

Ondate di calore: risposta termica e comportamento energetico nell'edilizia sociale

Simone Massetti, Gianluca Maracchini, Elisa Di Giuseppe, Marco D'Orazio

Le ondate di calore influiscono sulla vita delle persone, soprattutto quelle a reddito basso perché aumenta i consumi energetici dovuti agli impianti di raffrescamento. Un esempio di monitoraggio delle prestazioni termiche ed energetiche di due edifici a Reggio Emilia evidenzia questo fenomeno.

Il cambiamento climatico ha comportato l'aumento di eventi climatici estremi come le ondate di calore. Questo fenomeno colpisce sia la qualità della vita umana che gli edifici incrementando il consumo energetico e determinando un deterioramento della qualità ambientale interna. Le famiglie a basso reddito sono quelle maggiormente colpite a causa del ridotto utilizzo dell'impianto di raffrescamento. Dal monitoraggio delle prestazioni termiche ed energetiche di due edifici a Reggio Emilia si registra un notevole incremento dei consumi per la climatizzazione durante eventi di ondate di calore.

1. Introduzione

Eventi meteorologici estremi stanno aumentando in tutto il mondo sia in intensità che in frequenza. Un'ondata di calore (OdC) è un evento dovuto al cambiamento climatico, caratterizzato da temperature dell'aria insolitamente elevate rispetto alla media stagionale. Le implicazioni di questo fenomeno hanno effetti sulla salute delle persone [1], [2] e sul consumo di energia [3,4]. Le OdC, se accompagnate da elevati livelli di umidità, radiazione solare ed una mancata ventilazione, impediscono al corpo umano di rinfrescarsi mediante sudorazione, in quanto il sudore non evapora rapidamente; l'esposizione prolungata in queste condizioni può comportare effetti dannosi per la salute, arrivando nei casi più gravi a congestione, ictus e disidratazione [5].

Le proiezioni future indicano che le OdC saranno più frequenti in Europa tra il 2020 ed il 2049, con un aumento fino a 4 volte entro la fine del XXI secolo [6]. È fondamentale comprendere l'impatto delle OdC sul comfort termico interno ed esterno, nonché l'effetto sui consumi energetici degli edifici.

Da letteratura si scopre che diversi autori hanno valutato numericamente l'impatto delle OdC sugli edifici valutandone la risposta termica ed i consumi [4,7–9]. Questi studi hanno considerato anche i possibili effetti sinergici con il fenomeno Isola di Calore Urbana (UHI), che rappresenta l'aumento delle temperature urbane in confronto a quelle rurali [10–12]. Su questa tematica sono state confrontate le prestazioni termiche ed energetiche di edifici energeticamente inefficienti con quelle di edifici ad alta efficienza energetica in Australia [13,14]. Si è dimostrato che gli edifici ad alta efficienza non risultano essere migliori per mitigare lo stress termico delle OdC. In [8] l'impatto combinato delle OdC e dell'UHI sugli edifici residenziali mostrano un aumento significativo delle temperature interne e dei consumi energetici (rispettivamente 3,5°C e 87%) a confronto con il resto dell'estate.

Gli studi attuali presentano un limite nell'utilizzo di un approccio deterministico standard per modellare il comportamento degli occupanti negli edifici, trascurando possibili cambiamenti comportamentali che possono verificarsi. Ad esempio, in situazioni di povertà energetica, i costi energetici possono far desistere gli occupanti all'attivazione del sistema di climatizzazione seppur in caso di disagio termico. Durante le OdC le preoccupazioni per la salute possono prevalere a quelle economiche, portando a comportamenti diversi da quelli previsti, come un aumento nell'attivazione dei sistemi di Aria Condizionata (AC).

Le famiglie a basso reddito sono le più vulnerabili durante le OdC, poiché spesso non dispongono di un adeguato sistema di climatizzazione o non possono permettersi le spese legate al suo utilizzo [15]. Ad esempio, nel 1995 a Chicago, la maggior parte delle 700 vittime causate da una OdC apparteneva a gruppi a basso reddito senza aria condizionata [16]. Nel 2007 le abitazioni delle famiglie a basso reddito di Atene hanno registrato temperature interne superiori a 30°C per l'85% dell'estate [17]. Uno studio ha evidenziato un ampio divario nell'accesso ai sistemi di climatizzazione nei paesi del Sud del mondo [18]. Molti autori hanno affrontato il tema della povertà energetica, sebbene la maggior parte di essi si sia concentrata su problemi invernali, prestando meno attenzione alle condizioni estive [15]. Per questa ragione è essenziale approfondire la comprensione del comfort termico estivo negli edifici residenziali a basso reddito con il fine di sviluppare soluzioni tecniche ed economiche vantaggiose.

Questo studio si propone di valutare l'impatto delle OdC sulla risposta termica di due edifici di edilizia sociale ed il comportamento energetico degli occupanti in uno scenario di povertà energetica. La valutazione è stata condotta attraverso una campagna sperimentale di monitoraggio nell'ambito di progetto LIFE SUPERHERO. Tali edifici, siti a Reggio Emilia, si inseriscono in un contesto fortemente influenzato dai cambiamenti climatici globali e locali.

2. Fasi, materiali e metodi

2.1. Fasi

Il lavoro si articola in tre fasi principali:

- Analisi delle condizioni climatiche esterne durante il periodo estivo, al fine di identificare la presenza di OdC;
- Valutazione delle risposte termiche degli appartamenti non occupati con diverse orientazioni al fine di comprendere la risposta durante le OdC in assenza di occupanti;
- Analisi dell'ambiente termico interno degli appartamenti occupati e del comportamento energetico degli occupanti, inclusa l'attivazione della climatizzazione durante le OdC. Questi dati vengono confrontati con le evidenze sperimentali raccolte durante i giorni estivi normali per effettuare considerazioni sull'influenza delle OdC sul comportamento degli occupanti in relazione all'uso dell'AC.

2.2. Casi di studio

Per il monitoraggio sono selezionati due edifici di edilizia residenziale sociale situati a Reggio Emilia. Gli edifici (**Figura 1**), costruiti nel 1980, presentano scarse prestazioni energetiche e termiche. La località climatica è classificata come subtropicale umida (Cfa) secondo la classificazione Köppen-Geiger, con estati calde e umide e inverni da freschi a miti [19].

I due edifici sono realizzati con pannelli prefabbricati in calcestruzzo armato, ma differiscono nella presenza di isolamento termico. L'Edificio #1 non è coibentato, mentre l'Edificio #2 è dotato di un'isolante spesso 10 cm. I solai sono costituiti da lastre in cemento armato (c.a.) senza isolante, mentre i tetti piani presentano

una soletta parzialmente prefabbricata in c.a. (tipo “Predalles”) con uno strato d’aria esterno rivestito da una lastra metallica a svolgere la funzione di impermeabilizzazione.

L’Edificio #1 presenta anche uno strato isolante aggiuntivo al di sotto del rivestimento metallico. La trasmittanza termica stimata complessiva delle diverse componenti edilizie (valore U) è riportata nella **Tabella 1**. La **Tabella 2** invece fornisce informazioni sulla metratura ed il numero di occupanti di ogni appartamento monitorato all’ultimo piano.

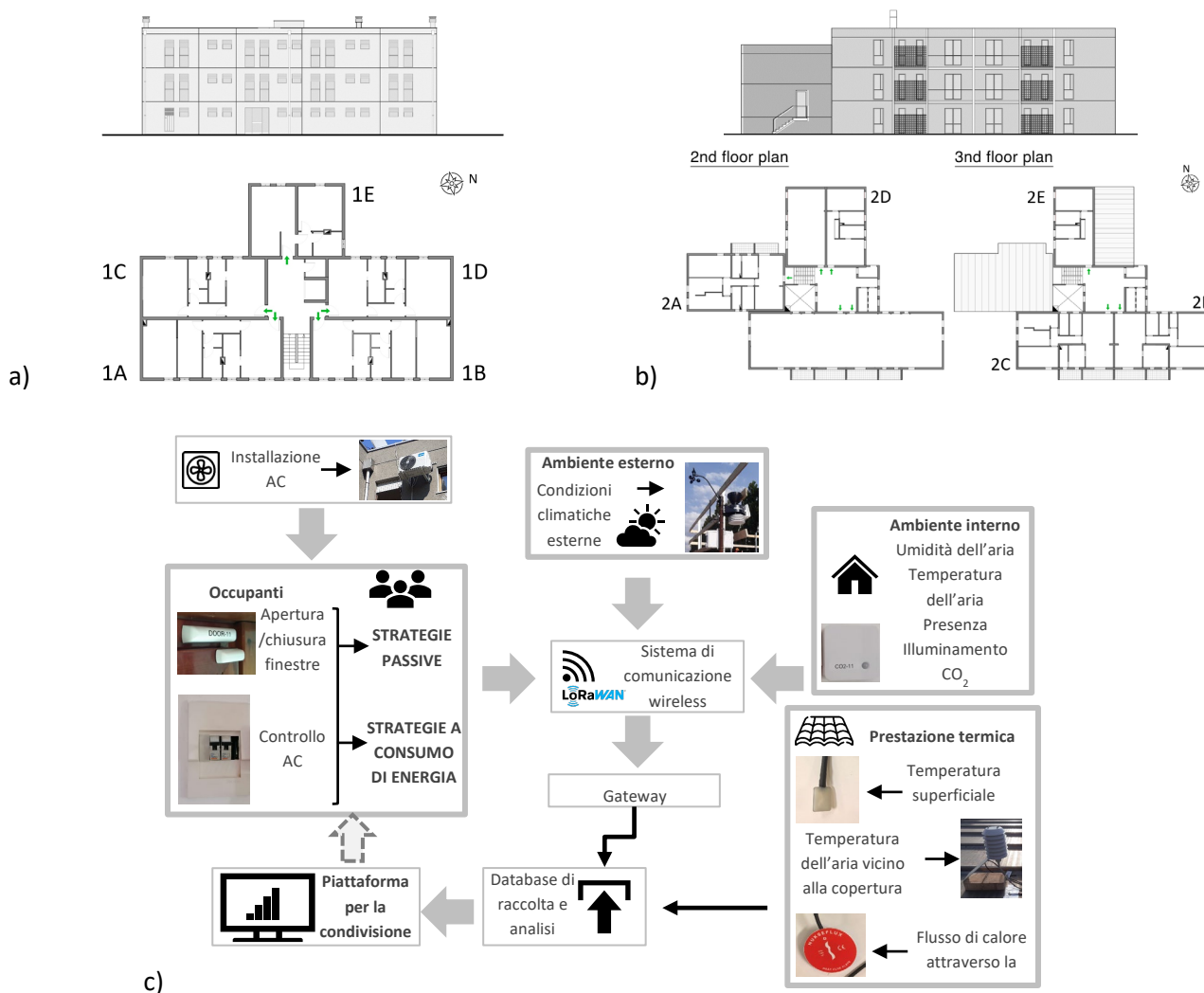


Figura 1 – Appartamenti monitorati e viste d’insieme di a) Edificio #1 e b) Edificio #2. c) Sistema di monitoraggio

Componenti edilizie	Edificio #1	Edificio #2
	W/(m ² K)	W/(m ² K)
Muro esterno	1.72	0.66
Partizione interna (tra appartamenti)	2.66	0.66
Copertura	0.33*	1.49*
Solai intermedi	1.45	1.64
Finestre	2.26	2.16

Tabella 1 – Trasmittanza termica (U) da superficie a superficie delle componenti edilizie. *Valori stimati considerando la presenza di un’intercapedine d’aria non ventilata

	ID appartamento	Superficie [m ²]	No. di stanze monitorate	No. di occupanti
Edificio #1	1A	53	3	none
	1B	53	3	none
	1C	47	2	none
	1D	42	2	none
	1E	47	2	2
Edificio #2	2A	83	2	5
	2B	83	3	2
	2C	83	3	none
	2D	48	2	2
	2E	48	2	none

Tabella 2 – Caratteristiche degli appartamenti monitorati

2.3. Setup sperimentale

La campagna di monitoraggio è stata condotta per analizzare le condizioni ambientali interne ed esterne e il comportamento degli occupanti negli appartamenti dell'ultimo piano dei due edifici presi in esame. Un sistema di monitoraggio wireless LoRaWAN è stato utilizzato per raccogliere i dati senza influire sulla vita quotidiana degli utenti (**Figura 1**). I sensori monitorano diverse grandezze come temperatura dell'aria, umidità relativa, illuminamento, emissioni di CO₂ e movimento. La presenza di finestre aperte o chiuse è rilevata da sensori ELSYS EMS Door, mentre il consumo energetico per il raffrescamento degli ambienti viene misurato con contatori certificati MID modello ORNO OR-WE-514. La **Tabella 3** riporta le grandezze monitorate e le specifiche tecniche dei sensori. Le condizioni climatiche esterne sono monitorate dalla stazione meteorologica wireless LoRaWAN WS100LRW/SR di DAVIS Instruments posta sul tetto dell'Edificio #2. Tutti i dati vengono inviati ad un server FTP tramite un'antenna LoRaWAN URSALINK UC1152. L'intero sistema di monitoraggio ha visto concludersi la sua installazione a luglio 2021.

Inoltre, è stato somministrato un questionario agli occupanti per valutare la loro sensazione termica negli ambienti interni.

Grandezza	Sensore	Posizione	Tasso di acquisizione	Accuratezza
Temperatura dell'aria Umidità dell'aria Radiazione solare Pluviometro Direzione del vento Velocità del vento	Stazione climatica LoRaWAN WS100LRW/SR	Tetto (Edificio #2)	5 min	±0.2 °C ±2 % ±5 % 0.2 mm / 4% ±5° ±3 Km/hr or 5 %
Temperature dell'aria Umidità relativa CO ₂ Illuminazione Movimento (PIR)	ELSYS ERS CO ₂	Soggiorno, stanza da letto	5 min	±0.2 °C ±2 % at 25°C ±50 ppm / ±3 % ±10 lux -
Sensori di apertura	ELSYS EMS Door	Finestre	5 min At use	16 mg/digit (sensibilità)
Contatore di energia	ORNO OR-WE-514		5 min	classe B secondo EN 50470-3

Tabella 3 – Specifiche tecniche dei sensori installati

2.4. Identificazione delle Ondate di Calore

Attualmente, non esistono approcci standardizzati per identificare e quantificare le OdC [20,21]. La letteratura scientifica ha proposto diversi parametri che possono essere utilizzati per identificare tali eventi, come ad esempio le temperature massime, minime ed apparenti [22,23]. Ci sono inoltre metodologie disponibili per definire i valori soglia da utilizzare per identificare le ondate di calore, che possono essere

impostati in termini di valore assoluto [24] o percentile di serie storiche di temperature [25]. È importante considerare che esistono anche diverse modalità per selezionare i dati storici da utilizzare nelle analisi [26], così come criteri variabili per determinare il numero di giorni consecutivi necessari per definire l'insorgenza di una OdC [27]. Le differenze metodologiche per la quantificazione delle OdC generano incertezza riguardo alla valutazione della loro entità e dei relativi impatti sulla salute, sul comfort e sulle prestazioni energetiche [28]. Tuttavia, è ampiamente riconosciuto che l'utilizzo di indici di OdC che combinano temperatura e umidità fornisca proiezioni climatiche più affidabili rispetto all'analisi delle due variabili separatamente [29].

Per identificare le OdC, in questo studio viene utilizzato l'indice di discomfort di Thom (Thom Discomfort Index, TDI) [30], che per descrivere le condizioni di disagio fisiologico causate dal caldo umido va a tener conto dei valori di temperatura e umidità dell'aria [31]. Nello specifico, $TDI=0,5T_w+0,5T_a$ dove T_a rappresenta la temperatura dell'aria e T_w la temperatura a bulbo umido calcolata sulla base dei dati di umidità [32]. Con riferimento a uno studio di mortalità condotto nell'area urbana di Bologna tra il 1989 ed il 2003 [33] sono state determinate le soglie di discomfort bioclimatico. Sono considerate tre soglie che corrispondono a condizioni di discomfort lieve, discomfort e discomfort grave. La soglia lieve è caratterizzata da un valore medio giornaliero di TDI di 24, indicando un disagio per la popolazione senza comportare un aumento di mortalità significativo. La soglia di discomfort può causare effetti sulla salute delle fasce più vulnerabili della popolazione, con valore TDI pari a 25. In particolare, agli anziani può comportare mal di testa, disidratazione e talvolta decessi. In media si registra un aumento del 15% nella mortalità totale e cardiovascolare, mentre la mortalità respiratoria può aumentare fino al 50%. È importante sottolineare che parte dei dati riferiti alla mortalità può essere attribuita al fenomeno "*harvesting*", che rappresenta una precoce anticipazione della mortalità per le persone che probabilmente sarebbero decedute a breve termine. La condizione di discomfort grave si verifica con valori pari (e mai superiori) al valore $TDI=26$ o dalla persistenza per almeno 3 giorni consecutivi di un valore $TDI=25$. In queste condizioni si amplia il numero di persone affette da patologie correlate al caldo, con un aumento medio del 30% nella mortalità totale e dell'80% nella mortalità respiratoria.

3. Risultati e discussione

3.1. Identificazione delle Ondate di Calore

La **Figura 2a** mostra i dati registrati dalla temperatura dell'aria esterna (T_o) e dell'umidità relativa (RH_o) durante il periodo di monitoraggio nel mese di agosto 2021. Si osserva che le temperature più elevate si sono verificate tra l'11 e il 16 agosto, con valori massimi costantemente superiori a 36°C (con picchi fino a 38°C) e minimi tra 23°C e 26°C.

Per valutare la presenza di una Ondata di Calore, sono stati calcolati i valori medi giornalieri di TDI per l'intero periodo di monitoraggio. La **Figura 2b** mostra i valori TDI con le rispettive soglie discomfort. Per la maggior parte del periodo, i valori sono inferiori alla soglia 24 di discomfort lieve, indicando una condizione di comfort all'aperto.

Tuttavia, dall'11 al 16 agosto il TDI supera la soglia di 24, indicando la presenza di un'OdC. Durante questo periodo per tre giorni consecutivi (dal 13 fino al 15 agosto) i valori di TDI superano anche la soglia di discomfort ($TDI=25$). L'OdC identificata rappresenta quindi una condizione bioclimatica estrema comportando rischi per la salute umana elevati.

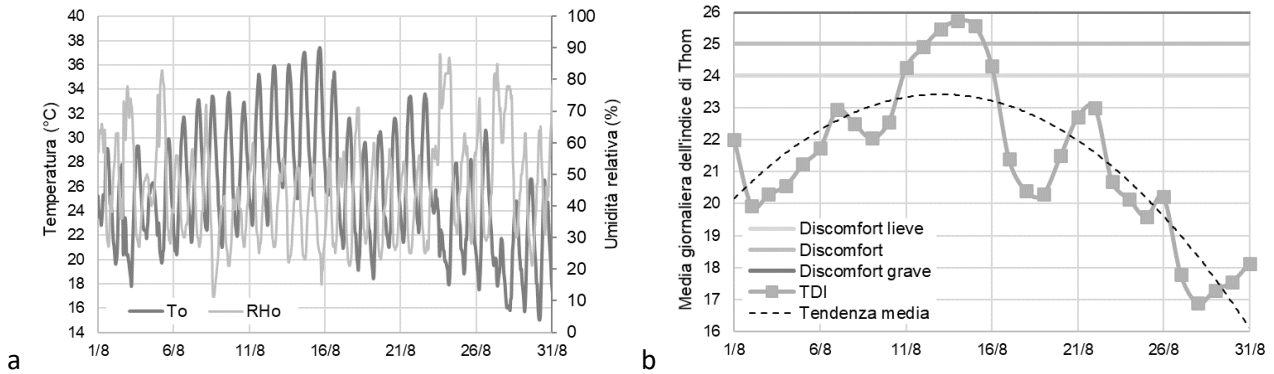
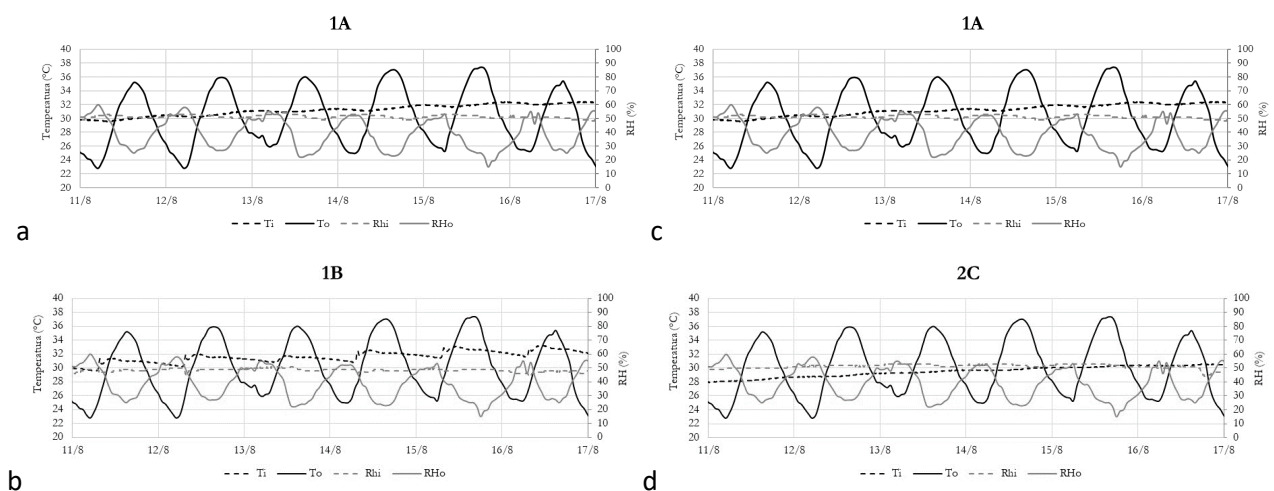


Figura 2 – a) Temperatura dell’aria esterna (T_o) e umidità relativa (RH_o) e b) valori medi giornalieri di TDI (con le relative soglie) registrati durante il periodo di monitoraggio

3.2. Risposta termica degli edifici

Al fine di valutare l’impatto delle azioni adattive degli occupanti sul comfort termico interno (come l’attivazione del condizionatore d’aria e l’apertura delle finestre), un importante punto di riferimento per effettuare un confronto con gli appartamenti occupati è l’analisi dell’ambiente termico interno degli appartamenti non occupati. Si andrà ad esaminare quindi la risposta termica di quattro appartamenti non occupati durante l’Ondata di Calore. In particolare, i risultati riguardano due appartamenti per ciascuno degli edifici monitorati, denominati 1A, 1B, 2C, 2E. Gli appartamenti 1A e 1B presentano finestre rivolte ad est, mentre l’appartamento 2C ha finestre rivolte a sud nel soggiorno e a ovest nelle camere da letto. L’appartamento 2E ha solo finestre ad ovest.

Con lo scopo di studiare l’impatto della radiazione solare che penetra attraverso le finestre sulle condizioni termiche interne, durante il periodo di monitoraggio tutte le finestre esterne rimangono chiuse, ad eccezione dell’appartamento 1B, in cui la radiazione solare diretta diffusa può entrare negli ambienti attraverso le finestre comportando un aumento delle temperature interne.



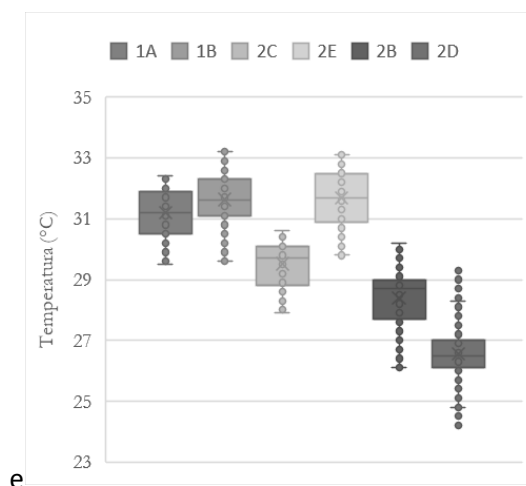


Figura 3 – Risposta termica degli appartamenti non occupati: a) 1A; b) 1B; c) 2E; d) 2C. e) Confronto tra temperature dell'aria interne registrate negli appartamenti non occupati (1A, 1B, 2C, e 2E) e occupati (2B e 2D). I valori sono riferiti al soggiorno di ogni appartamento.

Rappresentati in Figura 3a-d ci sono i risultati sperimentali per ciascun appartamento in termini di temperatura ed umidità dell'aria interna (T_i e R_{Hi}) insieme alla temperatura ed umidità esterna (T_o e R_{Ho}). Come atteso, l'effetto dell'elevata inerzia termica del sistema costruttivo è mostrato in tutti gli appartamenti, che si traduce in una ridotta variazione giornaliera della temperatura interna. Infatti, la variazione massima giornaliera di T_i è di 1°C per gli appartamenti con serramenti abbassati (1A, 2C e 2E) e di 2°C per quelli senza serramenti (1B). Durante il giorno l'effetto è benefico, con temperature interne anche di $6-8^\circ\text{C}$ inferiori rispetto a quelle esterne, ma può causare disagio durante la notte quando le temperature interne rimangono elevate (superiori a 28°C).

Durante l'OdC si osserva un aumento graduale della temperatura interna, correlato all'aumento delle temperature giornaliere esterne. Di conseguenza, le temperature interne più elevate sono registrate nei due ultimi giorni dell'evento OdC con valori di $32,4^\circ\text{C}$, $33,7^\circ\text{C}$, $30,6^\circ\text{C}$ e $33,1^\circ\text{C}$ rispettivamente per gli appartamenti 1A, 2B, 2C e 2E. Queste temperature rappresentano anche i valori massimi registrati durante l'intero periodo di monitoraggio. La **Figura 3e** presenta i box-plot delle temperature interne di tutti gli appartamenti non occupati. I set di dati degli appartamenti mostrano temperature e intervalli interquartili simili, ad eccezione del 2C in cui le temperature sono più basse. La presenza di schermature esterne a sud e ad ovest, come alberi e balconi, ha un impatto significativo sulla temperatura dell'aria interna. Tali schermature riducono il carico solare sulle pareti esterne contribuendo ad una diminuzione della temperatura interna. Questo effetto è evidente nella **Figura 3b**, dove si può osservare l'impatto dei guadagni solari attraverso le finestre nell'appartamento 1B. Durante la mattinata, si verifica un rapido aumento della temperatura dovuto alla radiazione solare che entra dalle finestre. Come previsto, l'appartamento 1B registra la temperatura massima più alta tra tutti gli appartamenti considerati, sebbene la differenza sia minima (solo $1,3^\circ\text{C}$ in più rispetto all'appartamento 1A nelle sue vicinanze).

3.3. Risposta termica interna degli appartamenti occupati durante le ondate di calore

Per considerare preliminarmente l'effetto delle OdC sui consumi di raffrescamento degli ambienti interni e sui comportamenti degli occupanti circa l'uso dell'AC, si analizzano le condizioni interne di due appartamenti occupati durante l'OdC e in normali giornate estive.

Agli occupanti vengono forniti dei questionari per comprendere la sensazione di comfort termico interno, e se ne registrano i risultati (**Figura 4**). Da ciò si ha conferma di un generale discomfort interno durante la

stagione estiva da un punto di vista termico. Da ogni occupante il proprio appartamento è difatti considerato caldo o molto caldo (**Figura 4a**), con l'80% che lo considera sgradevole per comfort termico (**Figura 4b**). Inoltre, l'impianto di AC è considerato per il 75% molto necessario, e per il restante 25% necessario per il miglioramento del comfort termico negli ambienti interni (**Figura 4c**), anche se lo stesso ambiente interno è definito appena accettabile durante l'utilizzo dell'impianto AC (**Figura 4d**). La totalità degli occupanti considera come preoccupazione primaria in estate il costo legato all'energia per raffrescare i locali interni.

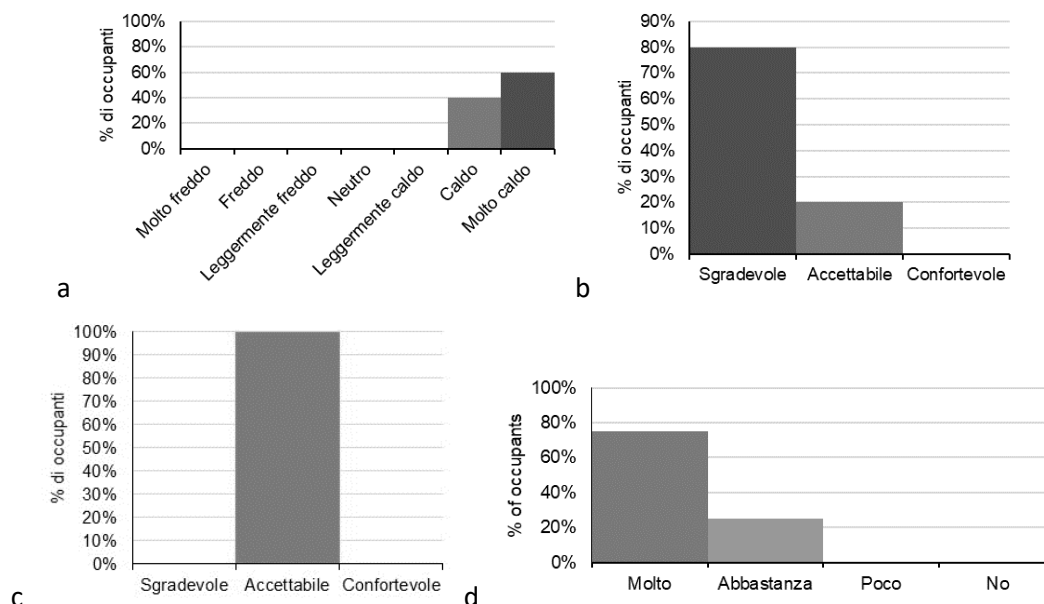
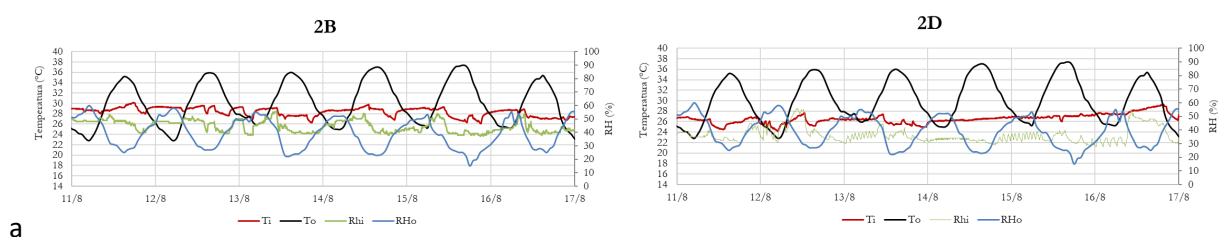


Figura 4 – Risultati dei questionari forniti agli occupanti. a) Voto sulla sensazione termica sull'ambiente interno; b) Comfort termico senza utilizzo del sistema di raffrescamento; c) Comfort termico con attivazione del sistema di raffrescamento; d) Necessità del sistema AC.

Date le simili risposte termiche dei due edifici, si riportano i soli risultati sperimentali relativi a due appartamenti occupate nell'Edificio #2 (2B e 2D). L'appartamento 2B è caratterizzato da una buona ventilazione naturale grazie alle finestrate su tutte e tre le pareti esterne (con orientamento a sud, ovest e nord). Anche la presenza degli alberi ed il balcone sulla facciata principale orientata a sud fornisce ombreggiatura a creare beneficio per gli occupanti. L'appartamento 2D ha le finestre rivolte verso ovest e senza elementi a favorire l'ombreggiamento, comportando uno scarso livello di ventilazione naturale ed un'elevata esposizione all'irraggiamento solare.

In **Figura 5a** vengono mostrate le temperature dell'aria e i valori di umidità relativa durante l'OdC. La **Figura 5b** riporta l'attività degli occupanti (monitorata attraverso i sensori PIR) ed il consumo di energia per il raffrescamento. I dati registrati dai sensori PIR confermano un elevato livello di attività durante questo periodo e ne confermano la presenza di occupanti. Entrambi gli appartamenti hanno usufruito dell'impianto di AC per il raffrescamento, con maggiore attivazione per l'appartamento 2D. Si evidenzia inoltre la comune necessità di chiudere le finestre quando l'impianto AC risulta attivo



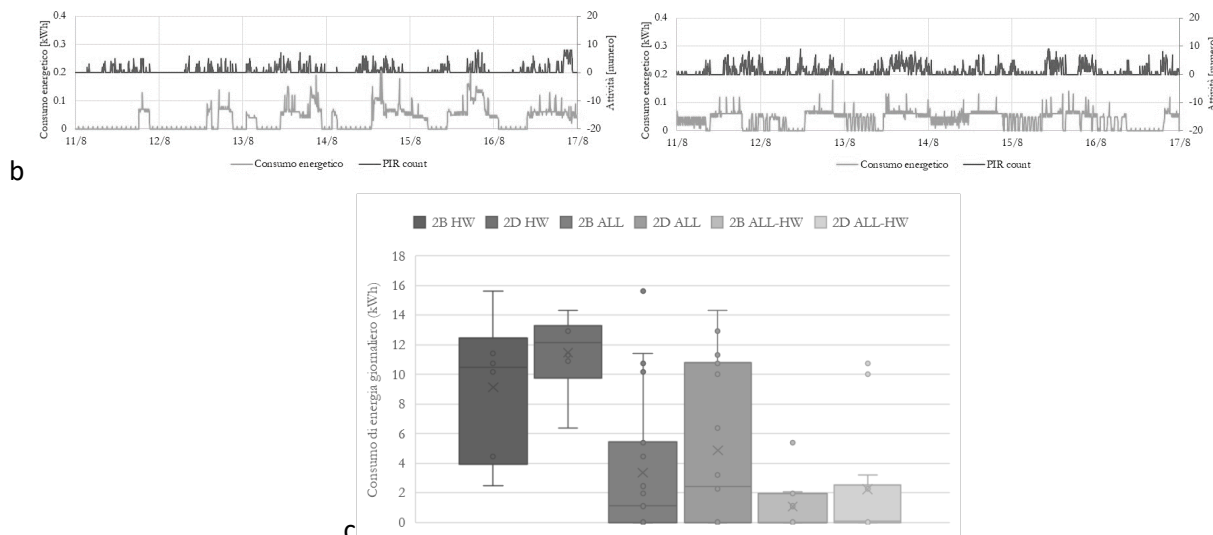


Figura 5 – a) *Temperatura e umidità relativa degli appartamenti occupati durante l’OdC, PIR e consumo energetico; b) correlazione tra TDI e consumo di energia per il raffrescamento degli ambienti; c) confronto tra l’energia consumata giornaliera media per il raffrescamento degli ambienti durante l’OdC (HW), durante l’intero periodo monitorato (ALL) e per l’intero periodo monitorato senza periodo OdC (ALL-HW)*

Le temperature degli appartamenti occupati sono confrontate con quelle degli appartamenti non occupati. Se ne individua un valore di temperatura interna inferiore nei locali occupati rispetto a quelli non occupati, raggiungendo valori di 30,2°C per l’appartamento 2B e 29,3°C per il 2D. In **Figura 5a** si osserva per i primi due giorni nell’appartamento 2B una bassa temperatura esterna (fino a 23°C) contro un’elevata temperatura interna (29°C circa). Ciò evidenzia che, nonostante le finestre siano aperte durante la notte, la ventilazione naturale ha difficoltà nel raffrescare i locali interni, probabilmente per effetto dell’elevata inerzia termica dell’involucro opaco. Pertanto, l’AC è la principale soluzione per il raffrescamento di questi ambienti. Per comprendere infine l’impatto sui consumi energetici, la Figura 5c mostra i box plot del consumo energetico giornaliero in diversi periodi temporali, ovvero durante l’OdC per l’intero periodo monitorato (ALL) e durante il periodo totale escluso quello in cui avviene l’OdC (ALL-HW). Come mostrato nel grafico, in termini di valore medio, il consumo di energia giornaliero passa da 1 e 2 kWh nel periodo senza OdC ai 9 e 11 kWh se viene compresa l’ondata di calore, rispettivamente per gli appartamenti 2B e 2C. Ne consegue che mentre in letteratura si individua un valore massimo di aumento di consumi del 90% (con simulazioni numeriche) [8], per lo scenario di povertà analizzato in questo studio si raggiungono aumenti dell’800% ed il 450% circa. Risulta evidente l’importanza di considerare contesti reali di utilizzo e comportamento energetico per poter coerentemente valutare l’impatto delle OdC sulle prestazioni energetiche degli edifici.

4. Conclusioni

Lo studio condotto ha esaminato e valutato l’impatto delle Onde di Calore (OdC) sulla risposta termica e sui consumi energetici di due edifici residenziali situati nella città di Reggio Emilia, in un contesto reale di utilizzo abitativo e di povertà energetica, in cui le famiglie hanno un reddito basso. La ricerca è stata condotta come parte del progetto LIFE SUPERHERO e ha coinvolto una campagna sperimentale per monitorare l’ambiente interno ed esterno degli edifici ed il comportamento degli occupanti.

Durante il periodo di monitoraggio, in agosto 2021, è stata registrata un’OdC della durata di 6 giorni. Al fine di comprendere la risposta degli edifici in assenza di occupanti durante l’OdC, è stata analizzata la risposta termica di quattro appartamenti non occupati. Inoltre, sono stati studiati la risposta termica, il

comportamento degli occupanti e i consumi energetici di due appartamenti durante tutto il periodo di monitoraggio.

I dati raccolti hanno evidenziato una condizione generale di discomfort termico sia negli appartamenti non occupati che in quelli occupati, quando l'aria condizionata non era in funzione. Questo sottolinea l'importanza dell'uso dell'aria condizionata per raggiungere una sensazione definita "accettabile" dagli occupanti. Tuttavia, i risultati hanno anche dimostrato che gli occupanti erano riluttanti ad utilizzare l'aria condizionata a causa delle limitazioni economiche (anche in condizioni interne sfavorevoli in termini di comfort).

Durante un'OdC, si è osservato un aumento significativo dei consumi energetici per il raffrescamento degli ambienti, con valori da 4 a 8 volte superiori rispetto ai periodi estivi normali. Questo risultato differisce notevolmente dai risultati numerici riportati nella letteratura, in cui si è registrato un aumento massimo di circa il 90% dei consumi energetici durante un'OdC. Ciò sottolinea l'importanza di considerare scenari di utilizzo reale degli edifici nella valutazione degli impatti delle ondate di calore sui consumi energetici.

5. Riconoscimenti

La ricerca è finanziata dall'Unione Europea nell'ambito del Progetto LIFE SUPERHERO, CUP I32F20005220006.

6. Bibliografia

- [1] M. Poumadère, C. Mays, S. Le Mer, R. Blong, The 2003 Heat Wave in France: Dangerous Climate Change Here and Now, *Risk Analysis*. 25 (2005) 1483–1494. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2005.00694.x>.
- [2] D. Ghatak, B. Zaitchik, C. Hain, M. Anderson, The role of local heating in the 2015 Indian Heat Wave, *Scientific Reports*. 7 (2017) 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07956-5>.
- [3] J. Tan, Y. Zheng, X. Tang, C. Guo, L. Li, G. Song, X. Zhen, D. Yuan, A.J. Kalkstein, F. Li, H. Chen, The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai, *Int J Biometeorol*. 54 (2010) 75–84. <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0256-x>.
- [4] G. Maracchini, E. Di Giuseppe, M. D’Orazio, Energy Poverty and Heatwaves. Experimental Investigation on Low-Income Households’ Energy Behavior, in: 2023: pp. 271–280. https://doi.org/10.1007/978-981-19-8769-4_26.
- [5] M. D’Orazio, G. Maracchini, An experimental investigation on the indoor hygrothermal environment of a reinforced-eps based temporary housing solution, *Energy and Buildings*. 204 (2019) 109500. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109500>.
- [6] O. Lhotka, J. Kyselý, A. Farda, Climate change scenarios of heat waves in Central Europe and their uncertainties, *Theoretical and Applied Climatology*. 131 (2018) 1043–1054. <https://doi.org/10.1007/S00704-016-2031-3/FIGURES/9>.
- [7] L. Habitzreuter, S.T. Smith, T. Keeling, Modelling the overheating risk in an uniform high-rise building design with a consideration of urban context and heatwaves, *Indoor and Built Environment*. 29 (2020) 671–688. <https://doi.org/10.1177/1420326X19856400>.
- [8] M. Zinzi, S. Agnoli, C. Burattini, B. Mattoni, On the thermal response of buildings under the synergic effect of heat waves and urban heat island, *Solar Energy*. 211 (2020) 1270–1282. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.050>.
- [9] G. Maracchini, E. Di Giuseppe, M. D’Orazio, Ondate di calore e povertà energetica. Indagine sperimentale sulla risposta termica di edifici di edilizia sociale e sul comportamento energetico di famiglie a basso reddito, in: *Colloqui.AT.e 2022 – Ar.Tec. Conference, Genova, 2022*: pp. 273–288.
- [10] T.R. Oke, G. Mills, A. Christen, J.A. Voogt, *Urban Climates*, Cambridge University Press, 2017. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>.
- [11] D. Rasilla, F. Allende, A. Martilli, F. Fernández, Heat Waves and Human Well-Being in Madrid (Spain), *Atmosphere* 2019, Vol. 10, Page 288. 10 (2019) 288. <https://doi.org/10.3390/ATMOS10050288>.
- [12] G. Maracchini, F.S. Bavarsad, E. Di Giuseppe, M. D’Orazio, Sensitivity and Uncertainty Analysis on Urban Heat Island Intensity Using the Local Climate Zone (LCZ) Schema: The Case Study of Athens, in: *Sustainability in Energy and Buildings*, 2023: pp. 281–290. https://doi.org/10.1007/978-981-19-8769-4_27.
- [13] G. Hatvani-Kovacs, M. Belusko, J. Pockett, J. Boland, Heat stress-resistant building design in the Australian context, *Energy Build.* 158 (2018) 290–299. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.025>.

- [14] G. Maracchini, M. D’Orazio, Improving the livability of lightweight emergency architectures: A numerical investigation on a novel reinforced-EPS based construction system, *Build Environ.* 208 (2022) 108601. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108601>.
- [15] Y. Zhang, S. Hu, D. Yan, S. Guo, P. Li, Exploring cooling pattern of low-income households in urban China based on a large-scale questionnaire survey: A case study in Beijing, *Energy and Buildings.* 236 (2021) 110783. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110783>.
- [16] J.C. Semenza, C.H. Rubin, K.H. Falter, J.D. Selanikio, W.D. Flanders, H.L. Howe, J.L. Wilhelm, Heat-Related Deaths during the July 1995 Heat Wave in Chicago, *New England Journal of Medicine.* 335 (1996) 84–90. <https://doi.org/10.1056/NEJM199607113350203>.
- [17] A. Sakka, M. Santamouris, I. Livada, F. Nicol, M. Wilson, On the thermal performance of low income housing during heat waves, *Energy and Buildings.* 49 (2012) 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.023>.
- [18] A. Mastrucci, E. Byers, S. Pachauri, N.D. Rao, Improving the SDG energy poverty targets: Residential cooling needs in the Global South, *Energy and Buildings.* 186 (2019) 405–415. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.01.015>.
- [19] M. Kottek, J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, F. Rubel, World map of the Köppen-Geiger climate classification updated, *Meteorologische Zeitschrift.* (2006). <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>.
- [20] C.Y. Lin, Y.Y. Chien, C.J. Su, M.T. Kueh, S.C. Lung, Climate variability of heat wave and projection of warming scenario in Taiwan, *Climatic Change.* 145 (2017) 305–320. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-2091-0>.
- [21] S.E. Perkins, A review on the scientific understanding of heatwaves-Their measurement, driving mechanisms, and changes at the global scale, *Atmospheric Research.* 164–165 (2015) 242–267. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.05.014>.
- [22] L. V. Alexander, X. Zhang, T.C. Peterson, J. Caesar, B. Gleason, A.M.G. Klein Tank, M. Haylock, D. Collins, B. Trewin, F. Rahimzadeh, A. Tagipour, K. Rupa Kumar, J. Revadekar, G. Griffiths, L. Vincent, D.B. Stephenson, J. Burn, E. Aguilar, M. Brunet, M. Taylor, M. New, P. Zhai, M. Rusticucci, J.L. Vazquez-Aguirre, Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation, *Journal of Geophysical Research.* 111 (2006) D05109. <https://doi.org/10.1029/2005JD006290>.
- [23] P. Michelozzi, F.K. de’ Donato, A.M. Bargagli, D. D’Ippoliti, M. de Sario, C. Marino, P. Schifano, G. Cappai, M. Leone, U. Kirchmayer, M. Ventura, M. di Gennaro, M. Leonardi, F. Oleari, A. de Martino, C.A. Perucci, Surveillance of summer mortality and preparedness to reduce the health impact of heat waves in Italy, *International Journal of Environmental Research and Public Health.* 7 (2010) 2256–2273. <https://doi.org/10.3390/ijerph7052256>.
- [24] R. Huth, J. Kyselý, L. Pokorná, A GCM simulation of heat waves, dry spells, and their relationships to circulation, *Climatic Change.* 46 (2000) 29–60. <https://doi.org/10.1023/a:1005633925903>.
- [25] S. Russo, A. Dosio, R.G. Graversen, J. Sillmann, H. Carrao, M.B. Dunbar, A. Singleton, P. Montagna, P. Barbola, J. V. Vogt, Magnitude of extreme heat waves in present climate and their projection in a

warming world, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 119 (2014) 12,500-12,512.

<https://doi.org/10.1002/2014JD022098>.

[26] S. Russo, A. Sterl, Global changes in indices describing moderate temperature extremes from the daily output of a climate model, *Journal of Geophysical Research*. 116 (2011) D03104.

<https://doi.org/10.1029/2010JD014727>.

[27] A.B. Pezza, P. van Rensch, W. Cai, Severe heat waves in Southern Australia: Synoptic climatology and large scale connections, *Climate Dynamics*. 38 (2012) 209–224. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1016-2>.

[28] Z. Xu, G. FitzGerald, Y. Guo, B. Jalaludin, S. Tong, Impact of heatwave on mortality under different heatwave definitions: A systematic review and meta-analysis, *Environment International*. 89–90 (2016) 193–203. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.02.007>.

<https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.02.007>.

[29] A. Casanueva, A. Burgstall, S. Kotlarski, A. Messeri, M. Morabito, A.D. Flouris, L. Nybo, C. Spirig, C. Schwierz, Overview of Existing Heat-Health Warning Systems in Europe, *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 16 (2019) 2657. <https://doi.org/10.3390/ijerph16152657>.

[30] E.C. Thom, The Discomfort Index, <https://doi.org/10.1080/00431672.1959.9926960>. 12 (2010) 57–61. <https://doi.org/10.1080/00431672.1959.9926960>.

[31] Y. Epstein, D.S. Moran, Thermal comfort and the heat stress indices, *Industrial Health*. 44 (2006) 388–398. <https://doi.org/10.2486/INDHEALTH.44.388>.

[32] R. Stull, Wet-Bulb Temperature from Relative Humidity and Air Temperature, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 50 (2011) 2267–2269. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0143.1>.

[33] S. Zauli Sajani, F. Scotto, R. Miglio, D. Agostini, P. Pandolfi, S. De Lisio, P. Lauriola, Mortality and summer bioclimatic discomfort: An evaluation of short and medium term effects, *GIMT. GIORNALE ITALIANO DELLE MALATTIE DEL TORACE*. (2007).