

IMPIANTI

Clara Peretti

L'EDIFICIO SALUBRE

La qualità degli ambienti interni
e le soluzioni tecnologiche



tecniche nuove

Indice

Prefazione	IX
Capitolo 1 – Introduzione alla qualità degli ambienti interni	1
1.1 Definizione e importanza della qualità degli ambienti interni	2
1.2 Evoluzione storica dell'approccio alla qualità ambientale: dalla norma UNI EN ISO 7730 a oggi.	3
1.3 Qualità degli ambienti interni e prestazioni energetiche degli edifici	5
1.4 La Direttiva EPBD IV Case Green e i requisiti per la qualità degli ambienti interni	5
Capitolo 2 – I parametri della qualità degli ambienti interni.	11
2.1 Comfort termico e igrometrico	12
2.2 La qualità dell'aria	22
2.3 Comfort visivo e illuminotecnico	42
2.4 Comfort acustico.	49
2.5 Qualità ambientale e prevenzione microbiologica	56
Capitolo 3 – La norma UNI EN 16798	61
3.1 Le categorie della qualità degli ambienti interni.	63
Capitolo 4 – Metodologie di analisi e monitoraggio	71
4.1 Introduzione	71
4.2 Tecniche di campionamento e analisi dei parametri IEQ	72
4.3 Monitoraggio continuo e puntuale.	73
4.4 La rappresentazione dei dati e i monitoraggi integrati	83
4.5 Strumentazione avanzata e misuratori domestici	88
4.6 Indagini sugli occupanti e valutazione soggettiva	91

Capitolo 5 – Sistemi impiantistici per garantire elevata qualità degli ambienti interni.	99
5.1 Introduzione	99
5.2 Le tecnologie per garantire elevata qualità degli ambienti interni	102
5.3 I sistemi di emissione.	103
5.4 La Ventilazione Meccanica Controllata (VMC).	111
5.5 Sistemi di controllo dell'umidità: sistemi di deumidificazione e di umidificazione	118
5.6 Tecnologie per la regolazione e il monitoraggio: BACS e sistemi di gestione degli impianti di ventilazione e di riscaldamento/raffrescamento.	120
 Capitolo 6 – Strumenti di progettazione per edifici con elevata qualità degli ambienti interni.	 125
6.1 Introduzione	125
6.2 L'analisi cost-optimal come strumento di progettazione	138
6.3 Future applicazioni e lavori in corso	145
 CASI STUDIO.	 147
 Caso studio 1	
Monitoraggio di un edificio per uffici con problematiche di comfort termico e qualità dell'aria	149
– Parametri misurati e riferimenti normativi	149
 Caso studio 2	
Determinazione delle portate di ventilazione in un edificio residenziale con VMC applicando la metodologia del decadimento della CO₂	155
– Prima analisi.	155
– Seconda analisi.	156
 Caso studio 3	
Analisi degli indici comfort termico (PMV e PPD) in un edificio per uffici	159
– Caratterizzazione delle misure per il monitoraggio "spot"	160

Caso studio 4

Analisi di un edificio residenziale con problematiche di muffe ed elevati consumi	165
– Descrizione dell'edificio e del monitoraggio	165
– Il monitoraggio	166
– Misure di trasmittanza in opera	168
– Riflessioni sui dati del monitoraggio e conclusioni	171

Caso studio 5

Analisi di un edificio residenziale con problematiche di muffa e ricambio dell'aria	172
– Temperatura e UR dell'aria esterna	172
– Determinazione del tasso di ricambio dell'aria a partire dai dati del monitoraggio	177
– Considerazioni sull'involucro, sulla ventilazione e sui dati del monitoraggio.	178

Caso studio 6

Analisi soggettiva di un edificio per uffici di nuova costruzione: la Camera di Commercio di Bolzano	179
– Metodologia e analisi dei risultati.	181

Caso studio 7

Monitoraggio di radon in un luogo di lavoro	186
--	------------

Caso studio 8

Analisi e monitoraggio di un edificio per uffici e per lo spettacolo per migliorare il comfort interno e l'efficienza energetica della struttura	189
– Analisi termografica.	192
– Analisi della qualità degli ambienti interni: focus comfort termico e qualità dell'aria	193
– Analisi soggettiva	195
– Proposta degli interventi di riqualificazione	196
– Monitoraggio dell'illuminamento a seguito dell'installazione delle pellicole solari	196

Caso studio 9

Analisi dei parametri IEQ secondo la norma UNI EN 16798-1: dati da monitoraggio	198
Glossario	201
Bibliografia	205

Introduzione alla qualità degli ambienti interni

I parametri fisico-ambientali, come la temperatura, l'umidità relativa, l'acustica, la qualità dell'aria, dell'illuminazione e della ventilazione descrivono la **qualità di un ambiente interno**. Essi sono tutti interconnessi e la sensazione di comfort rappresenta la sommatoria delle risposte fornite dalla mente agli stimoli derivanti da questi fattori. Tale stato d'animo costituisce la complessa risposta a un insieme di variabili ambientali, dell'ambiente fisico, dei servizi, insieme ad alcune condizioni fisiologiche individuali, come la salute, le relazioni sociali, la situazione finanziaria.

Il **consumo energetico degli edifici** dipende in modo significativo sia dai criteri utilizzati per l'ambiente interno (riscaldamento, raffrescamento, ventilazione e illuminazione), sia dalla progettazione e dalla gestione dell'edificio stesso. L'ambiente interno influisce anche sulla **salute**, sulla **produttività** e sul **comfort degli occupanti**. Studi recenti hanno dimostrato che i costi di una scarsa qualità degli ambienti interni sostenuti dal datore di lavoro, dal proprietario dell'edificio e dalla società sono spesso notevolmente superiori al costo dell'energia utilizzata nello stesso edificio. È stato inoltre dimostrato che una buona qualità dell'ambiente interno può migliorare le prestazioni lavorative e di apprendimento, oltre a ridurre l'assenteismo. Va considerato, inoltre, che gli occupanti che non si sentono a proprio agio tendono a intraprendere azioni che possono incidere negativamente sui consumi energetici (*Fonte: UNI EN 16798-1*).

Studi scientifici hanno evidenziato che le **aspettative degli occupanti** negli edifici a ventilazione naturale possono differire sensibilmente rispetto a quelle degli edifici con ventilazione meccanica; questo significa che i fattori psicologici giocano un ruolo determinante anche nella progettazione e gestione degli edifici.

Le società moderne hanno sviluppato tipologie di edifici che consentono un controllo diretto sull'ambiente di lavoro, rendendo così le prestazioni lavorative meno dipendenti dalle condizioni esterne, quali il meteo, l'ora del giorno o la stagione. Gli edifici rappresentano uno dei più grandi investimenti di capitale effettuato per qualsiasi società. La modalità di costruzione, così come il riscaldamento, il raffrescamento, la regolazione della luce in funzione delle diverse esigenze e la ventilazione, determina la maggior parte del consumo energetico.

Negli edifici per **uffici** cresce l'attenzione data al rapporto tra l'ambiente di lavoro e la produttività. Similmente, anche negli edifici **scolastici** le ricerche scientifiche puntano l'attenzione sul legame tra apprendimento e qualità degli ambienti interni, nonché il ruolo di quest'ultima sulla salute degli occupanti.

Un ambiente **non confortevole** può causare un aumento delle malattie respiratorie, dei sintomi riconducibili alla sindrome dell'edificio malato, delle infezioni trasmissibili per via respiratoria, delle allergie; può inoltre ridurre il comfort e la produttività.

Il primo **obiettivo** verso il **miglioramento della qualità** e della salubrità **degli ambienti interni** dovrebbe essere quello di garantire una condizione di comfort per gli occupanti, in particolare il comfort termoigrometrico, acustico e visivo e la qualità dell'aria.

1.1 Definizione e importanza della qualità degli ambienti interni

La qualità degli ambienti interni, in inglese *Indoor Environmental Quality*, con acronimo IEQ, comprende diverse tematiche quali il comfort termico, la qualità dell'aria, l'illuminazione, l'acustica e, in alcune definizioni, anche la qualità dell'acqua in relazione al tema della Legionella.

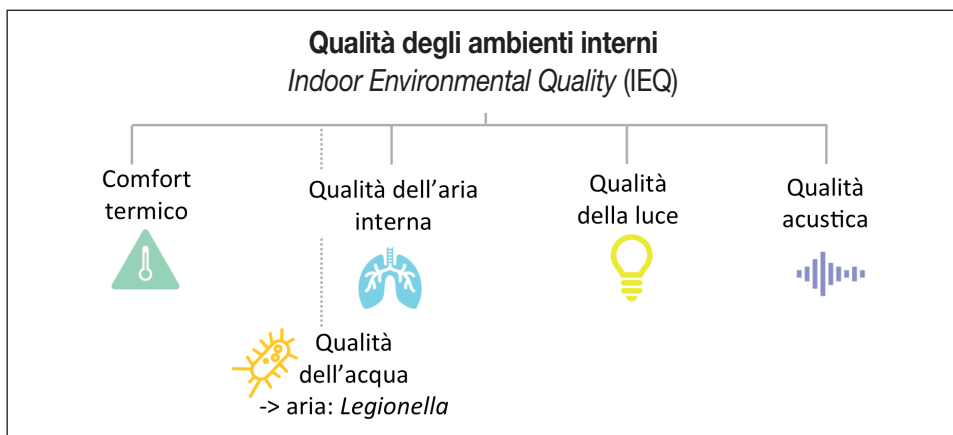


Figura 1.1 – Parametri della qualità degli ambienti interni, *Indoor Environmental Quality* (IEQ).

I parametri della qualità degli ambienti interni

Come abbiamo già visto i parametri che descrivono la qualità degli ambienti interni sono interconnessi e la sensazione di **comfort** è la sommatoria delle risposte fornite dalla mente agli stimoli derivanti da tali fattori.

Quattro componenti di base – il comfort termico, la qualità dell’aria interna, la qualità della luce e la qualità acustica – sono state identificate per determinare il livello di qualità degli ambienti interni, definito, come già ricordato, con l’acronimo IEQ ovvero *Indoor Environmental Quality*. La Legionella può essere considerata come componente aggiuntiva legata alla qualità dell’acqua e dell’aria.

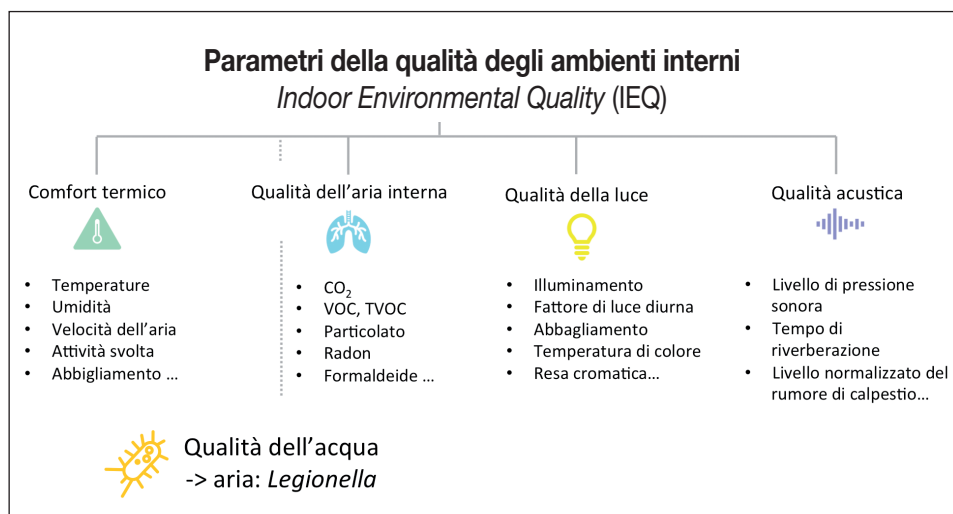


Figura 2.1 – Principali parametri della qualità degli ambienti interni.

2.1 Comfort termico e igrometrico

Il comfort termico e il comfort termo-igrometrico sono concetti correlati ma con sfumature differenti.

Il **comfort termico** si riferisce alla condizione di benessere fisico e mentale che una persona sperimenta quando è soddisfatta delle condizioni termiche dell'ambiente. È principalmente legato alla temperatura dell'aria e alla sensazione di non avere né troppo caldo né troppo freddo. Questo concetto considera principalmente la temperatura ambientale e la capacità del corpo di mantenere il proprio equilibrio termico.

Il **comfort termo-igrometrico** è un concetto più ampio che considera non solo la temperatura, ma anche l'umidità relativa dell'aria. Questa influenza infatti significativamente la percezione del comfort:

- con alta umidità la sudorazione è meno efficace nel raffreddare il corpo;
- con bassa umidità possono verificarsi problemi di secchezza delle mucose;
- l'umidità modifica la percezione della temperatura e, a parità di temperatura, un ambiente più umido viene percepito come più caldo.

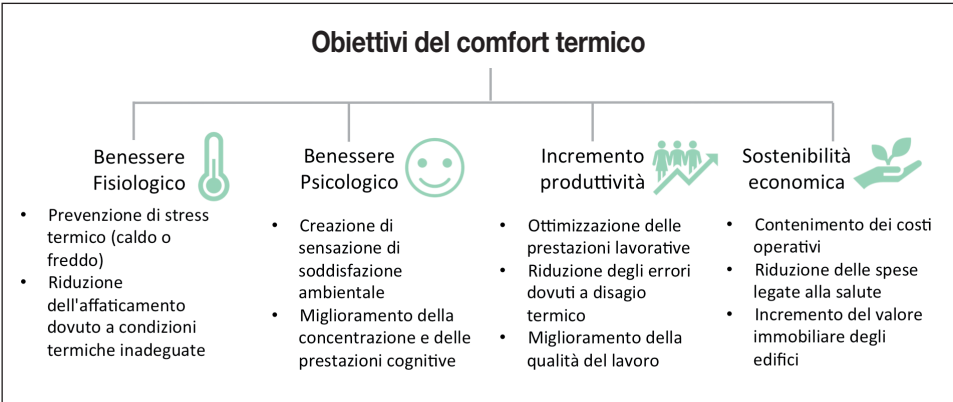


Figura 2.2 – Obiettivi del comfort termico.

La condizione di comfort termico può essere definita, dal punto di vista psicologico, come lo stato psicofisico in cui il soggetto esprime soddisfazione nei riguardi dell'ambiente termico, oppure, dal punto di vista termosensoriale, come la condizione in cui il soggetto non ha né sensazione di caldo né sensazione di freddo ovvero si trova in neutralità termica. La valutazione delle condizioni di comfort si traduce quindi nella determinazione dello scostamento delle condizioni reali da quelle di benessere.

La norma UNI EN 16798

La qualità degli ambienti interni negli edifici è un elemento chiave per il benessere degli occupanti e per l'efficienza energetica. Questo capitolo illustra le principali norme e linee guida per la progettazione degli edifici e dei sistemi **HVAC** (*Heating, Ventilation and Air Conditioning* - Riscaldamento, Ventilazione e Condizionamento dell'Aria), concentrandosi su parametri come comfort termico, qualità dell'aria interna, illuminazione e acustica. L'obiettivo è fornire indicazioni pratiche per dimensionare correttamente gli impianti e valutare l'ambiente interno sia a breve sia a lungo termine.

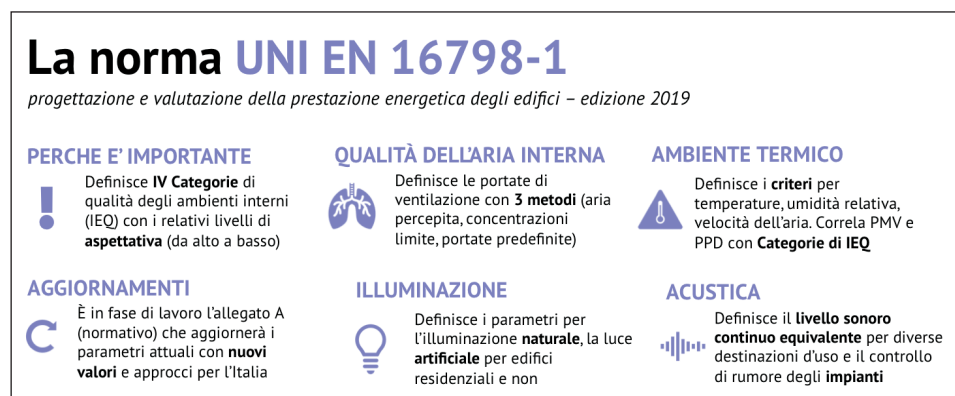


Figura 3.1 – Infografica sulla norma UNI EN 16798-1.

La prima edizione della norma **EN 15251** è avvenuta nel 2007. Nel 2019 la norma EN 15251 è stata sostituita con la norma EN 16798-1 recepita in Italia nello stesso anno come UNI EN 16798-1. Le principali modifiche hanno riguardato la suddivisione

Metodologie di analisi e monitoraggio

4.1 Introduzione

Il monitoraggio dei parametri ambientali e dei consumi energetici sta assumendo crescente rilevanza nella gestione e utilizzo del sistema edificio-impianto. La rilevazione e il monitoraggio dei parametri ambientali, dell'involucro, dei sistemi impiantistici e dei consumi energetici è utile sia per i **gestori** (in caso di edifici per uffici, scuole ecc.) sia per i diretti **occupanti** (in particolare in ambito residenziale). Il monitoraggio è inoltre uno strumento versatile e adattabile a differenti destinazioni d'uso, anche grazie alla crescente diffusione e all'evoluzione delle tecnologie sensoristiche, alla ridotta invasività installativa e ai costi contenuti delle soluzioni wireless di tali sistemi.

L'interesse crescente per il dato reale di consumo o di reale prestazione ambientale interna riguarda molteplici ambiti: della ricerca scientifica fino all'utente finale. Questo trend è ulteriormente rafforzato dalla presenza di riferimenti legislativi che incentivano l'utilizzo di sistemi di monitoraggio delle prestazioni effettive dell'edificio. Un esempio è la Direttiva Case Green che, come già richiamato nei capitoli precedenti, pone particolare attenzione alla qualità degli ambienti interni, definita come il *“risultato di una valutazione delle condizioni all'interno di un edificio che influiscono sulla salute e sul benessere dei suoi occupanti, basata su parametri quali quelli relativi a temperatura, umidità, tasso di ventilazione e presenza di contaminanti”* (Art. 2, punto 66 della Direttiva).

I dati reali relativi a consumi energetici e/o prestazioni ambientali possono essere utilizzati per molteplici finalità, tra cui:

- valutare le prestazioni effettive in termini di qualità degli ambienti interni;
- confrontare i valori monitorati con gli standard normativi (UNI EN 16798-1);
- identificare problematiche di discomfort e salute degli occupanti;

Tabella 4.1 – Parametri indoor e relative strumentazioni.

	Esempi di parametri misurati	Strumentazione
Comfort termico	Temperatura dell'aria (°C), Temperatura radiante (°C), Temperatura operante (°C), Umidità relativa (%), Velocità dell'aria (m/s)	Datalogger, termometri, igrometri, anemometri, centraline microclimatiche
Qualità dell'aria	CO ₂ (ppm), TVOC (ppm), PM, VOC, formaldeide, radon...	Datalogger, misuratori attivi e passivi...
Ventilazione	Tasso di ventilazione (vol/h)	Blower door, decadimento della CO ₂
Qualità illuminotecnica	Illuminamento, luminanza...	Luxmetro, luminanzometro
Qualità acustica	Pressione sonora	Fonometri, macchina generatrice di rumore al calpestio...

Ogni **strumento di misura** si caratterizza per le specifiche prestazioni fondamentali, quali:

- campo di misura;
- portata;
- fondo scala;
- precisione;
- risoluzione;
- sensibilità;
- accuratezza;
- tempo di risposta.

Misurazione della temperatura

La misura della temperatura rappresenta un aspetto centrale e trasversale nell'analisi di qualità degli ambienti interni, involucro e impianti. Le principali applicazioni dei sensori di temperatura sono riassunte in Figura 4.1.

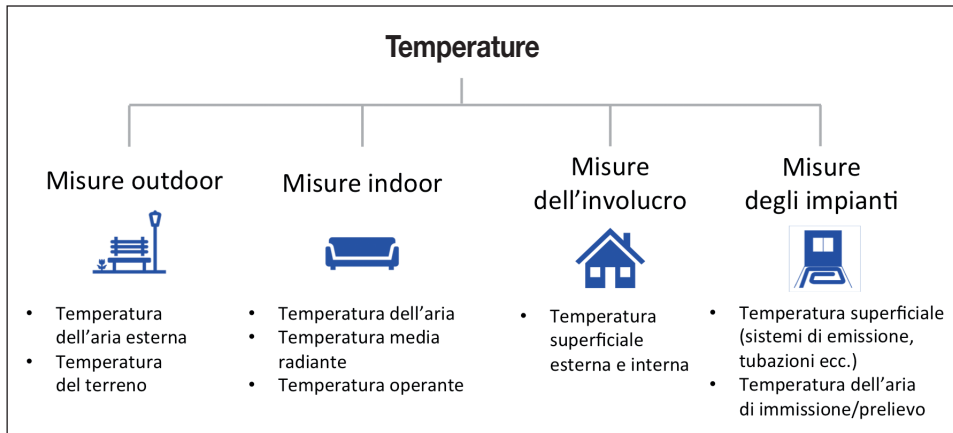


Figura 4.1 – Misure di temperatura.

Misurazione dell'umidità

Similmente alla temperatura anche la misura dell'umidità (relativa e specifica) presenta diverse applicazioni, come riportato in Figura 4.2.

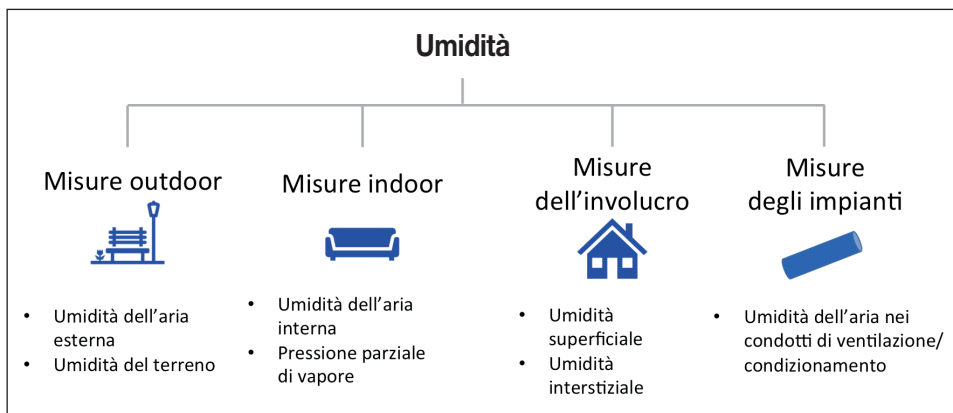


Figura 4.2 – Misure di umidità.

Misurazione della velocità dell'aria

La velocità dell'aria è una grandezza definita per intensità e per direzione. Per un'analisi accurata del flusso, la normativa raccomanda di registrare le sue fluttuazioni nel tempo. Ogni flusso può essere descritto tramite la velocità media in un determinato intervallo di tempo (periodo di misurazione) e la deviazione standard della velocità

Strumenti di progettazione per edifici con elevata qualità degli ambienti interni

6.1 Introduzione

La tendenza attuale nel campo della sostenibilità ambientale e sociale punta alla valutazione **olistica** che consideri non solo l'impatto ambientale dell'edificio, ma anche la sua capacità di promuovere salute, produttività e benessere degli utenti, creando ambienti che siano contemporaneamente **sostenibili e salubri**.

Attraverso strategie integrate come l'uso di materiali a basse emissioni, sistemi di ventilazione ad alta efficienza energetica, sfruttamento della luce naturale per ridurre consumi elettrici, e progettazione bioclimatica che ottimizza le prestazioni dell'edificio rispetto al clima locale, si mira a creare edifici con ambienti interni performanti e confortevoli. In questa direzione si collocano anche i protocolli di certificazione più avanzati, che valutano complessivamente la qualità degli ambienti nella progettazione, gestione e manutenzione degli edifici. Questo capitolo analizza l'integrazione e la valutazione del comfort indoor nei principali protocolli di sostenibilità.

Oggetto del presente capitolo sono le seguenti tematiche:

- **Level(s)**: non è un tipico protocollo, ma un **quadro di riferimento dell'UE** che fornisce indicatori comuni per valutare la sostenibilità degli edifici residenziali e a uso ufficio lungo tutto il loro ciclo di vita, integrando prestazioni ambientali, salute, benessere, costi e rischi futuri;
- **i protocolli di sostenibilità**;
- **i CAM Edilizia**, Criteri Ambientali Minimi per l'edilizia applicati agli edifici pubblici;
- l'analisi **cost-optimal** e l'indicatore **SRI**.

6.1.1 Level(s)

Sviluppato come un quadro di riferimento comune dell'UE per i principali **indicatori per la valutazione della sostenibilità degli edifici residenziali e a uso ufficio**, Level(s) può essere applicato sin dalle prime fasi della progettazione concettuale fino al termine del ciclo di vita dell'edificio.

Oltre a valutare le prestazioni ambientali, che rappresentano l'aspetto più importante, Level(s) consente di valutare la **salute e il benessere** con relativi costi del ciclo di vita e potenziali rischi futuri per le prestazioni. Level(s) intende fornire un linguaggio comune per la sostenibilità degli edifici. Obiettivo di questo linguaggio comune è consentire interventi a livello dell'intero edificio che possano apportare un evidente contributo al conseguimento di obiettivi più ampi nell'ambito della politica ambientale europea. Level(s) è così strutturato:

- macro-obiettivi: una serie di sei macro-obiettivi generali per il quadro Level(s) che contribuiscono al conseguimento degli obiettivi strategici dell'UE e degli Stati membri in ambiti quali energia, utilizzo dei materiali, gestione dei rifiuti, acqua e qualità dell'aria interna;
- indicatori principali: una serie di **16 indicatori comuni**, accompagnati da una metodologia semplificata di valutazione del ciclo di vita (LCA, Life Cycle Assessment), da utilizzare per misurare la prestazione degli edifici e il loro contributo a ciascun macro-obiettivo.

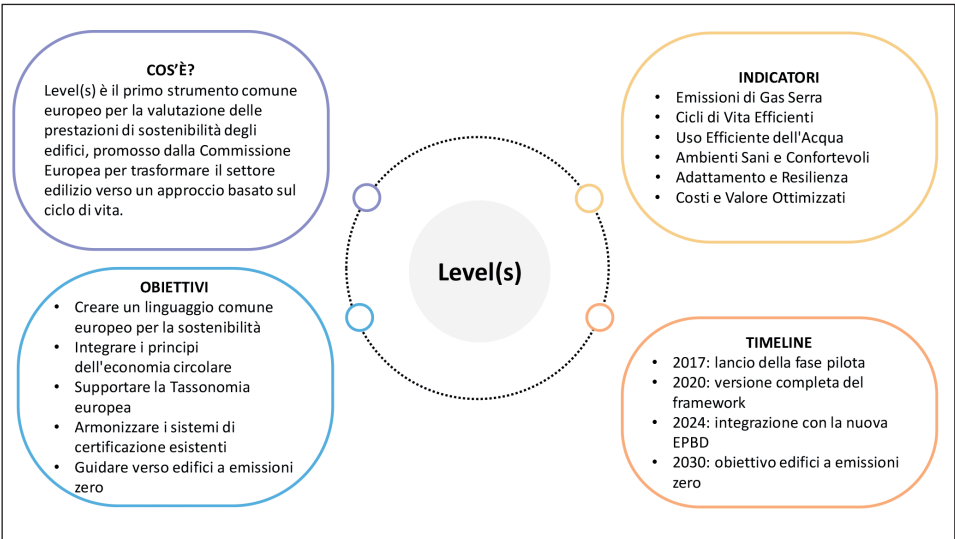


Figura 6.1 – Infografica Level(s).

Level(s) punta inoltre a promuovere una logica basata sull'intero ciclo di vita e sposta l'attenzione degli utenti dall'interesse iniziale per i singoli aspetti delle prestazioni dell'edificio verso una prospettiva più olistica, puntando a un più ampio utilizzo a livello europeo dei metodi per la valutazione sia del ciclo di vita (Life Cycle Assessment, LCA) sia dei costi del ciclo di vita (Life Cycle Cost Assessment, LCCA).

Il quadro di riferimento Level(s) fornisce una serie di indicatori e di parametri comuni per misurare le prestazioni di sostenibilità degli edifici durante il loro ciclo di vita, valutando gli aspetti seguenti:

- prestazioni ambientali;
- salute e benessere;
- costo e valore del ciclo di vita;
- potenziali rischi per le prestazioni future.



Figura 6.2 – Indicatori Level(s) che coinvolgono la qualità degli ambienti interni.

Indicatore Level(s) 4.1: Qualità dell'aria interna

L'indicatore 4.1 sulla qualità dell'aria descrive le strategie impiantistiche e di monitoraggio con l'obiettivo di dettagliare le strategie di ventilazione per fornire agli occupanti un apporto di aria salubre. Ciò implica il filtraggio degli inquinanti nocivi che potrebbero penetrare attraverso le prese d'aria esterna, così come la fissazione di un tasso minimo di ricambio d'aria per impedire che i livelli di CO₂, l'umidità e gli inquinanti prodotti dai materiali presenti o dalle attività svolte negli ambienti chiusi raggiungano livelli non confortevoli o nocivi. A ciò si aggiunge l'importanza di concentrarsi sulla selezione dei materiali e delle finiture per ridurre al minimo le emissioni nocive nell'aria interna o per prevenirle alla fonte.

La Tabella 6.1 riassume le condizioni della qualità dell'aria interne e gli inquinanti da considerare.

Tabella 6.1 – Parametri contemplati dall'indicatore 4.1.

Condizioni di qualità dell'aria interna		Inquinanti considerati			
		Principalmente da fonti interne		Principalmente da fonti esterne	
Parametro	Unità	Parametro	Unità	Parametro	Unità
Tasso di ventilazione (flusso d'aria)	L/s/m ²	VOC totali	µg/m ³	Benzene	µg/m ³
CO ₂	ppm	VOC CMR	µg/m ³	Radon	Bq/m ³
Umidità relativa	%	Valore R	Rapporto decimale	Particolato < 2,5 µm	µg/m ³
Indagine tra gli occupanti	n.d.	Formaldeide	µg/m ³	Particolato < 10 µm	µg/m ³

Il criterio definisce quattro livelli che seguono le attività di progettazione e per ogni livello descrive e dettaglia le relative attività e chi dovrebbe essere coinvolto e quando. I quattro livelli suggeriti sono:

1. progettazione concettuale;
2. progettazione dettagliata e costruzione (sulla base di disegni dell'edificio "come costruito");
3. prestazioni dell'edificio "come costruito";
4. prestazioni in uso (verifica dopo l'ingresso degli occupanti e l'arredamento).

Sono descritti i modelli di comunicazione Level(s) per il confronto delle condizioni di qualità dell'aria interna nelle diverse fasi del processo di progettazione, costruzione e uso dell'edificio. Per ogni inquinante sono riportati i riferimenti normativi europei, e, in alcuni casi, anche quelli nazionali (riferimenti tedeschi e francesi per i VOC, TVOC e particolato). Ulteriori dettagli sono disponibili nel Manuale Utente dell'Indicatore Level(s) 4.1: Qualità dell'aria interna¹.

Indicatore Level(s) 4.2: Tempo al di fuori dell'intervallo di comfort termico

Il livello è rivolto agli utenti che desiderano valutare i rischi di disagio termico degli occupanti durante le stagioni di riscaldamento e di raffrescamento e comprendere le misure che possono essere adottate per creare un ambiente termico confortevole nei tipi di edificio oggetto della valutazione.

¹ <https://susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau/sites/default/files/2023-02/4.1.ENV-2020-00029-01-02-IT-TRA-00.pdf>.



Il libro offre una panoramica completa sulla qualità degli ambienti interni (IEQ), un tema sempre più centrale nella progettazione e gestione degli edifici moderni, sia nuovi che da riqualificare. Partendo dall'evoluzione storica della normativa fino all'attuale direttiva EPBD IV "Case Green", il testo analizza l'impatto che gli spazi confinati hanno sulla salute e sul benessere degli occupanti.

Vengono esplorati tutti i parametri fondamentali dell'IEQ: qualità dell'aria, comfort termico, acustico e visivo e

qualità dell'acqua. Vengono approfondite le metodologie di monitoraggio, dalle tecniche di campionamento alla sensoristica avanzata. Ampio spazio è dedicato alle soluzioni impiantistiche per diversi contesti edilizi, dai sistemi di ventilazione meccanica controllata agli impianti di climatizzazione.

Nell'analisi del rapporto tra IEQ e sostenibilità ambientale vengono descritte le certificazioni e le strategie per ridurre l'impatto climatico, anche approfondendo i futuri sviluppi tecnologici e normativi.

I casi studio che concludono il volume rappresentano un elemento prezioso per il professionista. Attraverso esempi reali di monitoraggio e intervento su edifici per uffici e residenziali, il lettore può osservare come teoria e pratica si incontrino nella complessità delle situazioni concrete.

Clara Peretti

Libera professionista, svolge attività di ricerca e di divulgazione sul tema della qualità degli ambienti interni, con particolare focus sui sistemi impiantistici a servizio del comfort e della qualità dell'aria. Consulente della Provincia di Bolzano sul tema della qualità dell'aria nelle scuole. È autrice di diversi libri e articoli. Partecipa attivamente alle attività normative in ambito CTI sui sistemi radianti e sui sistemi di ventilazione. È esperta di interventi di risanamento radon secondo il D. Lgs 101/2020.