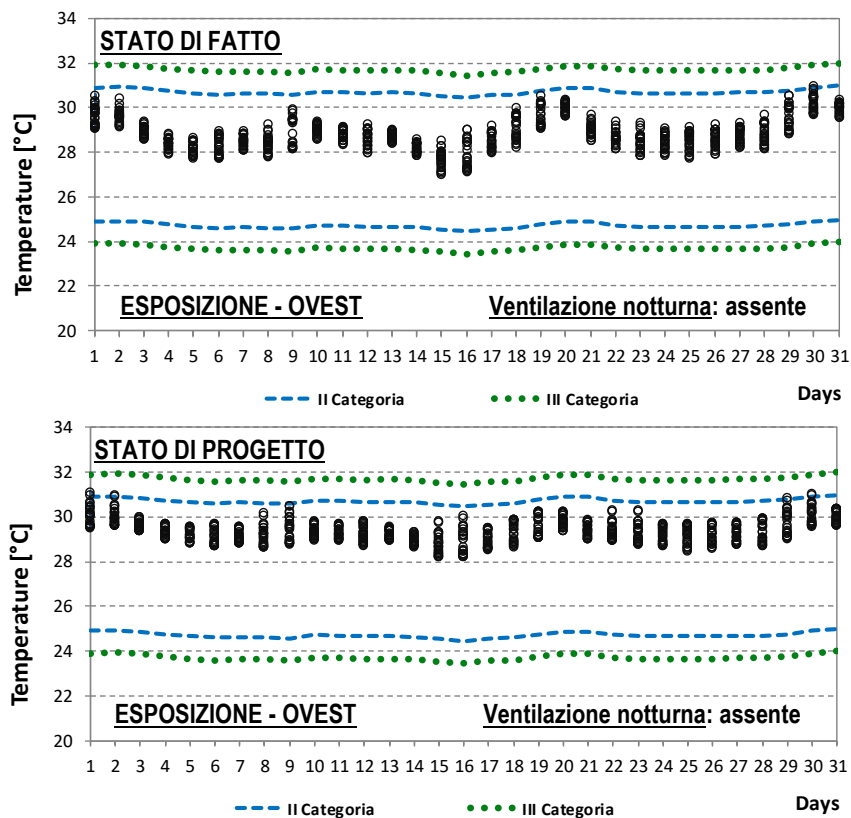


Figura A5. Temperatura operativa nel mese di Agosto (primo piano, esposizione Ovest, ventilazione assente)

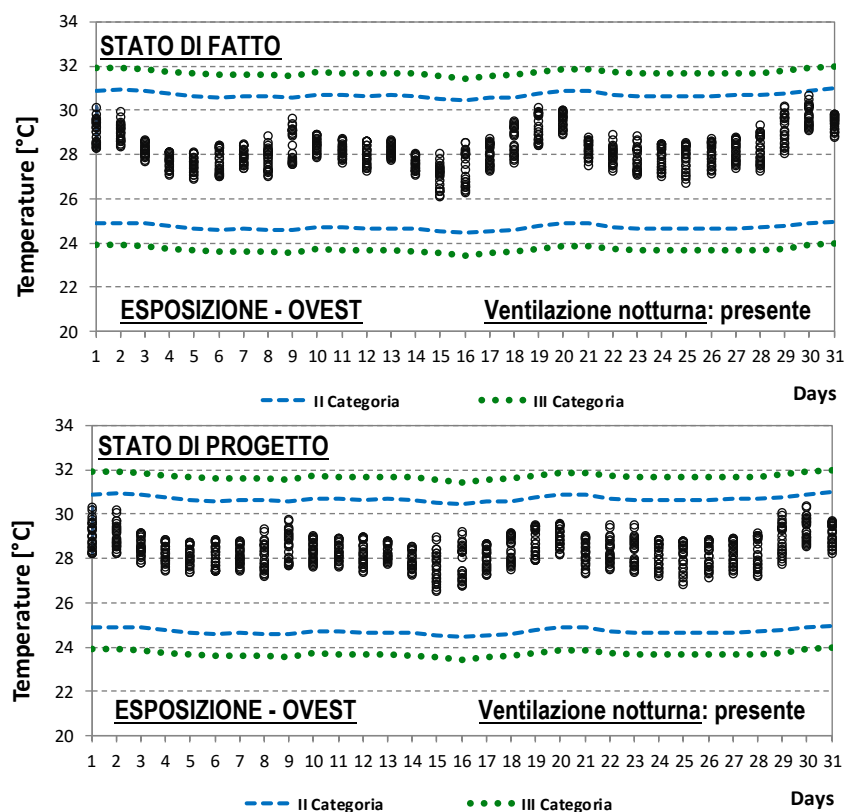


Figura A6. Temperatura operativa nel mese di Agosto (primo piano, esposizione Ovest, ventilazione presente)

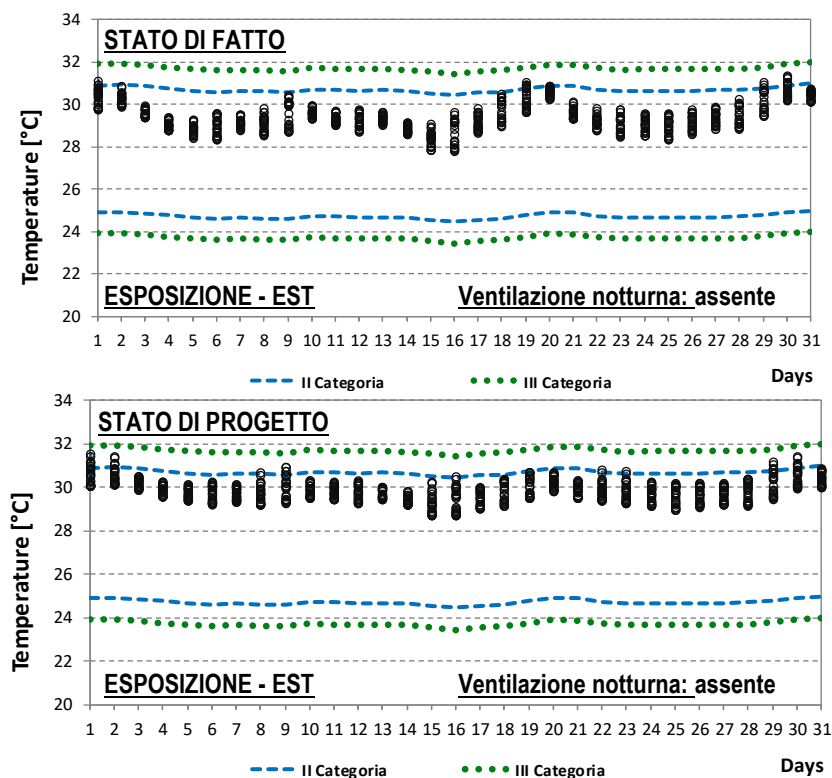


Figura A7. Temperatura operativa nel mese di Agosto (primo piano, esposizione Est, ventilazione assente)

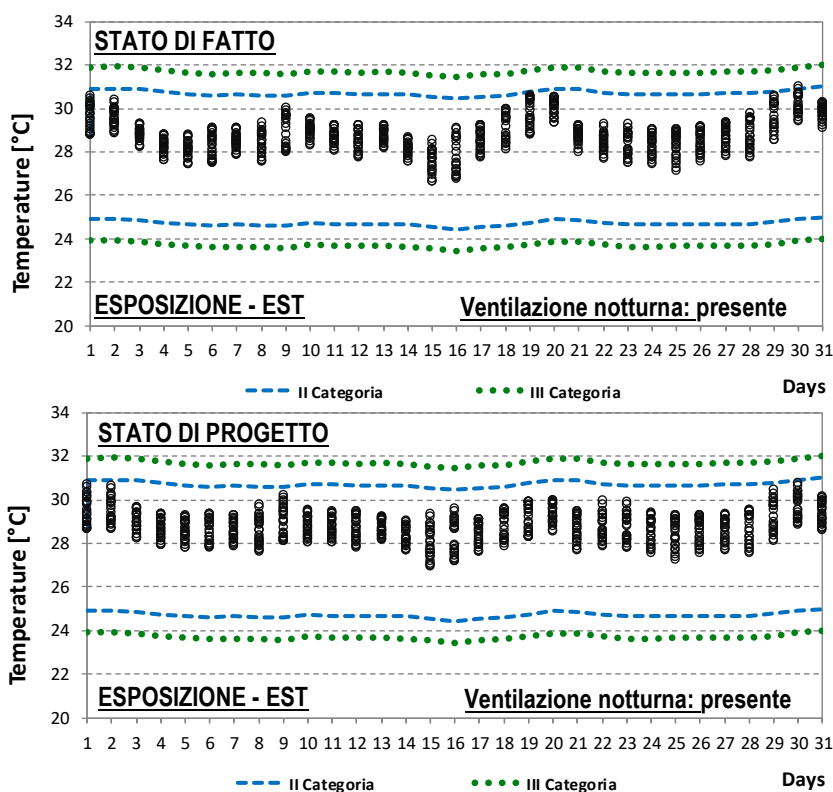


Figura A8. Temperatura operativa nel mese di Agosto (primo piano, esposizione Est, ventilazione presente)

ALLEGATO III

Temperatura operativa nel mese di Agosto
PIANO INTERMEDIO

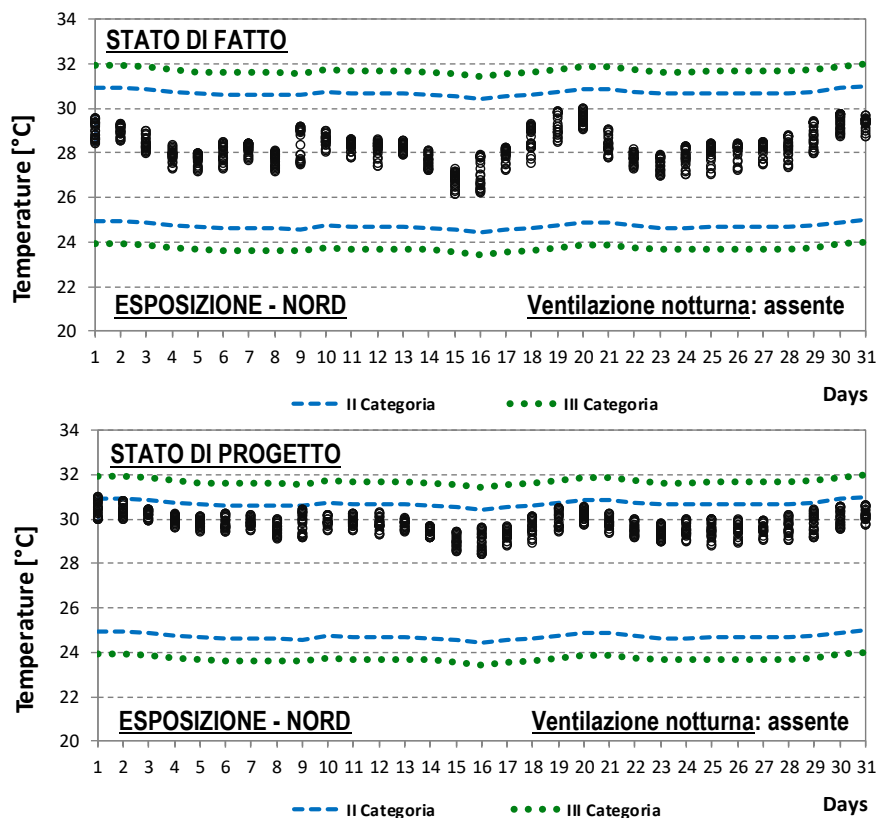


Figura A9. Temperatura operativa nel mese di Agosto (piano tipo, esposizione Nord, ventilazione assente)

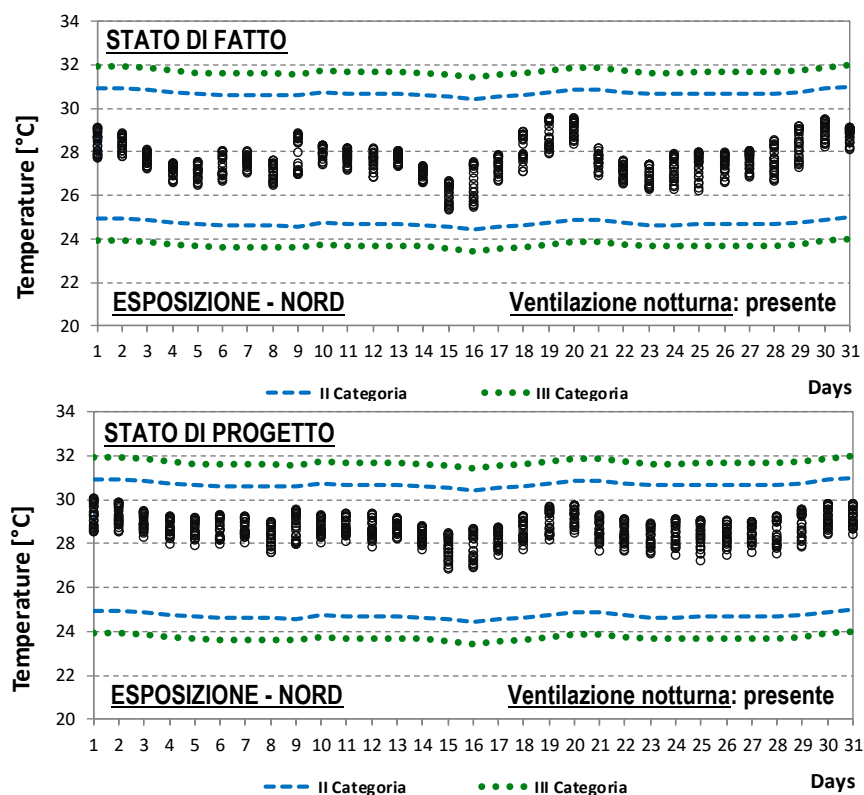


Figura A10. Temperatura operativa nel mese di Agosto (piano tipo, esposizione Nord, ventilazione presente)

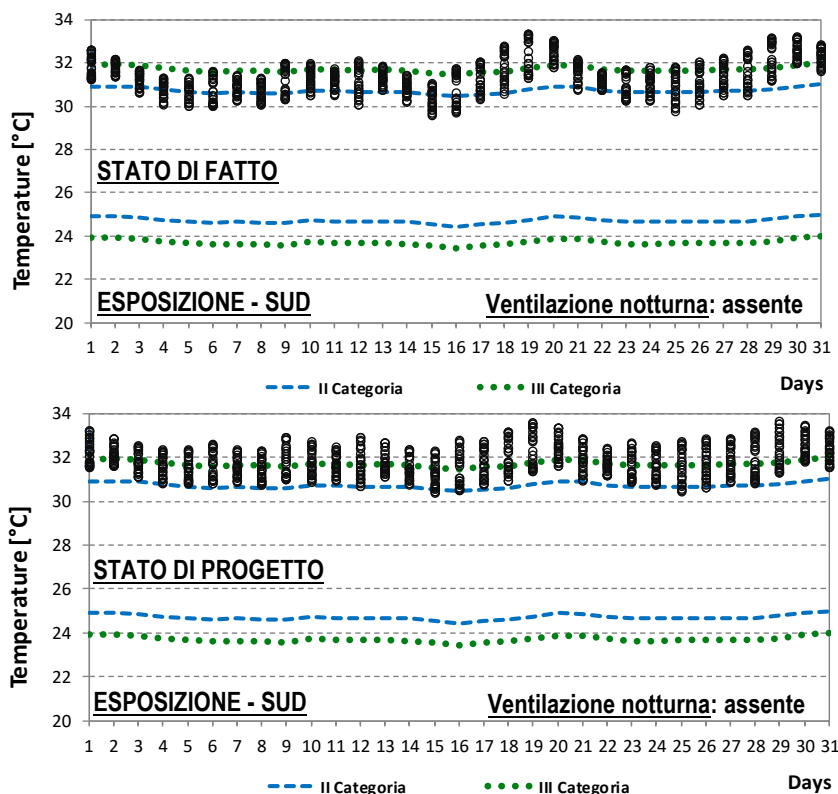


Figura A11. Temperatura operativa nel mese di Agosto (piano tipo, esposizione Sud, ventilazione assente)

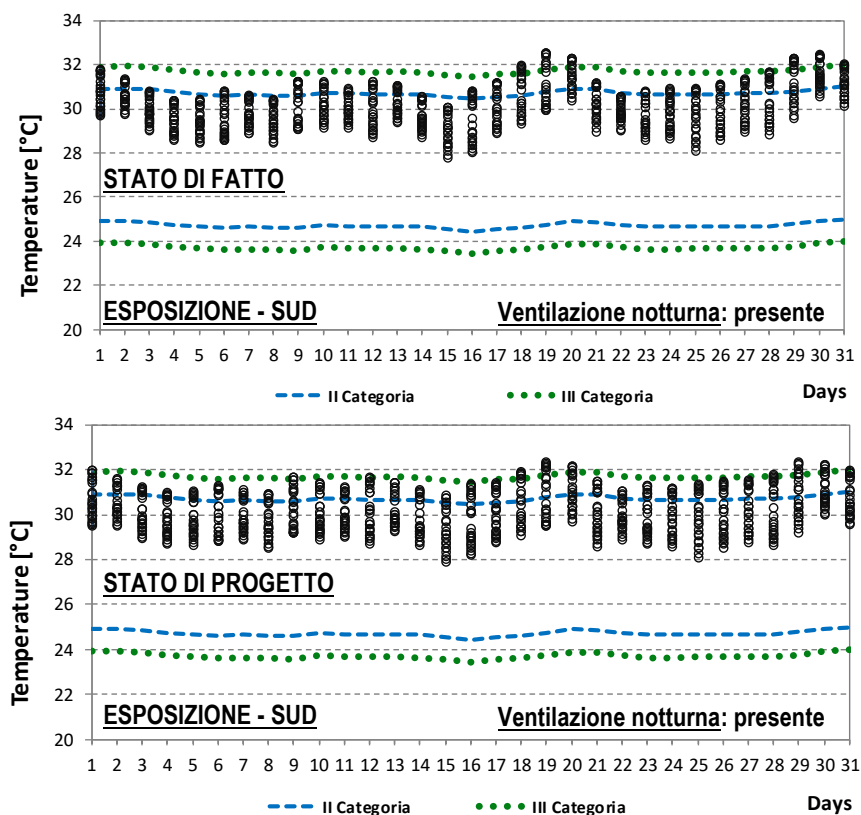


Figura A12. Temperatura operativa nel mese di Agosto (piano tipo, esposizione Sud, ventilazione presente)

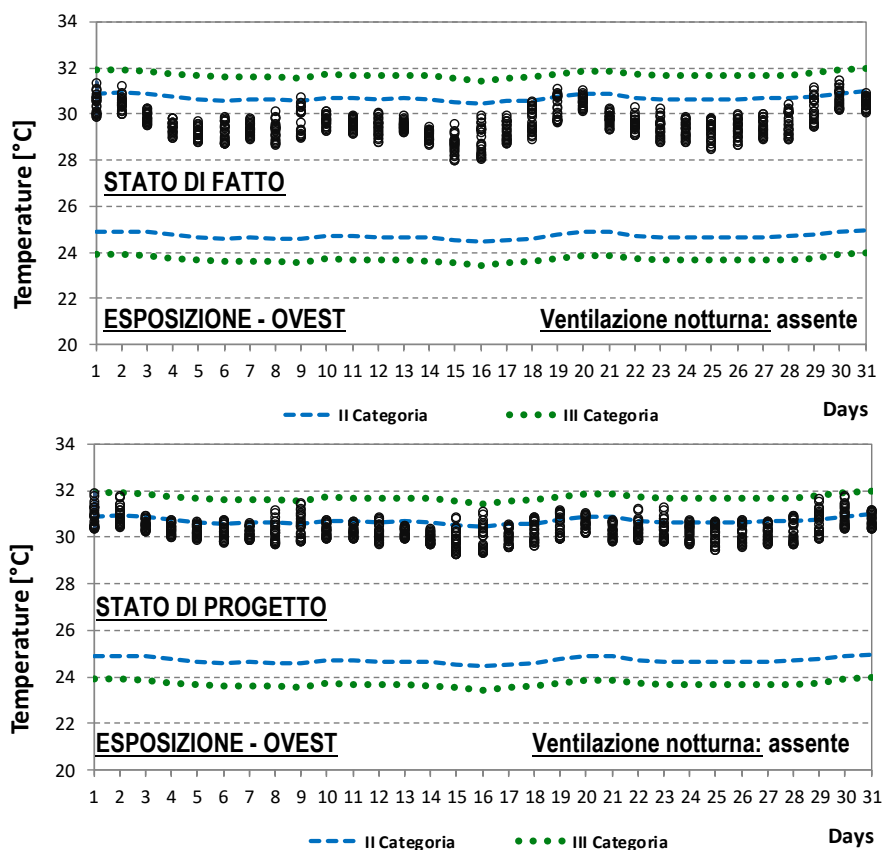


Figura A13. Temperatura operativa nel mese di Agosto (piano tipo, esposizione Ovest, ventilazione assente)

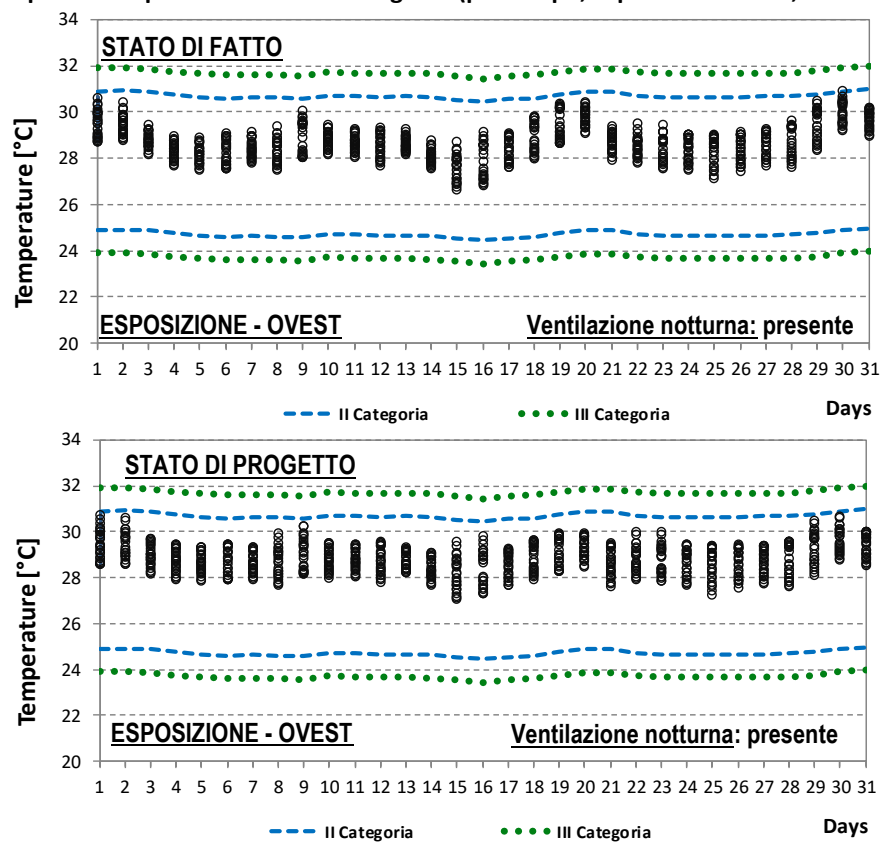


Figura A14. Temperatura operativa nel mese di Agosto (piano tipo, esposizione Ovest, ventilazione presente)

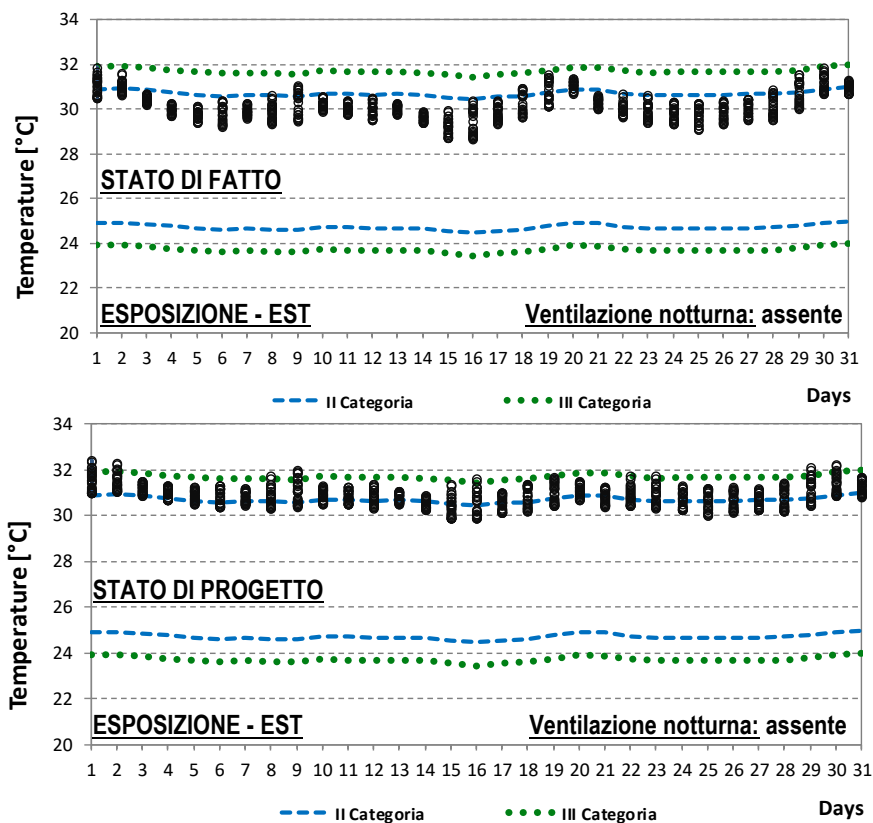


Figura A15. Temperatura operativa nel mese di Agosto (piano tipo, esposizione Est, ventilazione assente)

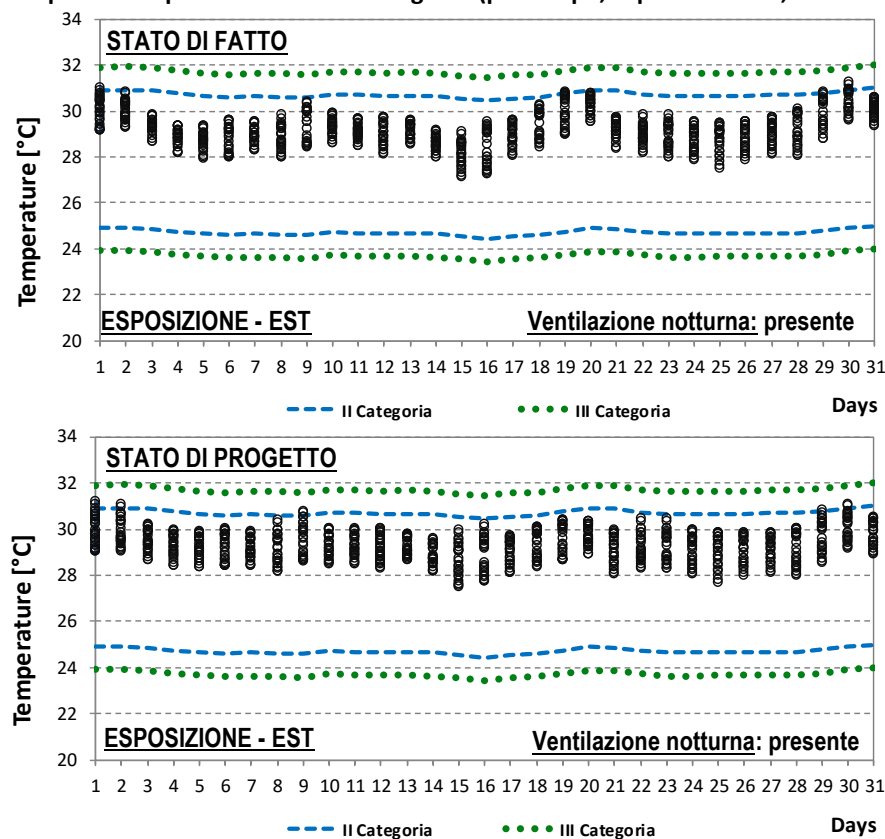


Figura A16. Temperatura operativa nel mese di Agosto (piano tipo, esposizione Est, ventilazione presente)

ALLEGATO IV

Temperatura operativa nel mese di Agosto
ULTIMO PIANO

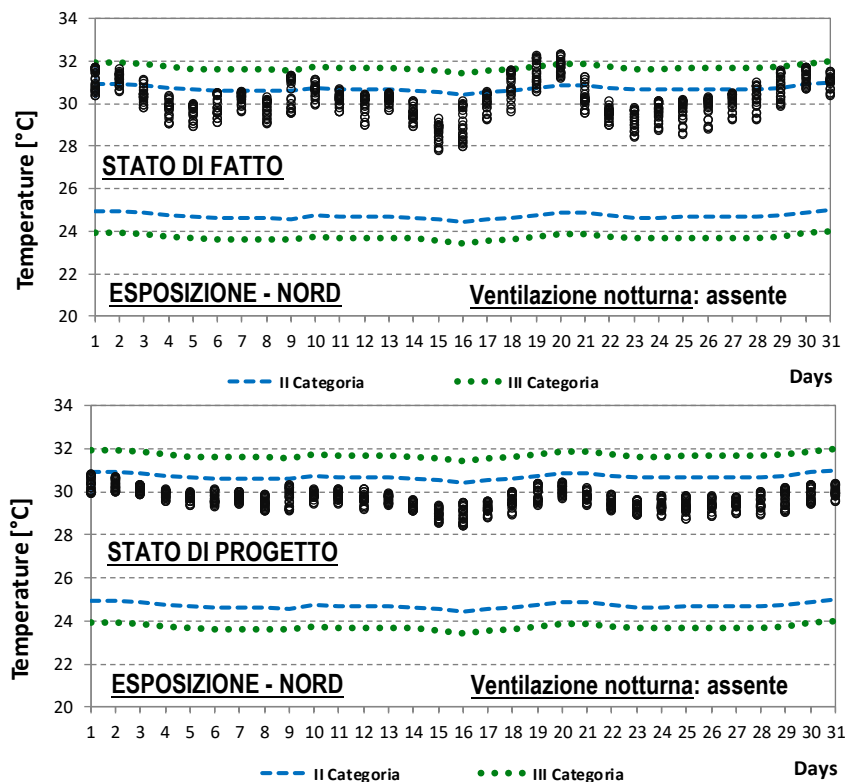


Figura A17. Temperatura operativa nel mese di Agosto (ultimo piano, esposizione Nord, ventilazione assente)

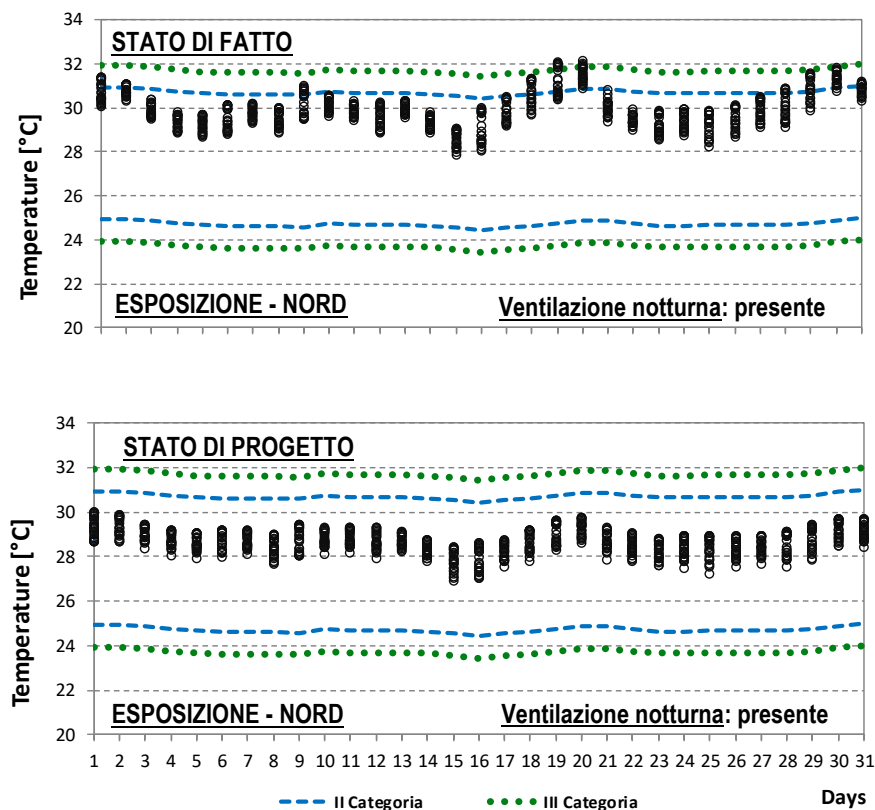


Figura A18. Temperatura operativa nel mese di Agosto (ultimo piano, esposizione Nord, ventilazione presente)

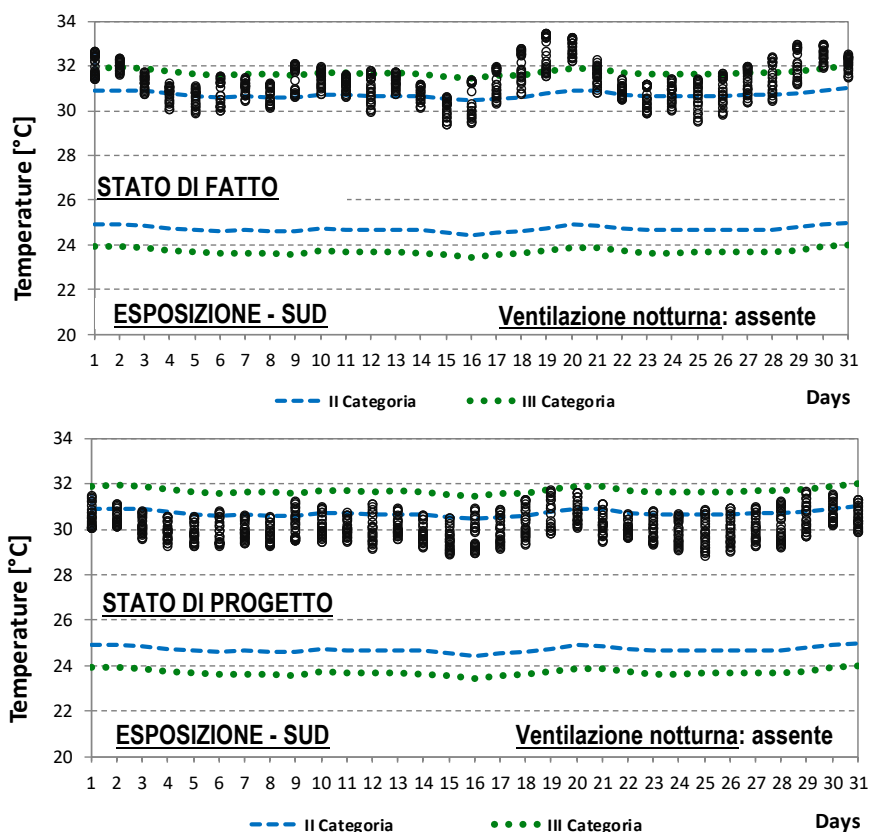


Figura A19. Temperatura operativa nel mese di Agosto (ultimo piano, esposizione Sud, ventilazione assente)

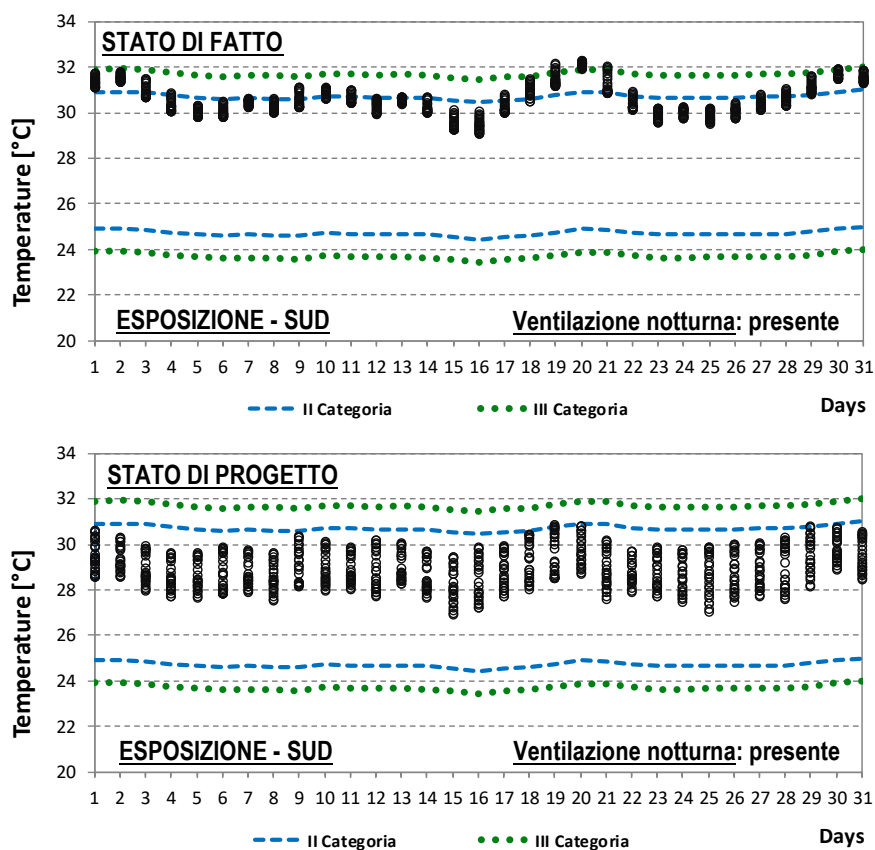


Figura A20. Temperatura operativa nel mese di Agosto (ultimo piano, esposizione Sud, ventilazione presente)

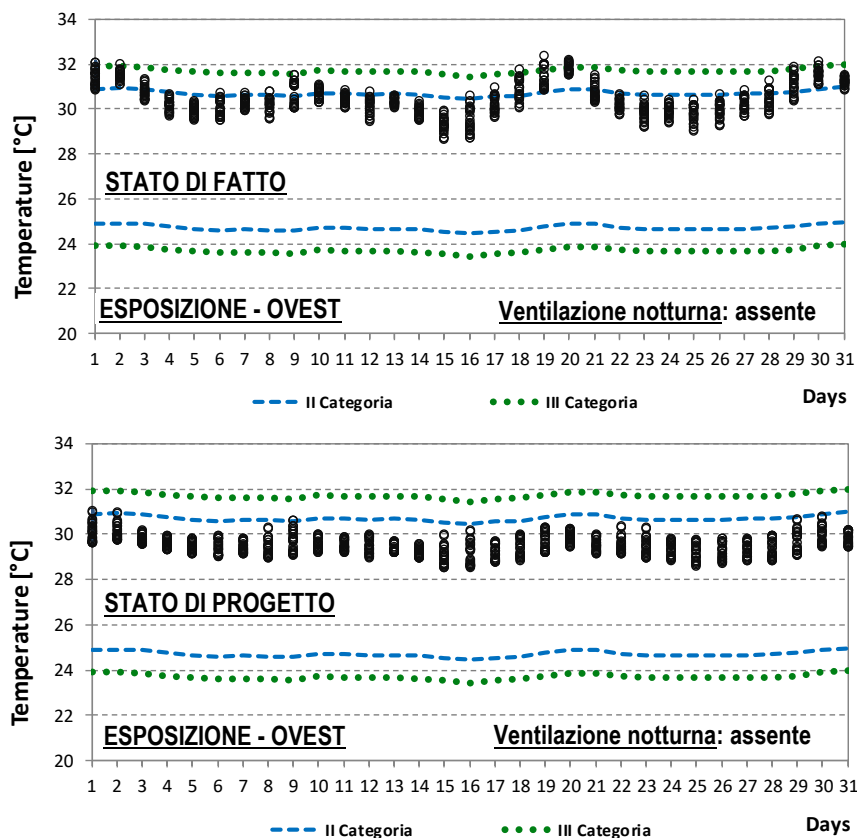


Figura A21. Temperatura operativa nel mese di Agosto (ultimo piano, esposizione Ovest, ventilazione assente)

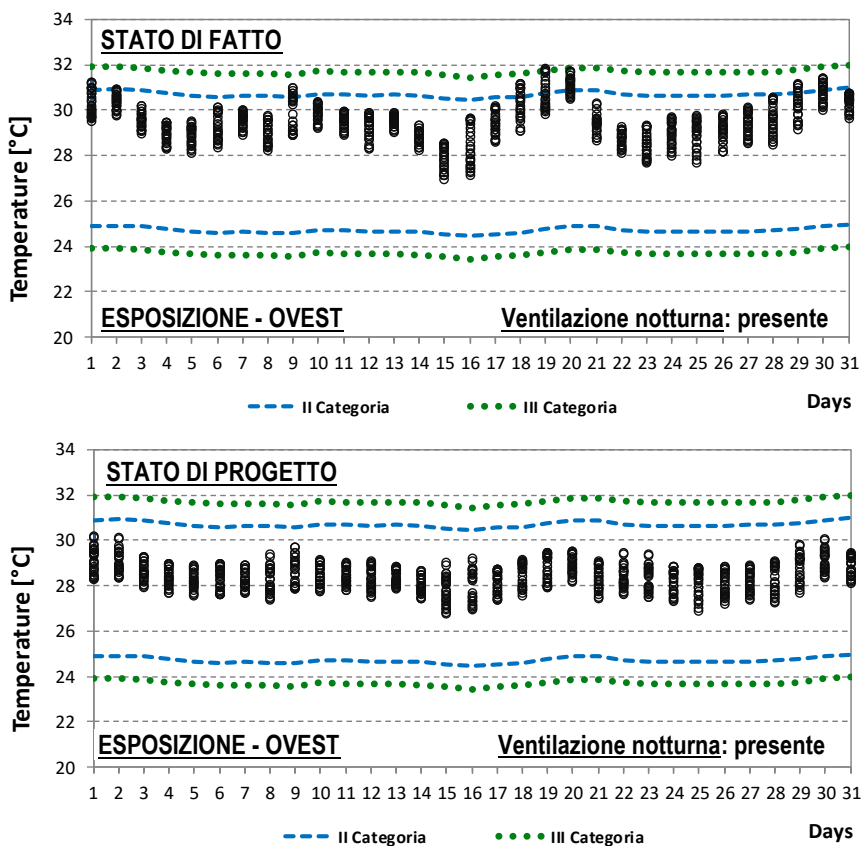


Figura A22. Temperatura operativa nel mese di Agosto (ultimo piano, esposizione Ovest, ventilazione presente)

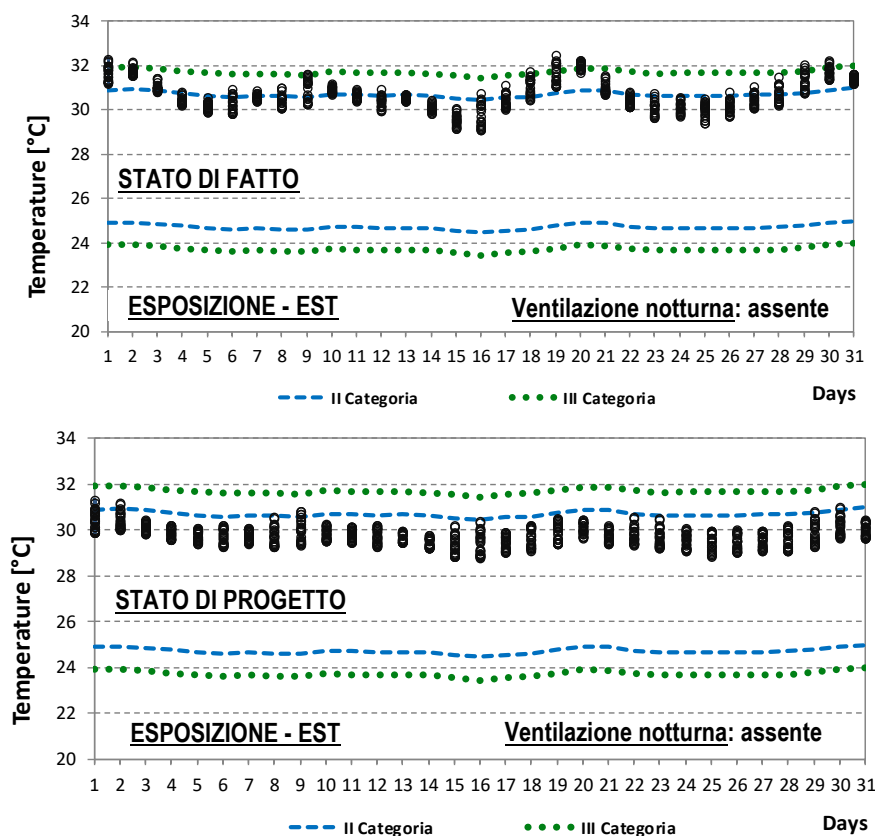


Figura A23. Temperatura operativa nel mese di Agosto (ultimo piano, esposizione Est, ventilazione assente)

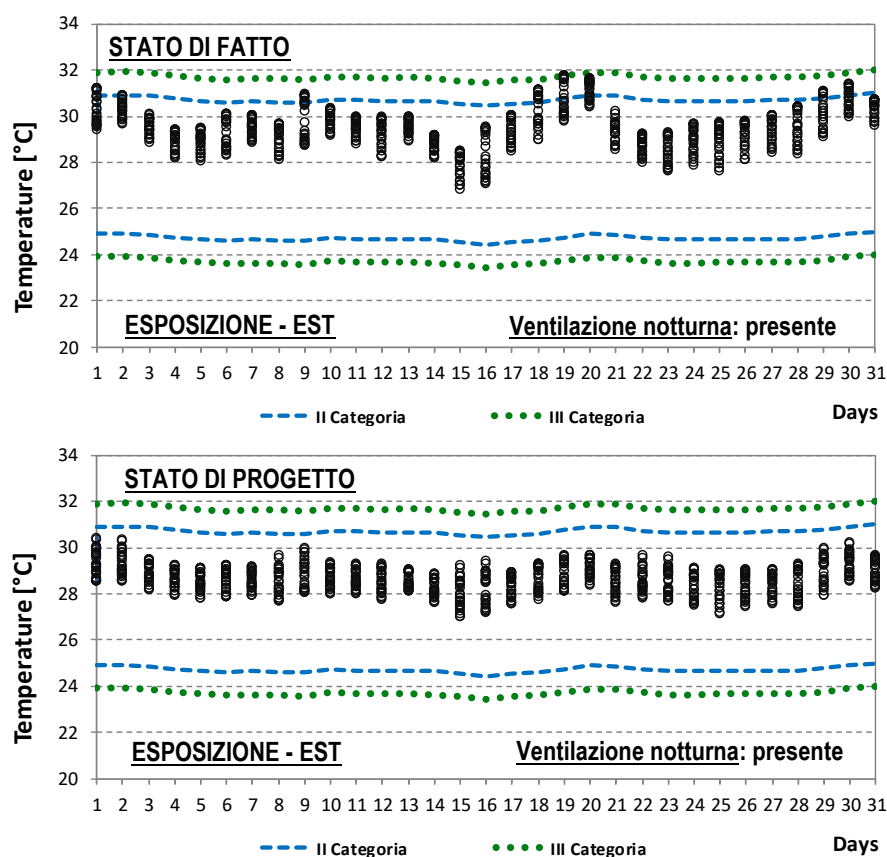


Figura A24. Temperatura operativa nel mese di Agosto (ultimo piano, esposizione Est, ventilazione presente)