



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Sede Amministrativa: Università degli Studi di Padova
Dipartimento di Ingegneria Industriale

SCUOLA DI DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA INDUSTRIALE
INDIRIZZO: FISICA TECNICA
XXV CICLO

Analisi della qualità degli ambienti interni

Direttore della Scuola: Ch.mo Prof. Paolo Colombo

Coordinatore d'indirizzo: Ch.mo Prof.ssa Luisa Rossetto

Supervisore: Ch.mo Prof. Pierfrancesco Brunello

Dottoranda: Clara Peretti

Riassunto

Il presente lavoro approfondisce e analizza la qualità globale degli ambienti interni negli edifici. Diversi sono gli obiettivi: studiare i parametri che definiscono la qualità di un ambiente interno, studiare le metodologie di indagine in funzione degli obiettivi delle analisi e infine analizzare l'influenza degli occupanti nella gestione dei parametri indoor.

Nella prima parte del lavoro sono stati approfonditi i parametri che caratterizzano gli ambienti interni: il comfort termo-igrometrico, la qualità dell'aria, la qualità illuminotecnica ed acustica. Per ognuno di essi sono state analizzate le normative e le linee guida vigenti. È stata approfondita la normativa UNI EN 15251, quale primario riferimento per la definizione della qualità degli ambienti interni. Inoltre la norma è attualmente in revisione, riportando modifiche che si integrano con i temi discussi nel presente lavoro.

Nel secondo capitolo viene trattata la certificazione della qualità, a partire dalla certificazione energetica per poi descrivere quella dell'ambiente interno. Sono descritte tre certificazioni volontarie, con un particolare focus sulla certificazione *CasaClima*, oggetto di una collaborazione sull'analisi della qualità dell'aria nelle strutture alberghiere e sull'analisi globale tramite questionari per la ricertificazione degli edifici.

Nella terza parte del lavoro vengono approfondite le tecniche di misura, quali monitoraggi tramite strumentazione e indagini soggettive mediante questionari. Le strumentazioni descritte sono state utilizzate nelle analisi dei tre casi studio, riportati nel capitolo 4.

Per analizzare le tematiche del comfort termico, acustico, illuminotecnico, della gestione e salubrità (salute e benessere degli occupanti) e le loro reciproche connessioni negli edifici residenziali è stato scelto un edificio situato a Padova nel quartiere Forcellini. È stato selezionato un appartamento nel quale erano presenti evidenti problemi di qualità dell'aria e di ventilazione.

Successivamente è stata analizzata la qualità degli ambienti interni in edifici non residenziali. In particolare sono state approfondite i temi della qualità dell'aria, ventilazione, salubrità, efficienza energetica e impiantistica in un edificio scolastico e in un edificio per uffici. L'edificio scolastico analizzato, la Scuola Stroppari situata a Tezze sul Brenta, presenta un innovativo sistema di ventilazione con uno scambiatore aria-terreno. L'edificio per uffici è una struttura pubblica composta da 11 piani nella quale è presente un sistema a tutt'aria per il riscaldamento, il raffrescamento e la ventilazione.

Nella parte conclusiva sono riassunti gli aspetti più importanti derivanti dall'applicazione dell'analisi indoor ai tre casi studi, al fine di delineare indicazioni pratiche per le indagini sulla qualità globale degli ambienti interni.

Summary

The aim of this work is to analyze the indoor environmental quality in buildings. There are several objectives: to study the parameters that define the indoor environmental quality, to study the methods of investigation in relation to the targets of the analysis and to analyze the influence of the occupants in the management of indoor parameters.

In the first part of this work parameters that characterize the indoor environment are described; these are thermal comfort, air quality, lighting and acoustic. For each of them it will be analyzed the regulations and guidelines in force. The regulation UNI EN 15251 is described, because it is the primary reference for the definition of the indoor environmental quality. In addition, the standard is currently under review, bringing changes that are integrated with the topics discussed in this paper.

In the second chapter the certification of building both energy and indoor is described. Three voluntary certification are presented, with a focus on the *CasaClima* certification, that has been used in a research on the analysis of air quality in hotels and, by the means of assessment questionnaires, in a global analysis for the re-certification of buildings.

In the third part of this work measurement techniques are described, such as instrumentation monitoring and subjective measures carried out with questionnaires. Instruments described have been used in the analysis of the three case studies presented in chapter 4.

In order to analyze thermal comfort, acoustic, lighting, management and health of occupants and their mutual connections in residential buildings an apartment located in Padova has been analyzed. In it indoor air quality and ventilation problems were reported.

The other two case study are non-residential buildings. Topics of indoor air quality, ventilation, energy efficiency and layout of school building and an office building have been analyzed. The school building, the School Stroppari located in Tezze sul Brenta, presents an innovative ventilation system with an earth to air heat exchanger. The office building is a public structure composed of 11 floors in which is installed an all in air system that provides heating, cooling and ventilation.

In the final part there the most important aspects of the application of the analysis to the three case studies are summarized, in order to outline practical guidelines for the investigation on the overall indoor environmental quality.

Indice

Introduzione	7
Capitolo 1. La qualità “globale” degli ambienti interni	9
1.1 Il comfort termico	10
1.2 Il comfort relativo alla qualità dell’aria	17
1.3 Il comfort illuminotecnico	22
1.4 Il comfort acustico	25
Capitolo 2. La certificazione della qualità	29
2.1 La certificazione <i>CasaClima</i>	31
2.2 La certificazione LEED	37
2.3 Il protocollo Itaca	39
Capitolo 3. Modalità di analisi della qualità degli ambienti interni.....	43
3.1 Strumenti per la misura dei parametri termoigrometrici.....	45
3.2 Tecniche di misura del tasso di ventilazione degli ambienti	48
3.3 Strumenti per la misura per i parametri illuminotecnici	52
3.4 Strumenti per la misura per i parametri acustici	53
3.5 Valutazione della qualità globale degli ambienti interni	53
4. Analisi di tre edifici.....	59
4.1. Analisi di un edificio residenziale.....	59
4.2 Analisi di un edificio scolastico	73
4.3 Analisi di un edificio per uffici	90
Conclusioni	103
Bibliografia	105

Introduzione

Il livello di qualità della vita si sta avviando verso standard sempre più elevati; ciò implica una sempre maggiore attenzione alla definizione dei requisiti microclimatici atti a garantire adeguate condizioni di benessere negli spazi in cui l'uomo vive e lavora. In un'ottica di eco-sostenibilità, il progetto edilizio ed impiantistico deve infatti contemplare non solo le soluzioni tecniche di carattere strutturale, ma anche quelle di carattere gestionale (dispositivi per la regolazione locale dei parametri ambientali, configurazioni atte a consentire l'illuminazione naturale o il raffrescamento notturno) che consentono all'utente di gestire correttamente il sistema "edificio-impianto", ottenendo soddisfacenti livelli di comfort con il minimo consumo di risorse energetiche. I consumi di energia per riscaldamento, ventilazione, climatizzazione e illuminazione di un edificio sono direttamente influenzati dal livello di comfort ambientale. Generalmente al crescere del livello di comfort si hanno, a parità di caratteristiche costruttive del sistema "edificio-impianto" e di condizioni climatiche esterne, consumi energetici maggiori.

I consumi energetici possono poi subire significative variazioni in relazione a molteplici aspetti quali ad esempio:

- aspettative di comfort dell'utente (valori di set point per temperatura, umidità relativa, qualità dell'aria, illuminamento ecc.);
- effettiva disponibilità di risorse naturali per il controllo del microclima (numero di ore di luce naturale, numero di ore in estate in cui l'aria esterna è utilizzabile per raffrescare gli ambienti ecc.);
- strategie che l'utente adotta per il controllo ambientale (programmazione temporale dei valori di set point, uso dell'illuminazione artificiale, apertura e chiusura delle finestre ecc.).

Queste considerazioni portano ad affermare che non ha senso occuparsi della qualità energetica di un edificio senza contemporaneamente determinare il livello di qualità dell'ambiente interno cui ci si riferisce, sia esso "di progetto" oppure "in esercizio" (Corgnati et al., 2005).

Bisogna quindi comprendere da che cosa dipendono principalmente i consumi energetici in edilizia, studiare gli scambi termici attraverso i componenti dell'involucro opaco e trasparente degli edifici e analizzare la qualità degli impianti. Attraverso il miglioramento di questi componenti deve però necessariamente tenere in considerazione le esigenze delle persone, al fine di garantire il comfort.

A livello europeo sono state promosse azioni comunitarie per la promozione della riduzione dei consumi in edilizia. La Direttiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio emanata il 19

maggio 2010 che aggiorna la vecchia Direttiva 2002/91/CE è denominata EPDB (Energy Performance Building Directive). Tale Direttiva è nata dalla necessità di accelerare le azioni di risparmio energetico e di ridurre le differenze tra i vari stati membri, attraverso la definizione di un quadro di riferimento normativo, in modo da coordinare gli interventi nel settore edilizio.

Gli obiettivi da raggiungere, sia per gli edifici nuovi che per quelli esistenti si possono riassumere in:

- Sviluppo delle energie rinnovabili. A partire dalla ricerca, dovrà essere incentivato lo sviluppo e la diffusione delle energie rinnovabili e mirare alla diversificazione delle fonti (solare fotovoltaico, biomasse, combustibili d'origine vegetale, solare termico...);
- Uso efficiente dell'energia nel settore edilizio e domestico: certificazione energetica degli edifici, promozione per l'acquisto e l'uso di apparecchi domestici a elevata efficienza energetica, utilizzo di sistemi impiantistici integrati ed altamente efficienti.
- Ridurre i consumi mirando al raggiungimento del comfort indoor, tendendo quindi in considerazione le esigenze degli utenti, le possibilità di interazione con gli impianti e il clima esterno.

Alla luce di ciò, gli obiettivi del lavoro di tesi sono:

- Studiare i parametri che definiscono la qualità di un ambiente interno, analizzando le diverse metodologie proposte nelle normative vigenti e in letteratura.
- Studiare le metodologie di indagine della qualità degli ambienti interni in funzione degli obiettivi delle analisi: determinazione delle prestazioni di sistemi HVAC, determinazione dell'efficienza energetica di un edificio, analisi dei discomfort, valutazioni della qualità degli ambienti interni.
- Analizzare l'influenza degli occupanti nella gestione dei parametri indoor.

Il presente lavoro di tesi proseguirà con lo studio di un indice per la valutazione globale della qualità degli ambienti interni. Lo studio avrà come oggetto diversi edifici che sono ad oggi sotto monitoraggio. Preliminarmente saranno analizzati e valutati gli indici di comfort globale ad oggi proposti in letteratura. L'analisi non è oggetto del presente lavoro di tesi in quanto necessita di ulteriori approfondimenti e studi.

Parallelamente a questa attività verrà approfondito il tema dei questionari, migliorando quello attualmente utilizzato nelle analisi della presente tesi in funzione delle esperienze sul campo e dei suggerimenti degli utenti che lo hanno compilato.

Capitolo 1. La qualità “globale” degli ambienti interni

I fattori ambientali più importanti per garantire il benessere degli occupanti e il contenimento dei consumi energetici sono il microclima interno, la concentrazione di sostanze inquinanti disperse nell'aria e depositate sulle superfici, la qualità e l'intensità luminosa e acustica.

La qualità degli ambienti interni è il risultato sinergico delle soluzioni progettuali, della scelta dei materiali da costruzione e degli arredi e delle modalità di funzionamento, manutenzione e controllo degli impianti: la gestione della qualità degli ambienti interni (Indoor Environmental Quality - IEQ) richiede dunque una strategia integrata di monitoraggio, verifica e ottimizzazione delle diverse componenti dell'ambiente, dalla fase preliminare del progetto, alla realizzazione e all'utilizzo-manutenzione dell'edificio.

Attraverso i parametri fisico-ambientali, quali la temperatura, l'umidità relativa, l'acustica, la qualità dell'aria, l'illuminazione e la ventilazione, viene determinata la sensazione di comfort, come complessa risposta di un insieme di fattori ambientali, dell'ambiente fisico e dei servizi ma anche delle condizioni fisiologiche individuali, come la salute e le relazioni sociali.

Il concetto di comfort ha subito una certa evoluzione da un lato perché si è cercato di tener conto dei vari aspetti del comfort (che verranno approfonditi in questo capitolo), ma anche perché gli stessi obiettivi del comfort si sono evoluti nel tempo. In passato le normative indicavano vincoli sui valori dei parametri indoor quali ad esempio la temperatura o l'umidità relativa. Uno dei principali limiti di questa impostazione è il considerare separatamente i diversi aspetti della qualità indoor. Tale concezione si è così evoluta nel concetto di indici di voto medio previsto e percentuale di persone insoddisfatte. Data la complessità dei molteplici parametri che concorrono a definire l'ambiente indoor sono stati definiti più livelli, ai quali corrispondono valori limite sempre più stringenti all'aumentare del livello di qualità indoor richiesto. La qualità indoor viene considerata nella sua globalità, coinvolgendo infatti molti parametri misurabili tramite strumentazione. Con il progredire delle ricerche è stato definito un nuovo metodo per analizzare la qualità degli ambienti interni: il comfort adattativo. Tale approccio estende il concetto di qualità globale, andando ad approfondire anche la percezione dell'utente nei confronti dell'ambiente.

Il concetto di “adattamento” ad un ambiente abbandona l'approccio deterministico per accogliere il concetto olistico di “uomo-ambiente”: si basa sulla variabilità delle aspettative climatiche degli occupanti, che manifestano un ruolo attivo, responsabile, nella gestione del microclima interno,

riducendo il controllo dei sistemi impiantistici a favore delle opportunità di adattamento offerte dall'edificio stesso.

Alcuni studi (De Dear e Brager, 1998) hanno dimostrato una maggiore tolleranza da parte degli individui a condizioni microlimatiche “meno stringenti” (in termini di ampiezza degli intervalli di temperatura ritenuti accettabili) nel caso di ambienti con ventilazione naturale, nei quali le persone possono attivare meccanismi di regolazione di tipo comportamentale, fisiologico e psicologico che inducono una più ampia accettabilità delle condizioni termoigrometriche (Alfano et al., 2004). Alla base di queste considerazioni, risiede l'assunto che secondo l'approccio del comfort adattativo la sensazione di benessere provata da un individuo non può essere spiegata esclusivamente dalle equazioni di bilancio termico tra persona ed ambiente circostante (Fanger, 1982), ma deve tener conto di altri fattori (di natura comportamentale, culturale, sociale, contestuale) che sono in grado di alterare la sensazione termica percepita (Brager e De Dear, 1998). L'influenza di tali fattori è tanto maggiore quanto più l'ambiente nel quale l'individuo si trova presenta un controllo climatico “naturale” (Brager e De Dear, 2000), cioè nel quale il microclima non è “artificialmente” creato ed imposto da un impianto (*fully mechanically controlled*), ma è, anche solo parzialmente (per esempio attraverso la ventilazione naturale), frutto di una azione diretta dell'utente.

1.1 Il comfort termico

Il corpo umano deve mantenere la propria temperatura corporea interna ad un valore costante pari a circa 37°C, con limitate variazioni attorno a questo valore. La produzione di calore da parte del corpo umano prende il nome di potenza metabolica, Φ_M . Per il mantenimento di una temperatura corporea costante nel tempo si deve rispettare un equilibrio tra gli scambi di potenza del corpo e la sua potenza metabolica. Deve essere soddisfatta quindi la relazione:

$$\Phi_M - \Phi_W - \Phi_T = 0 \quad (\text{W}) \quad (1.1)$$

In molte delle attività svolte dagli individui lo scambio di potenza meccanica con l'ambiente esterno, Φ_W , si annulla e quindi la (1.1) può essere riscritta nella forma:

$$\Phi_M - \Phi_T = 0 \quad (\text{W}) \quad (1.2)$$

espressione che rappresenta le condizioni di equilibrio termico per il corpo umano in quiete ed in attività moderate, situazione abbastanza comune per molti degli stati in cui il corpo umano si trova ad operare all'interno dei locali residenziali e di lavoro sedentario (uffici).

Essendo l'attività dell'individuo legata al suo flusso metabolico, quest'ultima grandezza serve per valutare l'attività svolta dalle persone. Per il parametro specifico derivato dal flusso metabolico è

stata scelta come grandezza di riferimento il “met”, il cui valore unitario corrisponde al flusso metabolico specifico di un individuo seduto in quiete. La scala dei valori usuali di attività, espressi in met, si estende da un minimo di 0,7 met, per una persona sdraiata che dorme, a valori massimi pari a circa 7 met relativi ad individui in attività fisica molto intensa come avviene, ad esempio, in alcuni sport ($1 \text{ met} = 56 \text{ W/m}^2$).

La potenza Φ_T , corrispondente alla somma degli scambi termici che avvengono tra il corpo e l'ambiente può essere scambiata con meccanismi di scambio termico sia sensibile che latente. Questi scambi termici hanno luogo sia sulla superficie esterna del corpo che in quella interna del cavo polmonare. Il corpo umano scambia prevalentemente calore sensibile con l'ambiente piuttosto che latente, pertanto negli ambienti termici moderati sono predominanti gli scambi termici per convezione con l'aria ambiente e per radiazione nel campo dell'infrarosso con le superfici che circondano l'individuo. Lo scambio termico latente è correlato all'umidità relativa dell'ambiente.

In presenza di equilibrio termico per il corpo umano, secondo la relazione (1.1), la temperatura corporea rimane costante. Se l'equilibrio non viene soddisfatto, si presenta un innalzamento o un abbassamento della temperatura corporea con conseguente sensazione di caldo o di freddo.

Uno dei primi obiettivi delle ricerche effettuate sul benessere termoigrometrico ha riguardato la ricerca di un unico parametro che fosse in grado di sintetizzare la sensazione provata dalle persone all'interno degli ambienti.

Gli scambi termici del corpo umano sono legati ai seguenti parametri ambientali, che, insieme al metabolismo e alla resistenza termica dell'abbigliamento, determinano il parametro che identifica la sensazione provata:

- temperatura dell'aria;
- umidità relativa;
- velocità dell'aria;
- temperatura media radiante delle pareti.

La temperatura dell'aria è il valore fornito da un sensore di temperatura, che deve essere in equilibrio con l'aria e non deve essere esposto a radiazione da parte di corpi a temperatura diversa da quella dell'aria, per cui va opportunamente schermato.

L'umidità relativa o grado igrometrico è definita come il rapporto tra la pressione parziale del vapore d'acqua nell'aria, p_a , e la pressione parziale massima di vapore d'acqua, p_{vs} , che si può avere a quella temperatura e che a sua volta dipende unicamente dalla temperatura dell'aria; la valutazione dell'umidità relativa è legata alla valutazione di p_a .

Per le misure di velocità dell'aria generalmente si usano strumenti “a filo caldo”, che si basano sul principio che lo scambio termico convettivo tra un elemento caldo e l'aria sia proporzionale alla velocità dell'aria. Normalmente si usano sensori omnidirezionali, generalmente costituiti da un

elemento caldo sferico, mentre non vanno utilizzati strumenti con elementi “caldi” cilindrici unidirezionali, i quali possono essere impiegati solo quando si conosce la direzione dell’aria, per esempio per misure di velocità, come nel caso di misure all’interno di canali.

La temperatura piana radiante è la temperatura di un’ideale cavità isoterma in cui il flusso radiante incidente su di una faccia di un elemento piano è uguale a quello presente nell’ambiente reale.

La temperatura media radiante si può valutare attraverso tre metodi:

- a) globotermometro,
- b) mediante la composizione delle temperature piane radianti,
- c) fattori di vista, attraverso la seguente formula.

$$\vartheta_{mr} = \left[\sum_{j=1}^n \left(\vartheta_{sj}^4 \cdot \frac{F_j}{n} \right) \right]^{\frac{1}{4}} - 273 \quad (1.3)$$

dove:

n numero di superfici;

ϑ_{sj} : temperatura assoluta della j -esima superficie [K];

F_j : fattore di vista della j -esima superficie;

A_j : area della j -esima superficie.

Il calcolo del fattore di vista tra le diverse superfici è piuttosto complesso e pertanto si può utilizzare la formula semplificata che si basa su una media pesata della temperature superficiali:

$$\vartheta_{mr} \cong \frac{\sum_{j=1}^n \vartheta_{sj} \cdot A_j}{\sum_{j=1}^n A_j} \quad (1.4)$$

Come anticipato, il corpo umano scambia calore sensibile con l’aria per convezione (e quindi col la temperatura dell’aria ϑ_a) e con le superfici interne per radiazione nel campo dell’infrarosso (e quindi con la temperatura media radiante ϑ_{mr}). La combinazione di questi due fenomeni porta a definire lo scambio termico complessivo; il parametro rappresentativo del totale calore scambiato tra le persone e l’ambiente si definisce temperatura operante o temperatura operativa (ϑ_o) e per ambienti termici moderati si può, in prima approssimazione considerare pari alla media tra la temperatura media radiante e la temperatura dell’aria.

$$\vartheta_o \cong \frac{\vartheta_{mr} + \vartheta_a}{2} \quad (1.5)$$

Tale parametro rappresenta quindi la temperatura percepita dalle persone all’interno di un ambiente ed è intuibile come questa temperatura sia il parametro di progetto che definisce la temperatura interna di un ambiente.

Parametri di comfort

I parametri fisici sopra riportati sono importanti e permettono di verificare le condizioni interne di un ambiente. Tuttavia da soli questi non consentono di stabilire se un ambiente possa considerarsi confortevole o meno. Questo aspetto richiama dei principi ergonomici non prettamente fisici o direttamente misurabili, quanto piuttosto condizioni personali e psicologiche. Di questi aspetti si tiene conto attraverso due parametri:

PPD (Predicted Percentage Dissatisfied): la percentuale di persone insoddisfatte rappresenta in termini relativi l'incidenza di soggetti che non gradiscono l'ambiente dal punto di vista termico;

PMV (Predicted Mean Vote): il voto medio previsto definisce una scala di comfort che va da -3 (sensazione di freddo) a +3 (sensazione di caldo), passando attraverso 0 (neutralità termica), come illustrato in Tabella 1).

Tabella 1. Scala di sensazione ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers).

PMV	Sensazione
+3	molto caldo
+2	caldo
+1	leggermente caldo
0	neutralità termica
-1	leggermente freddo
-2	freddo
-3	molto freddo

Le grandezze PPD e PMV sono tra loro associate secondo una funzione rappresentata in Figura 1. Occorre osservare come ad un valore di PPD corrispondano due valori di PMV; pertanto ad un PPD pari al 10% corrispondono due valori di PMV: + 0.5 (sensazione confortevole con lieve sensazione di calore) e - 0.5 (sensazione confortevole con lieve sensazione di freddo). Inoltre anche in condizioni di neutralità termica (PMV = 0) esiste sempre un 5% di persone insoddisfatte.

I riferimenti normativi che fissano i limiti per le condizioni di comfort termoigrometrico sono le norme UNI EN ISO 7730 e ANSI/ASHRAE 55-2010. In esse vengono riportati i limiti entro cui devono essere compresi i parametri ambientali per assicurare le condizioni di comfort. Le norme si riferiscono ad ambienti in cui non si presentano difformità marcate nella temperatura o negli altri parametri ambientali (definiti "ambienti termicamente moderati"); si fa riferimento alle persone che soggiornano in quiete o che svolgono una modesta attività sedentaria.

Se le condizioni ambientali si allontanano da quanto richiesto dal comfort per la permanenza delle persone, con differenze notevoli come avviene ad esempio in alcune attività industriali, gli ambienti vengono invece definiti come "ambienti termicamente severi", caratterizzati da specifiche normative. Nelle normative relative al comfort ambientale ai fini del benessere occorre garantire per $PPD \leq 10\%$ e $-0.5 < PMV < +0.5$ (Figura 1).

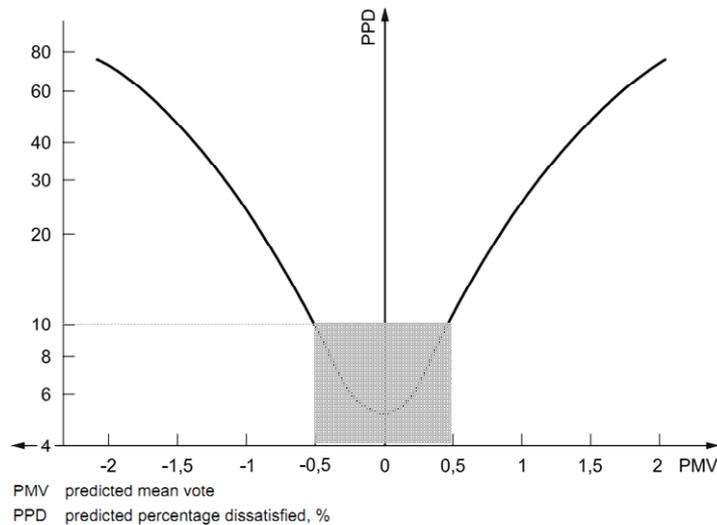


Figura 1. Curva che riporta la relazione tra la Percentuale di Persone (PPD) insoddisfatta ed il Voto Medio Previsto (PMV) (UNI EN ISO 7730).

Per quanto riguarda l'abbigliamento delle persone, sia estivo che invernale, il parametro di riferimento è la resistenza termica dell'abbigliamento. Generalmente, per la resistenza termica dell'abbigliamento viene usata un'unità di misura incoerente, il 'clo'. Le norme fissano i limiti di riferimento pari a $0,35 \div 0,60$ clo per l'estate e $0,8 \div 1,2$ clo per l'inverno.

Come prima descritto il metabolismo energetico, definito anche energia metabolica o tasso metabolico viene misurato con l'unità incoerente "met". Per dare un'indicazione su come la pesantezza degli abiti possa influenzare le condizioni di comfort si può fare riferimento alla Figura 2 in cui si riportano, per persone moderatamente attive (1.2 met) in ambienti con umidità relativa $\phi = 50\%$ e velocità dell'aria $v_a < 0.15$ m/s, la pesantezza degli abiti ottimale per le diverse temperature operanti dell'ambiente ed il campo di variazione consentito per questo parametro per limitare ad un massimo del 10% le persone insoddisfatte.

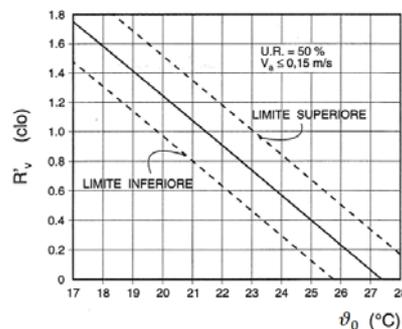


Figura 2. Resistenza termica degli abiti per persone moderatamente attive in funzione della temperatura operante.

Si può osservare in Figura 2 come una variazione di 0.2 clo nell'abbigliamento modifichi di circa 1.2 °C la temperatura operante di comfort.

Di seguito vengono riportati i campi di benessere per il periodo invernale ed estivo in funzione dei parametri ambientali prima descritti.

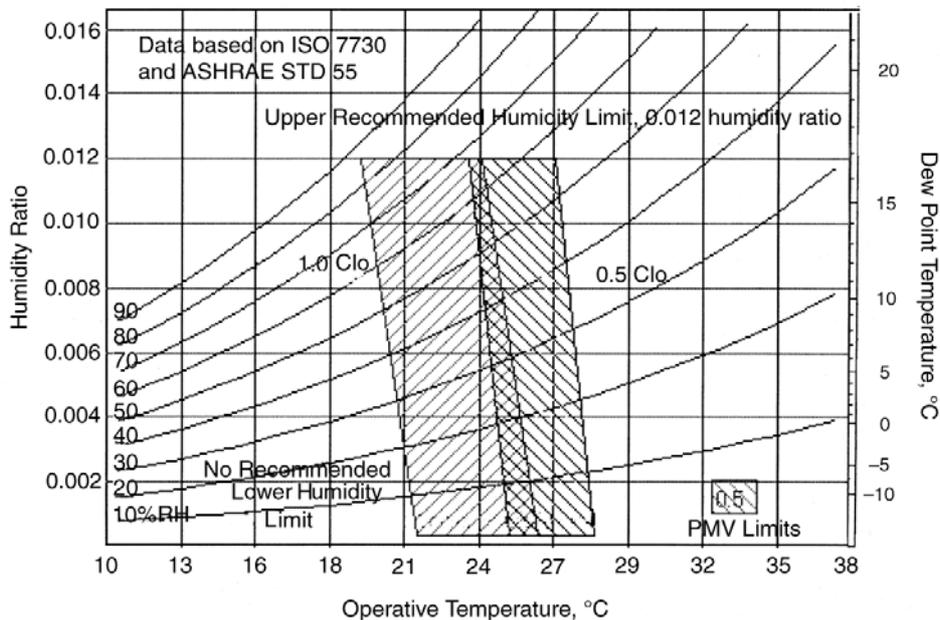


Figura 3. Campi di benessere invernale ed estivo per persona in attività moderata (UNI EN ISO 7730. 2006)

Il comfort termico locale

Quanto visto finora riguarda i parametri cosiddetti di comfort globale, relativi alle condizioni generali di un ambiente. Si vogliono ora illustrare le condizioni locali relative a fenomeni che possono indurre a scambi termici localizzati in particolari zone del corpo. Tali disuniformità termiche sono:

- gradiente verticale della temperatura dell'aria;
- asimmetria nella temperatura piana radiante;
- temperatura superficiale dei pavimento;
- disturbo da correnti d'aria.

Gradiente verticale della temperatura dell'aria.

Il valore accettabile di questo parametro deve portare ad una differenza massima di 3°C tra il livello delle caviglie (0.1 m dal pavimento) e quello della nuca (1.1 m dal pavimento per una persona seduta), con un gradiente limite quindi di 1.9 °C/m. Tale gradiente viene normalmente rispettato con soluzioni impiantistiche di climatizzazione tradizionali. Questo parametro può essere critico in ambienti con marcato gradiente verticale di temperatura.

Asimmetria della temperatura piana radiante

Le persone sono sensibili all'asimmetria di radiazione percepita sul corpo per effetto delle diverse temperature delle superfici che le circondano. Il parametro che misura l'esistenza di una differenza nella radiazione percepita prende il nome di asimmetria delle temperature piane radianti e viene definito pari alla differenza di tali temperature sulle due facce di una piccola superficie verticale (asimmetria laterale) od orizzontale (asimmetria verticale) all'interno di un ambiente.

Temperatura del pavimento (per pavimenti con riscaldamento radiante)

Per evitare il disagio per gli occupanti il valore limite della temperatura superficiale del pavimento è fissato tra 18°C e 29°C, per persone che indossano calzature. Per persone a piedi nudi questi valori si modificano leggermente e dipendono anche dalla natura della finitura superficiale del pavimento.

Disturbo da correnti d'aria

Per le persone in attività sedentaria risulta indispensabile evitare che la velocità dell'aria ambiente causi una corrente d'aria che comporti il raffreddamento localizzato di una parte del corpo. Normalmente le zone più critiche sono le caviglie (0.1 metri di altezza) e la nuca (1.1 metri di altezza per persone sedute e 1.7 per persone in piedi). Affinché le condizioni ambientali siano accettabili la PPD, riferita alle persone che lamentano la percezione di tali correnti d'aria, deve essere al massimo pari al 15%. La norma UNI EN ISO 7730 esprime il rischio da corrente d'aria (DR, Draught Rate) con la seguente formula:

$$DR = (34 - t_a) \cdot (v_a - 0.55)^{0.62} \cdot (0.37 \cdot v_a \cdot T_u + 3.14)$$

Dove:

- t_a è la temperatura dell'aria
- v_a è la velocità media dell'aria
- T_u è la turbolenza locale.

Il quadro normativo

La norma EN 15251 specifica i parametri di input per la progettazione e la valutazione degli ambienti indoor. La norma si focalizza sulla qualità dell'aria, sull'ambiente termico, sulla qualità della luce e acustica. La norma è ora in revisione (Olesen, 2012): i principali punti vengono di seguito discussi.

Il consumo energetico degli edifici dipende in modo significativo dai criteri di progettazione degli ambienti interni (temperatura, ventilazione e illuminazione), dalla costruzione (inclusi i sistemi) e dal funzionamento. Recenti studi hanno dimostrato che un ambiente di scarsa qualità implica maggiori costi per datore di lavoro (nel caso di uffici), il proprietario dell'edificio e per la società, nel suo complesso. Questi costi sono spesso superiori rispetto al costo dell'energia utilizzata nello stesso edificio.

È stato anche dimostrato che la buona qualità ambientale possa migliorare il lavoro e le prestazioni di apprendimento e ridurre l'assenteismo.

Inoltre gli occupanti possono intraprendere azioni per migliorare il proprio comfort, che possono avere implicazioni energetiche. Vi è quindi necessità di specificare i criteri degli ambienti interni per la progettazione, i calcoli energetici, le prestazioni e la gestione di edifici. Inoltre le azioni degli occupanti che lamentano discomfort possono implicare costi energetici aggiuntivi.

Per quanto riguarda l'ambiente termico i temi trattati nella revisione della norma sono i seguenti:

- chiara differenziazione tra l'approccio adattativo e il modello PMV-PPD
- ventilazione personalizzata
- parametri locali di comfort termico.

In funzione del contesto climatico nel quale l'edificio è inserito sono infatti differenti i range di temperatura operativa che si ottengono applicando l'approccio PMV-PPD oppure quello adattativo. I parametri di comfort termico localizzato nell'attuale normativa non hanno diretta influenza sui consumi energetici dell'edificio. Nella revisione si propone di modificare questo approccio, in quanto il legame tra parametri di comfort localizzato e i consumi esiste.

Un tema nuovo che non viene trattato nell'attuale normativa è il comportamento delle persone. Attraverso simulazioni dinamiche è stato provato che i comportamenti degli utenti influenzano i consumi.

1.2 Il comfort relativo alla qualità dell'aria

L'aria interna è ritenuta un importante fattore ambientale da più di un centinaio di anni, ovvero dall'inizio della rivoluzione sull'igiene, avvenuta intorno al 1850, per poi essere approfondita negli studi ambientali, per divenire tematica dominante intorno agli anni '60. La qualità dell'aria (Indoor Air Quality – IAQ) svolge un ruolo fondamentale per quanto riguarda la salute pubblica. I problemi principali sono riscontrabili nei paesi in via di sviluppo a causa della combustione interna della biomassa utilizzata per cucinare e riscaldarsi (Sundell, 2004). Studi sulle esposizioni in ambienti indoor e sugli effetti sulla salute sono stati condotti principalmente in Nord Europa e in Nord America.

Le conseguenze di un ambiente di lavoro poco salubre possono manifestarsi attraverso un quadro sintomatologico ben definito come la Sick-Building Syndrome (SBS), non una vera e propria malattia quanto una serie di disturbi come cefalea, irritazione di occhi, naso e gola, tosse secca, pelle disidratata, vertigini o nausea, difficoltà di concentrazione, affaticamento, particolare sensibilità agli odori. Il rimedio consiste nell'allontanamento per un periodo limitato di tempo dal luogo di lavoro. L'eziologia è ancora sconosciuta, ma i fattori scatenanti sono imputabili agli edifici (materiali di costruzione, arredi, rivestimenti), agli impianti di condizionamento e ventilazione, ai

programmi di manutenzione, al tipo e all'organizzazione del lavoro e certamente a fattori personali. I sintomi della SBS, così come i suoi effetti, sono modesti ma comportano un significativo calo della produttività e rappresentano su larga scala un costo più elevato di alcune gravi malattie. Proprio l'assenza di reperti obiettivi focalizza il problema sull'adeguatezza della qualità dell'aria, intesa come soddisfacimento delle proprie aspettative e raggiungimento di uno stato di benessere. Infatti, è difficile poter affermare che vi sia una vera e propria "malattia" causata dalla permanenza negli edifici, mentre è certo che si può avvertire malessere e senso di irritazione. Il giudizio espresso dagli occupanti è quindi l'unico modo per avere informazioni concernenti il comfort e ai sintomi a specifici della SBS (Johnner et al., 2004, Fang et al., 2005).

Inoltre le allergie sono in rapido aumento in tutto il mondo, sia nei paesi sviluppati che in quelli in via di sviluppo, e sono fortemente connesse con le esposizioni in ambienti interni; grande interesse è ora posto sulla relazione fra esposizione agli ambienti e aumento dei sintomi. In molte regioni del mondo, circa la metà della popolazione è colpita, i giovani maggiormente degli anziani, e in molte regioni, l'incidenza è praticamente raddoppiata negli ultimi decenni (Sundell, 2004).

La qualità dell'aria negli ambienti interni è definita accettabile se è percepita come fresca e piacevole, se non ha un impatto negativo sulla salute e può aumentare la produttività e l'apprendimento degli studenti nelle scuole. Le norme fino ad oggi emesse non prendono in considerazione la produttività e l'apprendimento e presentano un requisito modesto, ovvero che l'aria sia "accettabile" per almeno l'80% delle persone; questo significa che le persone più sensibili, che rappresenteranno il 20% dei presenti, giudicheranno la qualità dell'aria inaccettabile (Fanger, 2006). Per migliorare la qualità dell'aria sono oggi possibili varie strategie: controllo della fonte dell'aria, pulizia dell'aria (tramite assorbimento e fotocatalisi) e utilizzo della ventilazione personalizzata. Quest'ultima tipologia di intervento consiste nel fornire a ciascun occupante aria non inquinata dalle fonti presenti nell'ambiente (Melikov et al., 2002; Melikov, 2004).

Una fra le maggiori fonti di inquinamento negli uffici è costituita dalle particelle dei filtri di ventilazione (Beko et al., 2003). Fonti minori sono i materiali da costruzione e i computer (in particolare gli schermi CRT ovvero con tubo catodico ormai non più utilizzati).

La qualità dell'aria dipende anche da sostanze che penetrano dall'esterno e si accumulano nell'ambiente indoor. L'inquinamento indoor dipende quindi anche dalla qualità dell'aria intorno alla scuola. Se per esempio è vicino a un'area molto trafficata le concentrazioni di particolato (quale ad esempio il PM_{10} e $PM_{2.5}$) saranno più alte.

Il degrado della qualità dell'aria può essere altresì causato da una erronea gestione, mantenimento o pianificazione o installazione di sistemi di ventilazione e riscaldamento. Ma la presenza di un'aria "viziata" in un ambiente chiuso dipende anche da abitudini sbagliate. All'interno degli edifici la temperatura dovrebbe variare tra i 20 e i 22 °C con un tasso di umidità intorno al 40 - 60%. Non è consigliabile scendere sotto il 20% di umidità perché l'aria diventerebbe troppo secca causando un'elevata evaporazione delle mucose bronchiali e quindi secchezza nelle vie respiratorie.

Anche in assenza di fattori di inquinamento esterni, la qualità dell'aria indoor peggiora tanto più velocemente quanto maggiore è la presenza di persone in un ambiente chiuso per un tempo prolungato.

Gli inquinati negli ambienti interni

L'aria è composta principalmente da gas, quali ossigeno (21%), azoto (78%), argon (1%) e diossido di carbonio (0.04%). La concentrazione delle impurità dell'aria esterna è variabile, ma è generalmente inferiore rispetto a quella dei contaminanti prodotti dall'uomo all'interno degli ambienti.

I contaminanti che presentano particolari problemi negli ambienti indoor sono il fumo di tabacco, il radon e la formaldeide. I contaminanti aerei possono presentarsi sotto forma di particelle (aerosol o particolato inquinante) o di gas. La distinzione è fondamentale per capire le strategie per la rimozione. I contaminanti gassosi si distinguono in non organici e organici; questi ultimi contengono atomi di carbonio e nella maggior parte sono vapori. Gli effetti dannosi, provocati da questi composti sono: tossicità, odori sgradevoli, irritazione e danni materiali (corrosione, decolorazione). La tossicità varia in funzione della concentrazione e del tempo di esposizione. In Tabella 2 sono riportati le fonti degli inquinanti e le relative cause.

Tabella 2. Fonti e considerazioni sugli inquinanti negli ambienti interni

Materiali	La scelta dei materiali influisce sia sull'ambiente esterno che su quello interno. Le fonti degli inquinanti sono: solventi, fibre minerali, terreno (gas radon), pesticidi, arredo interno (pavimentazione, adesivi, tappeti, rivestimenti, vernici, coloranti, pitture).
Costruzione	La progettazione e la realizzazione non accurata degli edifici influiscono sulla qualità degli ambienti interni. I seguenti aspetti devono essere studiati e approfonditi: ermeticità dell'involucro, risparmio energetico e ventilazione.
Occupanti	I contaminanti possono essere introdotti a causa di: attività degli occupanti, umidità, fumo di tabacco, fotocopiatrici, prodotti per la pulizia, introduzione di diossido di carbonio, composti organici, particolato.
Fattori ambientali	Umidità e muffe, gas radon, emissioni di gas e di inquinanti esterni.
Manutenzione e gestione	Contribuiscono a peggiorare l'IAQ la scarsa manutenzione dell'edificio e dei controlli e l'errata gestione degli ambienti.

In uno studio comparativo sono stati analizzati 16 paesi europei, per confrontare le normative e delineare un quadro generale per definire la qualità dell'aria. Tra i paesi analizzati solo 6 sono dotati di riferimenti normativi che limitano le concentrazioni degli inquinanti negli ambienti non-industriali. Questi, insieme ai valori suggeriti dalla WHO (World Health Organization) sono riportati in Tabella 3 (Brelh, 2011).

Tabella 3. Inquinanti negli ambienti interni: limiti nelle diverse normative.

	WHO World Health Organization	FI Finland	LT Lithuania	NO Norway	PT Portugal	RO Romania	SI Slovenia
Ammonia [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	-	20	40	-	-	-	50
Asbestos	-	0 fb/cm	0.1 mg/m^3	0.1 fb/cm	-	-	-
CO [mg/m^3]	7 ^{#2}	8	3	10 ^{#5}	12.5	6 ^{#3}	10
CO₂ [ppm]	-	1200	-	1000	1000	-	1670
Formaldehide [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	100	50	10	100 ^{#3}	100	35 ^{#3}	100
NO₂ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	40	-	40	100 ^{#4}	-	-	-
Ozone [mg/m^3]	0.1 ^{#5}	-	0.03	-	0.2	-	0.1
PM₁₀ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	20	50	50	-	150	-	100
Radon [Bq/ m^3]	-	200 ^{#1}	-	100	400	140 ^{#6}	400
Styrene [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	-	1	2	-	-	-	-

^{#1} annual average, ^{#2} daily maximum, ^{#3} 30 min average, ^{#4} 1 h average, ^{#5} 8 h average, ^{#6} instant max, fb – fibre

Un confronto tra i diversi valori è difficile perché la durata di campionamento è differente. Solo due inquinanti sono riportati in tutte le normative: il monossido di carbonio (CO) e la formaldeide (HCHO).

Il quadro normativo

Di seguito sono descritte le normative per i sistemi impiantistici per la gestione dei parametri indoor (sia per la parte di riscaldamento e raffrescamento che per la ventilazione).

Gli impianti aeraulici concorrono all'ottenimento della desiderata qualità dell'aria nei locali serviti dall'impianto stesso. La ventilazione modifica la qualità dell'aria interna mediante il meccanismo di diluizione con aria esterna e tramite l'impiego di filtri ed altri sistemi di abbattimento e neutralizzazione dei contaminanti.

Tipologie e livelli di qualità dell'aria possono essere definiti in accordo con UNI EN 15251 e UNI EN 13779.

Per la classificazione della qualità dell'aria interna nella presente norma si adottano tre classi di qualità Elevata, Media e Bassa, come riportato nel in Tabella 4 nella quale è anche indicata la corrispondenza tra tali classi adottate e quelle previste nella norma UNI EN 13779; si noti che vengono considerate accettabili le categorie da IDA 1 a IDA 3.

Tabella 4. Classificazione della qualità dell'aria interna adottata e relativa corrispondenza con quelle della UNI EN 13779

Categorie di qualità dell'aria	Corrispondenza UNI EN 13779	Corrispondenza UNI EN 15251
Elevata	IDA 1	Categoria I
Media	IDA 2	Categoria II
Bassa	IDA 3	Categoria III
_*	IDA 4	Categoria IV

La classe IDA 4 (*), così come previsto ai fini di classificazione nella UNI EN 13779, non viene considerata accettabile per il raggiungimento degli scopi previsti dalla presente norma.

Per l'attribuzione della classificazione della qualità dell'aria interna si tiene conto della natura degli inquinanti, della loro concentrazione e degli effetti sulla salute e sul benessere degli occupanti.

Negli ambienti in cui esistono sorgenti di contaminanti per i quali è accertato un effetto nocivo sulla salute, vanno adottati tutti gli interventi necessari per contenere tale effetto entro limiti accettati.

Negli ambienti in cui si debbano considerare gli effetti sul benessere delle persone, si possono adottare differenti metodi di classificazione e di progettazione.

Le classi di qualità dell'aria sono funzione delle portate di aria esterna e della metodologia di filtrazione adottata. Il metodo prestazionale fa riferimento ad bilancio di massa di singoli contaminanti e porta a determinare la portata minima e la filtrazione minima da adottare ai fini del rispetto di una soglia di concentrazione di ciascun contaminante.

La classificazione che prende la concentrazione di CO₂ come marker della qualità dell'aria è utilizzabile nei locali in cui non è consentito fumare e non siano presenti fiamme libere e nei quali l'inquinamento è causato principalmente dalle persone in relazione alla loro attività metabolica.

Tabella 5. Concentrazione di CO₂ all'interno dei locali

Classe di qualità dell'aria	Corrispondenza UNI EN 13779	Differenza di concentrazione di CO₂ tra aria interna ed aria esterna [ppm]
Elevata	IDA 1	≤ 400
Media	IDA 2	400 – 600
Bassa	IDA 3	601 – 1000
-	IDA 4	> 1000

La normativa tecnica definisce i tassi di ventilazione all'interno degli edifici, che sono necessari per garantire livelli ottimali di qualità dell'aria. L'Indoor Air Quality Guide, l'ASHRAE Standard 62.1 (Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality) e la CIBSE Guide B: Heating, Ventilating, Air Conditioning and Refrigeration riportano il valore di riferimento in funzione della destinazione d'uso dell'edificio. La legislazione nei singoli stati presenta valori diversi, come riportato in un recente articolo sulla rivista RHEVA Journal (gennaio 2012):

Tabella 6. Tassi di ricambio d'aria nei diversi ambienti.

Edifici residenziali Tasso di ventilazione (h⁻¹)	Italia: 0.3 Germania: 0.6 Francia: 0.48
Scuole (aule) Portata di immissione (l/s per persona)	Italia: 4.7 Germania: 9.8 Francia: 4.2
Uffici Portata di immissione (l/s per persona)	Italia: 11 Germania: 25 Francia: 7

1.3 Il comfort illuminotecnico

L'illuminazione svolge un fondamentale ruolo nella qualità dell'ambiente indoor. In particolare, un ambiente per essere ben illuminato deve avere i seguenti requisiti:

- buona visibilità, per svolgere correttamente le attività;
- comfort visivo, cioè soddisfare necessità di carattere fisiologico e psicologico;
- sicurezza, per facilitare il movimento.

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 è compreso tra le lunghezze d'onda che vanno da 380 a 780 nm.

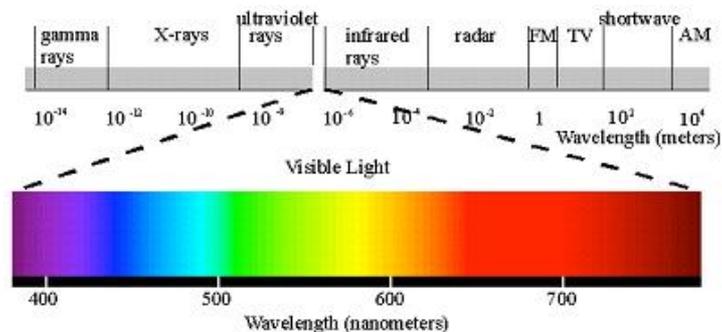


Figura 4. Spettro visibile.

L'occhio umano ha una risposta visiva diversa a seconda della lunghezza d'onda della radiazione incidente, per cui è stata introdotta una curva di sensibilità, sia per la visione diurna (fotopica) che notturna (scotopica). La fotometria studia la luce ponderando la radiazione in funzione della curva di sensibilità.

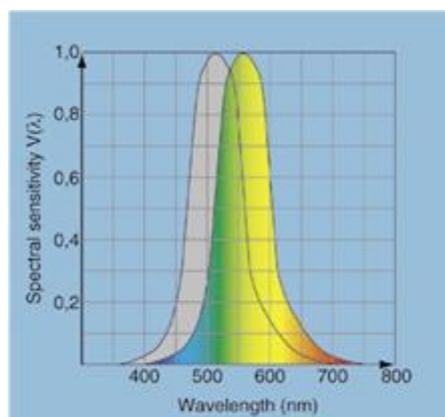


Figura 5. Curva di sensibilità dell'occhio umano (Fördergemeinschaft Gutes Licht,).

Le principali grandezze fotometriche sono:

- Flusso luminoso: quantità di luce che una sorgente emette nello spazio. Si misura in lumen [lm]
- Intensità luminosa: quantità di luce emessa in una certa direzione. Si misura in candele [cd]
- Illuminamento: misura la quantità di luce che colpisce una superficie. Si misura in lux [lm/m^2]
- Luminanza: quantità di luce che, partendo da una sorgente o da una superficie, colpisce l'occhio dell'osservatore. Si misura in [cd/m^2].

Non c'è e non può esistere una definizione chiara di cosa si intende per illuminazione di qualità, tuttavia si potrebbe affermare che si raggiunge la qualità quando un progetto illuminotecnico incontra e risponde sia agli obiettivi che alle necessità del cliente e del progettista. Gli obiettivi potrebbero essere, ad esempio, aumentare la performance nell'espletamento di un compito, creare particolari effetti visivi, assicurare il comfort visivo, mentre le necessità potrebbero essere rispettare il budget economico, i tempi di realizzazione del progetto e le restrizioni imposte dalle normative.

I parametri che caratterizzano l'ambiente luminoso sono:

- Distribuzione delle luminanze
- Illuminamento (\bar{E}_m) e uniformità di illuminamento ($E_{\min}/E_{\text{medio}}$)
- Abbagliamento
- Direzione della luce
- Resa dei colori e temperatura di colore della sorgente
- Sfarfallamento ed effetti stroboscopici
- Disponibilità di luce diurna, che, vista la sua continua variabilità in termini di intensità e di temperatura di colore contribuisce alla dinamicità degli spazi

In generale, una buona qualità della luce deriva da tre aspetti:

- Prestazione visiva: indica la velocità e l'accuratezza del sistema visivo nell'espletamento di un compito (velocità di percezione, acuità visiva, sensibilità al contrasto). È influenzata dal livello di illuminamento e della possibile presenza di abbagliamento.
- Comfort visivo: non è misurabile quantitativamente, ma è legato alle condizioni psicofisiche delle persone. È influenzato dalla resa dei colori e dall'equilibrio nella distribuzione delle luminanze.
- Ambiente visivo: esprime la sensazione generale che si può percepire a livello di illuminazione all'interno di un locale. È influenzato dal colore della luce, dalla direzione della luce e dall'effetto di modellato (corretto rapporto tra illuminazione diretta e diffusa).

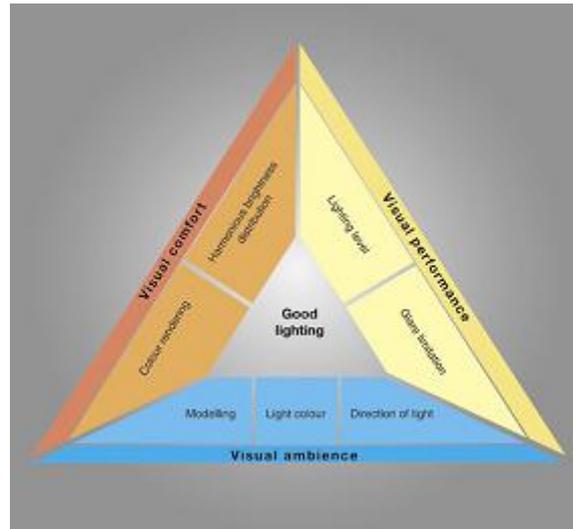


Figura 6. Parametri che influenzano la qualità della luce (Fördergemeinschaft Gutes Licht).

Molti studi hanno dimostrato come la luce naturale influisca positivamente sulle persone, dal momento che incrementa il benessere visivo, fisiologico e psicologico; pertanto è importante studiare attentamente, in fase di progettazione, una configurazione dell'edificio tale da permettere una penetrazione ottimale della luce. D'altro canto, il controllo della luce diurna è fondamentale, specialmente in ambito lavorativo, dove il rapporto verso l'esterno si è visto essere strettamente collegato alla performance e al comfort dell'utente.

Illuminazione naturale

Il controllo dell'illuminamento naturale è uno dei requisiti che concorrono al benessere dell'organismo in relazione dinamica col contesto ambientale. L'illuminazione naturale deve essere utilizzata nella maggiore misura possibile anche al fine ridurre il consumo energetico. I requisiti delle superfici sono principalmente tre: vedere l'ambiente esterno, realizzare una buona distribuzione delle luminanze e consentire la ventilazione naturale. Esistono alcuni parametri di riferimento che facilitano il progettista nel controllo della corretta illuminazione naturale negli ambienti; questi sono riassunti in Figura 7.



Figura 7. Parametri coinvolti nel progetto illuminotecnico (Carletti C., 2008)

Il quadro normativo

Di seguito sono riportati i riferimenti normativi per la progettazione e la verifica degli edifici. Per alcune tipologie come ad esempio le scuole e le strutture ospedaliere vi sono norme specifiche.

- Circ. Min. LL. PP. 3151 del 22/5/67 Circ. Min. LL. PP. 3151 del 22/5/67 (criteri di valutazione delle grandezze atte a rappresentare le proprietà termiche, igrometriche, di ventilazione e di illuminazione nelle costruzioni edilizie)
- Circ. Min. LL. PP. 13011 del 22/11/74 Circ. Min. LL. PP. 13011 del 22/11/74 (requisiti fisico tecnici per le costruzioni edilizie ospedaliere: proprietà termiche, igrometriche, di ventilazione e di illuminazione)
- D.M. 5 luglio 1975 D.M. 5 luglio 1975 (modificazioni alle istruzioni ministeriali 20/6/96 relativamente all'altezza minima ed ai requisiti igienico sanitari principali dei locali di abitazione)
- D.M. 18 dicembre 1975 D.M. 18 dicembre 1975 (norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica, ivi compresi gli indici minimi di funzionalità didattica, edilizia e urbanistica da osservarsi nella esecuzione di opere di edilizia scolastica)
- UNI 10840 UNI 10840 (luce e illuminazione - locali scolastici: criteri generali per l'illuminazione artificiale e naturale)

1.4 Il comfort acustico

L'acustica studia la generazione, la propagazione e la ricezione di perturbazione di carattere oscillatorio che si propagano in un mezzo elastico causata da una sorgente sonora. La perturbazione trasporta il segnale sonoro lungo la direzione di perturbazione; non vi è trasporto di massa ma di energia.

L'inquinamento acustico

La Legge quadro sull'inquinamento acustico n. 477/95 definisce l'inquinamento acustico come "l'introduzione di rumore nell'ambiente abitativo o nell'ambiente esterno tale da provocare fastidio o disturbo al riposo ed alle attività umane, 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".

Le principali cause del rumore sono il traffico stradale, ferroviario e aereo, gli impianti e le attività produttive e il rumore di origine antropica.

Il rumore può essere valutato con il rilevamento e la previsione da eseguire attraverso indagini sperimentali o simulazioni.

I livelli delle grandezze acustiche

L'orecchio umano tende a giudicare in termini relativi la sensazione sonora procurata da due suoni in funzione del rapporto delle loro intensità energetiche (e non della differenza di intensità). I valori operativi delle variabili acustiche coprono 6 – 12 ordini di grandezza; l'uso della scala logaritmica, oltre a comprimere il campo dei valori numerici richiesti per descrivere le variazioni di parecchi ordini di grandezza, applicata alle grandezze acustiche energetiche esprime in maniera più prossima alla legge psicofisica di sensazione uditiva. Per tale ragione l'entità delle grandezze acustiche è usualmente espressa in termini di "livello" in rapporto a valori convenzionali di riferimento.

Si definiscono:

Livello di pressione sonora:

Il livello espresso in decibel dB, è definito dalla formula: $L_{p_A} = 10 \lg (p/p_0)^2$

dove:

p_A è il valore efficace della pressione sonora, in pascal e p_0 è il valore della pressione sonora di riferimento pari a 20 μPa .

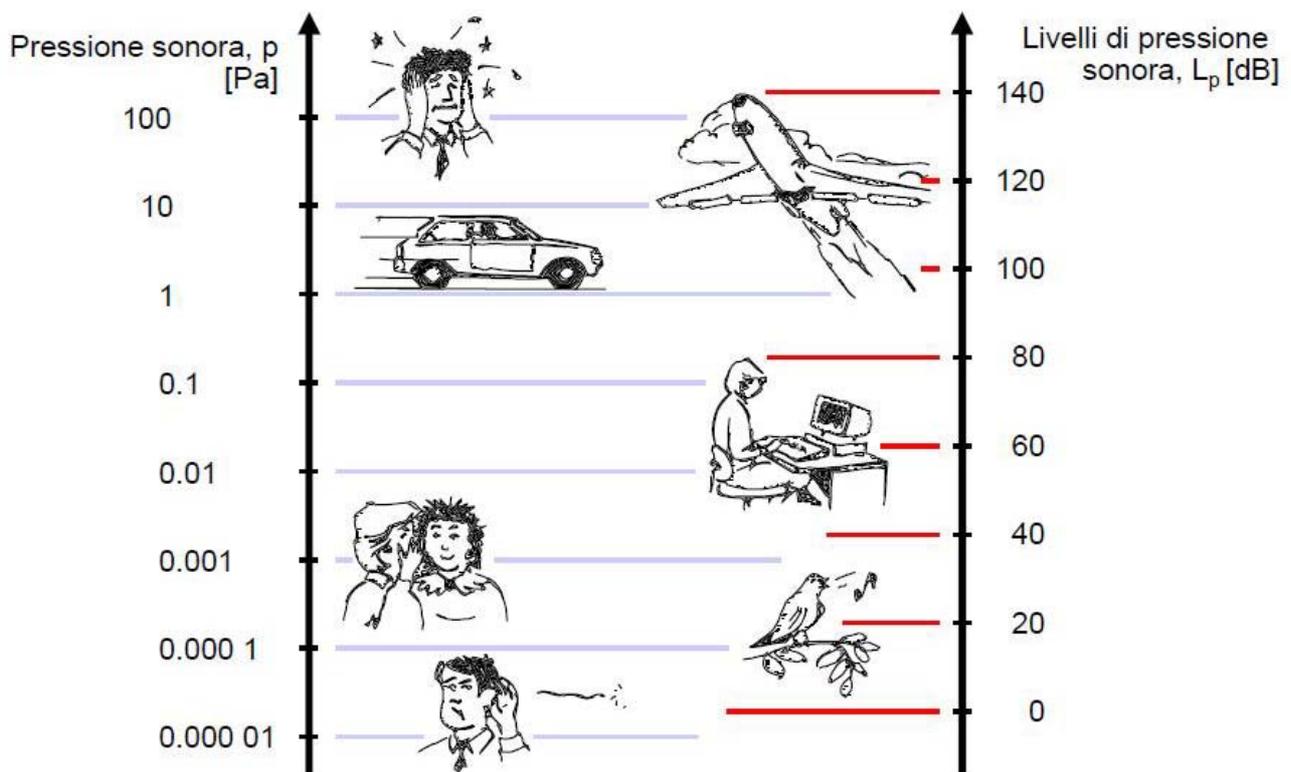


Figura 8. Livelli di pressione sonora.

La risposta del sistema uditivo umano non è costante all'aumentare della frequenza del suono: esso descrive una curva e, per ogni livello sonoro è più sensibile alle frequenze medio-alte piuttosto che alle basse.

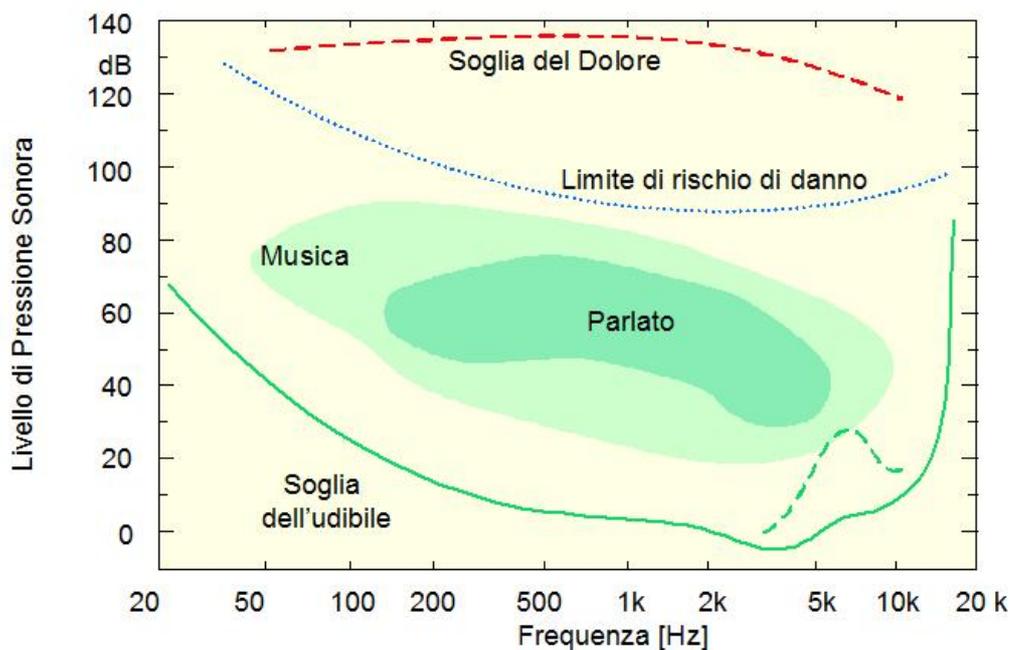


Figura 9. Risposta non lineare dell'orecchio umano in termini di frequenza.

Riferimenti normativi

Le normative emanate al fine di valutare i requisiti acustici passivi degli edifici sono il D.P.C.M. 5 dicembre 1997 e la norma UNI 11367 (2010).

Il D.P.C.M. 5 dicembre 1997 è stato emanato con l'obiettivo di essere un riferimento legislativo per le prestazioni acustiche degli edifici. La norma UNI 11367 ("Classificazione acustica delle unità immobiliari – Procedura di valutazione e verifica in opera") è entrata in vigore nel luglio 2010 con l'obiettivo di colmare le lacune presenti nel precedente testo legislativo. Tale norma, a carattere volontario, è stata redatta con obiettivo di fornire al legislatore uno strumento di supporto da cui partire per la redazione di una nuova normativa di riferimento sui requisiti acustici passivi degli edifici. Analogamente alla classificazione energetica degli edifici (D.P.R. 59/2009 – Attuazione del DLgs 192/2005) essa definisce le classi per ogni requisito analizzato con l'aggiunta di una classe generale che caratterizza globalmente l'unità immobiliare; la scelta di adottare le classi anziché un limite aveva l'obiettivo di fornire un facile indice anche ai proprietari dell'immobile e per incentivare la costruzione di edifici sempre più performanti.

Il decreto D.P.C.M. 5 dicembre 1997, dopo aver classificato gli edifici, definisce le grandezze che caratterizzano i requisiti acustici passivi degli immobili stessi:

- Tempo di riverberazione (T60): il tempo di riverberazione è il tempo necessario perché un determinato suono decada di 60 dB all'interno di un locale. Il parametro varia al variare della frequenza considerata.

- Livello di rumore di calpestio di solai, normalizzato, tra ambienti abitativi di diverse unità immobiliari ($L'n$): caratterizza la capacità di un solaio realizzato in opera di abbattere i rumori impattivi (di calpestio). Si valuta in sostanza azionando una macchina per il calpestio sul solaio da analizzare e misurando il livello di rumore percepito in un altro ambiente (in genere l'ambiente sottostante). Di conseguenza più basso è il livello di rumore misurato migliori sono le prestazioni di isolamento del solaio.
- Potere fonoisolante apparente di partizioni fra ambienti abitativi appartenenti a diverse unità immobiliari (R'): caratterizza la capacità di una partizione realizzata in opera, divisoria tra due differenti ambienti, di abbattere i rumori aerei. Il parametro varia al variare della frequenza considerata.
- Livello massimo di pressione sonora, ponderata A, che può essere immesso negli ambienti abitativi da impianti a funzionamento discontinuo non a servizio della stessa unità immobiliare ($L_{A\ Smax}$): per misurare il livello di rumore prodotto dagli impianti a funzionamento discontinuo il DPCM richiede di utilizzare il parametro Livello massimo di pressione sonora ponderata A con costante di tempo slow; si tratta quindi di misurare il picco massimo, da qui il pedice "max", di rumore prodotto da un impianto.
- Isolamento acustico normalizzato di facciata degli ambienti abitativi ($D_{2m,nT}$): caratterizza la capacità di una facciata di abbattere i rumori aerei provenienti dall'esterno. Il parametro varia al variare della frequenza considerata.
- Livello continuo equivalente di pressione sonora, ponderata A, che può essere immesso negli ambienti abitativi da impianti a funzionamento continuo non a servizio della stessa unità immobiliare (L_{Aeq}): per misurare il livello di rumore prodotto dagli impianti a funzionamento continuo il DPCM richiede di utilizzare il parametro Livello continuo equivalente di pressione sonora ponderata A; si tratta quindi di misurare il livello continuo di rumore prodotto dall'impianto. Per la misurazione del rumore prodotto da impianti che le misure devono essere eseguite nell'ambiente nel quale il livello di rumore è più elevato; tale ambiente deve essere diverso da quello in cui il rumore si origina.

La norma UNI 11367 (2010) definisce i requisiti acustici prestazionali degli edifici. La norma stabilisce inoltre una classificazione acustica, in riferimento ad ognuno dei requisiti, per l'intera unità immobiliare. I criteri definiti al suo interno sono applicabili a tutte le unità immobiliari con destinazione d'uso diversa da quella agricola, artigianale e industriale.

La classificazione acustica di un'unità immobiliare, basata su misure effettuate al termine dell'opera, consente di informare compiutamente i futuri utenti sulle caratteristiche acustiche della stessa; è importante sottolineare che tutte le fasi che convergono nel processo realizzativi dell'opera sono determinati al fine del risultato acustico: progettazione, esecuzione dei lavori, posa materiali, direzione lavori, eventuali verifiche in corso d'opera.

Capitolo 2. La certificazione della qualità

Nel precedente capitolo sono stati esposti i parametri che definiscono la qualità globale di un ambiente. Rispetto alla certificazione energetica, quella dell'ambiente interno amplia l'oggetto di indagine non solo agli aspetti di tipo energetici ma a molti altri requisiti al fine di ottenere una valutazione più completa della sostenibilità ambientale di un intervento edilizio, che non può essere riassunto in un unico indicatore prestazionale relativo al solo consumo energetico. Di seguito vengono richiamate le normative in tema di certificazione energetica e di qualità indoor.

L'attuale normativa sull'efficienza energetica degli edifici è un mezzo comprovato per il miglioramento delle prestazioni dei molteplici componenti che formano l'edificio. C'è una varietà di documenti che costituiscono il riferimento per orientare le scelte progettuali: taluni sono definiti mediante atti legislativi o regolamentari, mentre altri sono documenti ad adesione volontaria che vengono recepiti al fine di valorizzare l'immobile o per altre finalità specifiche (sgravi fiscali, aumenti di cubature ecc.). Essi sono diversificati in funzione di obiettivi, politiche energetiche, condizioni geografiche e climatiche. Un aspetto risulta però ricorrente: una riduzione dei consumi dal 30 al 50% rispetto allo standard minimo per gli edifici nuovi. Negli stati dell'Europa centrale questa riduzione corrisponde ad un fabbisogno energetico annuale tra 40 e 60 kWh/m².

Nella Tabella 7 per ogni paese è riportato il riferimento alla normativa nazionale e alle organizzazioni non governative.

In Italia diverse regioni si sono dotate di strumenti locali per la certificazione e la definizione di edifici a ridotto consumo energetico. Nel rapporto 2012 "Attuazione della certificazione energetica degli edifici in Italia" realizzato dal Comitato Termotecnico Italiano Energia e Ambiente (CTI) sono riportate, le iniziative regionali per l'efficienza energetica, la gestione energetica e le fonti rinnovabili. I dati evidenziano una situazione di notevole disuniformità. Le legislazioni regionali forniscono un'interpretazione differente di un punto importante della Direttiva EPBD che finalmente rende obbligatorio lo strumento della certificazione.

La disuniformità, pur nel pieno rispetto dei principi generali della legislazione italiana (vedi D.Lgs. 192/05 - Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia) riguarda innanzitutto il ruolo e le competenze dei tecnici certificatori energetici. I criteri di classificazione degli edifici (classi energetiche) rimangono uniformi per le Regioni che hanno recepito, o stanno recependo, le regole introdotte dalle Linee guida nazionali ma si differenziano per le Regioni che, per prime, hanno emanato leggi autonome sulla certificazione. Anche le procedure

di calcolo sono differenti; non tutte le Regioni infatti utilizzano il pacchetto degli standard tecnici UNI/TS 11300, come riportato nella Tabella 8.

Tabella 7. Classificazione dei riferimenti per la certificazione energetica in Europa

Paese	Normativa Istituzionale	Organizzazioni non governative
Austria	Standard volontari promossi dal Ministero per l'Agricoltura, le Foreste, l'Ambiente e la Gestione delle Acque (Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft).	- Total Quality Building Certification (TQB) - IBO Building Pass. - Informations - Gemeinschaft Passivhaus (IG Passivhaus)
Belgio	Regolamentazione EPB: Energie-Prestatie en Binnenklimaat (Efficienza energetica e clima interno)	Passiefhuis Platform vzw (PHP)
Danimarca	Building Regulation (2008)	- BOLIG+ - Passivhaus - Nordic Swan per gli edifici
Francia	Legge 2009, n. 967 "Grenelle I"; Programma di ricerca PREBAT	Effinergie®
Germania	Energieeinsparverordnung 2009 (EnEV 2009) Legge sul risparmio energetico negli edifici	Passivhaus
Italia	D.Lgs. 192/2005 e s.m.i.	<i>CasaClima</i> LEED Italia Protocollo ITACA
Olanda	"Regulation on Energy Performance of Buildings" (REG).	-
Regno Unito	"Code for Sustainable Homes" (CSH)	Building Research Establishment (BRE) Ecohomes
Svizzera	Standard SIA 380/1	Minergie

Una delle Province che hanno da anni promuove la certificazione energetica degli edifici è l'Alto Adige, attraverso l'Agenzia *CasaClima*. L'Agenzia ha recentemente creato nuovi sigilli con obiettivi che vanno oltre la classificazione in base ai consumi; di seguito vengono approfonditi. Un altro esempio di certificazione volontaria che approfondisce i temi della qualità degli ambienti interni è il Protocollo LEED che verrà descritto nel Capitolo 2.2. Molteplici sono i protocolli per costruire in modo più accorto verso l'ambiente, al fine di costruire edifici ecosostenibili. Tra questi vi è il Protocollo ITACA (Istituto per l'Innovazione e Trasparenza per gli Appalti e la Compatibilità Ambientale), approfondito nel Capitolo 2.3.

Tabella 8. Procedure di calcolo per la valutazione del fabbisogno di energia primaria e autocertificazione

Regioni e Province autonome	Procedure utilizzate per calcolo del fabbisogno di energia primaria		Procedure di calcolo semplificate			Autocertificazione in classe G	
	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	Prevista	Non prevista
Abruzzo	●			●	●	●	
Basilicata	●			●	●	●	
Bolzano		●		●		●	
Calabria	●			●	●	●	
Campania	●			●	●	●	
Emilia Romagna	●			●	●		●
Friuli Venezia Giulia	●			●		●	
Lazio	●			●	●	●	
Liguria	●		●				●
Lombardia		●	●				●
Marche	●			●	●	●	
Molise	●			●	●	●	
Piemonte	●			●			●
Puglia	●			●	●	●	
Sardegna	●			●	●	●	
Sicilia	●			●	●	●	
Toscana	●			●	●	●	
Trento	●				●		●
Umbria	●		●			●	
Valle d'Aosta	●			●		●	
Veneto	●			●		●	

[1] specifica tecnica UNI/TS 11300;

[2] norme regionali /provinciali.

[3] non vengono considerate;

[4] sono considerate quelle per edifici residenziali con superficie utile < 3000 m²;

[5] sono considerate quelle per edifici residenziali con superficie utile < 1000 m².

2.1 La certificazione *CasaClima*

Con più di 2500 edifici certificati su tutto il territorio italiano, *CasaClima* è oggi una delle realtà più consolidate nel campo della certificazione energetica degli edifici. Il certificato di qualità *CasaClima* e la relativa targhetta consentono di determinare quali saranno i consumi energetici dell'edificio e quindi di valutare con l'investimento. La certificazione si suddivide in tre macroaree, come riportato in Tabella 9.

Il protocollo *CasaClima* per gli edifici prevede una classificazione degli edifici in classi di prestazione energetica in base al fabbisogno calcolato di calore annuo per riscaldamento riferito alla superficie netta riscaldata o indice termico (dalla classe B - indice termico ≤ 50 kWh/m²a alla classe Gold - indice termico ≤ 10 kWh/m²a). Questa classificazione privilegia la scelta di interventi che, al fine di contenere i fabbisogni di riscaldamento e climatizzazione, vanno ad agire in primis sull'efficienza energetica dell'involucro edilizio, ossia sull'isolamento termico.

Tabella 9. Aree di certificazione *CasaClima*

Edifici	Sostenibilità	Prodotti
Nuova costruzione Edifici esistenti / Risanamento	ClimaHotel, <i>CasaClima</i> Wine <i>CasaClima</i> Work&Life	Finestra Qualità Porta Qualità

Oltre all'indice termico, il protocollo di certificazione prevede anche il calcolo del rendimento energetico complessivo del sistema edificio-impianti espresso in fabbisogno annuo di energia primaria per riscaldamento, acqua calda, illuminazione, raffrescamento (in kWh/m²a) e in indice di emissione di CO equivalente (in kg/m²a) (www.agenziacasaclima.it).

Nell'area "Sostenibilità" i sigilli hanno come obiettivo l'introduzione di misure tecniche e strategiche di gestione coerenti con uno sviluppo rispettoso e consapevole.

La Direttiva Tecnica CasaClima e la sostenibilità

CasaClima^{nature} è uno strumento introdotto dall'Agenzia *CasaClima* per valutare e certificare un edificio, non solo dal punto di vista dell'efficienza energetica ma anche degli impatti sull'ambiente e sulla salute dell'uomo. La certificazione *CasaClima*^{nature} può essere richiesta sia per edifici residenziali, sia per edifici non-residenziali.

A gennaio 2013 l'Agenzia ha emanato la nuova Direttiva Tecnica *CasaClima*^{nature}, che contiene le indicazioni per la valutazione della sostenibilità, dell'impatto ambientale dei materiali da costruzione, dell'impatto idrico dell'edificio, della qualità dell'aria interna, i requisiti per l'illuminazione naturale, il comfort acustico e la protezione dal gas radon.

Natura		Vita		Trasparenza	
Energia	Efficienza dell'involucro	Uomo	Comfort	Qualità	Durabilità/Flessibilità
	Efficienza complessiva		Accessibilità/ Sicurezza		Qualità del processo di progettazione e costruzione
Terra	Efficienza dell'insediamento	Ambiente	Qualità ambiente interno	Costi	Costi di investimento
	Standard ambientale materiali		Qualità dell'insediamento		Costi di gestione
	Ciclo di vita		Autenticità	Inserimento nel contesto	Comunicazione
Gestione dei rifiuti	Materiali e sistemi costruttivi locali	Partecipazione degli abitanti			
Acqua	Mobilità				
	Progettazione ciclo dell'acqua				
	Tutela delle risorse idriche				

Figura 10. Tre pilastri del costruire e abitare sostenibile (Direttiva Tecnica *CasaClima*^{nature}).

La certificazione ClimaHotel

Il Sigillo di qualità *ClimaHotel* si basa sui tre pilastri della sostenibilità: Ecologia, Economia e Aspetti socio-culturali. Il sigillo di qualità rappresenta lo strumento per introdurre all'interno delle strutture alberghiere misure tecniche e strategiche di gestione coerenti con uno sviluppo sostenibile dell'attività turistica. I criteri *ClimaHotel* della sostenibilità corrispondono ai concetti "Natura" (Ecologia), "Vita" (aspetti socioculturali) e "Trasparenza" (Economia), essi sono descritti di seguito.

Nella categoria *Natura* vengono analizzate le prestazioni della struttura in ambito ambientale; vengono valutati l'indice di efficienza energetica dell'involucro edilizio e l'indice di efficienza complessiva del sistema edificio - impianto secondo lo Standard *CasaClima*. In questo ambito viene anche valutata la diminuzione del fabbisogno energetico correlata al progetto illuminotecnico, che deve essere ideato e sviluppato con una forte connotazione rivolta al risparmio energetico tramite l'utilizzo di sorgenti luminose ad elevata efficienza. Viene esaminato l'utilizzo delle risorse, considerando sia aspetti legati alla progettazione, che alla gestione della struttura alberghiera. In particolare, il bilancio di impatto ambientale dei materiali da costruzione impiegati viene esaminato con lo standard "*CasaClima Nature*".

Nell'ambito della gestione dei rifiuti devono essere adottate procedure per la raccolta differenziata che coinvolgono attivamente gli ospiti. Per quanto riguarda la mobilità, la certificazione vuole dare un impulso per favorire l'utilizzo dei mezzi di trasporto pubblico e della bicicletta per ridurre gli impatti legati agli spostamenti in automobile. La proposta di trasporto alternativo deve quindi rappresentare per gli ospiti non solo un'opportunità di risparmio economico e di tutela dell'ambiente, ma anche di reale vantaggio in termini di tempo, con buon livello di accessibilità e comfort. Nel settore di valutazione "Acqua" viene valutata sia l'efficienza delle installazioni idrauliche che l'impatto legato al grado di impermeabilizzazione delle superfici.

Nella categoria *Vita* viene analizzato il rapporto della struttura con il benessere degli ospiti, attraverso la valutazione di comfort ambientale e accessibilità.

La certificazione richiede quindi di soddisfare elevati standard qualitativi sia per il comfort acustico, sia per quello luminoso.

Attraverso l'elemento di valutazione "Ambiente" si vuole garantire agli utenti della struttura un'elevata qualità degli spazi interni per mezzo di misure di prevenzione che assicurino una buona qualità indoor. In Figura 11 è riportato un estratto della normativa *ClimaHotel* sui requisiti della qualità dell'ambiente interno.

Ambiente	
v2 Qualità dell'ambiente interno	
CRITERIO:	Verifica del pericolo da gas Radon e adozione di precauzioni progettuali a. Edificio nuovo, ampliamento < 200 Bq/m ³ b. Edificio risanato < 400 Bq/m ³
CRITERIO:	Camere: presenza di almeno un requisito: a. Presenza della ventilazione meccanica controllata b. Utilizzo di prodotti e materiali che rispettano i valori massimi di emissione delle linee guida (materiali a base di legno incollato, prodotti liquidi per interni) c. Misurazione della qualità dell'aria interna prima dell'entrata degli ospiti
Documenti richiesti:	
Precertificazione	Mappatura e/o misurazione del gas radon Provvedimenti per il gas radon (nel caso di superamento dei valori limite) caso b. Elenco materiali in legno incollato e prodotti liquidi per interno
Certificazione	caso b. Certificati di emissione di formaldeide dei materiali a base di legno caso b. Dichiarazione di conformità dei prodotti per interni (vernici, lacche, impregnanti) caso b. Schede di sicurezza dei prodotti liquidi per interni (vernici, lacche, impregnanti) caso c. Rapporto di misurazione della qualità dell'aria interna ad arredo completato

Figura 11. ClimaHotel. Requisiti per la qualità dell'ambiente interno.

Le verifiche sui materiali da costruzioni riguardano l'emissione di formaldeide, mentre quelle sulle pitture vengono descritte nel paragrafo successivo.

Il criterio di valutazione "Autenticità" esamina le misure adottate per valorizzare la connessione con l'autenticità del luogo attraverso l'utilizzo di prodotti e materiali locali.

L'area *Trasparenza* è uno strumento di supporto al committente per redigere una valutazione degli aspetti legati ai costi e alla qualità, sia in fase di progettazione che di gestione.

Attraverso il confronto ed un'analisi costi-benefici, il committente ha la possibilità di valutare la coerenza degli scopi con i mezzi a disposizione. All'interno di quest'area vengono esaminati anche criteri legati alla durabilità della costruzione. La comunicazione rappresenta un ulteriore importante elemento di valutazione, orientato a dare risalto a quelle strategie di gestione atte alla sensibilizzazione e alla comunicazione dei valori di sostenibilità dell'hotel, sia nei confronti dei collaboratori che degli ospiti.

Il processo di certificazione si divide in tre fasi (Figura 12): Pre-Certificazione, Certificazione e Re-Certificazione. La Pre-Certificazione è la fase durante la quale vengono stabiliti gli scopi e vengono definite le basi per la progettazione architettonica, la costruzione e la futura gestione. Dopo la consegna della Pre-Certificazione il committente può utilizzare il sigillo ClimaHotel per lo sviluppo del marketing. La Certificazione prende in esame la realizzazione concreta degli impegni presi e degli scopi definiti durante la Pre-Certificazione.

La Re-Certificazione avviene ogni due anni dalla consegna della Certificazione e stabilisce se la gestione alberghiera ha portato avanti coerentemente gli scopi di sostenibilità garantendo gli standard di qualità a cui si era impegnata.

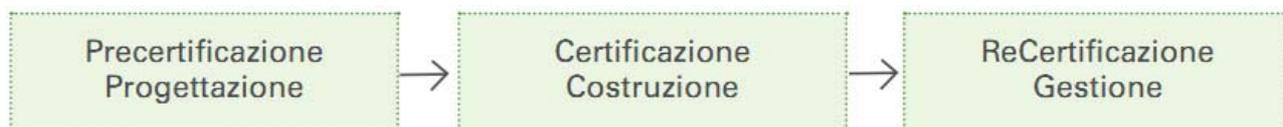


Figura 12. Processo di certificazione *CasaClima*.

Per valutare se gli obiettivi delle prime due fasi sono stati raggiunti, è stato sviluppato un questionario on-line, che verrà descritto nel Capitolo 3.5.

È stata svolta una collaborazione tra il Dipartimento di Fisica Tecnica e l'Agenzia *CasaClima* per lo studio e la definizione dei criteri per i materiali da pittura per gli ambienti indoor, come riportato in Figura 11, nella sezione "Certificazione".

Studio e definizione delle pitture utilizzate negli ambienti indoor per la normativa CasaClima.

In principio sono state analizzate le normative italiane, europee ed estere, al fine di delineare un quadro generale che riassume i criteri e i requisiti imposti dai diversi stati. Sono state analizzate le seguenti normative e guide:

- *Decreto Legislativo - 14 febbraio 2008, n. 33*. Modifiche al decreto legislativo 27 marzo 2006, n. 161, recante attuazione della direttiva 2004/42/CE per la limitazione delle emissioni di composti organici volatili conseguenti all'uso di solventi in talune pitture e vernici, nonché in prodotti per la carrozzeria. Il decreto contiene i limiti sul contenuto di VOC espresso in g/l di prodotto liquido.
- *Decisione Della Commissione del 13 agosto 2008* che stabilisce i criteri ecologici per l'assegnazione di un marchio comunitario di qualità ecologica ai prodotti vernicianti per interni (2009/544/CE).

Il regolamento descrive i criteri ecologici specifici per l'assegnazione del marchio di qualità ecologica siano stabiliti per gruppi di prodotti, sulla base dei criteri elaborati dal comitato dell'Unione europea per il marchio di qualità ecologica (Ecolabel). I requisiti riguardano i limiti di VOC (g/l di prodotto liquido), l'assenza di metalli pesanti e l'assenza di una lista di sostanze che riportano determinate frasi di rischio H (Le frasi H hanno sostituito le più vecchie frasi R, oggi abrogate.)

- *Guida EPA: Painting the Town Green* (Aberdeen Proving Ground's Paint Pilot Project).

Nella guida vengono descritti i componenti proibiti che non possono essere presenti nelle pitture ecologiche; vengono inoltre richiamati gli standard del marchio Green Seal (www.greenseal.org).

La guida riporta una classificazione dei prodotti in funzione del contenuto di VOC espresso in g/l.

Lo studio delle normative ha portato alla creazione dei requisiti relativi ai prodotti per le pitture. Sono stati definiti i criteri per i materiali e prodotti a base di legno e per i prodotti liquidi per le superfici interne (pittura, vernici, lacche ecc.), come riportato in Tabella 10.

Tabella 10. Estratto Direttiva Tecnica *CasaClima*^{nature}. Prodotti liquidi.

limiti di contenuto massimo di VOC per prodotti liquidi pronti all'uso (ai sensi della direttiva 2004/42/CE: valore limite in g/l di prodotto pronto all'uso)		
Prodotto liquido	base	limite (g/l)
a) pitture opache per pareti e soffitti interni	BA	15*
	BS	15
b) pitture lucide per pareti e soffitti interni	BA	60*
	BS	60
c) pitture per pareti esterne di supporto minerale	BA	20
	BS	215
d) pitture per finiture e tamponature da interno/esterno per legno metallo plastica	BA	90*
	BS	150
e) vernici e impregnanti per legno per finiture interne/esterne	BA	75*
	BS	200
f) impregnanti non filmogeni per legno che formeranno una pellicola di spessore minimo	BA	75*
	BS	350
g) primer	BA	15*
	BS	175
h) primer fissanti	BA	15*
	BS	375
i) pitture monocomponenti ad alte prestazioni	BA	100*
	BS	250
j) pitture bicomponenti ad alte prestazioni	BA	100*
	BS	250
k) pitture multicolori	BA	50
	BS	50
l) pitture per effetti decorativi	BA	90*
	BS	100

dove, BA = rivestimento a base acquosa, rivestimento la cui viscosità è regolata mediante l'uso di acqua. BS = rivestimento a base solvente, rivestimento la cui viscosità è regolata attraverso l'utilizzo di solventi organici.

I valori riportati in tabella contrassegnati da asterisco (*) si basano sulla 'Decisione Della Commissione del 13 agosto 2008', che stabilisce i criteri ecologici per l'assegnazione di un marchio comunitario di qualità ecologica ai prodotti vernicianti per interni (2009/544/CE).

La normativa riporta i criteri sui prodotti vernicianti che hanno l'obiettivo di promuovere:

- un impiego efficiente del prodotto e la riduzione al minimo dei rifiuti;

- la diminuzione dei rischi ambientali e di altro genere (ad esempio per l'ozono troposferico), riducendo le emissioni di solventi;
- la riduzione del rilascio nelle acque di sostanze tossiche o comunque inquinanti. I vari criteri sono fissati ad un livello tale da promuovere l'assegnazione del marchio di qualità ecologica ai prodotti vernicianti per interni a ridotto impatto ambientale.

La scelta di imporre dei vincoli sul contenuto di VOC nel prodotto liquido è stata dettata dalla necessità di un controllo rapido e di facile esecuzione da parte dell'Agenzia *CasaClima*. Monitorare infatti i livelli di VOC dopo la pittura degli ambienti non risultava fattibile, in quanto non esiste un protocollo per tale operazione. Le misure di VOC in ambiente inoltre sarebbero state influenzate dalle condizioni al contorno (tempo passato dopo la pittura, volume in analisi, portata di ventilazione dell'ambiente).

Il documento realizzato si intitola "Dichiarazione di Conformità al prodotto". È stato testato su alcune aziende del settore, produttrici di materiali per le pitture. I commenti e le osservazioni fatte dalle aziende sono stati presi come spunto per il miglioramento dei criteri della certificazione.

2.2 La certificazione LEED

Un secondo esempio sul territorio nazionale è lo standard LEED, elaborato dall'USGBC e da GBC ITALIA, che ne ha creato una versione nazionale. Attualmente sono stati sviluppati i seguenti ambiti: nuove costruzioni e ristrutturazioni, scuole, edifici commerciali e abitazioni residenziali, aree residenziali e quartieri. Il sistema Certificazione LEED Italia si basa sull'attribuzione di crediti che vengono riconosciuti attraverso il raggiungimento di ciascuno dei requisiti caratterizzanti la sostenibilità dell'edificio. La somma dei crediti, determina il livello di certificazione ottenuto. Nella sezione "Energia e Atmosfera" vengono definite le prestazioni energetiche minime, ovvero un livello minimo d'efficienza energetica per gli edifici e gli impianti proposti, al fine di ridurre gli impatti economici e ambientali derivanti da consumi eccessivi d'energia. Per il calcolo vengono proposti due approcci:

- Utilizzo di una procedura semplificata per la determinazione della prestazione energetica dell'edificio. Ai fini del presente calcolo si intende per prestazione energetica dell'edificio, la somma dei fabbisogni di energia primaria per la climatizzazione invernale ed estiva, per la produzione di acqua calda sanitaria, per l'alimentazione degli impianti di illuminazione, e per l'alimentazione di processo.
- Simulazione energetica in regime dinamico dell'intero edificio. Dimostrare un miglioramento percentuale dell'indice di prestazione energetica dell'edificio proposto, rispetto alla stima dei consumi di energia primaria del corrispondente edificio di riferimento, pari al 10% per edifici nuovi e al 5% per grandi ristrutturazioni (Manuale LEED 2009).

I criteri proposti dalla Certificazione LEED sono raggruppati in sei categorie, che prevedono prerequisiti prescrittivi obbligatori e un numero di performance ambientali, che assieme definiscono il punteggio finale dell'edificio:

- Progettazione ed innovazione: l'impiego di tecnologie costruttive migliorative rispetto alle "best practice" è un elemento di valore aggiunto, ai fini della certificazione LEED.
- Qualità degli ambienti interni: gli spazi interni dell'edificio devono essere progettati in maniera tale da consentire una sostanziale parità del bilancio energetico e favorire il massimo comfort abitativo per l'utente finale.
- Energia ed atmosfera: utilizzando al meglio l'energia da fonti rinnovabili e locali, è possibile ridurre in misura significativa la bolletta energetica degli edifici.
- Siti sostenibili: gli edifici certificati LEED devono essere costruiti sulla base di un piano di smaltimento che riduca la produzione di rifiuti e impieghi materiale riciclato o prodotto localmente.
- Materiali e risorse: ottengono un punteggio superiore, nel sistema di valutazione, gli edifici costruiti con l'impiego di materiali naturali, rinnovabili e locali, come il legno.
- Gestione efficiente dell'acqua: la presenza di sistemi per il recupero dell'acqua piovana o di rubinetti con regolatori di flusso deve garantire la massima efficienza nel consumo di acqua (www.gbitalia.org).

La sezione Qualità ambientale Interna (QI) affronta i temi ambientali relazionati alla qualità degli ambienti interni quali la salubrità, la sicurezza e il comfort.

I vari crediti fanno riferimento al miglioramento della ventilazione, al comfort termoigrometrico, all'illuminazione naturale e viste sull'esterno, nonché al controllo delle sostanze contaminanti presenti nell'aria impiegando materiali basso emissivi.

In Figura 13 sono riportati i due prerequisiti obbligatori e i requisiti che concorrono al punteggio generale sull'edificio.

Il prerequisito sulle "Prestazioni minime per la qualità dell'aria" impone la Classe II secondo UNI EN 15251 per la determinazione delle portate. Nel caso in cui si raggiunga la classe I viene dato un punto bonus. In caso di edifici non residenziali è richiesta la categoria "low polluting building".

Qualità Ambientale Interna		Possible Points: 15
Prereq 1	Prestazioni Minime per la Qualità dell'Aria	0
Prereq 2	Controllo Ambientale del Fumo di Tabacco	0
Credit 1	Monitoraggio della Portata dell'Aria di Rinnovo	1
Credit 2	Incremento della Ventilazione	1
Credit 3.1	Piano di Gestione IAQ: Fase Costruttiva	1
Credit 3.2	Piano di Gestione IAQ: Prima dell'Occupazione	1
Credit 4.1	Materiali Basso Emissivi: Adesivi, Primers, Sigillanti, Materiali C	1
Credit 4.2	Materiali Basso Emissivi: Pitture	1
Credit 4.3	Materiali Basso Emissivi: Pavimentazioni	1
Credit 4.4	Materiali Basso Emissivi: Prodotti in Legno Composito e Fibre V	1
Credit 5	Controllo delle Fonti Chimiche ed Inquinanti Indoor	1
Credit 6.1	Controllo e Gestione degli Impianti: Illuminazione	1
Credit 6.2	Controllo e Gestione degli Impianti: Comfort Termico	1
Credit 7.1	Comfort Termico: Progettazione	1
Credit 7.2	Comfort Termico: Verifica	1
Credit 8.1	Luce Naturale e Visione: Luce Naturale per il 75% degli Spazi	1
Credit 8.2	Luce Naturale e Visione: Visuale Esterna per il 90% degli Spazi	1

Figura 13. Prerequisiti e requisiti "Qualità ambientale interna", certificazione LEED (Manuale LEED 2009).

2.3 Il protocollo Itaca

Il certificato LEED è stato prodotto dal U.S. Green Building Council (USBGC), una organizzazione non governativa costituitasi nel 1993 a seguito di una crescente domanda nel mercato immobiliare americano di trovare garanzia di qualità nell'acquisto degli immobili. Fu proprio negli Stati Uniti che venne stabilito per la prima volta come il Consiglio Economico e Sociale, un organo consultivo e di coordinamento dell'attività economica e sociale delle Nazioni Unite, potesse consultare "organizzazioni non governative interessate alle questioni che rientrano nella sua competenza" (l'articolo 71 della Carta Costituzionale ONU). Analogamente in Italia l'esigenza venne creato un organismo operante sul piano tecnico per il coordinamento delle regioni nello sviluppo e approfondimento di alcune tematiche di interesse nazionale.

Nel 1996 nacque così l'"Istituto per la trasparenza, l'aggiornamento e la certificazione degli appalti", un'associazione di tipo federale tra le regioni e le provincie autonome di Trento e Bolzano, avente sede legale a Roma, normata da un proprio statuto e regolamento. Lo statuto stesso, approvato nel 2005, afferma che ITACA è una associazione senza fini di lucro e ha lo scopo di promuovere e garantire un efficace coordinamento tecnico tra le regioni e le provincie autonome anche al fine di assicurare un miglior raccordo tra Stato, Enti Locali e operatori di settore. L'attività dell'Istituto è esercitata attraverso tavoli tecnici che formano specifici Comitati e Gruppi di Lavoro, costituiti non solo da tecnici regionali ma anche da rappresentanti di amministrazioni statali e locali e organismi rappresentativi di categorie di settore. Ciò permette di affrontare diversi temi e questioni di volta in volta individuate con scambio di conoscenze, di esperienze e di progetti che possono costituire ipotesi di sviluppo socio-economico.

In Italia alcune amministrazioni avevano già dato vita ad iniziative volte a promuovere una edificazione più sostenibile da un punto di vista ambientale rispetto alle pratiche correnti in atto; ITACA ha riunito in un unico piano di lavoro lo stato dello sviluppo di tali iniziative, elaborando un progetto comune denominato Protocollo ITACA.

Esistono differenti versioni di tale documento rispondenti a fasi successive di elaborazioni e di applicazioni. In ordine cronologico si elencano:

- Protocollo Itaca completo (2004): caratterizzato da 70 schede di valutazione, una articolazione in criteri e sottocriteri complessa e molto articolata;
- Protocollo Itaca semplificato (2006): Versione elaborata per accedere agli incentivi, costituito da 28 schede.
- Protocollo Itaca sintetico (2007): “Valutazione della sostenibilità ambientale per gli edifici residenziali”, costituito da 16 schede.
- Protocollo Itaca sintetico (2009): “Valutazione energetico ambientale – Edifici residenziali: nuova costruzione e recupero”, costituito da 14 schede di valutazione.

I documenti riportati costituiscono tutti delle versioni elaborate e adottate da ITACA, aventi valore di documenti nazionali. Tuttavia, scopo di tale protocollo è quello di rendersi “adattabile” qualora lo richieda un contesto territoriale specifico proprio di un ente che adotta tale protocollo. Alcune regioni italiane, infatti, hanno promosso l’edilizia sostenibile con l’approvazione di specifiche leggi regolamentando modalità e procedimenti per incentivare un tipo di edificazione caratterizzata da qualità aggiuntive rispetto alle pratiche correnti tradizionali.

Le aree di valutazione ed i requisiti

Con il metodo di analisi predisposto dal Gruppo di lavoro si è soprattutto tentato di individuare un processo, suddiviso in grandi temi, attraverso il quale prendere in esame la sostenibilità attuabile nelle strategie di progetto, nella costruzione e nell’esercizio temporale degli edifici. Le macro esigenze sono state strutturate e codificate prioritariamente tramite le cosiddette “Aree di valutazione” le quali abbracciano gli obiettivi e le strategie in materia per mezzo di singoli temi con carattere di ampio respiro ma sufficientemente chiari per risultare efficaci. Le singole aree sono state suddivise così come segue:

- 1 - Qualità ambientale degli spazi esterni
- 2 - Consumo di risorse
- 3 - Carichi ambientali
- 4 - Qualità dell’ambiente interno
- 5 - Qualità del servizio
- 6 - Qualità della gestione
- 7 – Trasporti.

Ogni singola area di valutazione contiene di seguito una serie di categorie di requisiti: all'interno delle stesse categorie vengono individuati a loro volta dei singoli requisiti caratterizzati dalla presenza di indicatori di controllo o parametri necessari per la verifica del soddisfacimento del requisito qualitativo o quantitativo.

Sono di seguito riportati i criteri relativi alla qualità dell'ambiente interno.

Tabella 11. Protocollo ITACA: Capitolo 4. Qualità degli ambienti interni

4.1 Comfort visivo (20%)	
4.1.1 Illuminazione naturale	25 %
4.1.2 Penetrazione diretta della radiazione solare	25 %
4.1.3 Uniformità di illuminamento	25 %
4.1.4 Illuminazione artificiale parti comuni	25 %
4.2 Comfort acustico (30%)	
4.2.1 Isolamento acustico di facciata	30 %
4.2.2 Isolamento acustico delle partizioni interne	20 %
4.2.3 Isolamento acustico da calpestio	20 %
4.2.4 Isolamento acustico dei sistemi tecnici	30 %
4.3 Comfort termico (20%)	
4.3.1 Temperatura dell'aria nel periodo invernale	30 %
4.3.2 Temperatura delle superfici interne nel periodo invernale	30 %
4.3.3 Inerzia termica	40 %
4.4 Qualità dell'aria (30%)	
4.4.1 Controllo dell'umidità delle pareti	25 %
4.4.2 Controllo degli agenti inquinanti	25 %
4.4.3 Ventilazione	25 %
4.4.4 Inquinamento elettromagnetico	25 %

Nella Tabella 11 ogni tematica relativa alla qualità indoor presenta un punteggio percentuale. Le tematiche con punteggi maggiori sono il comfort acustico e la qualità dell'aria.

Il Protocollo ITACA presenta un aspetto innovativo: oltre a dare una valutazione energetica, riferita ad una scala di voti propria, si occupa anche di fornire un giudizio sulla qualità ambientale dell'edificio. Ciò premesso, si evidenzia che uno degli aspetti più critici del metodo proposto risulta proprio il punteggio e il relativo peso percentuale dato ad ogni tema. Fornire una votazione corretta può risultare difficile, perché molti temi presentano scale di punteggio senza indicatori precisi come limiti di soglia o valori da non superare. Inoltre sono molte le stime che bisogna fare sui consumi futuri degli utenti (come ad esempio sulla tematica dei rifiuti), senza però avere un futuro riscontro sulla realtà.

Capitolo 3. Modalità di analisi della qualità degli ambienti interni

Come anticipato in precedenza, per il contesto italiano non ci sono normative nazionali che definiscono i limiti sugli inquinanti indoor. Le norme emanate dai Comuni, nell'ambito del Regolamento di Igiene e Sanità, fissano i limiti di salubrità delle abitazioni e degli occupanti.

L'Accordo tra Ministero della Salute, Regioni e Province autonome del 27/09/2001 riporta le "Linee guida per la tutela e la promozione della salute negli ambienti confinati" nelle quali vengono fornite le indicazioni per la realizzazione di un Programma Nazionale di Prevenzione dell'inquinamento negli ambienti indoor.

Le "Linee guida su: microclima, aerazione e illuminazione nei posti di lavoro", realizzate dal Coordinamento tecnico per la sicurezza nei luoghi di lavoro sono state pubblicate nel 2006.

La norma UNI EN 15251:2008 "Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica" afferma che l'energia consumata in una costruzione dipende in larga misura dai criteri utilizzati per la definizione dell'ambiente indoor e che qualsiasi provvedimento finalizzato al risparmio energetico deve essere correlato alla qualità dell'ambiente interno. Vi sono definite quattro categorie di valutazione dell'ambiente indoor a seconda del numero di persone soddisfatte: le categorie variano in funzione del livello di aspettativa. L'ultima classe può essere raggiunta solo per periodi limitati di tempo.

I criteri di progettazione degli ambienti interni vengono suddivisi nelle seguenti tematiche, riportate nella tabella di seguito.

Tabella 12. Definizione parametri dell'ambiente indoor e relativi marker

Ambiente termico	Definizione delle temperature in fase invernale ed estiva; classificazione in funzione dei valori di PMV e PPD.
IAQ e tassi di ventilazione	Definizione dei tassi di ventilazione per le tipologie di edificio; classificazione in base ai valori di CO ₂ negli ambienti abitati.
Umidità	Definizione dei valori di progetto per i sistemi di deumidificazione e umidificazione.
Illuminamento	UGR (indice unificato di abbagliamento), R _a (resa del colore)
Rumore	Definizione dei range tipici di pressione sonora per le diverse tipologie di edificio.

La classificazione dell'aria indoor è fatta secondo le tipologie IDA 1, 2, 3, 4 (Indoor air) così come definita nella UNI EN 13779 (Ventilation for non-residential buildings – Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems). Le classi sono definite in funzione della differenza di concentrazione di CO₂ fra interno e esterno.

Metodologie di indagine della qualità degli ambienti interni

Nelle camere climatiche possono essere investigate, sotto condizioni controllate, le reazioni fisiologiche e psicologiche che si ottengono al variare dei parametri indoor. Esempi di parametri climatici che possono essere monitorati sono la temperatura dell'aria, la temperatura radiante, l'umidità e la velocità dell'aria. Aggiungendo ai parametri prima elencati il tasso metabolico e l'indice di vestiario, Fanger sviluppò un modello per prevedere la percentuale di persone insoddisfatte (PMV-PPD) (Fanger, 1970). Questo modello costituisce la base della norma ISO 7730. Il modello implica un bilancio di calore umano in stato stazionario, che è indipendente dai parametri climatici esterni. A causa dei crescenti dubbi circa la validità e la rilevanza dei risultati ottenuti in camera climatica, nel 1990 ASHRAE ha commissionato una serie di studi sul comfort termico. L'obiettivo era di convalidare i risultati degli esperimenti in camere climatizzate e le conseguenti norme per impianti HVAC in una varietà di contesti climatici in tutto il mondo (de Dear, 2004).

Nel 1988 Fanger ha introdotto le grandezze Olf e decipol, che consentono di quantificare e confrontare le diverse fonti di inquinamento. Si deve evidenziare che i bioeffluenti umani sono normalmente una fonte meno significativa di inquinamento rispetto agli arredi, ai materiali da costruzione e ai sistemi di ventilazione. Si ipotizza che queste fonti nascoste si possano essere la principale causa della sindrome dell'edificio malato.

La sindrome da edificio malato (SBS) è una combinazione di disturbi, associata luogo di lavoro (ufficio) o di residenza. La maggior parte dei sintomi è legata alla scarsa qualità dell'aria negli ambienti chiusi. Essi comprendono: astenia, incapacità di concentrazione, cefalea, bruciore agli occhi, lacrimazione, irritazione delle vie aeree, delle mucose e della superficie epidermica e lievi sintomi di tipo allergico (Johner et al., 2005).

Strumenti di misura per i parametri indoor

Sul mercato sono disponibili vari tipi di strumenti di misura, adatti per il monitoraggio a breve, medio e lungo termine. Sono caratterizzate da variabili livelli di prestazione, prezzi, dimensioni, tipo di trasmissione dati, ecc. Un esempio sono le centraline microclimatiche, i datalogger e le strumentazioni che misurano singoli parametri (termometri, anemometri, igrometri ecc.). Di seguito sono riportati i parametri indoor da misurare e la relativa strumentazione (Tabella 13).

La normativa di riferimento per la strumentazione dei parametri indoor è la UNI EN 7726, che riporta quali caratteristiche devono avere gli strumenti di misura.

Tabella 13. Parametri indoor e relative strumentazioni

	Parametri misurati	Strumentazione
Comfort termico	Temperatura dell'aria (°C), temperatura radiante (°C), umidità relativa (%)	Datalogger, termometri, centralina microclimatica
Qualità dell'aria	CO ₂ (ppm), TVOC (ppm)	Indoor Air Quality Monitor
Ventilazione	Tasso di ventilazione (vol/h)	Blower door, Decadimento della CO ₂ .
Velocità dell'aria	Velocità dell'aria	Anemometri (a filo caldo, a ventolina)
Qualità illuminotecnica	Illuminamento, Luminanza	Luxmetro, Luminanzometro
Qualità acustica	Pressione sonora	Fonometro, Macchina generatrice di rumore al calpestio

3.1 Strumenti per la misura dei parametri termoigrometrici

Le variabili da cui dipende la sensazione termica dell'uomo, e quindi il comfort termoigrometrico, sono sei; come si vedrà, mentre il metabolismo energetico e la resistenza termica dell'abbigliamento vengono generalmente stimati a partire da tabelle, le altre quattro devono essere misurate nell'ambiente in esame secondo quanto previsto dalla norma UNI EN ISO 7726:2002.

Temperatura dell'aria

Si riferisce alla temperatura dell'aria nell'ambiente che circonda il corpo umano, all'esterno dello strato limite d'aria riscaldata aderente alla persona stessa. Si definisce anche temperatura a bulbo secco e può essere determinata mediante termometri di diverso tipo: a dilatazione, a resistenza, a termocoppia. La temperatura dell'aria, è il fattore più importante nella determinazione del benessere termico, ma generalmente è percepita come “contributo” all'ambiente termico, assieme alla temperatura delle superfici che delimitano lo spazio occupato.

Diventa tuttavia estremamente importante in termini di discomfort locale, perché basse temperature dell'aria immessa nei locali dai sistemi di condizionamento e ventilazione possono contribuire ad aumentare i disagi dovuti alle correnti d'aria e determinare un ambiente termico non uniforme, che provoca disagio negli occupanti.

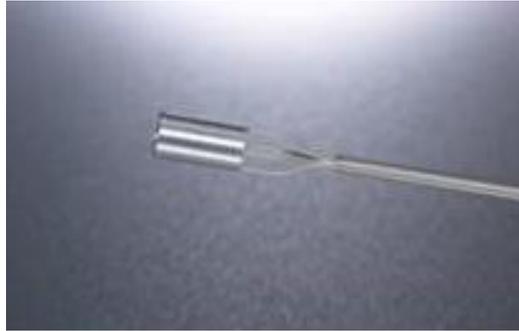


Figura 14. Trasduttore dotato di una resistenza al platino e di una schermatura contro la radiazione termica costituita da un cilindro lucido in alluminio, che lascia libero il flusso dell'aria attorno al sensore.



Figura 15. Termometro digitale.

Temperatura radiante piana

E' la temperatura uniforme di un involucro virtuale in cui lo scambio radiativo su un lato di un piccolo elemento di superficie, piano, è pari a quello che si verifica nell'ambiente reale non uniforme. Si definisce asimmetria della temperatura radiante piana, la differenza nei valori di temperatura radiante piana delle due facce opposte di un piccolo elemento di superficie nero e piano. Il concetto di asimmetria può essere utilizzato quando la temperatura media radiante non descrive esaurientemente lo scambio termico radiativo in ambiente, soprattutto in condizioni di accentuata eterogeneità.

Entrambe le grandezze, eminentemente direzionali, possono essere calcolate con procedimenti laboriosi, note le temperature superficiali e i fattori di forma tra le superfici e l'elemento piano, oppure determinate con diversi strumenti di misura: il radiometro "netto", il radiometro a due dischi e il radiometro a disco a temperatura dell'aria costante. L'asimmetria piana radiante può anche essere calcolata noti i valori di temperatura radiante piana misurati nelle due opposte direzioni.

Lo strumento utilizzato per la misura dell'asimmetria della temperatura radiante è il radiometro bidirezionale, dotato di due facce identiche e contrapposte, che misurano in modo indipendente la radiazione netta incidente su di esse.



Figura 16. Sensore per la misura dell'asimmetria della temperatura radiante

Umidità relativa

Indica il rapporto fra la quantità d'acqua contenuta in un Kg d'aria secca ad una certa temperatura e la quantità massima di vapore d'acqua che potrebbe essere contenuta alla stessa temperatura dalla stessa massa d'aria. In condizioni moderate, l'umidità atmosferica ha un effetto lieve sulla sensazione di benessere: tipicamente ad un aumento dell'umidità relativa del 10% corrisponde una sensazione termica pari ad una temperatura operativa superiore di soli 0.3°C. Tuttavia, può influenzare la sensazione termica dell'individuo: riduzioni della percentuale di umidità procurano un'istantanea

sensazione di raffrescamento (de Dear et al., 1989); alle basse temperature l'aria molto secca accresce la sensazione di freddo poiché l'umidità che raggiunge la superficie dell'epidermide evaporando provoca una spiacevole sensazione di freddo, mentre temperature dell'aria superiori ai 32°C e UR oltre il 70 %, accentuano la sensazione di caldo in quanto il sudore prodotto non può evaporare. E' inoltre dimostrato che l'umidità influenza la percezione della qualità dell'aria (Fang et al., 1998) e ha effetti sulla frequenza delle comuni malattie respiratorie: con $\Phi < 0.30$ le membrane mucose si seccano, aumentando le possibilità di infezione; mentre con $\Phi > 0.70$ aumenta il rischio di allergie e di formazione di condensa sulle superfici fredde del locale, con conseguente sviluppo di muffe (Fanger, 1983). Generalmente all'interno di un locale si verificano solo lievi disuniformità di umidità relativa ed è quindi sufficiente misurarne il valore in un solo punto.



Figura 17. Igrometro per la misura dell'umidità relativa espressa come rapporto tra quantità di vapore acqueo contenuto in una massa d'aria e quantità massima di vapore acqueo che la stessa massa d'aria riesce a contenere (uguali condizioni di temperatura e pressione).

Velocità dell'aria

E' una grandezza definita dalla EN ISO 7726 (2002) sia per intensità che per direzione: per l'analisi termica degli ambienti si considera infatti il vettore di velocità del flusso considerato nel punto di misura. La velocità dell'aria varia nel tempo e per questo la normativa raccomanda di registrarne le fluttuazioni; tuttavia ciascun flusso può essere descritto attraverso la velocità media in un determinato intervallo di tempo (periodo di misurazione) e la deviazione standard della velocità, SD (Standard Deviation): i due valori sono combinati in quella che è definita "intensità di turbolenza" (TU) del flusso d'aria, definita come la deviazione standard divisa per la velocità media, e generalmente espressa in percentuale.

La misura della velocità dell'aria è normalmente realizzata mediante sonde ad elemento caldo (filo o bulbo). Il movimento dell'aria favorisce lo scambio energetico del calore dalla superficie dell'epidermide, per effetto di meccanismi diversi: la trasmissione del calore per convezione, fino a quando la temperatura dell'aria rimane inferiore a quella dell'epidermide; e l'aumento dell'evaporazione, con conseguente raffrescamento della pelle. Con livelli di umidità bassi (< 30%) o alti (> 80%) il movimento dell'aria non ha grandi effetti rinfrescanti, mentre si produce una forte accelerazione dell'evaporazione alle medie umidità (40-50%): il movimento dell'aria infatti provvede a rimuovere lo strato più vicino all'epidermide che, in condizioni di saturazione, impedisce l'ulteriore evaporazione.

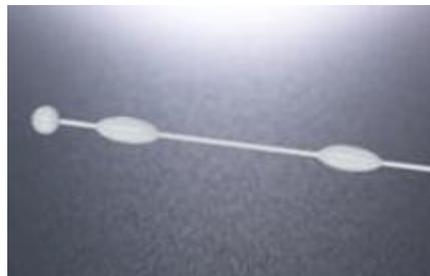


Figura 18. Anemometro omnidirezionale a sfera calda che, basandosi sul principio della differenza di temperatura, è sviluppato per rispondere rapidamente alle variazioni della velocità dell'aria (fluttuazioni) tipiche degli ambienti interni.

3.2 Tecniche di misura del tasso di ventilazione degli ambienti

Il Blower Door Test

Un'efficace tecnica per valutare le infiltrazioni negli edifici è il Blower Door Test. Le perdite per infiltrazione richiedono un'accurata diagnosi, al fine di individuare nella struttura le zone di maggiore permeabilità. Questo permette di mirare gli interventi sugli elementi maggiormente responsabili di tali problematiche.

Il Blower Door è costituito da un particolare ventilatore che mette in depressione o sovrappressione l'involucro edilizio rispetto all'esterno. Questo strumento di misura viene installato in

corrispondenza di una porta o di una finestra esterna che divide la zona climatizzata dall'ambiente circostante. Il ventilatore richiama aria dall'edificio fino a produrre e mantenere all'interno dell'edificio stesso una costante depressione o, secondo le esigenze, una sovrappressione.



Figura 19. Blower Door Test. Ventilatore.

La norma di riferimento per effettuare la prova con il sistema Blower Door è la UNI EN 13829:2002. Essa definisce un metodo di misurazione in opera della permeabilità all'aria di edifici o parti di essi, specificando l'uso della pressurizzazione o depressurizzazione meccanica dell'edificio. Tale norma si applica per la misurazione delle infiltrazioni d'aria dell'involucro edilizio di un edificio monozona, anche se molti edifici multizone possono essere trattati come monozona.

Secondo normativa, la metodologia descritta può essere utilizzata per diversi scopi. In primis per misurare la permeabilità all'aria di un intero edificio o di parte di esso per conformità ad una specifica di progetto di tenuta all'aria, ma anche per effettuare lo stesso controllo per numerosi edifici simili o per parti di essi, per identificare le cause di infiltrazione o, infine, per determinare la riduzione di infiltrazioni di aria che deriva da applicazioni successive di singole misure migliorative ad un edificio esistente o a parte di esso.

La prova procede pertanto con la misura della portata d'aria attraverso il ventilatore con diverse differenze di pressione tra l'interno e l'esterno, in modo da ricavare la curva caratteristica di permeabilità dell'edificio esaminato, la cosiddetta Building Leakage Curve (Figura 20): essa riporta sull'asse delle ascisse le differenze di pressione indotte (Pa) tra ambiente interno ed esterno, mentre sull'asse delle ordinate vi sono i rispettivi valori di portata (m^3/h), che fluisce attraverso gli ambienti in corrispondenza della differenza di pressione considerata.

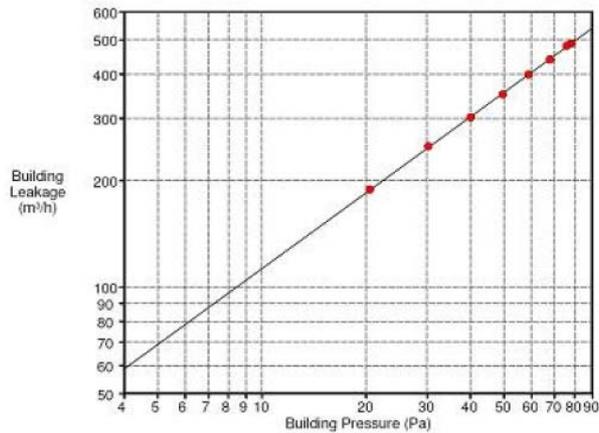


Figura 20. Esempio di Building Leakage Curve per prova in depressione.

L'indice $n_{\Delta p}$ è il parametro più rappresentativo per descrivere il tasso di ricambio del volume d'aria interno dell'edificio (Δp rappresenta la differenza di pressione tra interno ed esterno all'involucro, in Pascal). Esso è dato dal rapporto tra la portata media d'infiltrazione in corrispondenza di una determinata differenza di pressione ed il volume interno. La differenza di pressione di riferimento è spesso fissata e pari a 50 Pascal, dunque il risultato che in genere si ottiene mediante questa prova è il tasso di ricambio d'aria a 50 Pascal (n_{50})

In Tabella sono riportati i valori limite di n_{50} :

Tabella 14: valori limite in Germania (normativa DIN) e Repubblica Ceca (normativa CSN).

Descrizione della tipologia di edificio o impianto	$n_{50} [h^{-1}]$
Ventilazione naturale (DIN 4187:2001-08)	3
Con aspirazione meccanica dell'aria senza recupero di calore (DIN 4187:2001-08, CSN 73 0540)	1.5
Aspirazione e alimentazione guidata con recupero di calore (CSN 73 0540)	1
Case passive (CSN 73 0540)	0.6

Misure di ventilazione attraverso la CO_2 .

Le tecniche di misura per indagare la ventilazione negli edifici sono molteplici. La scelta dipende, in primo luogo dal tipo di sistema di ventilazione, dalla strumentazione e dal tempo che si ha a disposizione per compiere la prova. Il Blower Door Test permette di misurare l'ermeticità di un edificio dopo aver generato una determinata differenza di pressione tra interno ed esterno e misurando le conseguenti portate d'aria attraverso l'involucro nei riguardi delle infiltrazioni; si possono valutare anche in condizioni reali di esercizio. Un'alternativa a questa metodologia, che necessita di strumentazioni specifiche è l'utilizzo dei gas traccianti.

L'utilizzo dell'anidride carbonica come gas tracciante è uno degli esempi di metodo alternativo al Blower Door Test per la valutazione dei parametri di ventilazione (Baránková, 2004).

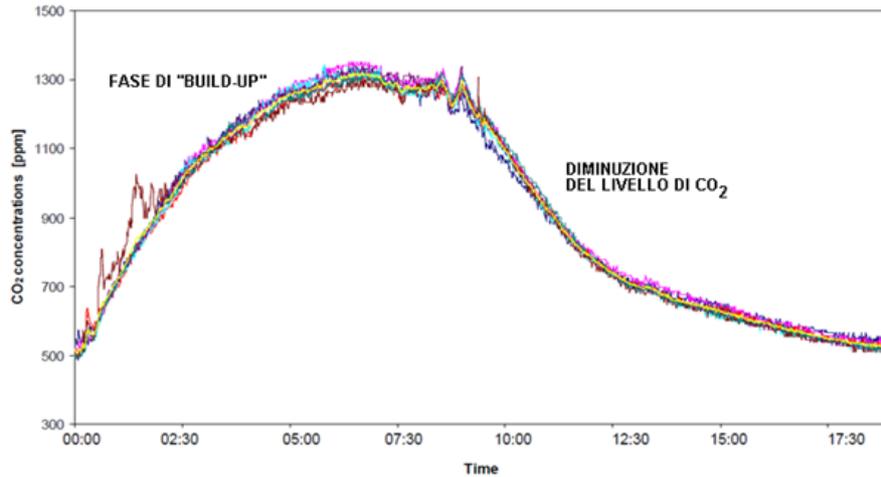


Figura 21. Concentrazione CO₂ - tempo

La metodologia è descritta nella normativa “ASTM Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation”. La guida propone le regole per le misure delle concentrazioni di CO₂ (il tempo e il luogo di campionamento), i requisiti di uniformità e i principi di calcolo. Due metodi sono proposti: il calcolo del decadimento (decay technique) dopo che gli occupanti hanno lasciato gli ambienti e l’analisi del periodo di “accumulo” (build-up) della CO₂ prodotta dalle persone mentre occupano l’ambiente.

Step-down change (decay) emission technique

La concentrazione al tempo τ è descritta dalla seguente equazione, che può essere utilizzata per calcolare la concentrazione approssimata e costruire una curva che approssima i valori misurati.

$$c(\tau) = c_e + [c(\tau_0) - c_e] \cdot e^{-N \cdot (\tau - \tau_0)}$$

dove

c_e è la concentrazione esterna (ppm)

$c(\tau_0)$ è la concentrazione iniziale

N è il tasso di ventilazione (h^{-1}).

Il tasso di ventilazione (N) di un ambiente viene espresso in vol/h o ach (air changes per hour, ovvero il numero di volte che il volume di aria in un ambiente viene sostituito con l'aria esterna in un'ora). Un tasso di ricambio di 0,5 vol/h significa che, in un'ora, va ricambiata la metà del volume del locale.

3.3 Strumenti per la misura per i parametri illuminotecnici

Misure di illuminamento

Il luxmetro permette di misurare il valore dell'illuminamento sia con luce naturale che con luce artificiale. La normativa di riferimento è la UNI 11142:2004.

Solitamente è composto da una parte fissa (corpo strumento) e una mobile che contiene il sensore vero e proprio costituito da un trasduttore (cella fotovoltaica o altre celle fotoelettriche) che sotto l'effetto dell'energia luminosa reagisce provocando una corrente elettrica (effetto fotoelettrico) che viene rilevata da un galvanometro la cui scala è tarata in lux. Tale strumento viene utilizzato per la verifica dei livelli di illuminamento degli ambienti e sui luoghi di lavoro.



Figura 22 Luxmetro.

Misure di luminanza

Attraverso il luminanzometro vengono eseguite le misure di luminanza (cd/m^2). Lo strumento focalizza la luce proveniente da un angolo solido a sezione circolare o rettangolare su di un elemento fotosensibile. Tale elemento fotosensibile è normalmente connesso ad un apparato elettronico in grado di restituire in forma numerica un valore di luminanza.



Figura 23 Luminanzometro.

3.4 Strumenti per la misura per i parametri acustici

Fonometro

Il fonometro è un misuratore del livello di pressione acustica. La pressione sonora viene tradotta in un corrispondente segnale elettrico, a sua volta pesato, quasi sempre, con un particolare filtro di ponderazione indicato con la lettera A ed ispirato alla curva isofonica di 40 phon dell'audiogramma normalizzato. Viene misurato il valore efficace della fluttuazione della pressione sonora, che viene visualizzato mediante una scala logaritmica (decibel), al fine di emulare la risposta logaritmica agli stimoli sonori tipica del sistema uditivo umano. Si ricava così un valore espresso in dB(A).

Macchina generatrice di rumore di calpestio

La prestazione di solai tra due ambienti sovrapposti viene valutata attraverso la misura del livello medio di pressione sonora nell'ambiente sottostante quando sul pavimento del solaio agisce una macchina normalizzata, generatrice di rumori impattivi. La macchina è dotata di martelli con impatti ad intervalli di frequenza di impatto controllata e definita da norma.

3.5 Valutazione della qualità globale degli ambienti interni

Le misure soggettive

Le risposte delle persone occupanti reali edifici possono essere influenzate da una serie complessa di fattori che non sono contabilizzati in modelli di bilancio termico. Studi sul campo hanno tenuto in considerazione l'intero ambiente delle persone intervistate, a seconda dei metodi di indagine. Di conseguenza è possibile analizzare come i diversi tipi di edifici e tecnologie reagiscono al clima esterno e come questo venga percepito dagli occupanti dell'edificio. Uno dei principali problemi degli studi sul campo è che le condizioni ambientali nella maggior parte degli edifici sono transitorie e difficili da misurare con precisione, e da relazionare con i voti degli occupanti.

Con il progredire della ricerca nel settore, è stato evidenziato che il comfort non è così chiaramente definibile sulla base di ricerche in laboratorio. Recenti studi hanno infatti ipotizzato che altri parametri di comfort, come la qualità dell'aria in ambienti chiusi, l'illuminotecnica e l'acustica, sono in correlazione con il comfort termico e il benessere globale. La capacità di controllo dei parametri ambientali interni influisce sulla soddisfazione della temperatura (Gossauer and Wagner, 2007). Le strumentazioni risultano essere non adatte per il rilievo dei molteplici fattori coinvolti nello studio del comfort indoor; un efficace metodo consiste nel coinvolgere gli occupanti indagando le loro insoddisfazioni e le problematiche relative al loro ambiente di lavoro.

Questionari per l'analisi della qualità degli ambienti indoor

La qualità dell'ambiente interno (IEQ, Indoor Environmental Quality) influenza significativamente la salute, il benessere e la produttività delle persone che occupano gli edifici. Le strategie principali per la valutazione della qualità dell'ambiente interno sono essenzialmente due: misurare i parametri fisici che caratterizzano l'ambiente e coinvolgere direttamente gli occupanti chiedendo loro di valutare la qualità dell'ambiente interno. Il secondo metodo è più economico, rapido ed efficace.

È stato svolto un approfondito studio con l'obiettivo di raccogliere e confrontare le informazioni relative agli strumenti per la valutazione soggettiva dell'IEQ presenti in letteratura, sia europei che extraeuropei. I parametri con cui i diversi questionari vengono confrontati riguardano: la modalità di compilazione, la lingua, gli obiettivi, la tipologia delle domande e delle risposte, i tassi di risposta e la destinazione d'uso degli edifici. Sono inoltre state esaminate la relazione con le misure strumentali e la correlazione con i sistemi impiantistici degli edifici. La ricerca si è basata sugli studi della Valutazione Post Abitativa (POE), nella quale vengono utilizzati i questionari come strumento di indagine. Nel giugno 2009 è stato sviluppato da ASHRAE, USGBC e CIBSE un documento intitolato 'Performance Measurement Protocols for Commercial Buildings', che ha lo scopo di fornire un protocollo di misura delle prestazioni degli edifici dal punto di vista dei consumi energetici e della qualità ambientale. In esso sono riportati i questionari più utilizzati per l'analisi degli ambienti indoor. Il confronto ha evidenziato gli aspetti positivi e innovativi di ogni questionario, nonché le problematiche e le cause dello scarso feedback ottenuto nelle indagini (Peretti e De Giuli, 2010). L'analisi è stata utilizzata come la base per la creazione di un questionario per la valutazione della qualità degli ambienti indoor all'interno degli alberghi, specifica per il contesto altoatesino.

La valutazione post-abitativa degli edifici (Post Occupancy Evaluation, POE)

La valutazione post abitativa è un processo sistematico di valutazione delle prestazioni degli edifici dopo che sono stati costruiti e occupati per un determinato periodo di tempo (Preiser e Vischer, 2005). In termini generali, la valutazione POE fornisce un metodo di raccolta e diffusione delle informazioni sulla struttura e sulla qualità dell'edificio che è di valore per tutti i soggetti coinvolti dalla progettazione alla fase di utilizzo. Una valutazione POE è solitamente effettuata dopo 6-12 mesi dalla realizzazione dell'edificio (Barlex, 2006). La POE può essere condotta non soltanto negli uffici e negli edifici commerciali, ma anche nelle abitazioni, nelle strutture per l'educazione, negli ospedali, nelle carceri, ecc. L'iter procedurale prevede l'identificazione degli obiettivi, della strategia e dell'approccio da utilizzare, la definizione dei metodi e delle modalità da seguire come interviste, questionari, sondaggi, indagini e test sulle performance (Meir et al., 2009). L'iter si conclude con l'interpretazione e i report dell'analisi. Uno degli strumenti fondamentali nel processo di valutazione post abitativa è il questionario, che consiste nel coinvolgimento degli utenti di un edificio per indagarne le caratteristiche, le performance e le problematiche.

Attraverso la compilazione del questionario gli utenti vengono direttamente coinvolti nella valutazione delle caratteristiche, della performance e delle problematiche dell'edificio stesso.

Protocollo di misura delle performance per edifici commerciali. Performance Measurement Protocols for Commercial Buildings (PMP)

Nel giugno 2010 è stata pubblicata da ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), USGBC (U.S. Green Building Council) e CIBSE (Chartered Institute of Building Services Engineers) la seconda edizione del documento intitolato ‘Performance Measurement Protocols for Commercial Buildings’, che ha lo scopo di fornire un protocollo di misura delle prestazioni degli edifici commerciali dal punto di vista dei consumi energetici e della qualità ambientale.

Il documento fornisce una visione d'insieme delle procedure per la misurazione delle prestazioni operative di edifici commerciali, tra cui: l'uso di energia, le risorse idriche e la qualità ambientale. Nel documento vengono affrontati i seguenti temi:

- Determinazione delle prestazioni di un singolo edificio o struttura.
- Applicazione dei protocolli energetici a tutte le forme di energia, tra cui: energia elettrica, gas, petrolio, teleriscaldamento / raffreddamento e le energie rinnovabili.
- Applicazione dei protocolli di IEQ al comfort termico, alla qualità dell'aria interna (IAQ), all'illuminazione, e all'acustica.
- I protocolli per l'utilizzo dell'acqua si applicano agli impianti singoli o multipli.
- I costi e le risorse vengono discussi in ogni sezione, dove richiesto.

La guida parte dal presupposto che ci sia poca chiarezza nella classificazione degli edifici e nella distinzione di essi in funzione dei consumi e dell'impatto ambientale. Ci sono molti edifici negli Stati Uniti, Regno Unito, e in altri paesi, che si classificano come “verdi”, oppure edifici a “basso consumo energetico”, o “ad alte prestazioni”. Non è mai del tutto chiaro su quali prove o dati tali affermazioni si basino. Esiste il bisogno di un protocollo di misura che consenta di determinare le prestazioni degli edifici. Una migliore gestione degli edifici, e di conseguenza una riduzione dei costi di gestione, richiede accurate misurazioni delle performance, infatti "non si può gestire ciò che non si può misurare". I protocolli presentati nella guida possono essere utilizzati da vari gruppi di persone. Il livello 1 è destinato ai proprietari degli edifici e agli operatori, facility manager, architetti e progettisti, e funzionari del governo per ottenere una prima indicazione delle prestazioni della loro costruzione.

Energy manager, tecnici, impiantisti, specialisti della messa in opera, ovvero figure professionali con un alto livello di conoscenze e competenze tecniche, possono utilizzare i livelli 2 e 3 per ottenere una più dettagliata, completa e precisa valutazione delle prestazioni. Ai differenti livelli corrispondono investimenti economici di diversa entità. Prima di compiere le misurazioni (livelli 2 e 3) si deve completare il livello 1 (livello base).

Il protocollo suggerisce le metodologie di analisi per ogni tematica affrontata; si fa riferimento a misurazioni con strumentazioni (anemometri, termometri, fonometri, igrometri etc.), checklist e questionari da somministrare alle persone che lavorano o occupano l'edificio in studio.

Ad ogni livello corrisponde un crescente dettaglio e approfondimento delle misurazioni. Nel documento sono tabulati, per ogni livello e ambito da indagare le misure soggettive e oggettive da compiere e i relativi costi. I questionari per le misure soggettive (Survey for Subjective Measures) variano di durata e di approfondimento dal livello 1 (Occupant survey), al livello 2 (Occupant 'right-now' survey) ed al livello 3 (Specialized survey).

Proposta di questionario per la Re-certificazione delle strutture alberghiere certificate ClimaHotel.

Il questionario è suddiviso in 7 sezioni. La prima è destinata ai proprietari dell'Hotel. Compilando la prima parte alcune domande vengono ridotte o tolte (ad esempio se nell'hotel non è presente la piscina non verranno fatte domande su di essa).

Il questionario è così strutturato:

Parte 0	Informazioni sulla struttura (compilazione da parte del gestore)
Parte 1	Informazioni generali (compilazione da parte dell'utente)
Parte 2	Natura - Gestione delle risorse idriche, dei rifiuti e mobilità
Parte 3	Vita - Benessere: COMFORT TERMICO
Parte 4	Vita - Benessere: COMFORT ACUSTICO e VISIVO, QUALITA' INDOOR
Parte 5	Vita - Benessere: ACCESSIBILITA'
Parte 6	Vita - Cultura: PRODOTTI E TRADIZIONI LOCALI.

Caratteristiche del questionario:

La scala delle risposte presenta 5 punti (da -2 a +2). Le tipologie di risposte sono le seguenti:

- Risposte multiple (elenco) – scegliere una delle opzioni oppure scegliere una o più opzioni
- Risposte aperte (L'opzione "Altro" è compilabile con una risposta libera).
- Risposte collegate alle sezioni precedenti: in alcune sezioni, se viene dato un punteggio negativo vengono indagate le cause dell'insoddisfazione.

La compilazione dura da 5 a 10 minuti, in funzione del numero di insoddisfazioni che si dichiarano e dal numero di servizi presenti nell'hotel. I dati vengono raccolti in un server e sono esportabili in formato Excel, in modo da poter operare analisi statistiche sui risultati. Deve essere garantito l'anonimato dei partecipanti all'indagine, ma è possibile assegnare un codice identificativo per evidenziare determinate risposte.

Il questionario è stato sviluppato attraverso il programma *Limesurvey*, un applicativo distribuito con licenza GNU, scritto in PHP. Esso permette la realizzazione di questionari e sondaggi online, che possono includere ramificazioni, personalizzazioni grafiche grazie ad un sistema di template e forniscono varie statistiche sui risultati raccolti. Possono essere sia pubblici sia con accesso riservato tramite l'utilizzo di password, diverse per ogni partecipante. I risultati raccolti, a prescindere alla tipologia pubblica/privata del sondaggio possono essere anonimi o nominali.

La versione prova del questionario è disponibile al seguente link:
<http://www.indequa.org/limesurvey/index.php?sid=34187&lang=it>

The screenshot shows a questionnaire interface with the following elements and annotations:

- Stato di avanzamento della compilazione:** A progress bar at the top right shows 0% completion.
- Campi di inserimento numeri:** A text input field for 'Quanti anni ha?' with the instruction 'Inserire solo numeri'.
- Selezione singola:** Radio buttons for 'Lei è:' with options 'Femmina', 'Maschio', and 'Non so' (selected).
- Scala punteggi:** A scale for 'Dia una valutazione alla temperatura della sua stanza:' with options -2, -1, 0, 1, 2, and 'Non so'.
- Selezione multipla:** Checkboxes for 'Durante la sua permanenza, avrebbe preferito...' with options: 'Sentire più caldo', 'Sentire più freddo', 'Sentire l'ambiente più/meno umido', 'Sono stato bene così', and 'Altro:'.
- Gestione pagine e compilazione:** Navigation buttons '<< Indietro' and 'Avanti >>' at the bottom.

Figura 24. Esempio di pagina on-line per la compilazione del questionario, con diverse tipologie di risposte.

Procedura per l'analisi della qualità globale degli ambienti interni

In Figura 25 è riportato uno schema riassuntivo sull'analisi della qualità degli ambienti interni. Gli obiettivi delle indagini sono riportati nella parte superiore dello schema; questi possono essere la determinazione delle performance di un sistema HVAC (come riportato nel caso studio della Scuola Stroppari), la determinazione dei consumi dell'edificio o di parti di esso e l'analisi di discomfort (come nel caso studio dell'edificio residenziale a Padova). La scelta dell'iter di analisi può essere orientata attraverso i risultati delle indagini soggettive, ottenuti mediante la somministrazione di questionari oppure intervistando gli occupanti. Gli occupanti sono infatti in grado di fornire un quadro complessivo dell'ambiente, riportando anche esperienze pregresse, difficilmente analizzabili tramite strumentazione. Nello schema l'analisi soggettiva accompagna tutto l'iter di indagine ed è rappresentata in grigio sullo sfondo.

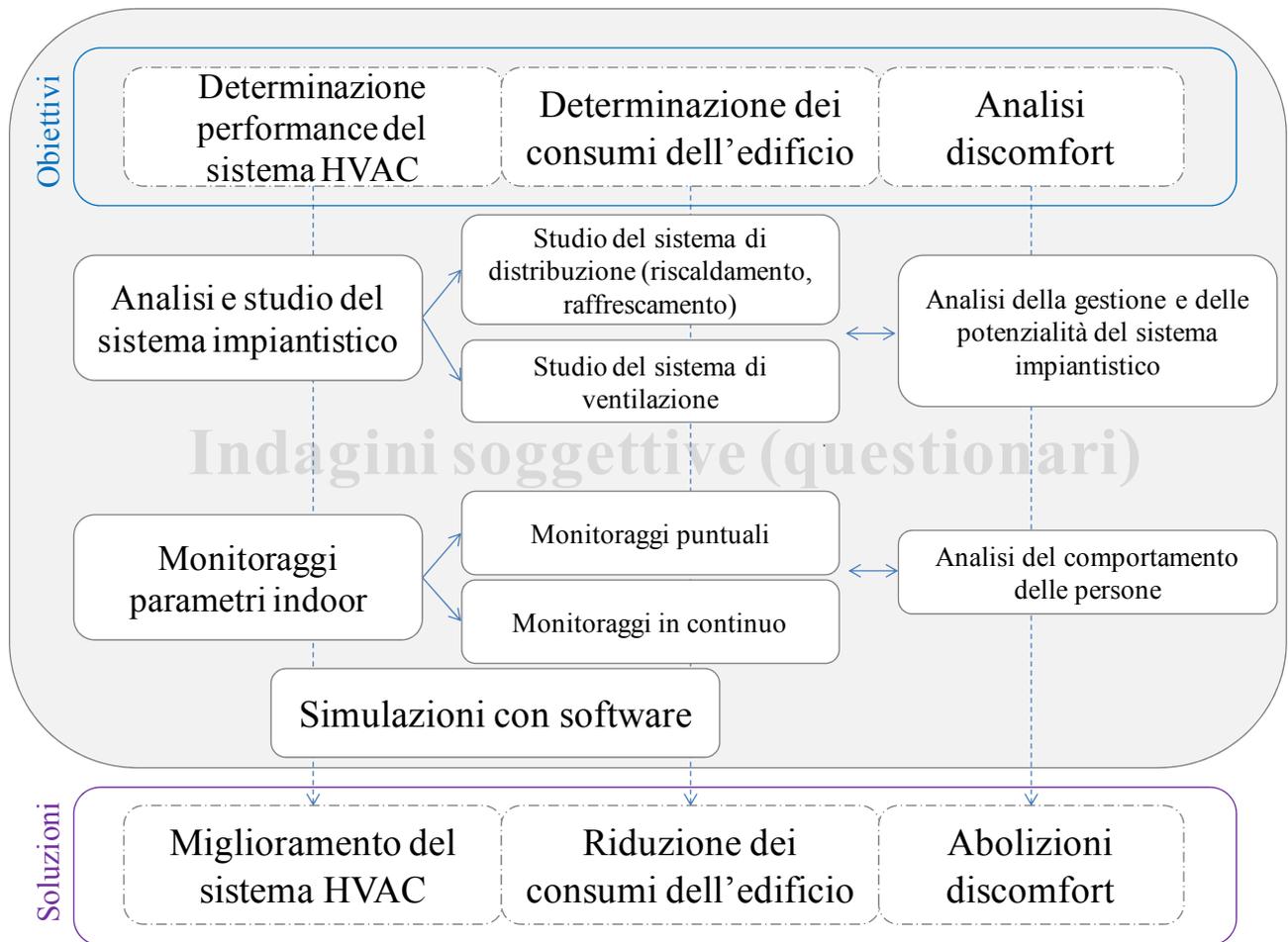


Figura 25. Iter per l'analisi degli ambienti indoor in funzione degli obiettivi.

A valle di questa acquisizione di informazioni sui diversi parametri che intervengono nella definizione del comfort indoor, si allocano le certificazioni energetiche e della qualità degli edifici. Le certificazioni sono, in primo luogo, uno strumento di ausilio alla progettazione, per orientare le scelte sia per quanto riguarda l'involucro sia per i sistemi impiantistici. Inoltre possono essere utilizzate anche per sensibilizzare gli utenti sui temi di efficienza energetica. Le analisi indoor possono essere utili per verificare e confermare le previsioni fatte in fase progettuale, nonché per proporre migliorie orientate al comfort oppure alla riduzione dei consumi.

4. Analisi di tre edifici

In questo paragrafo vengono presentati alcuni casi studio affrontati durante i tre anni di dottorato sulla base dei concetti e delle tecniche descritti nei precedenti capitoli.

Per analizzare le tematiche del comfort termico, acustico, illuminotecnico, della gestione e salubrità (salute e benessere degli occupanti) e le loro reciproche connessioni negli edifici residenziali è stato scelto un edificio situato a Padova. È stato selezionato un appartamento nel quale erano presenti evidenti problemi di qualità dell'aria e di ventilazione.

Successivamente è stata analizzata la qualità degli ambienti interni in edifici non residenziali. In particolare sono state approfondite i temi della qualità dell'aria, ventilazione, salubrità, efficienza energetica e impiantistica in un edificio scolastico e in un edificio per uffici. L'edificio scolastico analizzato, la Scuola Stropari situata a Tezze sul Brenta (VI), presenta un innovativo sistema di ventilazione con uno scambiatore aria-terreno. L'edificio per uffici è una struttura pubblica a Bologna composta da 11 piani nella quale è presente un sistema a tutt'aria per il riscaldamento, il raffrescamento e la ventilazione.

4.1. Analisi di un edificio residenziale

L'oggetto dello studio è un appartamento all'interno di un complesso residenziale costruito nel 2007 in Veneto. L'appartamento selezionato per l'analisi presentava problemi di muffe, infiltrazioni di acqua e un elevato grado di umidità; è inserito in un contesto verde con prati, campi e un fiume.

Gli edifici sono stati costruiti utilizzando i blocchi prefabbricati, costituiti da conglomerato di legno cemento con all'interno isolante in polistirolo. L'edificio è dotato di impianto di riscaldamento centralizzato, mentre per il raffrescamento ogni unità è dotata di split in numero variabile in funzione delle dimensioni dell'appartamento. Ogni locale è dotato di radiatori con termostato situato nel soggiorno. L'impianto di riscaldamento è centralizzato: ogni appartamento è dotato di collettore e contatore situato nell'atrio di ogni piano, vicino all'ingresso.

Il complesso residenziale nel quale l'appartamento in analisi è inserito è costituito da tre edifici di uguali dimensioni e caratteristiche: nell'interrato sono presenti garage e cantine, al piano terra non

vi sono appartamenti ma porticati e le zone di servizio. Gli appartamenti sono di diverse tipologie: duplex e su singolo piano, con dimensioni variabili da 50 a 100 m².

L'appartamento in analisi si trova al terzo piano del complesso residenziale. Il blocco residenziale fa parte di un complesso di sei edifici, e si colloca nella parte centrale. L'appartamento è in angolo. Gli edifici attorno hanno tutti la medesima altezza; differiscono per le dimensioni. Il blocco edilizio più vicino si trova ad una distanza di circa 12 metri. Gli altri edifici sono situati a circa 25 metri di distanza.

In Figura 26 è rappresentato un render 3d dell'appartamento e la pianta. L'area calpestabile è di 78 m², mentre l'area totale dell'involucro è di 144 m².

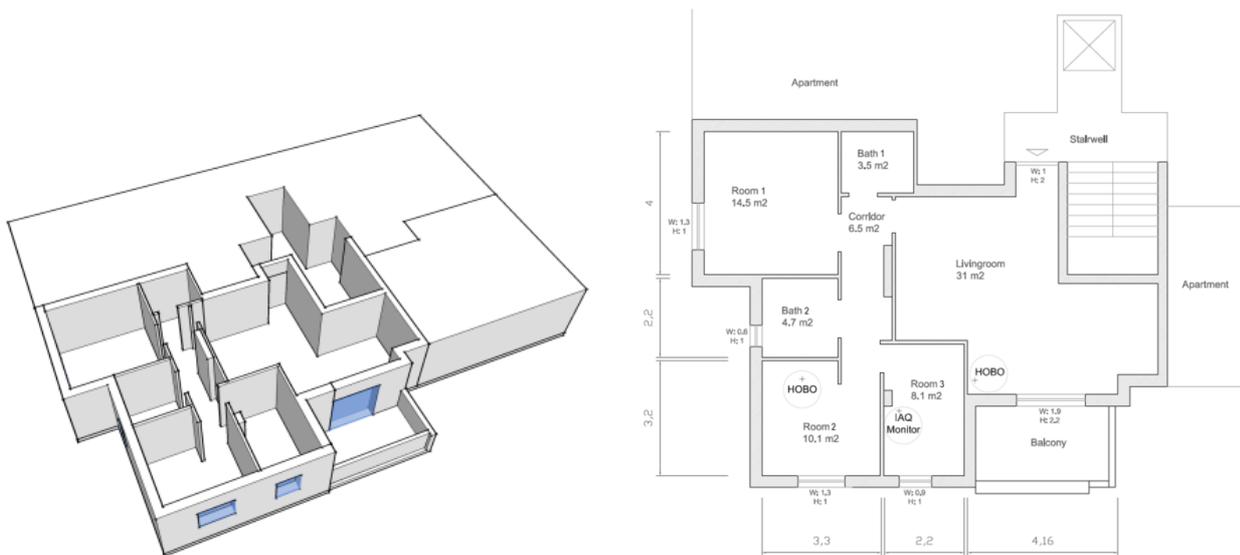


Figura 26. Rappresentazione 3D e pianta dell'appartamento.

Il monitoraggio

Il monitoraggio dei parametri indoor è stato eseguito durante il 2011 e il 2012. È stata utilizzata la seguente strumentazione: datalogger HOBO, con misuratore di CO₂ Vaisala.

I parametri monitorati e le relative caratteristiche sono riportati di seguito:

- Temperatura. 10K Thermistor. Accuratezza: ± 0.35 °C da 0 a 50 °C
- Umidità relativa. Accuratezza: $\pm 2.5\%$ da 10% a 90% RH (tipica), fino ad un massimo di $\pm 3.5\%$.
- CO₂. Accuratezza: $\pm 2\%$ del range di misura (0 – 5000 ppm) + 2% sulla lettura.

La scelta della misura di tali parametri indoor è stata fatta sulla base dei risultati dei questionari. Le lamentele riscontrate erano: alti costi di riscaldamento, presenza di muffe nei materassi, dietro agli armadi e negli spigoli delle pareti esterne. Per determinare le cause di tali discomfort sono state monitorate le temperature, l'umidità relativa e la qualità dell'aria. Vi erano inoltre molte lamentele legate alla scarsa qualità acustica della struttura. Dato che le lamentele erano legate ai rumori prodotti dai vicini e non erano invece causati dai sistemi impiantistici si è scelto di non analizzare

questo parametro. La qualità illuminotecnica ha ricevuto il voto più alto, evidenziando l'assenza di discomfort legato a tale parametro.

Per analizzare le temperature e l'umidità relativa i dati ottenuti dal monitoraggio sono stati suddivisi in tre periodi: inverno (dicembre - marzo), estate (giugno - settembre) e mezza stagione (settembre - novembre).

Di seguito sono rappresentati i grafici relativi alle temperature interne monitorate in soggiorno. Tale ambiente è stato scelto perché maggiormente utilizzato in termini di orario. Nel grafico sono riportate le percentuali di tempo nel quale la temperatura rientrava nel range riportato in ascissa. Nella Figura 27 (a), per circa il 58% del periodo invernale la temperatura variava tra 18 e 20°C.

Temperature interne

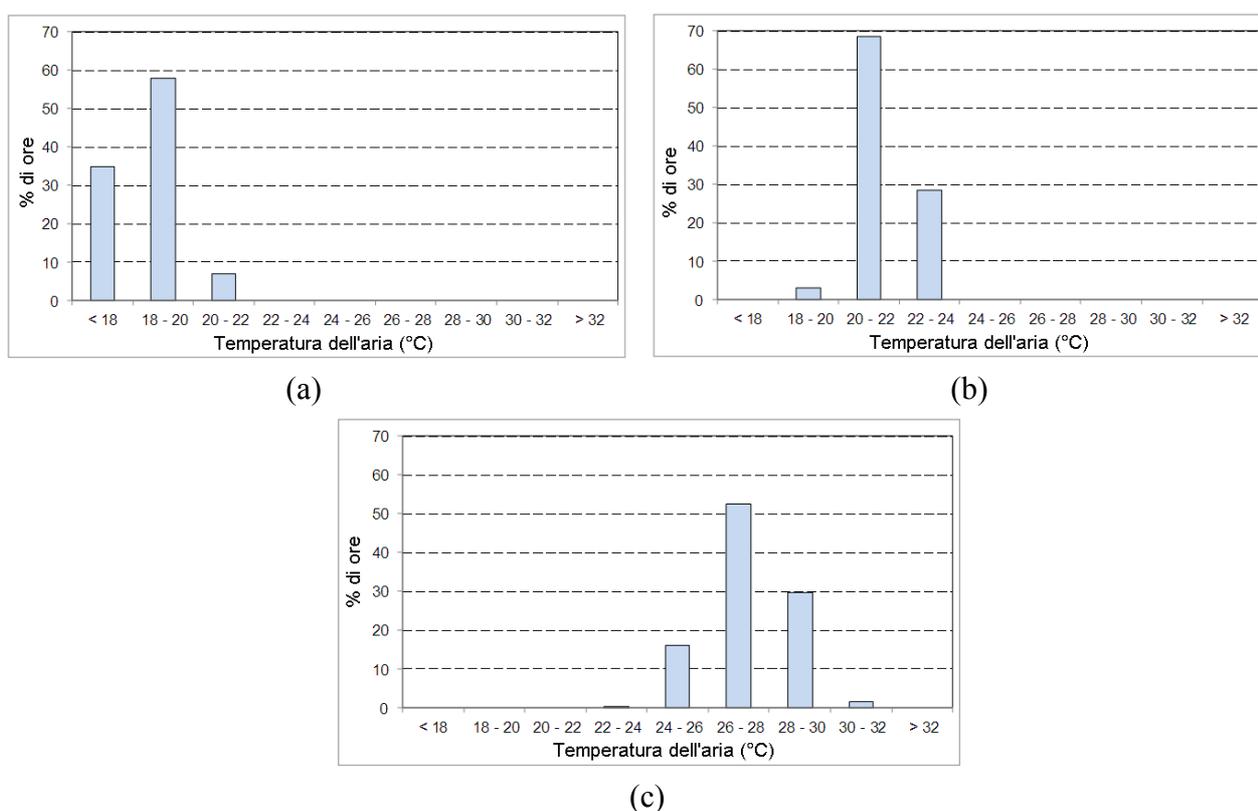


Figura 27. Temperature durante il periodo invernale (a), mezza stagione (b) e estate (c).

La norma UNI EN 15251 definisce i range di temperatura per rientrare nelle diverse classi di comfort. Nel periodo invernale l'ambiente in analisi rientra nella categoria I solo per l'8% del tempo. Per più del 30% del periodo risulta invece in categoria 3 (la temperatura è inferiore o uguale a 18°C).

Nel periodo estivo invece l'ambiente è in categoria I per il 10% del tempo (la temperatura non supera i 25.5 °C), mentre è in categoria III per più del 40% del tempo.

Attraverso i questionari sono state indagate le abitudini delle tre persone che abitavano nell'appartamento oggetto dell'analisi. Nel periodo invernale il termostato viene regolato

manualmente in funzione dell'utilizzo dell'appartamento: gli occupanti lasciano la casa al mattino per andare al lavoro e abbassano la temperatura (circa 16°C). Solitamente la casa rimane disabitata fino a sera, quando, al rientro il termostato viene alzato a 18 – 19°C. Questi comportamenti sono motivati da alte spese di riscaldamento.

Similmente, nel periodo estivo, nonostante le alte temperature gli split vengono accesi molto raramente. Questa è la causa del discomfort evidenziato dai grafici in Figura 27.

Umidità relativa interna.

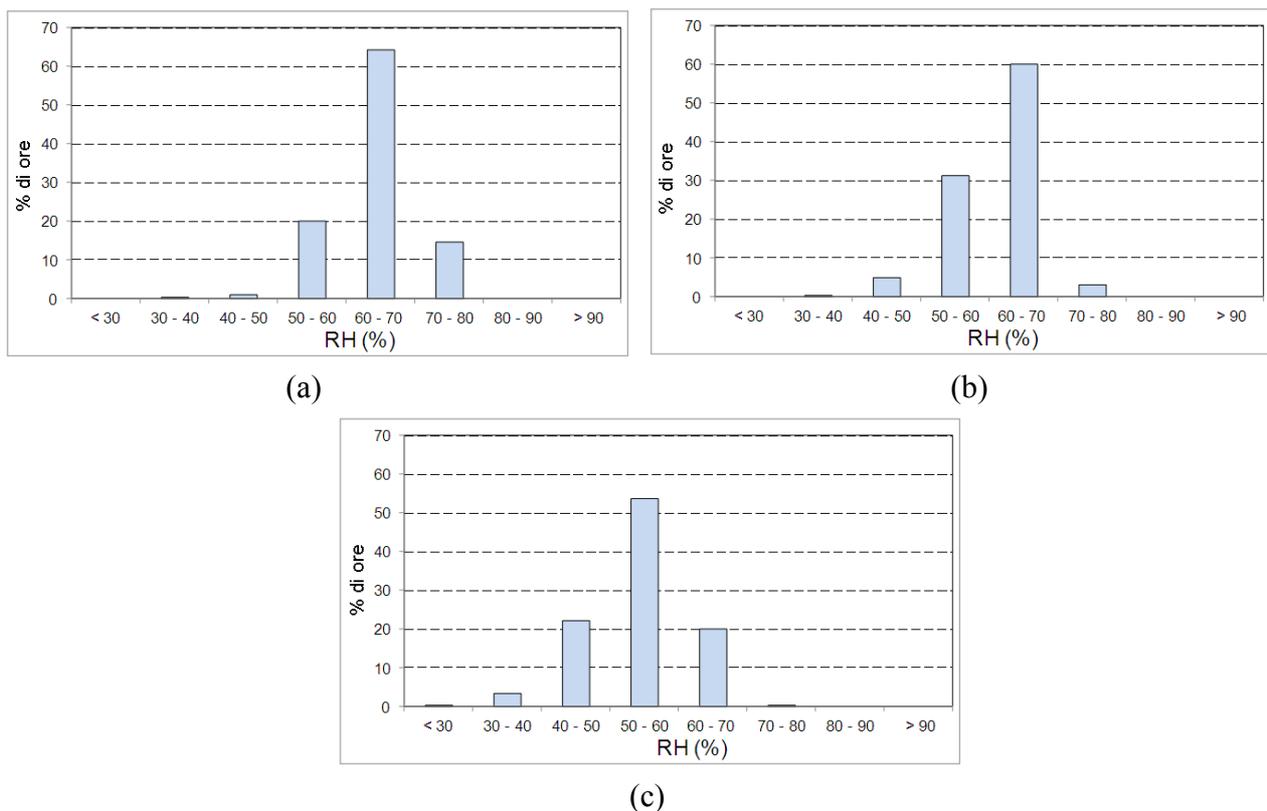


Figura 28. Umidità relativa durante il periodo invernale (a), mezza stagione (b) e estate (c).

La norma UNI EN 15251 non suggerisce range di umidità relativa per ambienti sprovvisti di sistemi di umidificazione/deumidificazione. Viene però indicato un limite sulla umidità specifica, che non deve superare i 12 g/kg. Tale condizione in inverno non viene rispettata in molteplici giornate.

Concentrazione di CO₂.

Di seguito sono rappresentate le classi di comfort relative al periodo estivo ed invernale per il soggiorno. In inverno il soggiorno rientra in classe III e IV (relative alla norma UNI EN 15251) per circa il 30% del periodo, mentre durante l'estate per circa il 35%.

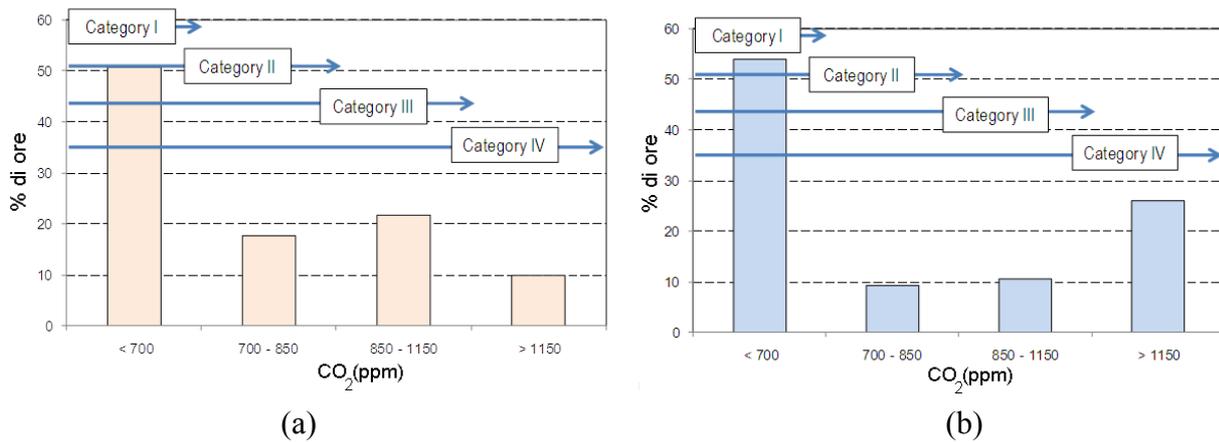


Figura 29. Concertazione di CO₂ durante il periodo invernale (a) e estivo (b).

La concentrazione di CO₂ registrata nelle camere dal letto raggiunge spesso picchi di 5000 ppm, che evidenziano che gli inquinanti indoor non vengono adeguatamente smaltiti. L'edificio è molto ermetico e in assenza di ventilazione (durante la notte le finestre rimangono chiuse) si raggiungono elevati livelli di CO₂.

L'appartamento in esame presentava ulteriori problematiche di diverso tipo e causa. Esse sono state indagate attraverso la somministrazione di questionari on-line per l'analisi soggettiva sulla qualità degli ambienti indoor. Il questionario è stato adattato al caso in esame: sono stati infatti approfonditi i temi che si sono dimostrati critici a seguito di colloqui con gli inquilini.

In particolare come si evidenzia dalla Figura 30 si tratta di infiltrazioni di acqua e muffe.



Figura 30. Infiltrazioni di acqua, muffa nel soffitto e nelle pareti, muffa nella parete e nell'armadio.

Dai dati ottenuti dal monitoraggio emerge che il comfort indoor rientra per periodi prolungati nelle classi peggiori definite dalla normativa UNI EN 15251.

Il riscaldamento e le aperture delle finestre sono gestite dagli occupanti, che modificano i set-point delle temperature anche in funzione delle spese di riscaldamento. Ciò emerge dai questionari somministrati contestualmente ai monitoraggi: al fine di contenere i costi di riscaldamento il termostato in inverno è settato a 18 – 19°C. Emerge inoltre una scarsa conoscenza delle problematiche correlate alla cattiva qualità dell'aria e alle soluzioni per migliorarla, nonostante gli occupanti lamentino problemi respiratori e anche asma.

Risulta quindi necessario apportare delle modifiche sia agli impianti che alla gestione dell'abitazione da parte degli utenti. Di seguito sono discusse tre proposte per migliorare la qualità degli ambienti interni nell'edificio in analisi, riducendo inoltre i consumi energetici attuali. Gli interventi sono stati valutati singolarmente, anche in alternativa uno all'altro.

Primo intervento: ventilazione meccanica controllata

Per eliminare i problemi di elevata umidità relativa interna e la conseguente formazione di muffe è stato proposta l'integrazione della ventilazione meccanica controllata nell'appartamento in analisi.

La ventilazione meccanica controllata (VMC) ricorre a delle tecnologie impiantistiche che permettono di controllare le portate di rinnovo secondo le esigenze determinate in fase di progetto.

La filosofia di funzionamento degli impianti di ventilazione meccanica consiste nell'immissione di aria di rinnovo in ambienti in cui l'uomo svolge prevalentemente attività come soggiornare o dormire e gli inquinanti prodotti sono sostanzialmente anidride carbonica e vapore acqueo in quantità standard così come esposte nel CR14788, al contempo l'estrazione si realizza nei locali dove le attività svolte comportano una più abbondante produzione di vapore acqueo, anidride carbonica e odori, si tratta di cucine e bagni.

Gli impianti di ventilazione meccanica controllata si distinguono essenzialmente in due categorie che presentano un diverso sviluppo delle reti aerauliche: impianti a semplice flusso e a doppio flusso. Nel primo caso l'immissione dell'aria negli ambienti avviene attraverso delle bocchette poste a livello degli infissi o sui muri, l'aria è richiamata in ambiente a causa della depressione verso l'esterno creata dal ventilatore, in questa situazione è richiesta la sola rete aeraulica di estrazione. Il secondo caso richiede invece due reti aerauliche, una di mandata e una di ripresa.

Il pregio degli impianti di ventilazione meccanica è quello di garantire, mediante tecnologie semplici ed economiche, il controllo delle portate di rinnovo dell'aria, che possono essere costanti (sistemi a portata fissa) o regolate durante il funzionamento (sistemi a portata variabile) mediante differenti tipi di sensori (umidità relativa, CO₂, ecc.). Essi sono efficaci per il controllo dell'inquinamento all'interno degli ambienti perché, se opportunamente progettati e mantenuti, possono fornire una portata di ventilazione controllata, filtrata e pulita.

Sistema a semplice flusso

Il sistema è costituito da un ventilatore di estrazione dell'aria collegato mediante condotti rigidi e/o flessibili a griglie di estrazione poste nei locali di servizio (bagni e cucine). L'immissione di aria esterna avviene attraverso le bocchette poste sulle pareti esterne o sui serramenti delle altre stanze, cioè soggiorno e camere.

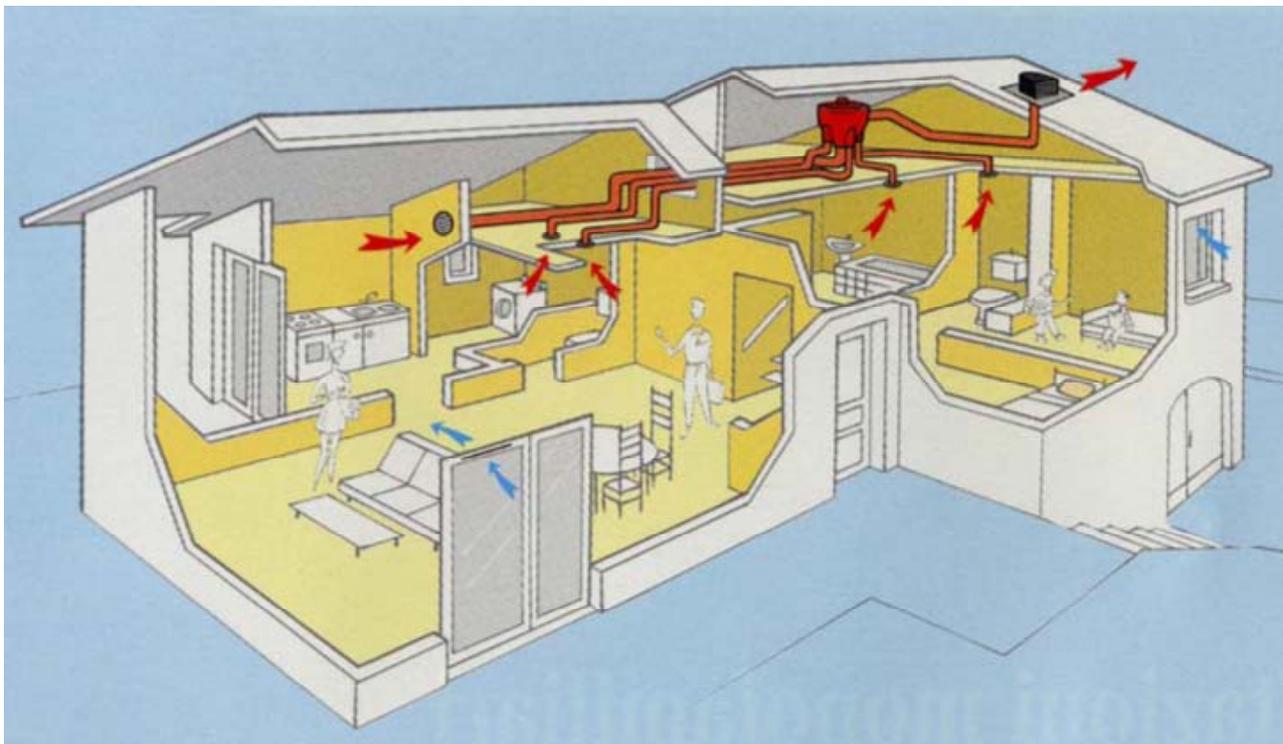


Figura 31. Sistema di ventilazione meccanica a semplice flusso. Fonte: Aldes.

In questo caso la presenza di semplici aperture incontrollate espone il sistema a variazioni di portata d'aria in relazione al vento, al differenziale di temperatura tra esterno ed interno e ad altri fenomeni (ad esempio il tiraggio attraverso il vano scale). Lo studio di questi fenomeni ha dato luogo a diverse tecniche di controllo delle portate d'aria e quindi allo sviluppo dei sistemi di ventilazione meccanica a semplice flusso attualmente in commercio. Due sono le principali tipologie di sistema a semplice flusso: quelli a portata fissa e quelli a portata variabile.

Nei primi vi è un regolatore meccanico che mantiene la portata costante e sono anche detti sistemi "autoregolabili". Nei sistemi a portata variabile, questa può essere regolata controllando la velocità del ventilatore. Ciò può essere fatto manualmente o automaticamente utilizzando dei sensori che possono essere di umidità, di presenza, di CO₂ o ancora possono essere utilizzati dei sistemi autoazionati. Questo è il caso dei cosiddetti sistemi igroregolabili, in cui la portata d'aria immessa è regolata in funzione del tasso di umidità relativa in ambiente.

Sistema a semplice flusso autoregolabile

I sistemi a portata costante sono anche detti “autoregolabili” poiché la costanza della portata è ottenuta mediante dispositivi di regolazione autoazionati nei quali la maggiore o minore sezione libera di passaggio dell’aria viene controllata dalla maggiore o minore differenza di pressione che si verifica istante per istante sui due lati del dispositivo.

In Figura 32 a sinistra è rappresentata a titolo di esempio una bocchetta di estrazione autoregolabile caratterizzata da un dispositivo di regolazione automatica della portata costituito da una membrana in gomma che modifica le dimensioni di passaggio dell’aria in funzione della pressione a cui è sottoposta.

In Figura 32 a destra sono riportate le curve caratteristiche della bocchetta (in funzione del valore di portata desiderato) da cui si osserva che tra 50 e 200 Pa il dispositivo è in grado di far passare una portata costante. La regolazione automatica, inoltre, agisce tarando con precisione la portata e determinando un livello di pressione sonora entro il limite di 30 dB[A].

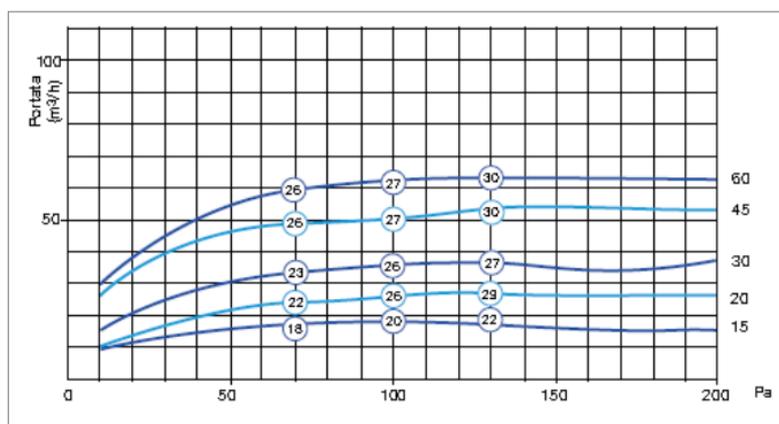


Figura 32. Bocchetta di estrazione autoregolabile (a sinistra) e curva caratteristica della bocchetta di estrazione autoregolabile (a destra). Fonte: Aldes.

Sistema a semplice flusso igroregolabile

Con questi sistemi le portate di rinnovo vengono modulate principalmente in funzione dell’umidità relativa interna. Ciò è possibile grazie ad una membrana (o ad un fascio di fili di polimero) installata all’interno del dispositivo, che modifica le sue dimensioni in funzione dell’umidità relativa alla quale è esposta e contraendosi o decontraendosi modifica l’apertura della bocchetta.

Il pregio principale di questo sistema basato sull’umidità relativa è che essa è legata alla presenza e all’attività delle persone (cottura dei cibi, lavaggio della persona e degli indumenti, asciugatura dei panni) che rappresenta un ottimo criterio per la ventilazione degli ambienti, anche se esiste un certo ritardo nell’azionamento della membrana igrosensibile, la quale si apre maggiormente solo dopo che l’umidità relativa interna si sia sufficientemente innalzata.

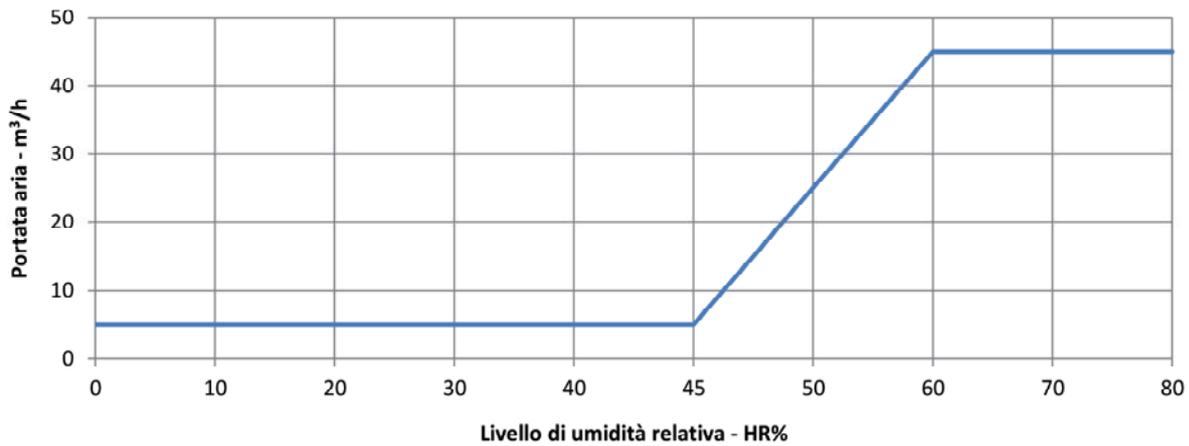


Figura 33. Curva caratteristica di una bocchetta igroregolabile. Fonte: Lindab.

Sistema a doppio flusso

I sistemi di ventilazione meccanica a doppio flusso si distinguono da quelli a semplice flusso per la presenza di una doppia rete aeraulica: una destinata alla mandata di aria di rinnovo nei soggiorni e nelle stanze da letto, mentre la seconda riprende l'aria dai bagni e cucine. In questo caso sono necessari due ventilatori, uno per la mandata e uno per la ripresa, e quando la portata elaborata da questi due ventilatori è la stessa si parla di ventilazione meccanica bilanciata, soluzione di gran lunga più frequente.

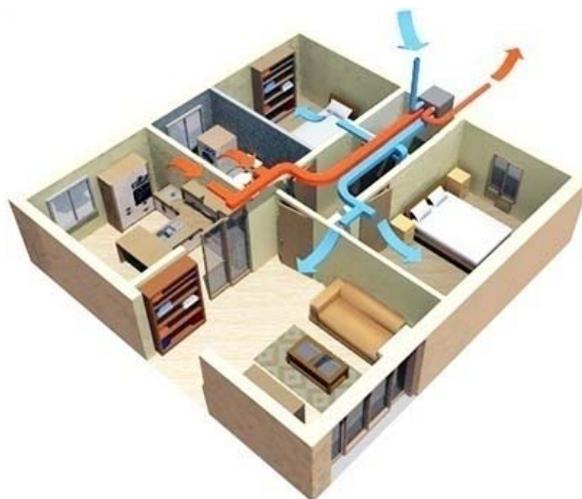


Figura 34. Sistema di ventilazione meccanica a doppio flusso. Fonte: Rossato Group.

Il sistema di ventilazione a doppio flusso presenta la possibilità di essere abbinato a dispositivi di recupero del calore dall'aria espulsa a favore di quella di rinnovo. Il recupero può essere fatto in

diversi modi e con diversi dispositivi che vengono nel seguito riportati. La descrizione dei sistemi affrontata nel seguito si limita a quelli destinati ad applicazioni nel residenziale.

Un impianto realizzato correttamente consente di mantenere condizioni di comfort indoor: un ambiente più umido ha bisogno di più energia per essere scaldato e le sue pareti umide disperdono di più. La condensazione superficiale, causa di patologie come le muffe, viene sanata attraverso la VMC.

In Figura 35 sono rappresentate le zone di estrazione (in blu) e di immissione dell'aria (in viola). Nelle zone ad alta produzione di inquinanti è prevista l'estrazione dell'aria, da rimettere nelle zone a bassa concentrazione di inquinanti (in blu).

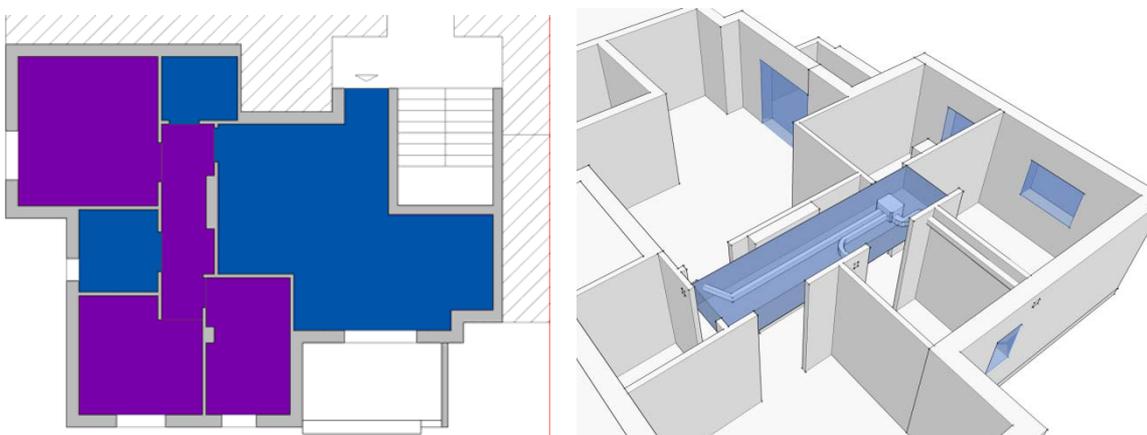


Figura 35. Suddivisione zone appartamento in esame e rappresentazione 3D impianto di ventilazione.

Il progetto dell'inserimento della ventilazione meccanica controllata in un edificio esistente risulta complesso perché la scelta deve tenere in conto della preesistenza e delle esigenze estetiche che il proprietario impone.

Nell'edificio in analisi si è scelto di controsoffittare il soffitto del corridoio, per inserirvi il ventilatore e parte delle canalizzazioni di ripresa dell'aria viziata.

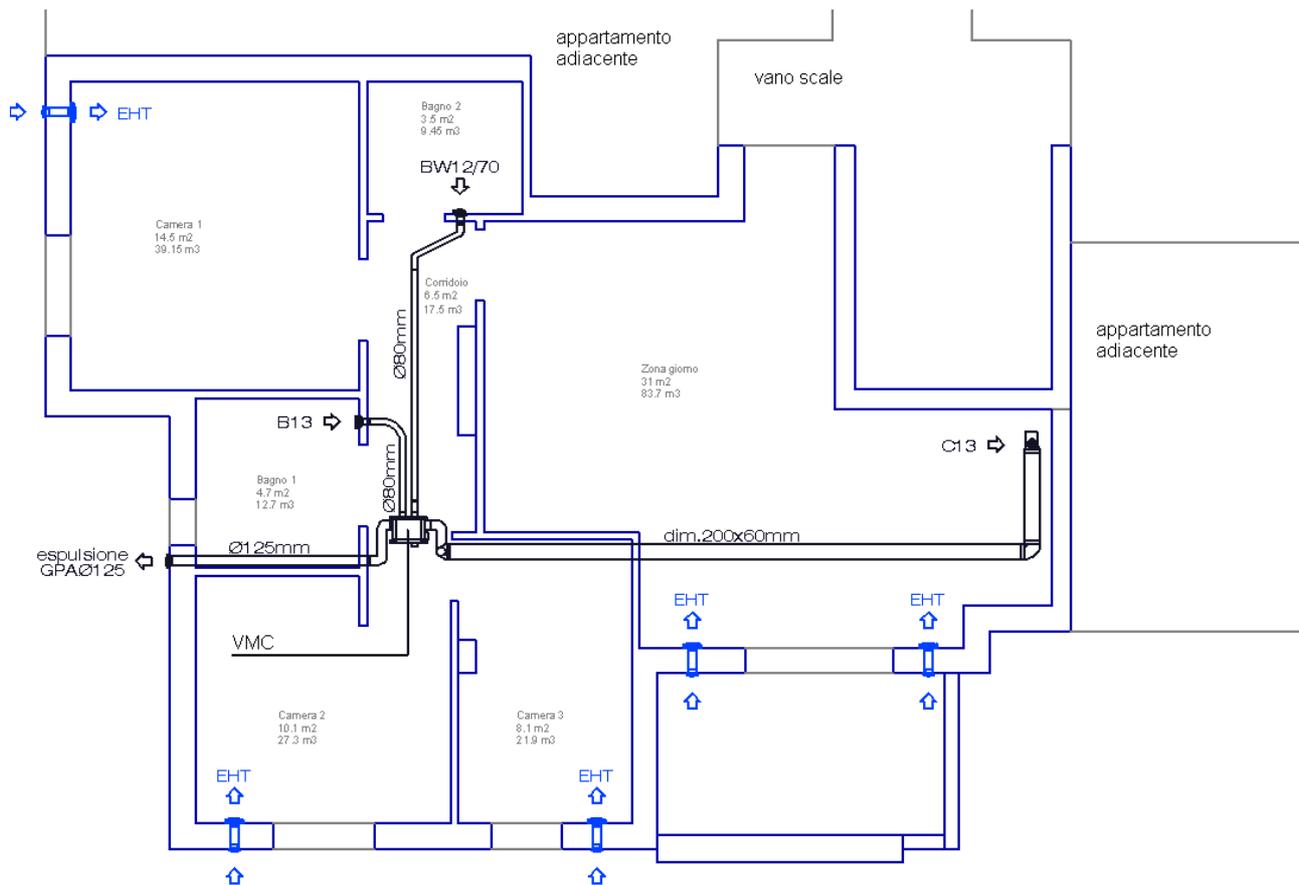


Figura 36. Progetto VMC a semplice flusso igroregolabile.

In Figura 36 è rappresentato il progetto della ventilazione meccanica a semplice flusso igroregolabile. Nelle pareti perimetrali (sigla EHT) sono collocate le bocchette di immissione, che si autoregolano in funzione dell'umidità relativa interna. Le canalizzazioni rappresentate in nero provvedono invece all'aspirazione dell'aria (in cucina e nei due bagni).

Secondo intervento: aumento della coibentazione della muratura perimetrale

Le parti vetrate quali finestre e porta verso il balcone non sono state oggetto del monitoraggio: dalle schede tecniche del costruttore la trasmittanza dichiarata era $1.7 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Durante l'inverno del 2011 è stata effettuata una misura in una parete orientata a nord dell'appartamento in analisi.

Il termoflussimetro è uno strumento che permette di misurare in maniera precisa e senza alcun intervento di demolizione il valore della conduttanza di una parete opaca. La strumentazione si compone di un data-logger, una piastra flussimetrica e di sonde a contatto per la misura delle temperature delle pareti interne ed esterne. Le misure vengono elaborate tramite software che effettua il calcolo della conduttanza, tramite il metodo delle medie mobili o tramite il metodo detto "black box". È stata svolta una misura di conduttanza nella parete nord dell'edificio in analisi. Per elaborare i risultati ottenuti con il termoflussimetro (Figura 34) è stato utilizzato il modello "black-box".

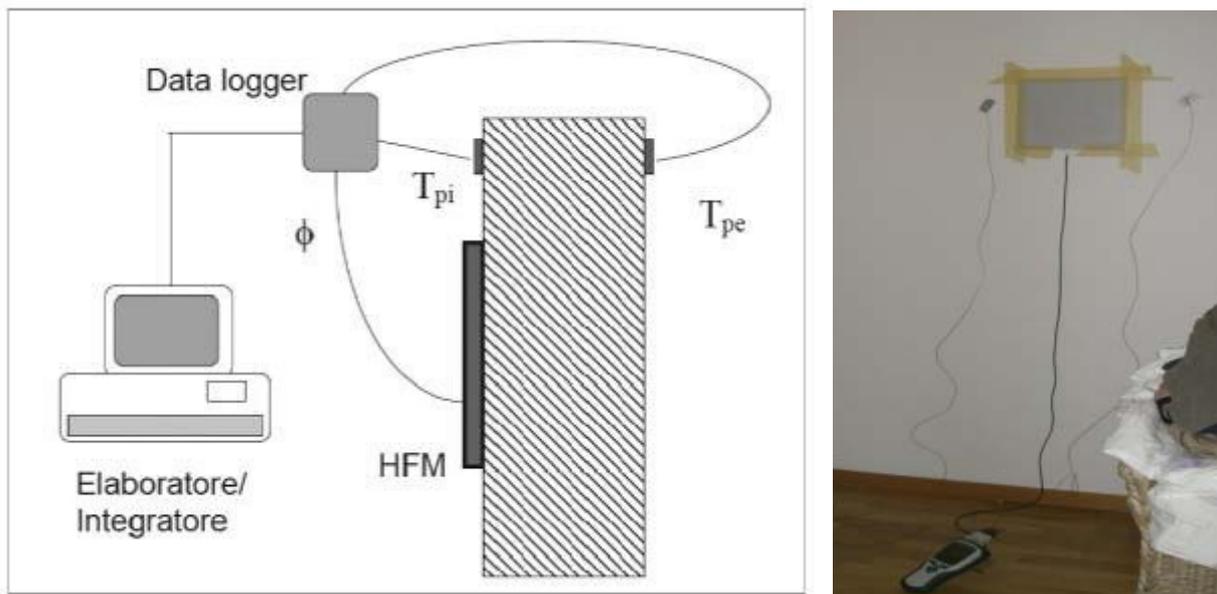


Figura 37. Schema di funzionamento della prova termoflussimetrica (a sinistra) e misura in opera (a destra).

Questa tecnica di modellazione matematica viene impiegata per caratterizzare il comportamento di sistemi dinamici complessi a partire dalla conoscenza di serie temporali di dati misurati. I modelli sono detti "black-box" poiché il loro utilizzo non richiede la conoscenza delle caratteristiche e della struttura del sistema fisico al quale il modello viene applicato. In Figura 38 è rappresentato uno schema di modello "black-box" di una parete edilizia.

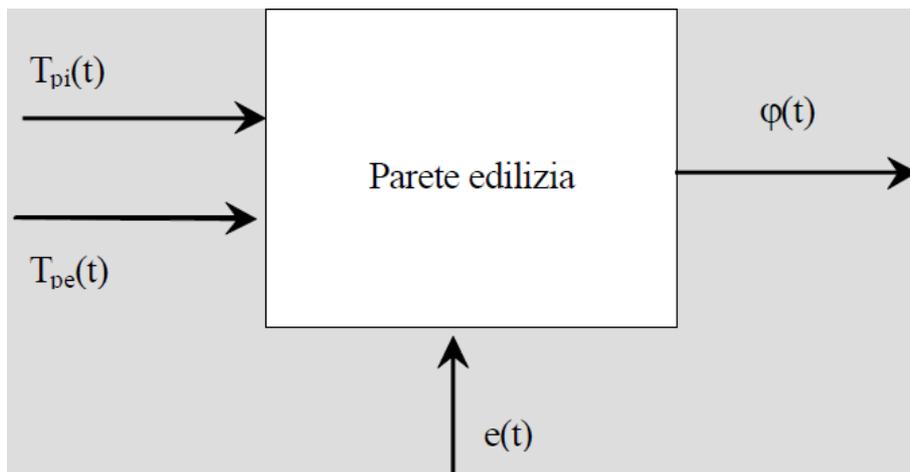
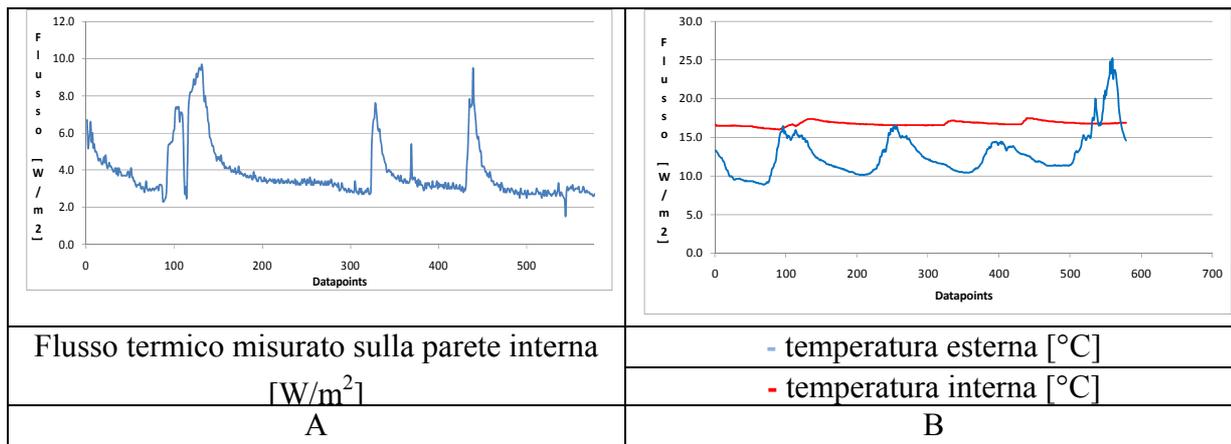


Figura 38. Schema di modello "black-box".

Di seguito sono riportati i risultati delle misure di conduttanza eseguite nell'appartamento in analisi.

Tabella 15. Flusso termico misurato (A), temperature misurate (B).



$$U_{\text{misurata}} = 0.72 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$$

La trasmittanza della parete perimetrale, misurata con il termoflussimetro è 0.72 W/(m² K), con una differenza del 60 % rispetto al valore dichiarato dal produttore (0.45 W/(m² K)) dei blocchi prefabbricati utilizzati nelle pareti perimetrali della struttura. Si ipotizza che il reale valore di trasmittanza sia sensibilmente influenzato dalla corretta posa in opera del materiale.

Per ovviare a questo inconveniente che rende la parete non conforme ai requisiti da legge si propone di seguito l'aggiunta di un sistema a cappotto con pannelli di isolante in polistirene (EPS).

L'isolamento termico a cappotto è realizzato con elevate prestazioni di isolamento termico (conduttività termica inferiore a 0.04 W/mK).

I pannelli isolanti vengono posati tramite un profilo di partenza staccato da terra che ha la funzione di allineare e contenere i pannelli al supporto. È buona norma per la zoccolatura utilizzare pannelli in estruso o in polistirene espanso stampato per circa un'altezza di 30 cm, con uno strato di impermeabilizzante esterno.

I pannelli vengono incollati al supporto sfalsati, perfettamente accostati e in bolla attraverso un collante. Gli spigoli devono essere protetti con parasigoli in PVC con rete premontata di diverse misure. Attraverso l'aggiunta di isolante termico la trasmittanza verrà diminuita per ottenere i seguenti valori:

- 5 cm isolante in EPS: $U_{\text{finale}} = 0.38 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$
- 10 cm isolante in EPS: $U_{\text{finale}} = 0.26 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$
- 15 cm isolante in EPS: $U_{\text{finale}} = 0.20 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$

La trasmittanza complessiva della parete opache riferita all'ipotesi con 10 cm di isolante è pari a 0.26 W/m²K. Il valore rispetta i requisiti imposti dalla normativa vigente (DPR 59/09 – Attuazione del DLgs 192/05. Sintesi del decreto che sostituisce le disposizioni transitorie dell'Allegato I del DLgs 192/05 per l'attuazione della dir. 2002/91/CE).

Riflessioni sui dati del monitoraggio e conclusioni

In Tabella 16 sono riportate le problematiche, gli effetti e le proposte di soluzione derivate dall'analisi dell'appartamento. Simili problematiche sono state riscontrate anche negli appartamenti adiacenti e in tutto il complesso residenziale. Un intervento sull'intero edificio potrebbe migliorare tutti gli appartamenti e risolvere varie problematiche, come ad esempio il posizionamento dei sistemi impiantistici per la ventilazione meccanica o l'esecuzione del cappotto (isolamento termico) nella muratura perimetrale. Quest'ultimo intervento inoltre, risulterebbe molto più efficace se esteso a tutta la muratura esterna.

Tabella 16. Problematiche, effetti e soluzioni nel caso studio in analisi.

Problematiche	Effetti	Soluzioni
Elevata trasmittanza involucro edilizio	Elevate dispersioni periodo invernale -> elevati costi del riscaldamento; Condensa	Aumentare isolamento e correggere i ponti termici
Sviluppo di muffe nelle pareti perimetrali	Ambiente malsano, cattiva qualità dell'aria	Abbassare il livello di UR interna, aumentare isolamento, aumentare ventilazione
Infiltrazioni di acqua	Macchie nelle pareti interne	Individuazione e rimozione sorgente
Elevato tasso di umidità interna	Effetti sulla salute, possibilità di sviluppo di muffe	Deumidificazione, aumento ventilazione
Elevata concentrazione CO ₂ interna	Cattiva qualità dell'aria	Aumento ventilazione

Dall'analisi è emerso che durante la fase di esecuzione molta attenzione deve essere posta per evitare problematiche di infiltrazioni e cattive prestazioni della muratura (alti valori di trasmittanza effettiva e diversità dai valori dichiarati dal produttore). Si può inoltre concludere che una buona qualità dell'aria interna, associata ad un controllo dei livelli di umidità relativa è requisito primario per assicurare comfort e salute per gli occupanti.

4.2 Analisi di un edificio scolastico

La qualità degli ambienti in cui si vive sta cambiando e stanno aumentando le conoscenze sui potenziali rischi che da questo cambiamento possono derivare per la salute dei bambini. In particolare la gestione della qualità dell'ambiente indoor scolastico merita attenzione, perché molti sono i settori responsabili (mobilità urbana, politiche energetiche, prodotti di costruzione e consumo, gestione e manutenzione, sistemi di prevenzione e monitoraggio ecc.) e perché gli impatti sulla salute respiratoria dei bambini hanno effetti socio-sanitari rilevanti.

L'ambiente scolastico può ospitare molte fonti di sostanze tossiche e allergeni, di cui i bambini non sono consapevoli. I bambini sono, inoltre, fisiologicamente molto più vulnerabili degli adulti: il loro sistema immunitario è immaturo e la loro respirazione è veloce. I problemi respiratori e allergici, ovvero le malattie più diffuse tra i bambini, sono tra gli effetti clinici più comuni associati all'esposizione ai fattori presenti in aria indoor. Le assenze scolastiche sono principalmente dovute a malattie delle prime vie respiratorie, asma e allergie.

I bambini spendono la maggior parte del loro tempo in un ambiente piuttosto particolare per quanto concerne la gestione della qualità dell'aria indoor: la scuola e la classe. I bambini sono esposti a multipli fattori di rischio ambientale di natura fisica, chimica e biologica in ambienti comuni e affollati.

Durante il giorno una popolazione eterogenea (insegnanti, personale scolastico, alunni) e gruppi vulnerabili (per esempio soggetti allergici e asmatici) trascorrono molto tempo insieme in spazi più piccoli rispetto a un normale ufficio in termini di densità abitativa per superficie.

Varie sono le sostanze potenzialmente tossiche e allergizzanti in ambiente scolastico, tra queste possiamo elencare alcune fonti indoor come materiali didattici, da costruzione e di arredo, detergenti chimici, nonché muffe e pollini presenti negli spazi esterni dove i bambini giocano e spendono il loro tempo libero. Un'inadeguata gestione degli ambienti interni ed esterni alla scuola è di per sé un ulteriore fattore di rischio: un esempio sono i tempi e modalità delle pulizie e dei ricambi d'aria di aule, palestre, servizi igienici, biblioteche, laboratori didattici. Un altro elemento da non sottovalutare è l'interazione indoor-outdoor, ovvero l'influenza dell'inquinamento esterno sull'ambiente confinato.

I fattori ambientali dipendono anche dalle caratteristiche strutturali della scuola e dai materiali usati nella progettazione e nelle ristrutturazioni. Il degrado della qualità dell'aria può essere altresì causato da una erronea gestione, mantenimento o pianificazione o installazione di sistemi di ventilazione e riscaldamento. Ma la presenza di un'aria "viziata" in un ambiente chiuso dipende anche da abitudini sbagliate. All'interno degli edifici la temperatura dovrebbe variare tra i 20 e i 22 °C con un tasso di umidità intorno al 40 - 60%. Non è consigliabile scendere sotto il 20% di umidità perché l'aria diventerebbe troppo secca causando un'elevata evaporazione delle mucose bronchiali e quindi secchezza nelle vie respiratorie.

Anche in assenza di fattori di inquinamento esterni, la qualità dell'aria indoor peggiora tanto più velocemente quanto maggiore è la presenza di persone in un ambiente chiuso per un tempo prolungato.

La frequenza con la quale l'aria viene ricambiata o con cui l'intero volume d'aria in una stanza viene sostituito è un fattore fondamentale che influenza la qualità dell'aria interna.

L'edificio oggetto dell'analisi è la scuola dell'infanzia 'Stroppari', costruita nel 2008 e situata a Tezze sul Brenta (Figura 39 e Figura 40).

Il presente lavoro è stato oggetto del Progetto di ricerca FSE (Fondo Sociale Europeo) sul tema "Determinazione dell'efficienza energetica di sistemi di raffrescamento passivo di edifici mediante scambiatori ad aria nel terreno".



Figura 39. Fotografie esterni Scuola Stroppari.



Figura 40. Fotografie esterni Scuola Stroppari.

L'obiettivo dello studio è il monitoraggio energetico-ambientale dello scambiatore di calore aria-terreno, al fine di valutare le sue prestazioni nel funzionamento invernale ed estivo.

L'edificio è composto da una scuola d'infanzia e da un asilo nido, con una superficie totale di 1570 m².

Nella centrale termica al piano interrato è collocata la caldaia a basamento con potenza termica nominale 175 kW. L'acqua calda sanitaria è prodotta da un bollitore a fuoco diretto da 215 litri con potenza termica utile pari a 25 kW. Il collettore serve cinque circuiti, rispettivamente per il sistema radiante a pavimento, le aule, la zona centrale e le aule speciali. La suddivisione delle zone è riportata in Figura 41.

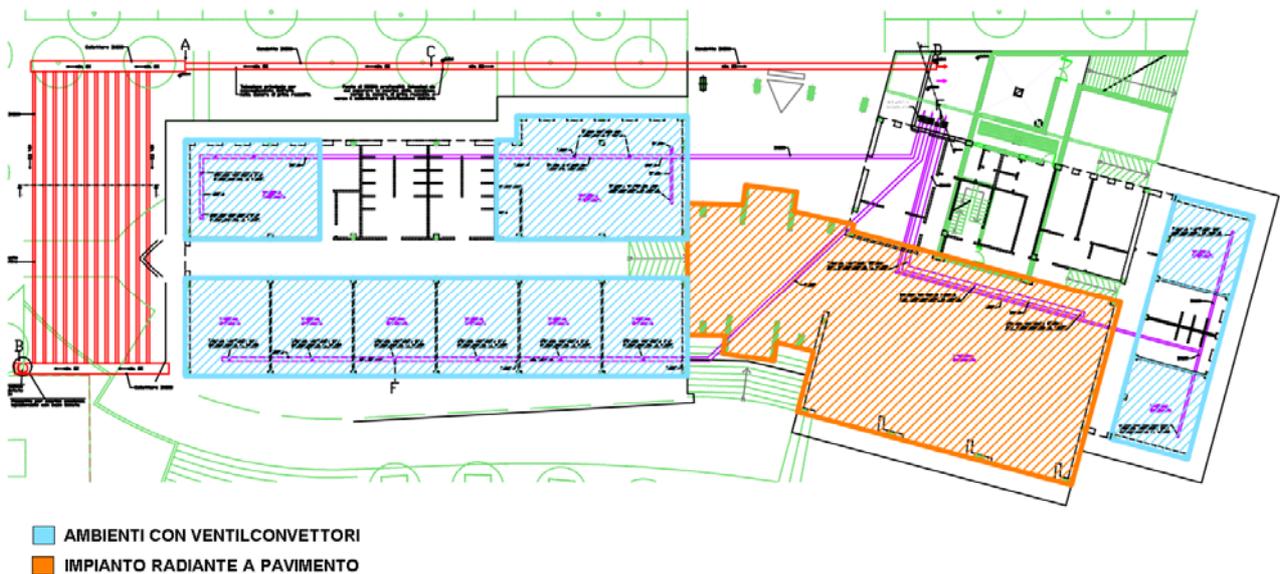


Figura 41. Suddivisione zone scuola Strozzari.

Il sistema di climatizzazione è costituito da un impianto radiante a pavimento per la palestra e l'ingresso, mentre per le aule sono stati installati ventilconvettori incassati nel pavimento (Figura 48). I bagni e le cucine sono serviti da un impianto a radiatori ad alta temperatura.

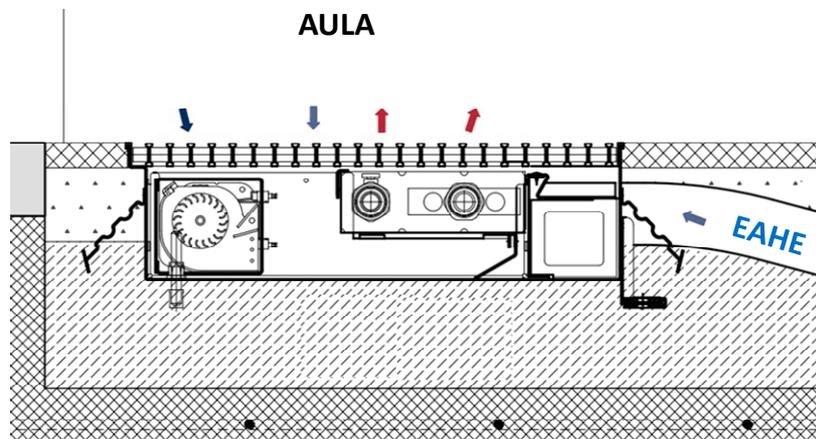


Figura 42. Sezione ventilconvettore ad incasso (aule).

Le caratteristiche dell'edificio in analisi sono riportate in

Tabella 17.

Tabella 17. Caratteristiche dell'edificio in analisi.

Superficie lorda	1545 m ²	
Superficie netta	1449 m ²	
Volume netto interno	4723 m ³	
Superficie verticale opaca U = 0.46 W/(m ² K)	Nord	101 m ²
	Sud	57 m ²
	Ovest	251 m ²
	Est	251 m ²
Superficie verticale vetrata U = 1.4 W/(m ² K)	Nord	50 m ²
	Sud	10 m ²
	Ovest	108 m ²
	Est	222 m ²
Copertura U = 0.7 W/(m ² K)	1545 m ²	
Fondazioni U = 0.32 W/(m ² K)	1545 m ²	
S/V	0.73	
Tasso di ventilazione	VMC (ventilazione meccanica) Aule, mensa, sala riposo, salone: 0.5 vol/h	
	Ventilazione naturale Bagni, locali di servizio: 0.3 vol/h	
Carichi interni (UNI TS 11300): E7	4 W/m ²	
Orari apertura scuola	Lun – ven: 7.30 – 16.00	

Il sistema impiantistico innovativo: lo scambiatore aria-terreno (EAHE)

Un esempio di sistemi HVAC integrati e innovativi è rappresentato dagli scambiatori aria-terra (Figura 43), che offrono un contributo sensibile nel ridurre i consumi energetici destinati alla ventilazione. Il sistema, costituito da uno o più tubi interrati a circa 2 - 4 metri di profondità, viene utilizzato per preraffrescare (in estate) o preriscaldare (in inverno) l'aria fornita all'edificio (Ascione et al., 2011, Fink et al., 2002).



Figura 43. Schema edificio con scambiatore di calore aria terreno (a destra), tubazioni, fotografia di cantiere (a sinistra). Legenda (Figura a sinistra): 1-Torre di aspirazione esterna; 2-Tubo Awadukt Thermo in PP; 3-Scarico Condensa; 4-Raccordi speciali di collegamento. Fonte: REHAU®

L'uso del terreno come sorgente di energia termica negli ultimi anni va sempre più progredendo; l'utilizzo di tale energia è possibile non solo ad elevate profondità, ma anche nei primi metri perché, anche a due metri di profondità, il terreno si comporta da accumulatore di energia. Sfruttando tale condizione si riesce a fornire all'edificio sia energia in fase invernale che in fase estiva, tutto ciò grazie ad una rete di tubi orizzontali posati ad una profondità di circa 1,5 ÷ 2 metri all'interno del terreno, che scambiano energia con quest'ultimo, più precisamente preriscaldano l'aria in fase invernale e raffreddandola in quella estiva, in abbinamento ad un impianto di ventilazione meccanica. Tale contributo energetico si ottiene perché il terreno, ad una profondità di due metri durante l'intero arco dell'anno, ha una variazione di temperatura inferiore rispetto a quella della temperatura esterna, con una tendenza al valore della temperatura media annuale del luogo (Figura 44).

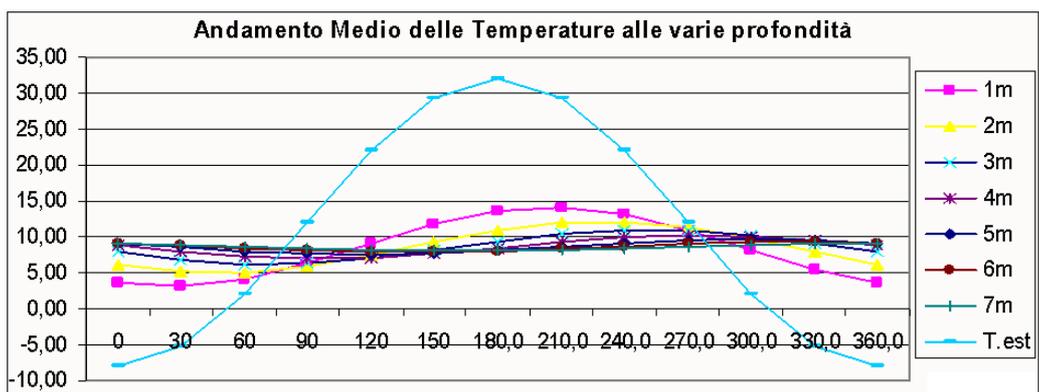


Figura 44. Esempio di andamento annuo della temperatura del terreno argillo-sabbioso ($\lambda=1,45\text{W/m}^{\circ}\text{K}$) in funzione della temperatura esterna alle varie profondità. Fonte: REHAU®

Il contributo energetico degli scambiatori aria-terra dipende da diversi fattori, quali la lunghezza totale, la profondità, le caratteristiche climatiche della zona di installazione e le caratteristiche del terreno. Tramite lo scambiatore aria-terreno si possono ottenere considerevoli risparmi di energia

sia in inverno che in estate. Attraverso l'integrazione di ventilazione meccanica controllata e scambiatori di calore aria-terreno si ottiene una riduzione dei tempi di ammortamento dell'impianto e si raggiungono più elevati livelli di efficienza energetica. In Figura 45 è rappresentato il funzionamento, durante le diverse stagioni, del sistema scambiatore aria-terreno accoppiato con la ventilazione meccanica.

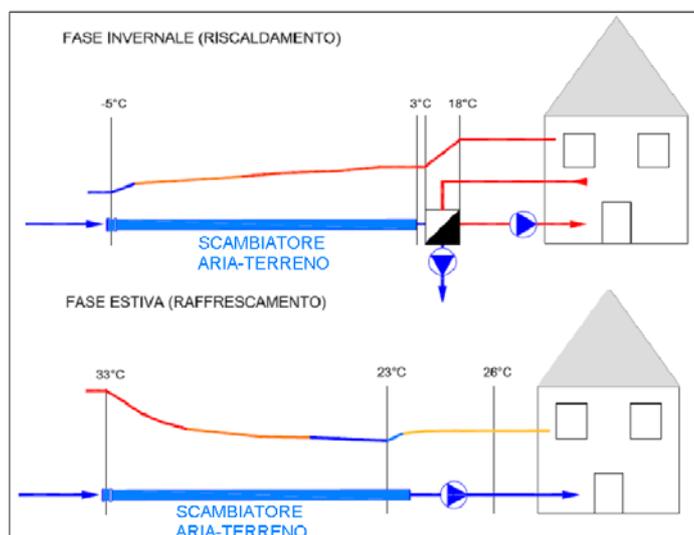


Figura 45 – Esempio di funzionamento invernale e estivo di un sistema integrato costituito da uno scambiatore aria-terreno e un impianto di ventilazione meccanica. Fonte:REHAU®

Il vantaggio economico ottenibile installando un impianto di ventilazione meccanica, con scambiatore di calore aria terreno, in una casa scarsamente isolata è meno prioritario rispetto a quello che riguarda la sostituzione degli infissi e l'isolamento delle superfici opache. Al contrario, per una casa passiva o a basso consumo energetico, con elevato isolamento termico implica poca dispersione per trasmissione e quindi le perdite per ventilazione diventano relativamente più importanti; la ventilazione meccanica, oltre a migliorare il comfort ambientale, consente di diminuire le perdite energetiche dovute al ricambio di aria, con accettabili tempi di ammortamento dell'impianto. Recenti studi hanno evidenziato che nel caso di edifici plurifamiliari i costi del sistema sono sensibilmente ridotti in confronto alla soluzione per edifici singoli. L'aumento dei costi del sistema, rispetto ad un edificio singolo, è pari al 40% per un complesso di 20 appartamenti (per un sistema costituito da uno scambiatore aria-terreno con efficienza pari a circa 25%). Questo sovraccosto viene suddiviso tra gli appartamenti del complesso con un conseguente tempo di ammortamento molto limitato.

Preliminarmente all'analisi è stata fatta una revisione della letteratura per studiare i parametri che influenzano le prestazioni degli scambiatori aria-terreno. Di seguito vengono riportati e descritti con i relativi riferimenti.

Clima e composizione del terreno: un alto contenuto di acqua per alcune tipologie di suolo migliora le prestazioni degli EAHE. Per quanto riguarda il materiale attorno al tubo, un buon contatto tra

suolo e tubi deve essere garantito attraverso l'aggiunta di argilla compattata o sabbia (Ascione et al., 2011). La temperatura del terreno è correlata alla temperatura ambientale e alla radiazione solare incidente. Per modificare la temperatura del terreno si può intervenire sulla superficie, modificando il colore (rendendola più scura per aumentarla, o più chiara per diminuirla).

Profondità dei tubi: un aumento della profondità del terreno sopra i tubi fornisce un notevole incremento della capacità potenziale di scambio termico del sistema. Due metri di profondità del tubo sono un buon compromesso tra una ridotta escursione annuale della temperatura (che diminuisce con la profondità) e il costo dello scavo (che aumenta con la profondità). Tre metri di profondità sono un compromesso ottimale per Ascione et al. (2011). Si può concludere che la profondità ottimale deve essere valutata per ogni intervento.

Lunghezza dei tubi: un aumento della lunghezza dei tubi implica un aumento della temperatura dell'aria di uscita, con un incremento di capacità di riscaldamento del sistema (Mihalakakou et al., 1996). Vantaggi significativi non si verificano per lunghezze superiori a 70 metri (Lee and Strand, 2008). La lunghezza ottimale è funzione delle condizioni climatiche (Ascione et al., 2011).

Copertura del terreno: Mihalakakou (1996) afferma che la superficie del suolo nudo può aumentare la capacità di riscaldamento del sistema. Viceversa Badescu (2007) attraverso simulazioni effettuate durante il periodo estivo conclude che il calore immagazzinato dal suolo è maggiore se c'è vegetazione ed è quindi più conveniente per il riscaldamento, mentre per il raffreddamento il contributo è minore.

Diametro del tubo: un aumento del diametro del tubo conduce ad una riduzione del coefficiente di scambio termico convettivo e fornisce una temperatura dell'aria in uscita inferiore, riducendo così la capacità di riscaldamento del sistema. Inoltre, la riduzione della temperatura dell'aria in uscita è associata all'aumento della superficie del tubo all'aumentare del suo diametro (Mihalakakou et al., 1996).

Materiale del tubo: l'influenza del materiale del tubo sulle prestazioni estive ed invernali è piccola (Badescu, 2007). I valori di conducibilità termica influenzano poco lo scambio termico quando la profondità e la lunghezza dei tubi sono correttamente progettate. Tubi in calcestruzzo richiedono un'ulteriore rivestimento interno per evitare infiltrazioni di radon, inoltre, le condizioni igieniche all'interno dei tubi devono essere garantite, ad esempio utilizzando rivestimenti antimicrobici (Ascione et al., 2011).

Disposizione dei tubi rispetto all'edificio: generalmente, per edifici di piccole dimensioni una buona soluzione è rappresentata dalla disposizione ad anello attorno al fabbricato, in modo da sfruttare gli scavi di fondazione.

Distanza tra i tubi: In caso di sistemi di tubazioni disposte in parallelo, la distanza tra i tubi deve essere di circa un metro, in modo da minimizzare l'interazione tra di essi. Un maggiore interasse non è utile per ottenere un beneficio aggiuntivo (Zimmenmann and Remund, 2001).

Velocità dell'aria: un aumento della velocità dell'aria nel tubo porta ad una leggera diminuzione della temperatura dell'aria in uscita. Ciò è principalmente dovuto all'aumento del flusso di massa. Elevate velocità dell'aria non sono energeticamente convenienti (Ascione et al., 2011). Una velocità

di circa 2 m/s è consigliata per edifici di piccole dimensioni; 5 m/s sono invece consigliati per edifici più grandi

Modalità di controllo: è strettamente correlata alla destinazione d'uso dell'edificio. Per gli edifici per uffici la soluzione più conveniente è l'uso dell'EAHE durante tutte le ore diurne (Ascione et al., 2011).

L'impianto di ventilazione meccanica controllata dell'edificio scolastico in analisi presenta un sistema con recupero geotermico mediante scambiatore interrato.

In Figura 42 è rappresentata la pianta dell'edificio con, in rosso sulla sinistra, il sistema di tubi interrato ad una profondità di 2 metri. Lo scambiatore aria-terreno è composto da 12 linee da 24 m passo 1 m interasse con diametro 20 cm.

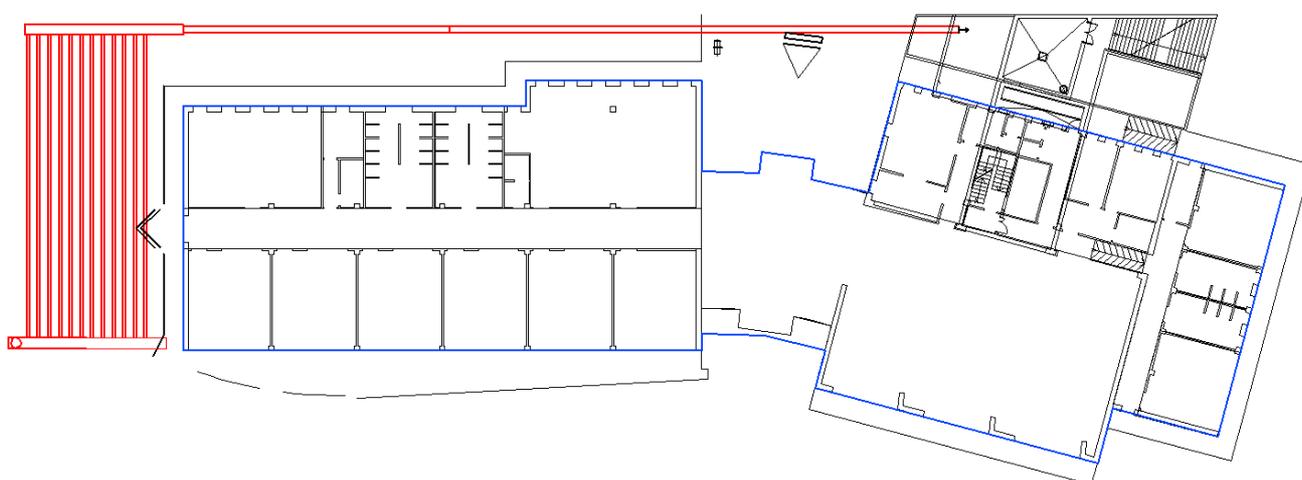


Figura 46. Scuola 'Stroppari' pianta e tubazioni EAHE.

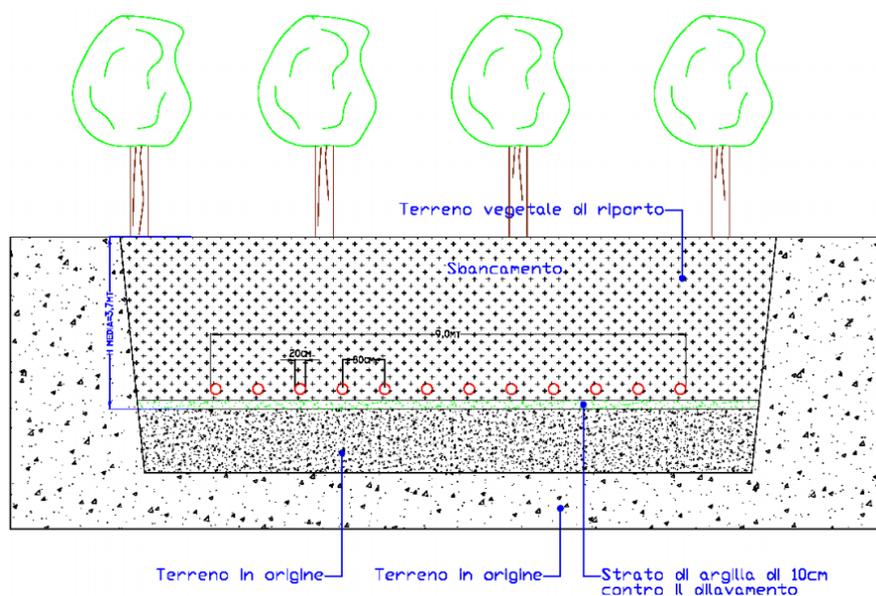


Figura 47. Sezione scambiatore aria-terreno.

L'aria di rinnovo prima di essere immessa nei locali attraverso le tubazioni a terreno viene preriscaldata durante il periodo invernale e preraffrescata durante l'estate. Il terreno, infatti, grazie all'elevata capacità termica, rispetto all'aria esterna, presenta una temperatura più alta durante i mesi invernali e più bassa in quelli estivi.

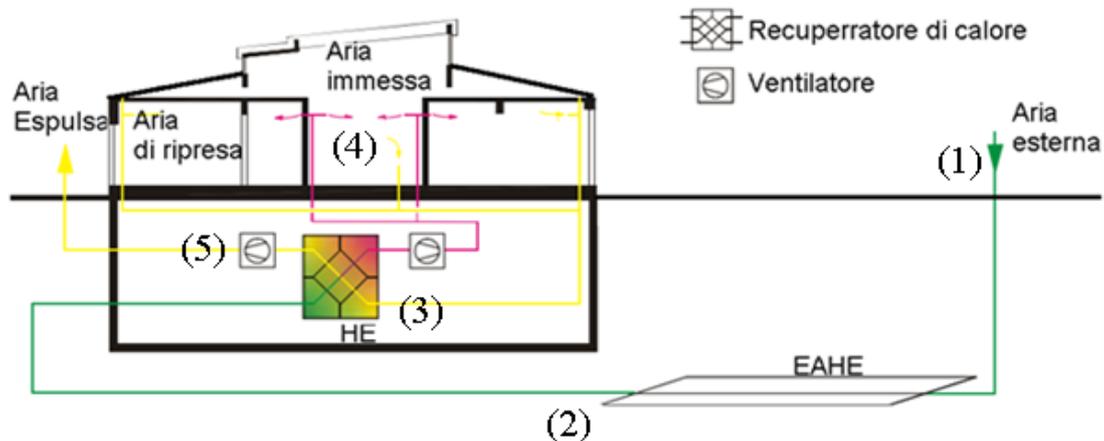


Figura 48. Sistema HVAC e punti di misura.

L'impianto è dotato anche di uno scambiatore di calore a flussi incrociati (HE), situato sotto l'ingresso principale della scuola, che permette di recuperare dall'aria espulsa dai locali una parte di energia che viene ceduta all'aria proveniente dallo scambiatore a terreno.

La ricerca mira all'analisi dell'impianto attraverso la misura in situ delle prestazioni dello scambiatore di calore aria-terreno. La misura in situ delle prestazioni dello scambiatore di calore aria-terreno è stata effettuata attraverso un sistema di monitoraggio gestibile da remoto. Le caratteristiche dei sensori sono:

- Sensore di temperatura: $-40\text{ }^{\circ}\text{C} - +85\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Sensore di umidità relativa: $0\% - 100\% \text{ RH}$, $\pm 3\%$.

I parametri registrati sono temperatura ed umidità relativa dell'aria in diversi punti caratteristici dell'impianto (Figura 48), in corrispondenza dell'immissione dell'aria esterna (1), all'uscita dell'EAHE (2), all'uscita dell'HE (3), nel prelievo dell'aria di immissione (4) e di espulsione (5). Il sistema di ventilazione è attivo dal lunedì al venerdì, dalle ore 9.00 alle ore 13.30. Il monitoraggio della è stato effettuato nel seguente periodo: 10 gennaio – 7 novembre 2011. In Figura 48 è rappresentato l'andamento delle temperature esterne e di immissione dell'aria in ambiente.

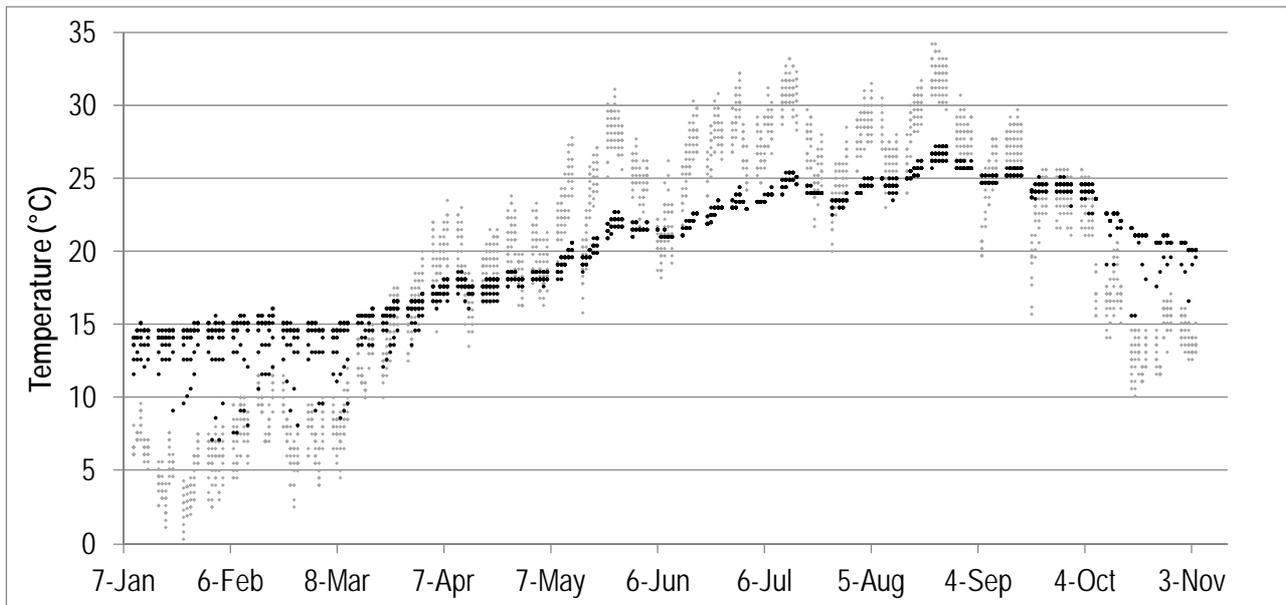


Figura 49. Profili di temperatura esterna (grigio chiaro) e di immissione aria in ambiente (nero).

Calcolo del potenziale di riscaldamento e raffrescamento

Per il calcolo del potenziale di riscaldamento e raffrescamento è stata utilizzata la seguente equazione:

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in}) \cdot \Delta\tau \quad (4.1)$$

Dove \dot{m} è la portata di ventilazione [kg/s], c_p è il calore specifico dell'aria [J/(kg K)], T_{in} e T_{out} sono rispettivamente la temperatura di ingresso e di uscita dallo scambiatore. Per il calcolo sono stati utilizzati i dati monitorati ogni 30 minuti. L'Equazione (4.1) considera solo lo scambio sensibile.

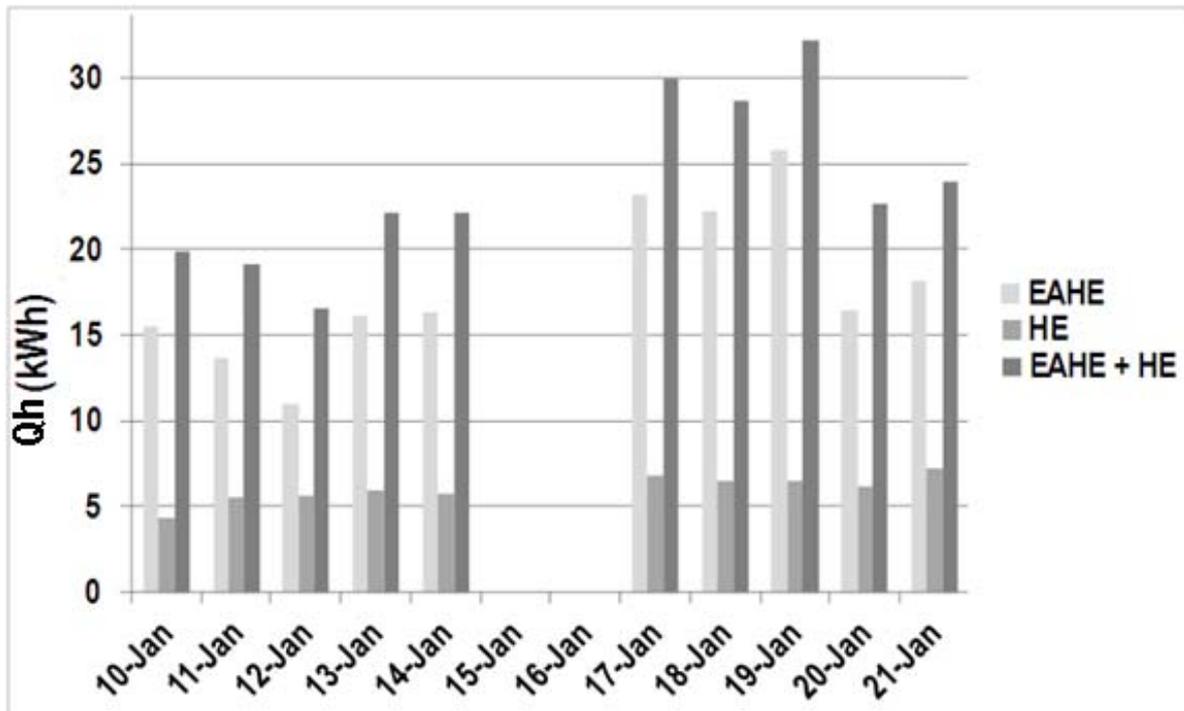


Figura 50. Potenziale di riscaldamento in gennaio.

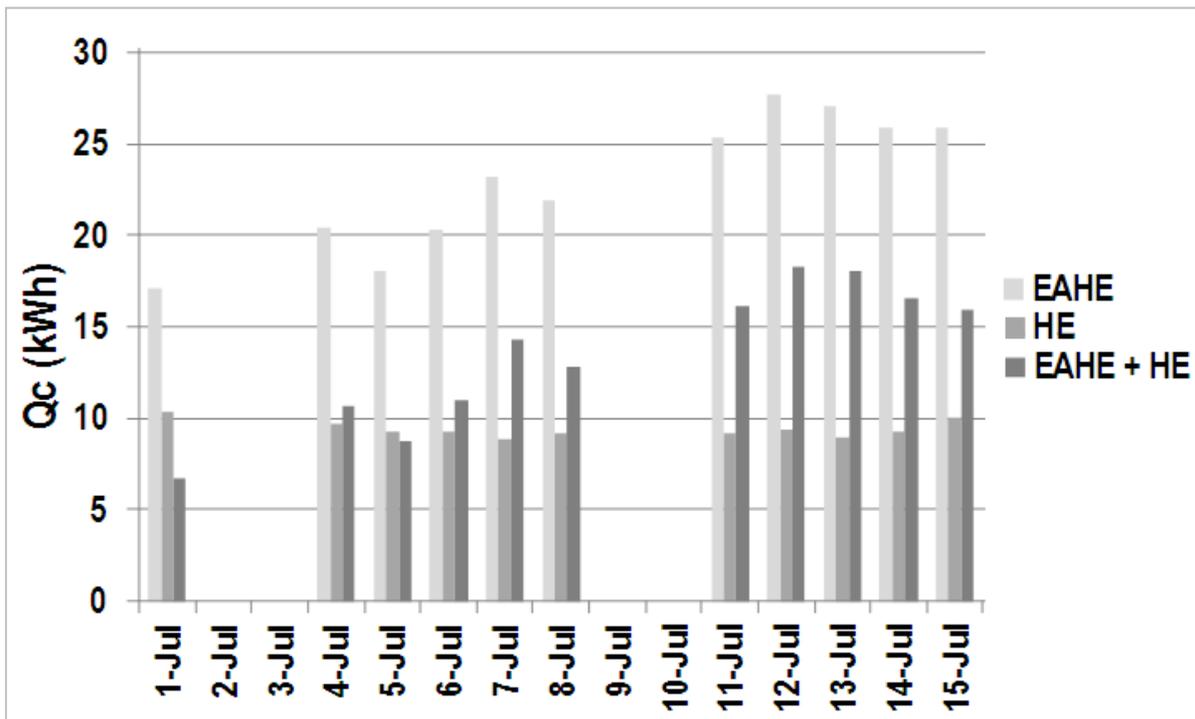


Figura 51. Potenziale di raffrescamento in luglio.

Nelle Figura 50 e Figura 51 sono riportati i grafici relativi al periodo invernale (gennaio) ed estivo (luglio). Gli istogrammi rappresentano il guadagno di energia ottenuto dallo scambiatore aria terreno (EAHE), dallo scambiatore a flussi incrociati (HE) e il contributo totale, dato dalla somma di EAHE + HE.

Premesso che si tratta sempre di contributi modesti rispetto ai fabbisogni dell'edificio, in alcuni mesi il contributo totale non è pari alla somma di EAHE e HE. Questo è dovuto al fatto che in alcuni periodi dell'anno i due scambiatori funzionano in contrapposizione. Il primo scalda l'aria prelevata dall'esterno e l'altro la raffredda oppure viceversa. Questo comportamento verrà di seguito discusso. In Figura 52 vengono rappresentati il potenziale di riscaldamento e di raffrescamento ottenuti utilizzando le Equazioni (2) e (3), considerando le seguenti temperature: T_{in} = temperatura esterna e T_{out} = temperatura di immissione nell'edificio.

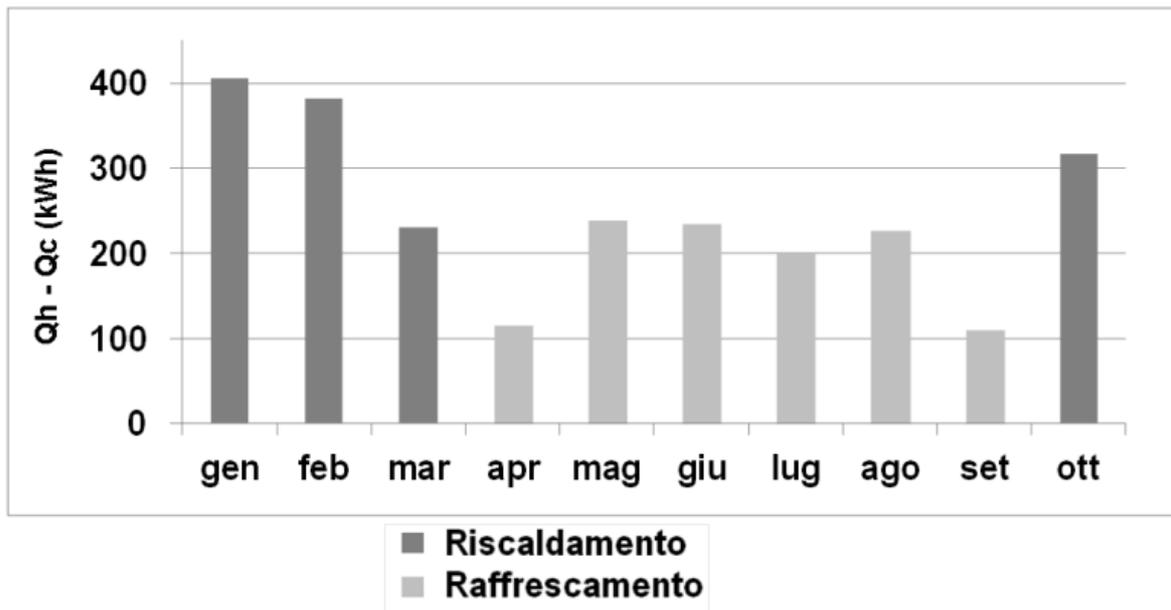


Figura 52. Potenziale mensile di riscaldamento e di raffrescamento.

Monitoraggio dei parametri indoor

Nel periodo 15 settembre – 29 novembre 2011 sono stati monitorati i dati di temperatura e umidità relativa negli ambienti interni della scuola. Le misure sono state effettuate a intervalli di 5 minuti attraverso i datalogger HOBO.

L'obiettivo del monitoraggio era la valutazione dei parametri indoor ovvero la definizione dei range di temperatura e umidità nelle condizioni reali di esercizio. I sensori sono stati collocati in sei punti dell'edificio, come riportato in Tabella 1.

Tabella 18. Collocazione sensori di temperatura e umidità relativa

H1	Mensa
H2	Salone
H3	Asilo nido: aula
H4	Aula
H5	Ingresso
H6	Aula riposo

In Figura 53 e Figura 54 sono riportati i grafici relativi alle temperature e all'umidità relativa negli ambienti monitorati. Sono stati selezionati i periodi dalle ore 7.00 alle ore 17.00 ovvero durante l'orario di apertura della scuola.

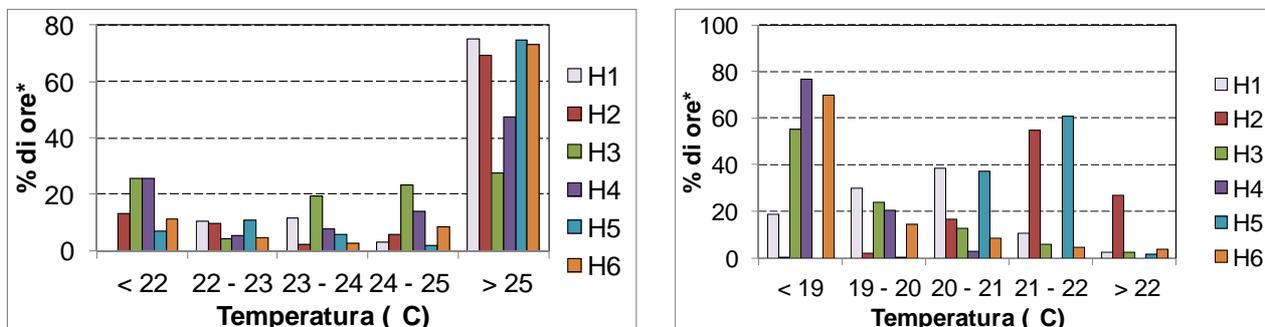


Figura 53. Range temperature (15 settembre – 15 ottobre) a destra e (15 ottobre - 29 novembre) a sinistra.

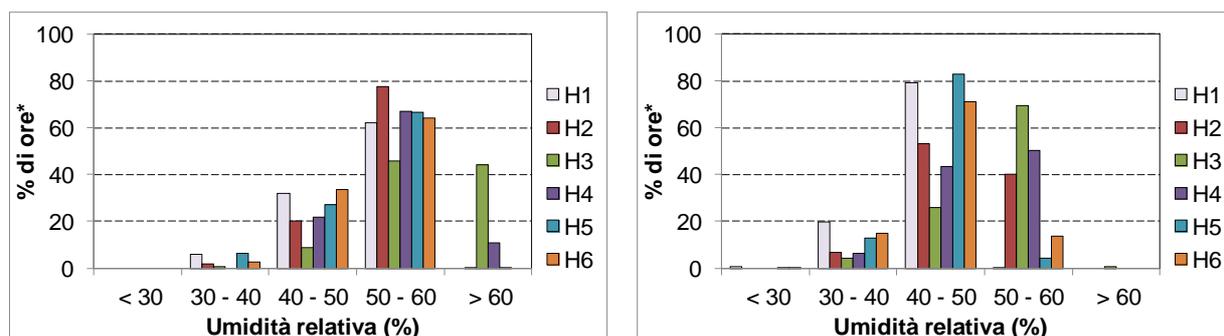


Figura 54. Range umidità relativa (15 settembre – 15 ottobre) a destra e (15 ottobre - 29 novembre) a sinistra.

L'analisi dei parametri indoor ha evidenziato che durante il periodo settembre-ottobre le temperature interne erano superiori a 25°C per più del 60% del tempo. Solo un'aula all'interno dell'asilo nido presenta valori di temperatura inferiori. L'umidità relativa risulta per la maggior parte del tempo compresa tra il 50 e il 60%, ad eccezione di un'aula, nella quale si riscontra una percentuale più alta. Attraverso le analisi dei parametri indoor è stato possibile modificare le modalità di regolazione da parte degli insegnanti, per garantire una migliore qualità dell'ambiente interno.

Sono state analizzate le migliori da applicare al sistema, quantificando il risparmio ottenibile variando i dati di input quali ad esempio la portata, l'orario di funzionamento e le logiche di controllo. L'analisi dei dati del monitoraggio ha evidenziato alcune problematiche, che vengono di seguito discusse insieme alle proposte di miglioramento.

Si evidenzia una problematica nel funzionamento del sistema: in aprile lo scambiatore aria-terreno raffredda l'aria, mentre lo scambiatore a flussi incrociati la riscalda (Figura 55, a sinistra).

Analogamente in settembre il primo scambiatore raffredda, mentre il secondo riscalda (Figura 55, a destra).

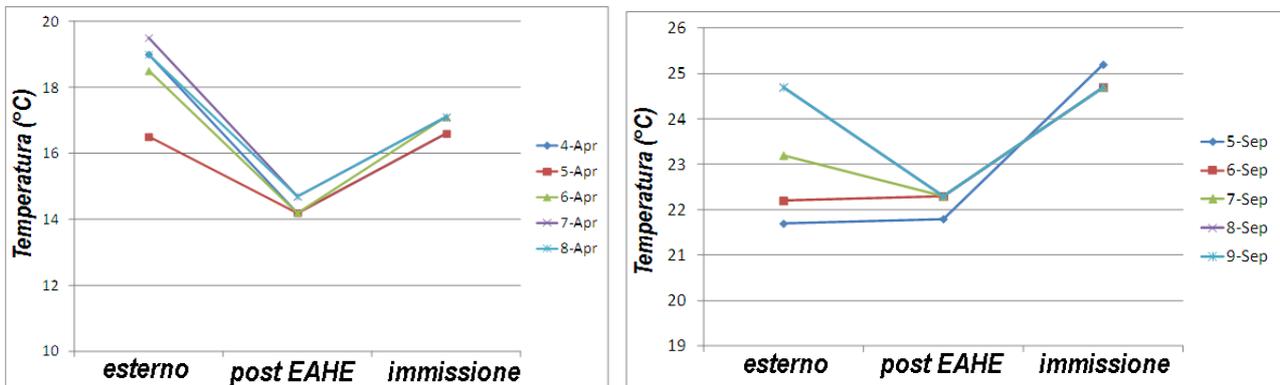
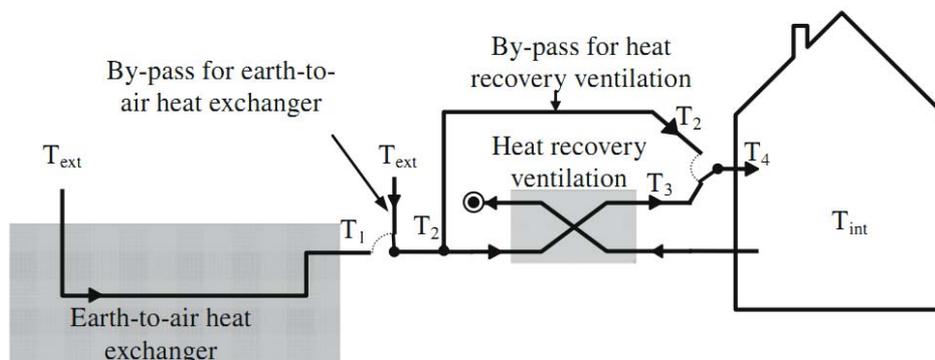


Figura 55. Andamento delle temperature in aprile (a sinistra) e settembre (a destra).

In questi due casi il funzionamento opposto suggerisce l'aggiunta di un sistema di bypass. In letteratura si trovano esempi di sistemi che utilizzano logiche di regolazione dei flussi d'aria in entrata attraverso bypass. In Figura 56 è rappresentato lo schema di impianto che prevede un doppio bypass: il primo permette di escludere lo scambiatore aria- terreno, il secondo lo scambiatore a flussi incrociati.



By-pass on the earth-to-air heat exchanger and the heat recovery ventilation system.

Figura 56. Schema EAHE e HE con bypass (Tittlein et al. 2009).

È stato effettuato un modello sia del sistema scambiatore di calore aria-terreno che dell'edificio e dell'impianto di riscaldamento al suo servizio. Il modello è stato tarato sulla base delle misure ottenute dai monitoraggi. La simulazione dell'edificio è stata fatta con il software TRNSYS, un programma di simulazione dinamica caratterizzato da una struttura modulare. Ai fini della simulazione del sistema oggetto di analisi, all'utente è richiesto di specificare i componenti che costituiscono il sistema e la maniera nelle quali questi interagiscano tra di loro.

La simulazione in ambiente TRNSYS è costituita dall'assemblaggio di una serie di componenti ("Types") opportunamente interconnessi in modo tale da svolgere una sequenza ordinata di operazioni.

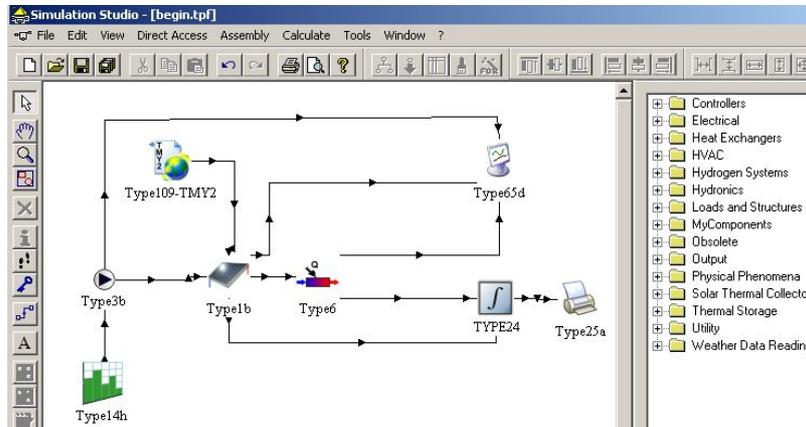


Figura 57. Interfaccia grafica programma TRNSYS

I componenti del sistema sono stati modellati attraverso un'interfaccia grafica denominata "TRNSYS Simulation Studio" (Figura 57), mentre le caratteristiche dell'edificio sono state inserite tramite un'interfaccia dedicata (TRNBuild). Il livello di dettaglio relativo alla Type 56 (che descrive l'edificio) è conforme alle normative e alle attuali normative europee.

All'interno del "Simulation Studio" l'utente definisce i componenti che costituiscono il sistema e i modi in cui essi sono connessi.

In Figura 58 è rappresentato lo schema relativo alla simulazione dell'edificio in analisi.

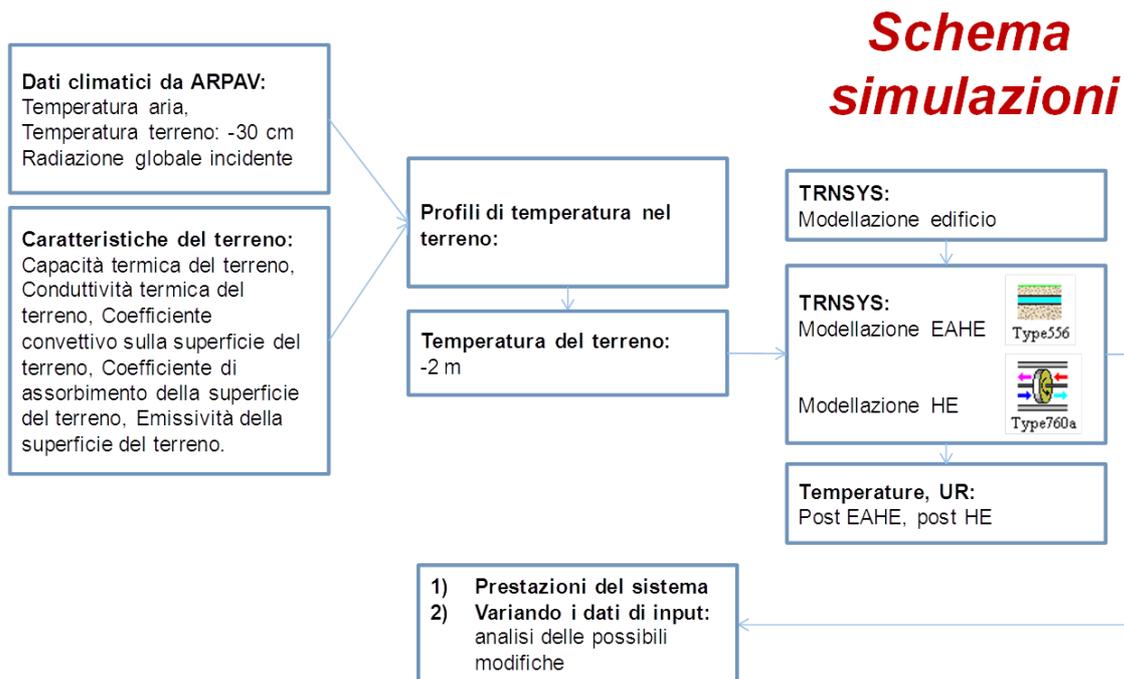


Figura 58. Schema simulazioni edificio – impianto Scuola Stroppari.

La simulazione dello scambiatore aria-terreno e lo scambiatore a flussi incrociati è stata effettuata in ambiente TRNSYS tramite le seguenti Type:

- Type 31b (Buried horizontal pipe): scambiatore di calore aria-terreno
- Type 760a (Air To Air Sensible Heat Exchanger): scambiatore a flussi incrociati.

In Tabella sono riassunte le modifiche da apportare al sistema e i relativi incrementi delle prestazioni, ottenute dalle simulazioni mediante il programma TRNSYS.

Tabella 19. Modifiche del sistema e risultati prestazionali

Parametro	Caso base	Modifiche	Incremento del potenziale del sistema
Bypass	assente	Bypass	+ 50 %
Profondità di posa (m)	-2	-3	+ 4 %
		-4	+ 9 %
		-5	+ 15 %
Portata (m ³ /h)	1700	2000	+ 15 %
		3000	+ 43 %
Ore di funzionamento	4.5	8	+ 68 %
		18	+ 86 %
		24	+ 89 %

L'adeguamento degli orari di accensione del sistema di ventilazione agli orari di utilizzo della scuola determina un incremento delle prestazioni molto elevato, senza la necessità di investimento.

Incrementando la portata da 1700 m³/h (che corrispondono ad un ricambio di 0.5 vol/h) in estate fino a 3000 m³/h, si potrà ridurre le ore di funzionamento degli split per il raffrescamento, determinando quindi un risparmio energetico.

Dall'analisi effettuata variando i parametri del sistema si è concluso che le migliori prestazioni in termini di efficacia economica e di efficienza dell'intervento si ottengono incrementando la portata e le ore di funzionamento del sistema. La variazione della profondità di posa ha invece minore influenza in termini di efficienza del sistema, e presenta inoltre maggiori costi esecutivi (sbancamento e riempimento dello scavo).

Le azioni connesse all'attività di insegnamento e apprendimento richiedono un elevato livello di vivibilità degli ambienti: la qualità dell'ambiente interno ed esterno è pertanto un elemento determinante per lo sviluppo di un adeguato livello di istruzione e di educazione. Negli ultimi anni una crescente attenzione è stata data allo studio degli ambienti scolastici, sia perché i bambini non hanno poche possibilità di interazione con l'ambiente e subiscono passivamente le condizioni degli

ambienti indoor, sia perché durante la fase di sviluppo una cattiva qualità ambientale può influire sull'apprendimento.

Il sistema HVAC della scuola Strozzari di Tezze sul Brenta è un esempio di sistema integrato che mira al raggiungimento di un elevato grado di comfort degli ambienti interni. Le prestazioni del sistema sono state valutate sia in termini di risparmio energetico che di riduzione di emissione di CO₂. Attraverso il monitoraggio durante l'anno 2011 è stato valutato il potenziale di riscaldamento e raffrescamento del sistema di ventilazione composto da scambiatore aria-terreno e scambiatore a flussi incrociati. Seguiranno ulteriori approfondimenti per indagare il contributo latente dello scambiatore aria-terreno.

Sono state inoltre individuati e discussi gli interventi da apportare al sistema per migliorarne le caratteristiche. Gli interventi suggeriti, quali l'aggiunta di un bypass e la modifica della portate e delle ore di funzionamento, presentano costi contenuti e permettono di migliorare notevolmente le prestazioni del sistema.

4.3 Analisi di un edificio per uffici

L'edificio per uffici in analisi situato a Bologna è stato scelto perché nonostante la costruzione fosse recente e il sistema impiantistico avanzato, gli occupanti lamentavano un alto grado di discomfort con diverse motivazioni. Alcune persone lamentavano temperature troppo basse o troppo alte (sia in estate che in inverno), altri evidenziavano che l'aria era secca e che causava difficoltà respiratorie e secchezza agli occhi. L'insieme delle problematiche rientra nella cosiddetta Sick Building Syndrome (SBS), un insieme di disturbi legato a tutti gli aspetti del microclima al quale i lavoratori sono esposti, che comprendono le condizioni di illuminazione, l'umidità dell'aria, la ventilazione, la possibile emissione di sostanze nocive dai materiali impiegati per la costruzione e il numero di lavoratori per ciascun locale.

È stata effettuata un'analisi preliminare per valutare l'efficienza del sistema HVAC. Il metodo utilizzato segue le procedure indicate dallo standard ASTM D6245-98 (2002) "Using indoor carbon dioxide concentrations to evaluate indoor air quality and ventilation": è stata utilizzata la CO₂ come gas tracciante per determinare le effettive portate di ventilazione negli ambienti.

Sono state inoltre monitorate in continuo le temperature, l'umidità relativa e la concentrazione di CO₂ in alcuni uffici campione. Nei medesimi uffici è stata effettuata una campagna di misure puntuali utilizzando la centralina microclimatica. Tali dati sono stati utilizzati per il calcolo degli indici PMV e PPD.

Per analizzare i discomfort puntuali è stata eseguita un'indagine termografica sulle vetrate degli uffici, per determinare la presenza di ponti termici e di discontinuità delle vetrate.

Lo studio ha portato all'evidenziazione di un complesso sistema di relazioni tra discomfort lamentato dalle persone e condizioni di qualità dell'aria, che nel caso specifico risultavano adeguate ai requisiti normativi; ha inoltre consentito la definizione di interventi migliorativi impiantistici sui sistemi di distribuzione al fine di attenuare se non eliminare la percezione di discomfort e ridurre le lamentele riscontrate durante i monitoraggi.

Descrizione dell'edificio

La superficie di 33.000 m² presenta uno sviluppo rettangolare con tre edifici di diverse altezze - da 12, 10 e 8 piani - destinati a differenti attività. L'edificio è schermato da una copertura composta da brise soleil, che svolge la duplice funzione di ombreggiare e di coesione al complesso.

Lo spazio, realizzato con ampie vetrate, è scandito da travi a cavalletto realizzate mediante tubi in acciaio ammorsati su due piastre bloccate da tirafondi. Le colonne degli edifici sono realizzate con profili di tipo HEA ed HEB e profili tubolari a seconda delle esigenze strutturali ed architettoniche. Lungo il perimetro e nella maglia regolare dei campi di solaio troviamo profili HEA e HEB; i profili tubolari sono stati impiegati in corrispondenza dei controventi verticali concentrati nelle testate degli edifici ed in particolare nei nodi strutturali, dove confluiscono più travi d'impalcato con angoli mutui diversi da 90. Le facciate, di tipo continuo, celano al proprio interno un sistema di

riutilizzo dell'aria calda, fondamentale per diminuire l'uso delle macchine UTA. Abbinato a questa tecnologia il sistema di distribuzione è realizzato tramite controsoffitto microforato (Figura 59). Tutto il perimetro dell'edifici è vetrato (Figura 59, fotografia a destra).



Figura 59. Dettagli soffitto microforato (a sinistra) e vetrata esterna (a destra) negli uffici.



Figura 60. Corridoio: fotografie di cantiere.

Il sistema impiantistico

Con il termine “Volume d'aria variabile” (VAV) si intende un tipo di impianto che viene utilizzato per regolare o variare la quantità di aria che viene immessa in uno spazio chiuso, sulla base di fattori quali la ventilazione o l'energia necessaria per mantenere la temperatura desiderata all'interno lo spazio. Ci sono diversi modi per gestire il volume di aria variabile, con alcuni sistemi molto semplice, ma con opzioni limitate e sistemi più sofisticati che possono essere programmati per regolare il volume per soddisfare un'ampia gamma di riscaldamento e raffreddamento situazioni.

In sistemi più avanzati piuttosto che limitarsi a interrompere il flusso di aria quando la temperatura desiderata viene raggiunta, diminuiscono la quantità di aria che viene immessa in funzione delle esigenze. In questo modo è possibile continuare a immettere aria fresca nello spazio, mantenendo la temperatura desiderata per un periodo di tempo più lungo. Un sistema che regola il volume d'aria variabile con questo approccio è spesso conveniente, dato che la regolazione è automatica e non

richiede l'intervento manuale. Ci sono altri sistemi oggi in grado di offrire ulteriori controlli e opzioni per la gestione di volume variabile di aria all'interno di un dato spazio. Con queste opzioni, il sistema di ventilazione può essere configurato con più punti di entrata e di uscita, creando un flusso più efficiente aereo da e per vari punti all'interno dello spazio. Molti di questi tipi di sistemi sono azionati attraverso software, che permette di modificare il flusso d'aria da bocchette specifiche così come regolare la temperatura del flusso d'aria in diversi punti all'interno dello spazio. Questa tipologia di impianto è installata nell'edificio in analisi.

L'impianto è realizzato in modo tale da garantire la completa autonomia nella regolazione della temperatura da parte di singoli utenti, viceversa l'umidità relativa, non viene controllata a livello di ambiente. L'impianto è dotato di più unità di trattamento aria (UTA) indipendenti poste nei controsoffitti di ogni piano, in tal modo è possibile raffreddare o riscaldare contemporaneamente uffici con esposizioni diverse.

La temperatura all'interno dei singoli uffici e open-space, è controllata tramite una sonda di temperatura con relativa unità di controllo che agisce sulla serranda modulante della cassetta di regolazione (impianto tipo VAV). L'aria primaria dei singoli edifici è pretrattata da una UTA posta sulla copertura mediante preriscaldamento, umidificazione e postriscaldamento nel periodo invernale, raffreddamento, deumidificazione ed eventuale postriscaldamento nel periodo estivo.

L'aria primaria alimenterà le UTA di piano in quota parte con l'aria di ricircolo, tale miscela viene successivamente postraffreddata o postriscaldata in funzione delle esigenze delle zona di pertinenza delle singole UTA di piano. L'aria trattata è distribuita attraverso canali in lamiera zincata e immessa in ambiente mediante pannelli radianti microforati.

La quantità d'aria esterna di rinnovo è stata determinata in base agli indici di affollamento riportati al prospetto VIII, Appendice A, della norma UNI 10339:1995 e alle relative portate d'aria per edifici ad uso civile riportate nel prospetto III della stessa norma.

I dati di progetto dell'edificio in analisi sono:

- Portata aria esterna: $11 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ per persona
- Portata unità di trattamento aria: $7.15 \text{ m}^3/\text{s}$ ($25.740 \text{ m}^3/\text{h}$)
- Portata unità di trattamento aria di progetto: $40.000 \text{ m}^3/\text{h}$.

Analisi delle portate d'aria nelle diverse configurazioni degli uffici.

Le misure di decadimento con CO₂ sono state elaborate secondo la norma ASTM D6245-98 (2002) "Using indoor carbon dioxide concentrations to evaluate indoor air quality and ventilation". Le analisi eseguite devono essere considerate indicative delle portate d'aria in ambiente.

In Figura 61 è rappresentato lo schema impiantistico di un ufficio tipo. I numeri rappresentano la collocazione degli strumenti di misura (datalogger per la misura della temperatura, dell'umidità relativa e della concentrazione di CO₂): 1) in corrispondenza del soffitto microforato, 2) in prossimità della ripresa a controsoffitto, 3) nella zona di lavoro, 4) nella ripresa a corridoio, accanto all'entrata dell'ufficio.

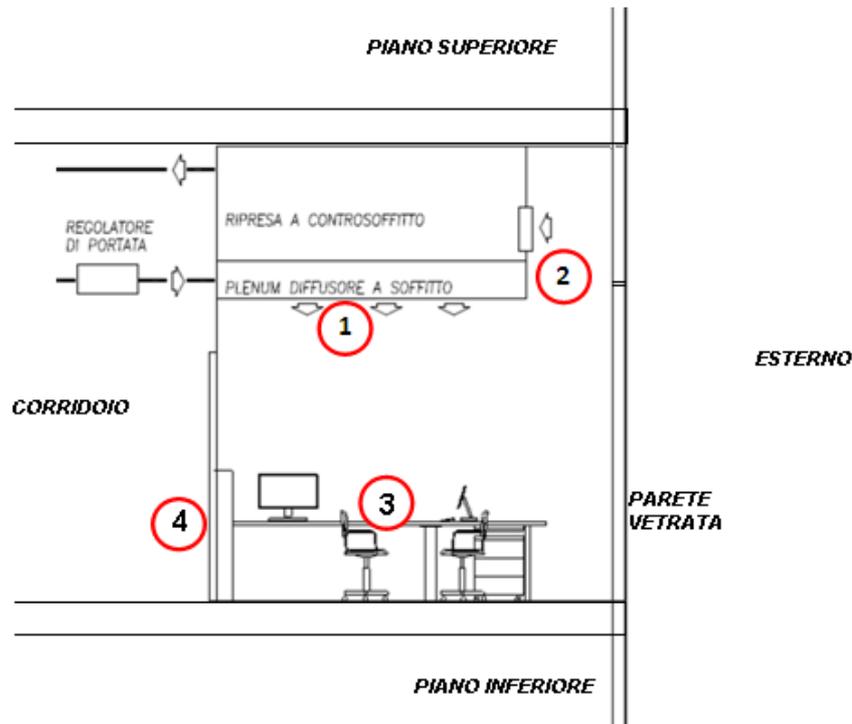


Figura 61. Schematizzazione ufficio in analisi.

Al fine di determinare l'influenza delle aperture (di estrazione) sono state sigillate le diverse riprese, come indicato di seguito. State eseguite delle misure comparative tra diverse soluzioni; a tal fine è stato scelto un ufficio esposto ad Ovest, in modo da minimizzare l'influenza degli apporti solari. In particolare, sono state effettuate le seguenti misure:

- Misura in assenza delle guarnizioni nei pannelli microforati (caso di riferimento) senza griglia sulla porta;
- Misura in presenza delle guarnizioni nei pannelli microforati e senza griglia sulla porta;
- Misura in presenza delle guarnizioni nei pannelli microforati e con griglia sulla porta;
- Misura in presenza delle guarnizioni nei pannelli microforati, con griglia sulla porta e occlusione della ripresa a controsoffitto;

È stata analizzata l'influenza dell'installazione di una guarnizione di sigillatura lungo tutto il perimetro interno delle lastre microforate, al fine di garantire la massima tenuta tra lastra e plenum di distribuzione. La guarnizione del tipo Gyso G-380 presentava una dimensione di 19 x 6 mm.

In Figura 62 sono rappresentate le due modalità dei pannelli microforati: con e senza guarnizioni.



Figura 62. Pannello microforato senza guarnizione (a sinistra); pannello durante l'installazione della guarnizione (a destra).

Tabella 20. Riepilogo delle misure di ottimizzazione dell'impianto

	Guarnizioni		Griglia sulla porta		Ripresa a controsoffitto	
	sì	no	sì	no	sì	no
Misura A		X		X	X	
Misura B	X			X	X	
Misura C	X		X		X	
Misura D	X		X			X

In Figura 63 e Figura 64 sono rappresentati i grafici di decadimento della CO₂ a portata massima e minima. Il valore iniziale di concentrazione è stato scelto pari a 3600 ppm. La velocità di decadimento della concentrazione del gas tracciante è proporzionale alla portata di ventilazione dell'ambiente. Utilizzando il programma Excel sulla base della normativa ASTM descritta nel Capitolo 3.1, sono state ricavate le portate riportate in Tabella 21.

In ascissa è riportato il numero di misure registrate ad intervalli di 1 minuto.

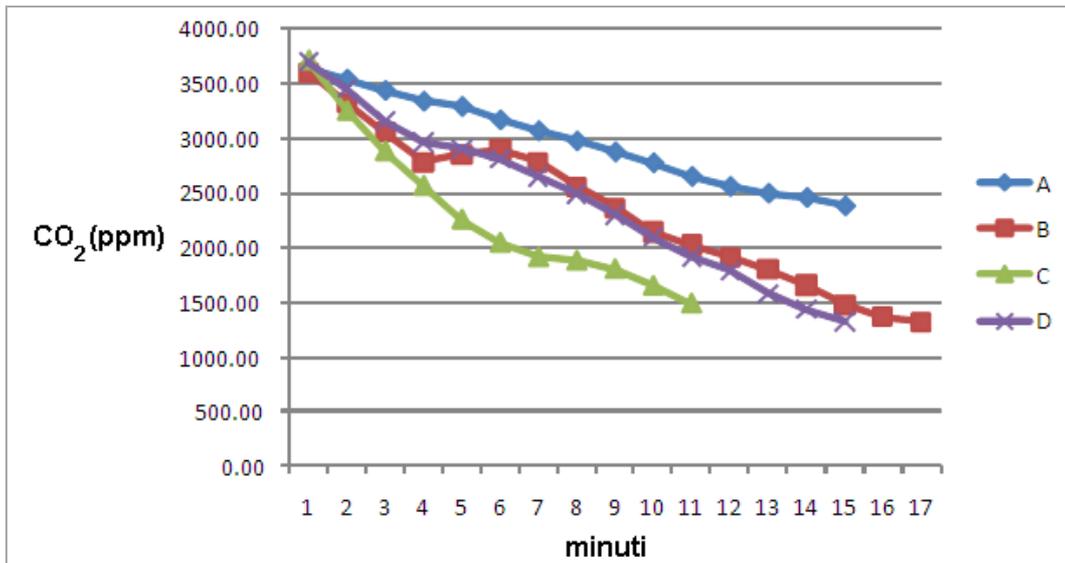


Figura 63. Concentrazione di CO₂ registrata dal sensore 3, posizionato sulla scrivania. Misura effettuata a portata massima.

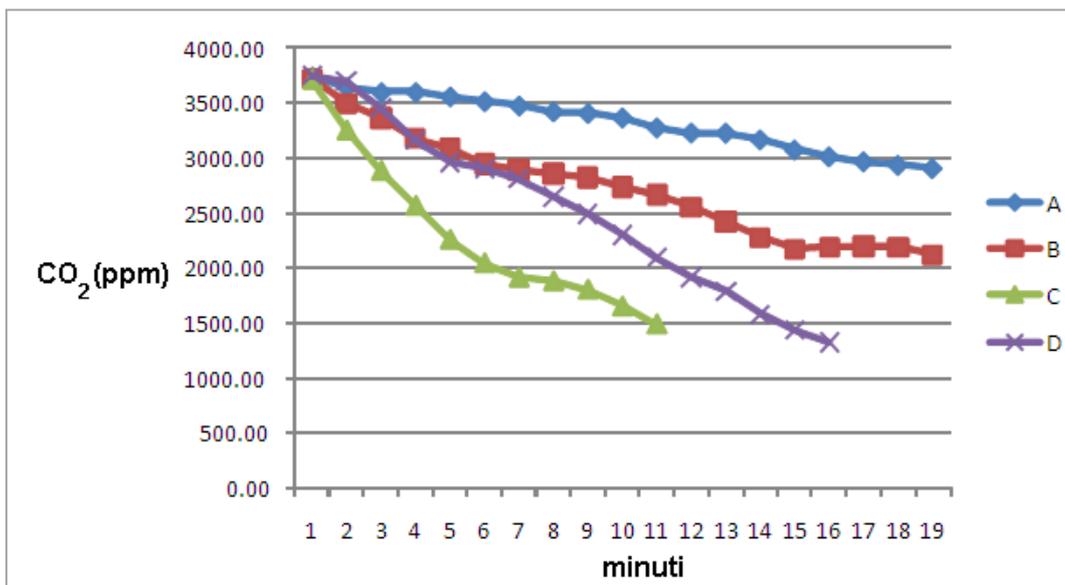


Figura 64. Concentrazione di CO₂ registrata dal sensore 3, posizionato sulla scrivania. Misura effettuata a portata minima.

I risultati (Tabella 21) mostrano sostanzialmente buon accordo con i dati di progetto sia alla portata minima (163 m³/h per la misura B, 142 m³/h per la misura C) sia alla portata massima (401 m³/h per la misura B, 496 m³/h per la misura C).

Le migliori soluzioni risultano quindi la B per la portata minima e la C per la portata massima. Si è concluso che la presenza di guarnizioni sul pannello microforato e la ripresa a controsoffitto garantiscono le portate di progetto. Per quanto riguarda la griglia accanto alla porta invece risulta influente a portata massima.

Tali considerazioni sono state utilizzate per modificare gli uffici che non presentavano le caratteristiche relative alla misura B.

Tabella 21. Portate di ventilazione calcolate nelle diverse misure.

	Portata	Portata calcolata tramite decadimento della CO ₂ (m ³ /h)
Misura A	Minima	62
	Massima	93
Misura B	Minima	163
	Massima	401
Misura C	Minima	142
	Massima	496
Misura D	Minima	125
	Massima	268

Come confronto, i dati di progetto risultano pari a:

- 135 m³/h per la portata minima (solo aria esterna di rinnovo)
- 535 m³/h per la portata massima.

Monitoraggio della qualità degli ambienti interni: calcolo degli indici di PMV e PPD

La campagna di monitoraggio è stata svolta in diversi momenti durante gli anni 2011 e 2012. I periodi in analisi sono stati: dicembre, luglio e maggio. I monitoraggi sono stati effettuati all'interno di diversi uffici, con orientamenti nord, sud e ovest, utilizzando la strumentazione riportata in Tabella 22 insieme ai parametri misurati. L'obiettivo dell'analisi era la determinazione degli indici PMV e PPD secondo la normativa UNI EN ISO 7730, come descritto nel Capitolo 1.

Tabella 22. Strumentazione per le misure puntuali di parametri indoor.

Strumentazione	Parametri misurati
Centralina microclimatica Brüel & Kjær (Figura 65)	Temperatura dell'aria, temperatura media radiante (radiometro bidirezionale), umidità relativa, velocità dell'aria, temperatura operativa, temperatura superficiale.



Figura 65. Centralina microclimatica Brüel & Kjær. Posizionamento a 1.1 m di altezza.

La velocità dell'aria in corrispondenza della caviglie è stata misurata a 0.1 m da terra, come riportato in Figura 65.



Figura 66. Centralina microclimatica Brüel & Kjær. Misura della velocità dell'aria a 0.1 m da terra.

Indici PMV e PPD.

Nei grafici di seguito sono riportati gli indici PMV e PPD misurati a 1.1 metri da terra. Le postazioni di misura erano situate nei lati dell'edifici nei diversi piani. Gli uffici sono stati presi a campioni in modo da rappresentare l'intera struttura.

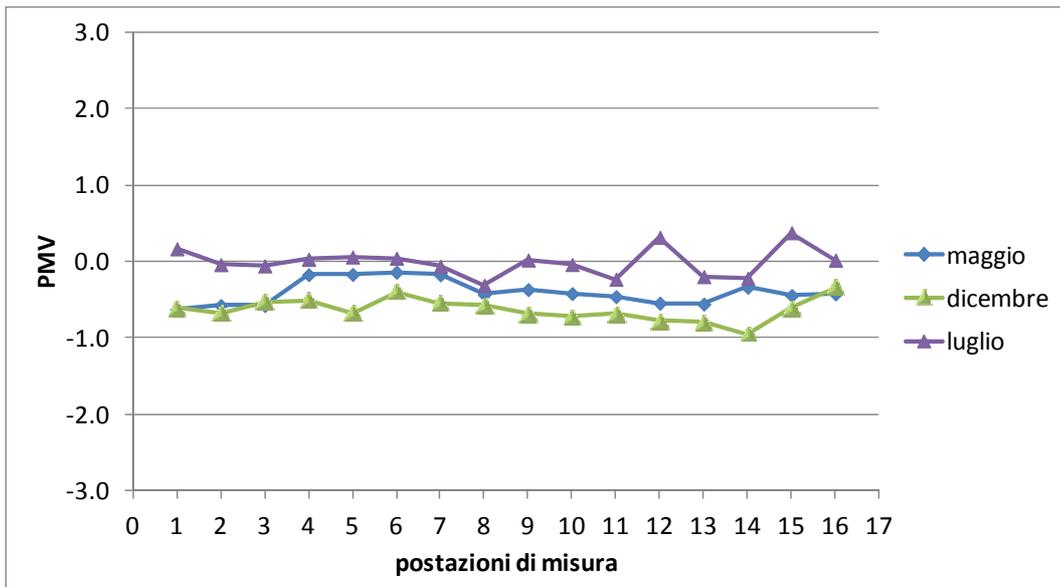


Figura 67. Indice PMV nelle sedici postazioni di misura durante le misure di maggio, luglio e dicembre.

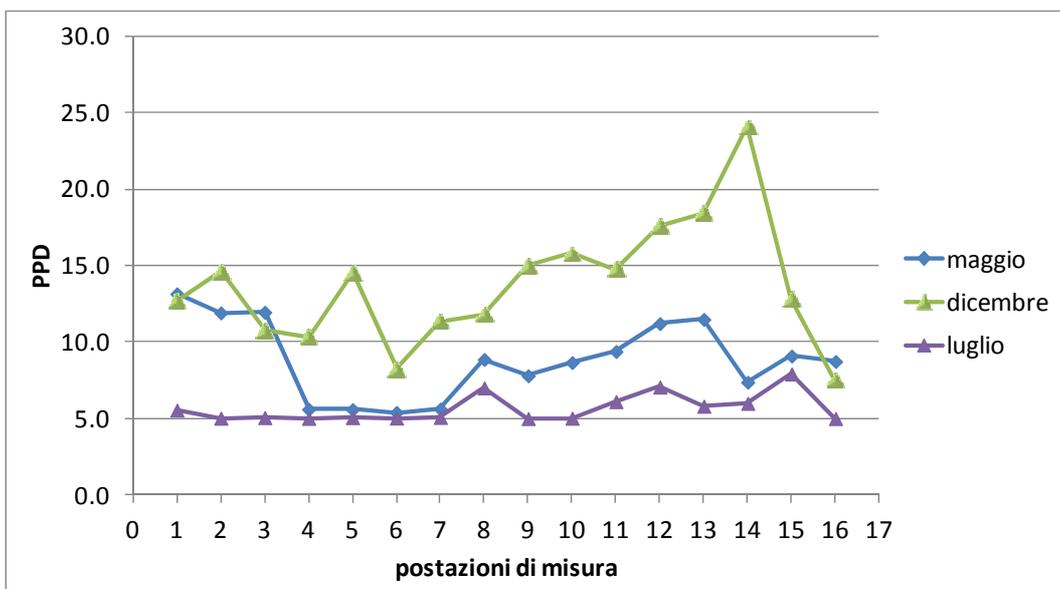


Figura 68. Indice PPD nelle sedici postazioni di misura durante le misure di maggio, luglio e dicembre.

La norma UNI EN 15251 definisce le classi di comfort in funzione degli indici PMV e PPD. La peggior Classe (IV) presenta PPD maggiore di 15. Tale condizione si riscontra solo in alcuni uffici durante il periodo invernale. Durante le misure di maggio e luglio la maggior parte degli ambienti in esame rientrava nelle classi migliori.

Qualità dell'aria: concentrazione di CO₂.

La concentrazione di CO₂ esterna durante le misure variava da 370 a 450 ppm. Nei grafici di seguito sono riportati i range di concentrazione e la relativa percentuale di ore.

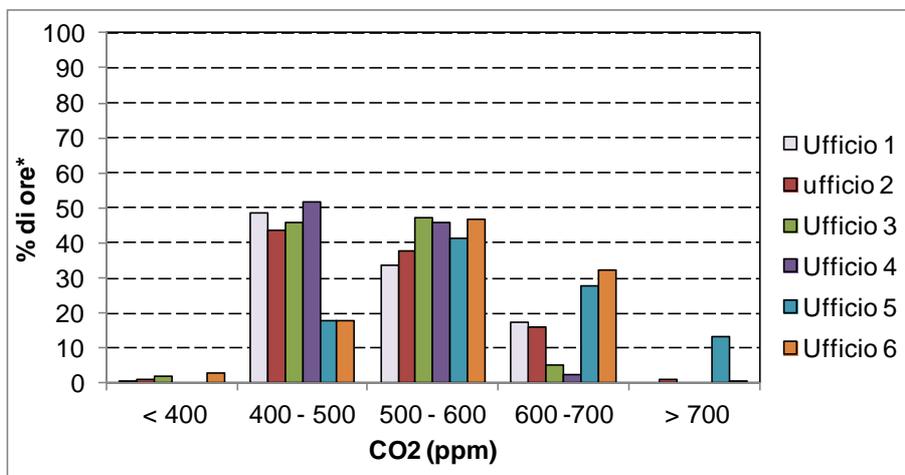


Figura 69. Concentrazione di CO₂ durante il mese di maggio.

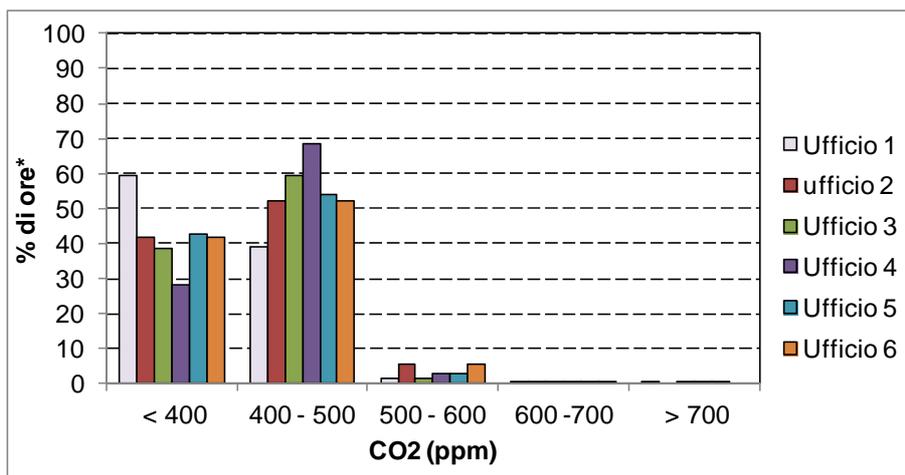


Figura 70. Concentrazione di CO₂ durante il mese di luglio.

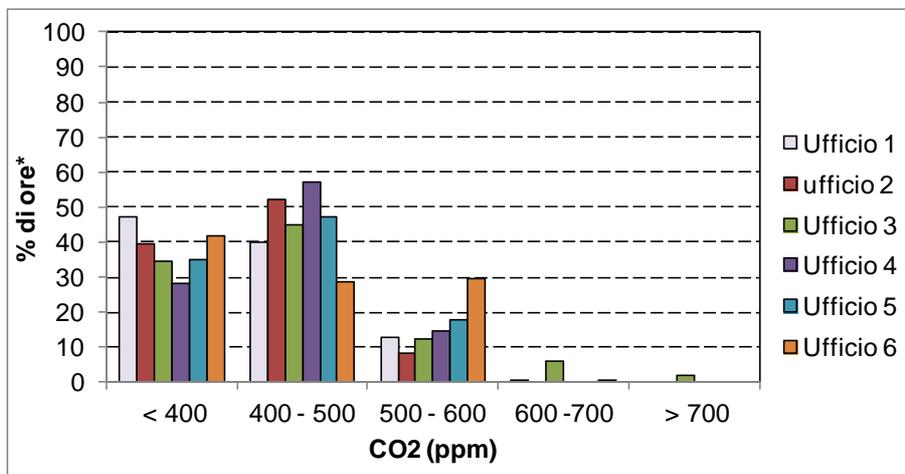


Figura 71. Concentrazione di CO₂ durante il mese di dicembre.

Analisi termografica

Nonostante non fosse possibile intervenire sulla struttura vetrata, si è voluto analizzare la causa di ogni possibile discomfort, in modo da poter eventualmente agire sugli impianti per minimizzare la presenza di eventuali correnti fredde.

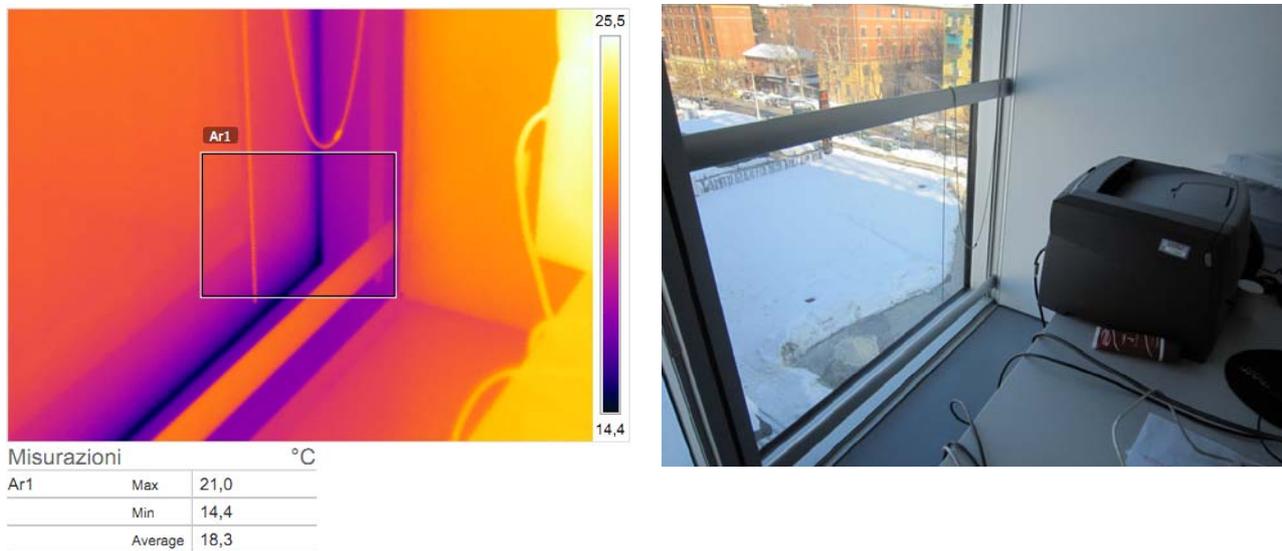


Figura 72. Termografia angolo vetrata – pavimentazione ufficio a nord.

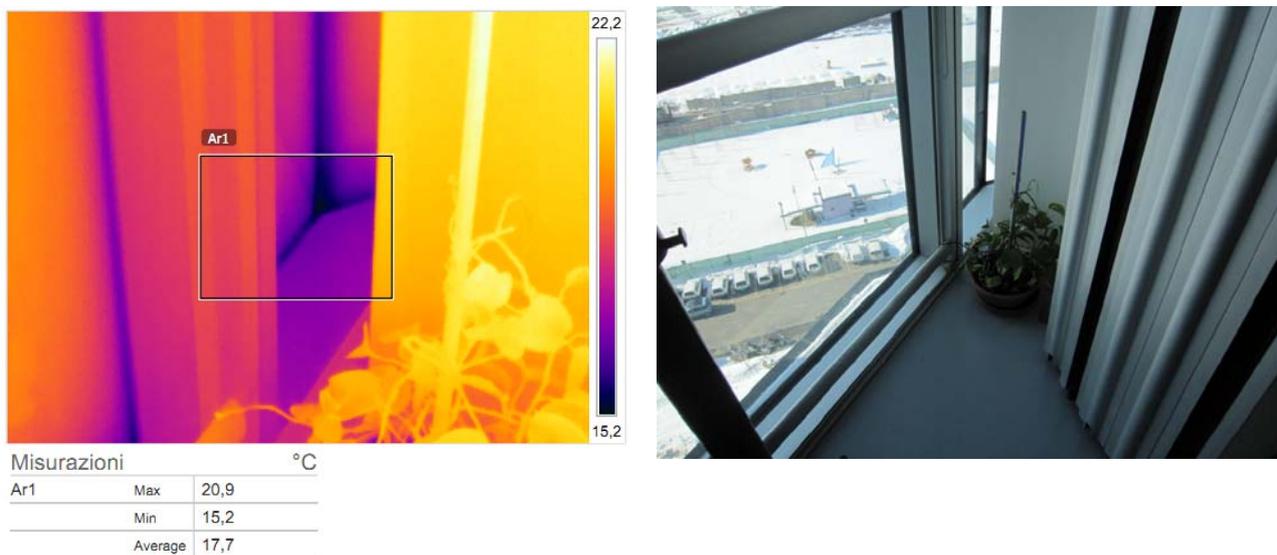


Figura 73. Termografia angolo vetrata – pavimentazione ufficio a ovest.

Le misure termografiche sono state eseguite durante una giornata invernale di gennaio. La temperatura esterna durante le misure era prossima allo zero. Come si nota dalle immagini in corrispondenza delle guarnizioni sono presenti temperature di circa 6°C inferiori rispetto alle parti opache in prossimità. Tale condizione non risulta però influente per quanto riguarda il discomfort dato che la superficie della guarnizione è contenuta e sensibilmente inferiore rispetto a quella della vetrata. Il discomfort che le persone lamentavano (parete fredda) è causato dall'ampia superficie vetrata con caratteristiche di trasmittanza non ottimali.

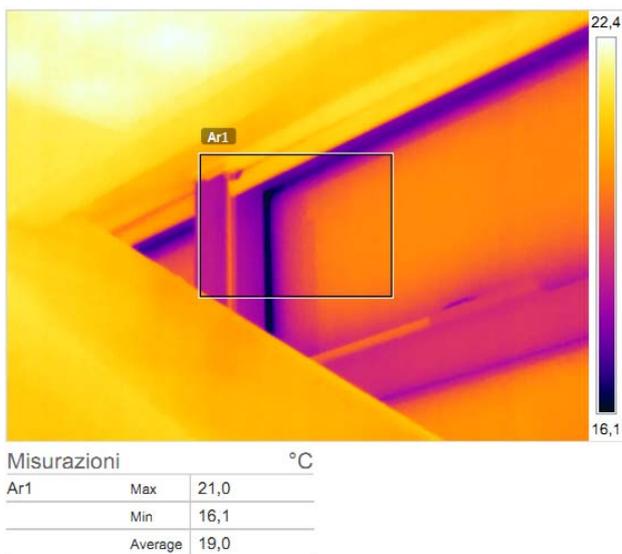


Figura 74. Termografia angolo vetrata – soffitto ufficio a nord.

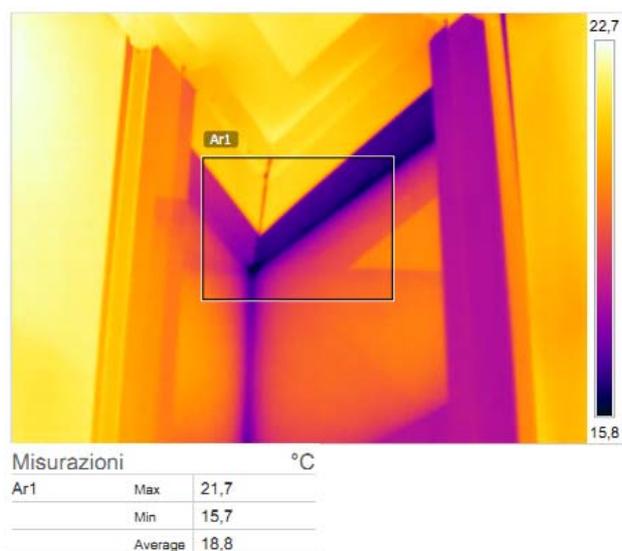


Figura 75. Termografia angolo vetrata – soffitto ufficio a ovest.

Analisi degli interventi impiantistici per migliorare la qualità degli ambienti interni

L'analisi precedentemente descritta ha come obiettivo la determinazione delle migliori impiantistiche da apportare alla struttura in analisi.

Attraverso le misure di decadimento di CO₂ sono state individuate le migliori condizioni delle riprese dell'aria negli uffici, ovvero l'aggiunta, dove non presente della ripresa vicino alla porta di ingresso, l'apertura della ripresa a controsoffitto e l'aggiunta delle guarnizioni nei pannelli microforati.

Dalle misure effettuate è emerso che non vi erano problemi relativi alla qualità dell'aria: la concertazione di CO₂ monitorata durante tre diversi periodi dell'anno raramente superava i 700

ppm, classificando quindi gli uffici in Categoria I secondo la norma UNI EN 15251 (la concentrazione di CO₂ è inferiore a 750 ppm).

Per favorire il flusso dell'aria negli ambienti sono stati installati ugelli orientabili nel soffitto microforato. La configurazione degli ugelli favorisce il flusso dell'aria del pannello microforato, creando un getto di aria monodirezionale a seconda dell'orientazione (Figura 76).



Figura 76. Ugelli direzionali posizionati vicino alla vetrata.

Tali ugelli però potevano creare un discomfort alle persone se installati sopra alle postazioni di lavoro; si è quindi scelto di aggiungere un'altra tipologia di ugelli collocati a metà e all'ingresso degli uffici. Gli ugelli tangenziali hanno come scopo l'immissione più diffusa dell'aria in ambiente, senza quindi creare discomfort. In Figura 77 sono riportati gli ugelli tangenziali installati nel soffitto microforato.



Figura 77. Ugelli tangenziali posizionati vicino all'ingresso dell'ufficio.

Dalle misure puntuali effettuate per calcolare gli indici PMV e PPD non sono emerse problematiche correlate alle temperature e all'umidità relativa. Questo ha indicato che le impostazioni del sistema di supervisione erano corrette e che i discomfort lamentati dalle persone dovevano essere valutati ponendo attenzione alle reciproche influenze degli occupanti e agli aspetti psicologici.

Conclusioni

Il primo obiettivo verso il miglioramento della qualità degli ambienti interni, assieme alla salubrità, dovrebbe essere la garanzia di una condizione di comfort per gli occupanti, in particolare il comfort termoigrometrico, acustico e visivo. I parametri fisico-ambientali, come la temperatura, l'umidità relativa, l'acustica, la qualità dell'aria, dell'illuminazione, della ventilazione e di distribuzione descrivono la qualità di un ambiente interno. Essi sono tutti interconnessi, e la sensazione di comfort è una sommatoria di risposte fornite dalla mente ai sensi di questi fattori. Questo stato d'animo è la complessa risposta di un insieme di fattori ambientali, dell'ambiente fisico e dei servizi, e delle condizioni fisiologiche individuali, come la salute, le relazioni sociali, la situazione finanziaria, ecc.

I casi studio analizzati rappresentano gli edifici nuovi o riqualificati, caratterizzati da un ridotto consumo energetico. Lo scopo di queste strutture è infatti il contenimento della spesa energetica, tematica sempre più attuale anche a causa del costante aumento del prezzo dei combustibili. Purtroppo la sensibilizzazione degli utenti si è fermata ai temi del risparmio (economico prima di tutto) senza coinvolgere anche la qualità dell'aria e la ventilazione.

Dal primo caso studio analizzato emerge infatti che le persone non percepiscono la scarsa qualità dell'aria negli ambienti residenziali e la necessità di ventilare un ambiente nonostante gli evidenti effetti quali muffe, elevati livelli di umidità e alta concentrazione di CO₂. Soprattutto quest'ultimo parametro, non essendo facilmente valutabile non viene ritenuto importante dagli utenti, che preferiscono quindi risparmiare nella spesa del riscaldamento piuttosto che ventilare maggiormente. Alla luce di ciò emerge la necessità di progettare edifici che contengano sistemi impiantistici idonei alla rimozione dei contaminanti, quali i sistemi di ventilazione, che garantiscano una buona qualità dell'aria negli ambienti interni.

Negli edifici per uffici, al contrario, le persone hanno alti livelli di aspettative per quanto riguarda la qualità dell'aria e il comfort termico ma trascurano l'aspetto economico perché non di loro competenza. Aspetti psicologici e reciproche influenze possono aumentare notevolmente il discomfort percepito nonostante non vi siano problematiche evidenti. Questo è emerso da terzo caso studio nel quale è stato analizzato un edificio di recente costruzione. Nonostante i valori dei parametri indoor facevano rientrare gli uffici nelle migliori categorie del comfort, le persone

lamentavano disagi di diversa origine: difficoltà di concentrazione, affaticamento, mal di testa, ma anche discomfort termico. Per migliorare o correggere un edificio con sistemi impiantistici avanzati e senza evidenti problematiche indoor è necessario approfondire e integrare le misure con analisi soggettive e interviste. Risulta di primaria importanza fornire agli utenti indicazioni sul funzionamento e sulla gestione del sistema edificio-impianto. È infatti necessario capire come le persone gestiscono l'edificio e i sistemi impiantistici: ciò permette di valutare correttamente le risposte soggettive e quindi gli eventuali discomfort dichiarati.

Le nuove tecnologie impiantistiche permettono di gestire complessivamente i parametri indoor, programmando ad esempio set-point di temperature e di umidità oppure, dove presente, impostando le portate del sistema di ventilazione. Accompagnate a maggiori potenzialità del sistema vi è però anche una maggiore complessità di gestione. Gli utenti necessitano quindi di essere sensibilizzati sull'utilizzo e sulla regolazione dato che richiedono di poter autonomamente gestire il proprio comfort. È stato infatti provato che gli occupanti sono più tolleranti se possono avere il controllo del proprio ambiente.

Attraverso le analisi e i monitoraggi descritti nel presente lavoro di tesi verrà approfondito il tema della qualità 'globale' degli ambienti interni, attraverso un indice che possa descrivere gli ambienti in esame nel loro complesso. Inoltre, analizzando i risultati dei questionari saranno migliorate le domande e i temi, al fine di creare uno strumento di valutazione soggettiva utile per descrivere la qualità indoor.

Bibliografia

- Ascione F., Bellia L., Minichiello F. 2011. Earth-to-air heat exchangers for Italian climates. *Renewable Energy* 36. Pp. 2177-2188.
- Autori Vari, Principles of Hybrid Ventilation, ed. IEA ECBCS Annex 35, 2002.
- Badescu V. 2007. Simple and accurate model for the ground heat exchanger of a passive house, *Renewable Energy* 32. Pp. 845–855.
- Barbat M. and Feldmann C. 2010. Needs and methods for ductwork cleaning in France. AIVC Ventilation Information Paper, n. 34.
- Barlex M.J. 2006. Guide to Post Occupancy Evaluation, Higher Education Funding Council for England (HEFCE).
- Batterman S.A. and Burge H. 1995. HVAC systems as emission sources affecting indoor air quality: A critical review. *HVAC&R Research*, 1, 61-80.
- Bekö G., Halàs O., Clausen G. and Weschler C.J. 2006. Initial studies of oxidation processes on filter surfaces and their impact on perceived air quality. *Indoor Air* 2006, Vol. 16, pp. 56–64.
- Bojic M., Papadakis G. and Kytitsis S. 1999. Energy from a two pipe, earth-to-air heat exchanger. *Energy* vol. 24, Pp. 519–23.
- Bojic M., Papadakis G., Kytitsis S. 1999. Energy from a two-pipe, earth-to-air heat exchanger. *Energy* vol. 24, Pp. 519–23.
- Brager, G.S. and De Dear, R.J. 1998. Thermal adaptation in the built environment: a literature review. *Energy and Buildings*, v 27, n 1, p 83-96.
- Brager, G.S. and De Dear, R.J. 2000. A standard for natural ventilation. *ASHRAE Journal*, v 42, n 10, p 21-23+25-28
- Brelh N. 2011. Ventilation rates and IAQ in national regulations. *The REHVA European HVAC Journal*, gennaio 2012.
- Carletti C. 2008. *Benessere Visivo Ed Illuminotecnico*. Materiale didattico.
- Corgnati, S.P., Filippi, M., Maga, C., Energy certification of existing building: comparison between actual and calculated energy demand for space heating, CLIMAMED 2005 International Conference, Madrid, Spagna, 23-25 Febbraio 2005.
- De Dear, Richard J. And Brager, Gail Schiller. 1998. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. *ASHRAE Transactions*, v 104, n Pt 1A, p 145-167, 1998
- Direttiva Tecnica *CasaClima* Nature. Gennaio 2013. Agenzia *CasaClima* Srl, Provincia Autonoma di Bolzano.

- Fang, Roulet, Oostra and Foradini (2005). Correlations between SBS, perceived comfort, energy use and other building characteristics in European office and residential buildings. Proceedings of Indoor Air 2005.
- Fanger P.O. 1982. Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering. R.E. Krieger Pub. Co.
- Fanger P.O. 2006. What is IAQ? Indoor Air 2006, Vol. 16, pp. 328–334.
- Fick J., Pommer L., Åstrand A., Östin R., Nilsson C., Andersson B. 2005. Ozonolysis of monoterpenes in mechanical ventilation systems, Atmospheric Environment, 39, 6315–6325.
- Filippi M., Perino M., Corgnati S.P. 2002. Qualità dell'aria negli ambienti interni: ventilazione naturale, artificiale o ibrida? Atti del convegno AICARR 2002 Sistemi e impianti per il controllo della qualità dell'aria e dell'umidità.
- Fink C., Blümel E., Kouba R. e Heimrath R. 2002. Passive Kühlkonzepte für Büro- und Verwaltungsgebäude mittels luft- bzw. Wasserdurchströmten Erdreich-wärmetauschern. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 35/2002 (in Tedesco).
- Fördergemeinschaft Gutes Licht. Lighting with Artificial Light (<http://www.licht.de>).
- Holopainen R., Asikainen V., Pasanen P. and Seppänen O. 2002. The Field Comparison of Three Measuring Techniques for Evaluation of the Surface Dust Level in Ventilation Ducts. Indoor Air, 12, 47-45.
- Jaunzens B. and D. 2001. Eds., Construction Research Communications Ltd, pp 95-109.
- Johner, Wyon, Clausen and Fanger (2004). Impact of indoor air temperature and humidity in an office on perceived air quality, SBS symptoms and performance. Indoor Air Journal 14 (Suppl.7): 74-81.
- Kusuda T., Achenbach P.R. 1965. Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in United States. ASHRAE Transactions. Vol. 71, Part 1.
- Lee K.H. and Strand R.K. 2008. The cooling and heating potential of an earth tube system in buildings. Energy and Buildings vol. 40, Pp. 486 – 494, 2008.
- Lee K.H., Strand R.K. 2008. The cooling and heating potential of an earth tube system in buildings. Energy and Buildings vol. 40, Pp. 486 – 494.
- Meir I.A., Garb Y., Jiao D. e Cicelsky A. 2009. Post-Occupancy Evaluation: An Inevitable Step Toward Sustainability, Advances in Building Energy Research, vol.3, pp. 189–220.
- Melikov A.K. 2004. Personalized ventilation. Indoor Air, Vol. 14, Supplement 7, pp. 157-167.
- Melikov A.K., Cermak R. and Mayer M. 2002. Personalized ventilation: evaluation of different air terminal devices, Energy and Buildings, Vol. 34, pp. 829–836.
- Mihalakakou G., Lewis J.O., Santamouris M. 1996. The influence of different ground covers on the heating potential of earth-to-air heat exchangers. Renew Energy vol. 7, Pp. 33–46.
- Morrison C.G. 1999. Ozone-surface interactions: investigations of mechanisms, kinetics, mass transport, and implications for indoor air quality. Ph. D. thesis. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Environmental Energy Technologies Division. 325 pages.
- Peretti, De Giuli, De Carli. Analisi Critica dei Questionari come Approccio Soggettivo per la Valutazione della Qualità degli Ambienti Interni. Atti del Congresso ATI, Sardegna 2010.

- Preiser W. e Vischer J. 2005. *Assessing building performance*, Elsevier, Amsterdam.
- Raisa V. 2008. *New trends in residential ventilation*. Convegno: Summer Course Integrated HVAC. Venezia.
- Raisa V., Schiavon S. e Zecchin R. 2010. *Teoria e tecnica della ventilazione - Soluzioni per l'edilizia residenziale e per il piccolo terziario*. Editoriale Delfino.
- Seppanen O. and Fisk W.J. 2002. Association of ventilation system type with SBS symptoms in office workers. *Indoor Air*, 12 (Issue 2), 98–112.
- Sundell J. 2004. The history of indoor air quality and health. *Indoor Air* 14 (Suppl 14). pp. 51-58.
- UNESCO. 2007. *Sviluppo sostenibile e cambiamenti climatici*. A cura di Aurelio Angelini, Daniela Fiorentino, Gianni Mattioli, Federica Rolle, Massimo Scalia.
- UNI 11142:2004. *Luce e illuminazione - Fotometri portatili - Caratteristiche prestazionali*
- UNI EN 13829:2002. *Prestazione termica degli edifici - Determinazione della permeabilità all'aria degli edifici - Metodo di pressurizzazione mediante ventilatore*
- UNI EN ISO 7726:2002. *Ergonomia degli ambienti termici - Strumenti per la misurazione delle grandezze fisiche*.
- UNI EN ISO 7730:2006. *Ambienti termici moderati. Determinazione degli indici PMV e PPD e specifica delle condizioni di benessere termico*.
- Wargocki P. 2002. Sensory pollution sources in buildings. *Indoor Air*, 14 (Suppl 7), pp. 82–91.
- Zimmermann M. and Remund S. 2001. IEA-ECBCS Annex 28 Subtask 2 Report 2, Chapter F Ground Coupled Air Systems. *Low Energy Cooling - Technology Selection and Early Design Guidance*, N. Barnard and D. Jaunzens, Eds., Construction Research Communications Ltd, pp 95-109.
- Zuraimi M. S. 2010. Is ventilation duct cleaning useful? A review of the scientific evidence. *Indoor Air* 20, 445–457.