

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DELLA TUSCIA

Dipartimento di Economia, Ingegneria, Società e
Impresa

Dottorato di ricerca in:

Engineering for Energy and Environment - XXXVI CICLO

Tesi di Dottorato

**Efficienza energetica e comfort abitativo:
sviluppo e applicazione di un indicatore di
benessere indoor**

IIND-07/A

Dottoranda

Dott.ssa Giulia Parlani

Tutor Universitario

Dott. Mauro Scungio

.....

Coordinatore

Prof. Andrea Luigi Facci

.....

Anno Accademico 2023-2024

Indice

Abstract	1
Introduzione	1
1 IEQ: Indoor Environmental Quality	7
1.1 Comfort Termoigrometrico	9
1.1.1 Strumenti di misurazione - Parametri termoigrometrici	18
1.2 Qualità dell'aria indoor	24
1.2.1 Principali fonti d'inquinamento dell'aria indoor . . .	26
1.2.2 Strumenti di misurazione - Qualità dell'aria	31
1.3 Comfort Visivo	35
1.3.1 Strumenti di misurazione - Parametri illuminotecnici	39
1.4 Comfort acustico	40
1.4.1 Strumenti di misurazione - Parametri acustici	43
2 Certificazione di qualità in edilizia	45
2.1 Protocolli di certificazione della sostenibilità degli edifici . .	45
2.2 Certificazione <i>CasaClima</i>	47
2.2.1 Blower-Door-Test	55
3 Indice Comfort Abitativo	59
3.1 Acquisizione indicatori ambientali	63
3.2 Acquisizione indicatori soggettivi	65
3.2.1 Questionario d'indagine	67
3.3 Applicativo <i>Indice Comfort Abitativo</i>	81
3.3.1 Formulazione <i>Indice Comfort Abitativo</i>	83
4 Analisi edifici residenziali	87
4.1 Unità abitativa " <i>CasaClima</i> "	88

4.2	Unità abitativa "Classe Energetica D"	100
4.3	Unità abitativa "Classe Energetica G"	106
4.4	Considerazioni finali - Analisi edifici	112
Conclusioni		114
5	Conclusioni	115
Lista delle Figure		118
Lista delle Tabelle		122
Bibliografia		124

Abstract

This work aims to investigate and assess the overall indoor environmental quality (IEQ) of residential buildings, presenting a methodology for evaluating well-being in living spaces.

The goals include examining critical environmental factors affecting indoor environmental quality (IEQ), establishing sampling methodologies, and evaluating their impact on occupant well-being.

The first section of the study examines essential parameters defining indoor environments, including thermal comfort, air quality, lighting, and acoustics, providing a detailed description of the specific instruments used to measure these environmental parameters, along with a thorough analysis of relevant regulations and guidelines.

The second chapter delves into quality certifications in the building sector, focusing on CasaClima certification and its application within the project context.

The third section of the study explores monitoring practices and subjective surveys conducted through questionnaires, followed by the introduction of a software that fully integrates all the collected information.

For assessing residential well-being, three buildings located in the province of Viterbo were selected: a CasaClima-certified apartment, another undergoing energy upgrading (Energy Class D), and a third with significant energy deficiencies (Energy Class G).

The concluding section of the study summarizes the key findings from the analysis of the three case studies. It examines the collected data and results of the residential comfort index, taking into account energy efficiency and building systems. This provides a solid foundation for developing design strategies aimed at optimizing the balance between energy efficiency, costs, and residential well-being.

Introduzione

Le nuove tendenze costruttive sono ormai concordemente protese verso l'integrazione dell'edificio con l'uomo, l'ambiente circostante e il contesto energetico [1, 2]. Le scelte progettuali contemporanee si fondano su due pilastri fondamentali: rendere il contesto abitativo adatto per l'uomo e rispettoso dell'ambiente circostante.

Nel contesto globale attuale, contraddistinto dall'urgenza di affrontare il cambiamento climatico, l'edilizia sostenibile assume un ruolo cruciale nella mitigazione degli impatti ambientali e nel miglioramento della qualità della vita, con benefici economici e sociali per le comunità.

Le principali soluzioni per l'edilizia sono un connubio di nuove proposte, derivanti sia della continua evoluzione tecnica e tecnologica che dalla valorizzazione di pratiche consolidate negli anni. In tale contesto, l'integrazione di tecnologie passive e attive definisce l'essenza stessa dell'*edilizia sostenibile* [3, 4]. In questo contesto, si assiste a un recupero dei materiali del passato, come i mattoni d'argilla e altri materiali naturali, che offrono migliori capacità di isolamento, traspirazione e regolazione dell'umidità, per la creazione di un ambiente energeticamente efficiente e caratterizzato da un microclima confortevole [5].

Nel corso della storia, le tecnologie costruttive hanno subito una costante evoluzione, adattandosi alle esigenze e ai contesti geografici di diverse epoche. Ad oggi, la progettazione edilizia è sempre più influenzata da considerazioni ambientali e di risparmio energetico. La direttiva EPBD dell'Unione Europea, introdotta nel 2002 e successivamente rivista nel 2010, 2018 e infine nel maggio 2024 con il nome di "Direttiva Case Green" [6], mira a migliorare l'efficienza energetica degli edifici e ridurre le emissioni di gas serra; promuove edifici a energia quasi zero (NZEB), attraverso requisiti minimi di prestazione energetica, certificazioni e uso di energie rinnovabili. Gli Stati membri devono implementare queste misure nei loro *Piani Nazionali per l'Energia e il Clima*, con l'obiettivo di eliminare i

combustibili fossili entro il 2040 e trasformare il patrimonio edilizio entro il 2050. [7, 8, 9, 10, 5].

I consumi energetici per riscaldamento, ventilazione, climatizzazione e illuminazione di un edificio sono influenzati direttamente dal comfort ambientale; di solito, un aumento del comfort comporta consumi energetici superiori, considerando le stesse caratteristiche costruttive dell'edificio e le condizioni climatiche esterne.

Pertanto, ottimizzare la forma e l'orientamento degli edifici, insieme alla massimizzazione dell'isolamento termico e acustico e all'impiego di serramenti ad alte prestazioni, costituisce l'obiettivo primario della progettazione edile contemporanea. L'ottimizzazione del comfort abitativo va oltre la mera progettazione fisica degli edifici; risulta essenziale valutare e gestire accuratamente le condizioni ambientali in tutti gli spazi abitativi, al fine di assicurare un ambiente salubre e confortevole per chi vi risiede [11, 12].

Tutto ciò necessita di un approccio integrato che consideri tutte le variabili ambientali tangibili, come quelle termiche, visive, acustiche e relative alla qualità dell'aria, comprendendo quali di queste siano prioritarie, secondo gli occupanti, e quali possano avere un'influenza meno rilevante. Un approccio interdisciplinare è essenziale per affrontare le sfide dell'edilizia sostenibile, migliorando la comprensione del comfort abitativo e identificando criticamente punti deboli e forti delle pratiche attuali.

Un ambiente confortevole non solo migliora il benessere fisico degli occupanti, ma influisce positivamente sul loro benessere mentale ed emotivo, migliorando l'umore, la produttività e persino la salute generale.

In sintesi, nel contesto di una transizione ecologica che impone crescenti requisiti di sostenibilità energetica e ambientale, il presente studio intende apportare un contributo significativo alla letteratura.

Questo lavoro indaga la qualità complessiva dell'ambiente interno (IEQ) negli edifici residenziali, proponendo una metodologia per valutare il benessere negli spazi abitativi. Gli obiettivi principali riguardano l'analisi dei fattori ambientali critici che influenzano l'IEQ, la definizione delle metodologie di campionamento e la valutazione del loro impatto sul benessere degli occupanti.

Inizialmente il lavoro di ricerca esamina parametri chiave come comfort termico, qualità dell'aria, illuminazione e acustica, definendo normative di riferimento e descrivendo la strumentazione per il campionamento. Successivamente il lavoro analizza le certificazioni di qualità edilizia, con

particolare attenzione alla certificazione *CasaClima*. Nella parte centrale sono definite le pratiche di monitoraggio e il questionario d'indagine, utilizzato per la definizione di un indice di comfort abitativo, con l'obiettivo di quantificare il comfort residenziale attraverso l'integrazione di fattori oggettivi e soggettivi.

Tre edifici nella provincia di Viterbo sono stati selezionati per il seguente studio: un appartamento certificato CasaClima, uno recentemente sottoposto a riqualificazione energetica (Classe D) e uno con gravi carenze energetiche (Classe G).

Tale attività di ricerca ha l'obiettivo di offrire le basi, attraverso strumenti e metodologie, per quantificare il benessere abitativo, focalizzandosi sui parametri ambientali più influenti nel settore residenziale e integrando un'analisi soggettiva basata su un campione di indagine.

I risultati di questa ricerca sono inoltre in grado di offrire una base di partenza per lo sviluppo di strategie di progettazione e riqualificazione degli edifici residenziali, mirate a ottimizzare il comfort abitativo. È fondamentale, per future indagini, considerare le esigenze sensoriali degli utenti al fine di indirizzare interventi migliorativi mirati.

Tali strategie dovrebbero cercare di bilanciare efficienza energetica, costi e benessere abitativo, incoraggiando l'adozione di soluzioni sostenibili e innovative. È auspicabile che studi futuri prevedano una raccolta di dati più ampia e continua, includendo misurazioni oggettive dei parametri ambientali contemporaneamente a valutazioni soggettive, consentendo di delineare un quadro completo e garantito del comfort abitativo.

Capitolo 1

IEQ: Indoor Environmental Quality

La qualità di vita negli ambienti interni è un concetto multidimensionale che include vari elementi, in grado di influenzare il benessere e la soddisfazione degli occupanti, comprendendo sia aspetti fisici che psicologici e sociali.

La gestione della qualità degli ambienti interni, *Indoor Environmental Quality* - *IEQ*, richiede dunque una strategia integrata di verifica, monitoraggio e ottimizzazione delle diverse componenti ambientali, dalla fase preliminare del progetto, alla realizzazione e all'utilizzo e manutenzione dell'edificio [13, 14].

Il comfort indoor rappresenta la condizione di benessere determinata dalle percezioni sensoriali di un individuo inserito in un ambiente. Il comfort indoor è influenzato da fattori ambientali esterni, dati oggettivamente misurabili, e dalla risposta soggettiva di ciascun individuo.

Per valutare e quantificare tale condizione di comfort, è fondamentale comprendere l'interazione tra l'ambiente fisico e il benessere psicofisico degli individui che lo abitano. I parametri fisici quali temperatura, umidità, qualità dell'aria, illuminazione e livelli di rumore hanno un impatto significativo sul comfort e sulla salute degli occupanti.

In particolare, temperatura, velocità e umidità relativa dell'aria hanno un ruolo diretto sul comfort termoigrometrico [15, 16]. Ambienti troppo caldi o freddi possono causare disagio e compromettere il benessere psicofisico. Allo stesso modo, un'elevata umidità può favorire la crescita di muffe e batteri, deteriorando la qualità dell'aria e influenzando negativamente la

salute respiratoria degli individui.

La qualità dell'aria interna rappresenta un aspetto di rilevanza fondamentale nel contesto del *benessere indoor*. Sostanze quali *polveri sottili*, *anidride carbonica* (CO_2) e *composti organici volatili* (VOC) possono recare danni alla salute e al benessere degli occupanti non solo in presenza di concentrazioni elevate, ma anche quando esposti a quantità ridotte per periodi prolungati. Di conseguenza, è imprescindibile assicurare un'adeguata ventilazione e l'utilizzo di sistemi di filtraggio dell'aria efficaci al fine di mantenere un ambiente interno salubre e confortevole.

Anche la gestione ottimale dell'illuminazione interna svolge un ruolo cruciale nel contesto del comfort negli ambienti interni. Un'illuminazione adeguata, che sia naturale o artificiale, è essenziale per creare un ambiente ergonomico e psicologicamente confortevole [17]. Durante le ore diurne, la luce solare non solo favorisce il benessere fisico delle persone, ma regola anche il loro ritmo circadiano, che è fondamentale per la salute e il benessere mentale. Inoltre, una progettazione accurata e un posizionamento strategico dell'illuminazione artificiale sono cruciali per garantire una visibilità e una percezione dello spazio ottimizzata, assicurando così un ambiente sicuro e accogliente per gli occupanti, specialmente nelle ore serali e notturne.

Il controllo del rumore interno è cruciale per assicurare un comfort acustico ottimale negli ambienti interni. L'esposizione a livelli elevati di rumore può avere effetti negativi sulla salute e sul benessere degli occupanti, influenzando la concentrazione, il riposo e la qualità della vita complessiva [18]. Pertanto, è essenziale che la progettazione degli ambienti interni consideri tutte le fonti di rumore e implementi misure per ridurne l'impatto. L'adozione di soluzioni architettoniche e tecniche di isolamento acustico può risultare particolarmente efficace in questo senso.

Il monitoraggio dei parametri ambientali permette di quantificare tali variabili e individuare eventuali criticità, consentendo di pianificare interventi mirati per ottimizzare e migliorare il comfort negli ambienti abitativi. È fondamentale integrare queste informazioni oggettive con le percezioni sensoriali degli occupanti. Comprendere quali fattori sono percepiti maggiormente come fonte di disagio e l'influenza che questi hanno sul loro benessere permette di quantificare il peso relativo di ciascun parametro sul comfort indoor. Per una quantificazione accurata del comfort indoor, è necessario adottare un sistema che consideri sia i dati oggettivi sia le esigenze e le percezioni degli utenti, al fine di creare ambienti abitativi che

soddisfino appieno le preferenze e le necessità delle persone che li abitano.

Alcune delle normative vigenti, *UNI EN 16798-1*, *UNI EN 16798-2* e *ISO 17772-1* [19, 20, 21], affrontano l'*Indoor Environmental Quality (IEQ)* mediante un approccio olistico, che considera l'interazione tra molteplici fattori determinanti per il benessere degli occupanti. In particolare, le norme *UNI EN 16798-1* e *UNI EN 16798-2* stabiliscono una serie di criteri per fissare valori ottimali dei parametri ambientali, come temperatura, umidità, illuminazione e qualità dell'aria interna, essenziali per garantire un adeguato livello di comfort. Questi valori variano in base alla categoria dell'ambiente, che include spazi residenziali, uffici, scuole, strutture sanitarie e spazi commerciali, ognuno con requisiti specifici. La *UNI EN 16798-1* sottolinea l'importanza di un'analisi integrata del comfort termico, acustico e visivo, evidenziando come la valutazione congiunta di questi aspetti sia fondamentale per ottenere condizioni ambientali ottimali. D'altro canto, la *UNI EN 16798-2* si concentra sulla ventilazione, fornendo linee guida rigorose per garantire che la qualità dell'aria soddisfi i requisiti di salute, evidenziando come una ventilazione adeguata migliori non solo la qualità dell'aria, ma anche il comfort complessivo. Infine, la norma *ISO 17772-1* propone un quadro metodologico per la valutazione del comfort ambientale, considerando le relazioni tra temperatura, umidità, velocità dell'aria e illuminazione.

L'adozione di questo approccio integrato è cruciale per la progettazione di ambienti interni sostenibili e salutarì, rispondendo alle sfide contemporanee della progettazione architettonica e ingegneristica, e garantendo che ogni categoria di ambiente sia ottimizzata per le esigenze specifiche degli occupanti.

1.1 Comfort Termoigrometrico

Il comfort termoigrometrico, o benessere termoigrometrico, si riferisce alla *condizione mentale che esprime la soddisfazione soggettiva nei confronti dell'ambiente termico* [22, 23]. La ricerca su questo tema si concentra sulla comprensione dei meccanismi fisiologici e psicologici che influenzano la percezione del comfort termico.

I fattori microclimatici chiave includono la temperatura dell'aria e la temperatura media radiante, l'umidità relativa e la velocità dell'aria ambiente, a cui si aggiungono i due parametri ambientali personali: isolamento termico dell'abbigliamento e metabolismo energetico [24]. La tempera-

tura determina direttamente la sensazione di caldo o freddo percepita da un individuo, mentre l'umidità relativa dell'aria e la presenza di correnti influiscono sulla capacità del corpo umano di dissipare il calore.

Gli ambienti confinati sono definiti come spazi chiusi o parzialmente chiusi non progettati per una presenza umana continua. Essi possono essere suddivisi in due categorie principali: ambienti termicamente moderati, come residenze e uffici, dove il comfort degli occupanti è prioritario, e ambienti con condizioni termiche severe, come quelli industriali, dove è essenziale proteggere gli operatori dallo stress termico [25].

Il corpo umano può essere considerato come un sistema termodinamico rispetto al quale è possibile attuare un bilancio di energia [26]. Con il termine *metabolismo energetico* (M) [W] si indica la produzione di calore del corpo umano. Il rispetto dell'equilibrio tra gli scambi di potenza del corpo con l'ambiente e la sua potenza metabolica, favorisce il mantenimento di una temperatura corporea costante nel tempo.

L'equazione di bilancio dell'energia per il corpo umano si può scrivere, in condizioni di regime non stazionario, come segue:

$$M \cdot A_b = \dot{Q} + \dot{L} + S \quad (1.1)$$

in cui:

- M è il metabolismo energetico sopra definito, espresso in W/m^2 o in *met*;
- A_b è l'area della superficie corporea di un uomo medio nudo, circa pari ad $1,8 \text{ m}^2$;
- $\dot{Q}$ è la potenza termica ceduta dal corpo umano all'ambiente, W ;
- $\dot{L}$ è la potenza meccanica, ovvero l'energia meccanica compiuta dall'uomo sull'ambiente nell'unità di tempo, W ;
- S è la variazione di energia interna del corpo umano nell'unità di tempo, W .

In condizioni di benessere non deve esserci variazione di energia interna, per cui il termine di accumulo S si annulla e la relazione (1.1) diventa (condizioni di regime stazionario):

$$M \cdot A_b = \dot{Q} + \dot{L} \quad (1.2)$$

che esprime la condizione per cui, in condizioni di benessere, l'energia disponibile nell'unità di tempo dal corpo (il metabolismo $M \cdot A_b$) è in parte utilizzata come lavoro esterno nell'unità di tempo $\dot{L}$, in parte è smaltita sotto forma di potenza termica $\dot{Q}$.

Il metabolismo energetico cresce all'aumentare del livello di attività dell'individuo ed è quindi tabellato, in funzione del tipo di attività, e disponibile nella norma *UNI-EN ISO 7730* [27] e negli standard definiti dall'*ASHRAE* (*American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers*).

Riassumendo, il corpo umano generalmente scambia calore sensibile con l'ambiente piuttosto che calore latente, il quale è correlato all'umidità relativa dell'ambiente. In ambienti termicamente moderati, gli scambi termici sono prevalentemente per convezione con l'aria circostante e per radiazione infrarossa con le superfici circostanti.

Come precedentemente anticipato altre grandezze capaci di influenzare gli scambi termici soggetto ambiente sono il *metabolismo energetico* e la *resistenza termica dell'abbigliamento*. Il primo è la misura dell'attività metabolica del corpo umano. Indica la quantità di calore prodotta dal corpo umano per unità di superficie corporea. Il parametro specifico del livello di carico metabolico è espresso mediante l'unità di misura *met* ($1 \text{ met} = 58.2 \text{ W/m}^2$), che di norma in un'abitazione è pari a 1.2 met , corrispondente a una attività sedentaria leggera [28]. La *resistenza termica dell'abbigliamento*, espressa mediante l'unità di misura *clo* ($1 \text{ clo} = 0.155 \text{ m}^2\text{K/W}$), invece, indica il livello di isolamento termico degli indumenti. Un valore di 1 clo indica un alto livello di isolamento termico adatto per condizioni invernali, mentre 0.5 clo rappresenta un isolamento più leggero, adatto per condizioni estive [29]. In un ambiente domestico, le persone tendono a svolgere attività leggere o sedentarie e a indossare abbigliamento adatto alla temperatura dell'ambiente. Di conseguenza, il flusso metabolico e la resistenza termica dell'abbigliamento non rappresentano fattori significativi nella determinazione del comfort termoigrometrico residenziale.

Come già menzionato, nell'ambito della definizione del comfort termoigrometrico, i fattori ambientali da considerare per la determinazione dell'indice di comfort abitativo sono: temperatura dell'aria e media radiante, umidità relativa e velocità dell'aria.

Partendo dalla temperatura il parametro maggiormente rappresentativo, in termini di comfort, è la *temperatura operativa* (t_o) che esprime lo scambio termico complessivo di una persona con l'ambiente che la circon-

da [30]. Si ottiene come combinazione della *temperatura media radiante* (t_r), definita come la "*temperatura uniforme di un ambiente fittizio in cui un soggetto scambierebbe per irraggiamento e convezione la stessa energia che scambia nell'ambiente reale (ambiente generalmente non uniforme)*", e della temperatura dell'aria (t_a), pesate dai rispettivi coefficienti di scambio termico. La temperatura media radiante t_r può essere valutata attraverso tre metodi:

- **composizione delle temperature piane radianti:** media ponderata della temperatura superficiale delle superfici circostanti.
- **Fattori di vista:** metodo che tiene conto della visibilità di diverse superfici radianti rispetto alla posizione dell'individuo nell'ambiente. La formula per calcolare la temperatura media radiante utilizzando i fattori di vista può variare a seconda del contesto specifico e delle variabili coinvolte.
- **Globotermometro:** tramite tale strumento si ricava la temperatura di globo nero. Avvalendosi di formulazioni presenti in letteratura (Equazioni 1.3 e 1.4) è possibile ricavare direttamente la temperatura media radiante dell'ambiente.

Nel caso di convezione naturale:

$$t_r = \left[(t_g + 273)^4 + \frac{0.25 \cdot 10^8}{\varepsilon_g} \left(\frac{|t_g - t_a|}{D} \right)^{1/4} \cdot (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273 \quad (1.3)$$

Nel caso di convezione forzata:

$$t_r = \left[(t_g + 273)^4 + \frac{1.1 \cdot 10^8 \cdot v_a^{0.6}}{\varepsilon_g \cdot D^{0.4}} (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273 \quad (1.4)$$

con:

- D = diametro del globotermometro [m];
- ε_g = emissività del globotermometro;
- v_a = velocità dell'aria [m/s].

Parlando di temperatura, l'omogeneità spaziale è un concetto essenziale nella valutazione del comfort ambientale, specialmente negli spazi interni. Essa si riferisce alla distribuzione uniforme della temperatura in

un ambiente, con riferimento alla temperatura misurata in una posizione centrale o strategica.

Secondo quanto espresso nella norma UNI EN ISO 7726 [31], un ambiente puo' essere considerato climaticamente omogeneo se, in ciascun istante, "lo scarto fra il valore locale di ciascuna delle quattro quantità temperatura dell'aria, radiazione, velocità dell'aria e umidità, e il rispettivo valore medio spaziale, non eccede un dato valore massimo ammesso, ottenuto in funzione dell'accuratezza della misura e di un fattore correttivo" specificatamente definito dalla norma.

Un'adeguata omogeneità spaziale contribuisce significativamente al comfort degli occupanti, poiché riduce il rischio di disagio termico. Quando la temperatura è distribuita in modo uniforme, gli individui percepiscono l'ambiente come più accogliente e piacevole. Inoltre, ambienti con alta omogeneità spaziale tendono a essere più efficienti dal punto di vista energetico. Un riscaldamento o un raffreddamento uniforme riduce il consumo energetico, poiché gli impianti non devono lavorare di più per compensare le aree fredde o calde.

Inoltre, fluttuazioni significative nella temperatura possono influenzare negativamente la salute degli occupanti, causando stress termico, affaticamento e, in alcuni casi, problemi respiratori. Pertanto, un ambiente termicamente uniforme è fondamentale per garantire il benessere e la salute degli utenti.

La valutazione dell'omogeneità spaziale può essere effettuata attraverso misurazioni sistematiche della temperatura in diversi punti dell'ambiente. Un'elevata omogeneità indica una buona progettazione e gestione degli impianti di climatizzazione e riscaldamento, contribuendo così a creare spazi interni confortevoli e salutarì.

La verifica strumentale dell'omogeneità su tutti i parametri ambientali può risultare dispendiosa temporalmente (ed economicamente); allo stesso tempo, l'utilizzo di sensori portatili per la valutazione dello stress presentano delle limitazioni nella loro accuratezza per l'analisi delle condizioni di comfort e stress termico [32, 33, 34]. Per tali motivazioni, un approccio di controllo rapido in fase preventiva potrebbe essere quello di effettuare la verifica solo mediante la comparazione della fluttuazione spaziale della temperatura dell'aria e della temperatura operativa, considerando una discrepanza massima del 5%.

L'umidità relativa e la velocità dell'aria, come la temperatura, contribuiscono a definire la condizione di comfort termoigrometrico.

L'umidità relativa dell'aria indica la "percentuale di vapor d'acqua presente nell'aria in rapporto alla massima quantità che l'aria può contenere a una specifica temperatura". Livelli ridotti di umidità relativa possono provocare secchezza nelle vie respiratorie e sulla pelle, mentre livelli elevati possono generare una sensazione di pesantezza e oppressione [35, 36, 37]. Di conseguenza, mantenere un equilibrio appropriato dell'umidità relativa è fondamentale per garantire condizioni di comfort ottimali.

La velocità dell'aria è un altro fattore cruciale che influisce sulla percezione di benessere termico e, di conseguenza, sul comfort termoigrometrico. Anche in assenza di variazioni nella temperatura dell'aria, il movimento dell'aria può avere effetti termici significativi. La velocità dell'aria può influenzare la capacità del corpo umano di dissipare il calore, alterando così la sensazione di calore o freddo. È quindi essenziale regolare la circolazione dell'aria per garantirne un'adeguata qualità e prevenire sensazioni di disagio termico.

Linee guida nazionali e internazionali offrono raccomandazioni mirate a garantire condizioni di comfort termico all'interno degli ambienti. Queste direttive includono indicazioni sulla progettazione ottimale degli edifici, sull'installazione dei sistemi di riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria (HVAC), e sulla gestione operativa degli spazi interni. Organizzazioni come: *ASHRAE*, *ISO*, *CEN* e *OMS* sono tra le entità che partecipano attivamente alla formulazione di tali linee guida. L'*ASHRAE* - *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* emette direttive e normative riguardanti il comfort termico e la qualità dell'aria all'interno degli edifici. Queste linee guida includono limiti di accettabilità per la temperatura interna, stabilendo criteri che favoriscono il benessere degli occupanti. Inoltre, definisce i requisiti per la ventilazione degli ambienti interni e la riduzione delle concentrazioni di inquinanti nell'aria.

L'**Organizzazione Internazionale per Standardizzazione (ISO)**, con la norma *ISO 7730*, fornisce direttive volte a stabilire linee guida per la valutazione del comfort termico in ambienti residenziali e commerciali, considerando parametri come la temperatura dell'aria, la temperatura media radiante, la velocità dell'aria e l'umidità relativa.

In riferimento al **Comitato Europeo di Normazione (CEN)**, le norme: *EN 16798-1*, *EN 16798-1* forniscono linee guida per la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici; riportano informazioni sulla IEQ nel suo complesso includendo: comfort termico, IAQ, comfort visivo

e comfort acustico. Infine, l'**Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS)**, con l'obiettivo di migliorare la salute e il benessere delle persone, stabilisce linee guida sulla qualità dell'aria interna e sul comfort termico negli ambienti confinati.

Le disposizioni nazionali riguardanti il comfort termico sono stabilite nel *Decreto del Presidente della Repubblica (DPR) 74/2013*, che stabilisce le "*Norme tecniche per le costruzioni*" [38]. Questo decreto definisce i requisiti minimi per la progettazione e la costruzione degli edifici al fine di promuovere la sicurezza, la salute e il benessere degli occupanti.

Riferendosi a quanto stabilito nella UNI EN 16798, è possibile definire i limiti di accettabilità per i principali parametri termoigrometrici negli edifici residenziali, ambienti interni di tipo moderato [39, 40]. Tali valori sono riassunti nella Tabella 1.1 .

Temperatura	Umidità relativa (UR)	Velocità dell'aria (v_a)
[°C]	[%]	[m/s]
20-26 $\pm$ 1	45-55 $\pm$ 5	$\leq$ 0.20

Tabella 1.1: Parametri ambientali termoigrometrici: condizioni microclimatiche di benessere termico - UNI EN 16798.

Le caratteristiche costruttive di un edificio hanno un impatto significativo sul comfort termico. L'isolamento termico di partizioni orizzontali e verticali, e la selezione appropriata dei materiali da costruzione, può influenzare l'inerzia termica dell'edificio e la sua capacità di mantenere temperature stabili durante variazioni climatiche esterne.

La corretta ventilazione dell'edificio, la presenza di sistemi di riscaldamento e raffreddamento efficienti e una gestione adeguata dell'illuminazione naturale sono ulteriori fattori cruciali per assicurare il comfort termico indoor.

L'isolamento termico riveste un ruolo prioritario, indicando la capacità di un materiale o di un sistema di ridurre il trasferimento di calore attraverso di essi. Questo è cruciale per assicurare il comfort termoigrometrico dei residenti all'interno dell'ambiente abitativo, limitando gli scambi di calore tra il corpo umano e l'ambiente circostante, i quali sono influenzati dalle variazioni dei parametri microclimatici.

Nella fase di progettazione dell'involucro edilizio, l'isolamento termico

e la gestione dei **ponti termici**¹ (Figura 1.1) risultano essere due aspetti imprescindibile per il raggiungimento di massimi livelli di prestazione energetica e comfort termoigrometrico.

I ponti termici, d'altra parte, sono aree in un edificio dove il flusso di calore è meno resistito rispetto alle zone circostanti. Questo può avvenire attraverso parti strutturali, giunture o materiali che conducono il calore più rapidamente rispetto agli altri componenti dell'involucro edilizio. La presenza di ponti termici causa dispersione di calore, generazione di condensa, formazione di muffa, quindi, disagio termico per gli occupanti. Pertanto, la gestione dei ponti termici è essenziale per garantire la massima efficienza energetica e il benessere termico negli edifici, adottando soluzioni progettuali e costruttive che eliminino tali fenomeni indesiderati.

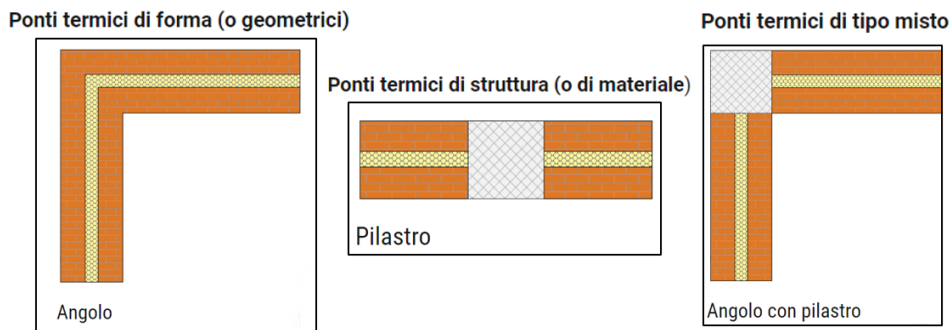


Figura 1.1: Classificazione ponti termici.

Nel contesto dell'ingegneria edilizia e della progettazione edile i ponti termici possono essere distinti in lineari e puntuali. I ponti termici lineari si verificano lungo una linea continua all'interno dell'involucro dell'edificio. Le aree soggette a ponti termici lineari possono includere il perimetro di un tetto, il bordo di un pavimento o di una parete esterna. La loro formazione è spesso dovuta a discontinuità nella struttura dell'edificio o al contatto tra materiali con differenti proprietà termiche.

¹ "Parte dell'involucro edilizio dove la resistenza termica, altrove uniforme, cambia in modo significativo per effetto della compenetrazione totale o parziale di materiali con conduttività termica diversa nell'involucro edilizio, e/o della variazione dello spessore della costruzione, e/o delle differenze tra le aree interne ed esterne, come avviene per esempio in corrispondenza dei giunti tra parete e pavimento o parete e soffitto." (UNI EN ISO 10211) [41]

I ponti termici puntuali, invece, si verificano in un punto specifico all'interno dell'involucro dell'edificio. In particolare, si generano per differenze di temperatura in punti di contatto tra le partizioni dell'involucro edilizio, con interruzioni della *barriera termica* dell'edificio, consentendo al calore di disperdersi con maggiore semplicità. Per cui i ponti termici possono essere causati sia dalla forma che dalla struttura di un edificio.

Ogni connessione tra gli elementi strutturali di un edificio costituisce dei ponti termici, cioè zone di concentrazione del flusso termico, che determinano:

- raffreddamento delle zone circostanti, con il rischio di formazione di muffe, se la temperatura superficiale delle strutture scende al di sotto della temperatura di condensazione del vapore nell'aria;
- riduzione del potere isolante complessivo della parete, di cui si tiene conto introducendo il *coefficiente di trasmittanza termica* U [W/m^2K], rendendo inferiore la capacità della casa di rispettare norme di sviluppo sostenibile.
- deterioramento dei materiali, accelerato dai ponti termici, i quali possono causarne un riscaldamento eccessivo, favorendo il loro deterioramento e degrado nel tempo.

La struttura dell'edificio, inclusi i materiali utilizzati per la costruzione, può influenzare la capacità dell'edificio di isolare termicamente l'interno dall'esterno. Materiali come il vetro e l'acciaio possono trasmettere il calore più facilmente rispetto a materiali isolanti come il polistirolo o la lana di vetro. Inoltre, la progettazione della struttura, come l'uso di pareti a doppio strato contribuisce alla riduzione di perdite di calore e al miglioramento dell'efficienza energetica dell'edificio.

Per ridurre l'impatto dei ponti termici, è importante utilizzare materiali isolanti di alta qualità e adottare tecniche di costruzione che minimizzino la dispersioni di calore attraverso l'involucro dell'edificio, influenzando fortemente i parametri termoigrometrici come la temperatura operativa. Tale parametro, tenendo conto sia della temperatura media radiante che della temperatura dell'aria, rappresenta la temperatura realmente precipitata dagli residenti all'interno di un ambiente.

Nella progettazione dei sistemi di riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria (HVAC), la temperatura operativa è il parametro preso come riferimento. Questi sistemi sono progettati per mantenere la

temperatura operativa all'interno di un range ottimale per il comfort degli occupanti. La progettazione dei sistemi HVAC tiene conto della temperatura operativa insieme ad altri fattori come l'isolamento termico dell'edificio, la distribuzione dell'aria e il controllo dell'umidità per garantire un ambiente interno confortevole e salubre [42, 43, 44].

In conclusione, la temperatura operativa è, insieme all'umidità e alla velocità dell'aria, il parametro caratteristico per la quantificazione del comfort termico indoor, poiché tiene conto dei diversi fattori che influenzano la percezione di benessere termico. Una progettazione dell'edificio mirata e una attenta e corretta gestione delle condizioni interne ed esterne possono contribuire a mantenere una temperatura operativa confortevole e stabile in tutti i locali dell'unità abitativa.

1.1.1 Strumenti di misurazione - Parametri termoigrometrici

Delle variabili da cui dipende la sensazione di benessere termoigrometrico, il metabolismo energetico e la resistenza termica dell'abbigliamento vengono stimati a partire da tabelle; le altre, temperatura dell'aria, temperatura operativa, umidità relativa e velocità dell'aria, devono essere rilevate secondo quanto previsto dalla norma *UNI EN ISO 7726:2002*.

Tale normativa fornisce indicazioni dettagliate per le misurazioni dei parametri fisici ambientali, compresi gli strumenti di misurazione, le condizioni di stabilità termica, le posizioni di misurazione, la durata delle misurazioni, la valutazione dei risultati delle misurazioni e la preparazione dei rapporti di misurazione.

La norma *UNI EN ISO 7726:2002* raccomanda l'uso di strumenti di misurazione accurati e calibrati per ottenere risultati affidabili e ripetibili, in grado di rilevare con la massima precisione i parametri fisici ambientali. Le misurazioni devono essere eseguite in condizioni di stabilità termica, ossia quando la temperatura, l'umidità e la velocità dell'aria all'interno dell'ambiente sono costanti. Questo assicura che le misurazioni e i risultati ottenuti siano rappresentativi delle condizioni termiche all'interno dell'ambiente.

Le misurazioni devono essere eseguite in diverse posizioni all'interno dell'ambiente per ottenere una rappresentazione accurata e completa delle condizioni termiche. Questo può includere la misurazione della temperatura dell'aria in diverse zone dell'ambiente o la misurazione della temperatura

radiante media in diverse posizioni all'interno dell'ambiente. Le misurazioni devono essere condotte per un periodo di tempo adeguato per catturare eventuali variazioni delle condizioni termiche nell'ambiente, includendo un monitoraggio prolungato che consenta di ottenere una media rappresentativa della temperatura. Inoltre, la norma fornisce linee guida per la valutazione dei risultati delle misurazioni, compresa la determinazione delle incertezze di misura e l'interpretazione dei dati ottenuti.

In conclusione, la norma UNI EN ISO 7726:2002 delinea dettagliatamente i metodi di rilevamento, le procedure di misurazione, la strumentazione da utilizzare e le modalità di elaborazione dei dati ambientali rilevati. Di seguito sono elencati i parametri termoigrometrici da monitorare e gli strumenti necessari per tale scopo.

Parametri termoigrometrici	Strumentazione
Temperatura (t_a , t_g , t_r , t_o)	Globotermometro
Umidità relativa dell'aria UR	
Velocità dell'aria	Anemometro

Tabella 1.2: *Identificazione parametri termoigrometrici e relativa apparecchiatura di misurazione.*

Partendo dalla temperatura i parametri da misurare per quantificare il livello di comfort termico in un ambiente sono: la temperatura dell'aria e la temperatura operativa. La prima definisce la quantità di calore presente nell'aria, può essere rilevata tramite termometri a liquido o termometri digitali, termocoppie e termistori, ma da sola non fornisce una rappresentazione completa delle condizioni termiche dell'ambiente.

La temperatura operativa si rivela un parametro più inclusivo per valutare il comfort termico, essendo una combinazione della temperatura dell'aria e della temperatura radiante media, considerando anche la velocità dell'aria ambiente.

Nell'ambito del progetto di ricerca, relativamente alla determinazione del comfort termico indoor, per la rilevazione della temperatura dell'aria e della temperatura operativa è stato utilizzato un globotermometro a bulbo umido *HT200 (Extech)*.



Figura 1.2: Globotermometro Extech HT200 (GEASS). Strumentazione per il campionamento di: temperatura di globo umido WBGT ($0-59^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$), temperatura dell'aria ($0-50^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$), temperatura di globo nero ($0-80^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$) e umidità relativa ($1-99\% \pm 2\%$).

È importante notare che, per l'analisi delle condizioni di comfort e stress termico, la letteratura scientifica evidenzia che l'uso di sensori portatili, come globi di dimensioni contenute, tende a sottostimare i carichi radianti, sia in ambienti controllati che in situazioni sul campo [32, 33, 34].

La scelta di utilizzare il globotermometro *HT200* è stata guidata dalla necessità di garantire tempi di risposta rapidi nelle misurazioni. Sebbene lo strumento possa manifestare qualche imprecisione in condizioni termiche estreme, si ritiene che l'applicazione di questo dispositivo in contesti moderati, come gli ambienti residenziali, sia adeguata, considerando la limitata intensità dei carichi radianti. In tal modo, si assicura un approccio pratico e tempestivo per la raccolta di dati, compatibile con gli obiettivi del progetto di ricerca.

Per la rilevazione della temperatura dell'aria si sfrutta la presenza nello strumento del sensore capacitivo. Il principio di funzionamento di un sensore di capacità, per la misura della temperatura ambiente, si basa sulla variazione della capacità elettrica di un condensatore in funzione della variazione di temperatura.

Questa tipologia di sensore è costituito da un condensatore, formato da

due piastre conduttrici separate da un materiale dielettrico, e un circuito elettronico. Quando la temperatura dell'aria varia, il dielettrico, in grado di immagazzinare energia sotto forma di cariche elettriche distribuite all'interno del campo elettrico tra le due piastre, si espande o si contrae, causando una variazione della distanza (d) tra le armature e, di conseguenza, una variazione della capacità del condensatore. Questa variazione di capacità è misurata utilizzando un circuito elettronico apposito, che converte la variazione di capacità in un segnale elettrico.

Nel definire la temperatura operativa, invece, è fondamentale rilevare la temperatura media radiante t_r avvalendosi di un termometro a globo nero, un dispositivo che consiste in una sfera opaca di materiale nero, la quale assorbe il calore radiante dalle superfici circostanti.

Le formulazioni descritte in precedenza (Equazioni 1.3 e 1.4) permettono, note la temperatura del globo nero, la temperatura dell'aria e la velocità dell'aria, di determinare la temperatura media radiante dell'ambiente.

Da qui, la temperatura operativa, considerando sia la temperatura dell'aria che l'effetto delle superfici circostanti tramite il calore radiante, rappresenta la temperatura percepita effettivamente dagli occupanti di un ambiente. Di conseguenza, è possibile definire la temperatura operativa nel seguente modo:

$$t_o = A \cdot t_a + (1 - A) \cdot t_r \quad (1.5)$$

con:

$$A = 0.5 \longrightarrow v_{ar} \leq 0.2 \text{ m/s}$$

$$A = 0.6 \longrightarrow 0.2 < v_{ar} \leq 0.6 \text{ m/s}$$

$$A = 0.7 \longrightarrow 0.6 < v_{ar} \leq 1.0 \text{ m/s}$$

Con il parametro v_{ar} , pari alla *velocità relativa aria*, definito dalla seguente relazione $va+0,0052(M-58,15)$ e con il metabolismo energetico (M) espresso in W/m^2 [45].

L'umidità relativa (UR) è una misura della quantità di vapore acqueo presente nell'aria rispetto alla massima quantità di vapore che l'aria può contenere a una data temperatura.

Espressa come percentuale, indica il rapporto tra la pressione parziale del vapore acqueo e la pressione di saturazione alla stessa temperatura. Per la rilevazione dell'umidità relativa vengono impiegati dispositivi noti

come *psicrometri*, ossia un termometro a bulbo umido schermato su cui la velocità dell'aria sia fatta impattare ad una velocità specifica (Figura 1.2).

Tale strumento è costituito da due termometri, uno dei quali ha il bulbo avvolto in un tessuto umido, mentre l'altro ha il bulbo esposto direttamente all'aria circostante. La differenza di temperatura registrata tra i due termometri è proporzionale all'umidità relativa dell'ambiente in esame.

Per garantire un comfort termico ottimale, è essenziale monitorare attentamente la velocità dell'aria all'interno di un ambiente.

Il movimento dell'aria agevola lo scambio termico tra la superficie della pelle e l'ambiente circostante, operando tramite la dissipazione del calore corporeo che favorisce un incremento dell'evaporazione, contribuendo così al raffreddamento della pelle, insieme alla trasmissione di calore, per convezione.

Secondo la UNI EN ISO 7726:2002, la velocità dell'aria è una grandezza definita sia in termini di intensità che di direzione. Quando si valutano le condizioni termiche di un ambiente, si considera il vettore di velocità del flusso nell'area di misura.

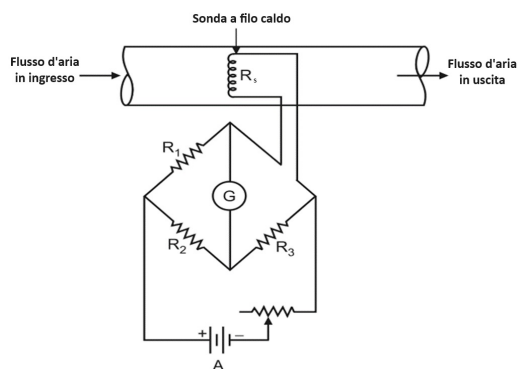
Poiché la velocità dell'aria tende a variare nel tempo, la normativa suggerisce di registrare le sue fluttuazioni, in modo da quantificare il discomfort locale da correnti d'aria. Tuttavia, ogni flusso può essere caratterizzato mediante la velocità media su un periodo di tempo definito (detto periodo di misurazione) e la deviazione standard della velocità.

La misurazione della velocità dell'aria viene solitamente effettuata con l'ausilio di un dispositivo noto come **anemometro**, strumento disponibili in diverse varianti, tra cui: a pale, a filo caldo, a ultrasuoni e a pressione differenziale.

Nei contesti indoor, l'utilizzo di anemometri a filo caldo o a ultrasuoni è spesso preferibile rispetto ad altre tipologie di anemometri. Ciò è dovuto alla capacità dei dispositivi a filo caldo e a ultrasuoni di misurare la velocità dell'aria con la massima precisione e accuratezza. Nel caso specifico è stato utilizzato un anemometro a filo caldo, *TA 300 (Trotec)*, riportato in Figura 1.3.



(a) Anemometro TA300.



(b) Principio di funzionamento TA300.

Figura 1.3: Anemometro TA300 (Trotec) - Strumento di precisione per il monitoraggio della velocità del vento. Portata di misurazione: 0-25 m/s. Risoluzione: ± 0.01 m/s. Precisione: $\pm 5\%$ del valore misurato.

Tale dispositivo si compone di un filamento di platino sottile riscaldato e sensibile al flusso d'aria. La corretta misurazione della velocità dell'aria deve essere effettuata posizionando la sonda a filo caldo perpendicolarmente al flusso d'aria. Quando l'aria in movimento colpisce il filo, si verifica un effetto di raffreddamento che induce una variazione nella resistenza elettrica del filamento stesso. La misura di questa variazione consente di calcolare con assoluta precisione la velocità dell'aria.

1.2 Qualità dell'aria indoor

La salubrità dell'aria indoor influisce significativamente sul comfort fisico e psicologico degli individui, nonché sulla loro produttività, capacità di concentrazione e qualità del sonno. Questo capitolo mira a esplorare i fattori critici che influenzano la qualità dell'aria negli ambienti residenziali, inclusi gli agenti inquinanti, le strategie di ventilazione e le tecnologie per la purificazione dell'aria. Saranno analizzati anche gli impatti specifici di una scarsa qualità dell'aria sulla salute e sul benessere degli individui, insieme a soluzioni potenziali e interventi preventivi.

Il deterioramento della qualità dell'aria indoor può essere dovuta alla presenza di agenti inquinanti all'interno degli spazi abitativi, oltre che da pratiche inadeguate come una ventilazione insufficiente. Nell'analisi del comfort respiratorio-olfattivo, uno degli aspetti centrali è il *ricambio dell'aria*, che può essere realizzato attraverso sistemi di ventilazione sia naturali che meccanici.

Le conseguenze di un ambiente interno poco salubre possono manifestarsi attraverso un quadro sintomatologico noto come *Sick-Building Syndrome (SBS)*. Si tratta di una condizione in cui gli occupanti di un edificio, esposti a condizioni ambientali insalubri o inquinamento indoor, possono riscontrare problemi di salute o sintomi senza cause specifiche apparenti. Questo non è una malattia definita, ma piuttosto una serie di disturbi che includono: cefalea, irritazione agli occhi, al naso e alla gola, tosse secca, pelle disidratata, vertigini o nausea, difficoltà di concentrazione, affaticamento e una particolare sensibilità agli odori. Inoltre, l'esposizione prolungata a determinati inquinanti può aumentare il rischio di sviluppare gravi patologie come malattie cardiache, disturbi neurologici e persino forme tumorali.

La norma *UNIEN16798* definisce il *fabbisogno di aria di ricambio* in funzione dell'indice di affollamento, il quale è stabilito a 0.04 per gli ambienti residenziali [46, 47]. Questa disposizione implica che per ogni individuo presente nell'ambiente, la quantità di aria da far ricircolare dovrebbe essere di 11 litri al secondo, pari a circa 40 metri cubi all'ora [48]. La normativa, inoltre, stabilisce requisiti minimi per gli impianti di ventilazione, che devono garantire il comfort e il benessere degli individui, limitando i consumi energetici e mantenendo caratteristiche termiche, igrometriche e di qualità dell'aria adeguate.

Negli ambienti confinati, è possibile riscontrare accumulo di contaminanti, provenienti sia dall'aria esterna che derivanti dalle attività di vita domestica (cottura di cibi, pulizia e riscaldamento) come: composti organici volatili (VOC), particelle in sospensione, prodotti della combustione, vapori di solventi e altre sostanze dannose [49, 50, 51, 52]. Tali sostanze, se presenti in quantità superiori ai limiti stabiliti da linee guida e standard internazionali o nazionali, possono compromettere la salute e il benessere degli occupanti [53, 54]. Tra le organizzazioni e agenzie che definiscono normative e linee guida sulla qualità dell'aria indoor ci sono: l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS), la Commissione Europea, Environmental Protection Agency (EPA). Tutte forniscono raccomandazioni sui livelli accettabili di inquinanti indoor, compresi i composti organici volatili (VOC) e la formaldeide.

Pertanto, è essenziale implementare strategie preventive e correttive efficaci per assicurare un adeguato ricambio dell'aria negli ambienti domestici, al fine di proteggere la salute e mantenere elevati standard di qualità dell'aria indoor.

Tale obiettivo può essere conseguito tramite sistemi di ventilazione sia di tipo naturale, apertura di serramenti, sia attraverso tecnologie più prestanti, come la *ventilazione meccanica controllata (VMC)*. Questi ultimi sistemi, se opportunamente dimensionati e revisionati, consentono di rimuovere in modo efficiente gli inquinanti presenti nell'aria interna e di introdurre aria pulita dall'esterno, contribuendo così a mantenere ambienti interni salubri. Inoltre, questi sistemi consentono di mantenere invariate le condizioni termoigrometriche dell'ambiente grazie alla presenza di un dispositivo noto come *recuperatore di calore*. Tale dispositivo ha il compito specifico di trattenere l'energia termica dall'aria interna estratta dagli ambienti e di trasferirla all'aria pulita che viene immessa. Questo scambio termico consente di ricambiare l'aria all'interno degli ambienti riducendo al minimo lo spreco di energia.

Nell'analisi della *qualità dell'aria indoor (IAQ)*, è fondamentale focalizzarsi sui principali inquinanti atmosferici che possono essere presenti negli ambienti domestici e influenzare la salute e il benessere degli occupanti degli edifici. Tra questi, rivestono particolare importanza le concentrazioni di anidride carbonica (CO_2), dei composti organici volatili (VOC) e della formaldeide (HCOH).

In assenza di ventilazione adeguata, si verifica un deterioramento della qualità dell'aria portando a una sensazione di aria stagnante e a una

diminuzione del comfort respiratorio-olfattivo.

Il deterioramento della qualità dell'aria può essere ricondotto al progressivo esaurimento di ossigeno, causato dalla presenza umana e dal suo processo respiratorio, che modifica la composizione dell'aria. Inoltre, elevati livelli di umidità e la presenza di muffe compromettono la qualità dell'aria degli ambienti, aumentando il rischio di manifestazioni allergiche e problemi respiratori.

Un'altra importante fonte di inquinamento è rappresentata dall'infiltrazione di contaminanti atmosferici esterni, attraverso aperture nei serramenti e infissi o tramite sistemi di ventilazione meccanica non adeguatamente mantenuti.

Risulta pertanto essenziale considerare le condizioni della qualità dell'aria esterna, poiché potrebbero contribuire all'accumulo di contaminanti esterni, specialmente in prossimità di aree ad alta concentrazione di traffico o di attività industriali e lavorative.

Ogni agente inquinante va trattato separatamente e collegato a disturbi della salute più o meno specifici. Di seguito, verranno esaminati i principali inquinanti presenti negli ambienti domestici, le metodologie di monitoraggio e i livelli di concentrazione ammissibili, tali da garantire il benessere indoor.

1.2.1 Principali fonti d'inquinamento dell'aria indoor

L'atmosfera è principalmente composta da ossigeno, azoto, argon e diossido di carbonio, elementi fondamentali per la sussistenza della vita umana [55]. La composizione chimica dell'aria esterna può essere soggetta a variazioni dovute a contaminanti provenienti sia da fonti naturali che antropiche.

Negli ambienti residenziali, diversi elementi nocivi possono compromettere la salubrità dell'aria, influenzando direttamente la salute e il benessere degli occupanti. Le principali fonti di inquinanti in ambito residenziale [56] sono associati a:

- processi di combustione per la cottura dei cibi e il riscaldamento dell'unità abitativa (CO , NO_x , SO_2 , particolato);
- materiali da costruzione, rivestimento, arredo (formaldeide e più in generale i $TVOC$);
- sorgenti naturali (*gas radon*, CO_2).

Le sorgenti naturali di inquinamento indoor includono il gas radon e l'anidride carbonica. Il radon è un gas naturale radioattivo, in condizioni di temperatura standard è inodore e incolore, ed è rilevabile solo attraverso gli appositi strumenti. Generalmente, il radon fuoriesce dal terreno e da materiali vari di origine vulcanica, tra i quali, ad esempio, il tufo e il granito. La necessità di rilevazione è legata alla caratteristica del gas di accumularsi all'interno delle abitazione. L'esposizione prolungata al radon può aumentare il rischio di cancro ai polmoni [57, 58, 59].

Allo stesso modo, l'*anidride carbonica* (CO_2), prodotta durante la respirazione umana, può raggiungere livelli significativi negli ambienti interni, in relazione all'affollamento dell'ambiente e al ricambio d'aria. L'eccessiva presenza provoca sensazione di affaticamento e stanchezza, mal di testa, sonnolenza e difficoltà di concentrazione. Sebbene siano sorgenti naturali, concentrazioni elevate di queste sostanze possono rappresentare un rischio più o meno importante per la salute umana.

Tra le sostanze maggiormente pericolose per la salute umana vi è il *monossido di carbonio* CO , gas inodore e insapore prodotto dalla combustione incompleta di combustibili come gas naturale e legna. La sua presenza in ambito residenziale è dovuta a processi di combustione (fumo di tabacco, stufe a gas o legna). L'inalazione di CO può causare avvelenamento da monossido di carbonio, con sintomi che vanno da stanchezza e vertigini fino a danni cerebrali irreversibili e morte [60].

Una diretta conseguenza degli impianti di riscaldamento e di produzione di energia alimentati a gasolio, carbone e oli combustibili è l'emissione in ambiente di *anidride solforosa* (SO_2), gas caratterizzato da un odore pungente e irritante, altamente solubile in acqua. Questo gas, se inalato, può avere un impatto negativo sulla salute umana, causando irritazioni delle vie respiratorie, broncospasmi, riduzione della funzione polmonare e peggioramento delle condizioni asmatiche [61, 62]. Inoltre, in particolari condizioni atmosferiche, l'anidride solforosa può contribuire, insieme agli ossidi di azoto, alla formazione di piogge acide e aerosol atmosferici. Questo fenomeno ha un impatto significativo sulla qualità dell'aria e sull'ambiente circostante.

L'aumento del traffico veicolare degli ultimi anni ha generato un livello crescente nelle concentrazioni di ossidi di azoto. In caso di inquinamento da monossido di azoto, la concentrazione decade in pochi giorni, ma nel caso di emissioni continue (ad esempio in aree urbane a forte traffico veicolare)

si assiste all'attivazione di un ciclo giornaliero, che porta alla produzione di inquinanti secondari, quali il biossido di azoto. Questo ciclo comporta picchi di concentrazione durante le ore di maggior traffico, seguiti da una diminuzione durante le ore notturne [63, 64].

Il *biossido di azoto* NO_2 è un gas caratterizzato da un forte odore pungente, presente nelle abitazioni principalmente come prodotto secondario dell'inquinamento atmosferico. Si forma dalla reazione dell'ossigeno con il *monossido di azoto* NO , anch'esso prodotto dalla combustione dei combustibili fossili [65]. Il biossido di azoto è uno dei costituenti del cosiddetto *smog fotochimico* e rappresenta la base per la formazione di altri inquinanti secondari pericolosi, come l'ozono e l'acido nitrico. La sua presenza negli ambienti interni può avere gravi effetti nocivi sulla salute umana e sull'ambiente. Tra questi effetti si annoverano irritazioni delle vie respiratorie, problemi respiratori come l'asma e un aumento della sensibilità alle infezioni polmonari.

I *composti organici volatili* (*VOC*) sono uno dei principali inquinanti da considerare negli ambienti domestici. Queste sostanze derivano da una vasta gamma di fonti, come prodotti per la pulizia, vernici, mobili e materiali da costruzione. I *VOC* comprendono una varietà di sostanze liquide e gassose, molte delle quali sono incolori e prive di odore [66, 67, 68]. La loro caratteristica volatilità fa sì che si vaporizzino facilmente a temperatura ambiente e si accumulino nell'aria interna.

La presenza di composti organici volatili può influenzare il benessere e la salute umana, poiché molte di queste sostanze sono considerate cancerogene a causa della loro composizione chimica diversificata.

Un'analisi del gruppo di sostanze come insieme risulta estremamente complessa. Attraverso la determinazione del cosiddetto valore *TVOC* si sintetizza la misura della concentrazione complessiva di tutti i composti organici volatili presenti nell'aria in un dato ambiente. In linea generale, l'esposizione prolungata anche a basse concentrazioni di TVOC può causare irritazione delle vie respiratorie, mal di testa e nausea [69, 70]. La tossicità varia in funzione della concentrazione e del tempo di esposizione. Se l'esposizione è prolungata, alcuni di questi composti, come la *formaldeide*, sono da considerarsi cancerogeni. Industrialmente, tale sostanza, viene prodotta per ossidazione in fase gassosa del metanolo in presenza di catalizzatori solidi a base di ferro e molibdeno [71, 72]. Impiegata su larga scala per la preparazione di importanti categorie di resine, quali i fenoplasti, gli amminoplasti e le resine melamminiche, serve anche per la

preparazione di prodotti chimici diversificati, quali esplosivi e composti farmaceutici [73, 74]. La formaldeide, detta anche *HCHO* o *metanale*, è classificata dall'anno 2016 come sostanza di *categoria 1B* [75, 76], categoria di pericolo cancerogeno, essendo presente nell'aria ambiente come gas incolore. Oltre a essere un prodotto della combustione (fumo di tabacco e altre fonti di combustione) è anche emesso da resine usate per l'isolamento, truciolo e compensato di legno, per tappezzerie, tendaggi e altri tessuti sottoposti a trattamenti antipiega e per altro materiale da arredamento.

Nei contesti residenziali, è comune riscontrare concentrazioni di particelle sospese, noto anche come particolato. Questo è diretta conseguenza sia di fonti esterne come il traffico veicolare e le attività industriali, sia di fonti interne come i processi di cottura e il riscaldamento domestico. Il particolato può includere sia particelle di dimensioni più grandi, PM_{10} , con un diametro massimo di $10\ \mu m$, che particelle più fini, $PM_{2.5}$, con un diametro massimo di $2.5\ \mu m$ e che risultano essere particolarmente preoccupanti per la salute umana in quanto possono penetrare profondamente nell'apparato respiratorio [77]. Questo rende il particolato in casa un potenziale rischio per la salute, con effetti negativi che possono manifestarsi sotto forma di problemi respiratori, irritazioni agli occhi, malattie cardiovascolari e altre condizioni mediche correlate [78, 79].

In riferimento al gas radon, le Agenzie Regionali per la Protezione Ambientale, attraverso attività di campionamento negli ambienti interni, in aree territoriali ad alta concentrazione di radioattività, rilevano le concentrazioni medie annuali di radon in locali privati dei comuni interessati. I livelli di riferimento per la concentrazione di radon indoor in abitazioni (concentrazione media annua negli ambienti interni inferiore a $300\ Bq/m^3$), e l'adozione di eventuali misure correttive nel caso i cui tali valori siano superati, sono definiti dalla *Direttiva Europea 59/2013*, recepita in Italia dal *Decreto Legislativo 101/2020*. Ulteriori direttive nazionali come la *Direttiva Tecnica CasaClima Nature* afferma che per edifici di nuova costruzione è richiesta un'analisi preventiva del rischio radon, basata su: mappatura del radon indoor e analisi geomorfologica del sito (sottoscritta da un geologo). La direttiva stabilisce inoltre che per gli edifici residenziali, con ventilazione meccanica controllata, il requisito si ritiene automaticamente soddisfatto se vengono rispettati i seguenti ulteriori criteri:

- gli edifici non si trovano in zone classificate secondo mappa ad “alto rischio radon” (concentrazione media annua $\geq 400\ Bq/m^3$);

- la ventilazione meccanica controllata è installata in tutte le unità abitative (con portata di ventilazione tale da garantire un ricambio d'aria almeno di 0.4 vol/h e le portate di immissione ed estrazione sono bilanciate o all'interno dell'edificio viene garantita una leggera sovrappressione);
- l'aspirazione dell'aria esterna è collocata almeno 80 cm sopra il livello del terreno;
- gli ambienti riscaldati (anche in modo non continuativo) non presentano strutture verticali a diretto contatto con il terreno.

Relativamente ai TVOC, non sono presenti normative nazionali che fissano il limite per la concentrazione nell'aria, ma sono presenti norme che riportano i limiti sulle emissioni dei materiali. Vi sono valori guida fissati dall'OMS e da organismi non nazionali, come ad esempio l'*Ufficio Federale dell'Ambiente (UFAM)*, agenzia governativa svizzera responsabile di supervisionare e regolamentare le questioni ambientali a livello nazionale, il quale stabilisce che negli spazi destinati ad una permanenza a lungo termine il valore TVOC dovrebbe mantenersi tra 1 e 3 mg/m^3 , poiché valori superiori provocano sensazione di disagio intesa come irritazioni e/o limitazioni del benessere [80]. Relativamente ai livelli di concentrazione di formaldeide, vista la "*Circolare n. 57 del 22 giugno 1983*" del *Ministero della Salute*, è previsto un limite di 0,1 ppm (0.124 mg/m^3) negli ambienti di vita e soggiorno in via sperimentale e provvisoria, che trova conferma nel decreto del 10 ottobre 2008 "*Disposizioni atte a regolamentare l'emissione di aldeide formica da pannelli a base di legno e manufatti con essi realizzati in ambienti di vita e soggiorno*". In linea generale, le maggiori concentrazioni di HCHO si possono osservare in case prefabbricate, dopo lavori di ristrutturazione edilizia.

Le raccomandazioni dell'Organizzazione Mondiale della Sanità per le concentrazioni di PM_{10} e $PM_{2.5}$ nell'aria interna non sono specificamente definite come per l'aria esterna. Tuttavia, indicazioni generali riguardanti la qualità dell'aria interna suggeriscono di mantenere le concentrazioni di particolato il più prossime possibile ai livelli raccomandati per l'aria esterna. La *Direttiva Europea (2008/50/EC)* detta dei limiti di qualità dell'aria con riferimento anche al $PM_{2.5}$, fino a quel momento non preso in considerazione, nonostante sia estremamente pericoloso per la salute. Questa direttiva è stata recepita dalla legislazione italiana con il *D.Lgs. 155/2010*,

secondo cui il parametro di riferimento per la valutazione di PM_{10} risulta essere la *media giornaliera*, pari a $50 \mu g/m^3$, da "non superare più di 35 volte per anno civile". Nello stesso decreto viene anche stabilito un limite di $40 \mu g/m^3$ come media annua. Relativamente al $PM_{2.5}$, non sono definiti limiti giornalieri, ma solo un limite di $25 \mu g/m^3$ come media annua. Di seguito i limiti di legge italiani (in accoglimento della Direttiva Europea (2008/50/EC)) su PM_{10} e $PM_{2.5}$:

	Limite medio annuale	Limite medio giornaliera
PM_{10}	$40 \mu g/m^3$	$50 \mu g/m^3$
$PM_{2.5}$	$25 \mu g/m^3$	-

Tabella 1.3: Direttiva Europea 2008/50/EC - Limiti su PM_{10} e $PM_{2.5}$.

1.2.2 Strumenti di misurazione - Qualità dell'aria

La valutazione della qualità dell'aria riveste un ruolo fondamentale nella tutela della salute pubblica e nell'ottimizzazione degli ambienti di vita e di lavoro. Tra le molteplici sostanze di interesse, le particelle sospese (PM), i composti organici volatili totali (TVOC) e la formaldeide rappresentano una significativa preoccupazione per la loro potenziale nocività sulla salute umana negli ambienti domestici. Strumenti di misura avanzati come spettrometri ottici e misuratori elettrochimici si pongono come soluzioni efficaci e affidabili per le attività di campionamento.

Per il seguente studio, le misurazioni, in termini di concentrazioni di particelle sospese nell'aria, sono state effettuate mediante uno spettrometro OPS (Optical Particle Sizer) modello 3330 prodotto dalla TSI (Minnesota, USA).

Il *BQ16 - HCHO/TCOV* prodotto dalla *TROTEC*, azienda specializzata nella produzione di strumenti e soluzioni per il monitoraggio dell'aria e il controllo ambientale, è stato utilizzato per la rilevazione dei composti organici volatili (TVOC) e più in generale della formaldeide (HCHO). Le caratteristiche e i principio di funzionamento della strumentazione sono riportati di seguito.

Lo spettrometro OPS TSI 3330 funziona secondo il principio dello scattering ottico delle singole particelle (Figura 1.4).



Figura 1.4: OPS 3330, TSI (Minnesota, USA). Concentrazione massima: 3000 part/cm^3 e tra 0.001 e $275000 \mu\text{g/m}^3$. Range dimensionale: $0.3 - 10 \mu\text{m}$. Frequenza di campionamento $\geq 1 \text{ s}$. Portata volumetrica: 1 L/min per l'aerosol campione e 1 L/min per il flusso di supporto.

Le particelle sono illuminate da un raggio laser indirizzato nella zona a valle dell'ugello di ingresso del flusso di aerosol (Figura 1.5).

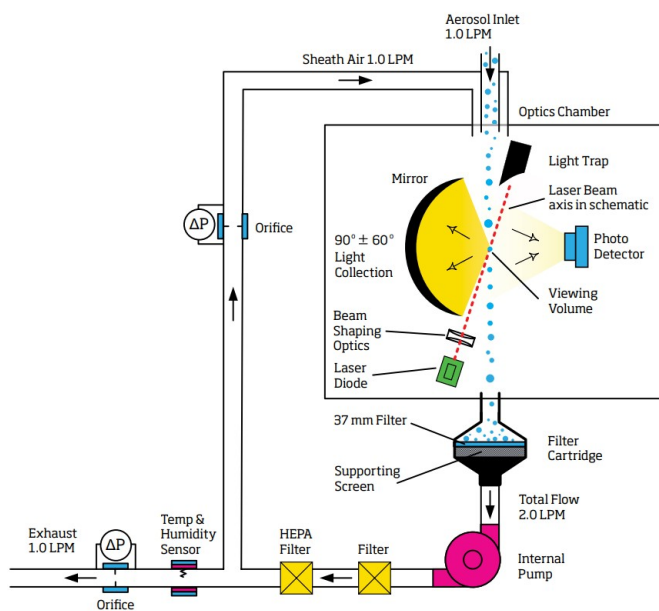


Figura 1.5: Principio di funzionamento OPS 3330.

Quando le particelle passano attraverso il laser, diffrangono la luce sotto forma di impulsi e vengono quindi contate e dimensionate simultaneamente. La concentrazione misurata dall'OPS è funzione della portata e quindi il flusso è strettamente mantenuto a $1.0 \text{ L/min} \pm 5\%$.

Lo spettrometro prevede anche un flusso di aria di supporto separato di 1.0 L/min la cui funzione è quella di mantenere le particelle strettamente confinate nella zona di rilevamento. Il flusso di supporto è completamente interno allo strumento: esso deriva dallo scarico della pompa che attraversa un filtro HEPA e viene quindi ricircolato nuovamente nella camera di misura. Due trasduttori di pressione monitorano il flusso di aerosol e il flusso di supporto e regolano la portata della pompa per mantenere i flussi entro le loro specifiche.

Gli impulsi prodotti dal passaggio delle particelle attraverso il laser vengono suddivisi in 16 canali diversi. L'intensità dell'impulso è proporzionale alla dimensione delle particelle. Attraverso una processo di calibrazione, le diverse intensità degli impulsi sono correlate a differenti dimensioni delle particelle.

Il BQ16 - HCHO/COV (Figura 1.6) utilizza un principio di funzionamento basato sulla tecnologia delle celle elettrochimiche per rilevare la presenza di formaldeide (HCHO) e composti organici volatili (COV) nell'aria.



Figura 1.6: BQ16 - Misuratore di HCHO/TVOC (Trotec). Campo di misura HCHO: $0.00 - 5.00 \text{ mg/m}^3$. Campo di misura TVOC: $0.00 - 9.99 \text{ mg/m}^3$. Risoluzione HCHO: $\pm 0.01 \text{ mg/m}^3$. Risoluzione TVOC: $\pm 0.01 \text{ mg/m}^3$. Precisione HCHO: $\pm 5\%$ del valore misurato. Precisione TVOC: $\pm 10\%$ del valore misurato.

Il funzionamento BQ16 - HCHO/COV si basa su due concetti principali: la reazione chimica e la trasduzione del segnale. Il sensore contiene celle elettrochimiche che reagiscono selettivamente con la formaldeide e i TVOC presenti nell'aria circostante. La reazione chimica tra le sostanze target e i materiali della cella elettrochimica genera variazioni misurabili nel materiale del sensore, che possono essere quantificati per determinare le concentrazioni d'interesse nell'ambiente.

Il sensore converte il cambiamento risultante in un segnale elettrico. Questo segnale viene quindi elaborato dal circuito interno del dispositivo e visualizzato sotto forma di valore numerico di concentrazione.

1.3 Comfort Visivo

L'illuminotecnica è la disciplina tecnico-scientifica che si occupa dell'illuminazione di spazi ed ambienti, sia interni che esterni, sia sfruttando la luce solare sia la luce artificiale.

Il concetto di *comfort visivo* si riferisce alla capacità di un sistema di illuminazione di soddisfare le esigenze visive degli individui in modo efficiente ed efficace, creando al contempo un ambiente piacevole e funzionale [81].

Da un punto di vista fisico, la luce è una radiazione elettromagnetica che varia nel tempo e nello spazio. La luce si definisce in base alla risposta visiva dell'uomo e, per definizione, lo spettro del visibile (porzione dello spettro elettromagnetico che cade tra il rosso e il violetto) è compreso tra le lunghezze d'onda che vanno da 380 a 760 nm [82, 83].

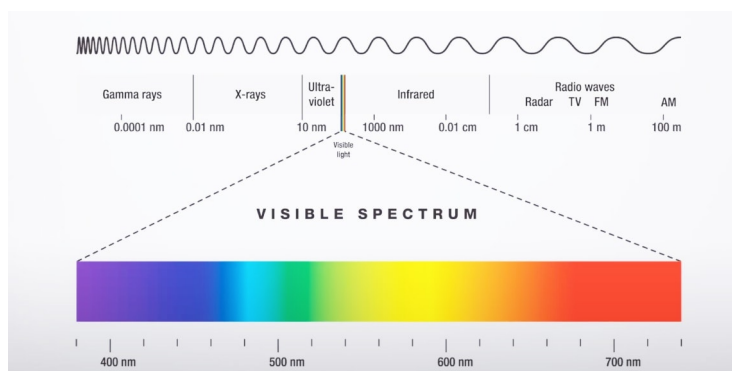


Figura 1.7: Spettro della radiazione elettromagnetica.

La sensibilità dell'occhio umano alle diverse radiazioni luminose varia notevolmente: risulta elevata nella regione del giallo-verde, mentre assume valori inferiori nel blu e nel rosso [84, 85]. La capacità visiva dell'occhio varia a seconda della luminosità ambientale, manifestandosi in modi diversi nel caso di luminosità diurna (visione fotopica) o luminosità notturna (visione scotopica) [86].

Le principali grandezze fotometriche sono:

- *flusso luminoso* (ϕ): quantità totale di energia luminosa emessa da una sorgente luminosa in tutte le direzioni [lm].

- *intensità luminosa* (I): quantità di luce emessa da una sorgente in una specifica direzione [cd].
- *illuminamento* (E): indica la quantità di luce che colpisce una superficie [lm/m^2] o [lux]
- *luminanza* (L): rappresenta la quantità di luce riflessa o emessa da una superficie in una specifica direzione [cd/m^2].

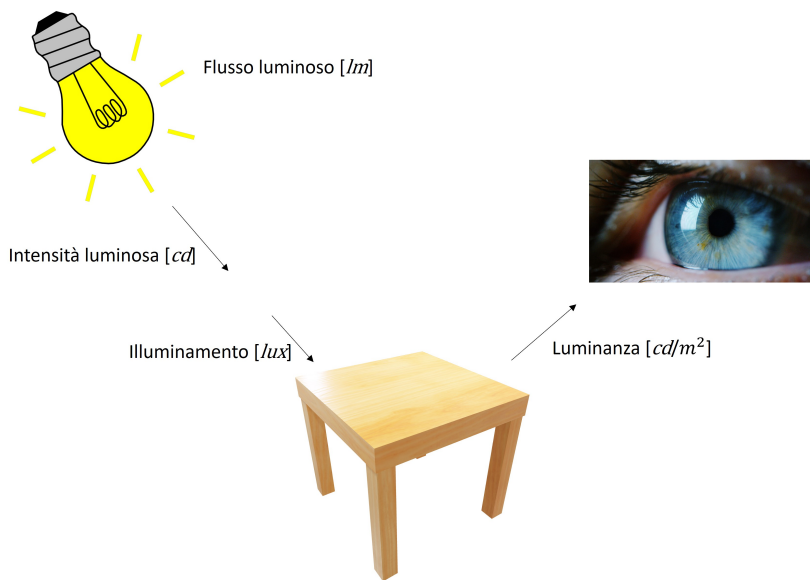


Figura 1.8: Rappresentazione grafica delle grandezze fotometriche.

I parametri tecnici che caratterizzano l'ambiente luminoso sono:

- distribuzione delle luminanze e direzione della luce;
- illuminamento medio(E_m);
- abbagliamento;
- distribuzione delle ombre;
- resa dei colori e tonalità della luce.

In generale, la qualità dell'illuminazione negli ambienti interni dipende dal livello di illuminazione necessario per l'uso specifico dell'ambiente. Ad esempio, in contesti dove sono necessarie attività di precisione, come nelle sale operatorie ospedaliere, è fondamentale assicurare elevati livelli di illuminazione.

Numerose ricerche hanno confermato gli effetti positivi della luce naturale sul benessere visivo [87, 88, 89, 90], fisiologico e psicologico delle persone. Pertanto, è di fondamentale importanza considerare attentamente, durante la fase di progettazione, la configurazione dell'edificio in modo da consentire una penetrazione ottimale della luce naturale.

Il benessere luminoso si raggiunge creando ambienti ben illuminati e confortevoli, sia attraverso l'ottimizzazione dell'illuminazione naturale che attraverso l'uso appropriato dell'illuminazione artificiale, controllando attentamente l'abbagliamento e considerando le esigenze specifiche degli utenti.

Solitamente, la quantificazione della luce naturale avviene attraverso il *Fattore Medio di Luce Diurna*, *FLDm*, che esprime la percentuale di illuminamento interno in un punto rispetto a quello che si verificherebbe nelle stesse condizioni climatiche su una superficie orizzontale esterna esposta in modo da ricevere luce dall'intera volta celeste, in condizioni di cielo coperto [91, 92]. Il *FLDm* consente di valutare l'effettiva illuminazione naturale all'interno di un ambiente.

Posizionare strategicamente gli edifici è fondamentale per ottimizzare l'illuminamento naturale distribuendo i locali in modo da evitare un irraggiamento diretto eccessivo durante il giorno. Questo approccio permette di sfruttare al meglio la luce solare, distribuendola uniformemente negli ambienti interni e riducendo contemporaneamente il rischio di surriscaldamento e abbagliamento. Inoltre, un'orientazione adeguata degli edifici favorisce l'entrata della luce solare nelle ore di maggiore intensità, riducendo così la necessità di illuminazione artificiale e contribuendo al risparmio energetico. Per ottimizzare l'illuminazione naturale e assicurare un ambiente luminoso e confortevole, è consigliabile disporre:

- a **sud** le stanze in cui si trascorre la maggior parte delle ore del giorno (necessità di luce naturale per più tempo), come soggiorno e cucina;
- a **nord** gli ambienti che non necessitano di molta luce, come bagni e ripostigli;

- a **est** gli ambienti che necessitano di maggiore luce nelle prime ore del giorno (camere da letto);
- a **ovest** è conveniente collocare uno studio, poiché in questi ambienti il sole è presente nel pomeriggio e al termine della giornata.

Negli ambienti domestici l'illuminazione naturale non dovrebbe creare normalmente molti problemi, poiché i locali delle abitazioni sono relativamente poco profondi e le finestre sono sufficientemente grandi; in particolare modo il decreto ministeriale, il *DM 05/07/1975* [93], stabilisce che tutti i locali di un edificio (tranne vani scala, ripostigli, ecc.), devono fruire di illuminazione naturale diretta adeguata alla destinazione d'uso; inoltre, secondo lo stesso decreto ministeriale, l'ampiezza delle finestre deve essere proporzionata in modo da assicurare un valore del *FLDm* non inferiore al 2% e comunque la superficie apribile non deve essere inferiore a 1/8 della superficie del pavimento e bucatore dell'ambiente [94].

L'installazione di sistemi per oscuramento regolabile, come veneziane, tende e avvolgibili, risulta fondamentale per regolare l'intensità della luce solare da far entrare nell'ambiente a seconda delle esigenze e in funzione dell'inclinazione dei raggi solari.

In termini di illuminazione artificiale i principali aspetti da considerare sono la *qualità* e l'*intensità* della luce, in relazione all'attività svolta nello spazio interno. I *lumen* necessari per l'illuminazione dipendono da vari fattori come la forma e le dimensioni della stanza, l'altezza del soffitto, la tipologia di installazione luminosa e le esigenze personali d'illuminazione.

La norma *UNI/TS 11826:2021 "Luce e Illuminazione - Illuminazione di interni residenziali domestici con luce artificiale"*, stabilisce le modalità per scegliere, valutare e misurare le grandezze foto-colorimetriche necessarie per definire le caratteristiche di un impianto di illuminazione artificiale per interni residenziali domestici [95]. Nella norma sono prescritte le esigenze qualitative e quantitative dell'illuminazione artificiale per gli ambienti interni residenziali domestici (valori in accordo con le indicazioni già definite dalla *UNI/TS 11826:2021*), in termini di illuminamento medio necessari in funzione del tipo di locale, compito visivo o attività da svolgere. Risulta possibile considerare per gli ambienti residenziali un valore di 100 lux come limite minimo raccomandato di illuminamento [96], sia nel caso di sola luce naturale, sia come integrazione con la luce artificiale.

1.3.1 Strumenti di misurazione - Parametri illuminotecnici

Per la valutazione dei livelli di illuminamento in ambienti interni, si ricorre comunemente all'impiego di un dispositivo noto come *luxmetro*, quale ad esempio il modello *BF06* (Figura 1.9), prodotto dalla *TROTEC*.



Figura 1.9: *Luxmetro BF06 (Trotec). Campo di misura 0-40000 lx. Risoluzione: 0.1 lux. Precisione: $\pm 5\%$ del valore misurato.*

Tale strumento si fonda sul principio della fotometria, misurando la quantità di luce visibile che incide su una specifica superficie, espressa in unità di illuminamento [lux].

Il luxmetro BF06 si avvale di un fotodiodo o di una fotocellula come sensori per rilevare la luce ambientale. Laddove la luce interagisce con il sensore, viene prodotto un segnale elettrico proporzionale alla quantità di luce incidente. Tale segnale viene successivamente elaborato dal circuito interno dello strumento e convertito in una lettura numerica che rappresenta il livello di illuminamento dell'ambiente.

Tale dispositivo risulta quindi pratico per misurare i livelli di illuminamento in diversi punti di un ambiente, permettendo una valutazione accurata della distribuzione della luce e dell'efficacia del sistema di illuminazione utilizzato.

1.4 Comfort acustico

Il comfort acustico è la condizione ambientale e psicologica di un individuo in un ambiente, in relazione ai livelli di rumore e ad altri parametri che possono compromettere la concentrazione, la comunicazione, il riposo o la salute [97, 98].

La condizione di benessere acustico dipende da vari fattori, tra cui il livello di rumore, la frequenza e l'intensità dei suoni presenti nell'ambiente, nonché la sensibilità individuale e il contesto in cui ci si trova [99].

La presenza eccessiva di suoni indesiderati o rumore nell'ambiente, al di sopra dei livelli considerati accettabili per la salute e il benessere umani, indica una condizione di inquinamento acustico [100]. Quest'ultimo inteso come "l'introduzione di rumore nell'ambiente abitativo o nell'ambiente esterno tale da provocare fastidio o disturbo al riposo ed alle attività, pericolo per la salute umana, deterioramento degli ecosistemi, dei beni materiali, dei monumenti, dell'ambiente abitativo o dell'ambiente esterno o tale da interferire con le legittime fruizioni degli ambienti stessi" [101].

Questo capitolo si propone di esaminare tale tematica in ambito residenziale, esaminando le sue diverse dimensioni, i fattori che lo influenzano e le strategie volte al suo miglioramento.

Nei contesti residenziali, diversi fattori, interni e/o esterni all'edificio, influenzano il comfort acustico. La struttura edilizia dell'edificio svolge un ruolo cruciale, poiché la qualità dei materiali impiegati e le tecniche costruttive adottate possono incidere sulla trasmissione del suono da un ambiente all'altro e dall'esterno verso l'interno dell'abitazione [102]. Ad esempio, pareti, pavimenti e soffitti realizzati con materiali acusticamente isolanti (fonoassorbenti e/o fonoisolanti), serramenti di alta qualità installati con tecniche ottimali e spessori adeguati delle stratigrafie murarie contribuiscono a ridurre la propagazione del rumore. Gli infissi, in particolare, giocano un ruolo fondamentale in questo contesto, poiché costituiscono uno degli elementi principali attraverso cui il rumore esterno può infiltrarsi all'interno dell'abitazione [103]. Utilizzando vetri stratificati, doppi o tripli, insieme a guarnizioni efficaci e un telaio ben progettato, gli infissi possono notevolmente migliorare il comfort acustico degli ambienti interni.

La disposizione degli spazi interni e la distribuzione degli elementi architettonici possono influenzare l'acustica delle singole stanze, determinando eventuali zone più o meno esposte al rumore. Fattori esterni come la vicinanza a: strade, attività produttive, attività commerciali e ricreative di

ogni genere, possono impattare sul comfort acustico della residenza [98], richiedendo strategie specifiche di isolamento o di mitigazione del suono per garantire un ambiente abitativo più confortevole.

All'interno delle unità abitative il rumore può essere generato: dagli impianti di climatizzazione (riscaldamento, raffrescamento, ventilazione), da quelli idraulici (trasporto di fluidi, scarichi, autoclavi, etc.) e da quelli di trasporto di persone e cose (ascensori, montacarichi, etc.).

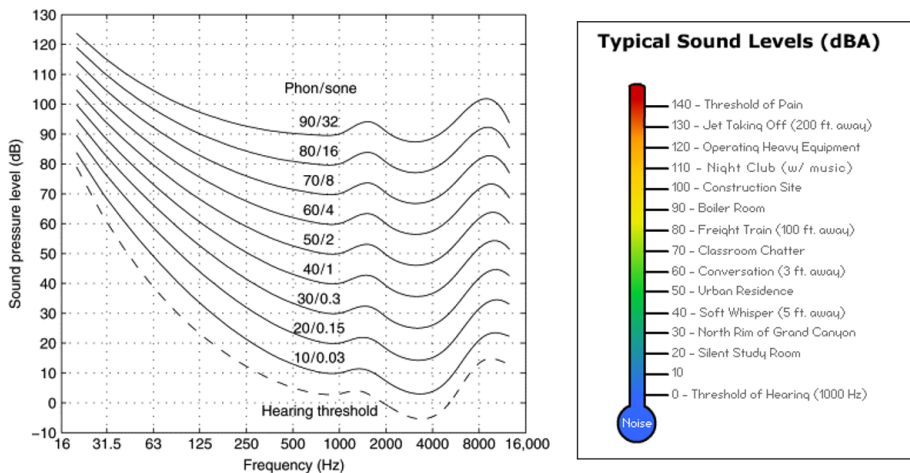


Figura 1.10: Soglia di udibilità e livelli di pressione sonora.

In termini di inquinamento acustico e di requisiti acustici passivi minimi degli edifici è possibile far riferimento al *DPCM 5 dicembre 1997 "Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici"* per la categoria *A - Edifici adibiti a residenza o assimilabili* [104, 105]. Tale decreto stabilisce i limiti di rumorosità, valore soglia, ammessi, il cui superamento è considerato sinonimo di inquinamento acustico [105].

Il criterio di valutazione del comfort acustico fa riferimento al concetto di *livello sonoro*, livello della pressione sonora, inteso come l'incremento in scala logaritmica della pressione dell'aria rispetto ad una situazione di quiete nell'aria stessa [106].

Le prestazioni che un edificio deve garantire, secondo tale norma, dipendono dalla sua destinazione d'uso e, a seconda della tipologia di rumore, si definiscono i valori minimi e massimi in *decibel (dB)* [97]. Per

la valutazione del benessere acustico i parametri presi a riferimento sono [101, 107, 108]:

- L'_n : *livello di pressione sonora di calpestio normalizzato*, riferito ad ambienti sovrapposti e/o adiacenti di differenti unità (≤ 63 dB).
- R'_w : *potere fonoisolante apparente*, riferito a divisori verticali e orizzontali fra ambienti di diverse unità (≥ 50 dB).
- $D_{2m,nT,w}$: *isolamento acustico standardizzato di facciata*, caratterizzata la capacità di una partizione di abbattere i rumori aerei provenienti dall'esterno (≥ 40 dB).

CLASSIFICAZIONE IMMOBILI AI SENSI DELLA LEGGE		CATEGORIE DI IMMOBILI	PARAMETRI DEI VALORI ESPRESSI IN DECIBEL				
CATEGORIA A	Edifici adibiti a residenza o assimilabili		R'_w	$D_{2m,nT,w}$	$L'_{n,w}$	$L_{w,max}$	$L_{w,eq}$
CATEGORIA B	Edifici adibiti a uffici e assimilabili	D	55	45	58	35	25
CATEGORIA C	Edifici adibiti ad alberghi, pensioni e attività assimilabili	A, C	50	40	63	35	35
CATEGORIA D	Edifici adibiti ad ospedali, cliniche, case di cura e assimilabili	E	50	48	58	35	25
CATEGORIA E	Edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli e assimilabili	B, F, G	50	42	55	35	35
CATEGORIA F	Edifici adibiti a attività ricreative o di culto o assimilabili						
CATEGORIA G	Edifici adibiti ad attività commerciali o assimilabili						

Figura 1.11: *Classificazione immobili ai sensi del "DPCM 5 dicembre 1997" - Definizione dei requisiti acustici passivi degli edifici.*

La carenza dei requisiti acustici indispensabili nelle abitazioni ne compromette la loro capacità di garantire le funzioni fondamentali per un'adeguata abitabilità. È noto che, al giorno d'oggi, il mancato rispetto delle normative vigenti in materia di acustica determina una rilevante svalutazione del valore dell'immobile acquistato.

In linea generale per limitare l'interferenza e/o il disturbo da rumore è necessario, in fase di progettazione di un involucro edilizio, porre l'attenzione sui seguenti aspetti:

- l'isolamento acustico delle facciate, studiando le migliori soluzioni, in termini di efficienza acustica, delle tamponature e dei serramenti;
- l'isolamento acustico dei divisori verticali ed orizzontali (isolamento al calpestio delle solette), migliorabile attraverso applicazione o inserzione di materiali ad elevata resa acustica (pannelli in lana di roccia o vetro e tappetini anticalpestio);
- il basso livello di emissione degli impianti, con l'utilizzo di soluzioni e componenti a basso rumore intrinseco.

1.4.1 Strumenti di misurazione - Parametri acustici

Nel contesto della progettazione degli spazi abitativi e lavorativi, la valutazione del comfort acustico riveste un ruolo fondamentale nel garantire il benessere degli individui e la qualità degli ambienti interni. Per misurare e valutare in modo accurato il livello di comfort acustico, sono utilizzati diversi strumenti e metodi.

Uno dei principali strumenti impiegati è il *fonometro*, che consente di misurare il livello di pressione sonora, in decibel (dB), all'interno di un ambiente. Questo strumento fornisce informazioni oggettive sul rumore presente nell'ambiente e può essere utilizzato per identificare fonti di disturbo acustico [109].

Oltre al fonometro, sono disponibili analizzatori di spettro sonoro, che consentono di analizzare la composizione spettrale del suono. Questi strumenti sono particolarmente utili per identificare le frequenze specifiche dei rumori presenti nell'ambiente, aiutando gli esperti acustici a progettare soluzioni mirate per ridurre il disturbo [110].

Per valutare la qualità acustica di un ambiente, vengono impiegati anche microfoni a impulsi, utilizzati per misurare il tempo di riverbero, cioè il tempo necessario affinché un suono si attenui di 60 decibel (dB) dopo l'interruzione della sorgente sonora [111, 112]. Un tempo di riverbero ottimale contribuisce a garantire un ambiente confortevole e privo di riverberazione eccessiva.

Organismi accreditati in ambito acustico, per certificare il livello di isolamento acustico tra abitazioni, utilizzano una strumentazione costituita da un martelletto acustico e un microfono. Il martelletto acustico viene impiegato per generare un impulso sonoro controllato che simula il calpestio umano. Questo impulso viene quindi registrato dal microfono posizionato in un locale differente della stessa unità abitativa oppure in una unità abitativa adiacente, a una distanza standard dal punto di impatto [113]. I dati acquisiti vengono analizzati per valutare varie proprietà del pavimento, inclusi l'isolamento acustico e la trasmissione del suono.

In aggiunta agli strumenti di misurazione oggettiva, risulta fondamentale considerare la percezione del livello di rumore da parte degli occupanti dell'ambiente. L'utilizzo di analisi descrittive sulle caratteristiche acustiche degli elementi costitutivi dell'edificio consente di definire il livello di rumore e migliorare il comfort acustico complessivo.

Integrando diverse metodologie di valutazione, è possibile ottenere una

panoramica completa del comfort acustico degli spazi interni e implementare le azioni necessarie per migliorare la qualità degli ambienti residenziali e lavorativi, favorendo il benessere e l'efficienza delle persone.

Capitolo 2

Certificazione di qualità in edilizia

2.1 Protocolli di certificazione della sostenibilità degli edifici

La crescita demografica, associata alla conseguente domanda di edifici e servizi, genera una crescente richiesta di energia a livello mondiale. Tale richiesta ha di conseguenza forti ripercussioni a livello ambientale, in termini di riscaldamento globale e cambiamento climatico. Nei paesi sviluppati gli edifici sono responsabili, in una percentuale significativa, del consumo totale di energia, compresa tra il 30 - 40% [114].

L'efficienza energetica negli edifici risulta essere un obiettivo primario per la politica energetica a livello mondiale. L'incremento dei costi energetici e la crescente attenzione per le tematiche ambientali sono i catalizzatori per la progettazione di edifici sostenibili a basso impatto. La certificazione della sostenibilità ambientale degli edifici è un processo volto a valutare e attestare l'efficienza, l'impatto ambientale delle costruzioni e il livello di sostenibilità di edifici edili e civili.

Molteplici sono i protocolli di certificazione riconosciuti a livello nazionale e internazionale, ciascuno con i propri criteri e metodologie di valutazione [115, 116]. In Italia, i principali protocolli di certificazione della sostenibilità degli edifici applicabili per promuovere la costruzione di edifici ecocompatibili sono: LEED, Itaca e CasaClima [117].

Il protocollo *LEED, Leadership in Energy and Environmental Design*, sviluppato dal *U.S. Green Building Council (USGBC)*, rappresenta uno dei sistemi di certificazione più autorevoli a livello globale per la costruzione sostenibile [118, 119]. Il protocollo valuta gli edifici in base a otto categorie: trasporto e ubicazione, sostenibilità del sito, efficienza delle risorse idriche, energia e atmosfera, materiali e risorse, qualità degli ambienti interni, innovazione, priorità regionale. Ogni categoria contribuisce all'assegnazione di punti che determinano il livello di certificazione tra: *Base, Argento, Oro e Platino* [120, 121, 122]. In Italia, il protocollo LEED è ampiamente adottato e riconosciuto, contribuendo significativamente alla realizzazione di edifici con un approccio orientato alla sostenibilità e al miglioramento della qualità della vita degli occupanti [119, 123, 124].

Il protocollo *ITACA*, sviluppato dall'*Istituto per l'Innovazione e la Trasparenza degli Appalti e la Compatibilità Ambientale*, si basa sulla norma *UNI/PdR 13:2023*. Tale protocollo valuta gli edifici mediante un'analisi multicriterio che prende in considerazione aspetti ambientali, sociali ed economici. Le categorie di valutazione includono: sviluppo e rigenerazione del sito, energia e consumo delle risorse, carichi ambientali, qualità ambientale indoor, qualità del servizio, adattamento ai cambiamenti climatici [125]. Il sistema di punteggio del protocollo ITACA permette di attribuire un valore complessivo che determina il livello di sostenibilità dell'edificio, suddiviso in quattro livelli: *Base, Buono, Ottimo ed Eccellente*. In Italia, il protocollo ITACA è ampiamente utilizzato per edifici pubblici e privati, contribuendo significativamente alla promozione di pratiche edilizie sostenibili e alla riduzione dell'impatto ambientale del settore delle costruzioni [126, 127].

Il protocollo *CasaClima*, sviluppato dall'omonima Agenzia della Provincia Autonoma di Bolzano, è uno tra i più diffusi sistemi di certificazione per la sostenibilità degli edifici in Italia. Le linee guida imposte dalle *Direttiva Tecnica Nuovi Edifici* rappresentano lo strumento per l'ottenimento della certificazione energetica in edifici di nuova costruzione. Allo stesso modo, per il risanamento degli edifici esistenti, è prevista una *Direttiva Tecnica Edifici Esistenti & Risanamento*. Secondo tale protocollo, le categorie di valutazione includono: efficienza energetica dell'involucro edilizio, impianti tecnici, comfort interno, sostenibilità dei materiali, ermeticità dell'involucro. Il protocollo prevede diversi livelli di certificazione, che indica-

no il grado di sostenibilità e di efficienza energetica raggiunto dall'edificio, come: *Gold*, *A* e *B*.

In Italia, l' Agenzia per l'Energia Alto Adige – CasaClima è particolarmente diffusa nelle regioni settentrionali, essendo un ente strumentale della Provincia Autonoma di Bolzano, ma sta guadagnando crescente riconoscimento a livello nazionale. Il protocollo contribuisce significativamente alla realizzazione di edifici a basso consumo energetico e a ridotto impatto ambientale, migliorando la qualità della vita degli occupanti e promuovendo pratiche edilizie ecocompatibili. Tali abitazioni costituiscono esempi eccellenti di edilizia sostenibile, con un'attenzione particolare all'ottimizzazione delle risorse ambientali e all'adozione di tecnologie avanzate per il risparmio energetico.

L'analisi approfondita degli aspetti tecnici e dei benefici ambientali connessi alla certificazione CasaClima, presentata nel paragrafo successivo, assume un'importanza fondamentale per il presente progetto di ricerca, volto alla definizione di un indice di comfort abitativo. In particolare, sono state condotte attività di monitoraggio e studio su abitazioni con differenti tecniche costruttive e impiantistiche, al fine di valutare come le misure di efficientamento energetico concorrano anche a garantire il comfort abitativo, e come quest'ultimo vari in funzione di tali differenze.

Per la formulazione dell'indice di comfort abitativo, è stato condotto uno studio approfondito del protocollo CasaClima, concentrando l'attenzione sulle fasi di progettazione, realizzazione e verifica di diverse abitazioni certificate secondo questo standard. Tale approccio ha consentito di identificare i parametri ambientali più significativi per il comfort abitativo, come la temperatura operativa, la concentrazione di composti organici volatili *COV* e *PM*₁₀, nonché l'illuminazione interna, permettendo di sviluppare un indice di comfort abitativo in grado di essere applicato a tutte le tipologie di edifici.

2.2 Certificazione *CasaClima*

Il protocollo CasaClima è stato istituito nel 2002 in risposta alle esigenze del Protocollo di Kyoto di ridurre le emissioni di gas serra. CasaClima si è affermato come soluzione, nel settore edilizio, alla necessità di abbattere tali emissioni [116]. Agisce come un ente della Provincia Autonoma di Bolzano, con l'obiettivo di eseguire la certificazione energetica obbliga-

toria degli edifici situati in Alto Adige. A livello nazionale, invece, svolge una funzione di verifica opzionale e rappresenta un protocollo di qualità volontario [128].

Oltre alla sua funzione di certificazione energetica, CasaClima si impegna anche nella formazione e nella sensibilizzazione dei cittadini e dei professionisti [129]. Non è concepita solo come "categoria energetica", ma anche come una tipologia architettonica che punta a garantire un elevato livello di comfort interno, contribuendo a migliorare il benessere abitativo e a tutelare l'ambiente, riducendo i costi di riscaldamento e raffrescamento.

Le caratteristiche distintive di un'abitazione CasaClima possono essere sintetizzate in alcuni elementi fondamentali, tra cui:

- massimi livelli di isolamento termico e acustico dell'involucro, con particolare attenzione all'eliminazione dei ponti termici, per ridurre al minimo le dispersioni energetiche e massimizzare il comfort termoigrometrico;
- impiantistica performante, che ottimizza l'efficienza energetica degli edifici, garantendo un uso ottimale delle risorse e riducendo i consumi;
- struttura compatta, che contribuisce a ridurre le superfici disperdenti, migliorando l'efficienza energetica complessiva dell'edificio;
- elevata tenuta all'aria, che minimizza le infiltrazioni non controllate, migliorando l'efficienza energetica e il comfort abitativo;
- utilizzo di fonti energetiche rinnovabili, promuovendo l'integrazione di tecnologie pulite e sostenibili per la produzione di energia, riducendo l'impatto ambientale dell'edificio.

Progettare e realizzare un'abitazione implica assicurare il massimo livello di comfort per gli occupanti, garantire il rispetto per l'ambiente e fornire i più elevati standard di sicurezza. Pertanto, la certificazione CasaClima può essere definita come *"un metodo costruttivo con uno standard energetico"*. La scelta di materiali adeguati, tecnologie avanzate e sistemi impiantistici all'avanguardia consente la realizzazione, o la riqualificazione, di abitazioni a bassissimo consumo energetico, in modo da garantire un elevato comfort indoor, per soddisfare appieno le esigenze dei residenti. Una "CasaClima" è, innanzitutto, un edificio progettato per ridurre

al minimo il fabbisogno energetico, massimizzando l'utilizzo di un'impiantistica moderna ed efficiente, preferibilmente sfruttando fonti energetiche rinnovabili.

L'Agenzia CasaClima, in qualità di ente terzo non coinvolto nella progettazione o nella realizzazione dell'immobile specifico, tutela gli interessi sia dei costruttori sia dei futuri residenti. Ad oggi, migliaia sono i nuovi edifici e progetti di ristrutturazione che hanno ottenuto la certificazione CasaClima, facendo sì che in poco tempo tale marchio diventasse un vero e proprio punto di riferimento per un costruire energeticamente efficiente e sostenibile, non solo a livello nazionale. Per valorizzare l'immobile, a conclusione di un iter di certificazione basato su controlli in fase di progettazione, audit in cantiere e verifica della documentazione specifica, viene consegnata, oltre al *certificato CasaClima*, una targa che simboleggia visivamente la qualità costruttiva.

Il protocollo CasaClima classifica gli edifici in *classe di prestazione energetica* sulla base del fabbisogno annuo di calore per il riscaldamento, calcolato in relazione alla superficie utile riscaldata. Le *classi CasaClima* definiscono il grado di consumo energetico di un edificio come segue:

Classe <i>CasaClima</i>	Efficienza energetica involucro [kWh/m ² a]	Efficienza energetica complessiva [kg CO _{2,eqv} /m ² a]
<i>Gold</i> ¹	≤10	≤15
A ¹	≤30	≤30
B	≤50	≤50
C	≤70	≤70
D	≤90	≤90
E	≤120	≤120
F	≤160	≤160
G	>160	>160

Tabella 2.1: Classi energetiche CasaClima e relativo grado di fabbisogno energetico dell'involucro.

¹Un edificio di classe energetica *CasaClima A* o *Gold* (efficienza energetica dell'involucro ed efficienza energetica complessiva) corrisponde alla definizione di "Edificio ad energia quasi zero - nZEB", ai sensi della *Direttiva Europea 31/2010/UE Art.2, comma 2*.

La *CasaClima Gold* descrive l'abitazione che garantisce il più basso consumo energetico, richiedendo un fabbisogno energetico di $10 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, il che si può garantire, nella pratica, anche in assenza di un sistema di riscaldamento attivo.

Oltre all'indice termico, il protocollo di certificazione prevede il calcolo del rendimento energetico complessivo del sistema edificio-impianti, espresso in *fabbisogno annuo di energia primaria* per riscaldamento, raffrescamento, produzione di acqua calda sanitaria e illuminazione e l'indice di emissione di CO_2 equivalente. Ulteriore requisito minimo imposto è quello dell'utilizzo delle energie rinnovabili; la delibera impone che il 50% del fabbisogno di energia primaria sia coperto da energie rinnovabili ed il 60% del fabbisogno di ACS (acqua calda sanitaria) sia fornito anch'esso da fonti rinnovabili.

La classificazione energetica CasaClima si basa su differenti norme tecniche di calcolo europee che forniscono le linee guida per la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici, considerando essenzialmente:

- dati tecnici dell'edificio, come dati geometrici e stratigrafici;
- dati climatici standard, come zona climatica altitudine;
- dati impiantistici (riscaldamento, raffrescamento, areazione e acqua calda sanitaria);
- efficienza dei sistemi produttivi, di distribuzione e accumulo.

Un edificio CasaClima non è vincolato a uno stile architettonico, ma necessita di uno specifico standard energetico. Nella fase iniziale, in una progettazione CasaClima, è importante definire lo standard energetico da ottenere, quindi la classe che si vuole raggiungere, minimizzando i fabbisogni energetici e, ove possibile, coprendo il fabbisogno energetico richiesto mediante l'impiego di fonti energetiche rinnovabili.

Come precedentemente illustrato, il protocollo CasaClima classifica gli edifici in classe di prestazione energetica, basata sul fabbisogno annuo di calore per il riscaldamento. Il calcolo del fabbisogno termico per riscaldamento prende in considerazione la superficie netta riscaldata, determinando la quantità di calore necessaria per mantenere una temperatura interna costante di 20°C . Il calcolo prevede un bilancio termico in cui vengono prese in considerazione le perdite o le dispersioni di calore e gli apporti sfruttabili per il riscaldamento. In un edificio ad alte prestazioni energetiche,

i "guadagni termici" risultano cruciali, poiché riducono significativamente il fabbisogno termico. Questi guadagni, ottenuti dal calore solare esterno, contribuiscono direttamente al riscaldamento degli ambienti interni. I guadagni termici solari, derivanti dall'irradiazione solare, dipendono da vari fattori come la quantità di superficie vetrata, il valore del fattore solare del vetro, le ombreggiature esterne e le condizioni climatiche. Pertanto, è essenziale considerare l'orientamento dell'edificio, dimensionare opportunamente le superfici vetrate, scegliendo adeguatamente gli infissi per ottimizzare tali guadagni.

Nella progettazione di un edificio, sia esso sottoposto o meno a certificazione CasaClima, è fondamentale identificare il sito ottimale per massimizzare l'utilizzo dell'energia solare e minimizzare le dispersioni. Tra i principali aspetti da considerare in fase di progettazione vi è la topografia del luogo, che comprende la valutazione dell'altitudine, dell'orientamento e della pendenza del terreno, la presenza o meno di ostacoli come alberature, edifici circostanti o rilievi, che possano limitare il soleggiamento nel periodo invernale e compromettere l'efficace utilizzo dell'energia solare. Inoltre, un edificio situato in posizioni sopraelevate sarà caratterizzato da un'eccessiva esposizione a venti e precipitazioni, aumentando così le dispersioni termiche. Al contrario, un posizionamento a fondovalle presenta aspetti negativi, per la maggior esposizione all'aria fredda e all'umidità e la minor ricezione delle radiazioni solari. Questi fattori incidono significativamente sulle prestazioni energetiche complessive dell'edificio, di conseguenza, il suo l'orientamento è di fondamentale importanza.

L'edificio deve essere progettato per adattarsi alle diverse stagioni e alla variazione dell'intensità dei raggi solari. In estate, i raggi solari sono più intensi e colpiscono diversi lati dell'edificio (est, sud, ovest e la copertura). In inverno, sebbene il sole abbia una radiazione meno intensa e sia più basso sull'orizzonte, il lato sud può comunque ricevere un buon apporto solare. A tale scopo, è consigliabile progettare ampie vetrate sul lato sud dell'edificio, al fine di ottimizzare l'illuminazione naturale e favorire l'ingresso della luce solare diretta. Collocare qui la *zona giorno* permetterà di massimizzare sia il comfort visivo sia quello termico, in quanto l'esposizione a sud contribuisce a ridurre il fabbisogno energetico per l'illuminazione artificiale e il riscaldamento, migliorando complessivamente l'efficienza energetica dell'edificio. La parete esposta a nord, non ricevendo apporti di alcun genere, deve avere la minor superficie finestrata possibile per ridurre al minimo le dispersioni. Sui lati est e ovest bisogna cercare di limitare

le aperture e assicurarsi di schermarle adeguatamente per evitare il surriscaldamento in estate. Nel caso ci siano vincoli urbanistici, ostruzioni o scelte progettuali che non permettano di avere un'esposizione ottimale, si dovrà sopperire a queste mancanze in altre maniere, come, ad esempio, aumentare l'isolamento della parete.

In aggiunta, la grande falda del tetto orientata a sud rappresenta una posizione ideale per l'installazione di pannelli solari e fotovoltaici. Questo non solo favorisce la produzione di energia rinnovabile, ma contribuisce anche a migliorare l'efficienza energetica complessiva dell'edificio. Ottimizzare questi aspetti fin dalle prime fasi della progettazione è essenziale per ridurre il consumo di energia, migliorare il comfort abitativo e promuovere la sostenibilità ambientale.

Le dispersioni di calore in un edificio avvengono in accordo con il secondo principio della termodinamica, secondo il quale il calore tende a fluire spontaneamente da un corpo più caldo a uno a minor temperatura. Di conseguenza, le superfici di un edificio perdono calore quando sono tra due ambienti con temperature diverse. Questo fenomeno si verifica generalmente in ambienti con pareti verso l'esterno, in corrispondenza di ambienti non riscaldati come i vani non abitati, i solai a contatto con il terreno e il tetto. Come si può notare in Figura 2.1, le superfici disperdenti di un edificio tipo, sono molteplici, e sono differenziate in base all'elemento confinante, ovvero: esterno, ambiente non riscaldato (cantina, box auto...) o controterra.

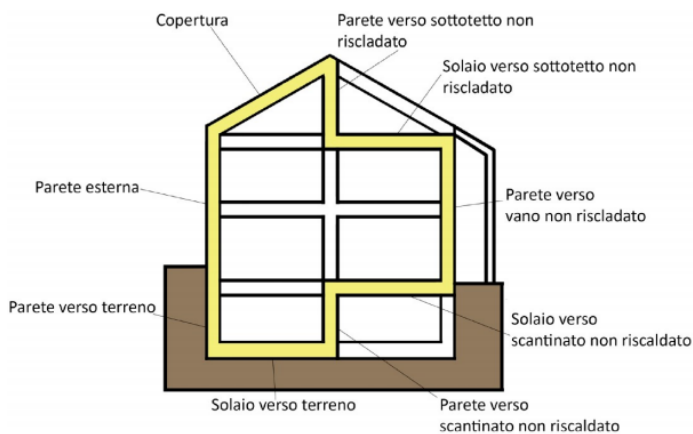


Figura 2.1: Schematizzazione elementi disperdenti di un edificio tipo.

Seguendo questa logica, si comprende come un edificio con meno superfici esposte verso l'esterno disperda meno calore rispetto a uno con una distribuzione più estesa. Gli edifici che includono più unità abitative, come i condomini, presentano un rapporto superficie/volume più favorevole. Questo perché ciascun appartamento ha meno superfici a contatto con spazi non riscaldati, escludendo il flusso tra unità abitative adiacenti che hanno la stessa temperatura.

Le perdite per trasmissione di calore avvengono attraverso gli elementi costitutivi, sia trasparenti che opachi, dell'involucro edilizio. Queste sono influenzate da vari fattori, tra cui le condizioni climatiche esterne, il grado di isolamento dell'involucro e la superficie totale degli elementi costruttivi che disperdono calore. Per ridurre al minimo le perdite di calore è fondamentale assicurare un eccellente isolamento dell'edificio, che consente di trattenere il calore all'interno più a lungo, andando a garantire la massima compattezza dell'edificio, riducendo così il numero di superfici disperdenti.

Un'altra importante fonte di dissipazione di calore è rappresentata dalla ventilazione, per cui il calore viene disperso durante i ricambi d'aria. Solitamente, la ventilazione avviene aprendo i serramenti, il che comporta, ad esempio, l'ingresso di aria fredda nell'ambiente interno (stagione invernale), aumentando così il fabbisogno termico per mantenere la temperatura interna al valore desiderato. Anche la presenza di fessure nelle giunzioni tra serramenti e partizioni è spesso motivo di dispersioni termiche indoor. Minimizzare tali perdite di calore è possibile andando a esaminare attentamente le giunzioni intorno alle aperture di un edificio, come porte e finestre, procedendo alla loro sigillatura con guarnizioni appropriate o mastici sigillanti. È altresì importante verificare che i serramenti siano correttamente chiusi e che siano stati installati in modo che l'accoppiamento tra la parte mobile (anta) e la parte fissa (telaio) sia adeguato e ermetico.

Un sistema altamente performante che minimizza le dispersioni di calore e assicura aria salubre è rappresentato dall'utilizzo di sistemi di ventilazione meccanica controllata (VMC) con recupero di calore. Questi sistemi sono progettati per mitigare l'incremento del consumo energetico necessario al riscaldamento, derivante dall'introduzione di aria fredda dall'esterno.

La progettazione di un edificio CasaClima non ha specifiche caratteristiche costruttive, le principali necessità sono legate all'ottenimento della massima efficienza energetica e del comfort abitativo. Questa tipologia costruttiva si contraddistingue per un isolamento esterno continuo. È pos-

sibile optare per diverse tecniche costruttive e scegliere quella che meglio si adatta alle necessità del progetto, le principali tipologie costruttive sono suddivise in costruzione massiccia, costruzione massiccia in legno e costruzione leggere.

In particolare, il metodo costruttivo più diffuso ancora oggi è quello delle costruzioni massicce, che si contraddistingue per l'utilizzo di materiali come mattoni, calcestruzzo o materiali simili, caratterizzati da spessori considerevoli e una conseguente capacità elevata di accumulare calore. Tale inerzia termica, di cui è dotato il materiale costruttivo maggiormente utilizzato, il laterizio, permette di accumulare calore e rilasciarlo gradualmente nel tempo, tale da consentire un aumento di temperatura dell'aria interna ridotto, grazie allo *sfasamento termico elevato* (capacità di un materiale o di una struttura di ritardare il trasferimento del calore da un lato all'altro). In altre parole, rappresenta il tempo necessario affinché il calore esterno raggiunga l'interno di un edificio; un alto sfasamento termico contribuisce significativamente a mantenere gli ambienti interni più freschi durante l'estate e più caldi durante l'inverno, migliorando il comfort abitativo e l'efficienza energetica complessiva.

La costruzione massiccia risulta essere una tipologia costruttiva con un'elevata flessibilità architettonica. La durabilità dei materiali impiegati assicura una notevole stabilità strutturale, contribuendo così a mantenere un valore economico costante nel tempo.

Se isolata adeguatamente, l'abitazione è in grado di accumulare calore sia in estate che in inverno massimizzando il comfort termoigrometrico all'interno dell'edificio. Nel periodo invernale l'isolante viene sfruttato per la sua ridotta *trasmissione termica*, capacità di un materiale o di un elemento costruttivo di consentire il passaggio del calore attraverso di esso, e *conduttività termica*, proprietà fisica dei materiali che indica la capacità di un materiale di condurre il calore. Nel periodo estivo, l'isolamento è sfruttato per il suo sfasamento termico, motivo per cui è importante scegliere un materiale isolante con un'inerzia termica consona.

All'interno di un nucleo abitativo è fondamentale che l'umidità relativa oscilli tra il 40% ed il 60%, infatti, le costruzioni massicce si dimostrano ottimali per soddisfare tali requisiti.

Relativamente al comfort acustico, la costruzione massiccia risulta avere caratteristiche rilevanti; infatti, grazie al peso specifico di cui è dotato il laterizio, è possibile ottenere buoni livelli di acustica interna. Per avere un involucro massiccio performante è inoltre fondamentale la sua tenuta all'a-

ria. Per un edificio CasaClima quest’ultima è un aspetto imprescindibile, infatti è essenziale che tutte le aperture e le forature siano sigillare. La certificazione CasaClima richiede il superamento del *Blower-Door-Test*, per misurare la tenuta all’aria di un edificio, come condizione imprescindibile.

In ogni caso, per ottenere le massime condizioni di comfort per l’edificio è fondamentale la collaborazione sinergica di tutti i componenti dell’edificio e l’inserimento, nelle partizioni orizzontali e verticali, di materiali fonoisolanti e/o fonoassorbenti.

2.2.1 Blower-Door-Test

Tramite il Blower-Door-Test viene misurata la tenuta all’aria dell’involucro edilizio, ovvero la permeabilità all’aria.

Il Blower-Door-Test va eseguito secondo quanto specificato nella *Direttiva Tecnica Blower-Door-Test* e conformemente alla norma *UNI EN ISO 13829* [130]. Il Blower-Door-Test deve essere sempre eseguito sulle singole unità abitative e non sull’intero edificio. Le verifiche di tenuta all’aria dell’edificio devono essere svolte su un campione di unità abitative distinte per piano e orientamento. La tabella seguente riporta la quantità di test da svolgersi in un edificio plurifamiliare.

Unità abitative edificio	Unità abitative minime per BDT
≤ 5	1
≤ 10	2
≤ 15	3
≤ 22	4
> 22	5

Tabella 2.2: Valori minimi per test BDT in un edificio plurifamiliare.

Il Blower-Door-Test per la certificazione CasaClima è obbligatorio, secondo la UNI EN ISO 13829, per tutti gli edifici residenziali di nuova costruzione, per edifici con presenza di sistema di VMC e per abitazioni realizzate con struttura “a secco”. CasaClima fissa dei valori limite di tenuta all’aria relativamente alla classe energetica dell’edificio.

Classe <i>CasaClima</i>	Valore limite n_{50}
<i>Gold</i>	$\leq 0.6 [h^{-1}]$
<i>A, B</i>	$\leq 1.5 [h^{-1}]$
<i>CasaClima R</i>	$\leq 3 [h^{-1}]$

Tabella 2.3: Valori limite per BDT suddivisi per classe *CasaClima*.

La strumentazione necessaria ad effettuare il Blower-Door-Test (Figura 2.2) si compone essenzialmente di: un ventilatore di sezione regolabile tramite diaframmi e sistema di regolazione della velocità delle girante, un telaio regolabile in altezza e larghezza e adattabile alle più comuni dimensioni di porte e finestre con telo di nylon per l'inserimento, nell'apertura predisposta, del ventilatore. Inoltre, è presente un dispositivo in grado di misurare la differenza di pressione tra interno ed esterno e le differenze di pressione generate dal ventilatore [131].



Figura 2.2: Unità abitativa sottoposto a Blower-Door-Test.

La normativa non indica un posizionamento preferenziale del telaio

metallico; nella maggior parte dei casi si installa l'apparecchiatura in corrispondenza di una portafinestra o, qualora il telaio non ricoprisse le dimensioni del vano, in corrispondenza di una finestra o della porta d'ingresso. Una volta che il telaio viene regolato in altezza e larghezza e ricoperto dal telo di nylon che ospiterà il ventilatore, viene correttamente posizionato nell'apposita apertura. Tale dispositivo è in grado di generare una differenza di pressione, andando a mettere in pressione e depressione l'unità abitativa, fino ad un valore massimo, Δp_{max} , pari a 50 Pa, così da simulare un vento incidente sull'edificio a 30 km/h. In corrispondenza del telo si installano, a perfetta tenuta, tubi di silicone di piccolo diametro per garantire la misurazione delle pressioni. Due di essi collegano il ventilatore al dispositivo di rilevazione dei dati. Gli altri due invece collegano interno ed esterno in modo da realizzare la misurazione della pressione dell'edificio sottoposto alla prova, mantenendo l'ermeticità. Per mantenere tale pressione il ventilatore immette o aspira una data quantità d'aria, funzione del volume netto dell'abitazione. La portata del ventilatore è regolabile grazie all'applicazione di maschere circolari di sezione variabile, diaframmi. Affinché il risultato della prova sia corretto, è necessario inserire nell'apposito software di elaborazione dati i valori di temperatura e umidità interna ed esterna. In questo modo il programma provvede automaticamente alla correzione dei valori derivati dalla curva di calibrazione del ventilatore, che sono riferiti alla condizione reale. Un altro dato importante da rilevare prima dell'esecuzione del test è la velocità del vento; la norma raccomanda di non effettuare la prova qualora si superasse il valore di 19 km/h.

Applicando questa metodologia, si è in grado di misurare i ricambi d'aria a differenze di pressioni, tra ambiente interno ed esterno, significativamente maggiori di quelle normalmente presenti (causate dai fenomeni naturali quali il vento). Ciò comporta l'esecuzione di cinque punti di misurazioni ad una differenza di 10 pascal l'uno dall'altro (50 Pa, 40 Pa, 30 Pa, 20 Pa, 10 Pa), in modo da ottenere un risultato finale medio che sia meno soggetto alle variazioni delle condizioni esterne. CasaClima fissa dei valori massimi di tenuta all'aria in base alla classe energetica dell'edificio che si sta analizzando. La tenuta all'aria è data dal valore n_{50} che esprime il numero di ricambi d'aria necessari per mantenere tale Δp_{max} all'interno dell'edificio. Il valore ottenuto alla pressione di riferimento $n_{\Delta p}$ è dato dalla formula:

$$n_{\Delta p} = \frac{q_p}{V} \quad (2.1)$$

con:

- $n_{\Delta p}$: indice di ricambio d'aria [h^{-1}] (qualora la pressione di riferimento sia di 50 Pa diventa n_{50});
- q_p : portata media di infiltrazione in entrata e in uscita alla pressione di riferimento [m^3/h] (qualora la pressione di riferimento sia di 50 Pa diventa q_{50});
- V : volume netto interno [m^3](volume d'aria all'interno dell'edificio soggetto alla prova).

Minore sarà il valore n_{50} , maggiore sarà il grado di tenuta all'aria dell'involucro.

Capitolo 3

Indice Comfort Abitativo

Il concetto di comfort abitativo ha acquisito crescente rilevanza negli ultimi anni, in un contesto caratterizzato da un'evoluzione significativa delle pratiche edilizie, delle tecnologie e della sensibilità ambientale. Oggi, il comfort abitativo non è più visto come un semplice aspetto accessorio dell'architettura e dell'ingegneria civile, ma come un elemento centrale che incide direttamente sul benessere psicofisico delle persone. Tale cambiamento è stato guidato da una crescente consapevolezza degli effetti che l'ambiente costruito ha sulla salute, la produttività e la qualità della vita degli occupanti [132, 133].

Ad oggi, diversi studi e ricerche hanno cercato di definire e misurare il comfort abitativo attraverso lo sviluppo di indici e parametri oggettivi. Tra i più noti e utilizzati, vi sono indici come il PMV (Predicted Mean Vote) e il PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) per il benessere termico, che tengono conto di fattori come la temperatura, l'umidità e la velocità dell'aria percepita dagli occupanti [134, 135]. In aggiunta a questi, gli standard internazionali come l'ASHRAE 55 e l'ISO 7730 regolano le linee guida per garantire livelli adeguati di comfort negli edifici.

Negli ultimi anni, l'attenzione si è progressivamente spostata verso un approccio più olistico; l'integrazione di tecnologie intelligenti e l'uso di sensori per il monitoraggio in tempo reale delle condizioni ambientali hanno reso possibile una gestione più dinamica e adattiva del comfort negli spazi abitativi [136, 137].

La progettazione di edifici ad elevato comfort abitativo richiede quindi un equilibrio tra esigenze tecniche e di benessere degli occupanti. In questo contesto, l'adozione di standard di certificazione internazionali come

il *LEED*, *ITACA*, *CasaClima* permette di stabilire criteri precisi per la valutazione del comfort abitativo, in sinergia con obiettivi di sostenibilità e risparmio energetico.

Nella letteratura, la valutazione del comfort indoor è ampia quando si considerano ambienti come scuole, università e uffici [138, 139]. Tuttavia, la valutazione del comfort abitativo tende a essere limitata a un'analisi parziale dei parametri ambientali. Molti studi si concentrano prevalentemente su aspetti quali: condizioni termoigrometriche e qualità dell'aria, trascurando fattori altrettanto rilevanti come l'acustica e l'illuminazione [140]. Inoltre, nella valutazione del comfort termico, si fa spesso riferimento esclusivamente alla temperatura ambiente, senza considerare l'importanza delle correnti d'aria, della temperatura media radiante e dell'umidità relativa. Analogamente, nella misurazione della qualità dell'aria interna, numerosi studi analizzano come unico fattore inquinante i livelli di concentrazione di CO_2 , ignorando la presenza di contaminanti atmosferici più nocivi, come il particolato fine (PM) e i composti organici volatili (VOC) [141]. In aggiunta, si riscontra una carenza di approfondimenti sulla descrizione della fase di monitoraggio, compresi la posizione e la tipologia degli strumenti impiegati. La correlazione tra le modalità costruttive adottate, che esercitano un impatto notevole sull'efficienza energetica e sul comfort generale degli spazi abitativi [142].

Questo studio si propone di colmare questa lacuna integrando sia aspetti soggettivi che oggettivi nell'analisi del comfort abitativo. Attraverso un approccio completo, in grado di esaminare i fattori ambientali di maggior rilievo in ambiente residenziale, unendo tali variabili in un applicativo che permetta di quantificare e qualificare in modo standardizzato il comfort residenziale. Questa metodologia non solo fornisce una valutazione oggettiva delle condizioni ambientali, ma integra anche la percezione soggettiva degli occupanti, creando così un sistema più accurato e rappresentativo del comfort abitativo.

Il presente lavoro di tesi si propone di affrontare questi aspetti in modo integrato, analizzando in modo esaustivo la relazione tra vari parametri ambientali e comfort abitativo. L'obiettivo generale del presente progetto è sviluppare una metodologia sistematica per la determinazione di un *indice di comfort abitativo*.

Per la realizzazione di tale obiettivo, è stato necessario procedere in mo-

do sequenziale, definendo dapprima indicatori ambientali distintivi del benessere abitativo (parametri ambientali) per ciascuno dei principali fattori ambientali:

- termoigrometrici;
- qualità dell'aria;
- visivi;
- acustici.

Parallelamente, sono stati definiti i limiti di accettabilità per ciascun parametro ambientale, sulla base di norme tecniche e di quanto presente in letteratura; a ciascun parametro ambientale è stato attribuito un peso specifico, determinato in base alle risposte ottenute da un campione rappresentativo della popolazione.

Per valutare l'importanza relativa e l'impatto dei vari parametri ambientali sul comfort indoor percepito dagli utenti, è stata adottata una metodologia basata sull'analisi delle risposte fornite attraverso un questionario d'indagine. In particolare, sono stati raccolti dati su l'importanza e il livello di soddisfazione, di un campione, per ciascun parametro ambientale (comfort termoigrometrico, qualità dell'aria, comfort visivo e acustico) all'interno della propria unità abitativa, al fine di identificare i fattori che influenzano maggiormente il benessere abitativo.

Le risposte sono organizzate in quattro categorie: da *molto importante* a *non importante*, per valutare l'importanza di ciascun fattore di comfort abitativo; e da *molto soddisfatto* a *insoddisfatto* per determinare il livello di soddisfazione all'interno della propria unità abitativa.

Relativamente all'analisi dei risultati, ad ognuna di queste risposte è fatto corrispondere un numero da 4 a 1, da *molto importante/molto soddisfatto* a *non importante/insoddisfatto* che permette di quantificare le indicazioni fornite dal campione. Il passo successivo ha riguardato il calcolo della media e della deviazione standard delle risposte per ciascun parametro. La media è stata utilizzata per determinare i parametri percepiti come più rilevanti dai partecipanti, mentre la deviazione standard ha permesso di valutare il livello di accordo tra i rispondenti, identificando quanto uniformemente un parametro fosse giudicato importante o soddisfacente.

In linea con l'obiettivo di assegnare maggiore rilevanza ai parametri più significativi, questo ha permesso di attribuire pesi più elevati ai fattori

con una media di punteggio maggiore (indicativa di una percezione di importanza o soddisfazione più elevata) e una deviazione standard inferiore (indicativa di un maggiore accordo tra gli intervistati). Questo ha consentito di privilegiare i parametri percepiti come centrali e sui quali vi era un ampio accordo.

I pesi, sono stati assegnati secondo un ordine di priorità derivante dall'analisi, facilitando la comprensione e il confronto tra i diversi parametri, con un valore massimo di 1 ad un valore minimo di 0.2. Questo ha portato alla definizione di un indice complessivo di comfort, in cui ogni parametro contribuisce, in proporzione al peso assegnato, alla definizione dell'indice di comfort indoor dell'abitazione in analisi.

L'approccio scelto, basato sulla media e la deviazione standard, è stato ritenuto adeguato per questo studio in relazione alla natura dei dati e delle dimensioni relativamente ridotte del campione.

Altre metodologie statistiche, come l'*Analytic Hierarchy Process (AHP)* o l'analisi fattoriale, sebbene potenti, richiedono una quantità di dati più ampia o una maggiore variabilità nelle risposte per essere pienamente efficaci. Inoltre, queste tecniche avanzate necessitano di un livello di complessità che non sarebbe giustificato in assenza di una correlazione diretta tra i dati percepiti e i valori oggettivi, ottenibili solo tramite un monitoraggio più esteso e un campionamento più consistente.

In aggiunta, l'impossibilità a monitorare in tempo reale i parametri ambientali di comfort al momento della compilazione del questionario, impedisce di correlare direttamente le percezioni soggettive con i valori oggettivi dei parametri ambientali registrati in simultanea.

Inoltre, l'impossibilità di estendere la raccolta dati a un intervallo temporale più ampio, con conseguente indagine soggettiva del campione, limitano la capacità di rilevare variazioni stagionali o temporanee nelle condizioni di comfort abitativo, che potrebbero influenzare le risposte degli intervistati.

Un'analisi incrociata tra percezioni e misurazioni oggettive rende più accurata la rispondenza tra la condizione di benessere percepita e i relativi valori ambientali associati.

A fronte di queste limitazioni, è stato ritenuto opportuno non ricorrere a metodi di analisi statistica complessi, in quanto i risultati raccolti non consentirebbero di ottenere significatività statistica o di sviluppare modelli predittivi attendibili. L'uso di tecniche statistiche più avanzate avrebbe richiesto un set di dati più esteso e una rilevazione parallela e continua

dei parametri oggettivi. Pertanto, si è optato per un'analisi descrittiva basata su media aritmetica e deviazione standard, che fornisce comunque indicazioni utili sull'importanza e la soddisfazione percepita nei confronti dei quattro fattori di comfort (termico, qualità dell'aria, visivo e acustico).

In conclusione, le risposte del questionario hanno mostrato una bassa variabilità e una distribuzione dei dati omogenea, rendendo così poco utili tecniche più complesse che avrebbero potuto sovraccaricare l'analisi senza apportare significativi miglioramenti.

L'integrazione di misurazioni oggettive e percezioni soggettive, mediante questo approccio metodologico, ha comunque consentito di ottenere un quadro complessivo del comfort indoor percepito dagli utenti e dei parametri ambientali che influenzano maggiormente il benessere abitativo.

3.1 Acquisizione indicatori ambientali

Nella valutazione delle condizioni di comfort, è fondamentale che le rilevazioni siano rappresentative dell'intero ambiente. Un posizionamento inadeguato della strumentazione può compromettere l'accuratezza del monitoraggio e rendere i dati raccolti non rappresentativi dell'ambiente indagato.

Per la fase di campionamento è stata eseguita un'analisi approfondita sulla disposizione della strumentazione all'interno dei locali. In particolare, nella fase di rilevazione dei parametri termoigrometrici e di qualità dell'aria, è fondamentale effettuare uno studio preliminare del sistema impiantistico, tenendo conto della presenza di ventilazione meccanica controllata (VMC) e del tipo di impianto di riscaldamento e raffrescamento utilizzato.

La norma UNI EN ISO 7730 specifica chiaramente che le altezze di riferimento per le misurazioni sono rispettivamente: 1,7 metri per le persone in piedi, 1,1 metri per le persone sedute e 0,1 metri per le sedute a livello del pavimento.

Tuttavia, nel presente studio, le rilevazioni sono state effettuate posizionando gli strumenti di monitoraggio a un'altezza di circa 1,1 metri dal pavimento, considerando l'influenza su una persona seduta all'interno dell'ambiente.

Questa scelta, stabilita in fase di definizione delle modalità di campionamento, è stata motivata dall'influenza della ventilazione meccanica, eventualmente presente, che potrebbe alterare le condizioni termiche posizionando la strumentazione ad altezze superiori e soprattutto in pros-

simità delle bocchette di aspirazione e mandata. Questo approccio consente di ridurre le tempistiche di monitoraggio, garantendo comunque una valutazione accurata del comfort termico.

Nel caso in cui sia presente la VMC, per evitare che le misurazioni dei parametri termoigrometrici e di qualità dell'aria siano alterate da possibili gradienti termici e di concentrazione, che potrebbero eventualmente verificarsi, è opportuno effettuare le misurazioni lontano da bocchette di aspirazione e mandata. Nel caso in cui queste non siano presenti, e il rinnovo dell'aria venga effettuato tramite aerazione naturale (con apertura di porte e finestre), è possibile collocare la strumentazione in qualsiasi punto dell'ambiente, lontano da infissi o porte d'ingresso, per evitare eventuali flussi d'aria indesiderati che potrebbero falsare i risultati.

Nella valutazione delle condizioni di comfort termoigrometrico, nel caso siano presenti nell'abitazione sotto indagine sistemi radianti a pavimento per riscaldamento e raffrescamento, non risultano necessari ulteriori accorgimenti particolari. Al contrario, quando si analizzano abitazioni con stufe, termostufe, radiatori, condizionatori e termoconvettori, è fondamentale posizionare i sensori a una distanza adeguata da tali dispositivi. Ciò garantisce che le misurazioni non siano influenzate direttamente dal calore o da flussi d'aria generati, consentendo così di ottenere dati rappresentativi del comfort effettivo nell'intero ambiente.

Per il campionamento dei parametri illuminotecnici, la strumentazione, posizionata a un'altezza di 1,1 m dal suolo, deve essere collocata evitando la vicinanza a vetrate o fonti di illuminazione artificiale. È necessario tenere conto della metratura dell'ambiente, consentendo una valutazione completa dell'illuminamento del locale attraverso l'integrazione di luce naturale e artificiale. Il massimo comfort visivo è garantito rispettando il valore minimo di illuminamento precedentemente stabilito, pari a 100 lux.

Per il progetto in questione, eseguire la rilevazione sul campo delle prestazioni acustiche residenziali attraverso misure in situ risulta di non facile attuazione. Tra i principali motivi, vi è la necessità di condizioni ambientali controllate e la necessità di strumentazione sofisticata e calibrata. Inoltre, l'accesso agli ambienti residenziali per un periodo prolungato può essere difficile da ottenere, rendendo le misurazioni più complicate e dispendiose in termini di tempo e risorse.

Tuttavia, quanto delineato nei capitoli precedenti, riguardo alle caratteristiche fonoassorbenti e fonoisolanti degli elementi solidi dell'edificio, permette di formulare previsioni affidabili sul livello di comfort acustico

dell'edificio. In particolare, utilizzando un approccio descrittivo, attraverso l'analisi delle schede tecniche dei materiali e dei componenti installati nell'abitazione o basandosi sui risultati di prove acustiche condotte su edifici con caratteristiche simili e realizzati con le medesime tecniche costruttive, è possibile valutare il comfort acustico delle abitazioni e definire un giudizio positivo o negativo; contribuendo alla formulazione finale dell'indice di comfort abitativo.

Durante la fase di campionamento, non è necessario esaminare tutti gli ambienti dell'unità abitativa. È invece fondamentale concentrare l'analisi sulle aree di vita quotidiana più frequentemente utilizzate, come il soggiorno, la camera da letto e/o lo studio. Questi ambienti sono generalmente caratterizzati da parametri microclimatici più stabili e meno influenzati da vapori o esalazioni, comuni in cucine e bagni.

3.2 Acquisizione indicatori soggettivi

La ricerca sul comfort abitativo mira a comprendere i meccanismi fisiologici e psicologici che influenzano la percezione del benessere domestico, al fine di garantire un'analisi esaustiva della tematica. Mentre i dati oggettivi forniscono informazioni misurabili e verificabili sulle condizioni ambientali, l'indagine di carattere soggettivo riflette la percezione e le esperienze individuali degli occupanti, consentendo di identificare aree di miglioramento e sviluppare soluzioni che rispondano alle esigenze e preferenze degli occupanti.

Una volta identificati i parametri ambientali più rappresentativi nel contesto residenziale, per comprendere quali aspetti del comfort abitativo influenzano maggiormente il benessere dei residenti, è fondamentale conoscere l'impatto che essi esercitano sulle persone, attribuendo un peso a ciascun parametro in base alle percezioni sensoriali di un campione di individui. L'indagine soggettiva è stata condotta attraverso l'utilizzo di un questionario mirato, finalizzato alla raccolta di informazioni personali riguardanti l'importanza e il grado di soddisfazione associati a ciascun fattore ambientale all'interno dell'unità abitativa. Sono stati inoltre raccolti dati aggiuntivi, inclusi la classe energetica dell'edificio e eventuali interventi di efficientamento recentemente effettuati.

I pesi, per ognuno degli indicatori di comfort, sono stati assegnati seguendo un ordine di priorità. In questo caso, si è scelto di attribuire

rispettivamente i pesi, da un valore massimo di 1 ad un valore minimo di 0.2, in base all'importanza e al livello di soddisfazione emersi dall'analisi dei risultati, come indicato nelle Tabelle 3.1 e 3.2. Inoltre, è stata inclusa una domanda aggiuntiva per indagare le priorità personali di ciascun partecipante, con particolare attenzione agli aspetti del comfort indoor su cui interverrebbero per migliorare la qualità della vita nella propria abitazione. Al parametro più votato (comfort termico) è stato quindi assegnato un ulteriore incremento di 0.3, contribuendo alla determinazione del valore finale di ponderazione.

Di seguito sono indicati i valori di media deviazione standard relativamente al grado di soddisfazione e importanza per ognuno dei parametri ambientali e il peso assegnato.

Parametro di comfort	Media	Dev. st.	Peso indicatore
Termico	3,70	0,46	1
Acustico	3,48	0,59	0,7
Qualità dell'aria	3,39	0,68	0,4
Visivo	3,32	0,72	0,2

Tabella 3.1: *Risultati questionario d'indagine - Livello importanza comfort abitativo.*

Parametro di comfort	Media	Dev. st.	Peso indicatore
Qualità dell'aria	3,32	0,53	0,2
Visivo	3,08	0,65	0,4
Termico	3,03	0,68	0,7
Acustico	3,01	0,77	1

Tabella 3.2: *Risultati questionario d'indagine - Livello soddisfazione comfort abitativo.*

3.2.1 Questionario d'indagine

Il questionario d'indagine, strutturato in due sezioni, si compone in totale di quattordici domande. La prima sezione consiste in dieci domande volte a valutare sia l'importanza che il grado di soddisfazione, all'interno dell'unità abitativa, relativamente ai singoli fattori ambientali.

Ogni domanda è introdotta da una definizione generale del fattore ambientale considerato, con l'obiettivo di chiarire il tema centrale trattato.

Inoltre, un'ulteriore domanda è stata inclusa per esplorare le *priorità personali* di ciascun partecipante, focalizzandosi sugli aspetti del comfort indoor su cui interverrebbero per migliorare la qualità della vita all'interno della propria abitazione.

La seconda sezione del questionario, costituita da tre domande, comprendeva la valutazione della classe energetica dell'unità abitativa e l'indicazione di eventuali interventi di efficientamento realizzati negli ultimi cinque anni. Di seguito si vanno a specificare le domande del questionario.

Comfort Termoigrometrico: *sensazione di benessere termico che una persona avverte in un ambiente, dove la temperatura, l'umidità, la circolazione dell'aria sono adeguate alle esigenze e preferenze personali.*

Quanto ritiene importante il comfort termico all'interno della propria abitazione (temperatura, umidità, correnti d'aria)?

- Molto importante
- Importante
- Poco importante
- Non importante

Quanto è soddisfatto/a delle condizioni termiche (temperatura, umidità, correnti d'aria) all'interno della propria abitazione?

- Molto soddisfatto
- Soddisfatto
- Poco soddisfatto
- Insoddisfatto

***Qualità dell'aria:** sensazione di benessere respiro-olfattivo che una persona avverte in un ambiente, dove non si ha necessità di ricambio d'aria per presenza di odori sgradevoli o nocivi, sensazione di secchezza o umidità dell'aria ambiente.*

Quanto ritiene importante la qualità dell'aria all'interno della propria abitazione (esigenza di rinnovare l'aria all'interno di un ambiente, eccessiva secchezza e/o umidità dell'aria interna)?

- Molto importante
- Importante
- Poco importante
- Non importante

Quanto è soddisfatto/a della qualità dell'aria all'interno della propria abitazione?

- Molto soddisfatto
- Soddisfatto
- Poco soddisfatto
- Insoddisfatto

All'interno della propria abitazione, ha mai avvertito difficoltà respiratorie o fastidi dovuti a una scarsa qualità dell'aria?

- Frequentemente
- Occasionalmente
- Mai

***Comfort Visivo:** sensazione di benessere visivo che una persona avverte in un ambiente, dove l'illuminazione è adeguata alle esigenze e alle attività svolte, con quantità di luce appropriata, corretto bilanciamento tra luce naturale e artificiale e assenza di abbagliamento (riduzione della visione).*

Quanto ritiene importante avere nella propria abitazione un adeguato contributo luminoso dato dalla luce naturale e/o artificiale?

- Molto importante
- Importante
- Poco importante
- Non importante

Quanto è soddisfatto/a del livello di illuminazione all'interno della propria abitazione (esposizione alla luce naturale e/o artificiale)?

- Molto soddisfatto
- Soddisfatto
- Poco soddisfatto
- Insoddisfatto

***Comfort Acustico:** sensazione di benessere derivante dall'ambiente sonoro in un determinato luogo. Questo include livelli di rumore appropriati: assenza del rumore indesiderato (suoni fastidiosi o disturbanti) e chiarezza del suono desiderato.*

Quanto ritiene importante avere ambienti silenziosi e/o privi di rumori fastidiosi all'interno della propria abitazione?

- Molto importante
- Importante
- Poco importante
- Non importante

Quanto è soddisfatto/a della privacy acustica all'interno della propria abitazione?

- Molto soddisfatto
- Soddisfatto
- Poco soddisfatto
- Insoddisfatto

Quali fonti di rumore avverte con maggior frequenza quando si trova all'interno della propria abitazione?

- Rumori esterni (traffico, rumori di costruzione/lavori in corso...)
- Rumori interni (abitazioni confinanti, impianti interni: condizionatori, ventilconvettori, termoconvettori...)
- Nessuna fonte di disturbo acustico

Priorità Personali

All'interno della propria abitazione, su quale/i aspetto/i del comfort indoor agirebbe per migliorare la qualità di vita? (Massimo 2 selezioni)

- Comfort Termico
- Qualità dell'aria
- Comfort Visivo
- Comfort Acustico
- Nessun aspetto

Efficienza Energetica dell'Abitazione

È a conoscenza della classe energetica della propria abitazione? Se sì, indicare la classe di riferimento (A, B, C...G).

- A4, A3, A2, A1
- B
- C
- D
- E
- F, G
- Non a conoscenza

Negli ultimi 5 anni, sono stati effettuati interventi di miglioramento acustico nella sua abitazione?

- Sì, sono stati effettuati interventi di miglioramento acustico
- No, non sono stati effettuati interventi di miglioramento acustico
- Non a conoscenza di eventuali interventi di miglioramento acustico

Negli ultimi 5 anni, sono stati effettuati interventi di efficientamento energetico sulla sua abitazione?

- Sì, l'abitazione ha subito interventi di efficientamento energetico**
- No, l'abitazione non ha subito interventi di efficientamento energetico
- Non a conoscenza di eventuali interventi di efficientamento energetico

** Saprebbe indicare quali interventi di efficientamento energetico sono stati eseguiti sulla sua abitazione?

- Cappotto termico; sostituzione infissi; sistemi di riscaldamento e/o raffrescamento; ventilazione meccanica controllata (VMC); installazioni di pannelli solari e/o fotovoltaici; altro.

Gli intervistati sono stati in totale settanta. Il questionario d'indagine mirava a valutare due aspetti fondamentali del comfort abitativo: l'importanza attribuita dai partecipanti a vari fattori di comfort ambientale (termico, qualità dell'aria, luminoso e acustico) e il livello di soddisfazione che essi sperimentano relativamente a questi stessi fattori nelle proprie abitazioni.

I risultati ottenuti, riportati in Figura 3.1 e Figura 3.2, riassumono quanto espresso dagli intervistati. I risultati dell'indagine forniscono un quadro chiaro sia sull'importanza attribuita ai vari fattori di comfort abitativo, sia sul livello di soddisfazione percepita dagli intervistati.

I grafici in Figura 3.1 illustrano il livello di importanza, secondo quanto espresso dai partecipanti al sondaggio, per ciascuno dei quattro parametri del comfort abitativo.

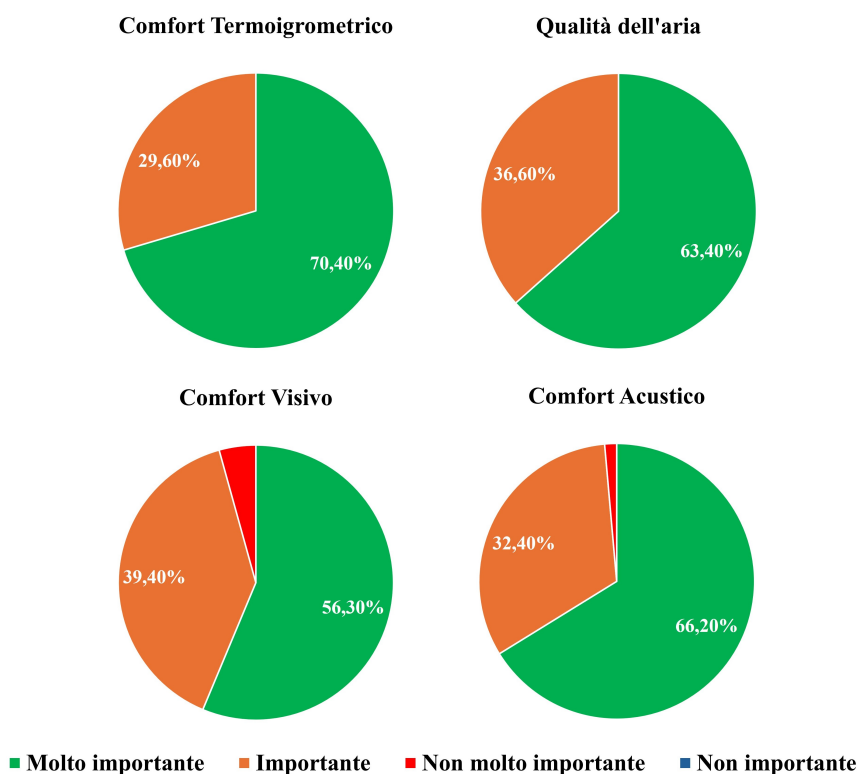


Figura 3.1: Questionario d'indagine - Livello importanza comfort abitativo.

Dai risultati in Figura 3.1, il comfort termico emerge come il parametro di maggiore rilevanza per gli intervistati, con il 70,40% che lo considera *molto importante* e il 29,60% che lo ritiene *importante*. Non vi è nessun intervistato che lo considera *poco importante* o *non importante*, questo indica un consenso unanime sulla sua rilevanza per il benessere abitativo.

La qualità dell'aria è anch'essa percepita come estremamente rilevante, con il 63,40% degli intervistati che la considera *molto importante* e il 36,60% che la ritiene *importante*. Anche in questo caso, nessuno ha indicato che la qualità dell'aria sia *poco importante* o *non importante*, sottolineando un'ampia consapevolezza dell'importanza di un'aria interna salubre.

Il comfort visivo è valutato *molto importante* dal 56,30% degli intervistati e *importante* dal 39,40%. Tuttavia, una piccola percentuale, pari al 4,30%, lo ritiene *non molto importante*. Non vi sono risposte che lo classificano come *non importante*, ma la presenza di una minoranza che lo ritiene meno rilevante rispetto ad altri fattori suggerisce una priorità leggermente inferiore.

Il comfort acustico è ritenuto *molto importante* dal 66,20% degli intervistati e *importante* dal 32,40%. Solo l'1,40% lo considera *non molto importante*, e nessuno lo ritiene *non importante*, riflettendo una forte percezione dell'importanza di un ambiente acusticamente confortevole per il benessere indoor.

I grafici in Figura 3.2 illustrano il livello di soddisfazione, secondo quanto espresso dai partecipanti al sondaggio, per ciascuno dei quattro parametri del comfort abitativo.

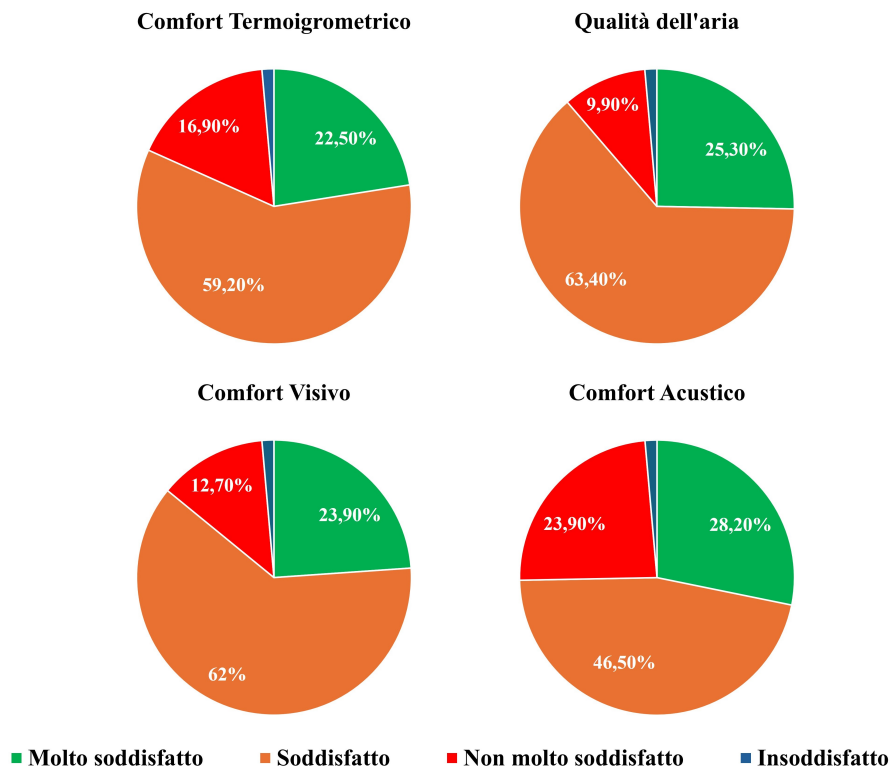


Figura 3.2: Questionario d'indagine - Livello soddisfazione comfort abitativo.

In relazione ai risultati in Figura 3.2, emerge che per quasi il 90% degli intervistati la qualità dell'aria all'interno della propria abitazione è ritenuta soddisfacente. In particolare, il 25,30% degli intervistati si dichiara *molto soddisfatto*, mentre il 63,40% si considera *soddisfatto*. Solo una minoranza ritiene necessarie delle migliorie. Il 9,90% si ritiene *poco soddisfatto* e l'1,40% *non soddisfatto*. Seguono, in ordine di soddisfazione, il comfort visivo, il comfort termico e il comfort acustico.

Per il comfort visivo, il 23,90% degli intervistati si dichiara *molto soddisfatto* e il 62% *soddisfatto*. Tuttavia, il 12,70% si ritiene *poco soddisfatto* e l'1,40% degli intervistati *non soddisfatto*. Anche in questo caso, la maggio-

ranza è soddisfatta, ma una parte significativa degli intervistati manifesta insoddisfazione.

Per quanto riguarda il comfort termico, il 22,50% degli intervistati si dichiara *molto soddisfatto* e il 59,20% *soddisfatto*. Tuttavia, il 16,90% *non è molto soddisfatto* e l'1,40% *non è soddisfatto* indicando che, sebbene la maggior parte degli intervistati sia soddisfatta, esiste una porzione significativa che trova spazio per miglioramenti.

Infine, per quasi il 75% degli intervistati il comfort acustico all'interno della propria abitazione risulta soddisfacente, con il 28,20% *molto soddisfatto* e il 46,50% *soddisfatto*, mentre il 23,90% è *poco soddisfatto* e l'1,40% *non è soddisfatto*. Questo indica che, sebbene vi sia un livello significativo di soddisfazione, quasi un quarto degli intervistati percepisce dei disagi acustici nella propria unità abitativa.

Osservare unicamente i valori di massima soddisfazione (*molto soddisfatto*) e minima soddisfazione (*non molto soddisfatto* e *insoddisfatto*) evidenzia ulteriormente le aree in cui il comfort abitativo è valutato in modo estremamente positivo o negativo.

In particolare, il comfort acustico emerge come la problematica principale, con un marcato bisogno di miglioramenti. Riguardo al comfort termico, la qualità dell'aria e il comfort visivo i risultati mostrano una prevalenza di soddisfazione, ma anche una parte non trascurabile di insoddisfazione, suggerendo che, per ognuno dei fattori che definiscono il benessere abitativo, ci sono aree che necessitano di attenzione.

I risultati del questionario forniscono un'analisi dettagliata delle aree in cui è percepita soddisfazione per il comfort indoor e delle aree che richiedono miglioramenti, evidenziando eventuali discrepanze tra l'importanza attribuita e l'esperienza effettivamente vissuta. Questo permette di confrontare la percezione reale di comfort abitativo con l'importanza attribuita a ciascun fattore ambientale.

In sintesi, sebbene tutti i fattori di comfort abitativo siano ritenuti fondamentali, si osserva una variazione nei livelli di soddisfazione percepiti, con il comfort acustico e termico che emergono come le principali aree di insoddisfazione secondo gli intervistati. Dai risultati della ricerca emerge chiaramente che il comfort termico risulta essere il parametro più rilevante per il benessere abitativo. Seguono, in ordine di importanza, il comfort acustico, la qualità dell'aria e il comfort visivo. È significativo notare come nessun intervistato abbia ritenuto *non importanti* tali parametri ambientali. Tuttavia, una minima percentuale degli intervistati ritiene il comfort

illuminotecnico e la qualità dell'aria come non molto rilevante per il loro benessere abitativo.

In aggiunta, è stato chiesto di indicare le principali aree su cui si dovrebbe intervenire per migliorare la qualità di vita in ambito residenziale (Figura 3.3), selezionando un massimo di due parametri di comfort.

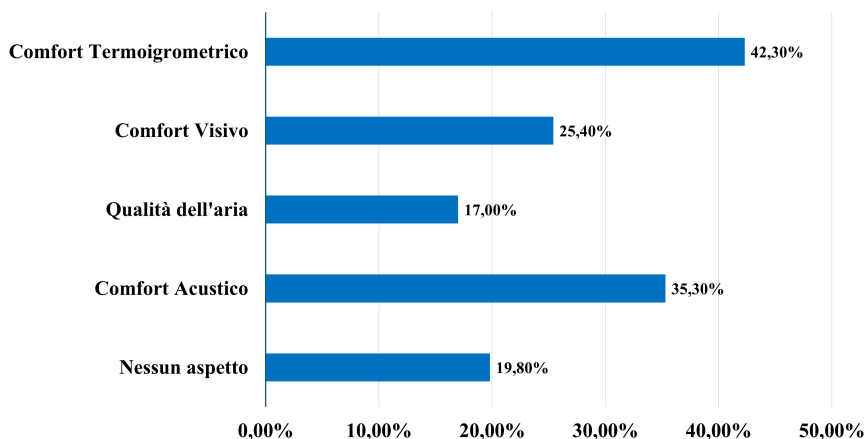


Figura 3.3: *Questionario d'indagine - Indicazione aree di intervento per miglioramento del comfort abitativo secondo priorità personali degli intervistati.*

Il 19,80% degli intervistati ha dichiarato di non sentire la necessità di intervenire su nessun aspetto del comfort abitativo, suggerendo che una parte della popolazione è già soddisfatta delle condizioni di comfort abitativo nella propria residenza. Questo dato positivo indica la presenza di abitazioni che già offrono un elevato livello di comfort ai loro occupanti.

Il comfort termico è emerso, invece, come il fattore prioritario, con il 42,30% degli intervistati che ha indicato questo aspetto come il principale ambito su cui agire per migliorare la qualità di vita residenziale. Questo risultato non sorprende, dato che il comfort termico è spesso associato direttamente al benessere fisico e alla salute. Temperature inadeguate possono influire negativamente sulla produttività, sulla qualità del sonno e sullo stato di salute generale. Pertanto, l'attenzione verso il miglioramento delle condizioni termiche nelle abitazioni rispecchia una necessità fondamentale per garantire un ambiente domestico confortevole.

Il comfort acustico segue come seconda area di intervento prioritaria, scelta dal 35,30% degli intervistati. Questo dato evidenzia l'importanza di un ambiente silenzioso per il benessere abitativo. Rumori esterni o interni indesiderati possono causare stress, disturbare il sonno e ridurre la capacità di concentrazione, influenzando negativamente la qualità di vita. Più del 60% degli intervistati percepisce rumori mentre si trova all'interno della propria abitazione. In particolare, il 35,20% identifica come principale fonte di rumore quelli provenienti da fonti interne, quali abitazioni confinanti e impianti interni (condizionatori, ventilconvettori, termoconvettori,...). Il 26,80% degli intervistati, invece, individua le fonti di rumore esterne come le maggiori fonti di disturbo. Infine, il 38% degli intervistati dichiara di non avvertire alcun disturbo acustico quando si trova all'interno della propria abitazione.

Il comfort visivo e la qualità dell'aria sono stati indicati rispettivamente dal 25,40% e dal 17% degli intervistati come aspetti su cui intervenire. Una buona illuminazione naturale e/o artificiale è essenziale per il benessere visivo e psicologico, influenzando l'umore e la produttività. La qualità dell'aria, invece, è cruciale per la salute respiratoria e generale. Un'aria interna di scarsa qualità può contribuire a problemi respiratori, allergie e altre condizioni di salute.

I risultati presentati sottolineano la presenza, in una buona parte delle abitazioni, di un'illuminazione e una ventilazione adeguata. Questo aspetto è confermato dall'81,70%, che ha indicato di "non aver mai avvertito difficoltà respiratorie o fastidi dovuti a una scarsa qualità dell'aria all'interno della propria abitazione". Il 15,5% degli intervistati ha riportato di aver sperimentato occasionalmente difficoltà respiratorie, mentre solo una piccola percentuale (2,80%) ha indicato di aver frequentemente tali problemi. I risultati del grafico in Figura 3.3 non evidenziano importanti condizioni di disagio percepito da parte dei residenti, suggerendo una possibile correlazione con l'efficacia dei sistemi di ventilazione adottati, siano essi naturali o meccanici.

Confrontare i risultati delle Figure 3.1, 3.2 e 3.3 permette di analizzare le percezioni degli intervistati riguardo l'importanza e la soddisfazione dei fattori di comfort abitativo, nonché le aree percepite come prioritarie per interventi migliorativi.

Per quanto riguarda il comfort termico, nonostante una maggioranza degli intervistati percepisca un buon livello di comfort termico, esiste an-

cora una porzione significativa di popolazione, il 22,50%, che ritiene questo aspetto carente all'interno della propria abitazione, e quasi il 50% degli intervistati che lo considera il parametro principale su cui intervenire per il miglioramento del comfort residenziale. Stesso discorso vale per il comfort acustico, ma in percentuale inferiore.

La qualità dell'aria e il comfort visivo risultano essere meno fondamentali in termini di benessere indoor. Quasi il 90% degli intervistati risulta soddisfatto, ma esiste ancora una percentuale che trova questo aspetto carente. Allo stesso modo, questi due fattori risultano essere i meno selezionati come ambito su cui intervenire, con la qualità dell'aria che con il 17% risulta essere in assoluto l'area con meno prioritaria di intervento.

Riassumendo, i risultati in termini di importanza e soddisfazione dei fattori ambientali in ambito residenziale mostrano una forte correlazione con le indicazioni relativamente alle aree percepite come prioritarie per interventi migliorativi. Il comfort termico e acustico emergono come le aree con maggiori necessità di miglioramento, seguite dal comfort visivo e dalla qualità dell'aria.

Per la formulazione dell'indice di comfort abitativo, le risposte ottenute rivestono un ruolo chiave poiché riflettono l'influenza effettiva che tali fattori hanno sugli abitanti, permettendo una ponderazione differenziata.

Tale indice non solo qualifica l'unità abitativa in termini di benessere abitativo, ma fornisce anche una base solida per ulteriori studi sugli interventi migliorativi.

L'integrazione di questi risultati per orientare le politiche e le azioni pratiche rappresenta un contributo significativo per migliorare la qualità della vita negli edifici e ottimizzare le strategie di costruzione.

Andando ora ad analizzare la seconda parte del questionario, riguardo l'efficienza energetica delle abitazioni e osservando quanto riportato in Figura 3.4, si evince che il 74,70% degli intervistati, non è a conoscenza della classe energetica della propria abitazione. Tra coloro che ne sono a conoscenza, le classi di efficienza energetica più elevate, come A e B, risultano essere le più diffuse. Questo dato suggerisce una crescente consapevolezza e interesse verso l'efficientamento energetico.

La prevalenza delle classi A e B potrebbe essere attribuita a vari fattori, tra cui l'aumento degli incentivi per edifici ad alta efficienza energetica, oltre a una maggiore attenzione da parte dei consumatori verso i benefici economici e ambientali derivanti da abitazioni energeticamente prestanti.

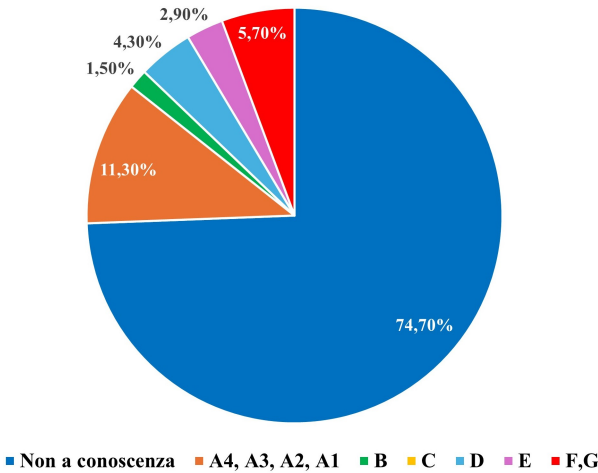


Figura 3.4: Questionario d'indagine - Classi energetiche unità abitative degli intervistati.

In merito agli interventi di efficientamento effettuati, la maggioranza degli intervistati non ha effettuato interventi di miglioramento acustico, con il 63,40% che ha risposto negativamente a questa domanda. Solo il 14,10% ha dichiarato di aver eseguito tali interventi, mentre il 22,50% non ne è a conoscenza. Parallelamente, l'efficientamento energetico ha registrato una maggiore incidenza di interventi: il 39,40% ha infatti dichiarato di aver effettuato tali interventi, il 36,60% non lo ha fatto e il 23,90% non è a conoscenza di eventuali interventi in questo ambito.

Tra gli interventi di efficientamento energetico, riassunti in Figura 3.5, i più comuni includono la sostituzione degli infissi (53,60%), l'installazione

di pannelli solari e/o fotovoltaici (42,90%), e l'isolamento dell'involucro edilizio tramite l'applicazione del cappotto termico (39,30%). Interventi come la sostituzione o l'installazione di sistemi di riscaldamento e raffrescamento, la ventilazione meccanica controllata e il miglioramento dei sistemi di riscaldamento sono risultati meno frequenti.

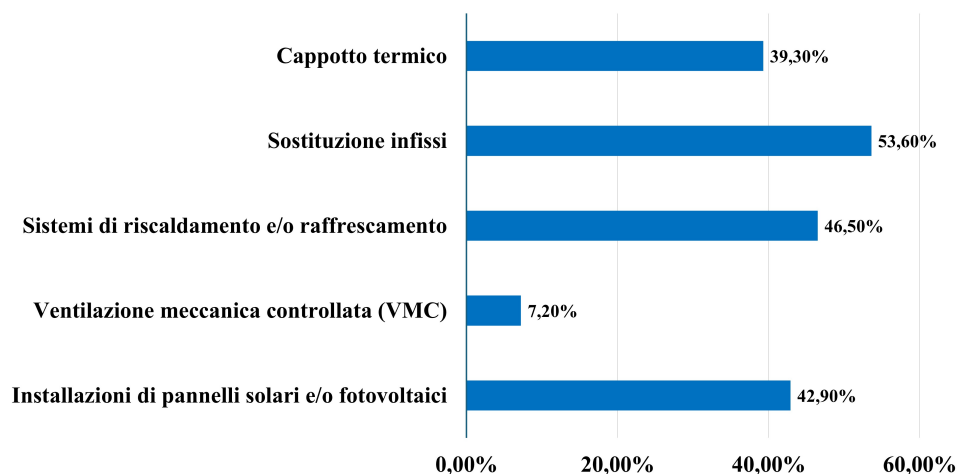


Figura 3.5: *Questionario d'indagine - Indicazione interventi di efficientamento energetico su unità abitative degli intervistati.*

Analizzando i risultati dell'intero questionario, emergono delle osservazioni significative. Tutti i partecipanti che hanno dichiarato di risiedere in abitazioni di classe energetica B o superiore non hanno segnalato problemi respiratori o disagi legati alla qualità dell'aria interna, e non hanno identificato specifici aspetti del comfort indoor che ritengono necessitino di miglioramenti. Solo il 14,30% di essi ha affermato di avvertire con maggior frequenza, all'interno della propria abitazione, fonti di rumore interne, probabilmente legate a impiantistica con un livello sonoro non idoneo, oppure dovuta ad un inadeguato isolamento acustico di partizioni orizzontali e/o verticali, tra unità abitative adiacenti.

Da ciò si può ipotizzare che esista una correlazione positiva tra la classe energetica elevata delle abitazioni e il benessere indoor degli occupanti, con tali abitazioni che potrebbero offrire condizioni ambientali interne adeguate e confortevoli. Inoltre, il fatto che non siano stati suggeriti, da parte dei residenti in abitazioni a elevate prestazioni energetiche, aspetti del

comfort indoor che necessitano di miglioramenti, indica che gli intervistati percepiscono già un elevato livello di benessere nella loro abitazione.

La prevalenza di interventi legati alla sostituzione degli infissi e all'installazione di pannelli solari e/o fotovoltaici indica un crescente interesse per soluzioni che migliorano l'efficienza abitativa e riducono i consumi.

In sintesi, mentre una porzione significativa degli intervistati ha intrapreso azioni per migliorare l'efficienza energetica delle proprie abitazioni, c'è ancora una parte considerevole che non ha eseguito interventi né è a conoscenza del loro stato. Questo evidenzia la necessità di una maggiore sensibilizzazione e informazione riguardo i benefici complessivi del miglioramento del comfort abitativo, inclusi gli aspetti acustici, oltre che quelli energetici.

3.3 Applicativo *Indice Comfort Abitativo*

Il questionario, ideato per pesare l'incidenza di ciascun parametro ambientale sul comfort degli occupanti, ha consentito di modulare l'indice sulla base delle risposte raccolte. In questo modo, sono stati assegnati pesi diversi ai differenti fattori ambientali, classificandoli per importanza e rilevanza rispetto alla percezione di benessere di ciascun occupante: il comfort termoigrometrico è risultato il fattore di rilievo, seguito dal comfort acustico, dalla qualità dell'aria e dal comfort visivo.

L'applicativo, realizzato per il calcolo dell'indice di comfort abitativo, permette di inserire manualmente i tre locali da campionare, i parametri termoigrometrici, di qualità dell'aria e di illuminamento campionati, selezionare l'esito dell'analisi acustica per l'abitazione e l'eventuale Blower-Door-Test condotto, con il relativo valore campionato. Tale applicativo contiene in sé tutte le informazioni descritte nei precedenti capitoli relativamente ai limiti di accettabilità dei parametri ambientali campionati e i pesi definiti per ogni fattore ambientale.

Per cui, determinati i punti di campionamento e posizionata la strumentazione, si procede alla rilevazione delle condizioni ambientali in tre differenti ambienti dell'unità abitativa.

La strumentazione utilizzata per il campionamento effettua misurazioni istantanee, fornendo immediatamente i risultati sullo schermo. Dopo una fase iniziale di stabilizzazione dei valori, il dato visualizzato sullo schermo rappresenta il valore definitivo rilevato. Relativamente al monitoraggio della concertazione di particolato atmosferico, le rilevazioni effettuate tra-

mite lo spettrometro ottico *OPS 3330*, sono registrate per un intervallo di campionamento di 100 s e riportate come valore medio.

Registrati i valori campionati e inseriti all'interno dell'applicativo, si procede al calcolo dell'indice complessivo di comfort abitativo, in funzione ovviamente dei pesi assegnati a ciascun parametro, determinati sulla base dei risultati del questionario d'indagine, e del rispetto dei limiti di accettabilità dei singoli parametri ambientali rilevati.

Il valore finale dell'indice di comfort abitativo è rappresentato su una scala di cinque livelli, da *TOP 1*, che indica il massimo livello di comfort, fino a *TOP 5*. L'interfaccia dell'applicativo fornisce una visione integrata delle condizioni ambientali rilevate nell'unità abitativa, come mostrato nell'immagine in Figura 3.6.

Questo approccio consente non solo di identificare rapidamente eventuali criticità, ma anche di guidare interventi mirati per migliorare il benessere abitativo complessivo. L'applicativo risulta essere quindi uno strumento prezioso per la definizione, gestione e ottimizzazione del comfort negli ambienti residenziali.

Parametri campionati				Conformità risultati			
Comfort Termoigrometrico				Comfort Termoigrometrico			
	Camera singola 1	Camera doppia 1	Soggiorno		Camera singola 1	Camera doppia 1	Soggiorno
Temperatura globo nero [°C]	25,2	22,1	18,3	Temperatura operativa [°C]			
Temperatura dell'aria [°C]	23,4	21,5	19,1	Omogeneità termica			
Velocità dell'aria [m/s]	0,08	0,09	0,1	Velocità dell'aria [m/s]			
U.R. [%]	57,2	53,1	59,5	U.R. [%]			
Qualità dell'aria				Qualità dell'aria			
	Camera singola 1	Camera doppia 1	Soggiorno		Camera singola 1	Camera doppia 1	Soggiorno
TVOC [mg/m³]	1,55	3,12	2,23	TVOC [mg/m³]			
Formaldeide [mg/m³]	0,11	0,25	0,18	Formaldeide [mg/m³]			
PM ₁₀ [µg/m³]	1,55	1,67	2,23	PM ₁₀ [µg/m³]			
Comfort Visivo				Comfort Visivo			
	Camera singola 1	Camera doppia 1	Soggiorno		Camera singola 1	Camera doppia 1	Soggiorno
Illuminamento [lux]	113	214	94	Illuminamento [lux]			
Comfort Acustico				Comfort Acustico			
Analisi Acustica	Negativa			Analisi Acustica			
Blower Door Test				Blower Door Test			
Classe CasaClima	Non presente			Classe CasaClima	Non presente		
n ₅₀ [h ⁻¹]	-			n ₅₀ [h ⁻¹]			
Livello Comfort Abitativo:				TOP 5			

stato progettato per essere adattabile, considerando una vasta gamma di parametri.

Un'analisi comparativa, tra abitazioni sottoposte al Blower-Door-Test e non testate, ha dimostrato come l'impatto specifico di questa analisi sul punteggio complessivo risulta limitato. Sebbene il test sia utile per individuare infiltrazioni d'aria e migliorare l'efficienza energetica, rappresenta solo una delle diverse variabili considerate nell'indice.

Aspetti come l'isolamento termico, l'isolamento acustico e la qualità dell'aria rivestono un ruolo maggiormente significativo nella definizione del livello di comfort abitativo.

Conseguentemente, anche in assenza del Blower-Door-Test, l'indice di comfort risulta rappresentativo delle condizioni generali di benessere dell'abitazione, garantendo una valutazione equa e accurata del comfort abitativo, indipendentemente dalla presenza o meno dello specifico test.

3.3.1 Formulazione *Indice Comfort Abitativo*

Descrivendo nello specifico la metodologia utilizzata per sviluppare l'indicatore proposto, ed in particolar modo l'equazione di calcolo formulata, questa considera cinque componenti principali: comfort termoigrometrico, qualità dell'aria, comfort visivo, comfort acustico e un test di tenuta all'aria (Blower Door Test).

L'indice è definito come una somma ponderata di cinque componenti, ciascuna delle quali si compone dei relativi parametri ambientali. Ogni componente è costruita in modo che, se tutti i parametri che la compongono rispettano i limiti normativi, la componente avrà valore unitario. Tuttavia, se uno o più parametri non rispettano tali limiti, il loro contributo nel calcolo dell'indice viene escluso. Le cinque componenti sono così definite:

- **A** (Comfort Termoigrometrico):

$$[0.25(t_o) + 0.25(\Delta t_{5\%}) + 0.25(v_a) + 0.25(UR)]$$

- **B** (Qualità dell'aria):

$$\left[\frac{1}{3}(TVOC) + \frac{1}{3}(HCOH) + \frac{1}{3}(PM_{10}) \right]$$

- **C** (Comfort Visivo):

$$[(Lux \ Local)]$$

- **D** (Comfort Acustico):

$$[(Analisi\ Acustica)]$$

- **E** (Blower Door Test):

$$[(n_{50})]$$

In forma estesa, la formulazione dell'indice di comfort abitativo risulta così composta:

$$\frac{a \cdot [A_1 + A_2 + \dots + A_N]}{N} + \frac{b \cdot [B_1 + B_2 + \dots + B_N]}{N} + \frac{c \cdot [C_1 + C_2 + \dots + C_N]}{N} + d \cdot [D] + e \cdot [E] \quad (3.1)$$

con N pari al numero di locali campionati all'interno dell'abitazione.

Le componenti a , b , c , d sono coefficienti moltiplicativi, determinati sulla base delle preferenze soggettive degli utenti tramite questionari mirati (Paragrafo 3.2). Al coefficiente e , direttamente legata al risultato del Blower Door Test, è attribuito un peso in modo arbitrario tale comunque da non inficiare in modo significativo sul risultato finale, poiché tale test è specifico di unità abitative sottoposte a certificazione energetica *CasaClima*.

Componente	Parametro di comfort	Peso indicatore
a	Termoigrometrico	2
b	Qualità dell'aria	0,6
c	Visivo	0,6
d	Acustico	1,7
e	BDT	0,1

Tabella 3.3: Valore di ponderazione finale componenti - Indice di Comfort Abitativo.

Il risultato dell'indice di comfort abitativo è ottenuto come somma pesata delle cinque componenti del comfort (termoigrometrico, qualità dell'aria, visivo e acustico) calcolate nei diversi locali dell'unità abitativa. La non conformità dei parametri ambientali misurati rispetto ai limiti accettabili comporterà l'assegnazione di un valore nullo al parametro ambientale corrispondente. Di conseguenza, la somma ponderata della specifica componente risulterà ridotta.

Prendendo come esempio le rilevazioni condotte in una unità abitativa, i cui risultati sono descritti in Figura 3.7:

Parametri campionati				Conformità risultati			
Comfort Termoisgrometrico				Comfort Termoisgrometrico			
	Camera singola 1	Camera doppia 1	Soggiorno		Camera singola 1	Camera doppia 1	Soggiorno
Temperatura globo nero [°C]	25,2	22,1	18,3	Temperatura operativa [°C]			
Temperatura dell'aria [°C]	23,4	21,5	19,1	Omogeneità termica			
Velocità dell'aria [m/s]	0,08	0,09	0,1	Velocità dell'aria [m/s]			
U.R. [%]	57,2	53,1	59,5	U.R. [%]			
Qualità dell'aria				Qualità dell'aria			
	Camera singola 1	Camera doppia 1	Soggiorno		Camera singola 1	Camera doppia 1	Soggiorno
TVOC [mg/m³]	1,55	3,12	2,23	TVOC [mg/m³]			
Formaldeide [mg/m³]	0,11	0,25	0,18	Formaldeide [mg/m³]			
PM ₁₀ [µg/m³]	1,55	1,67	2,23	PM ₁₀ [µg/m³]			
Comfort Visivo				Comfort Visivo			
	Camera singola 1	Camera doppia 1	Soggiorno		Camera singola 1	Camera doppia 1	Soggiorno
Illuminamento [lux]	113	214	94	Illuminamento [lux]			
Comfort Acustico				Comfort Acustico			
Analisi Acustica	Negativa			Analisi Acustica			
Blower Door Test				Blower Door Test			
Classe CasaClima	Non presente			Classe CasaClima	Non presente		
η ₅₀ [h ⁻¹]	-			η ₅₀ [h ⁻¹]			
Livello Comfort Abitativo:				TOP 5			

Capitolo 4

Analisi edifici residenziali

Nel presente paragrafo si descrivono i casi studio analizzati nel corso del triennio di dottorato. L'analisi del benessere abitativo, attraverso lo studio del comfort termico, acustico, illuminotecnico e della qualità dell'aria, nonché delle loro interconnessioni negli ambienti residenziali, è stata effettuata in tre unità abitative situate nella provincia di Viterbo. In particolare, l'indagine è stata condotta su un appartamento certificato *CasaClima A*, uno in *Classe Energetica D* e uno in *Classe Energetica G*.

La selezione di unità abitative con certificazioni energetiche diverse consente di valutare l'impatto della qualità e dell'efficienza costruttiva sul benessere abitativo degli occupanti.

Nel contesto del percorso di dottorato, è stato seguito l'intero ciclo di realizzazione del complesso abitativo sottoposto a certificazione "Casa-Clima", dalla progettazione alla certificazione e ai test di collaudo finali, concludendo con la valutazione dell'*indice di comfort abitativo*.

L'appartamento *CasaClima A*, con il suo elevato standard di efficienza energetica, è il massimo riferimento per comprendere i benefici di un'ottima coibentazione, un adeguato isolamento acustico e l'efficienza del sistema di ventilazione meccanico, sul benessere abitativo.

Al contrario, l'unità abitativa in *Classe Energetica G*, descrive la condizione opposta, identificando scarsi livelli di efficienza energetica, problematiche di ventilazione, illuminazione e scarsi livelli di comfort acustico, tali da influenzare negativamente il benessere dei residenti.

L'appartamento in *Classe Energetica D*, invece, offre un punto di confronto intermedio, utile per analizzare l'impatto di un'efficienza energetica moderata sul benessere degli occupanti.

4.1 Unità abitativa "*CasaClima*"

L'oggetto dello studio è un appartamento all'interno di un complesso residenziale, i cui lavori sono terminati nel dicembre 2022. Si compone di due palazzine adiacenti, separate da un giunto strutturale, ognuna delle quali ospita 8 appartamenti, per un totale di 16 unità abitative.

L'edificio classificato secondo la direttiva nazionale in *Classe Energetica A4*, è stato certificato *CasaClima A* dall'Agenzia CasaClima di Bolzano.

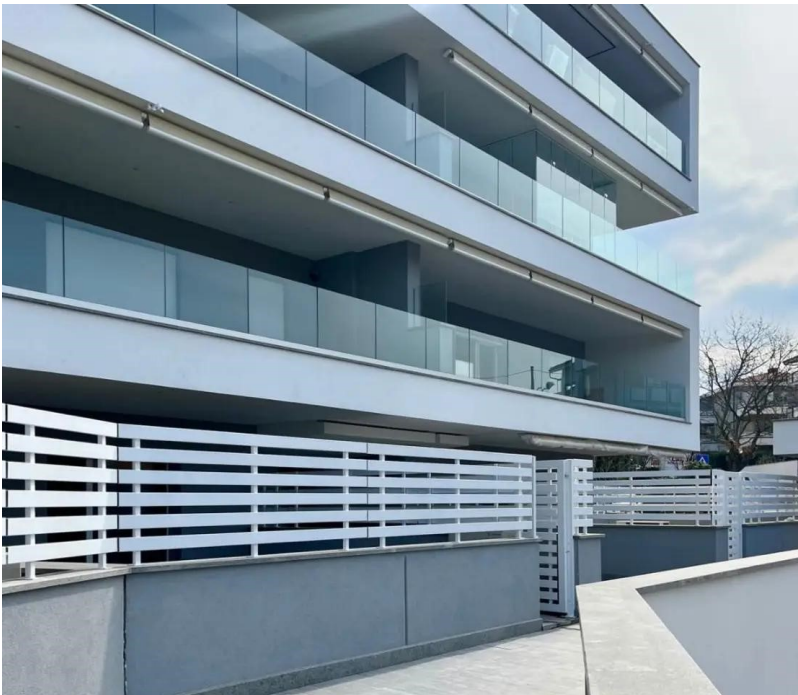


Figura 4.1: Unità abitativa "*CasaClima A*".

Analizzando gli elementi strutturali principali dell'edificio, emerge che: le facciate sono costituite da tamponature di differenti dimensioni, a seconda dello spessore dell'isolamento termico della parete, a creare un motivo architettonico, mentre, la caratteristica che accomuna tutto l'involucro edilizio è il corpo centrale, realizzato con una muratura in laterizio porizzato da 25 cm e la contro-parete interna a secco.

L'isolamento termico si compone di cappotto in *polistirene espanso sinterizzato* (EPS) con grafite dallo spessore di 8 cm o in EPS bianco da

24 cm, nella parte esterna delle pareti, a creare il motivo architettonico definito sopra.

Le lastre isolanti in EPS grafitato (Figura 4.2) sono costituite da polistirene espanso sinterizzato arricchito con grafite, progettati per migliorare l'isolamento termico degli edifici; grazie alle proprietà riflettenti della grafite, offrono un'elevata resistenza termica, riducendo le perdite di calore e migliorando l'efficienza energetica.



Figura 4.2: Isolamento in polistirene espanso sinterizzato (EPS) grafitato.

L'utilizzo di questo materiale è legato ad ulteriori fattori, quali: leggerezza e facilità di installazione, contribuendo inoltre a garantire una migliore sostenibilità edilizia, riducendo l'impatto ambientale complessivo. Utilizzati sia per l'isolamento esterno che interno, sono adatti per pareti, soffitti e coperture, offrendo anche una buona resistenza all'umidità e una lunga durabilità nel tempo.

Pannelli in *polistirene espanso ed estruso* (XPS) e *polistirene espanso sinterizzato* (EPS), di spessore pari a 5 cm, sono utilizzati per la correzione dei ponti termici (Figura 4.3).



(a) *Coibentazione pilastri piano seminterrato.*



(b) *Coibentazione a soffitto balconi.*



(c) *Coibentazione a pavimento balconi.*



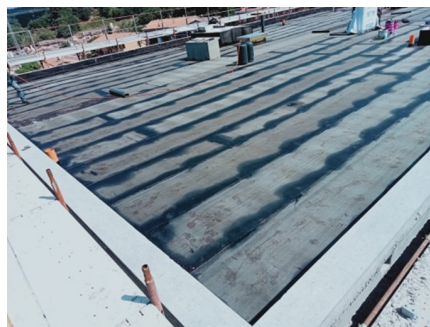
(d) *Coibentazione solaio controterra.*

Figura 4.3: *Descrizione fotografica della posa in opera di sistemi isolanti in partizioni orizzontali e verticali per la correzione dei ponti termici.*

La copertura a tetto rovescio, le cui fasi realizzative sono riportate in Figura 4.4, si compone di solaio pieno, strato di pendenza, guaina impermeabile in doppio spessore, strato coibente in EPS da 14 cm e brecciolino di zavorra di 20 cm di spessore, posto sopra telo di TNT.



(a) Fase preparatoria per la realizzazione del massetto delle pendenze.



(b) Impermeabilizzazione del solaio con rotoli di guaina bituminosa.



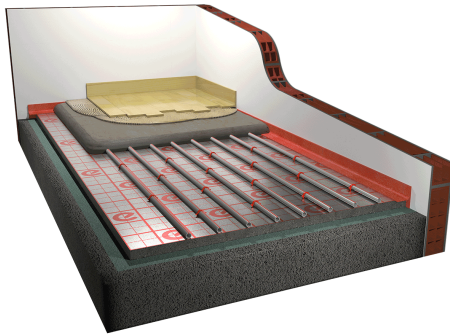
(c) Pannelli EPS spessore totale 14 cm.



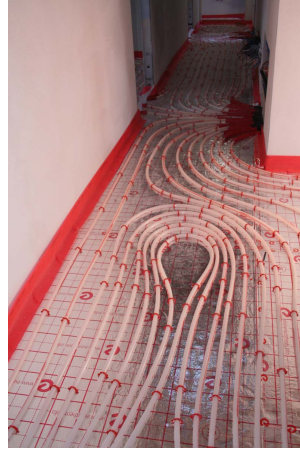
(d) Ghiaia su strato di TNT.

Figura 4.4: Descrizione fotografica della posa in opera della coibentazione in copertura.

L'isolamento acustico dell'intero edificio si compone di un isolamento al calpestio, realizzato con il sistema di riscaldamento e raffrescamento a pavimento, che prevede un pannello isolante piano in EPS con grafite, dotato inferiormente di guaina a base di fibre e granuli di gomma (Figura 4.5).



(a) Schematizzazione stratigrafia impianto a pavimento radiante.



(b) Posa in opera di impianto radiante a pavimento su EPS acustico anticalpestio.

Figura 4.5: Descrizione fotografica della posa in opera di sistemi isolanti, termici e acustici, in partizioni orizzontali dell'involucro edilizio.

L'isolamento a rumore aereo, invece, è ottenuto secondo il *principio della cella chiusa*, con pareti divisorie tra appartamenti e verso il vano scala in muratura e *contro-pareti a secco*, con all'interno lana di vetro e solette piene in c.a. dallo spessore di 24 cm.

All'interno della struttura a secco, nei solai interpiano è inserita lana di vetro dallo spessore di 4,5 cm, mentre lana di vetro da 10 cm è posizionata all'interno della struttura in cartongesso verso i box auto (Figura 4.6).

I tramezzi sono realizzati con struttura a secco, con all'interno lana di vetro e doppia lastra su entrambi i lati in cartongesso.



(a) Isolamento in lana di vetro in contro-parete.



(b) Isolamento in lana di vetro all'interno della struttura in cartongesso di box auto-corsia autorimessa.

Figura 4.6: Descrizione fotografica della posa in opera di sistemi isolanti, termici e acustici, in partizioni orizzontali e verticali dell'involucro edilizio.

Gli infissi, tutti in PVC, sono a triplo vetro con un valore di trasmittanza del vetro U_g pari a $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$, potere fonoisolante R_w pari a 34 dB , fattore solare g pari a 60% e trasmittanza complessiva U_w tra $0,64$ e $0,86 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Ogni appartamento dispone di un impianto di produzione di acqua calda e fredda per riscaldamento e raffrescamento di tipo autonomo, con sistema di emissione radiante a pavimento. Il condominio dispone di un impianto fotovoltaico a servizio delle utenze condominiali per la produzione di energia elettrica, alloggiato in copertura, con potenza di picco pari a $3,20 \text{ kW}$. Inoltre, ogni unità abitativa è dotata di un impianto fotovoltaico per la produzione di energia elettrica, con potenza di picco in funzione della superficie dell'appartamento.

In tutte le abitazioni è installato un impianto di ventilazione meccanica controllata (VMC), regolabile a diversi livelli a seconda delle esigenze, che consente un efficace ricambio e trattamento dell'aria, al fine di garantire la qualità di quest'ultima e valori ottimali di temperatura e umidità all'interno dell'abitazione, grazie alla presenza del *recuperatore di calore entalpico*.

L'unità abitativa selezionato in analisi, situata al piano terzo del complesso residenziale, è collocata ad un'altitudine di 432,49 m slm e ad un'altezza dal suolo di 10,31 m, la superficie netta è di 110,71 m^2 e il volume netto è pari a 309,99 m^3 .



Figura 4.7: Pianta unità abitativa "CasaClima A".

La fase di monitoraggio, per la definizione dell'indice di comfort abitativo, è stata svolta nel marzo 2023, tre mesi dopo il termine dei lavori. Le misurazioni sono state condotte in tre differenti ambienti dell'unità abitativa: *camera singola 1*, *camera doppia 1* e *soggiorno*, posizionando la strumentazione come riportato in Figura 4.8.

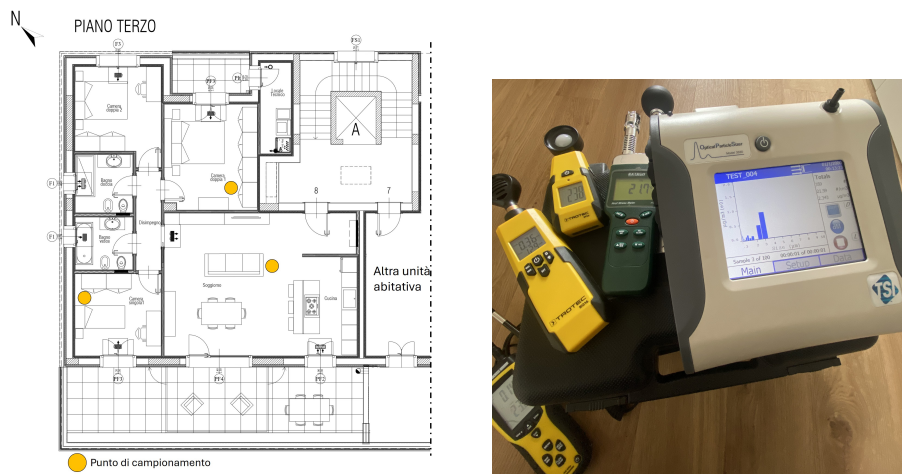


Figura 4.8: Attività di monitoraggio nell'unità abitativa "CasaClima A".

I parametri monitorati, riportati all'interno dell'applicativo e i risultati ottenuti, in termini di conformità con i limiti di accettabilità, sono riassunti in Figura 4.9.

Parametri campionati				Conformità risultati			
Comfort Termoigrometrico				Comfort Termoigrometrico			
	Camera singola 1	Camera doppia 1	Soggiorno		Camera singola 1	Camera doppia 1	Soggiorno
Temperatura globo nero [°C]	21,7	22,0	21,2	Temperatura operativa [°C]			
Temperatura dell'aria [°C]	22,1	21,8	21,1	Omogeneità termica			
Velocità dell'aria [m/s]	0,04	0,03	0,03	Velocità dell'aria [m/s]			
U.R. [%]	45,1	44,6	44,3	U.R. [%]			
Qualità dell'aria				Qualità dell'aria			
	Camera singola 1	Camera doppia 1	Soggiorno		Camera singola 1	Camera doppia 1	Soggiorno
TVOC [mg/m³]	1,45	1,36	2,38	TVOC [mg/m³]			
Formaldeide [mg/m³]	0,12	0,09	0,23	Formaldeide [mg/m³]			
PM ₁₀ [µg/m³]	6,47	5,85	6,92	PM ₁₀ [µg/m³]			
Comfort Visivo				Comfort Visivo			
	Camera singola 1	Camera doppia 1	Soggiorno		Camera singola 1	Camera doppia 1	Soggiorno
Illuminamento [lux]	386	424	256	Illuminamento [lux]			
Comfort Acustico				Comfort Acustico			
Analisi Acustica	Positiva			Analisi Acustica			
Blower Door Test				Blower Door Test			
Classe CasaClima	A			Classe CasaClima	A		
n ₅₀ [h ⁻¹]	1,32			n ₅₀ [h ⁻¹]			
Livello Comfort Abitativo:				TOP 1			

Figura 4.9: Risultati campionamento unità abitativa "CasaClima A".

I dati rilevati dimostrano una conformità con i limiti di accettabilità definiti, per la quasi totalità dei parametri ambientali investigati, suggerendo un livello di comfort adeguato. In particolare, secondo l'applicativo, il livello di comfort abitativo è classificato come *TOP 1*, indicando il massimo livello di benessere residenziale.

L'unità abitativa oggetto dello studio è anche stata selezionata per il Blower-Door-Test (Figura 4.10).



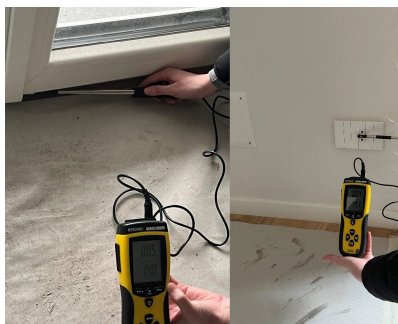
(a) *Interno appartamento - Fase pressurizzazione.*



(b) *Esterno appartamento - Fase depressurizzazione.*



(c) *Punti di estrazione ed aspirazione VMC sigillati.*



(d) *Verifica infiltrazioni d'aria a Δp_{50Pa} .*

Figura 4.10: *Descrizione fotografica fasi Blower-Door-Test.*

Relativamente al BDT, essendo il complesso residenziale caratterizzato da due palazzine di 8 appartamenti ciascuna, separate da un giunto strutturale, si caratterizzano ognuna di un proprio protocollo di certificazione. In riferimento alla *Direttiva Tecnica Blower-Door-Test* e conformemente alla norma *UNI EN ISO 13829*, il Blower-Door-Test deve essere sempre eseguito sulle singole unità abitative e non sull'intero edificio.

Nel seguente caso, essendo la singola palazzina composta da più di cinque appartamenti, le verifiche devono essere svolte su un campione di due unità abitative (Tabella 2.3). Il valore di permeabilità all'aria riferito al volume netto dell'edificio, in accordo con le normative sopracitate, risulta pari a $n_{50} = 1.32 \text{ h}^{-1}$, dove per edifici *CasaClima A* è richiesto un valore di $n_{50} \leq 1.50 \text{ h}^{-1}$.

In riferimento all'analisi acustica, le metodologie di isolamento impiegate per murature e solai, nonché le elevate caratteristiche prestazionali dei materiali e degli elementi costruttivi trasparenti, consentono di valutare positivamente il comfort acustico dell'abitazione.

Le rilevazioni sul comfort illuminotecnico sono state condotte in stanze con vetrate esposte all'irraggiamento solare, essendo orientate rispettivamente sul lato Nord-Est (*camera doppia 1*) e Sud-Ovest (*camera singola 1* e *soggiorno*). Come è possibile osservare nel report in Figura 4.9, i risultati ottenuti per il comfort illuminotecnico garantiscono valori notevolmente superiori al limine minimo raccomandato, essendo prossimi al valore che si dovrebbe tenere in "un'area di lavoro" ($\geq 400 \text{ lux}$). Come raccomandato da CasaClima, tutte le stanze sono dotate di un sistema di ombreggiamento mobile esterno; inoltre, la presenza di oggetti orizzontali e verticali garantisce un'ulteriore schermatura solare, garantendo un'illuminazione naturale diffusa all'interno degli ambienti, permettendo quindi alla luce naturale di entrare in modo omogeneo, migliorando la qualità visiva negli spazi interni. È importante notare che, le rilevazioni effettuate sono state condotte con il sistema di illuminazione artificiale attivo e non in prossimità di aperture vetrate.

Per quanto riguarda il comfort termoigrometrico, il sistema di termoregolazione dell'impianto radiante a pavimento include tre sonde: una che gestisce le serpentine al di sotto della "zona giorno", una quelle della "zona notte", ed infine una sonda che gestisce le serpentine al di sotto dei bagni, attiva solo nella stagione invernale, dal momento che, in tutti i casi e tipo-

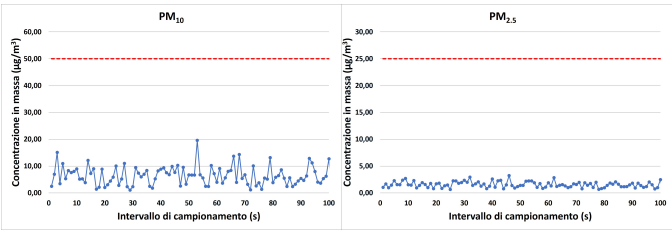
logie, i bagni non sono raffrescati nel periodo estivo per evitare fenomeni di condensa superficiale sui pavimenti.

Il controllo delle temperature nelle aree descritte è gestito tramite un display. Il passaggio tra le stagioni, programmato attraverso lo stesso dispositivo, regola direttamente la pompa di calore.

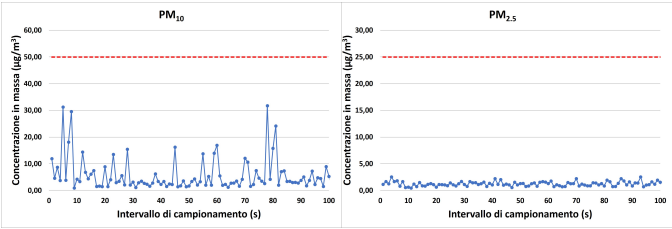
I parametri monitorati per lo studio sono completamente in linea con le impostazioni dell'impianto e rispettano i limiti accettabili per ogni parametro termoigrometrico.

Inoltre, la presenza del recuperatore di calore entalpico nell'impianto di ventilazione meccanica controllata (VMC) consente di mantenere costantemente il giusto livello di temperatura e umidità dell'aria interna. In inverno, questo sistema trasferisce il calore dall'aria in uscita a quella fredda in ingresso, garantendo l'immissione di aria pulita e riscaldata. In estate, se la temperatura esterna notturna è inferiore a quella interna, il recuperatore viene automaticamente bypassato, permettendo l'ingresso di aria più fresca senza costi aggiuntivi per il raffrescamento. In aggiunta, la VMC migliora significativamente la qualità dell'aria interna, rinnovandola continuamente con un ricambio di 0.5 volumi all'ora.

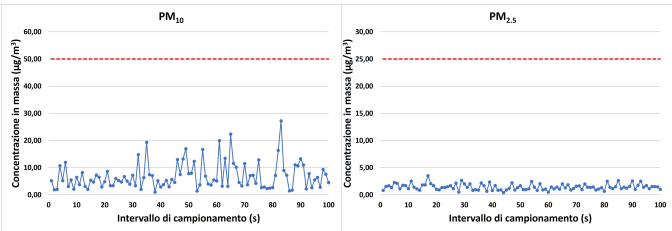
Infine, nello studio della qualità dell'aria dell'abitazione in analisi, i risultati di concentrazione di TVOC e particolato risultano essere conformi ai limiti ammissibili, con i valori di PM_{10} e $PM_{2.5}$, campionati nei singoli ambienti e illustrati di seguito, che mostrano normali fluttuazioni nella concentrazioni in massa, rimanendo costantemente al di sotto dei limiti normativi stabiliti.



(a) *Concentrazione in massa PM_{10} e $PM_{2.5}$ - camera singola 1.*



(b) *Concentrazione in massa PM_{10} e $PM_{2.5}$ - camera doppia 1.*



(c) *Concentrazione in massa PM_{10} e $PM_{2.5}$ - soggiorno.*

Figura 4.11: *Andamento della concentrazione in massa di PM_{10} e $PM_{2.5}$ durante l'attività di monitoraggio nell'abitazione "CasaClima A".*

I risultati in Figura 4.9 evidenziano, come unica *non conformità* il campionamento eseguito nel soggiorno, riguardo la concentrazione di formaldeide. Tale valore è risultato superiore al limite di 0,1 ppm (0,124

mg/m^3). Questo eccesso è riconducibile all'installazione di nuovi elementi di arredo nei giorni immediatamente precedenti il campionamento. Tale ipotesi è stata confermata da un'ulteriore analisi, condotta alcuni giorni dopo il campionamento, nella quale la concentrazione di formaldeide risultava significativamente inferiore al limite, grazie al contributo prezioso del sistema VMC sul ricambio d'aria.

4.2 Unità abitativa "Classe Energetica D"

La seconda unità abitativa oggetto d'indagine è parte di un complesso condominiale costruito nel 2002 e caratterizzato da 6 palazzine in aderenza, di 12 appartamenti ciascuna (Figura 4.12).



Figura 4.12: Unità abitativa "Classe Energetica D".

L'edificio ha ottenuto la Classe Energetica D, secondo la normativa nazionale, dopo aver completato un intervento di efficientamento energetico nel dicembre 2022.

Indagando sugli elementi costruttivi che definiscono l'edificio, emerge come le facciate siano costituite da muri di egual spessore, realizzati con blocchi in laterizio porizzato da 25 cm con isolamento termico esterno a cappotto, in *EPS grafitato* dallo spessore di 12 cm, con colla, rete e malta rasante a completare la facciata. Internamente non è presente una parete a secco, ma uno strato di intonaco di finitura.

I solai interpiano sono realizzati in laterocemento, con uno strato di circa 10 cm di calcestruzzo alleggerito per il livellamento degli impianti e pavimentazione in ceramica, sopra un massetto in sabbia e cemento.

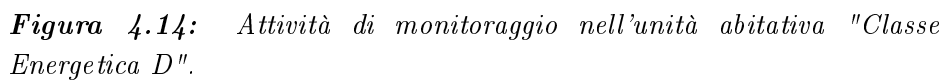
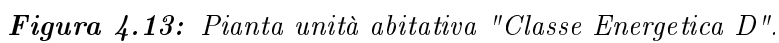
Pannelli in lana di vetro da 10 cm sono installati all'interno delle strutture in cartongesso verso i box auto e l'autorimessa. Per la correzione dei ponti termici, sono utilizzati pannelli isolanti di 5 cm di spessore, collocati a soffitto e a pavimento nei balconi.

La copertura a tetto rovescio è composta da un solaio pieno, strato di pendenza, guaina impermeabilizzante a doppio strato, pannelli isolanti in polistirene espanso estruso da 10 cm, strato di separazione in tessuto non tessuto di poliestere e strato di finitura con sistema di pavimentazione sopraelevata. Il condominio è provvisto di un impianto fotovoltaico, collocato in copertura, destinato a fornire energia elettrica alle utenze condominiali.

L'isolamento acustico è carente sia per quanto riguarda l'isolamento al calpestio sia nell'isolamento interpiano. Tra le unità abitative adiacenti, l'isolamento acustico, è garantito da pareti divisorie in muratura monostrato, realizzate con tramezzatura in laterizio porizzato da 12 cm, pannelli isolanti termici e acustici da 2 cm, e lastre in cartongesso con strato di intonaco di finitura. Le tramezzature interne sono realizzati in laterizio porizzato da 8 cm e intonaco di fondo.

Gli infissi, tutti in PVC, sono a triplo vetro con un valore di trasmittanza U_g pari a $0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$, potere fonoisolante R_w pari a 32 dB , fattore solare g pari a 60% e trasmittanza complessiva U_w tra $0,85$ e $0,73 \text{ W/m}^2\text{K}$. Inoltre, il cassonetto prefabbricato per l'alloggio di avvolgibili è in polistirene espanso sinterizzato, con conduttività termica dichiarata $\lambda_D = 0,034 \text{ W/mK}$, ad alta densità (35 kg/m^3).

L'unità abitativa in analisi, al piano primo di tale complesso condominiale, è caratterizzata da una superficie netta di $57,32 \text{ m}^2$ e un volume netto di $157,63 \text{ m}^3$.



La fase di monitoraggio, per la definizione dell'indice di comfort abitativo, è stata condotta nel marzo 2023, tre mesi dopo il completamento dei lavori. I parametri monitorati, riportati all'interno dell'applicativo e i risultati ottenuti, in termini di conformità con i limiti di accettabilità, sono riassunti in Figura 4.15.

Parametri campionati				Conformità risultati			
Comfort Termoigrometrico				Comfort Termoigrometrico			
	Soggiorno	Camera doppia I	Camera singola I		Soggiorno	Camera doppia I	Camera singola I
Temperatura globo nero [°C]	21,6	21,4	22,1	Temperatura operativa [°C]			
Temperatura dell'aria [°C]	22,2	21,7	21,8	Omogeneità termica			
Velocità dell'aria [m/s]	0,12	0,11	0,09	Velocità dell'aria [m/s]			
U.R. [%]	48,7	52,4	49,4	U.R. [%]			
Qualità dell'aria				Qualità dell'aria			
	Soggiorno	Camera doppia I	Camera singola I		Soggiorno	Camera doppia I	Camera singola I
TVOC [mg/m³]	2,85	2,24	2,32	TVOC [mg/m³]			
Formaldeide [mg/m³]	0,15	0,14	0,14	Formaldeide [mg/m³]			
PM ₁₀ [µg/m³]	8,87	7,94	7,08	PM ₁₀ [µg/m³]			
Comfort Visivo				Comfort Visivo			
	Soggiorno	Camera doppia I	Camera singola I		Soggiorno	Camera doppia I	Camera singola I
Illuminamento [lux]	224	278	184	Illuminamento [lux]			
Comfort Acustico				Comfort Acustico			
Analisi Acustica	Negativa			Analisi Acustica			
Blower Door Test				Blower Door Test			
Classe CasaClima	Non presente			Classe CasaClima	Non presente		
n ₅₀ [h ⁻¹]	-			n ₅₀ [h ⁻¹]			
Livello Comfort Abitativo:				TOP 3			

Figura 4.15: Risultati campionamento unità abitativa "Classe Energetica D".

I dati rilevati, durante le attività di monitoraggio, dimostrano una conformità con i limiti di accettabilità definiti, per la quasi totalità dei parametri ambientali investigati, suggerendo un buon livello di benessere indoor. In particolare, l'applicativo classifica il livello di comfort abitativo come *TOP 3*, indicando una condizione di comfort intermedio.

In riferimento all'analisi acustica, le metodologie di isolamento adottate non prevedono l'uso di materiali specifici di isolamento, ad eccezione del solaio verso l'autorimessa e delle tramezzature tra appartamenti e verso pianerottoli e corpo scala. Nel primo caso, nel controsoffitto è stata inserita della lana di vetro, materiale ad alto potere fonoisolante (costante di attenuazione acustica, riportata nella scheda tecnica di 85 dB/m), per isolare acusticamente gli appartamenti al primo piano dai rumori provenienti dall'autorimessa sottostante.

Relativamente agli elementi costruttivi trasparenti, il comfort acustico che essi sono in grado di garantire è eccellente, grazie alle elevate prestazioni degli infissi, come indicato nella scheda tecnica del prodotto. Nei solai interpiano non sono stati installati dispositivi anticalpestio o altri materiali

per l'isolamento acustico. Le murature esterne sono isolate termicamente, ma non acusticamente. L'isolamento acustico delle pareti divisorie tra gli appartamenti, così come verso i pianerottoli e i corpi scala, rappresenta l'unico sistema attualmente presente. Tuttavia, le specifiche tecniche di questi materiali non sono documentate poiché risalgono all'anno di costruzione e non sono state oggetto di modifiche durante il processo di riqualificazione energetica. In conclusione, l'analisi descrittiva del comfort acustico in questo appartamento evidenzia un livello complessivamente negativo di comfort acustico.

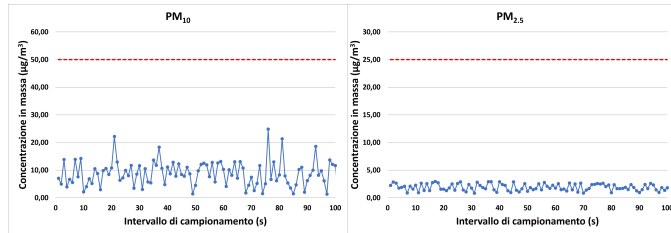
In relazione al Blower-Door-Test, la sua non esecuzione ha un impatto trascurabile sul livello di comfort abitativo complessivo non alterando in maniera significativa il risultato finale.

Le analisi del livello di illuminamento dei differenti locali sono state condotte in ambienti con vetrate esposte all'irraggiamento solare, essendo orientate rispettivamente sul lato Nord-Ovest (*camera doppia*) e sul lato Sud-Ovest (*camera singola* e *soggiorno*). Come è possibile osservare nel report in Figura 4.15, i risultati ottenuti per il comfort illuminotecnico garantiscono valori superiori al limine minimo raccomandato di 100 lux. Anche qui, tutti gli ambienti sono dotati di un sistema di ombreggiamento mobile esterno; inoltre, la presenza di aggetti orizzontali e verticali garantisce un'ulteriore schermatura solare, garantendo un'illuminazione naturale diffusa all'interno degli ambienti migliorando la qualità visiva negli spazi interni. È importante notare che le rilevazioni effettuate sono state condotte con il sistema di illuminazione artificiale attivo e non in prossimità di aperture vetrate.

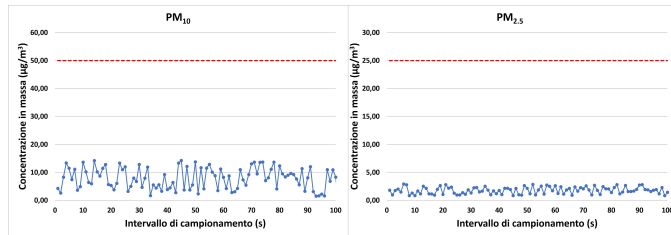
Per quanto riguarda il comfort termoigrometrico, l'appartamento è dotato di un impianto di riscaldamento e raffrescamento autonomo, che utilizza radiatori per il riscaldamento e condizionatori per il raffrescamento. Nella stagione invernale, una caldaia a condensazione, caratterizzata da una tecnologia che mira a minimizzare la perdita di calore durante l'espulsione dei fumi di scarico, utilizza il calore derivato dalla combustione per riscaldare l'acqua, destinata sia all'impianto di riscaldamento, sia alle utenze, come acqua calda sanitaria. Durante il campionamento, la temperatura dell'impianto di riscaldamento è impostata a 22.5 °C, tramite un display programmabile posizionato nel disimpegno. I risultati (Figura

4.15) in termini di comfort termoigrometrico, risultano entro i limiti di accettabilità, evidenziando un'omogeneità termica significativa in tutti gli ambienti.

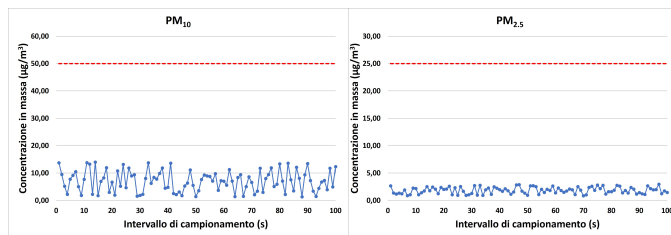
Analizzando la qualità dell'aria dell'abitazione, i risultati di concentrazione di PM_{10} e $PM_{2.5}$, campionati nei singoli ambienti e illustrati di seguito, mostrano normali fluttuazioni nella concentrazioni in massa, rimanendo costantemente al di sotto dei limiti normativi stabiliti.



(a) *Concentrazione in massa PM_{10} e $PM_{2.5}$ - soggiorno.*



(b) *Concentrazione in massa PM_{10} e $PM_{2.5}$ - camera doppia.*



(c) *Concentrazione in massa PM_{10} e $PM_{2.5}$ - camera singola.*

Figura 4.16: *Andamento della concentrazione in massa di PM_{10} e $PM_{2.5}$ durante l'attività di monitoraggio nell'abitazione "Classe Energetica D".*

Delle difformità si evidenziano in termini di concentrazione di formaldeide (Figura 4.15): i valori campionati risultano essere sempre superiore al limite di $0.124 \text{ mg}/\text{m}^3$ in tutti e tre i locali, seppur in percentuali non ec-

cessive. Il dato campionato eccede rispetto al limite del 21% nel soggiorno e del 13% nelle altre due camere.

Questo eccesso è imputabile a diversi fattori, probabilmente connessi a variazioni nell'ambiente interno, come l'impiego di materiali da costruzione a seguito degli interventi di efficientamento energetico, effettuati nei mesi precedenti, e l'uso di vari prodotti per la pulizia. A ciò si aggiunge una scarsa ventilazione all'interno dell'abitazione che non facilita la corretta dispersione delle sostanze inquinanti indoor. Secondo quanto riferito dai residenti, il ricambio d'aria avviene per un intervallo di 20-30 minuti al giorno, nelle prime ore del mattino, il che risulta insufficiente a garantire una dispersione adeguata dei contaminanti, come la formaldeide, contribuendo così al loro accumulo nel tempo.

4.3 Unità abitativa "Classe Energetica G"

L'oggetto dello studio è un appartamento, posto al primo piano di un condominio di due unità immobiliari, costruito nel 1980 (Figura 4.17).



Figura 4.17: Unità abitativa "Classe Energetica G".

L'edificio è classificato in *Classe Energetica G*, secondo la normativa nazionale.

L'analisi degli elementi costruttivi dell'edificio rivela che le tamponature sono realizzate in blocchi di tufo squadrate con uno spessore di 40 cm, rifinite con intonaco sia internamente che esternamente, e verniciatura di fondo su quest'ultimo. Le tramezzature sono costituite da laterizio porizzato di 8 cm di spessore, rivestito con intonaco di fondo.

I solai interpiano sono in laterocemento con uno strato di calcestruzzo alleggerito per il livellamento degli impianti, e pavimentazione in ceramica sopra un massetto in sabbia e cemento.

La copertura inclinata, in legno, si compone di assito in legno e tegole in laterizio (Figura 4.18), senza alcuna presenza di materiale impermeabilizzante.

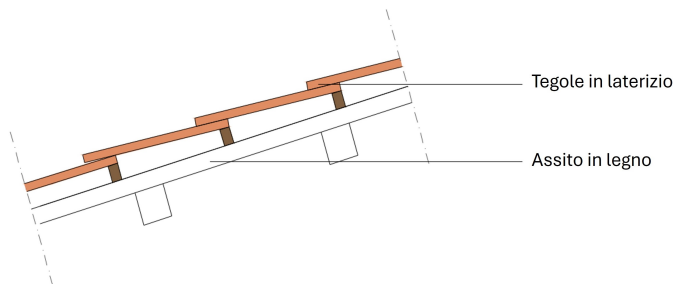


Figura 4.18: Dettaglio stratigrafico: tetto a falda privo di impermeabilizzazione.

L'isolamento acustico è pressoché assente sia per quanto riguarda l'isolamento al calpestio, sia per l'isolamento interpiano, tra le due unità abitative, e sia in termini di isolamento al rumore aereo. Gli infissi, sostituiti nel 2010, tutti in PVC, sono a doppio vetro con un valore di trasmittanza U_g pari a $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$, potere fonoisolante R_w pari a 32 dB , fattore solare g pari a 65% e trasmittanza complessiva U_w tra $1,21$ e $0,73 \text{ W/m}^2\text{K}$. Qui, il cassonetto per l'alloggio dell'avvolgibile risulta privo di isolamenti.

L'unità abitativa in analisi, situata al piano primo di tale complesso condominiale, è caratterizzata da una superficie netta di $117,44 \text{ m}^2$ e un volume netto di $320,61 \text{ m}^3$.

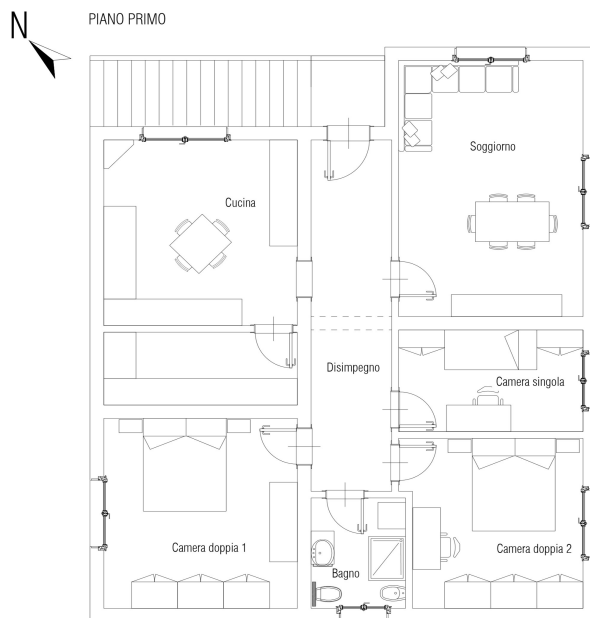


Figura 4.19: *Pianta unità abitativa "Classe Energetica G".*

Le misurazioni sono state eseguite in tre differenti ambienti dell'unità abitativa: *soggiorno*, *camera doppia 1* e *camera singola*, posizionando la strumentazione come riportato in Figura 4.20.

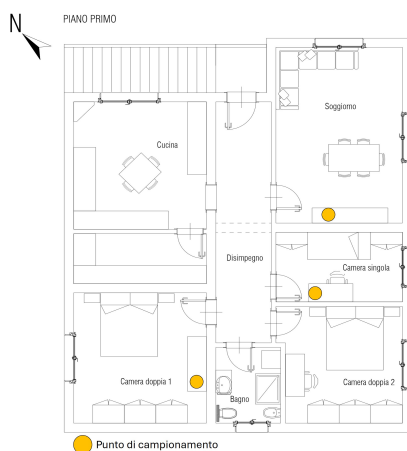


Figura 4.20: *Attività di monitoraggio nell'unità abitativa "Classe Energetica G".*

L'attività di monitoraggio è stata eseguita nel marzo 2023. I parametri campionati, riportati all'interno dell'applicativo e i risultati ottenuti, in termini di conformità con i limiti di accettabilità, sono riassunti in Figura 4.21.

Parametri campionati				Conformità risultati			
Comfort Termoigrometrico				Comfort Termoigrometrico			
	Soggiorno	Camera singola	Camera doppia I		Soggiorno	Camera singola	Camera doppia I
Temperatura globo nero [°C]	20,6	20,2	19,6	Temperatura operativa [°C]			
Temperatura dell'aria [°C]	21,8	21,5	20,8	Omogeneità termica			
Velocità dell'aria [m/s]	0,12	0,12	0,15	Velocità dell'aria [m/s]			
U.R. [%]	34,2	41,3	42,4	U.R. [%]			
Qualità dell'aria				Qualità dell'aria			
	Soggiorno	Camera singola	Camera doppia I		Soggiorno	Camera singola	Camera doppia I
TVOC [mg/m³]	3,36	3,06	2,38	TVOC [mg/m³]			
Formaldeide [mg/m³]	0,15	0,14	0,10	Formaldeide [mg/m³]			
PM ₁₀ [µg/m³]	10,20	8,34	8,28	PM ₁₀ [µg/m³]			
Comfort Visivo				Comfort Visivo			
	Soggiorno	Camera singola	Camera doppia I		Soggiorno	Camera singola	Camera doppia I
Illuminamento [lux]	264	198	82	Illuminamento [lux]			
Comfort Acustico				Comfort Acustico			
Analisi Acustica	Negativa			Analisi Acustica			
Blower Door Test				Blower Door Test			
Classe CasaClima	Non presente			Classe CasaClima	Non presente		
n ₅₀ [h ⁻¹]	-			n ₅₀ [h ⁻¹]			
Livello Comfort Abitativo:				TOP 5			

Figura 4.21: Risultati campionamento unità abitativa "Classe Energetica G".

I risultati evidenziano una discreta conformità con i limiti di accettabilità stabiliti, per la maggior parte dei parametri ambientali esaminati, suggerendo un livello di comfort modesto. In particolare, l'applicativo classifica il livello di comfort abitativo come *TOP 5*, indicando il livello più basso di benessere indoor.

In relazione al comfort acustico, le tecniche di isolamento impiegate non prevedono l'uso di materiali fonoisolanti. Secondo le specifiche fornite dal produttore, solo gli elementi trasparenti di costruzione offrono elevate capacità di insonorizzazione, sebbene da soli non siano sufficienti. I solai interpiano mancano di dispositivi anticalpestio e di altri materiali isolanti acustico aereo. Allo stesso modo, le stratigrafie delle tamponature non presentano alcun tipo di isolamento acustico (né tantomeno termico), portando a un esito negativo nell'analisi del comfort acustico.

In relazione al Blower-Door-Test, la sua non esecuzione ha un impatto trascurabile sul livello di comfort abitativo complessivo, non alterando in maniera significativa il risultato finale.

Per quanto riguarda il comfort luminoso, il livello di illuminamento è stato misurato in locali dotati di vetrate esposte all'irraggiamento solare, con orientamento rispettivamente a Nord-Ovest (*camera doppia 1*) e Sud-Est (*camera singola e soggiorno*). Come evidenziato in Figura 4.21, i risultati sull'analisi del benessere illuminotecnico indicano un buon livello di illuminazione nei due ambienti esposti a Sud-Est, superando il valore minimo raccomandato di 100 lux. Tuttavia, l'ambiente orientato a Nord-Ovest non raggiunge il limite minimo di illuminamento richiesto. È importante notare che queste rilevazioni sono state condotte con il sistema di illuminazione artificiale attivo, il quale non era comunque sufficiente a raggiungere il valore limite raccomandato.

Anche qui, tutti gli ambienti sono dotati di un sistema di ombreggiamento mobile esterno. L'assenza di aggetti orizzontali e verticali limita la schermatura solare, con conseguente illuminazione naturale diretta all'interno degli ambienti, la quale può essere mitigata solo tramite l'utilizzo del sistema di ombreggiamento installato.

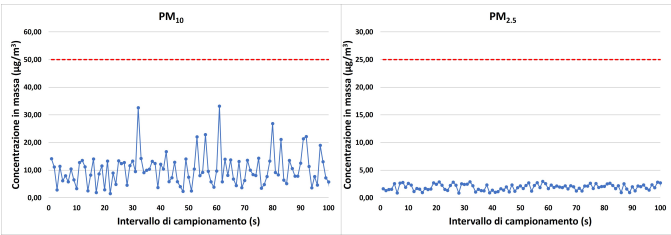
Per quanto riguarda il comfort termoigrometrico, l'appartamento è dotato di un impianto di riscaldamento e raffrescamento autonomo, che utilizza radiatori per il riscaldamento e condizionatori per il raffrescamento. Nella stagione invernale, una termostufa utilizza il calore derivato dalla combustione per riscaldare l'acqua, destinata sia al sistema di riscaldamento, sia alle utenze, come acqua calda sanitaria.

Nei risultati riportati nella Figura 4.21, relativamente al comfort termoigrometrico, si osserva una disomogeneità termica evidente. Questa differenza tra la temperatura media radiante, misurata a partire dalla temperatura del globo nero, e la temperatura dell'aria ambiente è attribuibile alla mancanza di una distribuzione uniforme del riscaldamento, all'assenza di adeguati isolamenti termici e alla presenza di ponti termici che favoriscono il flusso di calore verso zone a temperature inferiori. Tale disomogeneità causa differenze significative tra la temperatura delle superfici e quella dell'aria circostante, con conseguente aumento della temperatura di riscaldamento e dei costi associati.

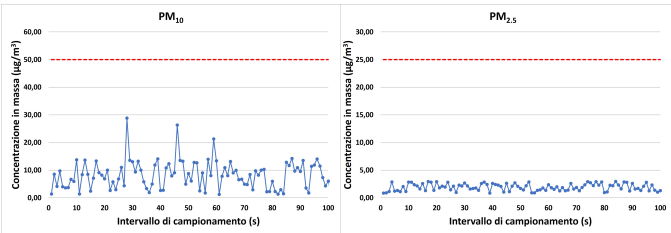
Altro aspetto di non conformità risulta essere l'umidità dell'aria ambiente nel soggiorno, che seppur di poco, è in disaccordo con il valore limite.

Analizzando la qualità dell'aria dell'abitazione, i risultati di concentrazione di PM_{10} e $PM_{2.5}$, campionati nei singoli ambienti e illustrati

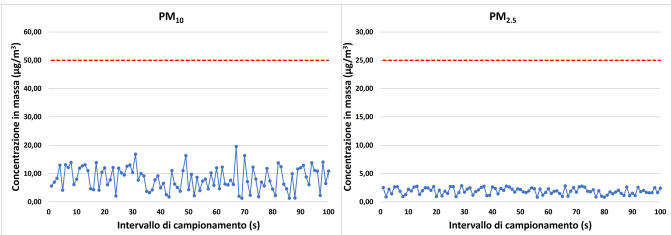
di seguito, mostrano normali fluttuazioni nella concentrazioni in massa, rimanendo costantemente al di sotto dei limiti normativi stabiliti.



(a) Concentrazione in massa PM_{10} e $PM_{2.5}$ - soggiorno.



(b) Concentrazione in massa PM_{10} e $PM_{2.5}$ - camera doppia.



(c) Concentrazione in massa PM_{10} e $PM_{2.5}$ - camera singola.

Figura 4.22: Andamento della concentrazione in massa di PM_{10} e $PM_{2.5}$ durante l'attività di monitoraggio nell'abitazione "Classe Energetica G".

Delle difformità si evidenziano in termini di concentrazione di TVOC. I valori campionati risultano essere superiore al limite raccomandato di $3 \text{ mg}/\text{m}^3$ con escedenze riscontrate in due locali, il *soggiorno* e la *camera singola*, seppur in percentuali minime; inoltre, nella *camera singola* si evidenzia anche un superamento dei limiti di concentrazione di formaldeide. Queste difformità possono essere attribuite a diversi fattori, tra cui il processo di combustione della stufa e una ventilazione insufficiente all'interno dell'abitazione, che non facilita la corretta dispersione dei

fumi e permette ai composti di accumularsi nel tempo. Infatti, secondo quanto dichiarato dai residenti, il ricambio d'aria nell'abitazione, avviene, attraverso l'apertura degli infissi, per un periodo di 10-20 minuti al giorno nelle prime ore del mattino, il che non è sufficiente per un ricambio d'aria completo, contribuendo al ristagno e all'accumulo di questi inquinanti.

4.4 Considerazioni finali - Analisi edifici

Analizzando i risultati dei tre casi studio, emergono diverse considerazioni riguardo all'efficienza energetica e al suo impatto sul comfort abitativo. L'appartamento certificato *CasaClima A* rappresenta un esempio significativo di come una costruzione progettata per elevate prestazioni energetiche possa garantire un ambiente interno ottimale dal punto di vista del benessere abitativo. La sua eccellente coibentazione, il sistema di ventilazione meccanica controllata (VMC) e l'utilizzo di tecnologie avanzate per il controllo dell'umidità hanno assicurato condizioni superiori di comfort termico e acustico, oltre a una qualità dell'aria interna ottimale. Inoltre, nella fase di progettazione, il rapporto aeroilluminante massimizza l'utilizzo della luce solare, riducendo il consumo energetico derivante dall'illuminazione artificiale. Questa sinergia tra prestazioni energetiche, comfort abitativo e design non solo migliorano il benessere degli occupanti, ma può anche contribuire significativamente a ridurre il consumo energetico totale dell'edificio nel lungo periodo.

D'altra parte, l'appartamento in *Classe Energetica G* ha evidenziato gravi carenze legate agli standard energetici insufficienti. La scarsa coibentazione e l'inefficienza dei sistemi di riscaldamento e raffreddamento creano un ambiente abitativo caratterizzato da variazioni di temperatura, livelli di umidità non ottimali e una qualità dell'aria interna insufficiente. Inoltre, il comfort acustico è compromesso da una bassa capacità di isolamento, contribuendo a una maggiore esposizione ai rumori esterni e interni. Questi fattori non solo compromettono il comfort abitativo degli occupanti, ma potrebbero aumentare anche il rischio di problemi di salute a lungo termine.

L'unità abitativa in *Classe Energetica D* ha rappresentato un esempio intermedio, dimostrando come un equilibrio tra gli standard energetici adottati e le condizioni abitative possa avere un impatto positivo sul be-

nessere degli occupanti. Pur non raggiungendo i livelli di efficienza energetica elevati, dell'appartamento *CasaClima A*, essa offre un ambiente relativamente confortevole, con miglioramenti significativi rispetto all'unità in *Classe Energetica G*. È essenziale sottolineare che tali valutazioni sono sempre circoscritte ai parametri e agli standard definiti nel contesto specifico di questo studio.

In conclusione, l'analisi dei tre casi studio ha chiaramente dimostrato come elevate prestazioni energetiche non sono solo auspicabili, ma essenziali per garantire condizioni di benessere abitativo ottimali e sostenibili. Questi risultati sottolineano l'importanza critica di normative edilizie che promuovano standard elevati di efficienza energetica, non solo per ridurre il consumo complessivo di energia, ma anche per migliorare la qualità di vita degli ambienti residenziali, quindi, il benessere degli occupanti.

Capitolo 5

Conclusioni

La qualità complessiva degli ambienti interni, *IEQ Indoor Environmental Quality*, intesa come insieme di comfort termico, acustico, visivo e di qualità dell'aria, è una tematica che riveste un'importanza significativa relativamente al benessere degli occupanti. Numerosi studi e ricerche hanno dimostrato che una scarsa qualità, negli ambienti confinati, può avere effetti negativi sulla salute, influenzando significativamente la qualità di vita dei residenti.

Per questi motivi, soprattutto nell'ambito dell'edilizia residenziale, lo sviluppo di un *indice di comfort abitativo* rappresenta, ad oggi, un passaggio obbligato nella classificazione di tali ambienti, consentendo una valutazione strutturata e obiettiva della qualità degli spazi abitativi, fornendo uno strumento di indicizzazione del comfort fisico e mentale degli occupanti.

Nel seguente studio, per lo sviluppo di tale indicatore, sono stati presi in considerazione i principali fattori ambientali, definendo i limiti di accettabilità in riferimento a norme tecniche e indicazioni della letteratura. Per offrire un indicatore del benessere abitativo, che rifletta anche le percezioni soggettive, sono stati attribuiti pesi d'incidenza ai diversi fattori ambientali, in funzione della sensibilità di un campione di intervistati, attraverso un questionario d'indagine.

I risultati del questionario hanno fornito una indicazione importante sulle percezioni e le esperienze dei partecipanti, riguardo al comfort abitativo, sia in termini di importanza che di soddisfazione. Questo strumento ha definito il comfort termico come il parametro maggiormente rilevante, sia in termini di importanza che di insoddisfazione, seguito dal benessere

acustico, visivo e di qualità dell'aria. Inoltre, il questionario ha permesso di identificare specifiche aree di intervento prioritarie, per migliorare il benessere abitativo complessivo, con le condizioni termiche o acustiche che richiedono massima urgenza d'intervento.

Complessivamente, i risultati del sondaggio hanno offerto una valutazione approfondita delle considerazioni di comfort negli ambienti residenziali, permettendo di identificare i parametri più influenti e sensibili per gli occupanti, ponendo le basi, inoltre, per la formulazione di raccomandazioni mirate a migliorare il design degli edifici e le politiche abitative, ottimizzando il benessere degli occupanti, promuovendo ambienti più salubri e sostenibili.

I casi studio esaminati comprendono edifici esistenti soggetti a interventi di riqualificazione energetica e nuove costruzioni. Nella prima analisi, condotta su un'abitazione in classe energetica nazionale A4 e certificata *CasaClima A*, si evidenzia un elevato livello di comfort abitativo. Secondo l'applicativo sviluppato, l'unità abitativa è classificata come *TOP1*, massimo livello di benessere residenziale ottenibile. L'abitazione ha costituito un importante modello di riferimento per valutare i benefici, in termini di comfort indoor, derivanti dall'efficienza energetica elevata dell'involucro edilizio. Grazie all'adozione di tecnologie avanzate come l'isolamento termico, il sistema di ventilazione meccanica controllata, la progettazione orientata e l'utilizzo di materiali ad alta efficienza acustica, l'unità abitativa ha mostrato livelli superiori di benessere abitativo. I dati delle misurazioni hanno confermato la piena conformità ai rigidi limiti di accettabilità imposti per tutti i parametri ambientali monitorati.

Lo studio condotto nell'unità abitativa in *Classe Energetica D* ha evidenziato una situazione intermedia. La mancanza di soluzioni avanzate impiantistiche e di isolamento, come l'assenza della VMC, dell'isolamento acustico interpiano e al rumore aereo e del sistema di riscaldamento a pavimento, ha causato una maggiore variabilità nei parametri di comfort, pur mantenendo prestazioni complessivamente soddisfacenti, ma non ottimali in tutte le condizioni. Lo studio ha evidenziato l'importanza di equilibrare l'efficienza energetica con i costi, suggerendo che investimenti mirati possano portare a miglioramenti significativi del comfort. Secondo l'applicativo di valutazione del comfort utilizzato, l'unità abitativa è stata classificata come *TOP3*, indicando una condizione di benessere residenziale intermedia.

Come prevedibile, l'estremo inferiore dello spettro di comfort abitativo

è rappresentato dallo studio condotto nell'abitazione in *Classe Energetica G*. La mancanza di adeguato isolamento e di tecnologie impiantistiche moderne ha evidenziato problematiche significative a livello oggettivo, come inefficienze termiche, acustiche e di qualità dell'aria, e in termini di benessere abitativo. Secondo l'applicativo di valutazione del comfort utilizzato, l'unità abitativa è stata classificata come *TOP5*, indicando una limitata condizione di benessere residenziale. Questo caso ha evidenziato la necessità urgente di interventi volti alla riqualificazione energetica al fine di migliorare il benessere abitativo dei residenti, e contemporaneamente, in situazioni specifiche, ridurre il consumo energetico.

L'analisi comparativa ha chiaramente evidenziato come gli edifici con certificazioni energetiche più elevate offrano anche un comfort abitativo superiore. Tuttavia, è cruciale considerare il contesto economico e sociale al fine di proporre soluzioni sostenibili e accessibili. La ricerca ha dimostrato che l'introduzione di tecnologie innovative e materiali avanzati può significativamente migliorare la qualità di vita degli occupanti, riducendo i consumi energetici e minimizzando l'impatto ambientale. Purtroppo, la sensibilizzazione degli utenti è spesso legata al tema del risparmio, economico prima di tutto, senza coinvolgere, ad esempio, la qualità dell'aria e la ventilazione o l'illuminazione degli ambienti. L'obiettivo delle strutture ad alta efficienza energetica è principalmente ridurre i consumi energetici, per limitare i costi in un contesto di continuo aumento dei prezzi dei combustibili, e per affrontare le problematiche ambientali, senza trascurare il benessere indoor degli occupanti.

Il lavoro ha sottolineato l'importanza, nelle future ricerche, di considerare le esigenze sensoriali degli abitanti per guidare interventi migliorativi specifici. Nonostante alcune limitazioni, relativamente alla strumentazione, ai tempi di rilevazione, alla correlazione "questionario-monitoraggio", il presente lavoro deve essere considerato come un importante punto di partenza per futuri approfondimenti. La metodologia utilizzata rappresenta una base iniziale importante per quantificare il comfort abitativo, ma i risultati suggeriscono la necessità di un approccio più strutturato e integrato in fasi successive.

In conclusione, i risultati di questa ricerca costituiscono una base solida per lo sviluppo di strategie di progettazione e riqualificazione degli edifici residenziali. Tali strategie dovrebbero mirare al raggiungimento di un equilibrio tra efficienza energetica, costi e comfort abitativo, promuovendo l'adozione di soluzioni sostenibili e innovative atte a migliorare il benessere

residenziale. Studi futuri dovrebbero prevedere una raccolta dati più ampia e continuativa, con l'inclusione di misurazioni oggettive dei parametri ambientali eseguite in parallelo alle valutazioni soggettive. Ciò permetterebbe di ottenere una visione più completa e di delineare un quadro più affidabile del comfort abitativo.

In conclusione, la qualità degli ambienti interni e il comfort abitativo rappresentano aspetti fondamentali per il benessere degli occupanti. La ricerca condotta ha messo in luce l'importanza di sviluppare indicatori di comfort che considerino non solo i parametri fisici, ma anche le percezioni soggettive degli utenti. I risultati ottenuti evidenziano che un'adeguata progettazione degli spazi abitativi, accompagnata dall'uso di tecnologie avanzate e materiali sostenibili, può contribuire significativamente a migliorare la qualità della vita.

Tuttavia, è cruciale affrontare le sfide economiche e sociali per garantire che le soluzioni proposte siano accessibili a un pubblico più ampio. L'attenzione dovrebbe essere rivolta a sensibilizzare gli occupanti sull'importanza della qualità ambientale, superando la visione limitata del risparmio economico, per promuovere ambienti più salubri e sostenibili.

Future ricerche dovrebbero concentrarsi sull'approfondimento delle esigenze sensoriali degli occupanti e sull'integrazione delle metodologie di valutazione, al fine di ottimizzare il comfort abitativo. Prevedendo una raccolta dati più ampia e continuativa, con l'inclusione di misurazioni oggettive dei parametri ambientali eseguite in parallelo alle valutazioni soggettive. Ciò permetterebbe di delineare un quadro più concreto del comfort abitativo. Solo adottando una prospettiva multidisciplinare sarà possibile progettare edifici che, oltre a garantire elevate prestazioni energetiche, offrano anche un livello superiore di qualità della vita per gli occupanti.

Elenco delle figure

1.1	Classificazione ponti termici.	16
1.2	Globotermometro Extech HT200 (GEASS). Strumentazione per il campionamento di: temperatura di globo umido <i>WBGT</i> ($0-59^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$), temperatura dell'aria ($0-50^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$), temperatura di globo nero ($0-80^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$) e umidità relativa ($1-99\% \pm 2\%$).	20
1.3	Anemometro TA300 (Trotec) - Strumento di precisione per il monitoraggio della velocità del vento. Portata di misurazione: $0-25$ m/s. Risoluzione: ± 0.01 m/s. Precisione: $\pm 5\%$ del valore misurato.	23
1.4	OPS 3330, TSI (Minnesota, USA). Concentrazione massima: 3000 <i>part/cm</i> ³ e tra 0.001 e 275000 $\mu\text{g/m}^3$. Range dimensionale: $0.3 - 10$ μm . Frequenza di campionamento ≥ 1 s. Portata volumetrica: 1 L/min per l'aerosol campione e 1 L/min per il flusso di supporto.	32
1.5	Principio di funzionamento OPS 3330.	32
1.6	BQ16 - Misuratore di HCHO/TVOC (Trotec). Campo di misura HCHO: $0.00 - 5.00$ mg/m^3 . Campo di misura TVOC: $0.00 - 9.99$ mg/m^3 . Risoluzione HCHO: ± 0.01 mg/m^3 . Risoluzione TVOC: ± 0.01 mg/m^3 . Precisione HCHO: $\pm 5\%$ del valore misurato. Precisione TVOC: $\pm 10\%$ del valore misurato.	33
1.7	Spettro della radiazione elettromagnetica.	35
1.8	Rappresentazione grafica delle grandezze fotometriche. . . .	36
1.9	Luxmetro BF06 (Trotec). Campo di misura $0-40000$ <i>lx</i> . Risoluzione: 0.1 <i>lux</i> . Precisione: $\pm 5\%$ del valore misurato.	39
1.10	Soglia di udibilità e livelli di pressione sonora.	41

1.11	Classificazione immobili ai sensi del " <i>DPCM 5 dicembre 1997</i> " - Definizione dei requisiti acustici passivi degli edifici.	42
2.1	Schematizzazione elementi disperdenti di un edificio tipo.	52
2.2	Unità abitativa sottoposto a Blower-Door-Test.	56
3.1	Questionario d'indagine - Livello importanza comfort abitativo.	72
3.2	Questionario d'indagine - Livello soddisfazione comfort abitativo.	74
3.3	Questionario d'indagine - Indicazione aree di intervento per miglioramento del comfort abitativo secondo priorità personali degli intervistati.	76
3.4	Questionario d'indagine - Classi energetiche unità abitative degli intervistati.	79
3.5	Questionario d'indagine - Indicazione interventi di efficientamento energetico su unità abitative degli intervistati.	80
3.6	Interfaccia applicativo "Indice di Comfort Abitativo".	82
3.7	Calcolo "Indice di Comfort Abitativo".	85
4.1	Unità abitativa " <i>CasaClima A</i> ".	88
4.2	Isolamento in polistirene espanso sinterizzato (EPS) grafitato.	89
4.3	Descrizione fotografica della posa in opera di sistemi isolanti in partizioni orizzontali e verticali per la correzione dei ponti termici.	90
4.4	Descrizione fotografica della posa in opera della coibentazione in copertura.	91
4.5	Descrizione fotografica della posa in opera di sistemi isolanti, termici e acustici, in partizioni orizzontali dell'involucro edilizio.	92
4.6	Descrizione fotografica della posa in opera di sistemi isolanti, termici e acustici, in partizioni orizzontali e verticali dell'involucro edilizio.	93
4.7	Pianta unità abitativa " <i>CasaClima A</i> ".	94
4.8	Attività di monitoraggio nell'unità abitativa " <i>CasaClima A</i> ".	95
4.9	Risultati campionamento unità abitativa " <i>CasaClima A</i> ".	95
4.10	Descrizione fotografica fasi Blower-Door-Test.	96

4.11	Andamento della concentrazione in massa di PM_{10} e $PM_{2.5}$ durante l'attività di monitoraggio nell'abitazione " <i>CasaClima A</i> ".	99
4.12	Unità abitativa "Classe Energetica D".	100
4.13	Pianta unità abitativa "Classe Energetica D".	102
4.14	Attività di monitoraggio nell'unità abitativa "Classe Energetica D".	102
4.15	Risultati campionamento unità abitativa "Classe Energetica D".	103
4.16	Andamento della concentrazione in massa di PM_{10} e $PM_{2.5}$ durante l'attività di monitoraggio nell'abitazione "Classe Energetica D".	105
4.17	Unità abitativa "Classe Energetica G".	106
4.18	Dettaglio stratigrafico: tetto a falda privo di impermeabilizzazione.	107
4.19	Pianta unità abitativa "Classe Energetica G".	108
4.20	Attività di monitoraggio nell'unità abitativa "Classe Energetica G".	108
4.21	Risultati campionamento unità abitativa "Classe Energetica G".	109
4.22	Andamento della concentrazione in massa di PM_{10} e $PM_{2.5}$ durante l'attività di monitoraggio nell'abitazione "Classe Energetica G".	111

Elenco delle tabelle

1.1	Parametri ambientali termoigrometrici: condizioni microclimatiche di benessere termico - UNI EN 16798.	15
1.2	Identificazione parametri termoigrometrici e relativa apparecchiatura di misurazione.	19
1.3	Direttiva Europea 2008/50/EC - Limiti su PM_{10} e $PM_{2.5}$. . .	31
2.1	Classi energetiche <i>CasaClima</i> e relativo grado di fabbisogno energetico dell'involucro.	49
2.2	Valori minimi per test BDT in un edificio plurifamiliare. . .	55
2.3	Valori limite per BDT suddivisi per classe CasaClima. . . .	56
3.1	Risultati questionario d'indagine - Livello importanza comfort abitativo.	66
3.2	Risultati questionario d'indagine - Livello soddisfazione comfort abitativo.	66
3.3	Valore di ponderazione finale componenti - Indice di Comfort Abitativo.	84
3.4	Livelli di classificazione unità abitativa - Indice di Comfort Abitativo.	85

Bibliografia

- [1] Xi Chen, Hongxing Yang, and Lin Lu. A comprehensive review on passive design approaches in green building rating tools. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50:1425–1436, 2015.
- [2] Y Elaouzy and A El Fadar. Energy, economic and environmental benefits of integrating passive design strategies into buildings: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 167:112828, 2022.
- [3] Fausto Barbolini, Paolo Cappellacci, and Luca Guardigli. A design strategy to reach nzeb standards integrating energy efficiency measures and passive energy use. *Energy Procedia*, 111:205–214, 2017.
- [4] Giovanni Barone, Annamaria Buonomano, Cesare Forzano, Giovanni Francesco Giuzio, and Adolfo Palombo. Passive and active performance assessment of building integrated hybrid solar photovoltaic/thermal collector prototypes: Energy, comfort, and economic analyses. *Energy*, 209:118435, 2020.
- [5] Adriano Bisello. Assessing multiple benefits of housing regeneration and smart city development: the european project sinfonia. *Sustainability*, 12(19):8038, 2020.
- [6] title = "EPBD – Energy Performance of Building Directive " DIRETTIVA 2024/1275/CE.
- [7] Sara Kunkel and Eleni Kontonasiou. Indoor air quality, thermal comfort and daylight policies on the way to nzeb—status of selected ms and future policy recommendations. *Proceedings of the ECEEE Summer Study, First Fuel Now, Belambra Les Criques, Toulon, France*, pages 1–6, 2015.

-
- [8] Massimiliano Manfren, Benedetto Nastasi, Edoardo Piana, and Lamberto Tronchin. On the link between energy performance of building and thermal comfort: An example. In *AIP Conference Proceedings*, volume 2123. AIP Publishing, 2019.
 - [9] Andrea Boeri, Laura Gabrielli, and Danila Longo. Evaluation and feasibility study of retrofitting interventions on social housing in Italy. *Procedia Engineering*, 21:1161–1168, 2011.
 - [10] Graziano Salvalai, Gabriele Masera, and Marta Maria Sesana. Italian local codes for energy efficiency of buildings: Theoretical definition and experimental application to a residential case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42:1245–1259, 2015.
 - [11] Melek Ozdamar and Filiz Umarogullari. Thermal comfort and indoor air quality. *Int. J. Sci. Res. Innov. Technol*, 5(3):2313–3759, 2018.
 - [12] Ludovico Danza, Benedetta Barozzi, Alice Bellazzi, Lorenzo Belussi, Anna Devitofrancesco, Matteo Ghellere, Francesco Salamone, Fabio Scamoni, and Chiara Scrosati. A weighting procedure to analyse the indoor environmental quality of a zero-energy building. *Building and Environment*, 183:107155, 2020.
 - [13] Francesca Romana D’Ambrosio, Luca Piterà, et al. *La qualità globale dell’ambiente interno. Un nuovo approccio alla progettazione e alla gestione degli edifici nel rispetto della sostenibilità in edilizia (d’Ambrosio Alfano FR, Piterà L-coordinatori)*. Delfino, 2014.
 - [14] Francesca Romana d’Ambrosio Alfano, Bjarne W Olesen, Boris Igor Palella, and Giuseppe Riccio. Thermal comfort: Design and assessment for energy saving. *Energy and Buildings*, 81:326–336, 2014.
 - [15] Shenglan Jing, Baizhan Li, Meilan Tan, and Hong Liu. Impact of relative humidity on thermal comfort in a warm environment. *Indoor and Built Environment*, 22(4):598–607, 2013.
 - [16] Jari Palonen, Olli Seppänen, and Jouni JK Jaakkola. The effects of air temperature and relative humidity on thermal comfort in the office environment. *Indoor Air*, 3(4):391–397, 1993.

-
- [17] Francesco Babich, Ingrid Demanega, Francesca Avella, and Annamaria Belleri. Low polluting building materials and ventilation for good air quality in residential buildings: A cost–benefit study. *Atmosphere*, 11(1):102, 2020.
- [18] Silvia Fasano, Virginia Isabella Fissore, Giuseppina Emma Puglisi, Louena Shtrepi, Giorgia Spigiantini, Arianna Astolfi, et al. Acoustic comfort contribution to the overall indoor environmental quality in workplaces. *Euronoise 2021*, 2021.
- [19] UNI EN 16798-1:2019. “*Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 1: Parametri di ingresso dell’ambiente interno per la progettazione e la valutazione della prestazione energetica degli edifici in relazione alla qualità dell’aria interna, all’ambiente termico, all’illuminazione e all’acustica - Modulo M1-6*”.
- [20] UNI CEN/TR 16798-2:2020. “*Prestazioni energetiche degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 2: Interpretazione dei requisiti della norma EN 16798-1 - Parametri di input ambientale interno per la progettazione e la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici in relazione alla qualità dell’aria interna, all’ambiente termico, all’illuminazione e all’acustica (Modulo M1-6)*”.
- [21] ISO 17772-1. “*Energy performance of Buildings. Indoor environmental quality. Part I: Indoor environmental input parameters for the design and assessment of energy performance of buildings*”.
- [22] Joost Van Hoof, Mitja Mazej, and Jan LM Hensen. Thermal comfort: research and practice. *Frontiers in Bioscience*, 15(2):765–788, 2010.
- [23] Jennifer K Vanos, Jon S Warland, Terry J Gillespie, and Natasha A Kenny. Review of the physiology of human thermal comfort while exercising in urban landscapes and implications for bioclimatic design. *International journal of biometeorology*, 54:319–334, 2010.
- [24] Poul O Fanger. Thermal comfort. analysis and applications in environmental engineering. 1970.
- [25] Ilaria CAPITANELLI, Livia FERRI, and Angelo SACCO. Ambienti di lavoro outdoor e stress termico alla luce dei cambiamenti climatici: l’esperienza di una azienda sanitaria locale italiana. *G Ital Psicol Med Lav*, 3(3):94–105, 2023.

-
- [26] Clara Peretti et al. "analisi della qualità dell'ambiente interno attraverso questionari in un edificio per uffici certificato casaclima". 2009.
- [27] UNI EN ISO 7730:2006. "*Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale.*".
- [28] Alberto VALLAN, Michele TROTTA, and Riccardo GASSINO. Realizzazione di un sistema per il monitoraggio della temperatura e dell'umidità per la valutazione del comfort microclimatico. 2018.
- [29] P Montuori, C Sarnataro, P Albertini, MR Basile, P Mainardi, I Russo, M Pelosi, P Sardelli, and M Triassi. La qualità ambientale di sale operatorie nella regione campania: i risultati di un monitoraggio pluriennale. *Ann Ig*, 19:451–462, 2007.
- [30] Guglielmina Mutani, L Cazzetta, et al. Un modello adattativo per la valutazione del comfort termico e del consumo energetico degli edifici (a new adaptive model for thermal comfort and energy consumption evaluations). *LA TERMOTECNICA*, 1:59–64, 2011.
- [31] UNI EN ISO 7726:2002. "*Ergonomia degli ambienti termici - Strumenti per la misurazione delle grandezze fisiche*".
- [32] Francesca Romana d'Ambrosio Alfano, Marco Dell'Isola, Giorgio Ficco, Boris Igor Palella, and Giuseppe Riccio. Small globes and pocket heat stress meters for wbgt and phs evaluations. a critical analysis under controlled conditions. *Building and Environment*, 226:109781, 2022.
- [33] Francesca Romana d'Ambrosio Alfano, Giorgio Ficco, Andrea Frattolillo, Boris Igor Palella, and Giuseppe Riccio. Mean radiant temperature measurements through small black globes under forced convection conditions. *Atmosphere*, 12(5):621, 2021.
- [34] Francesca Romana d'Ambrosio Alfano, Marco Dell'isola, Giorgio Ficco, Boris Igor Palella, and Giuseppe Riccio. On the measurement of the mean radiant temperature by means of globes: An experimental investigation under black enclosure conditions. *Building and Environment*, 193:107655, 2021.

-
- [35] Theofanis Psomas, Despoina Teli, Sarka Langer, Paula Wahlgren, and Pawel Wargocki. Indoor humidity of dwellings and association with building characteristics, behaviors and health in a northern climate. *Building and Environment*, 198:107885, 2021.
- [36] Yi Jin, Fan Wang, Megan Carpenter, Richard B Weller, Dominic Tabor, and Sarah R Payne. The effect of indoor thermal and humidity condition on the oldest-old people’s comfort and skin condition in winter. *Building and Environment*, 174:106790, 2020.
- [37] Eleonora Laurini, Mariangela De Vita, Pierluigi De Berardinis, and Avi Friedman. Passive ventilation for indoor comfort: A comparison of results from monitoring and simulation for a historical building in a temperate climate. *Sustainability*, 10(5):1565, 2018.
- [38] (DPR) 74/2013. “*Regolamento recante definizione dei criteri generali in materia di esercizio, conduzione, controllo, manutenzione e ispezione degli impianti termici per la climatizzazione invernale ed estiva degli edifici e per la preparazione dell’acqua calda per usi igienici sanitari, a norma dell’articolo 4, comma 1, lettere a) e c), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192.*”.
- [39] Cinzia Buratti. *Impianti di climatizzazione e condizionamento*. Morlacchi Editore, 2007.
- [40] Qinjiang Ge, Xiangdong Li, Kiao Inthavong, and Jiyuan Tu. Numerical study of the effects of human body heat on particle transport and inhalation in indoor environment. *Building and Environment*, 59:1–9, 2013.
- [41] UNI EN ISO 10211:2018. “*Ponti termici in edilizia - Flussi termici e temperature superficiali - Calcoli dettagliati*”.
- [42] Cihan Turhan. Comparison of indoor air temperature and operative temperature-driven hvac systems by means of thermal comfort and energy consumption. *Mugla Journal of Science and Technology*, 6(1):156–163, 2020.
- [43] Cinzia Buratti, Paola Ricciardi, and Marco Vergoni. Hvac systems testing and check: A simplified model to predict thermal comfort conditions in moderate environments. *Applied energy*, 104:117–127, 2013.

-
- [44] Samuel R West, John K Ward, and Josh Wall. Trial results from a model predictive control and optimisation system for commercial building hvac. *Energy and Buildings*, 72:271–279, 2014.
- [45] GIUSEPPE DESOGUS-SALVATORE MURA-ROBERTO RICCIU, Giuseppe Desogus, Salvatore Mura, et al. Comfort termico attraverso l'indice pmv. applicazione della simulazione monte carlo per la valutazione della distribuzione di probabilità. In *OLTRE LA CERTIFICAZIONE ENERGETICA: PROGETTAZIONE E GESTIONE DEL SISTEMA EDIFICIO IMPIANTO PER OTTIMIZZARE IL COMFORT ED I CONSUMI ENERGETICI REALI-AICARR 2012*. 2012.
- [46] Cristina Becchio, Diego Giuseppe Ferrando, Elena Fregonara, Niccolò Milani, Camilla Quercia, and Valentina Serra. The cost-optimal methodology for the energy retrofit of an ex-industrial building located in northern italy. *Energy and Buildings*, 127:590–602, 2016.
- [47] Valentina Monetti, Enrico Fabrizio, and Marco Filippi. Influence of different temperature control patterns through trv on district heating loads. In *Proceedings of the 8th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning: Volume 2: HVAC&R Component and Energy System*, pages 251–258. Springer, 2014.
- [48] UNI 10339:1995. *Impianti aeraulici al fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura*.
- [49] Zi-Feng Zhang, Xue Zhang, Xian-ming Zhang, Li-Yan Liu, Yi-Fan Li, and Wei Sun. Indoor occurrence and health risk of formaldehyde, toluene, xylene and total volatile organic compounds derived from an extensive monitoring campaign in harbin, a megacity of china. *Chemosphere*, 250:126324, 2020.
- [50] Sung Ho Hwang, Sangwon Lee, Jong-Uk Won, and Wha Me Park. Indoor exposure assessment for levels of dust mite and total volatile organic compounds (tvocs) in living houses. *International Journal of Environmental Health Research*, 33(7):723–731, 2023.
- [51] Ann Marie Coggins, Nina Wemken, Asit Kumar Mishra, Martin Sharkey, Liam Horgan, Hilary Cowie, Emmanuel Bourdin, and Brian

McIntyre. Indoor air quality, thermal comfort and ventilation in deep energy retrofitted irish dwellings. *Building and Environment*, 219:109236, 2022.

- [52] R Jacoby Cureau, Ilaria Pigliautile, Anna Laura Pisello, Mateus Bavaresco, Christiane Berger, Giorgia Chinazzo, Zs Deme Belafi, A Ghahramani, Arsalan Heydarian, D Kastner, et al. Bridging the gap from test rooms to field-tests for human indoor comfort studies: A critical review of the sustainability potential of living laboratories. *Energy Research & Social Science*, 92:102778, 2022.
- [53] Tun Z Maung, Jack E Bishop, Eleanor Holt, Alice M Turner, and Christian Pfrang. Indoor air pollution and the health of vulnerable groups: a systematic review focused on particulate matter (pm), volatile organic compounds (vocs) and their effects on children and people with pre-existing lung disease. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(14):8752, 2022.
- [54] Jagriti Saini, Maitreyee Dutta, and Gonalo Marques. A comprehensive review on indoor air quality monitoring systems for enhanced public health. *Sustainable environment research*, 30:1–12, 2020.
- [55] Andrea Sebastiano Sergi. *Ambiente e inquinamento*. Youcanprint, 2021.
- [56] E Caracci, L Canale, G Buonanno, and L Stabile. Effectiveness of eco-feedback in improving the indoor air quality in residential buildings: Mitigation of the exposure to airborne particles. *Building and Environment*, 226:109706, 2022.
- [57] Andrew Cliff and Peter Haggett. Time, travel and infection. *British medical bulletin*, 69(1):87–99, 2004.
- [58] National Research Council et al. *Health effects of exposure to radon: BEIR VI*. National Academy Press, 1999.
- [59] World Health Organization. *WHO handbook on indoor radon: a public health perspective*. World Health Organization, 2009.
- [60] M Maierna, G Gagliano, P Geraci, M Volante, A Erba, and A Airoidi. Determinazione dei livelli di inquinamento indoor da monossido di carbonio.

-
- [61] Zhuoru Chen, Ningrui Liu, Hao Tang, Xuehuan Gao, Yiping Zhang, Haidong Kan, Furong Deng, Bin Zhao, Xiangang Zeng, Yuexia Sun, et al. Health effects of exposure to sulfur dioxide, nitrogen dioxide, ozone, and carbon monoxide between 1980 and 2019: A systematic review and meta-analysis. *Indoor air*, 32(11):e13170, 2022.
- [62] Vinh Van Tran, Duckshin Park, and Young-Chul Lee. Indoor air pollution, related human diseases, and recent trends in the control and improvement of indoor air quality. *International journal of environmental research and public health*, 17(8):2927, 2020.
- [63] Amaury de Souza and Deniz Ozonur. Statistical behavior of o₃, ox, no, no₂, and nox in urban environment. *Ozone: Science & Engineering*, 42(1):66–78, 2020.
- [64] Joanna A Kaminska and Joanna Kajewska-Szkudlarek. The importance of data splitting in combined nox concentration modelling. *Science of The Total Environment*, page 161744, 2023.
- [65] Stefano Zauli Sajani, Stefano Marchesi, Silvia Brini, Arianna Lepore, Luciana Sinisi, Giovanni Lonati, Andrea Spinazzè, Andrea Cattaneo, et al. L’esposizione in ambiente indoor agli inquinanti atmosferici. In *Qualità dell’ambiente urbano-XII Rapporto. Focus su Inquinamento atmosferico nelle aree urbane ed effetti sulla salute*, pages 81–91. ISPRA–Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, 2016.
- [66] Mohamed Bayati, Danh C Vu, Phuc H Vo, Elizabeth Rogers, Jihyun Park, Thi L Ho, Alexandra N Davis, Zehra Gulseven, Gustavo Carlo, Francisco Palermo, et al. Health risk assessment of volatile organic compounds at daycare facilities. *Indoor air*, 31(4):977–988, 2021.
- [67] Sait C Sofuoglu, Guler Aslan, Fikret Inal, and Aysun Sofuoglu. An assessment of indoor air concentrations and health risks of volatile organic compounds in three primary schools. *International journal of hygiene and environmental health*, 214(1):36–46, 2011.
- [68] T Hoang, R Castorina, F Gaspar, R Maddalena, PL Jenkins, Q Zhang, TE McKone, E Benfenati, AY Shi, and A Bradman. Voc exposures in california early childhood education environments. *Indoor Air*, 27(3):609–621, 2017.

-
- [69] Hai Guo, SC Lee, LY Chan, and WM Li. Risk assessment of exposure to volatile organic compounds in different indoor environments. *Environmental Research*, 94(1):57–66, 2004.
- [70] Dimosthenis A Sarigiannis, Spyros P Karakitsios, Alberto Gotti, Ioannis L Liakos, and Athanasios Katsoyiannis. Exposure to major volatile organic compounds and carbonyls in european indoor environments and associated health risk. *Environment international*, 37(4):743–765, 2011.
- [71] Muhammad Irfan Malik, Nicolas Abatzoglou, and Inès Esma Achouri. Methanol to formaldehyde: an overview of surface studies and performance of an iron molybdate catalyst. *Catalysts*, 11(8):893, 2021.
- [72] Ziyang Xu, Shengpeng Mo, Yanxia Li, Yuchen Zhang, Junliang Wu, Mingli Fu, Xiaojun Niu, Yun Hu, and Daiqi Ye. Pt/mnox for toluene mineralization via ozonation catalysis at low temperature: Smsi optimization of surface oxygen species. *Chemosphere*, 286:131754, 2022.
- [73] Zahra Soltanpour, Yousef Mohammadian, and Yadolah Fakhri. The exposure to formaldehyde in industries and health care centers: A systematic review and probabilistic health risk assessment. *Environmental Research*, 204:112094, 2022.
- [74] T Tietz, N Hellwig, I Ebner, N Bartsch, C Lorenz, O Kappenstein, S Merkel, and A Luch. Release of formaldehyde and melamine from plastic cups and bowls: exposure estimation and risk assessment. In *NAUNYN-SCHMIEDEBERGS ARCHIVES OF PHARMACOLOGY*, volume 393, pages 80–80. SPRINGER ONE NEW YORK PLAZA, SUITE 4600, NEW YORK, NY, UNITED STATES, 2020.
- [75] Pia Solt, Johannes Konnerth, Wolfgang Gindl-Altmutter, Wolfgang Kantner, Johann Moser, Roland Mitter, and Hendrikus WG van Herwijnen. Technological performance of formaldehyde-free adhesive alternatives for particleboard industry. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 94:99–131, 2019.
- [76] Tunga Salthammer. Formaldehyde sources, formaldehyde concentrations and air exchange rates in european housings. *Building and environment*, 150:219–232, 2019.

-
- [77] Mauro Scungio and Giulia Parlani. Characterization of aerosol and assessment of the risk of transmission of sars-cov-2 virus in a natural thermal cave. In *E3S Web of Conferences*, volume 312, page 12004. EDP Sciences, 2021.
- [78] Christopher Y Chao and Kelvin K Wong. Residential indoor pm10 and pm2. 5 in hong kong and the elemental composition. *Atmospheric Environment*, 36(2):265–277, 2002.
- [79] Noel J Aquilina and Sara Fenech Camilleri. Impact of daily household activities on indoor pm2. 5 and black carbon concentrations in malta. *Building and Environment*, 207:108422, 2022.
- [80] AJ Adeyemi, RB Kanee, DO Edokpa, and PN Ede. Total volatile organic compounds concentration at selected automobile repair workshop centres in port harcourt, nigeria. *International Research Journal of Public and Environmental Health*, 2020.
- [81] Natalia Krawczyk and Luiza Dębska. Indoor environment, lighting conditions and productivity in the educational buildings. *Civil and Environmental Engineering*, 18(2):581–588, 2022.
- [82] Steven A Giannos, Edward R Kraft, Lance J Lyons, and Praveena K Gupta. Spectral evaluation of eyeglass blocking efficiency of ultraviolet/high-energy visible blue light for ocular protection. *Optometry and Vision Science*, 96(7):513, 2019.
- [83] Jinhai Zou, Chuchu Dong, Hongjian Wang, Tuanjie Du, and Zhenqian Luo. Towards visible-wavelength passively mode-locked lasers in all-fibre format. *Light: Science & Applications*, 9(1):61, 2020.
- [84] D Kalustova, V Kornaga, A Rybalochka, and S Valyukh. Space of visual and circadian parameters of rgbw lighting systems. *Lighting Engineering & Power Engineering*, 1(57):16–21, 2020.
- [85] Yuji Uchida and Tsunemasa Taguchi. Lighting theory and luminous characteristics of white light-emitting diodes. *Optical Engineering*, 44(12):124003–124003, 2005.
- [86] Silvia Ezpeleta, Elvira Orduna-Hospital, Teresa Solana, Justiniano Aporta, Isabel Pinilla, and Ana Sánchez-Cano. Analysis of photopic and melanopic lighting in teaching environments. *Buildings*, 11(10):439, 2021.

-
- [87] Agnieszka Wolska, Dariusz Sawicki, and Małgorzata Tafil-Klawe. *Visual and non-visual effects of light: working environment and well-being*. CRC Press, 2020.
- [88] Sergio Altomonte. Daylight for energy savings and psycho-physiological well-being in sustainable built environments. *Journal of sustainable development*, 1(3):3–16, 2008.
- [89] Kelly MJ Farley and Jennifer Ann Veitch. A room with a view: A review of the effects of windows on work and well-being. 2001.
- [90] Hui Xiao, Huiling Cai, and Xuefeng Li. Non-visual effects of indoor light environment on humans: A review. *Physiology & Behavior*, 228:113195, 2021.
- [91] LUCA BIANCHI. Studio della luce naturale per un corretto utilizzo di un complesso monumentale-caso studio la certosa di calci. 2019.
- [92] F Spinelli, L Terrinoni, M Zinzi, D Iatauro, and P Signoretti. Costruzione degli anni meteorologici tipici per l’illuminamento naturale (amntin) per il territorio nazionale e delle curve di disponibilità di luce naturale per la stima del fabbisogno di energia elettrica per l’illuminazione artificiale negli edifici. *ENEA, RdS/PA2014/085*, 2015.
- [93] DM 05/07/1975. “MODIFICAZIONI ALLE ISTRUZIONI MINISTERIALI 20 GIUGNO 1896 RELATIVAMENTE ALL’ALTEZZA MINIMA ED AI REQUISITI IGIENICO SANITARI PRINCIPALI DEI LOCALI D’ABITAZIONE. ”.
- [94] M Zinzi, A Mangione, and G Fasano. Studio preliminare per la definizione di una metodologia di calcolo per la determinazione del fabbisogno per illuminazione artificiale degli edifici, 2014.
- [95] Delia D’Agostino, Cristina Becchio, Giulia Crespi, and Stefano Paolo Corgnati. Assessment of passive and active buildings resilience to gas supply disruption in winter across european climates. *Sustainable Cities and Society*, 92:104461, 2023.
- [96] UNI/TS 11826:2021. *Luce e Illuminazione - Illuminazione di interni residenziali domestici con luce artificiale*.

-
- [97] Nikolaos-Georgios Vardaxis, Delphine Bard, and Kerstin Persson Waye. Review of acoustic comfort evaluation in dwellings—part i: Associations of acoustic field data to subjective responses from building surveys. *Building Acoustics*, 25(2):151–170, 2018.
- [98] Wei Yang and Jian Kang. Acoustic comfort evaluation in urban open public spaces. *Applied acoustics*, 66(2):211–229, 2005.
- [99] Abdelghani Gramez and Fouad Boubenider. Acoustic comfort evaluation for a conference room: A case study. *Applied acoustics*, 118:39–49, 2017.
- [100] Martina Lorenzino, Flavia D’Agostin, Sara Rigutti, Massimo Bovenzi, Carlo Fantoni, and Luigi Bregant. Acoustic comfort depends on the psychological state of the individual. *Ergonomics*, 63(12):1485–1501, 2020.
- [101] VALENTINA MALORNI. Valutazione di prestazioni acustiche di elementi edilizi e confronto con la normativa. 2021.
- [102] Berardo Naticchia and Alessandro Carbonari. Feasibility analysis of an active technology to improve acoustic comfort in buildings. *Building and Environment*, 42(7):2785–2796, 2007.
- [103] S Monteiro da Silva and M Guedes de Almeida. Thermal and acoustic comfort in buildings. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, volume 2010, pages 2358–2367. Institute of Noise Control Engineering, 2010.
- [104] DPCM 5 dicembre 1997. “*Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici.*”.
- [105] Livia Claudi, Marco Arnesano, Paolo Chiariotti, Gianmarco Battista, and Gian Marco Revel. A soft-sensing approach for the evaluation of the acoustic comfort due to building envelope protection against external noise. *Measurement*, 146:675–688, 2019.
- [106] Giulia Fratoni, Dario D’Orazio, and Luca Barbaresi. Acoustic comfort in a worship space made of cross-laminated timber. *Building Acoustics*, 26(2):121–138, 2019.

-
- [107] Roberto Pompoli and Simone Secchi. Prestazione acustica: confronto tra pareti in laterizio e pareti in lastre di gesso rivestito. *Costruire in laterizio*, pages 448–453, 2022.
- [108] Ezio Rendina. *Inquinamento acustico*, volume 17. Key Editore, 2019.
- [109] Giuseppe Ciaburro, Gino Iannace, and Amelia Trematerra. Research for the presence of unmanned aerial vehicle inside closed environments with acoustic measurements. *Buildings*, 10(5):96, 2020.
- [110] Metod Celestina, Jan Hrovat, and Chucri A Kardous. Smartphone-based sound level measurement apps: Evaluation of compliance with international sound level meter standards. *Applied Acoustics*, 139:119–128, 2018.
- [111] Nicola Prodi and Chiara Visentin. A slight increase in reverberation time in the classroom affects performance and behavioral listening effort. *Ear and Hearing*, 43(2):460–476, 2022.
- [112] Karolina Prawda, Sebastian Schlecht, and Vesa Välimäki. Evaluation of reverberation time models with variable acoustics. In *Sound and Music Computing Conference*, pages 145–152. CERN-European Organization for Nuclear Research, 2020.
- [113] Chiara De Bellis. *L’integrazione di tecnologie e soluzioni IOT negli edifici multipiano in legno per la manutenzione predittiva, la sicurezza e la qualità delle costruzioni. Analisi della sperimentazione di sistemi e processi in ambito internazionale.* = *The integration of IoT technologies and solutions into multi-storey wooden buildings for predictive maintenance, safety and construction quality. Analysis of the experimentation of systems and processes in the international context.* PhD thesis, Politecnico di Torino, 2022.
- [114] Chiara Gabrielli. *La certificazione energetica degli edifici. Individuazione degli scenari di risparmio energetico e l’utilizzo di fonti rinnovabili sul patrimonio edilizio residenziale del Piemonte.* PhD thesis, Politecnico di Torino, 2019.
- [115] Arijit Sinha, Rakesh Gupta, and Andreja Kutnar. Sustainable development and green buildings. *Drvna industrija*, 64(1):45–53, 2013.

-
- [116] Francesca Abastante, Isabella M Lami, and Marika Gaballo. Pursuing the sdg11 targets: The role of the sustainability protocols. *Sustainability*, 13(7):3858, 2021.
- [117] Stefano Politi, Ernesto Antonini, et al. An expeditious method for comparing sustainable rating systems for residential buildings. *Energy Procedia*, 111(March 2017):41–50, 2017.
- [118] Mary Ann Joy Quirapas Franco, Priya Pawar, and Xiaoying Wu. Green building policies in cities: A comparative assessment and analysis. *Energy and buildings*, 231:110561, 2021.
- [119] Francesco Asdrubali, G Baldinelli, F Bianchi, and S Sambuco. A comparison between environmental sustainability rating systems leed and itaca for residential buildings. *Building and Environment*, 86:98–108, 2015.
- [120] Asli Pelin Gurgun and David Arditi. Assessment of energy credits in leed-certified buildings based on certification levels and project ownership. *Buildings*, 8(2):29, 2018.
- [121] Giuliano Dall’O’, Elisa Bruni, and Angela Panza. Improvement of the sustainability of existing school buildings according to the leadership in energy and environmental design (leed)® protocol: A case study in italy. *Energies*, 6(12):6487–6507, 2013.
- [122] Svetlana Pushkar. The effect of regional priority points on the performance of leed 2009 certified buildings in turkey, spain, and italy. *Sustainability*, 10(10):3364, 2018.
- [123] Anna Miozzo. Confronto tra i sistemi di certificazione ambientale leed, breeam e protocollo itaca applicati nel progetto di recupero dell’istituto configliachi di via g. reni a padova. 2014.
- [124] F Asdrubali, G Baldinelli, F Bianchi, and S Sambuco. Residential buildings: a comparative analysis of the leed and itaca environmental sustainability schemes. *ATMOSPHERE*, 30(15):23.
- [125] Cristina Baglivo, Paolo Maria Congedo, and Andrea Fazio. Multi-criteria optimization analysis of external walls according to itaca protocol for zero energy buildings in the mediterranean climate. *Building and Environment*, 82:467–480, 2014.

-
- [126] Nils Larsson. Sbttool for 2015. *International Initiative for a Sustainable Built Environment*, 2015.
- [127] Elena Bernardi, Salvatore Carlucci, Cristina Cornaro, and Rolf André Bohne. An analysis of the most adopted rating systems for assessing the environmental impact of buildings. *Sustainability*, 9(7):1226, 2017.
- [128] Giulia Paoletti, A Belleri, H Mahlkenecht, and R Lollini. Nearly zero energy target integration in public design tenders. In *SB13 Graz, SUSTAINABLE BUILDING CONFERENCE 2013*, 2013.
- [129] U Santa, U Klammsteiner, D Bancher, and M Demattio. Casaclima quality seals—a key to sustainable buildings. In *XXXIX Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente (ASADES)(La Plata, 2016)*, 2016.
- [130] UNI EN ISO 13829:2002. “*Prestazione termica degli edifici - Determinazione della permeabilità all’aria degli edifici - Metodo di pressurizzazione mediante ventilatore.*”.
- [131] FR d’Ambrosio Alfano, Marco Dell’Isola, Giorgio Ficco, and Francesco Tassini. Experimental analysis of air tightness in mediterranean buildings using the fan pressurization method. *Building and environment*, 53:16–25, 2012.
- [132] JA Leech, K Wilby, E McMullen, and K Laporte. The canadian human activity pattern survey: report of methods and population surveyed. *Chronic diseases in Canada*, 17(3-4):118–123, 1996.
- [133] Fudan Liu, Lianyu Yan, Xi Meng, and Cen Zhang. A review on indoor green plants employed to improve indoor environment. *Journal of Building Engineering*, 53:104542, 2022.
- [134] Shengxian Wei, Ming Li, Wenxian Lin, and Yanlin Sun. Parametric studies and evaluations of indoor thermal environment in wet season using a field survey and pmv–ppd method. *Energy and Buildings*, 42(6):799–806, 2010.
- [135] Kristian Fabbri. Thermal comfort evaluation in kindergarten: Pmv and ppd measurement through datalogger and questionnaire. *Building and Environment*, 68:202–214, 2013.

-
- [136] Rune Vinther Andersen, Jørn Toftum, Klaus Kaae Andersen, and Bjarne W Olesen. Survey of occupant behaviour and control of indoor environment in danish dwellings. *Energy and Buildings*, 41(1):11–16, 2009.
- [137] Chihye Bae and Chungyoon Chun. Research on seasonal indoor thermal environment and residents’ control behavior of cooling and heating systems in korea. *Building and Environment*, 44(11):2300–2307, 2009.
- [138] Nastaran Abdollahzadeh, Azin Velashjerdi Farahani, Kamyar Soleimani, and Zahra Sadat Zomorodian. Indoor environmental quality improvement of student dormitories in tehran, iran. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 41(1):258–278, 2023.
- [139] Steffen Künn, Juan Palacios, and Nico Pestel. Indoor air quality and strategic decision making. *Management Science*, 69(9):5354–5377, 2023.
- [140] Seyedeh Mahsa Abdollahzadeh, Shahin Heidari, and Alireza Einifar. Evaluating thermal comfort and neutral temperature in residential apartments in hot and dry climate: A case study in shiraz, iran. *Journal of Building Engineering*, 76:107161, 2023.
- [141] A.C.K. Lai, K.W. Mui, L.T. Wong, and L.Y. Law. An evaluation model for indoor environmental quality (ieq) acceptance in residential buildings. *Energy and Buildings*, 41(9):930–936, 2009.
- [142] Yijin Zhao and Da Li. Multi-domain indoor environmental quality in buildings: A review of their interaction and combined effects on occupant satisfaction. *Building and Environment*, 228:109844, 2023.