



Ricerca di Sistema elettrico

Potenzialità e limiti del raffrescamento passivo con strategie di ventilazione naturale in aree urbane

R. De Lieto Vollaro, G. Battista, E. Carnielo, M. Zinzi, S. Agnoli

POTENZIALITA' E LIMITI DEL RAFFRESCAMENTO PASSIVO CON STRATEGIE DI VENTILAZIONE NATURALE IN AREE URBANE

R. de Lieto Vollaro, G. Battista, E. Carnielo, M. Zinzi, S. Agnoli (Università di Roma Tre, Dipartimento di ingegneria)

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

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

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

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

Responsabile del Progetto: Gaetano Fasano, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Potenzialità e limiti del raffrescamento passivo con strategie di ventilazione naturale in aree urbane"

Responsabile scientifico ENEA: Michele Zinzi

Responsabile scientifico Università di Roma TRE: Roberto de Lieto Vollaro

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 METODOLOGIA.....	6
3 DATI CLIMATICI.....	7
4 DESCRIZIONE DEL MODELLO.....	11
4.1 EDIFICIO DI RIFERIMENTO.....	11
4.2 MODELLO PER L'ANALISI TERMO-FLUIDODINAMICA.....	12
5 RISULTATI.....	15
5.1 ANALISI DELLE TEMPERATURE URBANE.....	15
5.2 PRESTAZIONI ENERGETICHE DELL'EDIFICIO DI RIFERIMENTO.....	18
5.3 PRESTAZIONI TERMICHE DELL'EDIFICIO DI RIFERIMENTO.....	21
5.4 RISULTATI DELL'ANALISI TERMO-FLUIDODINAMICA.....	24
6 DISCUSSIONE E CONCLUSIONI.....	26
7 BIBLIOGRAFIA.....	27

Sommario

I cambiamenti climatici e l'urbanizzazione stanno radicalmente incrementando la diffusione del fenomeno dell'isola di calore negli ambienti urbani ad ogni latitudine anche se con intensità diverse. Questa problematica è stata oggetto di studio già nell'ultimo decennio del diciannovesimo secolo, ma ne sono stati dimostrati gli effetti su larga scala solo un secolo più tardi. L'isola di calore è definita come l'aumento della temperatura dell'aria nelle zone densamente urbanizzate rispetto alle aree rurali limitrofe alla città. Molti studi hanno misurato l'intensità dell'isola di calore trovando valori anche rilevanti, superiori a 12 °C. Questo stress termico è causa di criticità sociali, ambientali e di salute con conseguenze maggiori sulle classi sociali più deboli. Recenti sondaggi hanno dimostrato un aumento dei decessi in queste categorie durante le ondate di calore. Questo studio presenta alcuni risultati frutto dell'osservazione della temperatura dell'aria misurata a Roma, città caratterizzata dal tipico clima mediterraneo e da una complessa struttura urbana, in cui aree densamente urbanizzate sono intervallate da aree verdi. Le centraline acquisiscono dati in 9 siti dislocati nell'area urbana e rurale di Roma e coprono diverse tipologie di zona: centro storico, area semi-centrale, area periferica, area adiacente a zone verdi ed area rurale.

Il progetto ha come scopo primario la valutazione delle potenzialità della ventilazione naturale come strumento per l'ottimizzazione dei consumi energetici degli edifici e il comfort termico degli occupanti, in particolare durante la stagione estiva. L'introduzione di aria esterna, con tecniche attive o passive, consente di mitigare lo stress termico all'interno degli edifici, moderando l'uso di sistemi di climatizzazione estiva. È tuttavia evidente che le potenzialità della ventilazione sono legate alle caratteristiche termogrometriche dell'aria in ingresso che come espresso precedentemente sono influenzate dalle condizioni ambientali urbane e quindi dall'intensità dell'isola di calore.

I dati di temperatura e umidità relativa acquisiti dalle centraline sono stati inseriti in un software di analisi energetiche con il quale è stato modellato un edificio di riferimento al fine di operare confronti energetici e termici tra le aree urbane e l'area rurale presa come riferimento.

Infine un'analisi numerica ha permesso di testare un modello in grado di apprezzare la variazione delle grandezze termo-fluidodinamiche all'interno di un edificio residenziale considerandolo inserito sia in un contesto rurale che urbano.

PAROLE CHIAVE: *Isola di Calore; Prestazioni energetiche; Comfort Termico; Ventilazione Naturale; Termo-fluidodinamica.*

1 Introduzione

I cambiamenti climatici e il *global warming* sono fenomeni scientificamente dimostrati da osservazioni sperimentali e modelli climatici numerici [1]. In particolare il global warming è un fenomeno presente ad ogni latitudine del pianeta sebbene con intensità e modalità diverse. Un'area fortemente interessata da questo fenomeno è l'area mediterranea per la quale diversi studi scientifici hanno stimato un incremento delle temperature medie di 2 °C nel corso delle prossime due decadi a cui si assoceranno fenomeni di ondate di calore più frequenti e prolungate. E' importante sottolineare che l'aumento delle temperature dell'ambiente non è il solo effetto del global warming: esso determina anche un sensibile aumento della frequenza con cui si verificano fenomeni climatici estremi e pericolosi, tra i quali le ondate di calore [2].

L'area mediterranea sta subendo un processo di urbanizzazione che prosegue incessantemente con un incremento compreso tra il 54 al 66% tra il 1970 e 2010. Secondo una stima datata 2010 più di 300 milioni di abitanti vivono in aree urbane con un trend in deciso aumento, mentre negli anni '70 questa cifra toccava i 150 milioni [3].

L'effetto combinato del global warming e dell'urbanizzazione è la causa della formazione dell'effetto isola di calore urbana UHI (*Urban Heat Island*) che è definito come l'incremento della temperatura dell'aria nelle aree densamente urbanizzate calcolato a partire dalla temperatura dell'aria nelle zone rurali adiacenti alla città. Questo parametro indicato con UHI (*Urban Heat Island Intensity*) può essere riferito a valori istantanei o a medie riferite a differenti intervalli di tempo (dall'orario allo stagionale).

Il fenomeno dell'isola di calore è stato osservato sin dal diciannovesimo secolo [4], ma è intensamente studiato e monitorato solo da circa un decennio [5-8]. Ad oggi molti studi sono disponibili e dimostrano come l'UHI sia presente ad ogni latitudine. I principali fattori che ne determinano la formazione sono: la riduzione delle aree verdi e permeabili (diminuzione del calore latente di vaporizzazione dell'acqua immagazzinata nel sottosuolo a discapito di quello sensibile); gli scambi termici radiativi a causa dei "canyon" urbani; l'incremento dell'accumulo termico negli edifici; le fonti termiche antropogeniche (scarichi degli impianti di climatizzazione degli edifici e dei mezzi di trasporto); l'aumento dell'assorbimento solare da parte delle superfici dei materiali da costruzione. In particolare la temperatura superficiale di picco dei materiali da costruzione può raggiungere valori sensibilmente elevati [9], anche 30 °C più alti rispetto a quelli dell'aria circostante. L'energia termica immagazzinata viene poi rilasciata nell'ambiente prima attraverso uno scambio termico per conduzione tra gli strati solidi e poi per convezione tra la superficie dei materiali e l'aria, con un conseguente incremento della temperatura ambiente. Strade, marciapiedi, parcheggi, aree pedonali, giocano un ruolo rilevante in questo bilancio energetico, dato che rappresentano tra il 30 e il 45% dell'impronta urbana [10]. I valori di riflettanza solare tipici per i materiali che rappresentano le strutture urbane sono: 5% per gli asfalti appena posati (il conglomerato bituminoso ricopre uniformemente la superficie); 15% per l'asfalto datato; 25% per il calcestruzzo.

L'isola di calore ha severe implicazioni sulle performance e sui costi energetici degli edifici che rappresentano approssimativamente il 40% dei consumi energetici totali per usi finali e il 36% di emissioni di CO₂ nei paesi europei. La relazione che lega l'isola di calore ai problemi energetici è stata oggetto di studio in diversi lavori [9, 11-13]. Essi hanno riguardato diversi argomenti: l'impatto delle temperature urbane sui fabbisogni energetici e sui picchi di carico di raffrescamento; materiali, tecnologie e strategie per la mitigazione dell'isola di calore e per incrementare le prestazioni termiche ed energetiche degli edifici; l'impatto sul comfort termico e le possibili tecniche di raffrescamento passivo.

Una tecnica di raffrescamento passivo degli edifici è rappresentata dall'ottimizzazione della ventilazione naturale. Lo sfruttamento delle risorse ventilative naturali costituisce un ottimo strumento per garantire il

raffrescamento degli edifici, specialmente nei climi caldi e nelle stagioni estive. In pratica, il movimento e il rinnovamento dell'aria, che sono tanto maggiori quanto più consistenti sono le differenze di temperatura e pressione tra l'interno e l'esterno, sottraggono calore alle strutture edilizie per convezione termica. I fenomeni avvengono in modo naturale, senza l'impiego di ventilatori meccanici o il consumo di energia. L'utilizzo dell'aria esterna quando essa si trova in condizioni termiche favorevoli (quando la sua temperatura è inferiore a quella dell'aria interna) è una tecnica che è stata oggetto di diversi studi in questi ultimi anni [14-18]. L'efficacia di questa tecnica dipende principalmente dai seguenti parametri:

- Condizioni ambientali e geografiche (latitudine, parametri meteorologici, la morfologia e l'orografia del luogo);
- Orientamento dell'edificio in funzione della posizione del sole e della direzione prevalente del vento;
- Caratteristiche dell'involucro edilizio;
- Tessuto urbano (effetti canyon, ombreggiamenti, isola di calore).

Il lavoro riportato in questo report intende valutare le potenzialità e i limiti del raffrescamento passivo con strategie di ventilazione naturale associato ai problemi termici delle aree urbane.

2 Metodologia

Il progetto ha come scopo la valutazione delle potenzialità della ventilazione naturale come strumento per l'ottimizzazione dei consumi energetici degli edifici e il comfort termico degli occupanti, in particolare durante la stagione estiva. L'introduzione di aria esterna, con tecniche attive o passive, consente di mitigare lo stress termico all'interno degli edifici, moderando l'uso di sistemi di climatizzazione estiva. È tuttavia evidente che le potenzialità della ventilazione sono legate alle caratteristiche termo-igrometriche dell'aria in ingresso che come espresso precedentemente sono influenzate dalle condizioni ambientali urbane e quindi dall'intensità dell'isola di calore. Le attività del progetto sono state suddivise in questo modo:

1. **Analisi e confronto dei dati climatici (temperatura a bulbo secco e umidità dell'aria):** questa fase riguarderà l'utilizzo di dati provenienti da 9 centraline equipaggiate con sensori termo-igrometrici impiegate sul territorio urbano di Roma. Il confronto tra i dati provenienti da una centralina situata in un contesto rurale e da centraline posizionate in aree densamente urbanizzate permetterà di quantificare l'intensità dell'isola di calore urbana.
2. **Analisi delle prestazioni energetiche e termiche di un edificio:** i dati climatici provenienti dalle centraline saranno utilizzati come input per le simulazioni dinamiche condotte attraverso un software di analisi energetica, il TRNSYS, che permetterà di ottenere i fabbisogni energetici netti calcolati per un edificio di riferimento. I risultati ottenuti da dati meteo appartenenti a centraline posizionate in aree densamente edificate saranno confrontati con quelli provenienti dai dati meteo provenienti dal riferimento rurale. TRNSYS permetterà inoltre di simulare l'edificio in condizioni di oscillazione libera della temperatura interna durante la stagione estiva e valutare la risposta termica dell'edificio a differenti valori della portata di ventilazione naturale attivata durante le ore notturne. Anche in questo caso si opererà un confronto tra i risultati derivanti dai diversi file meteo ottenuti dalle 9 centraline.
3. **Analisi termo-fluidodinamica del volume interno di un edificio semplificato:** un modello multi-fisico sarà inserito su una piattaforma ANSYS Fluent per l'analisi dell'effetto della ventilazione naturale notturna all'interno di un appartamento di estate. Il modello comprenderà un edificio geometricamente semplificato ma composto da elementi opachi e trasparenti. L'analisi numerica sarà suddivisa in tre fasi:

- I. *Fase Stazionaria*: le finestre saranno mantenute chiuse simulando il comportamento inerziale dell'edificio e esauendo fenomeni dinamici transitori.
- II. *Fase Dinamica Iniziale*: le condizioni ambientali esterne durante una giornata estiva saranno fatte variare in base all'andamento delle temperature dell'aria misurate dalle centraline in una giornata di riferimento; la radiazione solare verrà presa da un database di riferimento; la temperatura fittizia del cielo sarà calcolata in funzione dei due precedenti parametri.
- III. *Fase Dinamica Finale*: l'analisi prevedrà l'apertura delle finestre al cessare della radiazione solare in modo da valutare i ricambi orari che possono generarsi all'interno della casa e la conseguente variazione della temperatura dell'aria. I risultati ottenuti utilizzando da i dati termici misurati da due centraline (riferimento rurale e urbano) saranno messi a confronto.

3 Dati Climatici

I dati di temperatura a bulbo secco e umidità relativa sono stati ottenuti mediante centraline composte da sensore termo-igrometrico e scheda di acquisizione alloggiata in un contenitore impermeabile modello DECAGON EM 50, lo strumento è riportato in Figura 1. Il passo di acquisizione dei dati è stato impostato a 10 minuti.



Figura 1: Termo-Igrometro (sinistra) e scheda di acquisizione.

L'estensione della città è di 1.287 km² con 2,87 milioni di abitanti. Quest'ultimo numero raggiunge quasi 4 milioni se si considera l'intera area metropolitana limitrofa. Il tessuto urbano della città risulta essere molto articolato e non segue uno schema regolare, alternando zone densamente urbanizzate ad aree verdi. Infine le caratteristiche architettoniche degli edifici sono molto eterogenee in termini di dimensioni, geometria, tecniche costruttive, etc. Di seguito sono riportati: una breve descrizione dei 9 siti oggetto di questo studio, il loro posizionamento in Figura 2 e una veduta area delle zone in Figura 3.

- Sito 1: ANGUILLARA, presso Anguillare Sabazia. E' un'area di aperta campagna limitrofa ad un lago di origine vulcanica.
- Sito 2: TORREVECCHIA. E' una zona periferica costruita negli anni '40 e costituita principalmente da piccoli blocchi di appartamenti (3-5 piani). E' un quartiere molto articolato con strade asfaltate di differente ampiezza e caratterizzato dalla presenza di una vasta area verde;
- Sito 3: BALEANI. E' una zona densamente urbanizzata. Il sensore di rilevazione è posizionato in un vicolo laterale di larghezza limitata (< 10 m), vegetazione assente e strade asfaltate;
- Sito 4: BRAZZA'. Densamente urbanizzato con edifici massicci di età medioevale (altezza compresa tra i 12 e i 20 metri), strade strette (fino a 10 metri di larghezza), vegetazione scarsa o assente ad eccezione dei cortili interni, pavimentazione costituita da pietra scura di origine lavica;
- Sito 5: MONTEVERDE. Zona edificata all'inizio del ventesimo secolo, densamente popolata e caratterizzata da blocchi di appartamenti e strade strette (8-10 metri). Le aree verdi sono principalmente limitate ai cortili annessi agli edifici;
- Sito 6: NOMENTANA. Zona periferica edificata tra la fine del diciannovesimo secolo e l'inizio del ventesimo. Costituita da zone densamente urbanizzate e limitrofe ad estese aree verdi;
- Sito 7: OSTIENSE. Quartiere costruito in periodi differenti, la tipologia di edificio più frequente è caratterizzata da palazzi alti 30 metri circa disposti lungo un viale molto largo (60 metri) con una fila centrale di alberi ad alto fusto. Sono inoltre presenti larghi spazi vuoti principalmente ricoperti d'asfalto.
- Sito 8: PRATI. Area centrale edificata alla fine del diciannovesimo secolo costituita da edifici massicci e con un'altezza media di 25 metri, strade larghe in asfalto che creano una griglia regolare con alberi ad alto fusto ai lati. Il fiume Tevere scorre vicino a questa zona.
- Sito 9: TUSCOLANA. Area semiperiferica edificata negli anni '50 e '60. E' caratterizzata da schemi costruttivi lineari, edifici a torre alti tra i 20 e i 30 metri sorti intorno ad una strada larga circa 10-12 metri. Sono presenti piccole aree verdi.

La temperatura dell'aria e l'umidità relativa sono state monitorate con un intervallo di acquisizione di 10 minuti. Le caratteristiche principali dei sensori sono le seguenti:

1. Risoluzione della temperatura: 0,1 °C tra 40 e 82 °C;
2. Errore massimo di temperatura: ±0,5 tra -5 °C e 60 °C;
3. Risoluzione dell'umidità relativa: 0.1% tra 0 e 100%;
4. Errore massimo di umidità relativa: ±5% tra 10 e 100%.

La Tabella 1 riporta i periodi di monitoraggio per ogni sito.

Tabella 1: Periodo di acquisizione dei dati climatici nei i siti scelti.

		Periodo di acquisizione
Sito 1	ANGUILLARA	15/05/2014 ore 13:00 - 17/07/2015 ore 11:00
Sito 2	TORREVECCHIA	01/07/2014 ore 00:00 - 22/05/2015 ore 19:00
Sito 3	BALEANI	01/07/2014 ore 00:00 - 26/06/2015 ore 08:00
Sito 4	BRAZZA'	01/07/2014 ore 00:00 - 26/06/2015 ore 07:00
Sito 5	MONTEVERDE	01/07/2014 ore 00:00 - 25/05/2015 ore 13:00
Sito 6	NOMENTANA	01/07/2014 ore 00:00 - 01/07/2015 ore 14:00
Sito 7	OSTIENSE	01/07/2014 ore 00:00 - 05/05/2015 ore 17:00
Sito 8	PRATI	01/07/2014 ore 00:00 - 26/06/2015 ore 09:00
Sito 9	TUSCOLANA	01/07/2014 ore 00:00 - 29/05/2015 ore 19:00

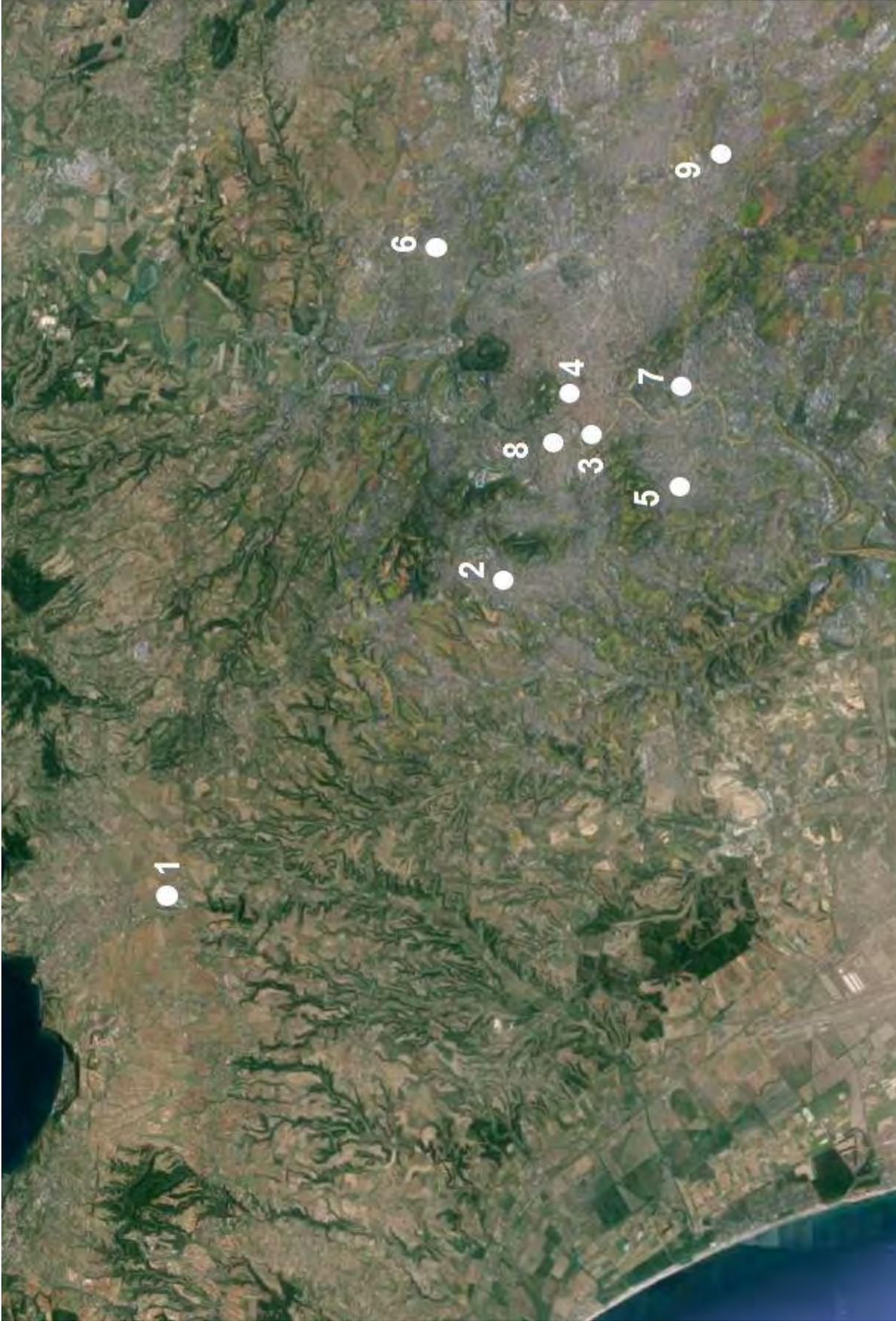


Figura 2: Posizione dei siti oggetto del monitoraggio nell'area di Roma.



Figura 3: Vedute aeree dei siti: 1) ANGUILLARA; 2) TORREVECCHIA; 3) BALEANI; 4) BRAZZA'; 5) MONTEVERDE; 6) NOMENTANA; 7) OSTIENSE; 8) PRATI; 9) TUSCOLANA.

4 Descrizione del modello

4.1 Edificio di Riferimento

La struttura sulla quale è stata effettuata l'analisi energetica, riportata in Figura 4, è una palazzina residenziale che si sviluppa su tre livelli equipaggiata con un tetto piano. Essa rappresenta una struttura tipica presente nelle aree periferiche urbanizzate della città di Roma. Ogni piano è suddiviso in due appartamenti, come riportato in Figura 5. La superficie netta calpestabile per appartamento è pari a 89,7 m², con un'altezza interpiano di 2,7 m e una superficie finestrata complessiva è pari a 13,6 m².

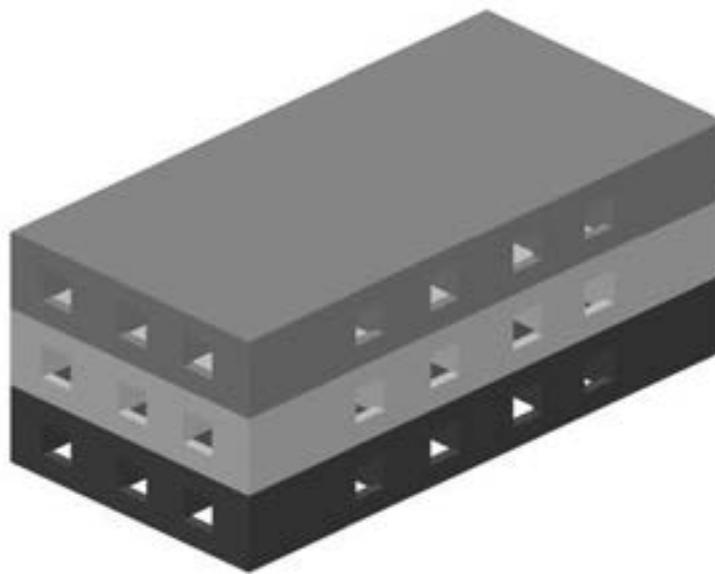


Figura 4: Edificio di riferimento.

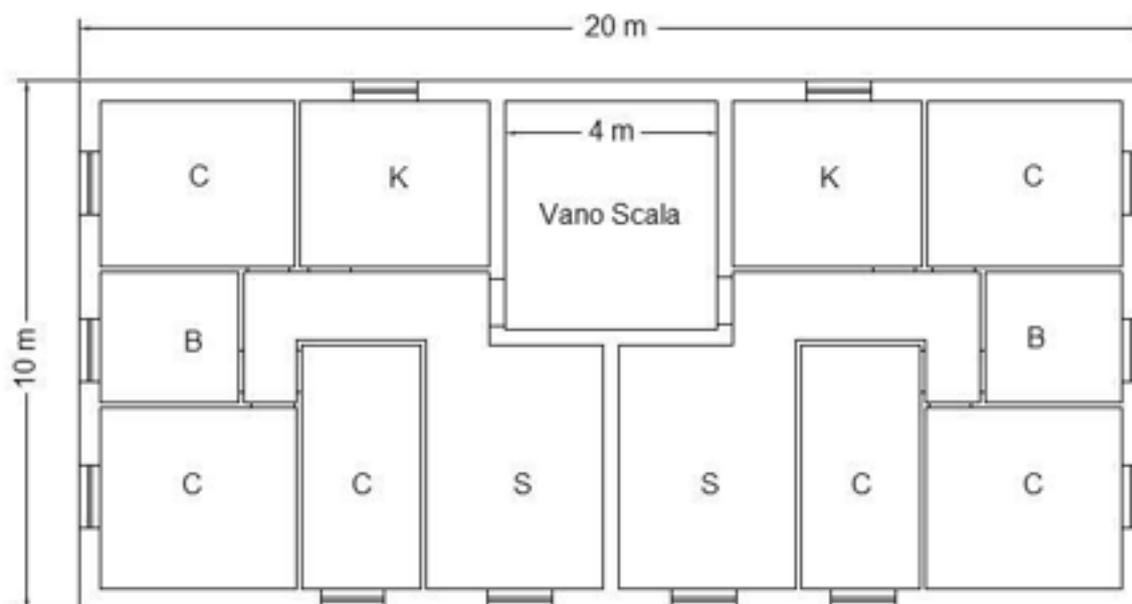


Figura 5: Pianta dell'edificio di riferimento.

La Tabella 2 riporta i valori di spessore e trasmittanza termica degli elementi opachi e trasparenti che compongono l'involucro. Sono stati considerati due livelli di isolamento al fine di quantificare l'incidenza della temperatura esterna su strutture con differenti caratteristiche termiche per allargare il campo di studio a edifici nuovi ed esistenti.

Sono state condotte due diverse tipologie di analisi:

1. Per valutare il fabbisogno energetico netto sono stati modellati i sistemi di climatizzazione invernale ed estiva. Il set-point di riscaldamento è stato impostato a 20 °C, mentre quello di raffrescamento a 25 °C. La ventilazione naturale è stata impostata su un valore costante di 0,5 volumi/h in accordo con la normativa italiana di riferimento [19] per edifici ad uso residenziale.
2. Al fine di monitorare il comfort termico interno sono state condotte simulazioni in condizioni di oscillazione libera della temperatura dell'aria. Per questa tipologia la ventilazione naturale è stata impostata ad un valore pari a 0.5 volumi/h durante la stagione invernale. Per la stagione estiva è stato programmato un periodo di attivazione dalle 20:00 alle 08:30 con 4 differenti valori di ricambi orari: 1, 3, 5, 10 volumi/h).

Sono stati inseriti dei profili di occupazione e di utilizzo al fine di generare degli apporti interni medi orari di 4 W/m², come stabilito dalla normativa italiana di riferimento [19]. Le superfici trasparenti presentano un schermatura pari al 70% della radiazione solare, attiva durante la stagione estiva.

Tabella 2: Caratteristiche dell'involucro opaco e trasparente dell'edificio di riferimento.

Configurazione Non Isolata			
	Spessore [m]	Trasmitt. Termica [W/m ² K]	Riflettanza Solare [-]
Tetto	0,28	1,20	0,3
Muro Esterno	0,30	1,40	0,4
Muro Interno	0,15	2,1	-
Pavimento	0,34	1,25	-
	Design [mm]	Trasmitt. Termica [W/m ² K]	Fattore solare g [-]
Finestra	4	5,68	0,85
Configurazione Isolata			
	Spessore [m]	Trasmitt. Termica [W/m ² K]	Riflettanza Solare [-]
Tetto	0,30	0,30	0,3
Muro Esterno	0,38	0,34	0,4
Muro Interno	0,15	0,80	-
Pavimento	0,42	0,32	-
	Design [mm]	Trasmitt. Termica [W/m ² K]	Fattore solare g [-]
Finestra	4-16-4	1,40	0,59

4.2 Modello per l'analisi termo-fluidodinamica

Lo studio termo-fluidodinamico della ventilazione naturale è stato condotto su un volume abitativo realizzato con schema semplificato. La struttura è stata modellata senza muri interni divisori ed è posta all'ultimo piano di un edificio a tre piani, come riportato in Figura 6, ed ha una superficie vetrata costituita da tre finestre di dimensioni 2x2 m con orientamento Nord, Sud e Ovest. La dimensione in pianta è di 100

m² con un'altezza interpiano di 2,7 metri. I materiali delle superfici opache e trasparenti utilizzati sono gli stessi utilizzati per il modello utilizzato nell'analisi energetica riportata nel precedente paragrafo (Tabella 2).

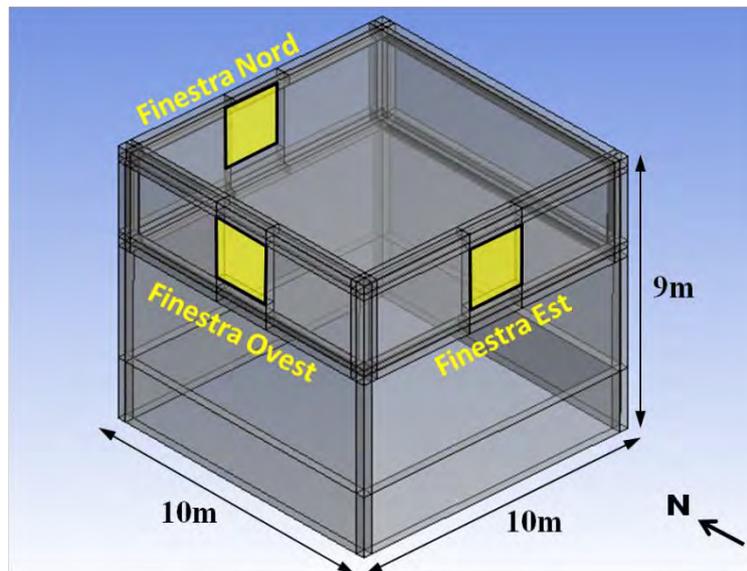


Figura 6: Geometria dell'edificio per l'analisi termo-fluidodinamica.

Il dominio di calcolo prevede anche una porzione di ambiente esterno per poter ricreare la fisica dello spostamento delle masse d'aria tra l'esterno e l'interno della struttura. Essa è stata quindi posizionata al centro di un'area di dimensioni 155 x 95 x 59 m che schematizzasse il volume di aria esterna ed il terreno. Come si evince dalla Figura 7, il dominio ha una direzione preferenziale sull'asse Ovest-Est in quanto, avendo scelto che il vento provenga da Ovest (situazione realistica per la zona di Roma), è necessario creare un dominio allungato nella parte che precede l'edificio al fine di ricreare il corretto profilo di velocità prima che il flusso di aria impatti il fabbricato [20]. La zona a valle dell'edificio, ovvero la parte esposta ad Est, è stata allungata in modo da ridurre gli effetti di bordo dell'uscita del flusso dal dominio [21].

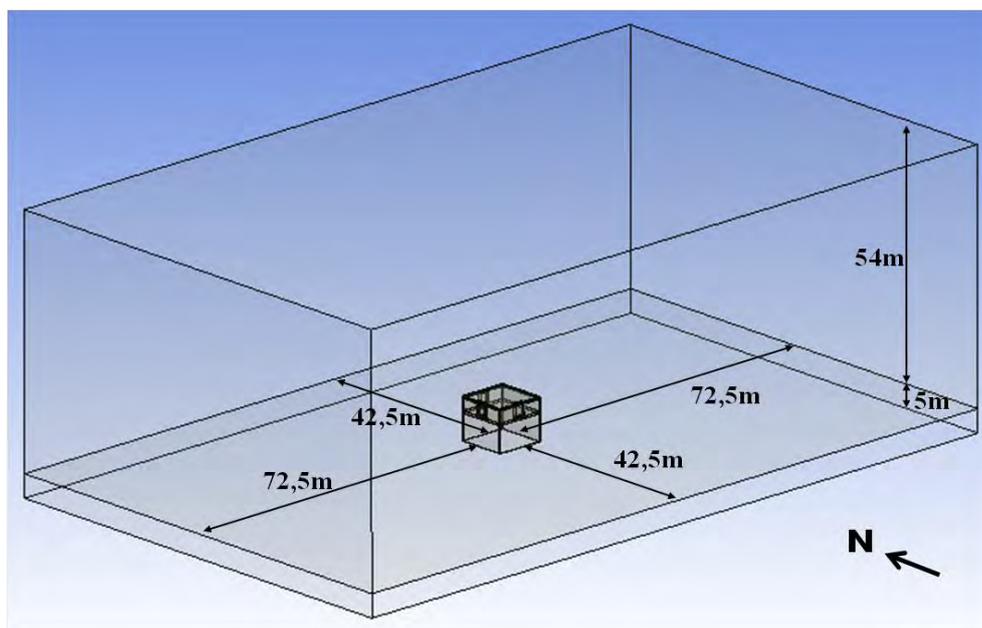


Figura 7: Rappresentazione del dominio di calcolo.

Uno degli elementi cruciali delle simulazioni CFD (*Computational Fluid Dynamics*) è la discretizzazione del dominio di calcolo in sotto-elementi, detta *mesh*. La dimensione massima degli elementi che servono a modellare un processo termo-fluidodinamico è di norma pari ad un ordine di grandezza inferiore rispetto alla dimensione del modello fisico ricreato nel dominio. In questo caso l'edificio ha dimensioni dell'ordine del metro e la mesh in prossimità di esso dovrà essere dell'ordine del decimetro. Per evitare di raggiungere un numero di elementi eccessivamente grande che avrebbe comportato un enorme costo computazionale, si è creata una mesh esaedrica sul dominio esterno con una grandezza della cella di 2 metri, mantenendo una mesh esaedrica più fine per modellare l'edificio, come espresso precedentemente. Per consentire una diminuzione graduale delle dimensioni tra la mesh del dominio esterno e quella dell'edificio, si è utilizzata una mesh ad elementi tetraedrici che si estende per 5 metri oltre la superficie dei muri esterni. Complessivamente il dominio, riportato in Figura 8, è stato suddiviso in circa 1.250.000 elementi.

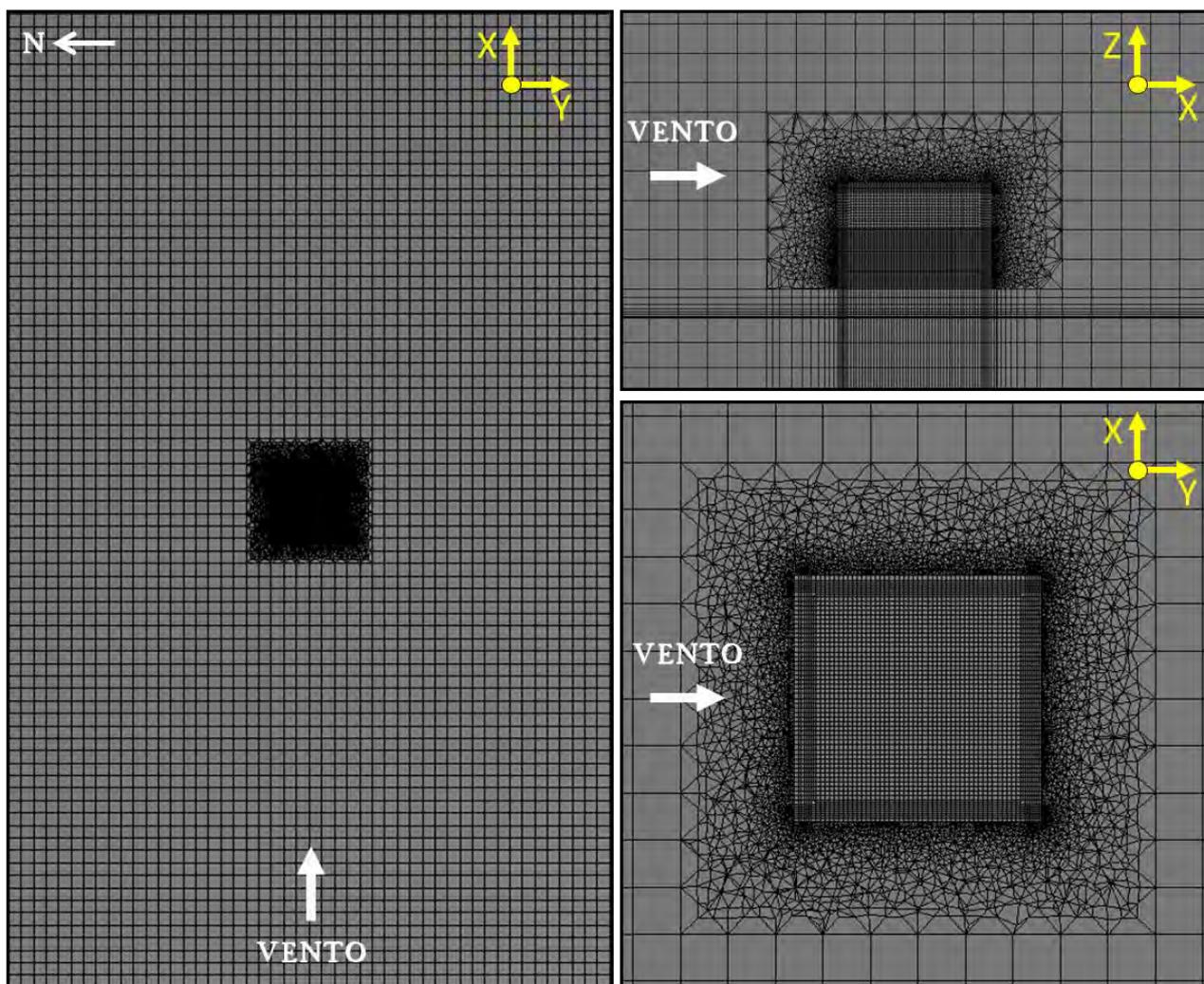


Figura 8: Discretizzazione del dominio di calcolo.

La Figura 8 mostra inoltre la posizione dell'edificio rispetto alla direzione del vento. La velocità del vento è stata impostata a 2,6 m/s, pari alla velocità media annua rilevata sul territorio oggetto di studio.

5 Risultati

5.1 Analisi delle temperature urbane

Dall'analisi dei dati meteo è emerso come le temperature nei siti urbanizzati siano più alte rispetto a quelle dei siti che si trovano nel contesto rurale. La Figura 9 e la Figura 10 mettono in evidenza questo fenomeno. Esse rappresentano l'andamento delle temperature di 4 siti: 3 inseriti nel contesto urbano (Sito 2 TORREVECCHIA, Sito 4 BRAZZA', Sito 11 TUSCOLANA); 1 rurale (Sito 1 ANGUILLARA) rispettivamente per 4 giorni selezionati all'interno della stagione estiva del 2014 e della stagione invernale del 2015.

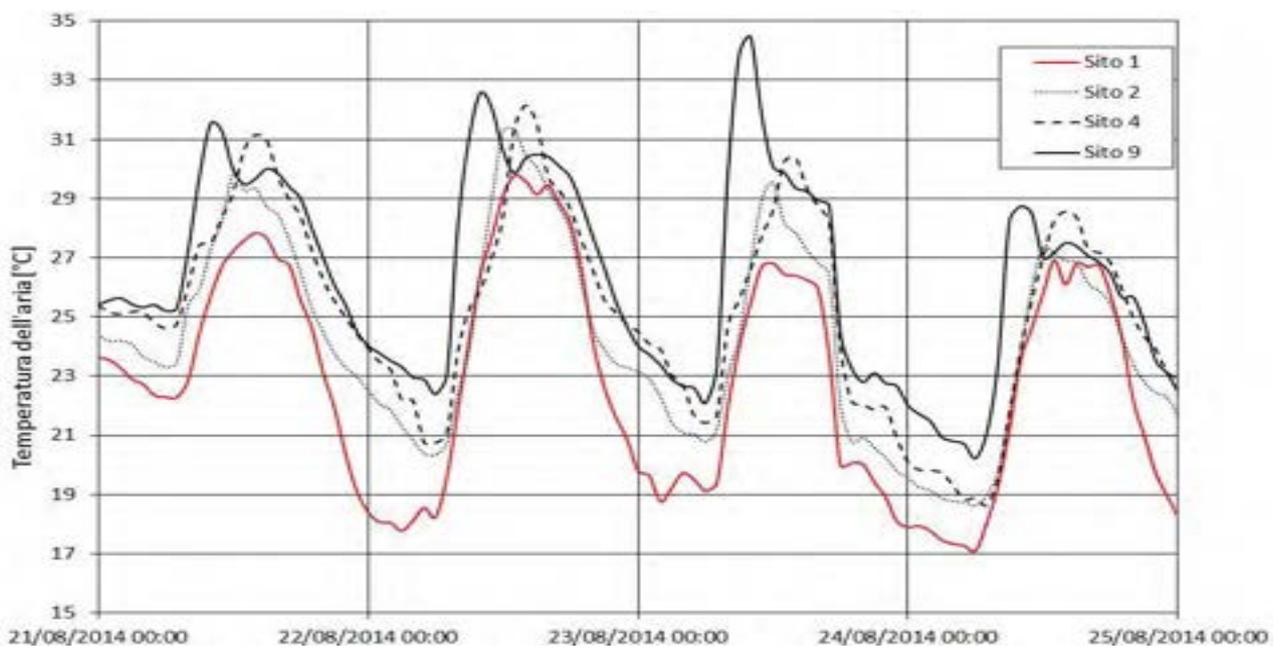


Figura 9: Andamento delle temperature orarie 21/08/2014 ore 00:00 - 25/08/2014 ore 00:00.

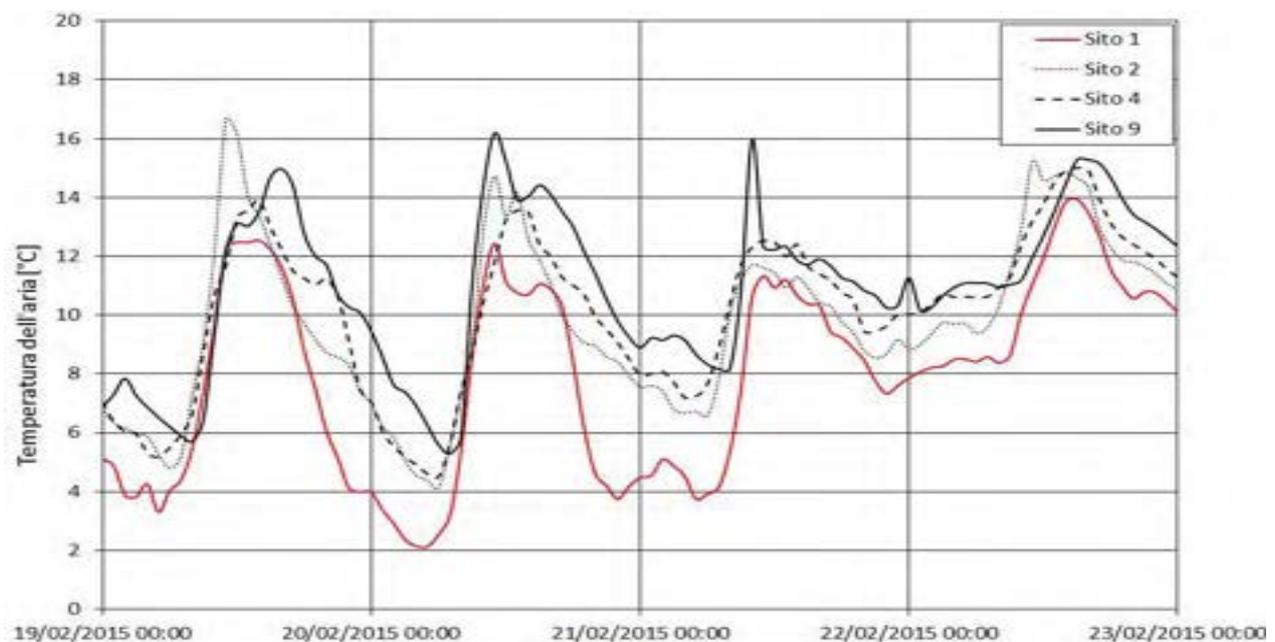


Figura 10: Andamento delle temperature orarie 19/02/2015 ore 00:00 - 23/02/2015 ore 00:00.

Il Sito 1, ANGUILLARA, è stato scelto come riferimento valutare il fenomeno dell'isola di calore urbana da qui in poi indicata anche con UHI (*Urban Heat Island*). La sua intensità è definita come l'incremento della temperatura dell'aria nelle aree urbanizzate calcolato a partire dalla temperatura dell'aria delle zone rurali limitrofe. Questo parametro può essere riferito a valori istantanei o a medie riferite a differenti periodi (dall'orario allo stagionale). La Tabella 3 fornisce i valori dell'intensità dell'isola di calore calcolati su base mensile, rispetto al sito di riferimento, e nel periodo estivo compreso tra il 01/07/2014 e il 20/09/2014.

Tabella 3: UHI nei siti monitorati su base mensile e media dell'intero periodo (01/07/2014 - 20/09/2014)

	Sito 2 [°C]	Sito 3 [°C]	Sito 4 [°C]	Sito 5 [°C]	Sito 6 [°C]	Sito 7 [°C]	Sito 8 [°C]	Sito 9 [°C]
Luglio	1,5	1,9	2,5	2,0	0,3	2,2	1,6	3,1
Agosto	1,6	2,0	2,6	2,0	0,9	2,3	1,8	3,4
Settembre	1,3	1,8	1,9	1,5	0,4	2,0	1,5	2,8
Periodo	1,5	1,9	2,4	1,9	0,5	2,2	1,7	3,2

Da questa tabella si nota come i siti nei quali il fenomeno dell'isola di calore si presenta in modo più intenso non sono necessariamente i più centrali. Infatti il valore più alto di UHI nel periodo considerato, 3,2 °C e nelle medie mensili, rispettivamente 3,1, 3,4 e 2,8 °C è stato registrato nel sito 9 una zona semiperiferica ma densamente costruita. Seguono poi il sito 4 (centro storico) e il sito 7 con valori di UHI rispettivamente di 2,4 e 2,2 °C nell'intero periodo in esame. Nonostante i siti 5 e 8 siano rappresentativi di due zone densamente urbanizzate si sono registrati valori di UHI rispettivamente di 1,9 e 1,7 °C e ciò è dovuto alla presenza di alberi lungo le strade che parzialmente mitigano le condizioni climatiche e, nel caso del sito 8, per la presenza del fiume Tevere. Il sito 2 è edificato in maniera del tutto simile al sito 5, ma è più periferico ed è limitrofo ad un'estesa area verde (UHI di 1,5 °C). Infine il sito che ha fatto registrare i valori di UHI più bassi è il sito 6: 0,5 °C nel periodo. E' da notare come i risultati calcolati sull'intero periodo siano mitigati dal clima nel mese di Settembre, periodo nel quale i valori di UHI risultano essere inferiori anche di 0,5 °C rispetto al mese di Agosto.

La Tabella 4 riporta i valori, calcolati con medie orarie delle temperature, dell'intensità dell'isola di calore. Rispetto alla precedente analisi essa fornisce informazioni più dettagliate riguardo l'impatto dell'urbanizzazione sui profili termici dell'ambiente.

Tabella 4: UHII calcolata su base oraria nel periodo 01/07/2014 - 20/09/2014

		UHII [°C]	Giorno di occorrenza
Sito 2	TORREVECCHIA	6,0	16/09/2014 15:00
Sito 3	BALEANI	7,7	16/09/2014 15:00
Sito 4	BRAZZA'	7,9	16/09/2014 15:00
Sito 5	MONTEVERDE	6,5	01/09/2014 09:00
Sito 6	NOMENTANA	6,6	16/09/2014 15:00
Sito 7	OSTIENSE	7,0	16/09/2014 15:00
Sito 8	PRATI	6,6	16/09/2014 15:00
Sito 9	TUSCOLANA	9,9	23/08/2014 09:00

I massimi valori di UHII registrati sono compresi tra 6 °C per il sito 2 (TORREVECCHIA), a 9.9 °C per il sito 9 (TUSCOLANA) che si dimostra essere anche in questo caso il sito più critico dal punto di vista termico. La Tabella 4 fornisce, inoltre, indicazioni sul giorno e l'ora di occorrenza del massimo valore di UHII.

Nonostante questi valori siano stati registrati durante la fase diurna è opportuno sottolineare come il fenomeno sia rilevante anche durante le ore notturne, come evidenziato in Figura 11. Essa rappresenta l'andamento dell'UHII rilevata durante il 18/08/2014. In queste ore (evidenziate in azzurro) si registrano valori dell'intensità dell'isola di calore che vanno da 3.3 a 7 °C.

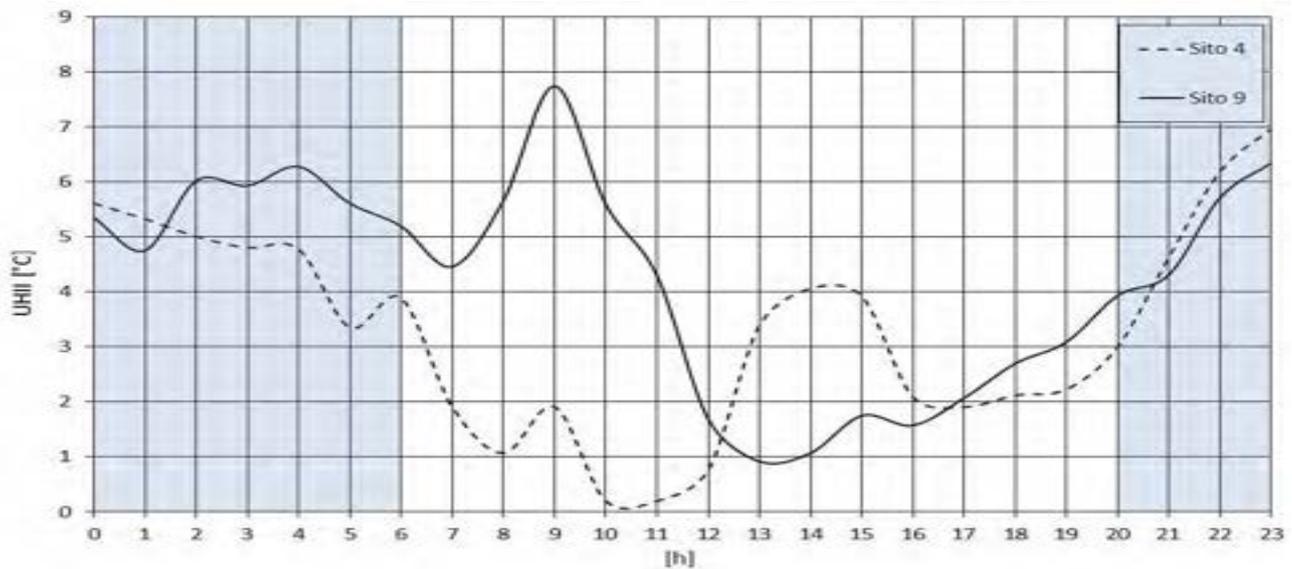


Figura 11: UHII registrata il 18/08/2014 per i siti 4 e 9.

Infine nella Figura 12 è riportata la distribuzione cumulativa dell'UHII calcolata tra il 01/07/2014 e il 20/09/2014. In tutti i siti ad eccezione del sito 6, per un numero di ore uguale e superiore al 30 % del periodo si è registrata un'UHII superiore a 2 °C. Per il sito 4 e il sito 9 questa percentuale supera il 60% (rispettivamente 60.7 e 76.6 %). Inoltre il sito 9 presenta valori di UHII superiori a 4 °C per il 28.2% e valori superiori a 6 °C per il 5.5 %. Il sito 6 fa registrare i valori più bassi infatti l'UHII supera i 3 °C per il 2.7% raggiungendo sporadicamente valori maggiori nel periodo.

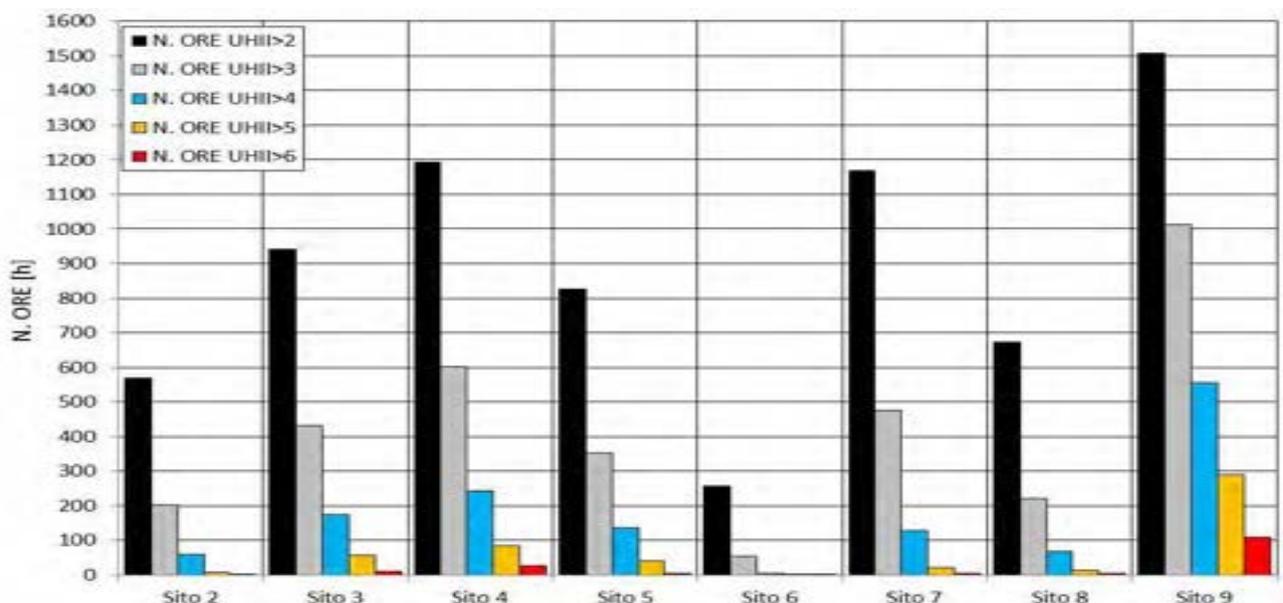


Figura 12: Distribuzione cumulativa dell'intensità dell'isola di calore (riferimento sito 1) nel periodo 01/07/2014 - 20/09/2014.

5.2 Prestazioni energetiche dell'edificio di riferimento

L'analisi energetica dell'edificio di riferimento è stata condotta con il software TRNSYS (Transient System Simulation Tool) sviluppato dalla University of Wisconsin Madison. Questo software consente l'analisi dinamica di sistemi energetici transitori complessi attraverso funzioni di trasferimento. Una sezione chiamata TRNBuild consente di progettare l'involucro edilizio e le sue proprietà termofisiche [22].

La Tabella 5 e la Tabella 6 riportano i fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento dell'edificio di riferimento per i 9 siti monitorati, espressi in kWh/m², rispettivamente per la configurazione non isolata e isolata. I fabbisogni riportati sono "netti" ovvero si riferiscono alla quantità energetica richiesta dall'edificio per mantenere le temperature di set-point, a prescindere dal tipo di fonte energetica utilizzata per soddisfare la richiesta.

L'incremento di isolamento della struttura determina una sensibile diminuzione del fabbisogno energetico di riscaldamento per tutti gli appartamenti e per tutti i siti simulati. E' stato registrato, inoltre, anche un decremento, seppur di modesta entità, del fabbisogno di raffrescamento nella maggior parte dei casi esaminati.

Esaminando i valori riportati nelle tabelle si evince come la temperatura influenzi in maniera chiara le prestazioni energetiche degli edifici. I valori dei fabbisogni risultano in linea con i dati di temperatura esterna rilevati dalle centraline.

Considerando la somma dei fabbisogni netti di tutti gli appartamenti riportata nelle tabelle, il sito 1 risulta essere l'area con il più alto fabbisogno di riscaldamento con un valore superiore a 420 kWh/m² per la configurazione non isolata e superiore a 134 kWh/m² per la configurazione isolata. I siti 3, 4 e 9, corrispondenti alle zone più densamente urbanizzate, hanno fatto registrare i valori più bassi del fabbisogno di riscaldamento, rispettivamente: 334,9, 337,2 e 307,3 kWh/m² per la configurazione non isolata e 115,9, 116,8 e 110,1 kWh/m² per quella isolata.

Tabella 5: Fabbisogni energetici dell'edificio di riferimento non isolato termicamente.

			Configurazione Non Isolata						
			Piano 2	Piano 2	Piano 1	Piano 1	Piano T	Piano T	Tot.
			Ovest	Est	Ovest	Est	Ovest	Est	Edificio
Riscaldamento [kWh/m ²]	Sito 1	Anguillara	90,2	90,3	58,6	59,1	61,0	61,5	420,7
	Sito 2	Torvecchia	76,2	76,4	49,4	50,0	51,3	51,8	355,1
	Sito 3	Baleani	71,8	71,9	46,8	47,2	48,4	48,8	334,9
	Sito 4	Brazzà	72,3	72,5	47,1	47,5	48,7	49,1	337,2
	Sito 5	Monteverde	73,1	73,3	47,6	48,1	49,3	49,7	341,1
	Sito 6	Nomentana	84,0	84,1	54,6	55,3	56,8	57,4	392,2
	Sito 7	Ostiense	73,4	73,6	48,0	48,6	49,6	50,2	343,4
	Sito 8	Prati	76,2	76,4	49,8	50,3	51,6	52,2	356,5
	Sito 9	Tuscolana	65,6	65,8	43,1	43,6	44,3	44,9	307,3
Raffrescamento [kWh/m ²]	Sito 1	Anguillara	21,5	21,2	18,7	18,4	13,1	12,8	105,7
	Sito 2	Torvecchia	29,8	29,7	25,7	25,6	19,3	19,1	149,2
	Sito 3	Baleani	32,6	32,5	27,9	27,7	21,2	21,0	162,9
	Sito 4	Brazzà	35,3	35,2	30,1	29,9	23,3	23,1	176,9
	Sito 5	Monteverde	33,1	32,9	28,3	28,1	21,6	21,4	165,4
	Sito 6	Nomentana	24,7	24,4	21,4	21,2	15,6	15,3	122,6
	Sito 7	Ostiense	35,3	35,2	30,2	30,0	23,3	23,1	177,1
	Sito 8	Prati	31,0	30,9	26,6	26,4	20,1	19,9	154,9
	Sito 9	Tuscolana	41,4	41,4	35,3	35,2	28,0	27,9	209,2

Tabella 6: Fabbisogni energetici dell'edificio di riferimento isolato termicamente.

			Configurazione Non Isolata						
			Piano 2	Piano 2	Piano 1	Piano 1	Piano T	Piano T	Tot.
			Ovest	Est	Ovest	Est	Ovest	Est	Edificio
Riscaldamento [kWh/m ²]	Sito 1	Anguillara	27,0	27,1	19,5	19,7	20,3	20,4	134,0
	Sito 2	Torrevecchia	23,4	23,6	17,7	17,8	18,3	18,4	119,2
	Sito 3	Baleani	22,5	22,6	17,5	17,5	17,9	17,9	115,9
	Sito 4	Brazzà	22,7	22,8	17,6	17,6	18,0	18,1	116,8
	Sito 5	Monteverde	22,8	23,0	17,6	17,7	18,1	18,1	117,3
	Sito 6	Nomentana	25,5	25,6	18,5	18,7	19,3	19,5	127,1
	Sito 7	Ostiense	22,9	23,1	17,7	17,8	18,1	18,2	117,8
	Sito 8	Prati	23,6	23,8	18,0	18,1	18,5	18,7	120,7
	Sito 9	Tuscolana	20,9	21,0	16,9	16,9	17,2	17,2	110,1
Raffrescamento [kWh/m ²]	Sito 1	Anguillara	18,5	18,4	17,6	17,6	14,4	14,3	100,8
	Sito 2	Torrevecchia	22,2	22,1	20,6	20,6	17,3	17,2	120,0
	Sito 3	Baleani	23,3	23,2	21,4	21,3	18,1	18,0	125,3
	Sito 4	Brazzà	24,3	24,3	22,3	22,2	18,9	18,8	130,8
	Sito 5	Monteverde	23,5	23,4	21,6	21,5	18,2	18,1	126,3
	Sito 6	Nomentana	19,9	19,8	18,7	18,7	15,4	15,3	107,8
	Sito 7	Ostiense	24,4	24,3	22,3	22,2	19,0	18,9	131,1
	Sito 8	Prati	22,6	22,5	20,9	20,8	17,5	17,4	121,7
	Sito 9	Tuscolana	26,9	26,9	24,4	24,3	21,0	20,9	144,4

Per quanto concerne il fabbisogno di raffrescamento il sito rurale di riferimento ha fatto registrare valori sensibilmente inferiori rispetto agli altri siti. I siti urbani con i più alti valori del fabbisogno di raffrescamento risultano essere il sito 7 e il 9, rispettivamente di 177,1 e 209,2 kWh/m² per la configurazione non isolata e 131,1 e 144,4 kWh/m² per la configurazione isolata.

L'influenza delle temperature sulla prestazione degli edifici è stato messo in evidenza anche nella Figura 13, nella Figura 14 e nella Figura 15 dove sono state riportate le variazioni relative rispettivamente del fabbisogno netto dell'intero edificio rispettivamente, di riscaldamento, raffrescamento e totale, riferiti ai valori ottenuti per il sito di riferimento (sito 1). Il fabbisogno totale netto, ottenuto come somma dei fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento è un esercizio puramente teorico (il fabbisogno totale dipende dalla somma dei fabbisogni primari che tengono conte della fonte energetica e dell'impianto di produzione), ma è stato scelto comunque di presentarlo all'interno del report a scopo puramente indicativo.

Analizzando la Figura 13 si nota come la diminuzione relativa del fabbisogno energetico di riscaldamento annuo sia compresa tra 6.8% (sito 6) e 27% (sito 9) per la configurazione non isolata. Le variazioni per la configurazione isolata risultano essere allineate alle precedenti sebbene di entità minore.

Variazioni più sensibili si sono registrate analizzando l'incremento relativo del fabbisogno di raffrescamento annuo, riportato in Figura 14. Esse sono comprese tra 16% (sito 6) e 97,9% (sito 9) per la configurazione non isolata. Per la configurazione abitativa più termicamente isolata le variazioni sono comprese tra 6,9% (sito 6) e 43,36% (sito 9). Il sito 9 si conferma come il sito più "caldo".

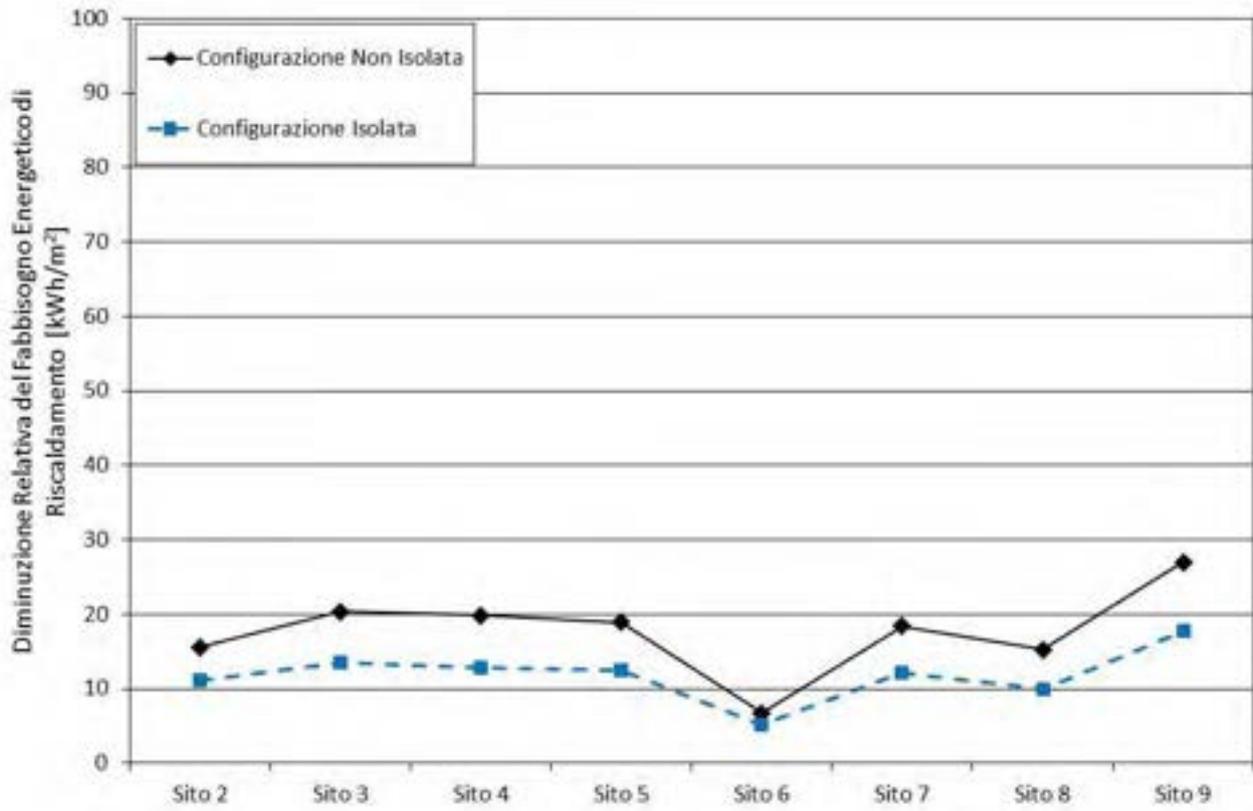


Figura 13: Diminuzione relativa del fabbisogno di riscaldamento.

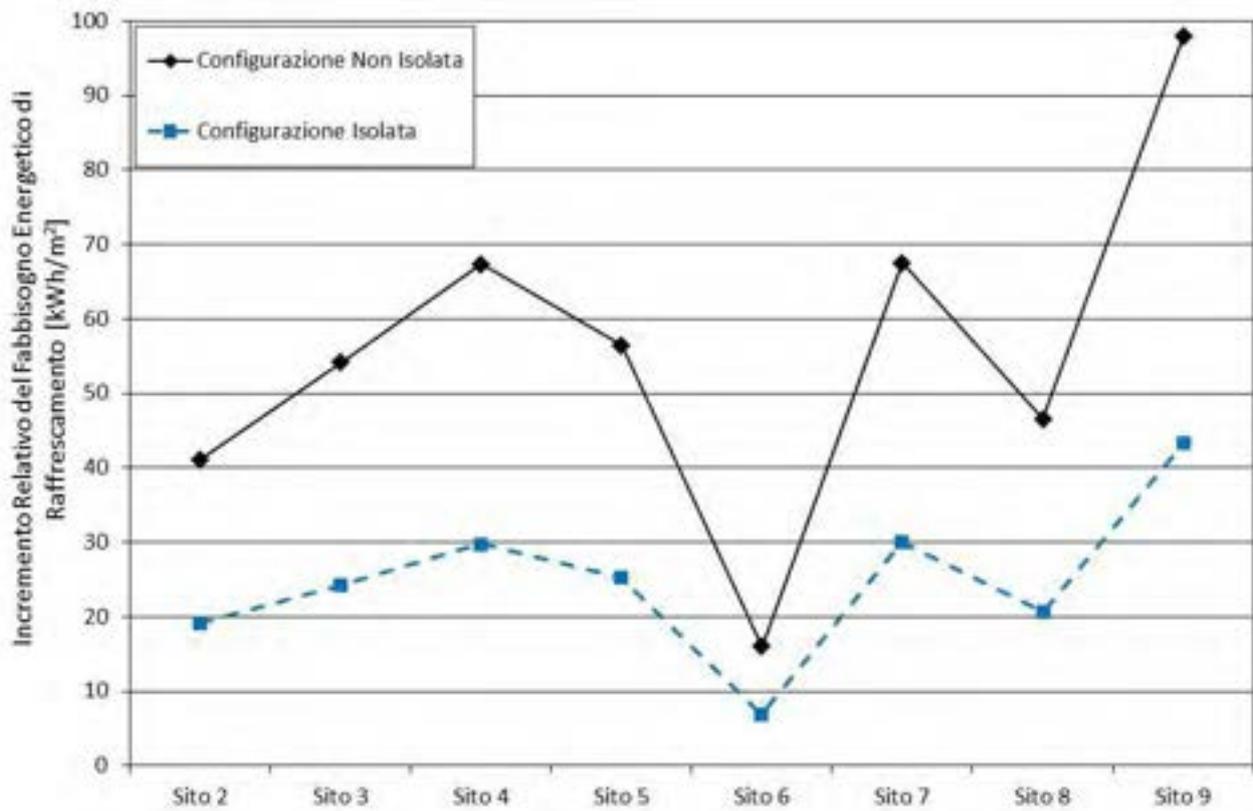


Figura 14: Incremento relativo del fabbisogno di raffrescamento.

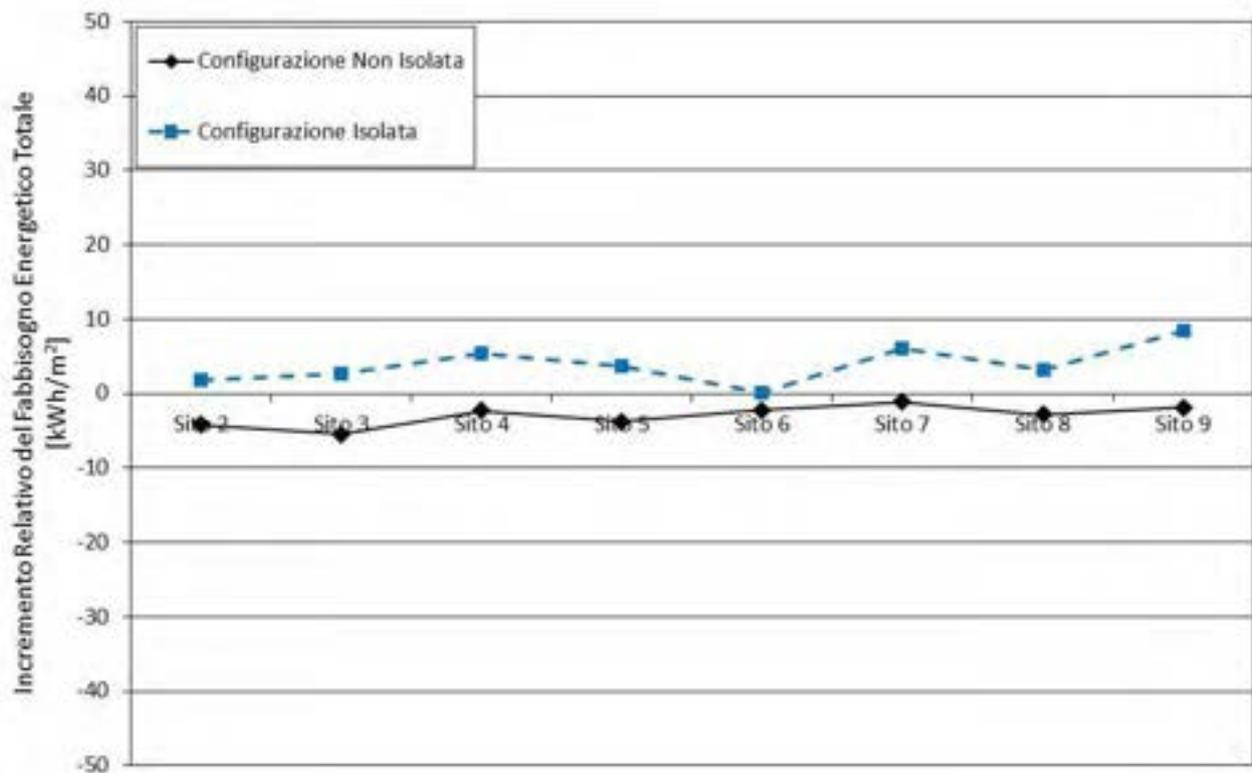


Figura 15: Variazione relativa del fabbisogno totale.

Analizzando la Figura 15, che riporta l'incremento relativo del fabbisogno totale netto, si nota una tendenza molto più piatta delle precedenti. Per la configurazione abitativa non isolata si registra una diminuzione relativa del fabbisogno annuo per tutti i siti oggetto di studio, con un decremento massimo del 5,4% registrato per il sito 3. Passando alla configurazione abitativa isolata si nota, invece, un aumento del fabbisogno energetico annuo in tutti i siti ad eccezione del sito 6 (incremento 0%). L'incremento relativo più elevato è pari a 8,4% rilevato nel sito 9.

5.3 Prestazioni termiche dell'edificio di riferimento

L'analisi numerica condotta con TRNSYS ha permesso anche di studiare l'effetto delle temperature urbane sull'evoluzione delle temperature interne dell'edificio di riferimento mantenendo spento il sistema di raffrescamento. I ricambi orari sono stati attivati solo nelle ore notturne, dalle 20:00 alle 08:30. I valori scelti per i suddetti ricambi orari sono stati: 1, 3, 5, 10 volumi/h. A titolo di esempio nella Figura 16 e nella Figura 17 sono riportate la distribuzioni cumulative del numero di ore in cui i valori di temperatura operativa sono risultati essere maggiori di alcuni valori prescelti: 26, 28, 30 e 32 °C. E' stato scelto di presentare i risultati ottenuti nel periodo dal 01/07/2014 al 20/09/2014 per un singolo appartamento, tra i 6 simulati, posizionato al primo piano con esposizioni Nord-Ovest-Sud. Sono stati scelti inoltre 3 siti rappresentativi tra i 9 selezionati: il sito 1 (zona rurale di riferimento); il sito 2 (zona urbana mitigata dalla presenza di un'estesa area verde) e il sito 9 (caratterizzato dall'essere il sito più termicamente critico, come evidenziato dai precedenti risultati).

Dall'analisi delle distribuzioni cumulative riportate nelle figure si nota come un incremento dei ricambi orari determini una sensibile diminuzione delle ore in cui le temperature raggiungono e superano i valori prestabiliti, sia per la configurazione non isolata (Figura 16) che per la configurazione isolata (Figura 17).

Mettendo a confronto le due configurazioni di isolamento è interessante notare come l'incremento del potere isolante della struttura determini un aumento delle ore di discomfort termico per le simulazioni condotte con 1 e 3 volumi/h. Vi è, infatti, un aumento del numero di ore in cui le temperature si attestano al di sopra dei valori prestabiliti e il fenomeno diventa più sensibile passando dal sito rurale (sito 1) a quello più termicamente critico (sito 9). Il fenomeno si presenta in maniera opposta per le simulazioni condotte con 5 e 10 volumi/h dove un incremento dell'isolamento della struttura determina un abbassamento del numero di ore per ogni temperatura operativa considerata, incrementando, quindi, il comfort termico.

Le Tabella 7 e la Tabella 8 permettono di valutare ancora maggiormente le differenze tra la risposta termica di un edificio posto in una zona rurale rispetto ad uno posizionato in un'area urbana densamente costruita. Le tabelle infatti riportano l'incremento relativo del numero di ore in cui la temperatura operativa uguaglia e supera i valori stabiliti in precedenza a seguito di un incremento dei ricambi orari (da 1 a 3, da 1 a 5 e da 1 a 10 volumi/h) per i 3 siti scelti.

Per la configurazione non isolata (Tabella 7), considerando il sito 1 e passando da 1 a 3 volumi/h vi è una variazione relativa del 45% nel numero delle ore in cui la temperatura uguaglia e supera i 26 °C. Questa variazione passa a 67,1% e 83,7% rispettivamente considerando 5 e 10 volumi/h. Decisamente inferiori sono le variazioni percentuali ottenute per il sito 9. Passando da 1 a 3 volumi/h si ottiene una variazione relativa del 5,8% nel numero delle ore in cui la temperatura uguaglia e supera i 26 °C. Incrementando i ricambi orari si ottengono variazioni del 14 e del 29,4% rispettivamente per 5 e 10 volumi/h. Queste considerazioni possono essere replicate per le altre temperature operative analizzate e per i risultati ottenuti per la configurazione isolata riportati in Tabella 8.

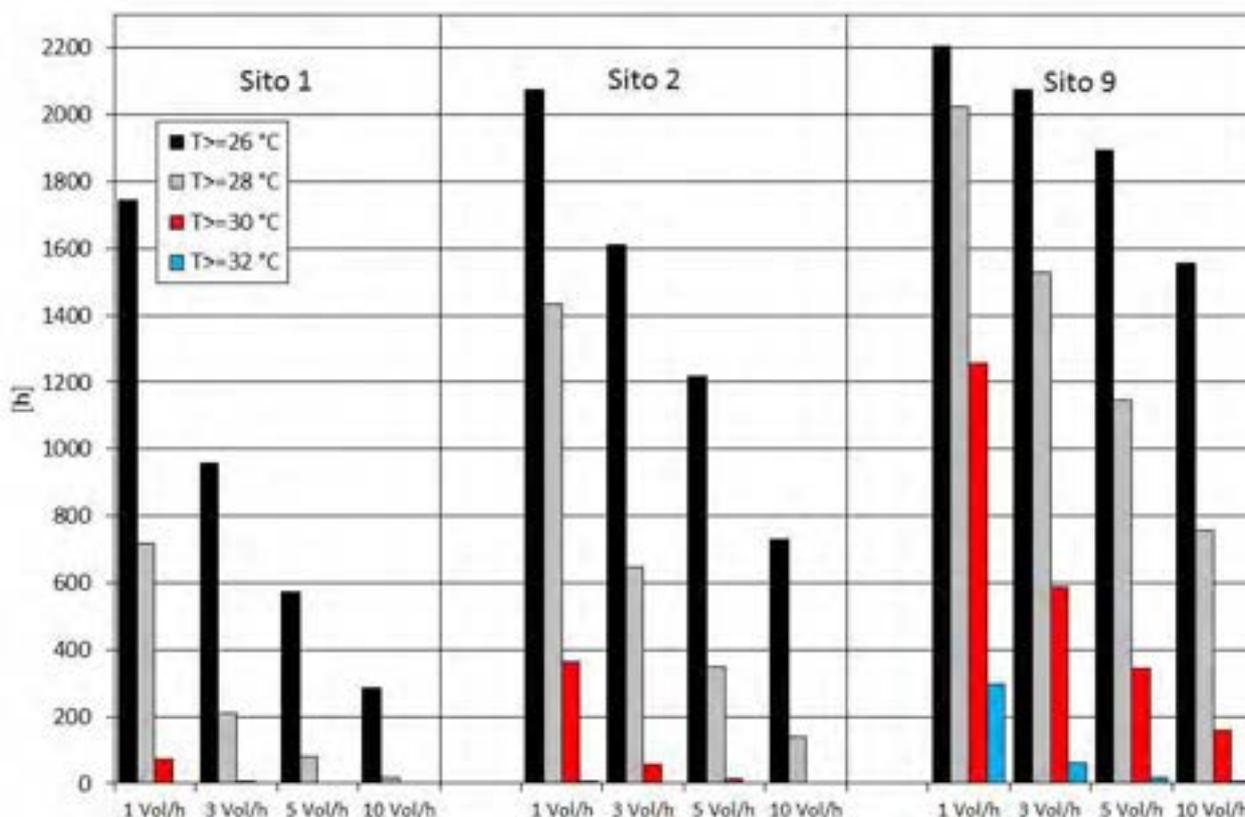


Figura 16: Distribuzione cumulativa delle temperature operative al variare dei ricambi orari per tre siti, configurazione non isolata.

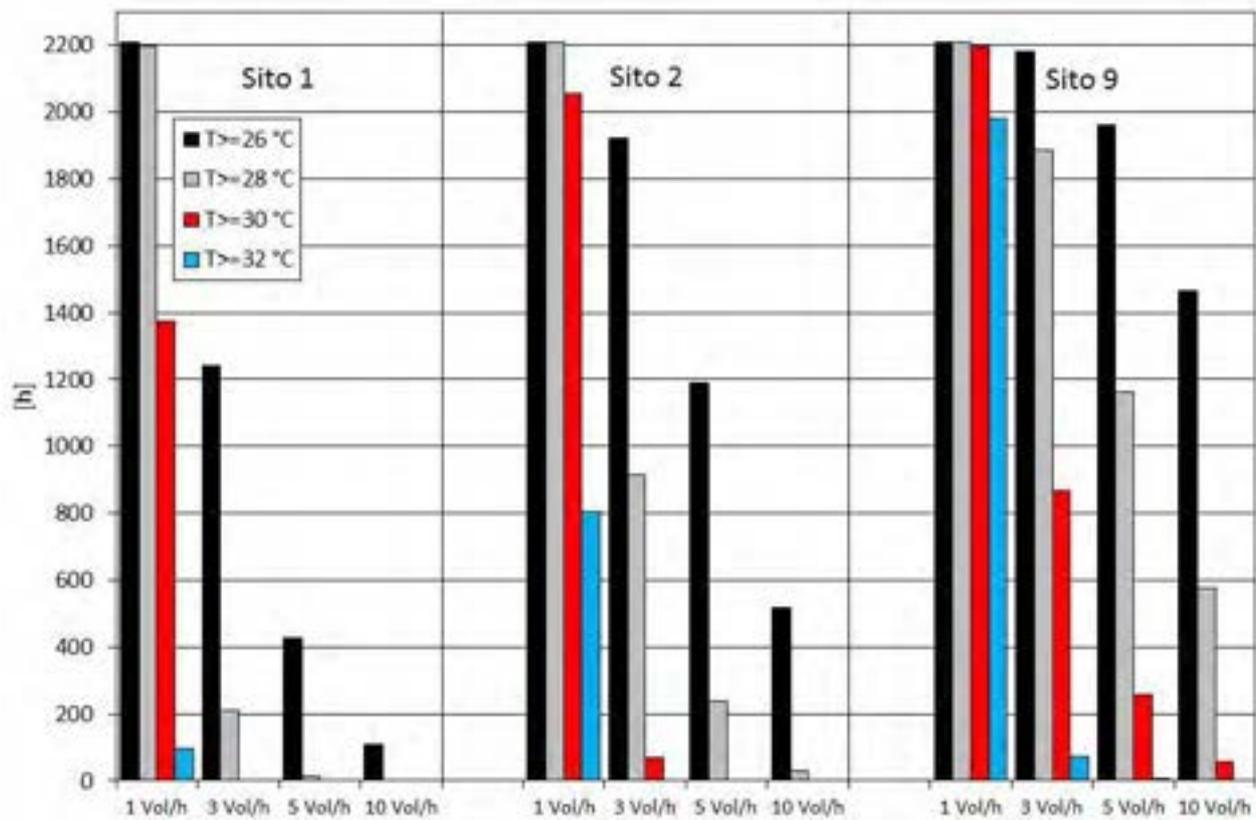


Figura 17: Distribuzione cumulativa delle temperature operative al variare dei ricambi orari per tre siti, configurazione isolata.

Tabella 7: Diminuzione relativa della distribuzione cumulativa oraria delle temperature operative, configurazione non isolata.

			$\Delta(1 \text{ vol/h-}3 \text{ vol/h}) [\%]$	$\Delta(1 \text{ vol/h-}5 \text{ vol/h}) [\%]$	$\Delta(1 \text{ vol/h-}10 \text{ vol/h}) [\%]$
Sito 1	Anguillara	T >= 26 °C	45,0	67,1	83,7
		T >= 28 °C	70,6	89,0	97,6
		T >= 30 °C	98,6	100,0	100,0
		T >= 32 °C	-	-	-
Sito 2	Torrevecchia	T >= 26 °C	22,5	41,3	64,9
		T >= 28 °C	54,8	75,7	90,3
		T >= 30 °C	84,3	96,7	100,0
		T >= 32 °C	100,0	100,0	100,0
Sito 9	Tuscolana	T >= 26 °C	5,8	14,0	29,4
		T >= 28 °C	24,5	43,4	62,6
		T >= 30 °C	53,3	72,5	87,2
		T >= 32 °C	79,2	94,0	99,0

Tabella 8: Diminuzione relativa della distribuzione cumulativa oraria delle temperature operative, configurazione non isolata.

			$\Delta(1 \text{ vol/h-3 vol/h}) [\%]$	$\Delta(1 \text{ vol/h-5 vol/h}) [\%]$	$\Delta(1 \text{ vol/h-10 vol/h}) [\%]$
Sito 1	Anguillara	T \geq 26 °C	43,8	80,6	95,2
		T \geq 28 °C	90,4	99,5	100,0
		T \geq 30 °C	100,0	100,0	100,0
		T \geq 32 °C	100,0	100,0	100,0
Sito 2	Torrevecchia	T \geq 26 °C	13,0	46,2	76,5
		T \geq 28 °C	58,6	89,3	98,7
		T \geq 30 °C	96,6	100,0	100,0
		T \geq 32 °C	100,0	100,0	100,0
Sito 9	Tuscolana	T \geq 26 °C	1,2	11,3	33,6
		T \geq 28 °C	14,7	47,4	73,9
		T \geq 30 °C	60,6	88,3	97,4
		T \geq 32 °C	96,3	99,8	100,0

5.4 Risultati dell'analisi termo-fluidodinamica

L'analisi numerica del modello multi-fisico descritto nel paragrafo 4.2 è stata condotta attraverso la piattaforma CFD ANSYS Fluent [23]. Essa ha lo scopo di valutare in via preliminare l'evoluzione delle masse d'aria in ingresso nell'edificio modellato, come conseguenza dell'apertura programmata delle finestre durante le ore notturne.

Le condizioni termiche dell'aria in ingresso al dominio sono state estrapolate dai dati delle centraline microclimatiche. In particolare sono scelti i dati relativi ad una giornata estiva, il 18 Agosto, per due zone, una rurale ed una urbana, rispettivamente: il sito 1 e il sito 3.

La corretta esecuzione dell'analisi numerica prevede tre fasi:

- 1 Simulazione stazionaria delle condizioni più critiche della giornata, ovvero alle ore 14:00, che ha lo scopo di portare a convergenza tutte le equazioni del modello.
- 2 Simulazione transitoria che simuli il comportamento inerziale delle masse murarie dalle ore 14:00 fino alle ore 20:00 del giorno successivo per un totale di 30 ore di simulazione.
- 3 Simulazione transitoria che simuli l'apertura delle finestre con la conseguente entrata dell'aria ambiente all'interno della casa.

Attualmente non è stato ancora possibile realizzare la terza fase di simulazione. Lo studio fluidodinamico relativo alla ventilazione naturale all'interno dell'edificio dovuto all'apertura delle finestre, necessita di una discretizzazione temporale in frazioni di secondo. Dato che l'obiettivo dello studio è la valutazione dei ricambi orari durante la fase notturna, il numero di iterazioni necessarie a valutare tale fenomeno raggiungerebbe valori che comporterebbero un tempo di simulazione proibitivo data la potenza di calcolo disponibile.

Per tale motivo sono state eseguite delle simulazioni preliminari di tipo stazionario in due diversi orari della giornata (ore 20:00 ed ore 23:00) considerando il diverso accumulo termico all'interno dell'involucro ottenuto attraverso i risultati delle simulazioni della seconda fase.

Lo scopo di tali simulazioni è testare il modello per poi condurre successivamente le simulazioni di tipo dinamico con le finestre aperte.

I risultati riportati in Figura 18 mostrano la distribuzione dell'aria nel volume interno su un piano ad un'altezza di 1,5 metri. Il flusso entrante dalla finestra con esposizione ovest diffonde all'interno dell'edificio creando zone di ristagno (velocità=0 m/s). La velocità media dell'aria nel volume dell'edificio risulta essere di 0,77 m/s.

Dato che le condizioni fluidodinamiche iniziali sono le stesse per entrambi i siti oggetto di studio, non esistono sostanziali differenze dal punto di vista della distribuzione dell'aria all'interno del volume.

Non essendo stato possibile apprezzare i comportamenti dinamici della ventilazione notturna, in questa fase non si è potuto ottenere l'evoluzione dei ricambi orari. A causa della stazionarietà dell'analisi, la temperatura dell'aria interna si è portata in equilibrio con quella esterna e la portata d'aria in ingresso ed in uscita dal volume sono risultate essere identiche.

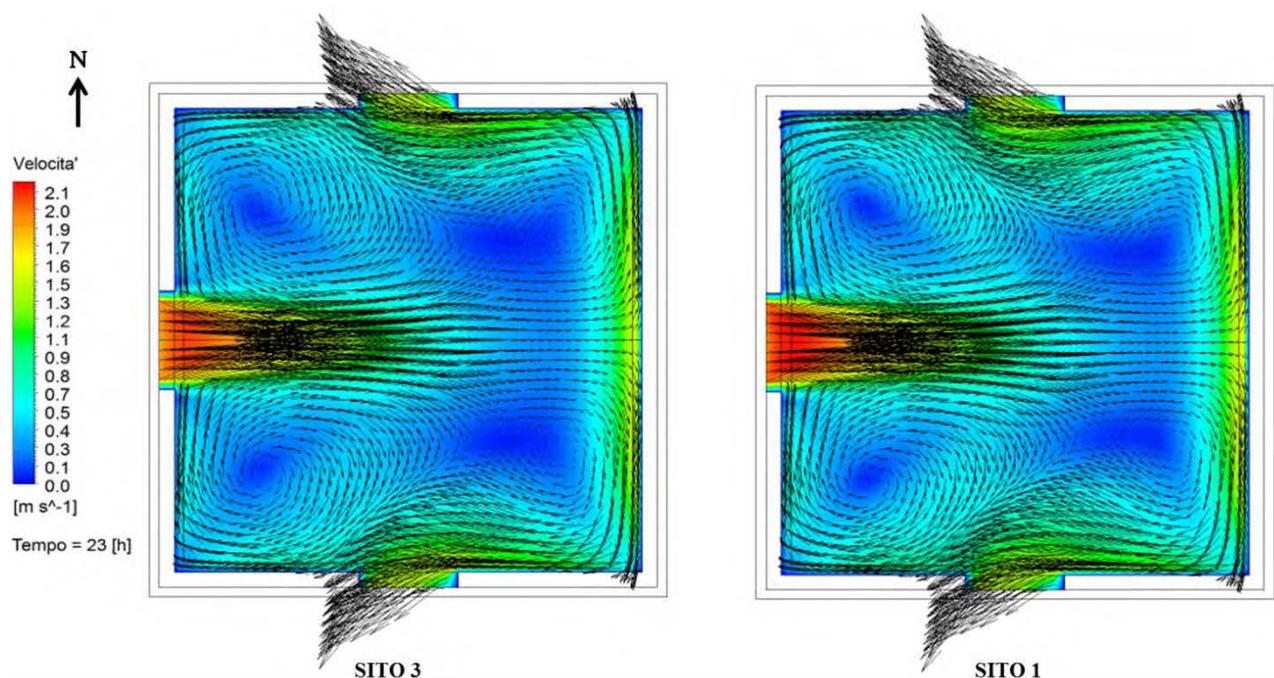


Figura 18: Distribuzione della velocità dell'aria all'interno della casa ad un'altezza di 1,5 metri.

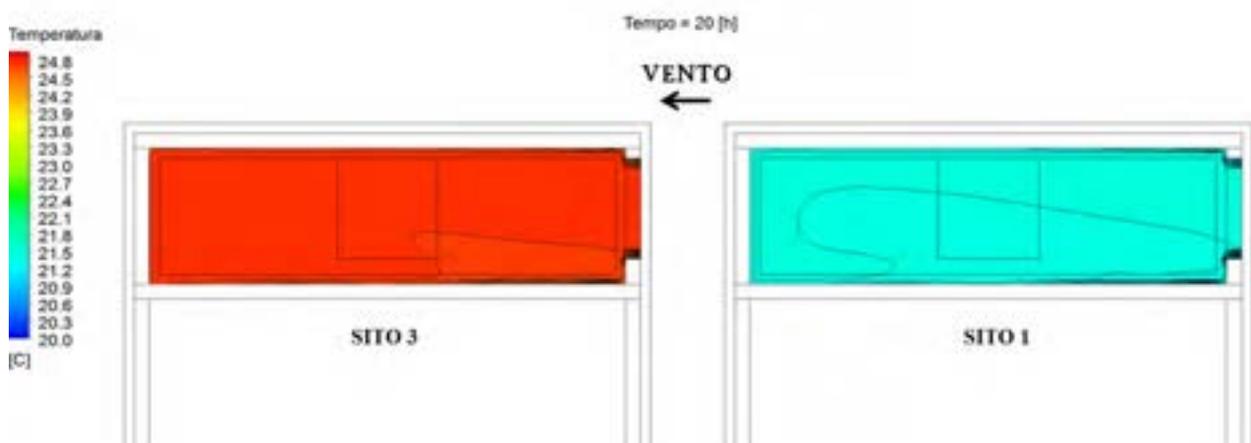


Figura 19: Confronto della temperatura dell'aria interna alla casa fra il sito 1 e 3 alle 20:00.

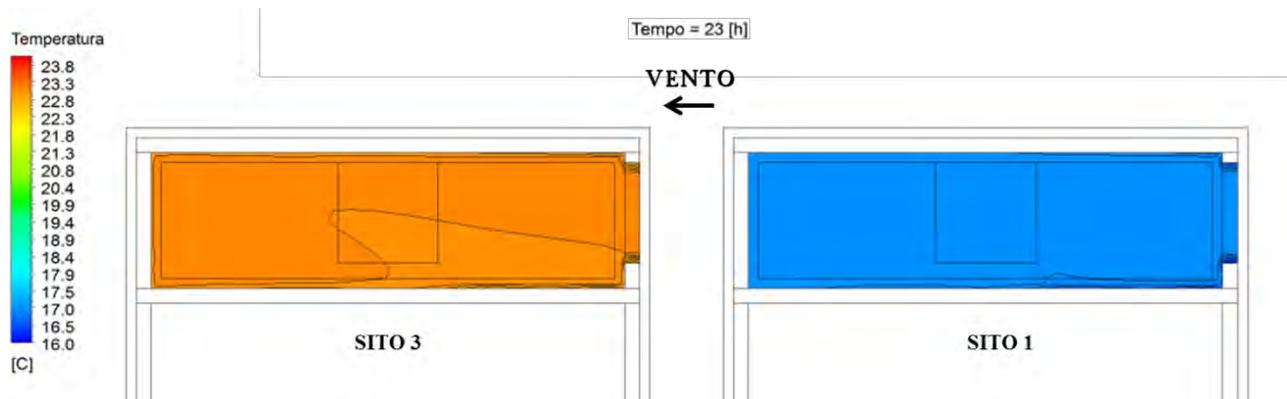


Figura 20: Confronto della temperatura dell’aria interna alla casa fra il sito 1 e 3 alle 23:00.

6 Discussione e Conclusioni

Questo report presenta uno studio mirato a quantificare l’impatto del clima urbano sulle performance energetiche degli edifici. La fase iniziale del lavoro parte dall’analisi dei dati immagazzinati in 9 centraline microclimatiche dislocate nell’area metropolitana di Roma che acquisiscono in continuo la temperatura a bulbo secco e l’umidità relativa dal 01/07/2014 con intervalli di 10 minuti.

I risultati mostrano come le aree densamente urbanizzate di Roma siano affette da un rilevante aumento delle temperature rispetto alle aree rurali. Questo fenomeno definito isola di calore urbana si presenta con intensità variabili a seconda della porzione di città investigata. L’isola di calore calcolata nel periodo estivo considerato (01/07/2014 - 20/07/2014) è compresa tra 0,5 °C per il sito 6 (Nomentana) e 3,2 °C per il sito 9 (Tuscolana). Quest’ultimo sito ha fatto anche registrare il più alto valore di intensità di isola di calore calcolato sul dato orario: 9,9 °C.

La seconda fase del lavoro si è incentrata su un’analisi energetica condotta su un edificio di riferimento simulato con due livelli di isolamento, ottenendo come risultato sia i valori dei fabbisogni energetici per le diverse zone, sia l’evoluzione temporale delle temperature operative interne. Per quanto concerne la configurazione abitativa non isolata, i risultati mostrano un significativo aumento del fabbisogno di raffrescamento nelle aree densamente urbanizzate, rispetto al riferimento rurale, compreso tra il 16% del sito 6 al 97,9% del sito 9. Queste variazioni percentuali si dimezzano considerando la configurazione abitativa isolata. Variazioni sensibili, anche se minori rispetto alle precedenti, si sono ottenute analizzando la diminuzione del fabbisogno di riscaldamento rispetto al sito rurale, dal 6,8% del sito 6 al 27% per il sito 9, considerando la configurazione non isolata e dal 5,1% del sito 6 al 17,8% per il sito 9, considerando la configurazione isolata. L’analisi delle distribuzioni cumulative delle temperature operative in condizioni di oscillazione libera durante le ore notturne nel periodo estivo ha messo in evidenza come la variazione della portata d’aria della ventilazione naturale influisca sulla diminuzione delle ore in cui l’ambiente interno si trova in condizioni di discomfort in modo più rilevante nelle zone rurali che nelle zone densamente urbanizzate. Per l’edificio non isolato variando i ricambi orari da 1 a 10 volumi/h si ha un decremento del numero di ore in cui la temperatura è uguale o superiore a 26 °C che varia tra 29,4% per il sito 9 (che ha dimostrato essere il più critico dal punto di vista termico) a 83,7% per il sito 1. L’edificio non isolato ha fatto registrare variazioni comprese tra il 33,6% e 95,2% rispettivamente per il sito 9 e il sito 1.

Infine un'analisi numerica CFD ha permesso di testare un modello in grado di apprezzare la variazione delle grandezze termo-fluidodinamiche all'interno di un edificio residenziale considerandolo inserito sia in un contesto rurale che urbano.

Lo studio ha messo in risalto le differenze tra l'area rurale e le aree urbanizzate, sottolineando come il clima in quest'ultime possa generare problematiche di discomfort e di salute pubblica durante i periodi estivi, sia su scala urbana che di edificio. Risulta quindi necessario implementare strategie per mitigare le temperature urbane, sia attraverso l'estensione delle aree verdi, dove possibile (sito 2, sito 7, sito 9) sia attraverso l'utilizzo di materiali con elevato potere di riflessione della radiazione solare ed elevata emissività termica (Cool Materials) che ridurrebbero le temperature superficiali del costruito e gli scambi termici convettivo-radiativi con l'ambiente. L'impiego di queste soluzioni mitigherebbe specialmente le ore notturne ovvero il periodo in cui sono applicabili le tecniche di raffrescamento tramite ventilazione naturale.

7 Bibliografia

- [1] IPCC, Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, Geneva, Switzerland.
- [2] IPCC, 2014: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [3] Plan Bleu, (2008) Climate Change and Energy in the Mediterranean Plan Bleu - Regional Activity Center, Sophia Antipolis, July 2008.
- [4] Oke, T.R., Johnson, G.T., Steyn, D.G., Watson, I.D. (1991). 'Simulation of surface urban heat islands under "ideal" conditions at night: Part 2'. Diagnosis of causation, Boundary Layer Meteorol. 56, 339-358.
- [5] Santamouris, M. (Ed.) (2001). 'Energy and Climate in the Urban Built Environment'. James and James Science Publishers, London.
- [6] Stewart, D. (2011). 'A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature'. International Journal of Climatology, Special Issue: ICUC-7 Urban Climate Meeting 31(2), 200-217.
- [7] Papanastasiou, D.K., Kittas C. (2012). 'Maximum urban heat island intensity in a medium-sized coastal Mediterranean city'. Theoretical and Applied Climatology, 107 (3-4) (2012), 407-416.
- [8] Coseo P., Larsen L. (2014). 'How factors of land use/land cover, building configuration, and adjacent heat sources and sinks explain Urban Heat Islands in Chicago'. Landscape and Urban Planning, Volume 125, 117-129.
- [9] Carnielo E., Zinzi M. (2013). 'Optical and thermal characterisation of cool asphalts to mitigate urban temperatures and building cooling demand'. Building and Environment, 60, 2013, 56-65.
- [10] Rose L.S., Akbari H., Taha H. (2003). 'Characterizing the Fabric of the Urban Environment: A Case Study of Greater Houston, Texas'. Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-51448, Berkeley, CA.

- [11] Kolokotroni M., Ren X., Davies M., Mavrogianni A. (2012). 'London's urban heat island: impact on current and future energy consumption in office buildings'. *Energy and Buildings*, 47, 302-311.
- [12] Akbari H., Konopacki S. (2004). 'Energy effects of heat-island reduction strategies in Toronto, Canada'. *Energy and Buildings*, 29, 191-210.
- [13] Santamouris M., Papanikolaou N., Livada I., Koronakis I., Georgakis C., Argiriou A., Assimakopoulos D.N. (2001). 'On the impact of urban climate to the energy consumption of buildings'. *Solar Energy*, 70 (3), 201-216.
- [14] Evola G., Popov V. (2006). 'Computational analysis of wind driven natural ventilation in buildings'. *Energy and Buildings*, 38 (5), 491-501.
- [15] Jiang Y., Alexander D., Jenkins H., Arthur R., Chen Q. (2003). 'Natural ventilation in buildings: measurement in a wind tunnel and numerical simulation with large-eddy simulation'. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91 (3), 331-353.
- [16] Jiang Y., Chen Q. (2001). 'Study of natural ventilation in buildings by large eddy simulation'. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 89 (13), 1155-1178.
- [17] Jiang Y., Chen Q. (2003). 'Buoyancy-driven single-sided natural ventilation in buildings with large openings'. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46 (6), 973-988.
- [18] Jiang Y., Chen Q. (2002). 'Effect of fluctuating wind direction on cross natural ventilation in buildings from large eddy simulation'. *Building and Environment*, 37 (4), 379-386.
- [19] UNI TS 11300-1. (2008). Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale.
- [20] Tominagaa, Y., Mochidab A., Yoshiec R., Kataokad H., Nozue T., Yoshikawaf M., Shirasawa T. (2008). 'AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings'. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96, 1749-1761.
- [21] Blocken B., Carmeliet J., Stathopoulos T. (2007). 'CFD evaluation of wind speed conditions in passages between parallel buildings—effect of wall-function roughness modifications for the atmospheric boundary layer flow'. *Journal of Wind Engineering*, 95, 941-962.
- [22] TRNSYS 16; www.trnsys.com.
- [23] Ansys Fluent version 15.0, 2013. User's Guide.