### METODOLOGIA DI SVOLGIMENTO

### OR 1. La misura delle prestazioni energetiche degli edifici e certificazione del retrofit in ottica NZEB

La U.O. UNICAS, con la collaborazione della U.O. UNISA, ha effettuato il confronto tra le tecniche termoflussimetriche e quelle termografiche per la verifica dell'isolamento termico degli edifici esistenti, nella caratterizzazione metrologica di sensori di misura della temperatura media radiante e nella effettuazione di campagne di monitoraggio delle condizioni termoigrometriche. In particolare, l'obiettivo di ricerca è stato perseguito mediante i seguenti sotto-obiettivi:

- OR 1.1 l'ottimizzazione delle tecniche per la misurazione della trasmittanza termica in climi temperati attraverso l'analisi puntuale dei fattori di influenza in campo;
- OR 1.2 il confronto tra le tecniche termoflussimetriche e termografiche per la verifica dell'isolamento termico degli edifici esistenti (in collaborazione con la U.O. UNISA) e taratura degli strumenti di misura;
- OR 1.3 l'analisi in campo dell'influenza delle prestazioni energetiche dell'edificio sui parametri di comfort termo-igrometrico (in collaborazione con la U.O. UNISA).

**OR 1.1** La misurazione in situ della trasmittanza (U) di una parete opaca, nelle condizioni reali di temperatura e contenuto di umidità, può essere significativamente diversa se confrontata con i valori U stimati per mezzo della UNI EN ISO 6946:2018. Al fine di fornire una metodologia per l'ottimizzazione delle tecniche per la misurazione della trasmittanza termica in climi temperati, la U.O. UNICAS, in collaborazione con la U.O. UNISA, ha approfondito lo studio sperimentale su diverse tipologie di involucro, in differenti condizioni ambientali di prova, utilizzando il metodo del misuratore del flusso di calore, noto come "termoflussimetro" (Heat Flow Meter, HFM). In particolare UNICAS e UNISA hanno valutato le prestazioni di quattro datalogger HFM basati su diverse tecnologie e principi di misurazione, forma e dimensioni delle piastre e numero e tipo di sensori di temperatura (termocoppie, TC, e termoresistenze, RTD), come descritto nella Tabella 1 e valutato le incertezze di misura in campo.

**Tabella 1** – Caratteristiche metrologiche dei sensori oggetto di studio.

	Termofl	ussimetro	Sensore di t	temperatura	Sistema di acquisizione dati			
	Tipologia	Cipologia Accuracy (a)		Tipologia Accuracy (a) Interno/esterno Accura		Accuracy (a)	Tipologia del sistema di comunicazione	Accuracy (a)
HFM1	Quadrato (L=100 mm)	± 5% r.v.	TC tipo T	±5°C	cavo	± 0.1 W/m <sup>2</sup> ± 0.1 °C		
HFM2	Circolare (D=80 mm)	± (5% r.v. +0.01 W/m <sup>2</sup> )	Pt1000	± (0.1+0.0017t) °C	wifi	n.d.		
HFM3	Indiretto (b)	± (0.4 ± 0.01) °C	TC tipo T, K	± 0.5 °C	cavo/wifi	± (0.1 +2% r.v.) W/m <sup>2</sup>		
HFM4	Quadrato (L=250 mm)	± 5% r.v.	TC tipo T	± 0.5 °C	cavo	± 0.1 W/m <sup>2</sup> ± 0.1 °C		

<sup>&</sup>lt;sup>a</sup> Dati forniti dal costruttore

Tutti i sensori utilizzati sono muniti di certificato di calibrazione del costruttore; inoltre, tutti i sensori di temperatura sono stati comunque oggetto di verifica presso LAMI, il Laboratorio di Misure Industriali dell'Università di Cassino e del Lazio Meridionale, accreditato dall'ente di accreditamento italiano.

Le pareti oggetto di verifica sono descritte nella sezione casi di studio. Le stime di densità superficiale, capacità termica, sfasamento e fattore di decremento dei componenti in esame sono state ottenute secondo lo standard ISO 13786. I valori di trasmittanza U dei componenti esaminati sono stati stimati attraverso dati di progettazione nominali (spesso incompleti e scarsamente precisi) e dati tecnici disponibili nelle norme UNI 10351:2015 e UNI 10355:1994. Sono stati comunque oltremodo effettuate specifiche analisi endoscopiche (vedi casi studio B4 e B6 nella sezione Casi di Studio) e campionamenti core (vedi casi studio B1, B3 e B5 nella sezione Casi di Studio). Le analisi endoscopiche e i campionamenti del nucleo hanno permesso, inoltre, di conoscere esattamente il tipo di mattone cavo presente nel componente dell'involucro e di misurare con precisione gli spessori di ogni strato attraverso un calibro tarato e di calcolare l'effettiva conducibilità termica/valore di conduttanza.

I valori di trasmittanza, riportati nella sezione risultati, sono quindi valutati nel seguente modo: in assenza di informazioni accurate sulla densità del materiale costituente l'involucro, è stato considerato il valore medio  $(U_2)$  tra i valori estremi di conducibilità termica e intervallo di conduttanza dato dalle norme per i materiali e i componenti che costituiscono ogni strato del muro in esame  $(\lambda_{2,i})$ ; in caso contrario è stato considerato il valore più accurato  $(U_3)$  corrispondente alla densità nota del materiale di ogni strato in quanto tiene conto della conduttività termica puntuale e dei valori di conduttanza di ogni strato  $(\lambda_{3,i})$ . Per i componenti dell'involucro B1 e B5, è stata, infine, anche misurata la densità del tufo, usando il metodo gravimetrico presso il laboratorio accreditato del PALMER (Parco Scientifico e Tecnologico di Lazio Meridionale).

Prima delle misurazioni, sono state eseguite accurate indagini termografiche secondo lo standard ISO 6781 al fine di

<sup>&</sup>lt;sup>b</sup> Sistema basato sulla misura della differenza tra temperatura dell'aria interna e temperatura media della parete interna.

escludere la presenza di possibili non omogeneità (ponti termici). Particolare attenzione è stata posta affinché i sensori di temperatura non fossero esposti a fonti radiative interne o esterne, proteggendoli dall'influenza del vento ed ombreggiandoli dalla radiazione solare. In accordo alla normativa di riferimento UNI ISO 9869-1:2015 la durata del campionamento scelto è stato pari a: un multiplo intero di 24 ore e mai inferiore alle 72 ore consecutive, per i componenti pesanti (B1, B3, B4, B5 e B6); dalle 3 alle 12 ore, con analisi eseguite solo sui dati acquisiti di notte, per i componenti leggeri (B2 e B7).

L'incertezza estesa associata al valore di trasmittanza misurato è stata stimato mediante le ISO / IEC 98-3: 2008 e UNI CEI 70098-3. I singoli contributi sono stati analizzati valutandone il relativo "coefficiente di peso" e successivamente utilizzati per la stima dell'incertezza estesa della misura U (y), valutata con un fattore di copertura k = 2, corrispondente ad un intervallo di confidenza di circa il 95%.

La ISO 9869:1994 evidenzia che l'incertezza può essere molto più ampia in presenza di particolari condizioni di misura che nelle situazioni reali possono essere frequenti (e.g. elevate fluttuazioni delle temperature rispetto al valore della differenza di temperatura tra interno ed esterno, ridotti tempi di campionamento, elevata inerzia termica della muratura). Per questo motivo, nell'ambito della misura di trasmittanza in opera mediante HFM sono stati considerati, oltre alle incertezze della catena di misura (e.g. incertezza sulla resistenza del termoflussimetro, taratura e deriva dei sensori di flusso e temperatura), i diversi fattori di influenza ambientale (e.g. radiazione solare e schermatura dei sensori, pioggia battente sulla muratura, ecc.) e, soprattutto, l'incertezza sul misurando (e.g. non monodimensionalità del flusso termico). L'approccio è stato dunque quello di mettere a punto un modello di valutazione dell'incertezza che tenesse correttamente conto di tutti i contributi suddetti (vedi Tabella 2), risultando uno strumento molto utile non solo per lo sviluppo e la diffusione del metodo, ma anche per consentire a tutti coloro che operano nel settore del risparmio energetico in edilizia di avere risultati più accurati, con positive ripercussioni sulla "definizione" dei risparmi ottenibili dagli interventi per il miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici esistenti.

Tabella 2 – Contributi all'incertezza composta estesa nella misura della trasmittanza mediante HFM.

	Cause	Descrizione	Incertezza tipica
	Disuniformità del flusso termico	Flusso non monodimensionale dovuto a: i) disomogeneità delle strutture; ii) disuniformità delle strutture (forma); iii) non uniformità termica (temperatura / radiazione interna o esterna).	1-5%
Misurando	Instabilità del flusso e della temperatura	Regime non stazionario dovuto a: i) variazioni climatiche esterne; ii) variazioni climatiche interne; iii) variazioni dei coefficienti liminari interni ed esterni (es. Per effetto della velocità dell'aria).	5-10%*
	Resistenza termica della piastra HFM	Distorsione e risoluzione del flusso termico per la presenza della piastra HFM.	2-3%*
	Resistenza di contatto	Dovuta a: i) non planarità della parete; ii) finitura superficiale; iii) pressione di contatto	2÷5%*
	Sensori di temperatura	i) linearità e sensibilità del sensore; ii) deriva del sensore.	0.1÷0.2°C
Catena di	HFM	i) linearità e sensibilità del sensore; ii) deriva del sensore	1÷2% F.S.
misura	Sistema di acquisizione dati	i) risoluzione convertitore A/D; ii) deriva del Sistema di acquisizione; iii) tipologia trasmissione dati (wifi, cavo, ecc).	1÷2%
	Temperatura dell'aria	Influenza sui component elettronici e sulla piastra HFM.	
Parametri	Radiazione termica	Influenza su HFM da parte di contributi radiativi esterni (radiazione solare) e/o interni (illuminazione, termoelementi, ecc).	1÷2%
ambientali	Velocità dell'aria	Variazione dei coefficienti liminari interni ed esterni	1-270
	Umidità nei componenti	Influenza del contenuto di umidità dovuto a condensa interstiziale, umidità di risalita, infiltrazioni di pioggia intensa.	

Per quanto riguarda, in particolare, la stabilità del flusso termico e della temperatura, si osservi che essa diminuisce all'aumentare della differenza di temperatura tra ambiente interno ed esterno e, in genere, all'aumentare del flusso termico. Per ridurre questa componente, si è avuta particolare attenzione a mantenere un adeguato rapporto tra la durata del campionamento (mai inferiore alle 72 ore e maggiore per le pareti di maggiore capacità termica) e la costante di tempo della parete, a cui la durata stessa deve essere direttamente proporzionale. In particolare, per la valutazione del contributo all'incertezza di misura, gli autori hanno utilizzato la relazione

$$i_{stab,\varphi} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\varphi av}}{\sigma_{\alpha v} \sqrt{n}}\right) + \left(\frac{\sigma_{\Delta \theta av}}{\Delta \theta_{\alpha v} \sqrt{n}}\right) - 2r\left(\frac{\sigma_{\varphi av} \sigma_{\Delta \theta av}}{\sigma_{\alpha v} m}\right)}$$
(1)

avendo indicato con:

- $\varphi_{av}$  e  $\Delta\theta_{av}$  il flusso medio e la differenza di temperatura media durante un periodo pari alla costante di tempo e ad un giorno di campionamento, rispettivamente;
- $\varphi_{av,m}$  e  $\Delta\theta_{av,m}$ la media dei flussi medi e delle differenze di temperatura medie negli n periodi pari alla costante di tempo e negli N giorni di campionamento, rispettivamente;
- $\sigma_{\varphi_{qv}}$  la deviazione standard dei flussi medi negli n periodi pari alla costante di tempo;
- $\sigma_{\Delta\theta_{av}}$  la deviazione standard delle differenze di temperatura medie negli N giorni di campionamento;
- r il coefficiente di correlazione tra il flusso e temperatura.

Per quanto riguarda la Resistenza termica di contatto della piastra termoflussimetrica, si osservi che essa è importante soprattutto per piastre di elevato spessore, superiore ad 1/10 della larghezza della piastra. Misurando la temperatura superficiale prossimità dell'HFM e conoscendo la resistenza del termoflussimetro, la resistenza termica R è stata corretta in prima approssimazione mediante la relazione

$$R = \frac{\theta_e - \theta_i}{\varphi} - R_{HFM} \tag{2}$$

OR 1.2 Al fine di effettuare un confronto tra le tecniche termoflussimetriche e termografiche per la misura della trasmittanza in opera su edifici esistenti la U.O. UNICAS ha condotto una serie di campagne sperimentali su differenti tipologie di involucro, descritte successivamente al paragrafo "casi di studio". L'unità operativa, nell'ambito dell'OR 1.2 ha, inoltre, condotto uno studio numerico-sperimentale per la progettazione di un sistema di taratura dei termoflussimetri. Per quanto concerne le campagne sperimentali per la misura della trasmittanza in opera su edifici esistenti, al fine di minimizzare gli errori associati all'utilizzo corretto della strumentazione, tutte le misure sono state precedute da un'attenta ispezione qualitativa dell'involucro oggetto della misura, finalizzata al rilevamento di anomalie. In particolare le ispezioni sono state condotte sia con analisi termografica della parete per il rilevamento di ponti termici o disomogeneità nella struttura (cavedi...), sia mediante scanner micrometrico di profondità per il rilevamento di tubazioni interne, materiali ferrosi o guaine per il passaggio di cavi. Per il confronto tra le due differenti tecniche di misura sono state scelte solo pareti esposte a Nord per limitare l'influenza dei carichi radiativi solari analizzata nell'ambito dell'OR1, con superfici libere da elementi di arredo.

La trasmittanza delle pareti con il metodo termografico è calcolata dal bilancio dei flussi radiativi  $q_r$  e convettivi  $q_c$  che lasciano la parete e dalla misura delle temperature dell'aria (nei due ambienti)  $T_{a,in}$  e  $T_{a,est}$  e di quella superficiale interna  $T_{s,in}$ , secondo la relazione:

$$U = \frac{q_r + q_c}{(T_{a,in} - T_{a,est})} = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot \left(T_{rif}^4 - T_{s,in}^4\right) + h_c \cdot (T_{a,in} - T_{s,in})}{(T_{a,in} - T_{a,est})}$$
(3)

I flussi radiativi e convettivi sono valutati sulla superficie interna della parete, sia per motivi pratici di accesso alla stessa parete sia per ridurre l'incertezza del calcolo del coefficiente convettivo h<sub>c</sub>, che può variare ampiamente in diverse posizioni sulla superficie di un edificio. La temperatura superficiale delle pareti è stata acquisita mediante 3 coppie di termoresistenze Pt100, in classe 1/3 B secondo la norma DIN/IEC75, due posizionate sul lato interno della parete ed una sul lato esterno. Al fine di ridurre al minimo la resistenza termica di contatto, tutti gli elementi sensibili sono applicati sulla parete previo utilizzo di pasta termica e serrati mediante clip in grado di esercitare una pressione meccanica costante sugli stessi. Il cablaggio al radio modem è costituito da un filo elettrico twistato per ridurre al minimo le interferenze elettromagnetiche. Il sistema include anche un registratore di dati con RAM integrata, in grado di accettare fino a 30 differenti segnali in ingresso. La catena di misura è completata da un notebook collegato tramite cavo USB al datalogger da cui i dati sono acquisiti in formato ASCII.

Le condizioni ambientali interne ed esterne agli ambienti di prova sono state acquisite mediante datalogger Tinytag ultra 2, modello TGU-4500, con al suo interno apposito sensore di temperatura dell'aria (10k NTC, accuracy <0,5°C) e di umidità relativa (capacitivo, accuracy ±3%). Particolare attenzione è stata posta anche al posizionamento di questi ultimi, al fine di evitare una loro vicinanza a fonti di calore radiative e l'esposizione a correnti d'aria. Infine, l'irraggiamento solare sulle pareti oggetto della misura è stato acquisito mediante piranometro di seconda classe (secondo ISO 9060) posizionato direttamente sulla parete in oggetto. Per quelle misure effettuate contemporaneamente su più pareti, l'irraggiamento è stato calcolato a partire da quello diretto su piano orizzontale, in accordo alla UNI 10349/1:2016.

Tutti i sensori sono dotati di certificato di calibrazione annuale. La frequenza di campionamento per tutti i sensori è stata settata pari a 5 min. Si precisa, comunque, che per questa tipologia di misura non è necessario un estremo sincronismo nei tempi di acquisizione tra i differenti canali. Le prove hanno avuto una durata non inferiore a 5 giorni consecutivi. In particolare, per il caso studio C, il valore di temperatura dell'aria particolarmente mite registrato all'esterno, ha indotto a prolungare la prova fino a poco meno di 8 giorni consecutivi.

La mappatura termica delle superfici oggetto di analisi è stata ottenuta mediante Thermo Tracer NEC 7800N. La camera opera nella banda spettrale  $8 \div 14~\mu m$  con elemento sensibile costituito da microbolometro non raffreddato da  $320 \times 240$  pixels. La risoluzione spaziale (instantaneous field of view, IFOV) è pari a 1.5 mrad ed il campo visivo (FOV) of  $27^{\circ} \times 20^{\circ}$ , con una distanza minima di 0.3 m. La risoluzione termica (thermal sensitivity) è pari a 0.05 °C alla temperatura ambiente di 30 °C, con accuratezza (systematic bias) of  $\pm 2$  °C o  $\pm 2\%$ r.v. Il post-processamento delle immagini è stato eseguito

mediante InfReC Analyzer NS9500 software.

Il valore di trasmittanza ottenuto mediante l'equazione di bilancio, è stato confrontato con il valore teorico ricavabile dalla UNI EN ISO 6946:2018 e con il valore sperimentale ricavato sulle stesse pareti mediante tecnica termoflussimetrica. In relazione a quest'ultimo obiettivo, per ogni parete oggetto di studio sono stati utilizzati 3 termoflussimetri wireless Termozig: due posizionati sul lato interno della parete ed uno sul lato esterno. L'elemento sensibile sfrutta il principio della termopila, su una superficie di contatto di 80 mm, con la possibilità di acquisire flussi di calore nell'intervallo da -300 a 300 W/m<sup>2</sup> con risoluzione non migliore di 0,01 W/m<sup>2</sup>. L'emissività superficiale della parete, oggetto della misura termografica, è stata stimata mediante il riscontro sperimentale dei parametri impostati nel relativo menu della termocamera. Un foglio di alluminio accartocciato, posizionato sulla superficie è stato utilizzato per la misura della temperatura riflessa (emissività impostata su 1), mentre un nastro adesivo nero, sempre posizionato sulla superficie ed avente larghezza sufficiente a coprire il campo visivo della termocamera (emissività impostata su 0,95) è stato utilizzato per la misura della temperatura superficiale. L'emissività reale della superficie è stimata regolandone il valore impostato nella termocamera fino ad ottenere sulla superficie adiacente al nastro il valore di temperatura misurato sul nastro stesso. Il coefficiente di scambio termico convettivo h<sub>c</sub> interno può variare nelle diverse posizioni della superficie su cui viene calcolato e non esiste attualmente alcun metodo noto per misurare la sua distribuzione spaziale. Nella presente attività di ricerca esso è stato stimato mediante la relazione proposta dall'ASTM C680 (per convezione naturale su superficie piana verticale) e ripresa da altri ricercatori (Tejedor et al. in Energy and Buildings 151 del 2017):

$$h_c = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 \cdot R\alpha^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}^2 \cdot \frac{k_f}{L}$$
 (4)

dove il termine in parentesi graffa è il numero di Nusselt,  $k_f$  è la conducibilità termica dell'aria in [W/mK] ed L è (per una parete verticale) l'altezza della parete in [m].

L'analisi di sensibilità delle singole variabili di influenza nella stima di U mediante la relazione (3) è svolta in accordo alla UNI CEI 70098-3:2016.

L'analisi di sensibilità associata alla misura della temperatura superficiale  $T_{s,in}$  mediante termocamera, è basata sul bilancio energetico dei diversi flussi in arrivo sul sensore: quello emesso dalla superficie  $E_{target}$ , quello riflesso dalla superficie  $E_{rif}$  ma proveniente dall'ambiente circostante e quello proveniente dall'atmosfera  $E_{atm}$  che circonda l'elemento sensibile, che è responsabile, tra l'altro, dell'attenuazione dei primi due attraverso il coefficiente di trasmissione  $\tau$ .

$$E_{target} = \frac{1}{\varepsilon \tau} E_{mis} - \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} E_{rif} - \frac{1 - \tau}{\varepsilon \tau} E_{atm}$$
 (5)

Tutti e tre i parametri sono stati determinati sulla base della legge di Stefan-Boltzmann, assumendo che la temperatura riflessa sia la stessa per tutte le superfici riflettenti (ciò è in gran parte corretto quando si esegue la termografia IR per interni) e che l'emissività dell'ambiente circostante sia uguale ad 1.

Per quanto concerne lo sviluppo di un sistema innovativo di taratura per termoflussimetri, la UO2 ha condotto un'analisi numerico-sperimentale delle performance metrologiche in collaborazione con l'istituto metrologico INRIM. La necessità di sviluppare tale sistema di taratura nasce dalla problematica che i termoflussimetri sono strumenti non sempre dotati di tracciabilità metrologica a causa della mancanza di adeguati standard di riferimento, soprattutto in condizioni critiche (bassi flussi di energia termica). Il sistema di taratura sviluppato nell'ambito del presente progetto può essere utilizzato in due modalità differenti: i) misura della conducibilità termica dei materiali attraverso la generazione di un flusso noto; ii) taratura di un termoflussimetro attraverso il metodo assoluto (misura dell'energia fornita da un riscaldatore e dell'area della sezione trasversale attraversata dal flusso termico) o attraverso il metodo relativo (misura della differenza di temperatura su un campione caratterizzato da uno spessore noto ed una conducibilità certificata). Al fine di assicurare l'uniformità del flusso termico, è stato adottato l'approccio della piastra calda ed il sistema può essere applicato alla taratura di termoflussimetri nel range che va approssimativamente da 10 W/m² a 100 W/m².

**OR 1.3** L'Unità Operativa UNICAS ha collaborato con la U.O. UNISA nell'analisi in campo dell'influenza delle prestazioni metrologiche di sensori di temperatura di globo a basso tempo di risposta per la misura della temperatura media radiante. In questo studio, UNICAS ha curato l'aspetto relativo alla progettazione, allo sviluppo e alla caratterizzazione metrologica del sistema per la taratura dei globotermometri e quello riguardante la progettazione e lo sviluppo di prototipi dei globotermometri miniaturizzati. Per la metodologia si faccia riferimento a quanto presente nella relazione della U.O. UNISA al punto (Attività 1.2: Analisi delle prestazioni metrologiche di sensori di temperatura di globo a basso tempo di risposta per la misura della temperatura media radiante).

Sempre nell'ambito dell'attività 1.3 ed in collaborazione con la UO4 (UNISA-UNINA), l'Unità Operativa 2 di Cassino (UNICAS) nel 2018 ha effettuato una sperimentazione sulle condizioni di comfort termico di clienti e personale nelle aree refrigerate di quattro supermercati del centro Italia. La misurazione dei parametri termoigrometrici è stata effettuata secondo le procedure della norma UNI EN ISO 7726. La campagna di misura è stata condotta in base ad un protocollo specifico per la valutazione dell'ambiente termico fornito da UNISA. In due dei quattro supermercati oggetto

dell'indagine è stata effettuata anche una campagna soggettiva, effettuata tramite la somministrazione di un questionario fornito dalla U.O. UNISA. Sul campo sono state effettuate misurazioni sia in estate (supermercati A e C) che in autunno (supermercati B e D) per sottolineare possibili criticità anche a metà stagione nelle posizioni più critiche. I supermercati oggetto dello studio sono descritti nella sezione "casi di studio".

I risultati delle misurazioni effettuate dalla U.O. UNICAS sono stati elaborati dalla U.O. UNISA secondo quanto riportato nella relazione UNISA.

Per quanto riguarda la misurazione dei parametri microclimatici, è stato utilizzato un datalogger Delta OHM HD 32 dotato di sensori per la temperatura dell'aria, temperature radianti, velocità dell'aria, temperatura di bulbo umido e temperatura globo conformi ai requisiti ISO 7726. Prima della campagna sperimentale, tutti i dispositivi di misurazione sono stati calibrati presso il LAMI, il laboratorio di misure industriali dell'Università di Cassino e del Lazio Meridionale, accreditato da ACCREDIA, l'ente italiano di accreditamento.

### OR 2. La misura della permeabilità all'aria ed analisi degli effetti sul comfort termico e ambientale nel retrofit sulla ventilazione degli edifici in ottica NZEB

L'obiettivo di ricerca relativo alla misura della permeabilità all'aria ed analisi degli effetti sul comfort termico nel retrofit sulla ventilazione degli edifici in ottica NZEB è stato perseguito mediante le seguenti attività di ricerca:

OR 2.1 - l'analisi dell'influenza della permeabilità e della ventilazione naturale sulla qualità dell'aria negli edifici esistenti (attività condotta in collaborazione con UNISA)

OR 2.2 - la verifica degli effetti di miglioramento in seguito al retrofit della ventilazione sulle prestazioni energetiche e sulla qualità dell'aria (attività condotta in collaborazione con UNISA)

OR 2.3 - la definizione di un protocollo operativo e sviluppo di un software per la misura della permeabilità all'aria di edifici mediante tecnica di pressurizzazione

OR 2.4 - la validazione metrologica e confronto tra le tecniche di misura della permeabilità all'aria degli edifici (e.g. BDT e gas tracciante).

**OR 2.1** Al fine di valutare l'influenza della permeabilità e della ventilazione naturale sulla qualità dell'aria negli edifici esistenti, la UO2 ha condotto uno studio sperimentale e numerico su un'aula scolastica (aula-test) sita a Cassino (FR, Italia) che può essere ritenuta rappresentativa degli edifici scolastici esistenti in Italia non oggetto di retrofit energetico e, quindi, ad elevata richiesta energetica. Nello specifico, nello studio è stato approfondito l'effetto delle diverse strategie di ventilazione sulla qualità dell'aria e sul risparmio energetico. A tal fine, sono state condotte analisi sperimentali e simulazioni (utilizzando l'equazione di bilancio della CO<sub>2</sub>) sull'aula completamente caratterizzata in termini di permeabilità all'aria e parametri termofisici. Inoltre, è stato valutato, a-priori, il potenziale miglioramento ottenibile adottando un sistema di ventilazione meccanica controllata per diversi livelli di occupazione dell'aula. L'aula-test scelta per la sperimentazione è descritta in dettaglio nella sezione "casi di studio".

La caratterizzazione della permeabilità all'aria dell'aula è stata condotta con due diversi metodi: il test di pressurizzazione/depressurizzazione ("Blower Door Test, BDT") ed il test di decadimento di un gas tracciante (CO<sub>2</sub>). Il BDT prevede una pressurizzazione/depressurizzazione della stanza applicando una prefissata differenza di pressione ( $\Delta p$ ) indoor-outdoor, secondo la metodologia riportata nella norma ISO 9972:2015, ed estrapolando il ricambio della stanza per il  $\Delta p$ =50 Pa  $(n_{50})$ . Il BDT permette di caratterizzare in maniera univoca la permeabilità della stanza indipendentemente delle condizioni climatiche esterne; maggiori dettagli sulla tecnica di pressurizzazione sono di seguito forniti (metodologia relativa all'attività 2.3 e 2.4). Oltre al BDT sono stati condotti dei test di decadimento di un gas tracciante secondo la norma ISO 12569:2017, tali test permettono, differentemente dal BDT, di misurare il ricambio nelle condizioni meteoclimatiche specifiche nel periodo di misura. I test decadimento della CO<sub>2</sub> sono stati condotti alla fine dell'orario scolastico in assenza di studenti per circa 1 h in modo da garantire concentrazioni di CO<sub>2</sub> elevate ed omogenee nell'aula. Le misure sono state condotte sia con finestre aperte, ossia con ricambio legato all'aerazione manuale dell'edificio, che con finestre chiuse, ovvero con ricambio legato alla sola permeabilità all'aria intrinseca dell'edificio. Pertanto, sono stati calcolati i ricambi d'aria sia con finestre aperte,  $(n_{\text{decay\_open}})$ , che con finestre chiuse  $(n_{\text{decay\_close}})$ . Sono stati condotti 10 test per entrambi gli scenari di ventilazione (finestre chiuse e finestre aperte). La CO2 nell'aula è stata misurata mediante una sonda che utilizza la tecnologia a infrarossi non dispersiva (NDIR) (Testo - Ambient CO<sub>2</sub> probe; range: 0–10000 ppm; frequenza di campionamento: 1 s); durante i test la sonda è stata posizionata su un banco a circa 0.8 m di altezza rispetto al pavimento. I dati sono stati post-processati come valori medi al minuto. Dal momento che la concentrazione di CO2 nell'aula è uniforme e non avvengono reazioni chimiche con altri composti, il ricambio d'aria (n) è stato determinato sulla base di un bilancio di massa di CO2 nell'aula che riconduce alla canonica relazione di decadimento esponenziale:

$$n = \frac{1}{\Delta t} \cdot \ln \frac{CO_{2-peak} - CO_{2-out}}{CO_{2-final} - CO_{2-out}}, (h^{-1})$$
(6)

con  $CO_{2\text{-peak}}$ ,  $CO_{2\text{-final}}$  e  $CO_{2\text{-out}}$  che rappresentato, rispettivamente, le concentrazioni di  $CO_{2}$  di picco (iniziale), finale ed outdoor mentre  $\Delta t$  è l'intervallo di tempo tra le concentrazioni di picco e finale. La concentrazione di  $CO_{2}$  outdoor è stata misurata prima e dopo il test di decadimento mediante una ulteriore sonda NDIR (TSI Model 7515 IAQ-CALC<sup>TM</sup>); data la non elevata variabilità delle tipiche concentrazioni di  $CO_{2}$  outdoor,  $CO_{2\text{-out}}$  è stata calcolata come valor medio tra i due valori misurati.

La qualità dell'aria è stata valutata durante la stagione di riscaldamento misurando o simulando le concentrazioni indoor di CO<sub>2</sub> per diversi scenari di ventilazione: i) ventilazione non schedulata o "free-running ventilation, FRV" (applicata semplicemente sulla percezione di insegnanti e studenti) e ii) aerazione manuale o "manual airing, MA" (schedulata secondo procedura prefissata) sono state investigate sperimentalmente, mentre (iii) ventilazione naturale, (iv) aerazione manuale e (v) ventilazione meccanica per garantire gli standard minimi di ventilazione sono state investigate numericamente simulando la concentrazione di CO<sub>2</sub> mediante bilancio di massa.

I test in condizioni di Free-running ventilation (FRV) sono stati condotti misurando le concentrazioni di CO<sub>2</sub> durante l'orario scolastico (08:30–13.00). I test sono stati condotti nel periodo Novembre 2014–Marzo 2015. Durante i test agli studenti/insegnanti è stata lasciata libertà di aprire/chiudere le finestre secondo la loro percezione. Durante il periodo di misura l'aula è stata occupata da 26-27 studenti (più due insegnanti) ottenendo un'area per studente di 2.2 m² persona<sup>-1</sup>. I test di aerazione manuale sono stati condotti nel periodo Febbraio-Marzo 2016 con tre diverse procedure di aerazione (10, 15 o 20 minuti di aperture delle finestre per ora); maggiori dettagli sono riportati nella metodologia relativa all'attività 2.2

Sulla base dei ricambi d'aria misurati in condizioni di ventilazione naturale e aerazione manuale ( $n_{\text{decay\_close}}$  e  $n_{\text{decay\_open}}$ ) sono stati stimati i ricambi d'aria per i test in condizione di "free-running ventilation" e "manual airing" come media pesata sui tempi di apertura delle finestre:

$$n = (n_{\text{decay\_close}} \cdot t_{\text{decay\_close}} + n_{\text{decay\_open}} \cdot t_{\text{decay\_open}}) / (t_{\text{decay\_close}} + t_{\text{decay\_open}}), (h^{-1})$$
 (7)

dove  $t_{\text{decay\_close}}$  e  $t_{\text{decay\_open}}$  sono le durate dei periodi durante i quali le finestre sono state tenute chiuse ed aperte, rispettivamente, (la somma è ovviamente pari a 270 min, ossia l'orario scolastico 8.30-13.00). Tali tempi durate per i test FRV sono state desunti dai diari delle attività giornaliere tenuti dalle insegnanti.

Per le stime/simulazioni dei trend di concentrazione di CO<sub>2</sub> indoor, sono stati utilizzati i tassi di generazione di CO<sub>2</sub> tipici della letteratura scientifica. Le simulazioni sono state condotte per un'occupazione di 2.2 m² persona⁻¹ negli scenari di ventilazione naturale (ossia con finestre e porte considerate completamente chiuse), aerazione manuale della stanza per garantire il ricambio minimo della EN 15251 (2.76 h⁻¹, i.e. 4.88 L s⁻¹ persona⁻¹), ventilazione meccanica controllata con portata costante per garantire il ricambio minimo della EN 15251.

Inoltre, simulazioni di ricambi d'aria e dei trend di CO<sub>2</sub> sono state effettuate per gli scenari di aerazione manuale e ventilazione meccanica controllata per diversi scenari di affollamento: 2 m<sup>2</sup> persona<sup>-1</sup> (indicato dalla norma UNI EN 15251), 1.8 m<sup>2</sup> persona<sup>-1</sup> (imposto dalla legislazione italiana per scuole elementari, Decreto Ministeriale 18/12/1975), e 1.6 m<sup>2</sup> persona<sup>-1</sup> (tipico valore di aule sovraffollate).

Per quanto concerne la stima dell'energia necessaria al riscaldamento dell'aula nelle diverse condizioni di ventilazione ed indice di occupazione, è stato adottato un "asset rating method" con procedura di calcolo mensile secondo quanto descritto nella norma EN ISO 52016–1:2017 con procedura di calcolo su base mensile e dati meteoclimatici standard (temperatura media mensile outdoor e 20 °C come set point indoor). Il fabbisogno energetico per il riscaldamento ( $Q_{H,nd}$ ) è stato calcolato applicando il bilancio energetico descritto nella EN ISO 52016-1:2017 che considera le perdite per trasmissione ( $Q_{H,vr}$ ) e ventilazione ( $Q_{H,ve}$ ) nonché i guadagni di energia per carichi endogeni ( $Q_{int}$ ) e solari ( $Q_{sol}$ ):

$$Q_{H,nd} = Q_{H,tr} + Q_{H,ve} - \eta_{H,gn}(Q_{int} + Q_{sol}), (MJ)$$
(8)

Il termine  $\eta_{H,gn}$  rappresenta un fattore di utilizzazione dei guadagni di energia; tale fattore, così come  $Q_{int}$  e  $Q_{sol}$ , è stato determinato sulla base della normativa tecnica considerando il reale affollamento dell'aula (27 studenti, 1 insegnante) e gli effetti di ombreggiamento dell'aula da alberi e aggetti.

**OR 2.2** Al fine di verificare gli effetti di miglioramento in seguito al retrofit della ventilazione sulle prestazioni energetiche e sulla qualità dell'aria, la UO2 ha condotto uno studio sperimentale pilota sull'aula scolastica (aula-test) già menzionata ed analizzata nell'attività 2.1 e descritta nei casi di studio di seguito riportati. In tale aula-test è stato effettuato un intervento di retrofit installando un sistema di ventilazione meccanica controllata con recuperatore di calore. I risultati in termini di qualità dell'aria e risparmio energetico ottenuti sono stati confrontati con la soluzione pre-retrofit costituita dalla stessa aula sprovvista di sistemi di ventilazione ad-hoc come descritto nella metodologia dell'attività 2.1.

Il monitoraggio della qualità dell'aria è stato condotto nell'aula-test, prima e dopo l'intervento di retrofit, durante la stagione di riscaldamento. I test pre-retrofit sono stati effettuati imponendo diverse procedure di aerazione manuale mediante aperte manuale delle finestre (come per l'attività 2.1). Al contrario, i test post-retrofit sono stati condotti imponendo un set-point in termini di CO<sub>2</sub> pari a 1000 ppm. La qualità dell'aria indoor è stata valutata misurando diversi parametri: PM<sub>10</sub>, concentrazioni in numero di particelle sub-micrometriche, e concentrazioni di CO<sub>2</sub>. Tali parametri sono stati misurati simultaneamente sia indoor che outdoor. L'analisi delle prestazioni energetiche è stata realizzata stimando la spesa energetica per il riscaldamento dell'aula; in particolare, è stato applicato un bilancio di energia secondo la norma EN ISO 52016–1:2017 adottando un "asset rating method" (vedi attività 2.1).

Le attività scolastiche nell'aula esaminata sono condotte dalle 08.30 alle 13.00 con una pausa di 15 minuti di solito effettuata nell'aula stessa. Durante la campagna sperimentale l'aula era frequentata da 25–27 studenti. Va sottolineato che, in merito alle possibili sorgenti emissive di polveri, nella scuola non è permesso fumare e non sono previste attività

di cucina (es. mensa).

Per la misura delle concentrazioni di inquinanti indoor ed outdoor sono stati utilizzati i seguenti strumenti: i) due contatori di particelle "diffusion charger" (Testo DiSCmini) per misurare la concentrazione in numero di particelle submicrometriche sia indoor che outdoor; ii) due fotometri "DustTrakTM DRX Aerosol Monitors" (Model 8534, TSI Inc.) per misurare la concentrazione di PM<sub>10</sub> sia indoor che outdoor; iii) due sonde NDIR per la misura della concentrazione di CO<sub>2</sub> sia indoor che outdoor; iv) due anemometri a filo caldo (Testo 0635 1025) per la misura della velocità e temperatura del flusso nei condotti di aspirazione del sistema di ventilazione meccanica controllata; v) due coppie di contatti magnetici (collegati ad un multimetro) per misurare le durate di aperture di porte e finestre.

Come descritto nell'attività 2.1, i test in condizioni "pre-retrofit" sono stati condotti nel periodo Febbraio-Marzo 2016 imponendo un'aerazione manuale della stanza con aperture delle finestre secondo una procedura prefissata (aerazione di 5, 10, 15, o 20 minuti ogni ora). Sono stati inoltre effettuati test di decadimento della CO<sub>2</sub> per valutare il ricambio d'aria della stanza sia per finestre che per finestre chiuse (in assenza di studenti) e poter quindi stimare un ricambio per i quattro diversi test di aerazione condotti.

Cinque test in condizioni "post-retrofit" sono stati condotti a Febbraio 2018 a seguito dell'installazione del sistema di ventilazione. Tale sistema è composto da due unità di ventilazione a soffitto con recuperatore di calore con unità di controllo wireless in grado di comandare le macchine in base al valore massimo di CO<sub>2</sub> desiderato. Dettagli delle unità di ventilazione sono riportati nei casi di studio.

Per quanto concerne la stima dell'energia necessaria al riscaldamento dell'aula sia in condizioni pre- che post-retrofit è stato adottato un "asset rating method" con procedura di calcolo mensile secondo quanto descritto nella norma EN ISO 52016–1:2017.

OR 2.3 e 2.4 Al fine di effettuare il confronto tra le tecniche di misura della permeabilità all'aria degli edifici, sono state condotte delle analisi sperimentali su un'unità abitativa non dotata di sistemi di ventilazione meccanica. Nello specifico, sono state condotte misure di permeabilità all'aria mediante la tecnica del Blower Door Test (BDT) e misure di ricambio d'aria mediante tecnica del gas tracciante (decadimento della CO<sub>2</sub>).

Per la sperimentazione è stato scelto un appartamento privato descritto in dettaglio nella sezione "casi di studio".

Le due metodologie per la caratterizzazione della ventilazione degli edifici sono state investigate e confrontate in riferimento all'intero appartamento e a cinque singole zone in comunicazione con l'ambiente esterno. In particolare, sono stati misurati:

- permeabilità all'aria delle singole stanze mediante tecnica di pressurizzazione;
- permeabilità all'aria dell'intero appartamento mediante tecnica di pressurizzazione;
- ricambio d'aria delle singole stanze mediante tecnica di decadimento del gas tracciante;
- ricambio d'aria dell'intero appartamento mediante tecnica di decadimento del gas tracciante.

La permeabilità all'aria dell'appartamento (e delle singole zone) è stata misurata mediante un test di pressurizzazione secondo la normativa ISO 9972. Nel caso di studio qui riportato è stato applicato il Metodo 1 ("test di un edificio in uso"), che permette di condurre misure di permeabilità dell'edificio nelle reali condizioni di utilizzo dell'edificio (e.g. non sigillando porte e finestre). In particolare, il test di pressurizzazione, *Blower Door Test* (BDT), è basato sulla pressurizzazione e/o depressurizzazione dell'edificio (o di una singola stanza) e sulla simultanea misura della portata che, in tali condizioni di differenza di pressione imposta tra ambiente interno ed esterno ( $\Delta p$ ), attraversa l'edificio. La relazione tra portata d'aria ( $g_{\rm env}$ , m³/h) e  $\Delta p$  (Pa) è data dall'equazione

$$q_{\rm env} = C_{\rm env} \, (\Delta p)^n \tag{9}$$

dove n e  $C_{env}$  sono parametri stimati secondo una semplice regressione lineare come indicato dalla norma. Il tasso di ricambio d'aria a 50 Pa  $(n_{50})$  è stato poi stimato come rapporto tra la portata a 50 Pa  $(q_{50})$  ed il volume dell'edificio. Le misure sono state condotte utilizzando un ventilatore a portata controllata in grado di indurre differenze di pressione positive o negative, un telaio estensibile ed un telo di nylon per garantire la sigillatura del locale oggetto della misura, un sistema di controllo della pressurizzazione/depressurizzazione per la regolazione della portata e del verso del flusso in grado di imporre un  $\Delta p$  desiderato tra interno ed esterno, due elementi primari per la misura della portata d'aria, un micromanometro digitale per la misura del  $\Delta p$  tra interno ed esterno, una sonda multifunzione per la misura di temperatura, pressione e umidità relativa interne ed esterne utili alla normalizzazione delle portate. Sulla base del valore di  $n_{50}$  è stato anche stimato il tasso di ricambio in condizioni naturali (n) dividendo  $n_{50}$  per un fattore N definito da studi di letteratura circa pari a 20. Le misure di permeabilità all'aria sono state condotte seguendo un protocollo operativo implementato sulla base della normativa ed implementato in un software sviluppato ad-hoc.

Il tasso di ricambio d'aria dell'appartamento (e delle singole zone) è stato misurato mediante il test di decadimento di un gas tracciante ( $CO_2$  per il presente studio) secondo l'approccio "single zone" indicato dalla norma ISO 12569. Tale test consente di stimare il tasso di ricambio sulla base della velocità di riduzione della concentrazione della  $CO_2$  nel locale in esame. A tal fine, come prescritto dalla norma, è stata immessa  $CO_2$  nel locale mediante una bombola e sono stati utilizzati dei ventilatori per uniformare la concentrazione. La misura della concentrazione di  $CO_2$  è stata condotta mediante una sonda di  $CO_2$  operante secondo il principio di misura NDIR. Durante le prove, le porte e le finestre dell'edificio/zone sono state tenute chiuse: in tali condizioni il ricambio d'aria è solo funzione della permeabilità dell'edificio e del  $\Delta p$  tra

interno ed esterno dovuto alle forzanti meteo-climatiche. Il test di decadimento è, infatti, a differenza del BDT, funzione delle condizioni meteo-climatiche esterne e, quindi, per definizione, non ripetibile. Sulla base delle misure della concentrazione di  $CO_2$  durante il test, è stato stimato il tasso di ricambio d'aria ( $n_{\rm ISO12569}$ ) mediante la relazione

$$n_{\text{ISO}12569} = (1/\Delta t) \ln[(C_1 - C_0)/(C_2 - C_0)]$$
 (10)

dove  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_0$  sono, rispettivamente, le concentrazioni di picco, finale ed outdoor di  $CO_2$ , mentre  $\Delta t$  è l'intervallo di tempo tra  $C_1$  e  $C_2$ .

Le misure mediante tecnica di pressurizzazione sono state condotte una sola volta per ciascun locale individuato data l'elevata ripetibilità del metodo; al contrario, le misure del ricambio d'aria mediante il metodo del decadimento dei gas traccianti sono state ripetute diverse volte in ragione della notevole dipendenza dalle condizioni climatiche esterne.

### OR 3. Il monitoraggio e la contabilizzazione del calore nel retrofit degli edifici in ottica NZEB

L'obiettivo di ricerca focalizzato sulla contabilizzazione del calore nel retrofit degli edifici in ottica NZEB è stato investigato attraverso le seguenti attività di ricerca:

- 3.1 la caratterizzazione delle metodologie di misura della contabilizzazione e ripartizione del calore;
- 3.2 il monitoraggio ex-ante ed ex-post di edifici sottoposti ad un retrofit sulla contabilizzazione dei consumi energetici;
- 3.3 la verifica dei consumi energetici e profilatura degli utenti a seguito di un intervento di retrofit energetico.

**OR 3.1** Nell'attività 3.1 l'UO ha condotto un'indagine bibliografica volta a definire lo stato dell'arte dei sistemi di contabilizzazione ed ha, inoltre, effettuato una sperimentazione per valutare le prestazioni in campo delle diverse tecniche di contabilizzazione diretta ed indiretta (come descritto nella sezione "casi di studio").

I sistemi di contabilizzazione del calore possono essere classificati come "diretti" e "indiretti". I primi, denominati contatori di energia termica o contatori di calore (heat meter, HM), effettuano una misura puntuale dell'energia termica fornita in un circuito di scambio termico (e.g. appartamento o edificio). I secondi sono invece di due differenti tipologie: i) i ripartitori di calore elettronici (heat cost allocators, HCA conformi alla UNI EN 834); ii) i sistemi di contabilizzazione del calore basati sui tempi di inserzione (insertion time counter, ITC) compensati con la temperatura media del fluido (conformi alla UNI 11388) oppure con i gradi giorno effettivi (conformi alla UNI 9019). I ripartitori di calore elettronici conformi alla UNI EN 834 sono oggi i sistemi di contabilizzazione indiretta maggiormente diffusi. Per completezza, sono disponibili anche contatori diretti HM "ibridi" recentemente brevettati e costituiti da un sensore di flusso statico miniaturizzato installato nel tubo di ritorno e da una coppia di sensori di temperatura a lettura remota incorporati nella valvola termostatica e nel supporto dell'elemento riscaldante. Tali dispositivi consentono la misurazione "diretta" del consumo di energia di ciascun elemento riscaldante. I sistemi diretti con HM sono quindi utilizzabili sia per la misura dell'energia termica al punto di fornitura (metering) che nella successiva ripartizione dei consumi condominiali (submetering). Se, da un lato, nel caso di edifici di nuova costruzione, dove le tubazioni di ingresso e di uscita dell'impianto di riscaldamento sono agevolmente accessibili, l'utilizzo degli HMs è sempre tecnicamente possibile, negli edifici esistenti essi non risultano sempre tecnicamente applicabili e risultano, comunque, spesso non convenienti dal punto di vista economico. Questo accade ad esempio negli interventi di retrofit su edifici esistenti sia a causa della configurazione distributiva degli impianti di riscaldamento (e.g. impianti centralizzati con distribuzione a colonne montanti verticali), sia a causa di vincoli architettonici ed impiantistici. Viceversa, i dispositivi di contabilizzazione indiretta HCA e ITC sono applicabili nella gran parte dei casi negli edifici esistenti, ma risultano carenti dal punto di vista regolatorio, ovvero sotto il profilo metrologico-prestazionale a garanzia della transazione economica ed a tutela della fede pubblica.

L'utilizzo di sistemi di contabilizzazione diretta HM è stabilito come prioritario quando tecnicamente possibile ed economicamente efficiente dalla Direttiva Efficienza Energetica 2012/27/UE e dal decreto di recepimento 102/2014 e dalle rispettive modifiche ed integrazioni. Gli HMs sono inoltre oggi gli unici strumenti regolati dalla Metrologia Legale (Direttiva 2014/32/UE, MID). Pertanto, essi sono soggetti ad un rigoroso percorso di prove e verifiche che prevede certificazione del tipo, controllo della produzione, verifica prima e periodica.

Dal punto di vista metrologico, l'accuratezza dei singoli HM diretti può variare tra il 3,3% e l'8,4% con un valore tipico del 5,5%. D'altra parte, il singolo dispositivo indiretto (HCA o ITC) è influenzato principalmente da: i) la stima delle potenze termiche nominali dei radiatori che potrebbero differire notevolmente da quelle effettive a seconda delle temperature di esercizio, del tipo di installazione, dei collegamenti idraulici e della verniciatura, che devono essere considerati mediante opportuni fattori correttivi; ii) imprecisione della misurazione della temperatura in funzione sia dei parametri di installazione che della posizione del sensore stesso, del funzionamento dell'elemento riscaldante, dell'accoppiamento tra sensore e radiatore e del modello di calcolo; iii) la deriva dei sensori di temperatura. La precisione dei singoli sistemi indiretti, di conseguenza, varia tra il 4,9% e il 37,7% con un valore tipico dell'8,1% per gli HCA e tra il 5,7% e il 37,1% con un valore tipico del 10,3% per gli ITC. Tuttavia, l'accuratezza dell'intero sistema di indiretto di contabilizzazione può essere molto diversa da quella del singolo dispositivo, a causa degli effetti di compensazione e della correlazione tra i radiatori nell'appartamento e nell'edificio e tra gli appartamenti nell'edificio stesso. Ad esempio, quando vengono utilizzati lo stesso tipo di radiatori e le stesse condizioni di installazione, l'incertezza della condivisione del calore viene notevolmente ridotta, variando dal 2,7% al 4,9% in condizioni ottimali (vale a dire un grande edificio con radiatori e condizioni di installazione simili). Questi effetti di compensazione sono più rilevanti nei piccoli edifici, a

causa dell'effetto di autocorrelazione sulle quote di calore.

Al fine di migliorare le prestazioni del metodo indiretto è stato sviluppato un metodo cosiddetto "ibrido", ovvero costituito da dispositivi di contabilizzazione indiretti (e.g. HCA) installati su ciascun radiatore e HM diretti installati alla base di ciascuna tubazione verticale dell'impianto di riscaldamento, oltre all'HM di fornitura. In questo caso, la ripartizione viene eseguita in modo selettivo su ciascuna colonna e non sull'intero edificio, consentendo in questo modo di: i) verificare l'energia termica prodotta dalla caldaia e, quindi, monitorarne l'efficienza e programmare tempestivamente eventuali interventi di manutenzione; ii) valutare la quota individuale del consumo di calore, prendendo in considerazione gruppi di radiatori con condizioni di installazione simili e potenza termica nominale, come i radiatori su tubazione verticale (la tipologia di appartamento e la distribuzione degli ambienti è tipicamente ripetitiva per i piani sovrapposti, quindi si ottiene una maggiore accuratezza della contabilizzazione come effetto positivo della compensazione degli errori sistematici), iii) monitorare il consumo di energia dei singoli locali, mantenendo allo stesso tempo la misurazione dell'energia su ciascuna colonna; iv) garantire l'economicità e semplicità di installazione dei dispositivi indiretti con un leggero costo aggiuntivo a seconda del numero di verticali presenti nell'impianto.

OR 3.2 Malgrado esistano in letteratura numerosi studi sul risparmio di energia connesso alla introduzione dei sistemi di contabilizzazione del calore e di termoregolazione in climi continentali, non esistono né campagne sperimentali estensive a lungo termine, né studi riguardanti la quantificazione sperimentale di tale risparmio nei paesi con clima mediterraneo e per le tipologie costruttive tipiche dei paesi del Sud Europa. A tal fine, sono stati analizzati i dati relativi alla variazione dei consumi energetici in 53 edifici (circa 3000 abitazioni) nelle principali città italiane (Roma, Milano e Torino) in cui era stata effettuata l'installazione di sistemi di contabilizzazione del calore e di termoregolazione. In tredici edifici del campione analizzato, l'installazione dei sistemi di contabilizzazione e di termoregolazione è stata effettuata contemporaneamente alla sostituzione della caldaia esistente con una ad elevata efficienza consentendo la valutazione dei benefici conseguibili dall'effetto combinato di diversi interventi di efficientamento energetico. A valle della campagna sperimentale è stato quindi possibile: i) stimare il beneficio medio nazionale direttamente connesso alla contabilizzazione individuale del calore; ii) osservare la variabilità nel tempo del beneficio energetico atteso; iii) studiare l'effetto combinato dell'installazione dei sistemi di contabilizzazione e termoregolazione insieme alla sostituzione della caldaia con una ad elevata efficienza energetica.

Nelle abitazioni investigate erano stati installati sistemi di contabilizzazione indiretta con Ripartitori di Calore (HCA) e valvole termostatiche su ciascun radiatore. Per alcuni edifici, erano disponibili anche i dati di consumo della seconda stagione di riscaldamento dopo l'installazione dei sistemi di contabilizzazione e di termoregolazione, e questo ha consentito di valutare la variabilità e la persistenza del beneficio nel tempo. Per ciascuna stagione di riscaldamento, è stata acquisita anche la temperatura esterna media giornaliera, con lo scopo di normalizzare il consumo di energia rispetto ai Gradi Giorno effettivi (GG).

**OR** 3.3 Per valutare la capacità degli edifici di sfruttare le nuove tecnologie ICT e sensibilizzare proprietari e occupanti ai risparmi di energia nelle sue diverse forme (elettrica, termica, gas), sono stati investigati il problema della raccolta, elaborazione e trasmissione dei dati di consumo di energia mediante una piattaforma integrata basata su tecnologia IoT volta ad aumentare la consapevolezza degli utenti residenziali attraverso l'uso di indici di consumo e benchmark. Attraverso due casi di studio sperimentali, sono stati testati sistemi di monitoraggio dell'energia termica ed elettrica e valutata l'idoneità della comunicazione del consumo energetico in termini di aggregazione temporale, spaziale e tipologica. Sempre in questo ambito, sono stati analizzate le prestazioni dei modelli di previsione dei consumi di gas naturale al fine di simulare il consumo di energia degli stock di edifici urbani. A tale scopo sono stati utilizzati i dati di consumo di utenze dotate di smart meters e di utenze non telelette (NDM) su due differenti scale (città e quartiere) in una rete di distribuzione nell'Italia meridionale con circa 16000 clienti NDM e 4000 edifici.

A tal fine sono state definite le specifiche tecniche dei sistemi di misura e submetering, delle librerie di analisi dei dati, dei parametri ed indicatori energetici, delle modalità di visualizzazione dei dati, per i seguenti vettori e impianti che generalmente alimentano una singola abitazione: i) impianto termico (e.g. riscaldamento/raffrescamento/altro); ii) impianto elettrico (e.g. illuminazione/elettrodomestici/altro); iii) impianto gas (e.g. uso cottura/acqua calda sanitaria/altro); iv) altro impianto tecnologico (e.g. termocamino). È stata inoltre definita l'architettura di una piattaforma SW per il monitoraggio dei consumi energetici con le seguenti funzionalità: i) Configurazione (e.g. riconoscimento sistemi, inserimento parametri caratteristici), ii) Monitoraggio (e.g. acquisizione e trasmissione del dato di misura), iii) Visualizzazione ed Analisi Dati(e.g. visualizzazione dati istantanei, trend temporali), iv) Diagnosi energetica (e.g. benchmarking, analisi cause inefficienza), v) Simulazione e Retrofit (e.g. simulazione comportamento energetico sistemi alternativi).

La piattaforma integrata IoT sviluppata si basa su tre livelli (vedi Figura 1). Il primo livello è rappresentato dai sistemi di metering e sub-metering per la raccolta dei dati di consumo di energia dei dispositivi elettrici, termici e del gas naturale (nodi) dei relativi impianti. Il secondo livello è la concentrazione dei dati da parte delle reti wireless (protocollo ZigBee) e la trasmissione remota. Gli smart meters possono anche comunicare direttamente con il cloud. Il terzo livello è la gestione dei dati basata sul Web che fornisce soluzioni per l'immissione, l'archiviazione, l'analisi e l'elaborazione dei dati. In particolare, in quest'ultimo livello i dati per il feedback degli utenti vengono elaborati creando report (ad es. Feedback indiretto), nonché la visualizzazione in tempo reale tramite dashboard (ad es. Feedback diretto). Pertanto, la

piattaforma integrata IoT combina e memorizza informazioni e dati, come segue: i) il modulo di misurazione, che raccoglie dati da diverse fonti (consumo e produzione di energia elettrica, termica e gassosa); ii) il modulo di configurazione che raccoglie dati dalla diversa fonte (ad es. prezzi dell'energia, dati meteorologici e comportamento dell'utente finale).

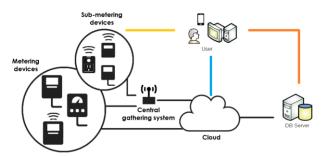


Figura 1 – Schema della piattaforma integrata IoT per la gestione dei consumi energetici.

Per quanto riguarda i sistemi di misura sono stati analizzati i contatori di energia (gas, energia termica ed energia elettrica) disponibili sul mercato, con particolare attenzione alla disponibilità di sistemi di comunicazione e trasmissione dei dati di consumo e all'interoperabilità con i sistemi di analisi dati, oltre che alla loro capacità di fornire le informazioni necessarie all'analisi e diagnosi energetica in tempo reale. Sono stati inoltre analizzati i sistemi di sub-metering per il monitoraggio dei singoli impianti e centri di consumo. Anche per i sistemi di sub-metering è stata approfondita in maniera particolare la capacità di interfacciarsi e di comunicare con la piattaforma di monitoraggio in progettazione con il necessario dettaglio rispetto ai centri di consumo interessati. A valle dell'analisi di mercato effettuata sono stati individuati i requisiti necessari per i sistemi di metering e sub-metering da utilizzare per la realizzazione della piattaforma e del prototipo sperimentale.

Per quanto attiene i metodi di modellazione dei consumi utilizzati dai gestori dei sistemi di trasmissione di gas naturale europei, questi sono generalmente impiegati ai fini dell'allocazione dei consumi (ad es. Bilanciamento energetico della rete e fatturazione). Le stime e le previsioni del consumo di gas naturale sono ottenute generalmente attraverso: ii) due letture dei contatori all'anno in un periodo casuale (2 o 6 mesi); ii) variabili climatiche (temperatura esterna, velocità del vento, temperatura dei giorni precedenti ecc.), iii) SLP (ovvero curve di regressione) le cui caratteristiche e parametri principali sono definiti in norme e documenti tecnici specifici da ciascuno Stato membro dell'UE. Nei tre metodi esaminati (italiano, tedesco e inglese) a ciascun cliente non misurato giornalmente (NDM) viene prima assegnata una categoria di utilizzo, che identifica l'uso finale del gas naturale (riscaldamento, cottura, produzione di acqua calda, raffreddamento, uso tecnologico ecc.) o le dimensioni, in termini di consumo di gas naturale del cliente. La stima del consumo annuale di gas naturale (CA) e del consumo giornaliero di gas naturale (CC) di ciascun utente NDM viene quindi eseguita come riportato nelle seguenti equazioni:

$$AC = CV \cdot \sum_{d=1}^{365} SLP_d \cdot CF_d$$
 (11)

$$DC = CV \cdot SLP_{d} \cdot CF_{d}$$
 (12)

dove CF è il fattore di correzione per condizioni meteorologiche, giorno della settimana, festività ecc.,  $SLP_d$  è il profilo di carico standard definito dalla normativa nazionale e CV rappresenta il valore del cliente, che è una misura della cosiddetta "ampiezza" di profilo di carico del cliente, direttamente correlato a due letture dei contatori ai giorni 1 e n ( $L_1$  e  $L_n$ ), secondo l'equazione):

$$CV = \frac{L_n - L_1}{\sum_{d=1}^n SLP_d} \tag{13}$$

I tre metodi analizzati, pur presentando analogie metodologiche, differiscono per SLP e parametri climatici.

### Casi studio applicativi

### OR 1. La misura delle prestazioni energetiche degli edifici e certificazione del retrofit in ottica NZEB

Per le attività sperimentali condotte nell'ambito delle attività di ricerca 1.1 sono stati analizzate 6 diverse tipologie di pareti le cui caratteristiche sono riportate nella Tabella 3.

**Tabella 3** – Stratigrafia e stima della trasmittanza termica delle pareti oggetto di studio secondo le UNI 10351:2015 e UNI 10355:1994.

#		Parete B1	s <sub>i</sub> [mm]	$\lambda_{2,i}  [\text{W m}^{-1}  \text{K}^{-1}]$	λ <sub>3,i</sub> [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	
1 2 3 4 spessore totale densità sup.		Blocchi di tufo intonaco EPS 520 642	30 400 30 60	0.29-1.4 0.63-1.7 0.29-1.4 0.036-0.051	0.29 0.63 0.29 0.036	
capacità termica, ext.	$[kJ m^{-2} K^{-1}]$	7.8				
trasittanza termica U2,						
trasmittanza termiica U	J3 [W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	] 0.37–0.62				
sfasamento	[h]	14.82				
		Parete B2	$s_i$ [mm]	$\lambda_{2,i} \; [W  m^{-1} \; K^{-1}]$	$\lambda_{3,i} \ [{ m W}  { m m}^{-1}  { m K}^{-1}]$	1 2 3 4
1 2 3		Alluminio Isolante intermedio Alluminio	1 60 1	200 0.036–0.051 200	200 0.036 200	
spessore totale densità sup. capacità termica, ext.	[mm] [kg m <sup>-2</sup> ] [kJ m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	62 7				
trasittanza termica U2,		3.9 0.54				
trasmittanza termiica U	73 [W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	0.54-0.74				
sfasamento	[h]	0.35				
	P	arete B3	s <sub>i</sub> [mm]	$\lambda_{2,i} [W m^{-1} K^{-1}]$	λ <sub>3,i</sub> [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	1 2 3
1 2 3 4	F Ii E	ntonaco orati in argilla ntercapedine d'aria PS	15 80 50 30	0.29-1.4 0.25-0.9 (*) 0.036-0.051	0.70 0.47 (*) 0.036	
5 6 spessore totale	In [mm]	Aattoni ntonaco 325	120 30	0.25-0.9 0.29-1.4	0.47 0.70	
densità sup. capacità termica, ext.	[kg m-2] [kJ m-2 K-1]	264 88				
trasittanza termica U2, trasmittanza termiica U3	[W m-2 K-1]	0.60				
sfasamento	[h]	0.50-0.84 8.38				
* resistenza termica dell'interca 6946 pari a 0.18 m² K W <sup>-1</sup> .	npedine fornita da	ISO				1 2 3 4 5 6
#		Parete B4	$s_i$ [mm]	$\lambda_{2,i}  [W  m^{-1}  K^{-1}]$	$\lambda_{3,i}  [{ m W}  { m m}^{-1}  { m K}^{-1}]$	
1 2		Intonaco Mattoni	50 195	0.29-1.40 0.25-0.90	0.85 0.40	
3	j	intonaco Calcestruzzo	70	0.25-0.90 0.29-1.40 0.76-1.82	0.85	
4 spessore totale	[mm]	365	50	0.76-1.82	1.82	
densità sup. capacità termica, ext.	[kg m-2] [kJ m-2 K-1]	439 125.1				
trasittanza termica U2,						
trasmittanza termiica U						
sfasamento	[h]	10.31				1 2 3 4
#	P	arete B5	s <sub>i</sub> [mm]	λ <sub>2,i</sub> [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	λ <sub>3,i</sub> [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	
1 2		ntonaco Blocchi di tufo	30 400	0.29-1.40 0.63-1.70	0.29 0.63	
3 Spessore totale Densità superficiale		460 640 68.7	30	0.29–1.40	0.29	
Capacità termica ext.						
Capacità termica $ext$ . Trasmittanza termica $U_2$	$[W m^{-2} K^{-1}]$	0,99				
•		0,99 0.99–2.23				

	Parete B6		$s_i$ [mm]	$\lambda_{2,i} \ [\mathrm{W}  \mathrm{m}^{-1}  \mathrm{K}^{-1}]$	$\lambda_{3,i} \ [{ m W} \ { m m}^{-1} \ { m K}^{-1} ]$	
$1$ $2$ $3$ $4$ $5$ Spessore totale Densità superficiale Capacità termica ext. Trasmittanza termica $U_2$	$\begin{tabular}{l} Calcestruzz \\ Mattoni cav \\ Intonaco \\ [mm] \\ [kg m^{-2}] \\ [kJ m^{-2} K^{-1}] \end{tabular}$	ati in argilla ori di cemento 495 600 49.2 0.66	20 250 100 100 25	0.29-1.40 0.25-0.90 0.15-1.91 0.25-0.90 0.29-1.40	0.85 0.30 1.50 0.25 0.85	
Trasmittanza termica $U_3$	$[W m^{-2} K^{-1}]$	0.42-1.55				
Sfasamento #	[h]	16.88				1 2 3 4 5

Per le attività sperimentali volte alla misura della trasmittanza in opera su edifici esistenti condotte nell'ambito delle attività di ricerca 1.2 su differenti tipologie di involucro, sono stati considerati tre casi studio nel periodo ottobre 2018-marzo 2019. Il caso di studio A (Figura 2) è un edificio realizzato tra gli anni 1950-1956, nel Borgo S. Elia a Cagliari, costituito da muratura in tufo  $(2300 \text{ kg/m}^3)$  senza isolamento, avente spessore medio 40 cm e trasmittanza termica di progetto  $U_A$ =2,192 W/m²K. Sono presenti effetti di degrado dell'involucro causati da umidità e fenomeni di formazione di condensa superficiale accompagnata da muffe ed efflorescenze sul paramento interno.



**Figura 2** – Caso di studio A: muratura in tufo senza isolamento.

L'ambiente concesso per le sperimentazioni non era abitato nel periodo dei test. Il locale oggetto di prova è stato appositamente riscaldato mediante termoconvettore portatile. Il caso di studio B (Figura 3) è un edificio dello stesso Borgo del precedente, ma soggetto a recente riqualificazione energetica (cappotto termico lato interno con lastre in gesso rivestito preaccoppiate con polistirolo espanso sinterizzato autoestinguente, densità  $10 \text{ kg/m}^2$ ); impermeabilizzazione e coibentazione della copertura; sostituzione infissi con serramenti in alluminio e vetrocamera). La trasmittanza termica della parete oggetto di analisi è valutata secondo UNI EN ISO 6946:2018 pari a  $U_C$ =1,001 W/m²K.



Figura 3 – Caso di studio B: muratura in tufo con isolamento interno.

Il caso di studio C (Figura 4) è un edificio 4x4x3 in legno posizionato sul terrazzo del Dipartimento DiCAAR dell'Università di Cagliari, realizzato con sistema ad ossatura lignea controventata (balloon frame), con pilastri e travetti disposti a intervalli ravvicinati e montanti continui dal basamento alla copertura. La trasmittanza termica della parete oggetto di analisi è valutata secondo UNI 6946:2018 pari a  $U_C$ =0,219 W/m² K.

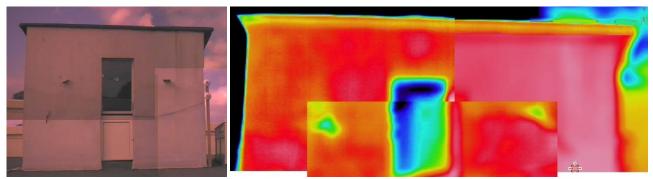
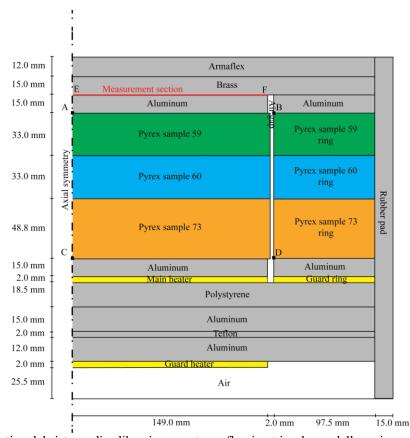


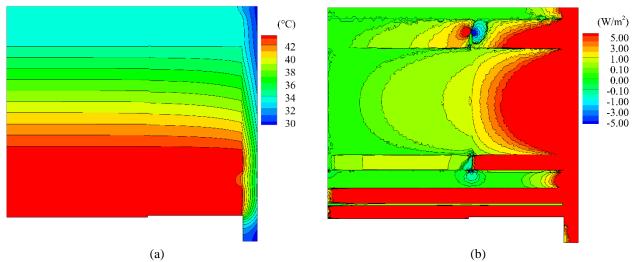
Figura 4 – Caso di studio C: pareti in legno con isolante intermedio.

Trattasi di un ambiente destinato alla sperimentazione di vetrate elettrocromiche, con pareti opache dotate di forte isolamento in lana di roccia (circa 8 cm). Le ampie superfici vetrate poste a SO causano nell'arco del pomeriggio un elevato carico radiativo in grado di provocare oscillazioni giornaliere della temperatura dell'aria all'interno anche oltre i  $15\,^{\circ}$ C. Al fine di garantire una maggiore stabilità termica all'interno del volume oggetto di prova, è stato utilizzato un termoconvettore dotato di termostato ambiente settato appositamente sui  $23\,^{\circ}$ C. Questa accortezza ha permesso di ridurre le oscillazioni interne della temperatura dell'aria su valori di circa  $24\pm2\,^{\circ}$ C.

Nell'ambito dell'attività 1.2 riguardante lo studio numerico-sperimentale per la progettazione di un sistema di taratura dei termoflussimetri, è stato prodotto un prototipo del sistema di calibrazione il cui schema in sezione è riportato in Figura 5. Attraverso un'analisi sperimentale, sono state analizzate le prestazioni del sistema utilizzando flussi termici di 10 W/m², 50 W/m² and 100 W/m². Inoltre, sono stati effettuati i confronti tra le misure ottenute con il metodo assoluto ed il metodo relativo ed una dettagliata analisi delle incertezze del flusso termico generato. Al fine di migliorare ulteriormente le prestazioni del sistema di calibrazione, è stata modellata la distribuzione della temperatura e del flusso termico mediante tecnica CFD (Figura 6). I risultati numerici sono stati validati per confronto con i dati sperimentali ottenendo un buon accordo tra i dati. Una volta validato, il modello numerico è stato applicato per investigare l'uniformità del flusso termico nella sezione di misura variando i seguenti parametri geometrici e termofluidodinamici: temperatura esterna dell'aria, spessore dell'isolante di gomma, diametro del piatto di alluminio sopra gli strati di Pyrex, spessore del gap di aria interposto tra i vetri di Pyrex e le guardie.



**Figura 5** – Prototipo del sistema di calibrazione per termoflussimetri: schema della sezione assialsimmetrica in cui si evidenziano i differenti componenti.



**Figura 6** – Campo di temperatura (a) e flusso radiale di energia termica limitato tra -5 W/m<sup>2</sup> e 5 W/m<sup>2</sup> (b) ottenuto imponendo un flusso di energia termica sul riscaldatore principale pari a 100 W/m<sup>2</sup>.

Per la descrizione dei casi di studio dell'Attività 1.3 si faccia riferimento a quanto presente nella relazione della UO4 (Attività 1.3: Analisi delle prestazioni metrologiche di sensori di temperatura di globo a basso tempo di risposta per la misura della temperatura media radiante). Relativamente all'altro studio condotto nell'ambito dell'attività 1.3, ossia le misure di comfort presso supermercati, sono stati analizzate le aree refrigerate di quattro supermercati di Cassino (già definiti come A, B, C e D nella sezione metodologica) i cui schemi e punti investigati sono evidenziati in Figura 7 e Figura 8:

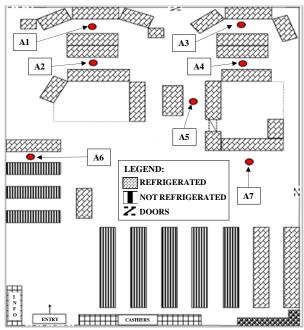


Figura 7 – Supermercato A con indicazione dei punti di misura (non in scala).

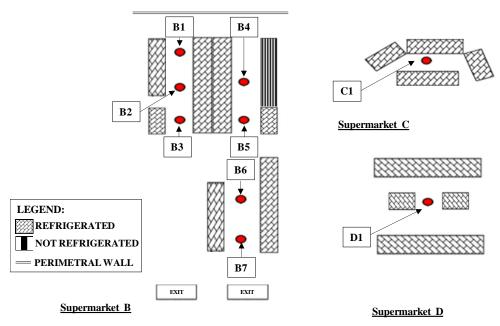


Figura 8 – Supermercati B, C e D con indicazione dei punti di misura (non in scala).

# OR 2. La misura della permeabilità all'aria ed analisi degli effetti sul comfort termico e ambientale nel retrofit sulla ventilazione degli edifici in ottica NZEB

Per le attività sperimentali condotte nell'ambito delle attività di ricerca 2.1 e 2.2 è stato considerato come caso-studio un'aula-test sita in una scuola del comune di Cassino (FR). L'aula-test è sita nel centro urbano della città, pertanto la qualità dell'aria indoor è influenzata in maniera significativa dal traffico veicolare. L'aula (superficie di 61.6 m² e volume di 178.5 m³) è sita al piano terra della scuola (costruita negli anni '80) ed ha un tetto terrazzato. La stratigrafia della stanza è nota in quanto valutata in precedenti lavori scientifici secondo la metodologia riportata nella norma ISO 6946 (trasmittanze, *U*, della muratura esterna, del tetto e del solaio pari, rispettivamente a 0.72, 0.99 e 1.10 W m⁻² K⁻¹). L'aula ha due finestre a vetro singolo (una di 2.7×2.6 m, l'altra di 5.4×2.6 m). Uno schema dell'aula test è riportato in Figura 9.

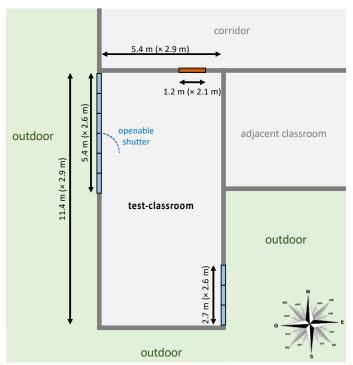
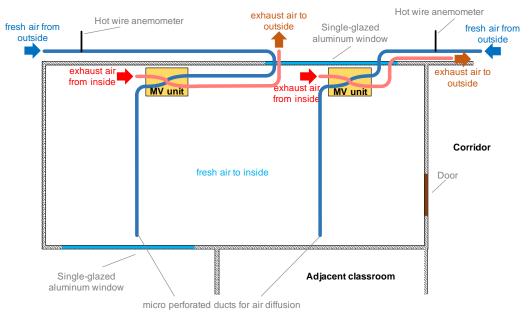


Figura 9 – Schema dell'aula test ("Test-classroom") considerata come caso di studio per le attività 2.1 e 2.2.

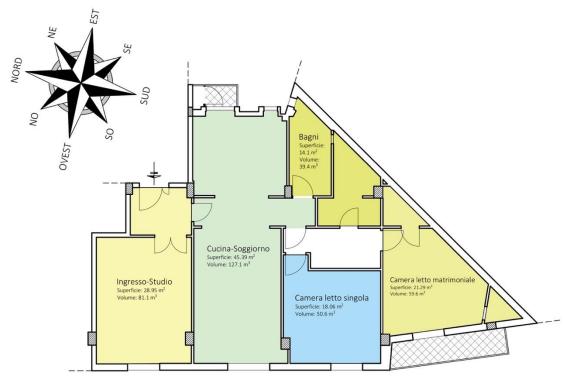
La sperimentazione relativa all'attività 2.2 è stata condotta installando nell'aula test un sistema di ventilazione meccanica controllata in CO<sub>2</sub> con recuperatore di calore. Tale sistema consta di due unità di ventilazione/recupero termico installate a soffitto. Ognuna delle unità garantisce una portata nominale massima di 500 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>, una pressione statica di 80 Pa. Le

unità presentano due filtri G4 (sia sulla mandata che sulla ripresa) ed una unità di recupero con efficienza nominale pari a 87% a 500 m³ h⁻¹ e and 92% a 250 m³ h⁻¹. Le unità sono connesse ad un controller wireless (installato ad 1.5 m di altezza dal pavimento) in grado di comandare le stesse in termini di set-point fissato in CO₂ e variare di conseguenza la portata di aria di rinnovo immessa in ambiente. Le unità installate permettono di variare la portata in ragione di tre livelli di velocità del motore, 20%, 40% e 60% della portata nominale, con conseguente consumo di 28, 67, e 83 W, rispettivamente. L'aria di rinnovo proveniente dall'ambiente outdoor passa attraverso la sezione di recupero termico ed è riscaldata dall'aria calda ripresa dal locale ed espulsa. L'immissione nell'ambiente è effettuata mediante dei condotti microforati di 20 cm di diametro disposti in maniera tale da garantire una ventilazione omogenea della stanza come riportato in Figura 10.



**Figura 10** – Schema (non in scala) del sistema di ventilazione meccanica controllata e diffusione dell'aria installati nell'aula test.

Per le attività sperimentali condotte nell'ambito delle attività di ricerca 2.3 e 2.4 è stato considerato un appartamento privato situato al secondo piano di un edificio costruito negli anni '70 realizzato in calcestruzzo armato e classificato in categoria E.1 (Edifici adibiti a residenza ed assimili) secondo il D.P.R. 412/93. L'edificio presenta una facciata, esposta a Sud-Ovest, prospiciente un'ampia piazza, ed una facciata più piccola e riparata esposta a Nord-Est. L'appartamento è costituito da nove locali/zone di diverse dimensioni per una superficie netta totale del pavimento di 135 m² ed un volume interno netto totale di 378 m³. La porta di ingresso e le sette finestre, con telaio in legno a singolo vetro, sono sprovviste di sigillatura. L'appartamento non è provvisto di sistemi di ventilazione meccanica, pertanto, i ricambi d'aria sono demandati alla ventilazione naturale e, quindi, strettamente connessi alla permeabilità intrinseca dell'appartamento stesso. La planimetria dell'appartamento oggetto dello studio con identificazione delle zone/locali oggetto di test di permeabilità è riportata in Figura 11.



**Figura 11** – Planimetria dell'appartamento oggetto dello studio e identificazione delle zone/locali oggetto di test di permeabilità nelle attività 2.3 e 2.4.

### OR 3. Il monitoraggio e la contabilizzazione del calore nel retrofit degli edifici in ottica NZEB

Per le attività sperimentali condotte nell'ambito delle attività di ricerca 3.1 è stato considerato come caso di studio un edificio costituito da 6 unità immobiliari, tutte destinate all'uso residenziale. L'edificio è stato edificato intorno al 1950 ed è ubicato nel centro urbano di Cassino (FR). Esso è costituito da 4 piani fuori terra, uno dei quali adibito ad uso commerciale (non oggetto della sperimentazione) e tre ad uso residenziale. In Tabella 4 sono riportate le principali caratteristiche dell'edificio.

**Tabella 4** – Caratteristiche principali dell'edificio pilota investigato.

Ubicazione edificio	Cassino (FR)
Zona climatica	C
Gradi giorno	1164
Numero livelli	4
Unità immobiliari coinvolte nella sperimentazione	6
Destinazione d'uso delle unità immobiliari	Residenziale
Superficie totale dell'edificio	1268 m <sup>2</sup>
Superficie riscaldata totale	825 m <sup>2</sup>

Ogni unità abitativa è servita da un impianto di riscaldamento autonomo con caldaia alimentata a gas naturale, un sistema di distribuzione del fluido termovettore orizzontale e radiatori come unità terminali di emissione, come schematizzato in Figura 12.

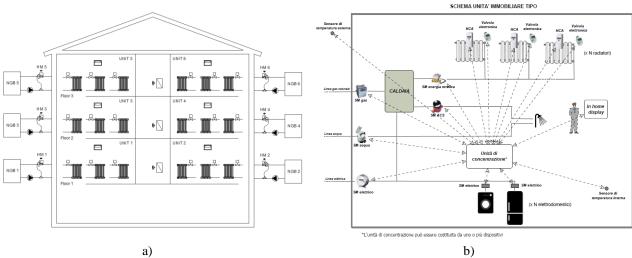


Figura 12 – Schema dell'edificio investigato e schema di installazione.

L'impianto di prova per la valutazione delle prestazioni del nuovo metodo di contabilizzazione ibrido (Figura 13) è costituito da un sistema di riscaldamento centralizzato con 40 radiatori caratterizzati da diverse forme, connessioni idrauliche, dimensioni e materiali, installati su quattro livelli e collegati attraverso un circuito idraulico che può essere impostato automaticamente per simulare diverse configurazioni impiantistiche (e.g. ad anello o a colonne verticali).



Figura 13 – Impianto sperimentale INRIM per la verifica dei sistemi di contabilizzazione.

L'impianto sperimentale, disponibile presso INRIM Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica di Torino, è stato configurato con la distribuzione a colonne verticali, ovvero il tipico caso di contabilizzazione indiretta tramite HCA negli edifici storici. La Figura 14 mostra il layout sperimentale con l'identificazione dei singoli elementi riscaldanti.

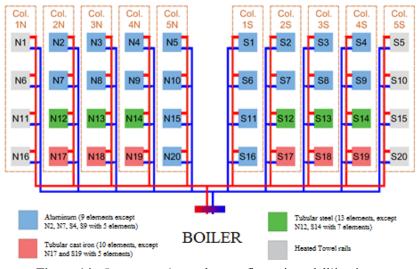


Figura 14 – Layout sperimentale e configurazione dell'impianto.

Per le attività sperimentali condotte nell'ambito delle attività di ricerca 3.2 è stato considerato come caso-studio lo stock edilizio nazionale (dati ISTAT) e 3000 appartamenti in tre città metropolitane (Torino, Milano e Roma).

Per le attività sperimentali condotte nell'ambito delle attività di ricerca 3.3 è stato considerato come caso-studio una villetta a schiera bifamiliare sita in Cervaro (FR) ed un edificio di edilizia popolare ATER sito in Anagni (FR). Per quanto riguarda il consumo di energia elettrica, è attualmente in corso una campagna sperimentale in una casa indipendente situata in provincia di Frosinone, costruita nel primo decennio del 2000 e abitata da una famiglia di quattro persone. La casa è un edificio indipendente su due piani, diviso in due appartamenti, di cui solo uno effettivamente abitato dalla famiglia, ma entrambi serviti dal contatore di energia elettrica principale con una potenza massima installata di 4,5 kW. Un misuratore di corrente è stato installato sulla linea di alimentazione principale dell'unico appartamento abitato (livello di misurazione), mentre, a livello di sotto-misurazione, sono stati installati due diversi dispositivi: i) misuratore di corrente sulla linea di alimentazione principale; ii) smart plugs sugli apparecchi elettrici che consumano più energia. L'edificio di edilizia popolare ATER di Anagni è stato invece edificato negli anni '70 e presenta prestazioni energetiche molto basse. Esso richiederebbe un importante intervento di retrofit energetico, sia per migliorare l'isolamento dell'involucro dell'edificio sia per aumentare l'efficienza dell'impianto di riscaldamento. Gli utenti finali sono prevalentemente a basso reddito e anziani con limitata capacità di interagire con i sistemi di automazione. In ogni edificio sono stati installati un contatore di energia termica per la misurazione diretta dell'energia termica prodotta dalla caldaia (livello di misurazione) e due diversi sistemi di misurazione del calore indiretto (livello di sotto-misurazione): i) contatori dei tempi di inserimento compensati con la temperatura del fluido e valvole elettroniche termostatiche controllate da cronotermostato (edificio n. 1); ii) ripartitori elettronici del costo del calore a due sensori, valvole termostatiche meccaniche e cronotermostato (edifici n. 2 e n. 3); iii) registratore di dati della temperatura dell'aria interna in due zone di ciascun appartamento (edifici n. 2 e n. 3). In Figura 15 sono raffigurati due degli edifici investigati.



**Figura 15** – (a) Case study impianto di riscaldamento n. 1, (b) Case study impianto elettrico con posizione dei dispositivi (punti rossi: smart plugs, punti verdi: misuratori di corrente).

### Risultati

#### OR 1. La misura delle prestazioni energetiche degli edifici e certificazione del retrofit in ottica NZEB

OR 1.1. In Tabella 5 vengono riportati i risultati delle misurazioni della trasmittanza U per i sei casi di studio esaminati e confrontati con i corrispondenti valori di riferimento U2 e U3. Come evidente, U2 mostra una maggiore incertezza per i componenti pesanti, maggiore di quella ottenuta con il metodo termoflussimetrico in situ ad eccezione del componente B1. Inoltre, quando la conducibilità termica di ogni strato è adeguatamente stimata o certificata, i valori U3 sono compatibili con quelli ottenuti con il metodo termoflussimetrico in situ. I valori in grassetto sono le migliori stime dei valori di trasmittanza U in situ, in quanto corrispondono ai test in cui sono stati registrati i valori più alti del flusso medio di calore e della differenza di temperatura media. Dai risultati sperimentali si evincono una serie di considerazioni. Le differenze tra le misurazioni HFM in situ sono sempre all'interno della corrispondente incertezza estesa, ad eccezione dell'HFM3 che utilizza un metodo indiretto. I valori di trasmittanza stimati sulla base delle proprietà ricavate dalle UNI 10351:2015 e UNI 10355:1994, sono compatibili con quelli in situ, ma l'incertezza varia in relazione alla conoscenza della struttura effettiva del componente indagato. Le condizioni di temperatura e umidità influenzano fortemente la conduttanza termica di alcuni materiali, aggiungendo, di conseguenza, un ulteriore contributo di incertezza al misurando; questo è il caso di materiali molto porosi, come il tufo (ad esempio il caso B1, B5), dove l'identificazione della struttura e i valori HFM in situ mostrano le differenze più elevate; la forma e le dimensioni delle piastre HFM sembrano non influenzare significativamente le misurazioni.

Tabella 5 – Valori della trasmittanza misurata per i 6 casi di studio posti a confronto con i valori ricavati da normativa.

Comparison between in situ U-values and  $U_2$ ,  $U_3$ .

Envelope component	Test id.	$U [W m^{-2} K^{-1}]$	U[W m <sup>−2</sup> K <sup>−1</sup> ]								
		$\overline{U_2}$	U <sub>3</sub>	U <sub>HFM1</sub>	U <sub>HFM2</sub>	$U_{ m HFM3}$	U <sub>HFM4</sub>				
	B1.1			$0.49 \pm 0.13$	0.54±0.13	$0.81 \pm 0.26$	$0.55 \pm 0.13$				
	B1.2			$0.47 \pm 0.13$	$0.53 \pm 0.13$	$\boldsymbol{0.70 \pm 0.25}$	$0.53 \pm 0.13$				
B1	B1.3	$0.49 \pm 0.07$	$0.37\pm0.03$	$0.43 \pm 0.11$	$0.49 \pm 0.11$	Fail	$0.50 \pm 0.11$				
	B1.4			$\textbf{0.39} \pm \textbf{0.09}$	$\textbf{0.44} \pm \textbf{0.10}$	Fail	$\textbf{0.44} \pm \textbf{0.09}$				
	B1.5			$0.39 \pm 0.1$	$0.44 \pm 0.10$	Fail	$0.46 \pm 0.10$				
	B2.1			$\textbf{0.55} \pm \textbf{0.06}$	$\boldsymbol{0.27 \pm 0.06}$	$1.82 \pm 0.33$	$\textbf{0.52} \pm \textbf{0.06}$				
B2	B2.2	$0.64 \pm 0.06$	$0.54 \pm 0.05$	$\boldsymbol{0.60 \pm 0.07}$	$0.51 \pm 0.07$	$\boldsymbol{1.69 \pm 0.35}$	$0.53 \pm 0.07$				
DZ	B2.3	$0.04 \pm 0.00$	$0.34 \pm 0.03$	$\boldsymbol{0.57 \pm 0.07}$	$0.38 \pm 0.06$	$\boldsymbol{1.73 \pm 0.32}$	$0.51\pm0.07$				
	B2.4			$\textbf{0.59} \pm \textbf{0.07}$	$\textbf{0.49} \pm \textbf{0.07}$	$\boldsymbol{1.68 \pm 0.31}$	$\textbf{0.53} \pm \textbf{0.07}$				
	B3.1			$0.58 \pm 0.06$	n.a.	n.a.	$0.57 \pm 0.06$				
D2	B3.2	$0.67 \pm 0.10$	$0.60 \pm 0.07$	$\textbf{0.58} \pm \textbf{0.06}$	n.a.	n.a.	$\textbf{0.57} \pm \textbf{0.06}$				
В3	B3.3	$0.67 \pm 0.10$	$0.00 \pm 0.07$	$\boldsymbol{0.58 \pm 0.06}$	n.a.	n.a.	$0.55 \pm 0.06$				
	B3.4			$0.59 \pm 0.06$	n.a.	n.a.	$0.59 \pm 0.06$				
	B4.1			$1.04 \pm 0.54$	$1.37 \pm 0.16$	$2.01 \pm 1.23$	$1.38 \pm 0.55$				
B4	B4.2	$1.35\pm0.38$	$1.21 \pm 0.05$	$\textbf{1.34} \pm \textbf{0.12}$	$\boldsymbol{1.17 \pm 0.09}$	$\textbf{1.03} \pm \textbf{0.18}$	$\textbf{1.28} \pm \textbf{0.11}$				
	B4.3			n.a.	$2.12 \pm 0.47$	$2.85 \pm 0.73$	$1.96 \pm 0.61$				
	B5.1			$0.68 \pm 0.15$	$0.64 \pm 0.15$	$0.93 \pm 0.22$	$0.59 \pm 0.14$				
D.5	B5.2	1.61 + 0.26	0.00 + 0.05	$\boldsymbol{0.73 \pm 0.17}$	$\boldsymbol{0.79 \pm 0.17}$	$1.19 \pm 0.28$	$\boldsymbol{0.72 \pm 0.17}$				
B5	B5.3	$1.61 \pm 0.36$	$0.99\pm0.05$	$0.71\pm0.13$	$0.78 \pm 0.13$	Fail	$0.71\pm0.13$				
	B5.4			$\textbf{0.74} \pm \textbf{0.09}$	$\textbf{0.80} \pm \textbf{0.10}$	$\textbf{1.19} \pm \textbf{0.19}$	$\textbf{0.71} \pm \textbf{0.09}$				
	B6.1			n.a.	$\textbf{0.68} \pm \textbf{0.07}$	$\textbf{0.3} \pm \textbf{0.20}$	$\textbf{0.67} \pm \textbf{0.07}$				
B6	B6.2	$0.99 \pm 0.33$	$0.66 \pm 0.03$	n.a.	$\boldsymbol{1.59 \pm 0.26}$	$2.4\pm1.16$	$2.2 \pm 0.26$				
	B7.1			$3.21 \pm 0.57$	$3.12 \pm 0.57$	$2.27 \pm 0.81$	$3.13 \pm 0.57$				
	B7.2	0.00 . 0.45	2.20 . 0.073	$3.22 \pm 0.53$	$3.19 \pm 0.53$	$1.98 \pm 0.69$	$3.17 \pm 0.53$				
B7	B7.3	$3.30 \pm 0.17$	$3.30 \pm 0.07^{a}$	$3.2 \pm 0.52$	$3.18 \pm 0.52$	$1.88 \pm 0.66$	$3.17 \pm 0.52$				
	B7.4			$\textbf{3.19} \pm \textbf{0.53}$	$\textbf{3.2} \pm \textbf{0.53}$	$\textbf{1.81} \pm \textbf{0.65}$	$\textbf{3.16} \pm \textbf{0.53}$				

<sup>&</sup>lt;sup>a</sup> Certified by the manufacturer.

I due fattori più critici per le misurazioni in situ mediante HFM sono rappresentati dalla differenza di temperatura e dal flusso misurato: valori medi del  $\Delta T$  inferiori a 10 °C e un modesto flusso termico (o inversione dello stesso) portano a incertezze inaccettabili (ad esempio in condizioni estive e/o primaverili, test B4.3 e B6.2, rispettivamente). Sebbene la norma ISO 9869 suggerisca una frequenza di campionamento che va da 30 a 60 min, ciò non sembra essere rilevante per la precisione della misurazione. In effetti i risultati sono sempre in un intervallo di  $\pm$  3% (componente B3 test 3.1, 3.2, 3.3, 3.4) al variare della durata (ad es. 15, 30, 45 e 60 min). Un potenziale problema può essere rappresentato da valori anomali (potrebbe essere molto frequente nei sistemi di trasmissione wireless) che, se non gestiti e corretti in modo adeguato dal punto di vista statistico, possono causare errori fino al 30%.

In caso di condizioni di misurazione non ottimali (ad es. valore medio del ΔT inferiore a 10 °C), l'affidabilità della misurazione aumenta all'aumentare della durata del campionamento sia per i componenti isolati (ad es. B1 per il periodo di campionamento superiore a 120 h) che per i componenti non isolati (ad es. B5 per un periodo di campionamento superiore a 96 h). Quando invece il periodo di campionamento è limitato al minimo (ovvero 72 h) possono verificarsi errori relativi superiori al 25%. Per il componente leggero B2 (vale a dire in caso di bassa inerzia termica) i valori U sono ripetibili anche con tempi di campionamento molto brevi (fino a 3 ore).

Relativamente all'incertezza di misura, come detto, numerose problematiche metrologiche insorgono in campo per la misura di U, come ad esempio: i) effetto della temperatura ed umidità e delle condizioni climatiche interne ed esterne, ii) l'accuratezza e la deriva dei sensori di flusso e di temperatura, iii) l'incertezza di taratura, iv) la stima ed incertezza dei coefficienti di scambio termico convettivo  $h_i$  ed  $h_e$ . La norma ISO 9869 fornisce un valore puramente indicativo dell'incertezza di U compreso tra il 14% (con contributi di incertezza non correlati) e il 28% (con contributi perfettamente correlati), ma evidenzia che essa può diventare molto più ampia in presenza di basso  $\Delta\theta$ , di ridotti tempi di campionamento, di elevata resistenza ed inerzia termica della parete, di radiazione solare, vento o pioggia. Di conseguenza, una corretta stima dell'incertezza di U mediante HFM deve considerare fattori quali: i) la variabilità del flusso misurato (stabilità ed uniformità), ii) la resistenza della piastra HFM e quella di contatto; iii) l'accuratezza della catena di misura (HFM, sensori di temperatura e datalogger); iv) la variabilità delle condizioni climatiche interne ed esterne di prova.

Applicando la legge di propagazione delle incertezze, l'incertezza di U è data dalla seguente equazione

$$u_{U} = \sqrt{\frac{\left(\frac{u_{\phi_{unif}}}{\Delta\theta}\right)^{2} + \left(\frac{u_{\phi_{Stab}}}{\Delta\theta}\right)^{2} + \left(\frac{u_{R_{HFM}}}{(R_{W} + R_{HFM})^{2}} u_{R_{HFM}}\right)^{2} + \left(\frac{u_{R_{C}}}{(R_{W} + R_{HFM})^{2}}\right)^{2}} + \left(-\frac{\phi}{\Delta\theta^{2}} u_{\Delta\theta}\right)^{2} + u_{HFM}^{2} + u_{SAD}^{2} + \left(\frac{u_{int}}{\sqrt{3}}\right)^{2} + \left(\frac{u_{ext}}{\sqrt{3}}\right)^{2}}$$
(14)

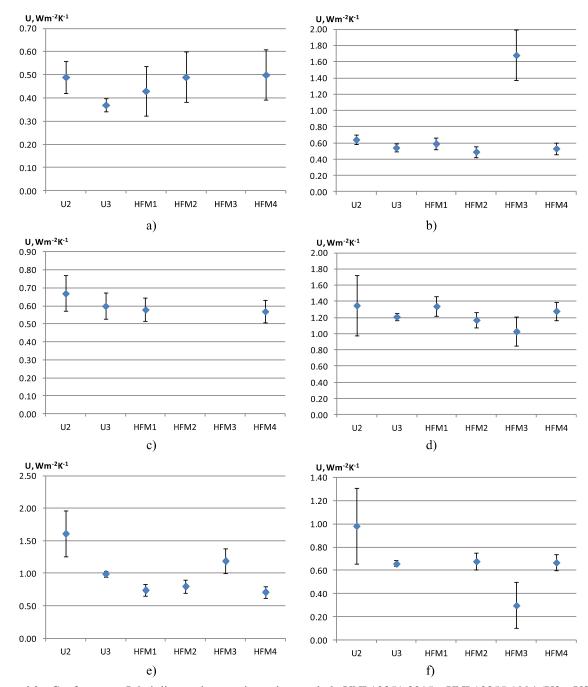
A titolo di esempio, in Tabella 6 viene riportato il budget di incertezza per un caso di studio (parete con doppio strato di forati ed intercapedine, intonaco interno ed esterno,  $\tau = 7$  h, misura in regime invernale. Al termine del campionamento è

stato riscontrato  $\overline{\emptyset}$ =15.2 Wm<sup>-2</sup> e  $\overline{\Delta\theta}$ =11.4 K, mentre il valore misurato è U=(1.08±0.14) Wm<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>. In termini relativi l'incertezza estesa è circa 12.7%.

Tabella 6 – Esempio di Budget di incertezza per una misura di trasmittanza termica con HFM.

Contributo di incertezza	unità	Distr.	u <sub>i</sub> (max/min)	$u_{i}$	c <sub>i</sub>	$(c_i u_i)^2$
Flusso termico (uniformità), $u_{\phi_{unif}}$	Wm <sup>-2</sup>	norm.	1-5%	0.076	$1/\Delta\theta = 0.088$	4.4E-05
Flusso termico (stabilità), $u_{\phi_{stab}}$	Wm <sup>-2</sup>	norm.	5-20%	0.633	$1/\Delta\theta = 0.088$	3.1E-03
Misura flusso termico HFM, $u_{HFM}$	Wm <sup>-2</sup>	rett.	2-5%	0.016	$1/\Delta\theta = 0.088$	2.6E-04
Resistenza termica HFM, $u_{R_{HFM}}$	K m <sup>2</sup> W <sup>-1</sup>	rett.	1-10%	0.023	$(R_w - R_{HFM})^{-2} = 1.234$	8.1E-04
Resistenza contatto HFM, $u_{R_C}$	K m <sup>2</sup> W <sup>-1</sup>	rett.	1-5%	0.001	$(R_w - R_{HFM})^{-2} = 1.234$	5.1E-07
Misura $\Delta\theta$ interno-esterno, $u_{\Delta\theta}$	K	norm.	1-2%	0.100	$-\phi/\Delta\theta^2 = -0.117$	1.4E-04
Risoluzione Datalogger, $u_{SAD}$	Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	rett.	0.5-1%	0.006	$1/\Delta\theta = 0.088$	2.6E-07
Stabilità ambiente esterno, $u_{ext}$	Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	rett.	1-10%	0.019	1	3.5E-04
Stabilità ambiente interno, $u_{int}$	Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	rett.	1-3%	0.006	1	3.9E-05
Incertezza composta estesa, $U_U$ (k=2, livello	di probabilità	circa 95%	), Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>			0.14

Di conseguenza, le incertezze di misura variano fortemente con il componente esaminato: ad es. i componenti leggeri (B2 e B7) presentano incertezze significativamente ridotte rispetto ai componenti pesanti. Inoltre, osservando la Figura 16, è possibile evidenziare che, anche considerando la migliore stima dei valori U in situ (ovvero i valori in grassetto nella Tabella 5): HFM3 fornisce misure non compatibili nei casi B2 e B6 e bassa compatibilità in altri casi; i valori U2 presentano incertezze troppo elevate (B4, B5, B6) e spesso non sono compatibili con quelli ottenuti da misurazioni situ.



**Figura 16** – Confronto tra I dati di trasmittanza ricavati secondo le UNI 10351:2015 e UNI 10355:1994 (U2 e U3) ed i valori misurati in situ per i componenti: (a) B1, (b) B2, (c) B3, (d) B4, (e) B5, (f) B6.

OR 1.2. Per quanto concerne le campagne sperimentali per la misura della trasmittanza in opera su edifici esistenti, in Tabella 7 sono riportati, per tutte e tre le tipologie di parete oggetto di studio, i seguenti dati di misura: il valore medio (durante l'intero periodo della prova) della temperatura dell'aria all'interno del volume riscaldato  $T_{a,in}$  e della temperatura dell'aria all'esterno del volume riscaldato  $T_{a,est}$ ; il valore misurato mediante termocamera della temperatura superficiale interna  $T_{s,in}$ ; il valore dell'emissività  $\epsilon$  della parete interna, calcolato secondo la procedura riportata al paragrafo Metodologia OR 1.2; il valore della trasmittanza di riferimento  $U_{STD}$  calcolato in accordo alla UNI EN ISO 6946:2018; il valore della trasmittanza calcolata mediante tecnica termoflussimetrica  $U_{HFM}$ ; il valore della trasmittanza calcolata mediante tecnica termografica  $U_{IRT}$ .

Tabella 7 – Condizioni di prova e valori di trasmittanza misurati mediante termoflussimetria U<sub>HFM</sub> e termografia U<sub>IRT</sub>.

Caso di	$T_{a,in}$	Ta,est	$T_{s,in}$	τ	$U_{\mathrm{STD}}$	$U_{ m HFM}$	U <sub>IRT</sub>
Studio	[°C]	[°C]	[°C]	[]	$[W/m^2K]$	$[W/m^2K]$	$[W/m^2K]$
A	18,5	14,0	17,5	0,95	2,193	1,801	$1,707 \pm 0,212$
В	20,5	11,9	19,5	0,95	1,001	0,952	$0,790 \pm 0,107$
С	24,4	16,4	23,0	0,82	0,219	0,204	$0,247 \pm 0,105$

In Tabella 8 sono riportati gli scostamenti in percentuale dei valori di trasmittanza calcolati con tecnica termoflussimetrica  $\Delta U_{HFM}$  e con tecnica termografica  $\Delta U_{IRT}$  rispetto ai corrispondenti calcolati in accordo alla UNI EN ISO 6946:2018 ( $U_{STD}$  secondo la  $\Delta U_{mes} = (U_{mes} - U_{STD})/U_{STD}$ ). Gli scostamenti ottenuti sono in linea con i valori riportati in letteratura dove, fatte alcune eccezioni, essi rientrano sempre nell'intervallo 15-20%. Parte di questo gap è presumibilmente imputabile al fatto che nei calcoli teorici sono utilizzate le caratteristiche dei materiali fornite dai produttori, quando disponibili, o ricavate da una ispezione sommaria in situ, con una incertezza che si propaga ulteriormente per effetto delle reali condizioni in cui si trovano i paramenti edilizi in opera. La tecnica di misura resta però molto promettente per i tempi estremamente ridotti di valutazione della trasmittanza in opera e la minore sensibilità alla differenza di temperatura tra ambiente interno ed esterno, come invece accade per la tecnica termoflussimetrica per la quale è richiesto un  $\Delta T$  di almeno 10 °C, il che preclude la possibilità di una misura affidabile per gran parte dell'anno, soprattutto in clima mediterraneo.

Tabella 8 –	Scostamenti o	dei valori	di trasm	ittanza 1	nisurati	dal v	alore di	riferimento.

Caso di	$U_{STD}$	$\Delta U_{HFM}$	$\Delta U_{IRT}$
Studio	$[W/m^2K]$	[%]	[%]
A	2,193	-18%	-22%
В	1,001	-5%	-21%
С	0,219	-7%	13%

Per contro la tecnica termografica richiede una accurata calibrazione dei parametri di settaggio della termocamera, al fine di ridurre l'incertezza associata alla necessaria conoscenza dell'emissività superficiale e delle caratteristiche dell'ambiente circostante. A riguardo, nelle immagini seguenti (Figura 17) vengono riportati i coefficienti di sensibilità della trasmittanza calcolata mediante tecnica termografica, rispetto ai principali parametri della temperatura misurata nel volume condizionato ( $T_{a,in}$ ), all'esterno dello stesso ( $T_{a,es}$ ) e sulla parete oggetto della misura (temperatura riflessa Trif e temperatura superficiale  $T_{s,in}$ ). È importante sottolineare quanto importante risulti la corretta impostazione dei parametri ambientali (emissività, umidità relativa) da cui dipendono valori che indirettamente (coefficiente di trasmissione dell'aria  $\tau$ ) o direttamente (temperatura riflessa e temperatura superficiale) vanno ad influenzare l'incertezza della misura della trasmittanza della parete.

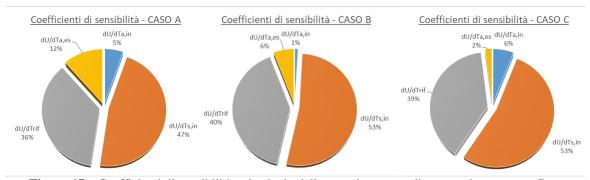
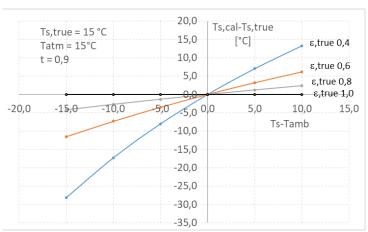
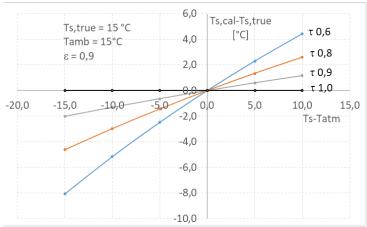


Figura 17 – Coefficienti di sensibilità nel calcolo della trasmittanza mediante tecnica termografica.

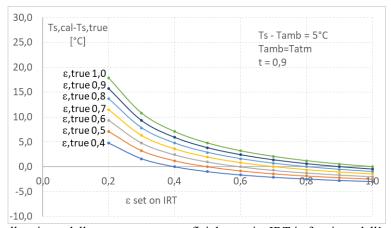
Di seguito vengono riportati i principali risultati dell'analisi di sensibilità associata alla misura della temperatura superficiale  $T_{s,in}$  mediante termocamera, e basata sul bilancio energetico dei diversi flussi in arrivo sul sensore, come riportato nella eq. (5). In particolare, viene riportato l'errore associato alla misura della temperatura superficiale  $(T_{s,calc} - T_{s,true})$  al variare del suo scostamento rispetto: (Figura 18) alla temperatura dell'ambiente circostante per diversi valori dell'emissività superficiale e (Figura 19) alla temperatura dell'aria interposta tra la termocamera e la parete di prova per diversi valori del coefficiente di trasmissione  $\tau$ . Infine, in Figura 20 viene riportato l'errore nella misura della temperatura superficiale per differenti errori dell'emissività superficiale calibrazione iniziale della termocamera



**Figura 18** – Errore nella misura di Ts in funzione del suo scostamento dalla temperatura dell'ambiente cui essa è esposta, per diversi valori di emissività della parete.

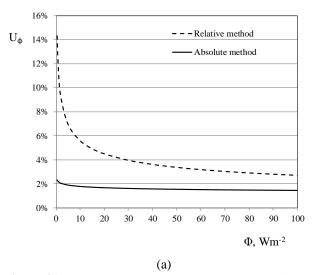


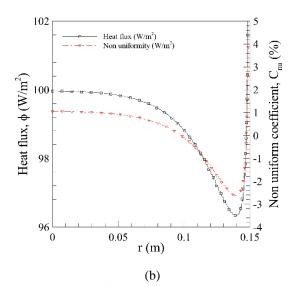
**Figura 19** – Errore nella misura di Ts in funzione del suo scostamento dalla temperatura dell'atmosfera frapposta, per diversi valori del coefficiente τ.



**Figura 20** – Errore nella misura della temperatura superficiale tramite IRT in funzione dell'emissività superficiale impostata sulla termocamera per diversi valori di emissività reali della superficie.

In merito alla progettazione del sistema di taratura dei termoflussimetri condotti nell'ambito dell'OR1.2, è stata ottenuta un'incertezza composta estesa, nel caso del metodo relativo, che varia tra il 5.7%, nel caso di bassi flussi di energia termica, ed il 2.8% per flusso termico circa pari a 100 W/m². Differentemente, applicando il metodo assoluto, l'incertezza massima ottenuta è stata pari all'1.8% per un flusso termico di 10 W/m² (Figura 21a). Dalle analisi si è osservato che l'uniformità richiesta è ottenuta soltanto in una sotto regione della sezione di misura, consentendo l'utilizzo del sistema di calibrazione standard proposto solo per la calibrazione di termoflussimetri di piccole dimensioni (Figura 21b).





**Figura 21** – Incertezza composta estesa ottenuta nel caso di metodo diretto ed indiretto in funzione del flusso termico (a); soluzione numerica ottimale ottenuta dall'analisi parametrica. Profilo del flusso termico in funzione del raggio che copre l'intera sezione di misura E-F di Figura 5 (b).

**OR 1.3.** L'Unità Operativa 2 di Cassino (UNICAS) ha collaborato con la UO4 (UNISA) nell'analisi in campo dell'influenza delle prestazioni energetiche dell'edificio sui parametri di comfort termo-igrometrico. Per i risultati si faccia riferimento a quanto presente nella relazione della UO4 (Attività 1.2).

Relativamente alle misure di comfort nei supermercati, l'analisi dei parametri microclimatici locali ha rivelato basse temperature del pavimento e una significativa stratificazione dell'aria fredda con differenze verticali di temperatura dell'aria fino a 8-9 °C in caso di cabinet aperti. In estate, a causa dei valori più bassi della temperatura dell'aria (rispetto a quelli esterni) combinati con l'usuale basso isolamento termico dei vestiti, l'ambiente termico è risultato freddo e il modello IREQ ha rivelato condizioni potenzialmente pericolose per i clienti in tre delle aree investigate con DLE (Durata Limite di Esposizione) di circa 40 minuti. In autunno, i DLE hanno superato ampiamente un'ora. I risultati dell'indagine soggettiva condotta in due punti vendita solo per i clienti sono risultati coerenti con l'indagine oggettiva e hanno rivelato percentuali più elevate di insoddisfatti nel caso delle donne. Infine, il disagio locale dovuto all'effetto dei piedi freddi è apparso più significativo per le donne probabilmente a causa della diversa distribuzione degli indumenti nelle parti inferiori del corpo. Per quanto riguarda il comfort termico complessivo per i clienti, l'indagine microclimatica ha rivelato valori di PMV sistematicamente negativi (basati su abiti indossati reali) sia in estate che in autunno. Ad eccezione di 5 casi su 23, sono state riscontrate condizioni di disagio generalizzate (PMV <-0,7) e, in alcuni casi, l'insorgenza di stress da freddo (PMV <-2). Al contrario, grazie all'utilizzo di abbigliamento più idoneo per i compiti di lavoro nelle aree refrigerate, sono state riscontrate condizioni di comfort per il personale. La valutazione dell'indice di stress IREQ ha rivelato nelle condizioni di stress da freddo estivo in cinque aree (latticini, salumi, yogurt, pesce e verdure) con DLE stimato superiore ai tempi medi di permanenza dei clienti nelle aree di vendita. In autunno, sebbene in diverse posizioni i valori di isolamento degli indumenti fossero inferiori al valore minimo richiesto, i valori di DLE hanno superato ampiamente un'ora. Non sono state rilevate, invece, condizioni di stress per il personale in nessuna condizione. Per quanto riguarda il disagio locale, la tipologia di cabinets (specialmente aperti) e la loro disposizione all'interno dell'area di vendita (ad es. cabinets contrapposti) favoriscono una significativa stratificazione dell'aria fredda a livello della caviglia con bassi valori di temperatura del pavimento, determinando una percentuale di insoddisfatti anche maggiore di 80% che sembra ridursi in caso di cabinets chiusi (circa 20%). Come descritto nella sezione metodologica, in due supermercati è stata condotta anche un'indagine soggettiva per i clienti e i relativi risultati sono risultati abbastanza in accordo con l'analisi oggettiva. Ciò è probabilmente dovuto a condizioni microclimatiche più prossime al comfort. In particolare, per quanto riguarda il disagio globale, i giudizi espressi sulla scala percettiva, valutativa e di tolleranza erano coerenti con condizioni leggermente fredde, come confermato dai voti sulla sensazione termica (TSV=-0,61 in estate e TSV=-0,77 in autunno). Sebbene i valori di TSV non siano stati influenzati da problemi legati al genere, sono state riscontrate percentuali più elevate di insoddisfatti (secondo il criterio di Fanger) per le donne.

## OR 2. La misura della permeabilità all'aria ed analisi degli effetti sul comfort termico e ambientale nel retrofit sulla ventilazione degli edifici in ottica NZEB

**OR 2.1.** La misura di permeabilità dell'edificio mediante BDT ha evidenziato un  $n_{50}$ =3.76 h<sup>-1</sup>, ossia un valore tipico di edifici esistenti costruiti prima di normative sul risparmio energetico degli edifici. Tale valore è la media tra i dati ottenuti in depressurizzazione e pressurizzazione 2.97 e 4.55 h<sup>-1</sup>, rispettivamente. Il più alto valore di depressurizzazione è dovuto alla tipologia di finestre dell'aula che prevedono l'apertura verso l'interno. I valori medi di ricambio d'aria ottenuti da test di decadimento sono risultati pari a 0.22 h<sup>-1</sup> (range 0.18–0.26 h<sup>-1</sup>) e 3.77 h<sup>-1</sup> (range 2.99–4.88 h<sup>-1</sup>) per finestre chiuse ed aperte, rispettivamente.

Per quanto concerne la qualità dell'aria indoor, come riportato in Tabella 9 durante i test FRV i valori mediani di CO<sub>2</sub> sono risultati nel range 1777-2272 ppm, e pertanto molto più alti del valore comunemente accettato di 1000 ppm. Al contrario, le concentrazioni mediane di CO<sub>2</sub> misurate durante i test di aerazione manuale sono risultate pari a 1482, 1310, e 1085 ppm per aerazione di 10, 15 e and 20 min h<sup>-1</sup>, rispettivamente. Valori mediani di CO<sub>2</sub> indoor accettabili sono stati stimati solo per le strategie di ventilazione atte a garantire il ricambio minimo (aerazione manuale basata sulla della EN 15251 e ventilazione meccanica controllata con portata costante basata sula EN 15251).

Per indici di occupazione maggiori della stanza, sono richiesti periodi di aerazione più lunghi che comportano non trascurabili aumenti nelle concentrazioni mediane di CO<sub>2</sub> rispetto agli stessi scenari di occupazione con ventilazione meccanica (fino al 13%).

In termini di consumi energetici per il riscaldamento, la differenza tra i diversi scenari testati è dovuta al solo contributo delle perdite per ventilazione. I test FRV e di ventilazione naturale sono caratterizzati da minori spese energetiche a causa delle ridotte aerazioni attuate, ma anche da una peggiore qualità dell'aria. I test con aerazione manuale schedulata presentano spese energetiche per ventilazione fino al 21% della spesa totale per riscaldamento. Tale spesa aumenta fino al 36% quando l'aerazione manuale è applicata per garantire il ricambio minimo sancito dalla EN 15251. Nel caso di ventilazione meccanica controllata e recupero di calore tale spesa può essere potenzialmente ridotta del 32% (Tabella 9). Tale divario nella spesa energetica tra aerazione manuale e ventilazione meccanica aumenta, in ragione del più lungo periodo di aerazione richiesto, per scenari a maggiore occupazione dell'aula.

In conclusione, lo studio evidenzia che anche in presenza di non elevati scenari di occupazione, gli obiettivi di qualità dell'aria e di risparmio energetico non possono essere conseguiti simultaneamente a meno che non si adotti una soluzione impiantistica che preveda un sistema di ventilazione meccanica controllata con recupero di calore. Infatti, dai dati è evidente che se i confronti tra diverse strategie di ventilazione sono condotti a parità di ricambi d'aria, la ventilazione meccanica non può essere additata come un metodo energivoro.

**Tabella 9** – Valori di ricambio d'aria (n), concentrazioni di CO<sub>2</sub>, contributo di perdite per ventilazione e risparmio energetico per i diversi test di ventilazione (condotti sperimentalmente o simulati).

Strategia di ventilazione	Descrizione	Test	<i>n</i> (h <sup>-1</sup> )	CO <sub>2</sub> mediana e range (ppm)	Contributo perdite di ventilazione	Risparmio energetico rispetto all'aerazione manuale imposta da EN 15251 (%)
Ventilazione naturale	Concentrazione di CO <sub>2</sub> stimata (bilancio di massa) considerando il tasso di ricambio d'aria dovuto alla sola permeabilità dell'edificio (no aerazione)	NV	0.22	2783 (782–4064)	4%	33%
		FRV 1	0.43	2078 (766–3377)	8%	30%
	Cinque test di misura della CO <sub>2</sub> condotti durante l'orario scolastico. L'aerazione	FRV 2	0.55	2044 (814–2922)	10%	29%
Free-running ventilation		FRV 3	0.60	1777 (770–2809)	11%	28%
		FRV 4	0.63	2272 (805–2778)	11%	28%
		FRV 5	0.88	1859 (723–2952)	15%	24%
	Tre test di misura della CO <sub>2</sub> condotti	MA 1	0.75	1482 (700–2044)	13%	26%
	seguendo tre diverse procedure di aerazione dell'aula: apertura delle	MA 2	1.01	1310 (710–1791)	17%	23%
Manual airing	finestre per 10 min h <sup>-1</sup> (MA 1), 15 min h <sup>-1</sup> (MA 2), e 20 min h <sup>-1</sup> (MA 3).	MA 3	1.27	1085 (579–1688)	21%	19%
	Concentrazione di CO <sub>2</sub> stimata (bilancio di massa) considerando il tasso di ricambio d'aria minimo determinato dalla norma EN 15251.	MA EN 1	2.76	912 (792–1090)	36%	-
Ventilazione meccanica controllata (a portata costante) e recuperatore di calore	Concentrazione di CO <sub>2</sub> stimata (bilancio di massa) considerando il tasso di ricambio d'aria minimo determinato dalla norma EN 15251. Efficienza del recuperatore di calore pari al 90%.	MV EN 1	2.76	965 (716–966)	5%	32% ▽

**OR 2.2** Le misure condotte in condizioni "pre-retrofit" hanno evidenziato che l'aula-test necessita di una energia per riscaldamento (per l'intero periodo di riscaldamento) variabile tra  $44.1 \times 10^3$  e  $50.5 \times 10^3$  MJ in ragione della portata d'aria considerata nei diversi test di aerazione. Infatti, tale spesa energetica per sola ventilazione della stanza varia tra il 9% (aerazione di 5 minuti per ora) e il 21% (aerazione di 20 minuti per ora) del totale. Se si volesse garantire il valore minimo di ricambio d'aria richiesto dalla normativa EN 15251 (e.g.  $2.76 \, h^{-1}$ ) mediante sola aerazione manuale occorrerebbero  $62.6 \times 10^3$  MJ per l'intera stagione di riscaldamento, con un contributo della sola ventilazione pari al 36% del totale.

Dal punto di vista della qualità dell'aria indoor, i quattro test di aerazione hanno mostrato un valore mediano di CO<sub>2</sub> sull'intera giornata di test pari a 1756, 1482, 1310, e 1085 ppm per aerazione di 5, 10, 15, and 20 min h<sup>-1</sup>. Test statistici condotti sui trend di CO<sub>2</sub> hanno confermato che tali valori sono statisticamente differenti tra loro, dimostrando, quindi, che un'aerazione manuale pianificata in maniera appropriata potrebbe influenzare positivamente i valori di CO<sub>2</sub> indoor. Tuttavia, l'utilizzo di tecniche di aerazione non garantisce un risultato positivo in termini di esposizione alle polveri aerodisperse. Le polveri sub-micrometriche indoor sono principalmente legate alle sorgenti esterne (traffico), pertanto, una maggiore aerazione causa una penetrazione maggiore di tali polveri nell'aula. Nei test condotti, infatti, il rapporto della concentrazione in numero di polveri indoor su quella outdoor è aumentato da 0.57 (test con aerazione di 5 min h<sup>-1</sup>) a 0.80 (test con aerazione di 20 min h<sup>-1</sup>) (Figura 22).

Un comportamento completamente differente è stato misurato per il  $PM_{10}$  (metrica tipica delle polveri supermicrometriche). I trend di  $PM_{10}$  misurati nei test condotti hanno mostrato una concentrazione di  $PM_{10}$  indoor superiore a quella outdoor probabilmente dovuta ai fenomeni di risospensione delle polveri grossolane legati al movimento degli studenti nelle aule e all'uso del gesso. In tal senso, l'effetto dell'aerazione si rivelato abbastanza trascurabile, infatti i rapporti di concentrazione  $PM_{10}$  indoor su outdoor sono stati misurati nel range 2-5 senza una correlazione chiara con la durata del periodo di aerazione (Figura 22).

Le misure condotte in condizioni "post-retrofit" hanno evidenziato che per garantire il valore di set-point di CO<sub>2</sub> occorre un ricambio d'aria tra 2.33 e 2.79 h<sup>-1</sup> (valori statisticamente non differenti). Le concentrazioni in numero di particelle indoor durante i test con ventilazione meccanica controllata hanno mostrato una riduzione del rapporto indoor-outdoor (0.39-0.56) rispetto ai test con aerazione manuale (Figura 22). Tale rapporto, in assenza di aerazione, è legato solo al grado di penetrazione del filtro: pertanto, l'utilizzo di filtri più performanti sulle polveri sub-micrometriche (es. F7) garantirebbe concentrazioni indoor inferiori.

Anche in termini di  $PM_{10}$  la ventilazione meccanica controllata ha un effetto positivo, infatti, anche se le concentrazioni indoor risultano ancora maggiori di quelle indoor, il rapporto di  $PM_{10}$  indoor-outdoor si riduce a valori variabili tra 1.14 e 2.00, ossia inferiori rispetto a quelli misurati nella condizione "pre-retrofit". Tale effetto è dovuto essenzialmente al maggiore ricambio d'aria garantito dalla ventilazione meccanica.

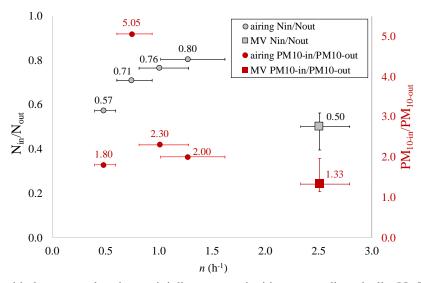


Figura 22 – Rapporti indoor-to-outdoor in termini di concentrazioni in numero di particelle (N<sub>in</sub>/N<sub>out</sub>) e PM<sub>10</sub> (PM<sub>10</sub>in/PM<sub>10-out</sub>) per i test di aerazione manuale (airing) e ventilazione meccanica controllata con set-point di
CO<sub>2</sub>=1000 ppm (MV).

In termini di spesa energetica per il riscaldamento, la presenza dell'unità di recupero termico (efficienza del 90% verificata sperimentalmente) garantisce un risparmio rispetto alla condizione pre-retrofit con ricambio imposto dalla norma pari al 32%.

Riassumendo, i dati delle campagne sperimentali condotte sul retrofit della ventilazione hanno mostrato un effetto positivo della ventilazione meccanica controllata sia in termini di consumo energetico per il riscaldamento che di qualità dell'aria indoor, da intendersi, quest'ultima, non limitata alla sola CO<sub>2</sub> ma in un'accezione più generale che include anche le diverse metriche dell'aerosol (polveri sub-micrometriche e super-micrometriche).

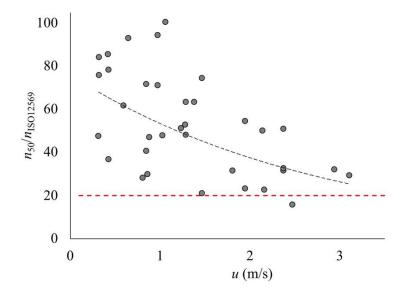
OR 2.3 e 2.4. In Tabella 10 sono riportati i risultati delle misure BDT espresse in termini di ricambio d'aria a 50 Pa  $(n_{50})$  per i singoli locali dell'appartamento in esame e per l'intero appartamento. Inoltre, sono riportati i valori dei ricambi naturali (n) stimati applicando la nota relazione empirica  $n = n_{50}/N$  avendo considerato N=20 come suggerito dalla letteratura scientifica del settore e validato con buona approssimazione per edifici del Nord America. I dati di  $n_{50}$  relativi ai singoli locali mettono in luce una sensibile disuniformità del comportamento dell'edificio in termini di permeabilità all'aria, infatti il valore di  $n_{50}$  varia da 13.6 a 15.4 h<sup>-1</sup>. Il valore di  $n_{50}$  sull'intero edificio è pari a circa 12 h<sup>-1</sup>, ossia inferiore

al valore stimato calcolando la media pesata sui volumi delle permeabilità delle singole zone (pari a 14.9 h<sup>-1</sup>). Tale scostamento può essere imputato a flussi interstiziali tra i locali adiacenti non computabili mediante la tecnica BDT applicata all'intero appartamento. Ad ogni modo, una più dettagliata analisi della differenza tra i due metodi necessita un'attenta analisi delle incertezze delle due misure, il che rappresenta un obiettivo futuro dello studio.

**Tabella 10** – Valori misurati di n<sub>50</sub> mediante Blower Door Test sui singoli locali e sull'intero edificio, stima del ricambio d'aria (n) a partire dai dati di n<sub>50</sub> e valori misurati di ricambio d'aria secondo la tecnica del decadimento del gas tracciante (nyousco)

		$n = n_{50}/N \text{ (h}^{-1})$	n <sub>ISO12569</sub> (	(h-1)	N stimato
Zona	<i>n</i> <sub>50</sub> (11 )	$n = n_{50/1} (n)$	mediana	intervallo	mediana
1) Ingresso-Studio	13.8	0.69	0.34	0.14-0.70	40.6
2) Cucina-Soggiorno	15.9	0.79	0.52	0.22-0.90	30.5
3) Bagni	14.7	0.74	-	-	-
4) Camera letto singola	13.6	0.68	-	-	-
5) Camera da letto matrimoniale	15.4	0.77	0.30	0.16-0.96	51.2
Appartamento					
Media stimata delle singole zone	14.9	0.75	-	-	-
Misura sull'intero appartamento	12.2	0.61	0.16	0.14-0.33	76.1

In Tabella 10 sono anche riportati i valori dei ricambi d'aria in condizioni naturali misurati secondo la ISO 12569 (n<sub>ISO12569</sub>) per i singoli locali e per l'intero appartamento. I dati sono espressi in termini di mediana delle diverse misure e intervallo minimo-massimo dei dati misurati. Dai risultati sperimentali si rileva un'elevata variabilità del ricambio d'aria naturale misurato, attribuibile, in buona parte, alle diverse condizioni climatiche esterne. Inoltre, il rapporto tra i valori  $n_{50}$  ed i valori mediani di  $n_{\rm ISO12569}$  per i singoli locali investigati risulta pari a circa 41 per la zona 1 (Ingresso-Studio), circa 31 per la zona 2 (Cucina-Soggiorno), circa 51 per la zona 5 (camera da letto matrimoniale) e circa 76 per l'intero appartamento. È opportuno sottolineare che tali rapporti sono molto maggiori del parametro N "convenzionale" pari a 20 riportato in letteratura. Inoltre, se si considerano i valori minimi e massimi di  $n_{\rm ISO12569}$  di Tabella 10, il rapporto  $n_{\rm 50}/n_{\rm ISO12569}$ varia tra 16 e 100, il che è, anche in questo caso, ben al di sopra dell'intervallo 10-30 indicato dalla letteratura. La variabilità del rapporto  $n_{50}/n_{\rm ISO12569}$  è messa in luce in Figura 23 dove sono riportati i rapporti ottenuti su tutte le misure condotte nei locali dell'appartamento in ragione della componente normale della velocità del vento (u) misurata dalla centralina ARPA rappresentativa della zona. La Figura 23 mostra una forte dipendenza dalla forzante esterna, infatti, all'aumentare della componente u della velocità incidente sulle finestre dell'appartamento si nota una sensibile riduzione del rapporto  $n_{50}/n_{\rm ISO12569}$  e della dispersione dei dati misurati. Dal punto di vista fisico questo fenomeno è attribuibile alla circostanza che una minore forzante esterna (i.e. ridotta velocità del vento) comporta un minore  $\Delta p$  e, quindi, un minore ricambio d'aria. L'elevata dipendenza del rapporto  $n_{50}/n_{\rm ISO12569}$  dalla velocità del vento determina l'impossibilità di definire un unico parametro N convenzionale valido indipendentemente dalle condizioni climatiche esterne. Va inoltre osservato, come già evidenziato in precedenza, che anche in presenza di elevate velocità del vento il rapporto N resta mediamente maggiore di 20. È opportuno puntualizzare che il rapporto  $n_{50}/n_{\rm ISO12569}$  è fortemente influenzato dalla misura di intensità e direzione del vento locali (ovvero nell'immediata prossimità dell'edificio) che possono variare in funzione dell'orientamento stesso dell'edificio, ma anche di ostacoli (e.g. altri edifici ed alberi), street canyon (e.g. strade e canaloni) e dell'orografia locale (e.g. colline e zone pianeggianti) e, quindi, difficilmente identificabili mediante la centralina meteo "di zona". Tali fenomeni locali potrebbero spiegare, in parte, l'elevata dispersione dei risultati ottenuti.



**Figura 23** – Rapporto n<sub>50</sub>/n<sub>ISO12569</sub> misurato nei diversi locali dell'appartamento in esame in funzione della componente normale della velocità del vento (u). In rosso è riportato il parametro N=20 suggerito dalla letteratura scientifica del settore

Le misure di permeabilità all'aria mediante BDT ( $n_{50}$ ) e di ricambio d'aria (n) mediante decadimento della CO<sub>2</sub> sulle singole stanze hanno messo in luce un rapporto N ( $n_{50}/n$ ) molto variabile e spesso molto più alto del tipico valore N=20 suggerito dalla letteratura scientifica del settore. Tale variabilità è legata, come atteso, alle condizioni meteoclimatiche del sito ed, in particolare, alla direzione e velocità del vento.

I valori di  $n_{50}$  (da BDT) di n (da gas tracciante) delle singole stanze sono e risultati significativamente differenti tra i diversi locali, mettendo, quindi, in risalto una disuniformità non facilmente evidenziabile con prove di BDT e gas tracciante condotte sull'intero volume.

Concludendo, la tecnica del BDT sull'intero appartamento, condotta come da normativa, non evidenzia il gradiente di permeabilità dell'appartamento, mentre, la misura mediante tecnica BDT sulle singole zone rischia di sovrastimare la permeabilità a causa della permeabilità interna tra le diverse zone interne. Inoltre, la stima del ricambio d'aria a partire dal dato di  $n_{50}$  fornito dal BDT (pratica utilizzata nella letteratura) può condurre ad importanti sovrastime dell'effettivo ricambio d'aria naturale; ciò è sicuramente anche legato al fatto che i valori convenzionali di N disponibili in letteratura sono per lo più riferiti a condizioni climatiche e soluzioni costruttive del Nord America. Infine, la misura di tasso di ricambio d'aria dell'edificio è fortemente influenzata dalle condizioni climatiche esterne; in tal senso è fondamentale misurare contestualmente alle prove la velocità e direzione del vento "locale". Gli autori sottolineano che sviluppi futuri dello studio dovranno contemplare (i) un'accurata stima dell'incertezza delle due tecniche di misura (BDT e gas traccianti) ed (ii) un'analisi delle possibili disuniformità spaziali durante la misura del reale ricambio naturale in grandi locali (es. intero appartamento) mediante decadimento del gas tracciante; tale aspetto potrebbe, infatti, influenzare la scelta del punto di posizionamento della sonda in tali locali quando investigati con il metodo "single zone".

### OR 3. Il monitoraggio e la contabilizzazione del calore nel retrofit degli edifici in ottica NZEB

**OR 3.1.** Dal confronto sperimentale delle tecniche di contabilizzazione diretta ed indiretta in campo emerge che la tecnica indiretta può essere affetta da significativi errori di misura se non si tengono in debito conto alcuni aspetti metrologici quali ad esempio la potenza termica nominale ed effettiva dei corpi scaldanti, le problematiche di installazione e, infine, gli effetti di correlazione tra i diversi dispositivi installati. Al fine di migliorare l'accuratezza della ripartizione sono stati proposti alcuni metodi migliorativi (e.g. il metodo ibrido).

Dai risultati sperimentali ottenuti nel case study si può rilevare che: i) gli HM diretti presentano errori inferiori a quelli corrispondenti della direttiva MID, sia su base stagionale che semestrale; ii) gli HCA indiretti presentano errori non trascurabili anche se le loro misurazioni sono ancora compatibili con gli HM diretti; iii) gli ITC presentano errori molto più alti degli HM diretti e in alcune situazioni critiche (ad es. bassi consumi) inaccettabili; iv) la correzione dei dati dei sistemi indiretti mediante la potenza termica effettiva degli elementi riscaldanti e la caduta di temperatura lungo l'impianto di riscaldamento (per ITC) migliorano l'accuratezza della contabilizzazione; v) la correlazione tra le incertezze dei singoli dispositivi deve essere adeguatamente considerata al fine di stimare con precisione l'incertezza di contabilizzazione e migliorare la compatibilità delle misure tra i diversi dispositivi. Inoltre, un'installazione efficace che tenga conto dell'accurata stima della potenza termica dei singoli elementi riscaldanti e della caduta di temperatura lungo l'impianto, dovrebbe migliorare notevolmente l'accuratezza di tali sistemi, attraverso l'uso di appropriati fattori correttivi. I risultati dei test mostrano chiaramente che i diversi metodi di contabilizzazione non sono sempre completamente compatibili tra loro. Inoltre, la mancanza di standard specifici per l'installazione porta le prestazioni metrologiche della misurazione del calore e del sub-metering a dipendere in larga misura dalla capacità e dalla competenza dell'installatore. L'analisi sperimentale effettuata presso il laboratorio INRIM dimostra che il metodo ibrido funziona sempre meglio di quello indiretto. Il vantaggio può essere particolarmente rilevante per gli edifici che presentano configurazioni standard di appartamenti e per gli edifici occupati occasionalmente. In particolare, i risultati sperimentali hanno dimostrato che:

- nell'intero periodo esaminato e per entrambe le condizioni di occupazione piena e occasionale la deviazione standard degli errori contabili è pari rispettivamente allo 0,82% e allo 0,71% per il metodo indiretto e ibrido;
- quando si verificano condizioni di occupazione occasionale, è stato riscontrato l'abbassamento sia dell'errore massimo (riduzione di circa il 44,4%) sia della deviazione standard (riduzione di circa il 39%) per il metodo ibrido rispetto a quello indiretto;
- il metodo ibrido non è influenzato in alcun modo dall'errore nella valutazione del coefficiente K per i radiatori installati sulla stessa linea di sollevamento verticale (ad es. Errore nella valutazione della potenza termica nominale dei radiatori dello stesso tipo), mentre il il metodo indiretto mostra una tendenza lineare;
- il metodo ibrido tende a essere meno influenzato dall'errore sistematico sul coefficiente K per i radiatori installati nello stesso appartamento (ad es. Caso di ristrutturazione dell'impianto di riscaldamento) rispetto a quello indiretto.

Il metodo ibrido, pertanto, nonostante i costi più elevati dovuti all'installazione di contatori di energia termica diretta su ogni colonna verticale, potrebbe essere particolarmente efficace nei vecchi edifici a torre in cui la stima accurata dei coefficienti K dei radiatori installati è particolarmente difficile.

OR 3.2. L'analisi dei dati sperimentali relativi dei consumi energetici per riscaldamento di 3047 appartamenti in 50 edifici mostra un beneficio medio a livello nazionale conseguente all'installazione di sistemi di contabilizzazione individuale del calore e di termoregolazione pari a circa 11%, come somma di un beneficio nel primo anno dopo l'installazione pari a 8.7% e nel secondo anno di 2.3%, dimostrando che l'efficacia di tale azione aumenta con il coinvolgimento e la consapevolezza degli utenti. L'applicazione del modello sviluppato ha consentito di stimare un potenziale risparmio energetico connesso all'installazione dei sistemi di contabilizzazione e termoregolazione negli edifici residenziali in Italia compreso tra 0,072 e 0,410 Mtep/anno (i.e. tra 0,3 e 1,9% dei consumi per riscaldamento), a seconda dell'efficacia degli incentivi economici applicabili e dei vincoli normativi applicabili. La variabilità del beneficio ottenibile è connessa anche ai seguenti fattori: i) tipo di utente (e.g. reddito e titolo abitativo), ii) modalità di conduzione dell'impianto (occupazione saltuaria/continuativa etc.), iii) tipologia di feedback e livello di informazione dell'utente, iv) tempo intercorso dall'installazione, v) criterio adottato per la ripartizione delle spese in contesti con più unità immobiliari, vi) condizioni climatiche. Sebbene il beneficio stimato negli edifici in regioni aventi clima mediterraneo sia assolutamente inferiore rispetto a quelli con clima continentale, il beneficio percentuale risulta più elevato grazie al contributo rilevante degli apporti solari ed alla conseguente maggiore efficacia dei sistemi di termoregolazione. L'analisi dei consumi nei 13 edifici (tutti nella regione Piemonte) in cui i sistemi di contabilizzazione e di termoregolazione sono stati installati contemporaneamente alla sostituzione della vecchia caldaia con una ad alta efficienza ha mostrato invece un beneficio più significativo, variabile tra 15% e 35%. Nessuno di questi edifici, inoltre, ha registrato un aumento dei consumi energetici.

OR 3.3. Relativamente alla profilazione dei consumi, i due casi di studio analizzati (i.e. riscaldamento e consumo di energia elettrica) dimostrano che: i) sebbene esistano numerosi limiti di interfacciabilità e interoperabilità dei dispositivi e dei sistemi di monitoraggio, questi possono essere superati mediante l'uso di piattaforme ICT; ii) l'enorme numero di dati misurati e la complessità dei sistemi monitorati rendono l'analisi e il feedback particolarmente complessi per gli utenti non specializzati; iii) il feedback agli utenti dovrebbe essere scelto tenendo conto di alcuni importanti parametri (frequenza, contenuto, aggregazione, presentazione, benchmark e informazioni aggiuntive); iv) il feedback diretto dovrebbe privilegiare semplicità e immediatezza delle informazioni; v) il feedback indiretto dovrebbe presentare un confronto basato su indici di prestazione e suggerimenti personalizzati sul comportamento degli utenti. L'analisi dei dati ha infine mostrato alcuni comportamenti scorretti di cui gli utenti non erano a conoscenza, come un'eccessiva ventilazione di alcuni ambienti (ad es. ingresso, bagni e cucine), gestione errata delle valvole termostatiche, gestione errata di alcuni elettrodomestici.

Attraverso la somministrazione di questionari specificatamente progettati per gli edifici ATER, è stato analizzato l'atteggiamento dell'utente ad adottare strategie di risparmio energetico e ad interagire con i sistemi di monitoraggio e controllo. Il tasso di risposta ai questionari forniti è stato del 100%. La Figura 24 mostra i risultati dell'analisi complessiva delle risposte ottenute. Per quanto riguarda l'installazione di sistemi di monitoraggio e controllo, gli utenti, pur dichiarandosi soddisfatti (100%) e abbastanza familiari con tali sistemi (64%), diffidavano della potenziale efficacia in termini di risparmio (71%). Per quanto riguarda la percezione della temperatura interna, la maggior parte degli utenti ritiene di non percepire temperature interne troppo alte (71%) o troppo basse (78%). Le domande poste alle famiglie sono elencate di seguito:

- A. Nel complesso, mi sento soddisfatto dell'installazione di valvole termostatiche e dispositivi di contabilizzazione individuale nel mio appartamento;
- B. Regolo spesso la temperatura usando il cronotermostato;
- C. Durante i periodi di assenza dall'appartamento, ho impostato la temperatura del termostato al minimo per risparmiare energia;
- D. Penso che l'installazione di valvole termostatiche e dispositivi di contabilizzazione individuale nel mio appartamento mi stia aiutando a risparmiare sulla mia bolletta del gas;
- E. La temperatura nel mio appartamento è spesso troppo alta e sono costretto ad aprire le finestre;
- F. La temperatura nel mio appartamento è spesso troppo bassa;
- G. Uso sistemi alternativi per riscaldare il mio appartamento (ad esempio stufe elettriche, stufe a gas ecc.).

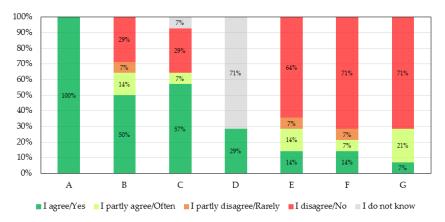


Figura 24 – Analisi dei questionari.

Basandosi sui risultati dell'indagine, sono state quindi progettate due nuove strategie di feedback diretto e indiretto. In Figura 25 è riportato il cruscotto energetico progettato per la presentazione del feedback diretto all'utente, mentre in è Figura 26 riportato il prospetto informativo periodico progettato per la presentazione del feedback indiretto all'utente.

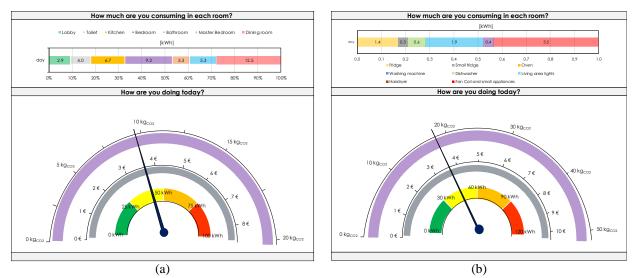
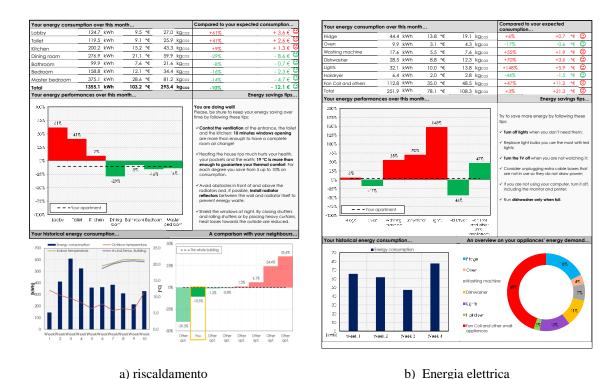


Figura 25 – Cruscotto progettato per il Feedback diretto: (a) riscaldamento, (b) energia elettrica.



**Figura 26** – Prospetto informativo periodico progettato per il Feedback indiretto: (a) riscaldamento, (b) energia elettrica.

Per quanto concerne l'analisi dei modelli di previsione dei consumi di gas naturale su scala urbana, essa fornisce risultati mediamente affidabili; infatti, nel caso di una sola lettura annua, gli errori mensili stimati sono risultati compresi nell'intervallo tra -8% e -27% (rispettivamente durante la stagione invernale e quella estiva), mentre su base annua l'errore è pari a -11%. Nell'ipotesi di un aumento del numero di letture annue dei contatori, l'errore diventerebbe inferiore a 2%. I risultati sono mostrati in Figura 27 su base mensile

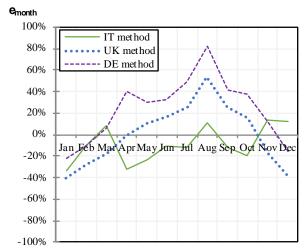


Figura 27 – Errore relativo mensile dei modelli di previsione investigati su scala urbana.

Come evidenziato nella Figura 27, i metodi investigati presentano errori elevati, che tuttavia risultano livellati su base annuale con conseguenti valori molto più contenuti. Come prevedibile, il metodo italiano ha prestazioni migliori rispetto agli altri, grazie al fatto che i metodi sono applicati a una rete energetica urbana italiana. Infatti, l'utilizzo di SLP stimati per stock di edifici situati in zona climatica continentale (come quello tedesco) in località mediterranee con clima più moderato, si traduce in una minore accuratezza. Ciò dovrebbe anche spiegare perché sia il metodo tedesco che quello inglese sovrastimano notevolmente il consumo energetico durante i mesi estivi (da giugno a settembre), dove anche il progressivo svuotamento delle città nei mesi di luglio e agosto rappresenta uno dei principali contributi all'incertezza. Tuttavia, va sottolineato che, considerando solo la stagione di riscaldamento, il metodo tedesco presenta prestazioni paragonabili a quelle del metodo italiano, a volte addirittura con risultati migliori. Questo può dipendere strettamente dal fatto che gli SLP tedeschi sono curve dipendenti dalla temperatura, mentre per i corrispondenti SLP italiani la dipendenza climatica si basa solo sulla zona geografica e non su dati di temperatura puntuali.

D'altra parte, il metodo inglese: i) sottostima sempre il consumo di energia della rete urbana durante i mesi di riscaldamento (da gennaio a marzo, novembre, dicembre), ii) sovrastima sempre il consumo di energia della rete urbana durante il periodo di riscaldamento. Le basse prestazioni del metodo inglese sono probabilmente dovute alla variabile meteorologica che è costruita sul clima continentale specifico (i.e. vento e temperatura) e non su quello mediterraneo (i.e. temperatura e radiazione solare). In Figura 28 sono mostrati i risultati della simulazione energetica eseguita con i metodi descritti, evidenziando l'errore rispetto al consumo di energia residenziale misurato.

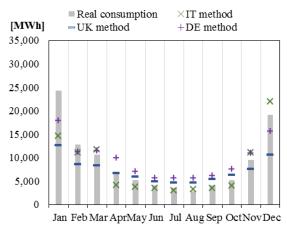


Figura 28 – Consumi mensili ed errore relative stimato per i modelli investigate.