

Qualità dell'Aria negli Edifici Scolastici

WP3. Indagine sullo stato dell'arte e del mercato

Task 3.5 – Identificazione degli indicatori prestazionali



Data: 30.11.2019

Task Leader: Eurac Research – Istituto per le Energie Rinnovabili

Autore: Annamaria Belleri

Co-autori: Francesco Babich, Simone Torresin

© ALL RIGHTS RESERVED

Indice

1	Introduzione.....	3
2	Indicatori della qualita' dell'aria	5
2.1	Indicatori basati sul valore limite di esposizione (Exposure Limit Value)	5
2.2	Concentrazione inquinanti indoor	7
2.3	Indicatori di contaminazione biologica	9
2.4	Disability Adjusted Life Year.....	9
3	Indicatori comfort termico.....	12
3.1	Predicted Mean Value (PMV) e Percentage of Person Dissatisfied (PPD)	12
3.2	Modello adattivo di comfort termico.....	13
3.3	Overheating.....	15
3.4	Overcooling	15
4	Indicatori di comfort acustico	16
4.1	Lo Speech Transmission Index (STI)	16
4.2	Indicatori acustici e riferimenti per la misura	18
5	Indicatori energetici	21
5.1	Uso energetico ventilazione.....	21
5.2	Uso energetico riscaldamento	21
6	Conclusioni.....	23
7	Bibliography	24

1 Introduzione

Il seguente report ha lo scopo di identificare degli indicatori prestazionali che descrivano in maniera quantitativa la qualità dell'aria all'interno delle scuole e che permettano di valutare misure di miglioramento delle prestazioni energetiche dell'edificio e della qualità dell'ambiente all'interno delle classi.

Per indicatori prestazionali si intende misure quantificabili. Pertanto non si riferiscono alla singola misura ma mirano a trasformare i dati ricavati dalle campagne di misura e dal monitoraggio in genere di un edificio scolastico in un'informazione pratica e a comunicare in maniera chiara e comprensibile lo stato della qualità dell'aria in una scuola a chi frequenta la scuola e a chi gestisce l'edificio.

Ad indicatori di qualità dell'aria si è voluto affiancare anche indicatori riguardo al comfort termico e acustico e agli usi energetici al fine di fornire una valutazione comprensiva delle soluzioni che verranno messe in campo per migliorare la qualità dell'aria nelle scuole. L'applicazione di ciascun indicatore al caso studio specifico verrà valutata di caso in caso in funzione delle grandezze misurate durante le campagne di misura, della strumentazione disponibile e delle soluzioni di miglioramento messe in campo.

Pertanto, per la selezione degli indicatori prestazionali sono stati presi in considerazione i seguenti aspetti:

- Utilizzo delle aule: ore di occupazione, nr di studenti presenti e attività svolte dagli studenti
- Concentrazione inquinanti indoor (CO₂, formaldeide, VOC, NO₂, O₃, PM_{1-2.5-10}, radon)
- Concentrazione inquinanti outdoor (NO₂, O₃, PM_{1-2.5-10})
- Contaminanti biologici
- Ricambi d'aria (infiltrazioni, ventilazione naturale e meccanica)
- Parametri riguardanti il comfort termico: temperatura dell'aria, temperatura media radiante, temperatura superficiale, umidità relativa, velocità dell'aria
- Parametri riguardanti il comfort acustico: livello di rumore, tempo di riverberazione
- Uso energetico per ventilazione
- Uso energetico per riscaldamento

Non tutti gli indicatori potranno essere ricavati dai dati raccolti durante le campagne di misura. Gli usi energetici verranno derivati e calcolati sulla base di informazioni sul funzionamento degli impianti, consumi medi degli anni precedenti, consumi riportati in bolletta e dati riguardo ad efficienze ed assorbimento elettrico delle macchine.

I parametri riguardanti il comfort acustico vengono riportati per completezza al fine di una corretta valutazione della qualità dell'ambiente interno. Verrà valutato di caso in caso se opportuno fare misure anche riguardo al comfort acustico a seconda delle soluzioni che verranno implementate per il miglioramento della qualità dell'aria e del loro potenziale effetto sul comfort acustico.

Oltre all'interpretazione dei dati delle campagne di monitoraggio, gli indicatori prestazionali troveranno ulteriore applicazione negli strumenti di seguito elencati:

- QAES knowledge sharing platform: sistema per la raccolta dati provenienti dalle misure di qualità dell'aria nelle scuole effettuate con visualizzazione dinamica dei dati e di analisi, di tipo supervised e unsupervised, delle relazioni tra i dati, attraverso strategie di data mining.
- Eurac KPI database [1]: archivio open source di Eurac su indicatori prestazionali per edifici

- Cerplan (Cost Effective renovation Plan) [2]: software che simula scenari di riqualificazione per il parco immobiliare provinciale, determinando le soluzioni più adatte ed economicamente più vantaggiose ed identificando le priorit  d'intervento. Grazie a questi indicatori, le priorit  di intervento negli edifici scolastici saranno anche determinate dallo stato della qualit  dell'aria.

Come descritto di seguito, alcuni indicatori saranno accompagnati anche da una visualizzazione grafica predefinita in modo da rendere l'informazione ancora pi  chiara.

2 Indicatori della qualità dell'aria

In questo capitolo vengono descritti gli indicatori proposti per valutare la qualità dell'aria nelle scuole. I primi tre paragrafi si riferiscono ad indicatori di rischio che valutano la concentrazione dell'inquinante in relazione ai valori limite di esposizione raccomandati dalle linee guida sulla qualità dell'aria. L'ultimo paragrafo tratta invece indicatori di impatto sulla salute dell'esposizione ai diversi inquinanti.

2.1 Indicatori basati sul valore limite di esposizione (Exposure Limit Value)

La concentrazione degli agenti inquinanti non è sufficiente per determinare gli effetti sulla salute dei bambini e degli insegnanti; è necessario definire anche la durata dell'esposizione. Per valore limite di esposizione (VLE o in inglese ELV) si intende il limite di concentrazione al di sopra del quale l'esposizione comporta rischi per la salute. I VLE sono stabiliti a livello nazionale e mondiale (Organizzazione Mondiale della Sanità) da comitati di esperti tra cui medici di medicina, tossicologia, chimica, igienisti, farmacisti, ecc. I valori limite proposti dalle autorità competenti possono differire in funzione dei dati e della metodologia applicata.

Come riportato nel report dell'IEA Annex 68 sugli indicatori di qualità dell'aria [3] esistono due livelli di VLE:

- Valori di riferimento della tossicità (TRV): sono determinati per molti composti utilizzando i dati ottenuti negli esperimenti su animali. I limiti ottenuti negli studi con animali sono stati usati per stabilire i limiti per l'uomo applicando un fattore di sicurezza di almeno 100 (per esempio, se gli effetti sulla salute negli esperimenti su animali compaiono a $1.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$, il TRV per un essere umano è fissato a $\leq 10 \mu\text{g} / \text{m}^3$);
- Valori indicativi per l'aria indoor (IAGV): vengono determinati utilizzando i dati degli studi epidemiologici che esaminano la correlazione tra i sintomi di salute osservati in una popolazione di individui esposti al composto al chiuso. Sono disponibili solo per il numero limitato di composti.

In linea con il paradigma della tossicologia "è la dose che rende il veleno", devono essere considerati sia il livello di concentrazione che la durata dell'esposizione. Di conseguenza, è possibile trovare diversi TRV o IAGV per tempi di esposizione diversi per un singolo inquinante in base al tempo medio. Un esempio è il limite di esposizione per la formaldeide che è $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ per 30 min (esposizione a breve termine [4]) e $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ per 1 anno (esposizione a lungo termine [5]).

Per la selezione dei valori di riferimento abbiamo applicato il principio di priorità geografica, dando priorità ai valori stabiliti dalle autorità competenti a livello locale ove disponibili.

In Tabella 1 sono indicati i valori limite di esposizione stabiliti dalle autorità competenti per ciascuna sostanza inquinante e il relativo periodo di riferimento sulla base del quale mediare la misura.

Si distinguono due principali categorie di valutazione in base all'estensione del periodo di riferimento:

- Long term: in genere riferito ad una esposizione prolungata per un periodo superiore alla settimana fino ad un anno, quindi il valore limite di esposizione viene confrontato con la concentrazione inquinante media durante l'intero anno. La concentrazione media annuale può essere stimata con campagne di misura di 1-2 settimane in estate e in inverno;
- Short term: in genere riferito ad un periodo di tempo inferiore alle 24h.

Nel caso di edifici scolastici i valori limite di esposizione vengono calcolati sul periodo di occupazione delle aule, ovvero l'orario scolastico.

Tabella 1. Valori limite di esposizione media sul periodo di riferimento.

Sostanza inquinante	Long term		Short term		Fonte bibliografica
	Valore limite di esposizione	Periodo di riferimento	Valore limite di esposizione	Periodo di riferimento	
Anidride carbonica (CO ₂)	-	-	1500 ppm	1h	CasaClima school [6]
Biossido di azoto (NO ₂)	40 µg/m ³	Anno o settimana	200 µg/m ³	1 h	WHO, 2010 [4] e INDEX, 2005 [7].
Ozono (O ₃)	-	-	100 µg/m ³	8 h	WHO, 2005 [8]
Monossido di Carbonio	-	-	10 µg/m ³	8 h	WHO, 2010 [4]
Radon	200 Bq/m ³	1 anno	-	-	livello di riferimento per edifici nuovi in Alto Adige, [Dlg nr 241, 2000]
	400 Bq/m ³	1 anno	-	-	livello di riferimento per edifici esistenti in Alto Adige [Dlg nr 241, 2000]
	300 Bq/m ³	Min 90 gg durante il periodo invernale	-	-	Consiglio federale svizzero, Ordinanza sulla radioprotezione (ORaP) del 26 aprile 2017 ¹
Total VOC	-	-	600 µg/m ³	24-h	IEA Annex 68 [1]
Formaldeide	10 µg/m ³	1 anno	100 µg/m ³	30 min	WHO, 2010 [4], INDEX, 2005 [7] e ANSES, 2007 [5]
PM ₁₀	20 µg/m ³	1 anno	50 µg/m ³	24 h	WHO, 2005 [8]
PM _{2.5}	10 µg/m ³	1 anno	25 µg/m ³	24 h	

Al fine di tradurre la valutazione dell'esposizione a diversi tipi di inquinanti in un'unica sintetica rappresentazione si sono scelti gli indicatori proposti dal gruppo di lavoro dell'IEA Annex 68 [9]. I valori limite di esposizione possono tradursi in un indicatore che compara la concentrazione di ciascun contaminante con il valore limite di riferimento per quel contaminante, come calcolato nella seguente equazione:

$$I_i = \frac{C_i}{ELV_i}$$

C_i concentrazione del contaminante i

ELV_i Exposure Limit Value del contaminante i

In pratica l'indicatore segnala se la concentrazione è superiore ($I > 1$) o inferiore ($I < 1$) al valore limite sul periodo di riferimento segnalando quindi un potenziale rischio.

Per periodi short term, è possibile calcolare anche il numero di intervalli temporali in cui la concentrazione di un inquinante supera il valore limite (ELV), secondo la seguente equazione:

¹ Nuova ordinanza federale dal 1° di gennaio 2018 (<https://www.admin.ch/opc/it/classified-compilation/20163016/index.html#id-4-3>)

$$\sum h|C_i > ELV$$

Tali indicatori presentano due principali vantaggi: 1) sono facili da comprendere e comunicare; 2) permettono di confrontare il livello di rischio dovuto a più sostanze inquinanti.

Possono essere rappresentati con un grafico di tipo radar [10] come mostrato in Figura 1.

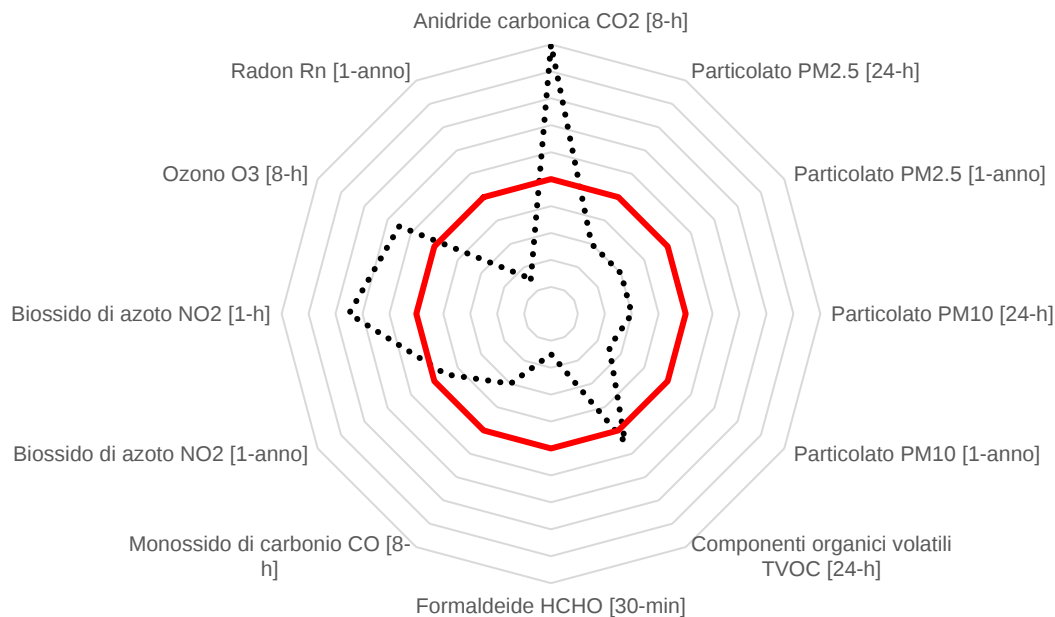


Figura 1. Esempio di rappresentazione grafica degli indicatori basati sul valore limite di esposizione per diversi inquinanti e sulla base di diversi periodi di riferimento.

2.2 Concentrazione inquinanti indoor

A completamento degli indicatori di rischio descritti al par. **Error! Reference source not found.**, la distribuzione statistica delle concentrazioni di ciascun inquinante indoor sul periodo di riferimento verranno rappresentate anche attraverso box-plot. In Figura 2 viene riportato un esempio di rappresentazione della distribuzione statistica delle concentrazioni di CO₂ in un ambiente. Questo tipo di rappresentazione aggiunge informazioni importanti riguardo ai valori minimi e massimi della concentrazione dell'inquinante misurati nell'ambiente e questi possono essere confrontati con i valori medi.

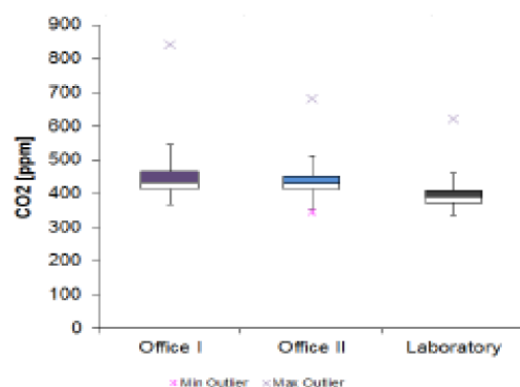


tabella CO2	Office I	Office II	Lab
Minimum	365	330	335
Maximum	883	872	652
Median	435	432	391
% over 1000 ppm	0	0	0
Lower quartile (25%)	415	415	374
Upper quartile (75%)	466	453	410

Figura 2. Esempio di rappresentazione grafica delle concentrazioni di CO2 in un ambiente. Fonte: <http://kpidb.eurac.edu/>

Secondo la recente norma EN 16798-2: 2019 [11][11], la concentrazione di CO2 viene utilizzata anche come indicatore della qualità dell'aria di un ambiente in genere. La norma identifica quattro categorie di comfort a seconda della differenza di concentrazione di CO2 tra interno della classe ed ambiente esterno. La prima categoria di comfort è indicata per le scuole dell'infanzia, mentre la seconda categoria per tutte le altre scuole nuove e la terza categoria per le scuole risanate.

Tabella 2. Differenza massima di concentrazione di CO2 tra interno ed esterno per ciascuna categoria di comfort definita nella norma EN 16798-2: 2019.

Categoria	ΔCO_2 [ppm]
I	550
II	800
III	1350
IV	1350

Dalle misurazioni di CO2 esterna verrà derivata una concentrazione media di CO2 esterna che verrà utilizzata per definire le concentrazioni di CO2 limite nelle quattro categorie identificate.

Per ogni ora di occupazione della classe, la concentrazione media di CO2 verrà confrontata con le concentrazioni limite di ciascuna categoria. Le ore totali di occupazione verranno aggregate in funzione della categoria di qualità dell'aria calcolata e rappresentate attraverso un istogramma (esempio in Figura 3).

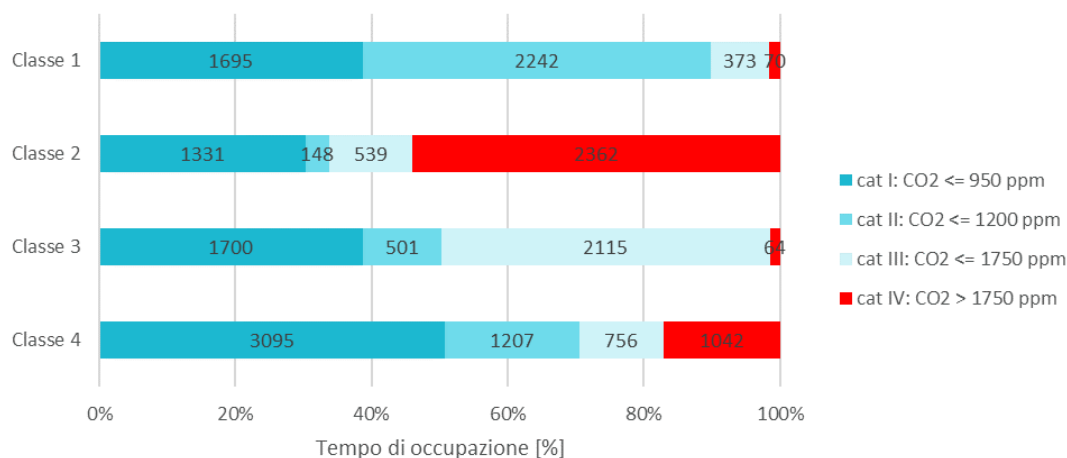


Figura 3. Ore di occupazione divise per classe monitorata e per categoria di qualità dell'aria secondo EN 16798-2, ipotizzando una concentrazione di CO2 media esterna di 400 ppm.

2.3 Indicatori di contaminazione biologica

Per quanto riguarda i contaminanti biologici sono stati identificati i seguenti indicatori [12]:

- **Unità Formanti Colonia (UFC)** per m³ di aria: Concentrazione totale di batteri e funghi nell'aria. Il giudizio sulla carica microbica totale si può ritenere “buono” se questa risulta compresa tra 0 e 25 UFC/24 cm² di superficie (corrispondenti a 0 - 104 UFC/100cm²)
- **Indice Globale di Contaminazione Microbica (IGCM)** per m³ di aria: UFC batteri mesofili (37°C) + UFC batteri psicrofili (20°C) + UFC miceti.
Per IGCM/m³<1000 il livello di contaminazione è considerato “Basso”.
Per IGCM/m³>5000 si entra nella categoria di contaminazione “Alta”.
- **Indice di Contaminazione da batteri Mesofili (ICM)**: UFC batteri mesofili (37°C) / UFC batteri psicrofili (20°C). Tale indice valuta il contributo, alla contaminazione totale, dei batteri di origine umana, tra i quali possono essere presenti patogeni. È indicativo del livello di affollamento e dell'efficienza dei ricambi d'aria.
- **IA (Indice di Amplificazione)**: IGCM indoor / IGCM outdoor. Tale indice valuta eventuali fenomeni di accumulo interno della contaminazione (stato igienico).

2.4 Disability Adjusted Life Year

Come definito dall'Organizzazione Mondiale della Sanità [13], il “Disability Adjusted Life Year (DALY)” è una unità di misura che rappresenta un anno di vita “sana” perso a causa di una malattia, o in questo caso, dell'esposizione a sostanze inquinanti indoor. Misura l'impatto complessivo sulla salute di una popolazione, considerando sia disabilità che morte precoce, e permette di confrontare lo stato attuale di salute della popolazione con uno stato ideale in cui la popolazione vive fino ad età avanzata senza malattie o disabilità dovute all'esposizione alle sostanze inquinanti indoor.

Questo indicatore informa i policy e i decision makers riguardo al peso di ciascun inquinante sulla salute di una popolazione permettendo di indirizzare sforzi e investimenti verso gli inquinanti più pericolosi.

Può essere calcolato solo considerando esposizioni a lungo termine, in genere nell'arco di un anno.

$$DALYs = DALY\ factor * disease\ incidence$$

Secondo Logue et al. 2012 [14], DALY lost sono state stimate per ogni inquinante secondo due diversi metodi:

- Metodo intake-incidence-DALY (IND) basato su dati epidemiologici che quantificano il tasso di incidenza della malattia secondo funzioni C-R (concentration-response);
- Metodo intake-DALY (ID) method basato su dati tossicologici di animali che quantificano l'impatto sulla salute delle sostanze inquinanti inalate.

Il metodo IND è il più preciso perché non implica estrapolazioni interspecie, ma necessita di funzioni C-R che non sono disponibili per tutti le sostanze inquinanti.

Le funzioni C-R seguono nella maggioranza dei casi l'equazione:

$$\Delta incidence = -\{y_0 * [\exp(-\beta \Delta C_{exposure}) - 1]\} * population$$

y_0 = diffusione base della malattia per anno

β = coefficiente del cambio di concentrazione

$\Delta C_{\text{exposure}}$ = concentrazione relativa all'esposizione, calcolata considerando la concentrazione media dell'inquinante ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) per la percentuale di occupazione dell'ambiente indoor

population = nr di persone esposte (in genere ci si riferisce a 100'000 persone)

Tabella 3. Parametri delle funzioni C-R per le malattie causate da ciascun inquinante a DALYs. Fonte: Logue et al. 2012 [14]

Pollutant	Outcome	β -Coefficient (95% CI)	y_0	DALYs lost per incidence (95% CI)
PM _{2.5}	Total mortality (Pope et al. 2002)	0.058 (0.002, 0.010)	7.4×10^{-3}	1.4 (0.14, 14) (Pope 2007; Pope et al. 2002, 2009)
	Chronic bronchitis (Abbey et al. 1995)	0.091 (0.078, 0.105)	0.4×10^{-3}	1.2 (0.12, 12) (Lvovsky et al. 2000; Melse et al. 2010)
	Nonfatal stroke (Brook et al. 2010)	0.025 (0.002, 0.048)	0.2×10^{-3}	0 complications: 9.5 (9.25, 9.75)
				1 complication: 11.7 (11.1, 12.4)
				> 1 complication: 13.1 (12.2, 14.0) (Hong et al. 2010)
CO	Hospital admissions (Burnett et al. 1999)			4×10^{-4} (Lvovsky et al. 2000)
	Asthma	0.033 (0.016, 0.050)	1.8×10^{-3}	
	Lung disease	0.025 (0.000, 0.057)	2.1×10^{-3}	
	Dysrhythmias	0.058 (0.012, 0.102)	2.4×10^{-3}	
	Heart failure	0.034 (0.002, 0.066)	3.4×10^{-3}	
NO ₂	Hospital admissions (Burnett et al. 1999)			4×10^{-4} (Lvovsky et al. 2000)
	Respiratory issues	0.004 (0.000, 0.008)	9.5×10^{-3}	
	Congestive heart failure	0.003 (0.001, 0.004)	3.4×10^{-3}	
	Ischemic heart disease	0.003 (0.002, 0.004)	8.0×10^{-3}	
	Respiratory illness, indicated by symptoms (Hasselblad et al. 1992)	0.028 (0.002, 0.053)	N/A	4×10^{-4} (Lvovsky et al. 2000)
Ozone	Mortality (Jerrett et al. 2010; Samet et al. 1997)	0.001 (0.000, 0.002)	7.7×10^{-3}	1.0 (0.1, 10) (Levy et al. 2001; Lvovsky et al. 2000)

	Hospital admissions (Burnett et al. 1999)			4×10^{-4} (Lvovsky et al. 2000)
	Asthma	0.003 (0.001, 0.004)	1.8×10^{-3}	
	Lung disease	0.003 (0.001, 0.005)	2.1×10^{-3}	
	Respiratory infection	0.002 (0.001, 0.003)	5.8×10^{-3}	
	Dysrhythmias	0.002 (0.000, 0.004)	2.4×10^{-3}	

In Figura 4 sono riportati DALYs riferiti a diverse sostanze inquinanti e calcolati secondo diversi metodi.

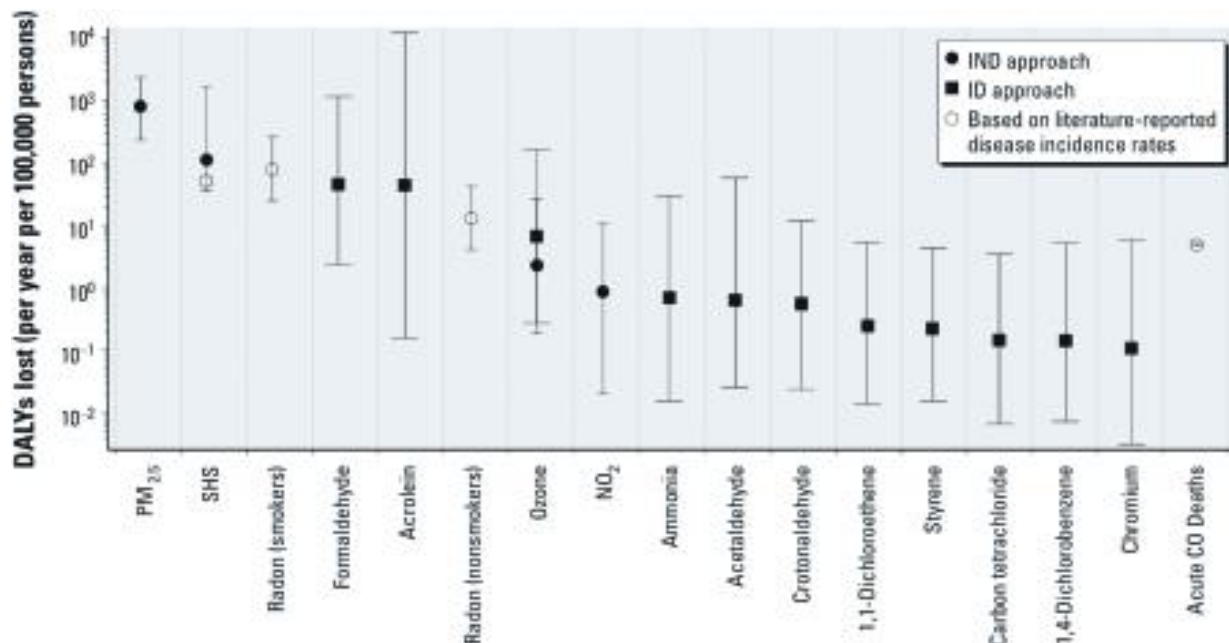


Figura 4. DALY calcolati per diverse sostanze inquinanti secondo diversi metodi. Source: Logue et al., 2012 [14]

3 Indicatori comfort termico

Oltre alla qualità dell'aria, un altro parametro fondamentale per la valutazione della qualità dell'ambiente interno è il comfort termico. Nei paragrafi seguenti sono riportati gli indicatori selezionati per valutare la percezione del comfort termico e il livello di surriscaldamento estivo nelle scuole.

3.1 Predicted Mean Value (PMV) e Percentage of Person Dissatisfied (PPD)

Il modello PMV-PPD è stato sviluppato a partire dagli esperimenti fatti da Fanger negli anni '70. PMV sta per Predicted Mean Vote (in italiano, Voto Medio Previsto), ed è un indice di valutazione dello stato di benessere termoisometrico, comunemente chiamato comfort termico, di un individuo medio. Viene calcolato sulla base di quattro parametri ambientali (temperatura dell'aria, temperatura media radiante, umidità relativa e velocità dell'aria) e due parametri personali (clothing level - clo: misura dell'isolamento termico dei vestiti indossati; metabolic rate - met: misura del tasso metabolico, che dipende dall'attività svolta). PPD sta per Percentage of Person Dissatisfied, ovvero percentuale di persone insoddisfatte in un determinato ambiente, e viene calcolato a partire dal PMV.

L'output del calcolo del PMV è un valore detto "thermal sensation" (sensazione termica) normalmente compreso fra +3 (hot, ovvero molto caldo) e -3 (cold, ovvero molto freddo). Lo 0 è considerato il punto neutrale e, nel modello PMV-PPD, è considerato il punto di maggiore comfort termico. Questo vuol dire che in un gruppo di persone sufficientemente grande da avere valenza statistica, se una certa combinazione di parametri ambientali e personali produce $PMV = 0$, allora la maggior parte delle persone sarà termicamente confortevole. Tuttavia il corrispondente PPD è 5%, e non 0%, poiché gli esperimenti evidenziarono che anche in condizioni di neutralità alcune persone possono essere non soddisfatte.

In QAES gli indici PMV-PPD possono essere calcolati a partire dai dati rilevati da EQ-OX (quattro parametri ambientali) e assumendo dei valori verosimili per il clo e met degli studenti e degli insegnanti. L'algoritmo di calcolo è riportato nello standard UNI EN ISO 7730-2006 [15] e anche in quello americano ASHRAE 55-2017 [16]. Per velocità dell'aria non superiori a 0.1 m/s i due algoritmi sono identici. Per valori superiori a 0.1 m/s invece lo standard ASHRAE 55 contiene una versione più complessa ed aggiornata che consente di stimare meglio l'effetto di velocità dell'aria elevate; questa versione include un calcolo basato su un semplice modello fisiologico del corpo umano ed è considerata un po' più affidabile anche in condizioni non stazionarie (il modello originale di Fanger era stato sviluppato in condizioni ambientali stazionarie). In QAES sarà quindi fatto il calcolo secondo ASHRAE 55. Tuttavia, va sottolineato che la differenza fra i due algoritmi aumenta significativamente con l'aumentare della velocità dell'aria.

I valori orari (o eventualmente anche sub-orari) calcolati di PMV e PPD sanno rappresentati con box-plot e istogrammi per ogni aula scolastica (Figura 6). Considerando che gli esperimenti di Fanger (e successivi) furono fatti con soggetti adulti, i risultati andranno analizzati in maniera critica considerando l'età degli studenti. Per l'indice PMV l'ampiezza di ciascuna barra dell'istogramma sarà valutata in base ai risultati. Tipicamente le barre possono essere 7 (quindi tante quante i punti sulla scala ASHRAE (Figura 5) oppure multipli di 7 qualora risulti interessante avere una risoluzione più alta. Questo ad esempio è il caso in cui gran parte dei valori siano concentrati in una zona (ad esempio intorno allo 0 - neutral). Per il PPD invece è importante notare che l'indice non fornisce indicazioni sulla direzione del discomfort (caldo oppure freddo), ma solo sulla sua magnitudine. A differenza del PMV è quindi possibile calcolare media e mediana, ma tali valori vanno sempre letti guardando anche la distribuzione del PMV per un'analisi completa e accurata.

Seven-point thermal sensation scale

+ 3	Hot
+ 2	Warm
+ 1	Slightly warm
0	Neutral
- 1	Slightly cool
-2	Cool
- 3	Cold

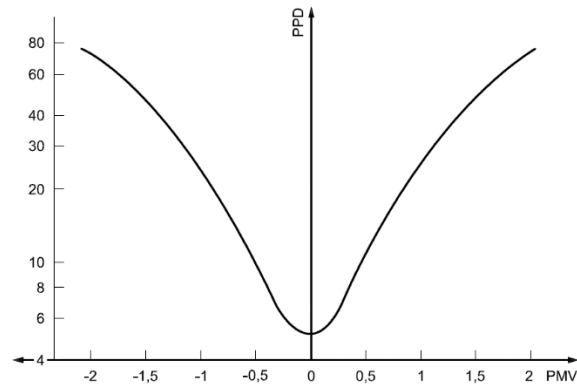


Figura 5. Relazione tra PMV e thermal sensation scale (sinistra) e relazione tra PMV e PPD (destra).

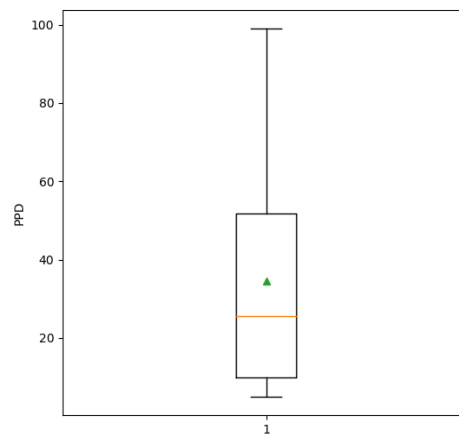
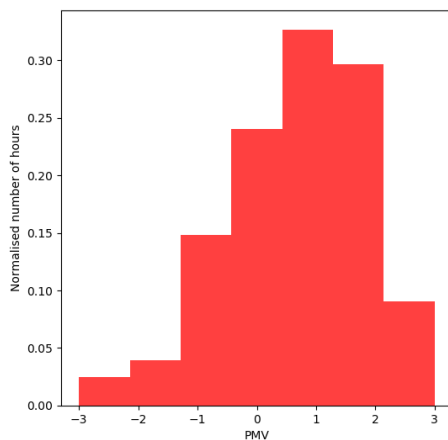


Figura 6. Rappresentazione della frequenza del PMV (sinistra) e box plot dei valori PPD (destra) per ogni aula scolastica.

3.2 Modello adattivo di comfort termico

In aggiunta al modello PMV-PPD per i periodi dell'anno in cui un edificio è ventilato naturalmente è più opportuno utilizzare il modello di comfort adattivo. Questo modello è stato sviluppato più recentemente rispetto all'altro e a livello europeo è incluso dalla norma UNI EN 16798-1: 2019 [17], ma ne esistono molti altri a livello mondiale fra cui quello contenuto nella ASHRAE 55: 2017 [16]. In generale l'approccio adattivo è applicabile quando (i) non ci sono sistemi di raffrescamento e riscaldamento, (ii) gli occupanti sono impegnati in attività moderate e (iii) possono adattare il loro vestiario alla temperatura, e (iv) la temperatura media esterna è compresa indicativamente fra 10°C e 33°C.

L'ipotesi base dell'approccio adattivo, che poi ha portato ai vari modelli adattivi, è che la temperatura di comfort interna dipenda dalla temperatura esterna dei giorni immediatamente precedente. In particolare si calcola la media della temperatura esterna nel periodo precedente, da questa si ricava la temperatura di comfort e infine i range di comfort. I vari modelli differiscono per il modo in cui si calcolano la temperatura esterna nel periodo precedente e quella di comfort (e quindi i range) e anche per i limiti di applicabilità. In generale tali differenze riflettono usi e costumi di diverse parti del mondo (ad esempio il modello indiano accetta temperature più elevate di quello europeo).

In QAES si considera il modello UNI EN 16798-1: 2019 [17]: si presentano dei grafici per illustrare l'andamento della temperatura interna in relazione ai vari range di accettabilità e si calcolano le ore occupate in cui una stanza si trova nei vari range (Figura 7). Nella norma la temperatura di comfort è chiamata "optimal operative temperature".

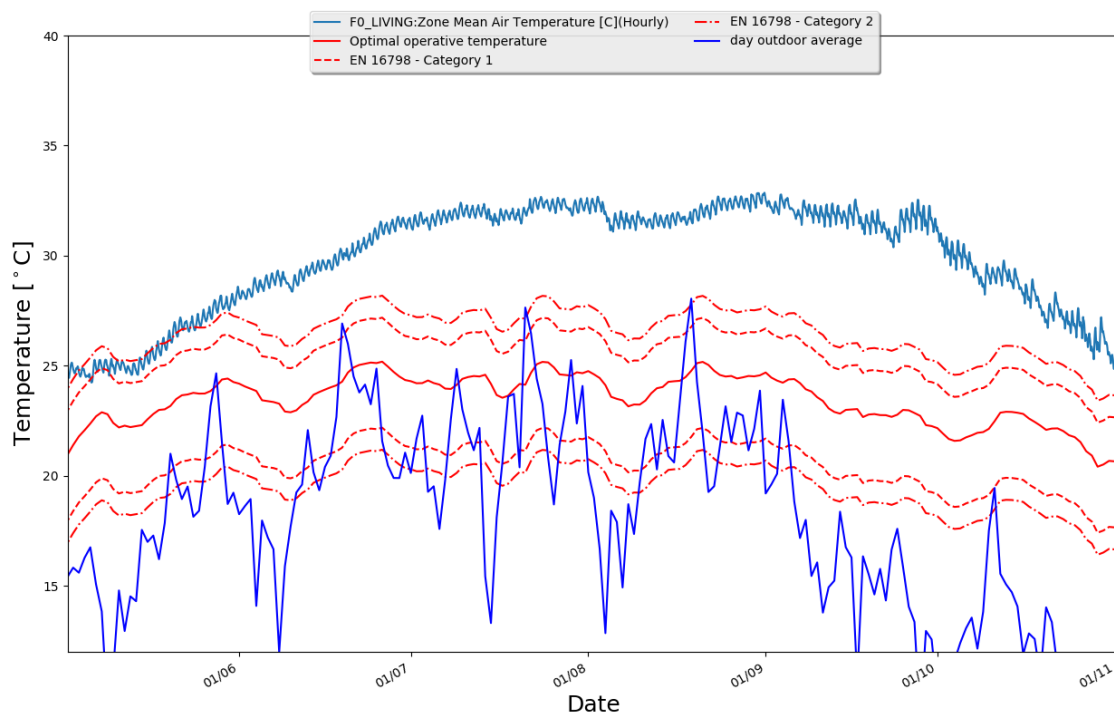


Figura 7. Andamento della temperature operativa in relazione alla temperature media esterna e al range di comfort suggerito dal modello di comfort termico adattivo secondo la norma UNI EN 16798-1: 2019.

Per poter confrontare le prestazioni in termini di comfort termico adattivo, si possono rappresentare su un grafico a barre il numero di ore di occupazione divise per categoria di comfort adattivo di riferimento per ogni classe monitorata (esempio in Figura 8).

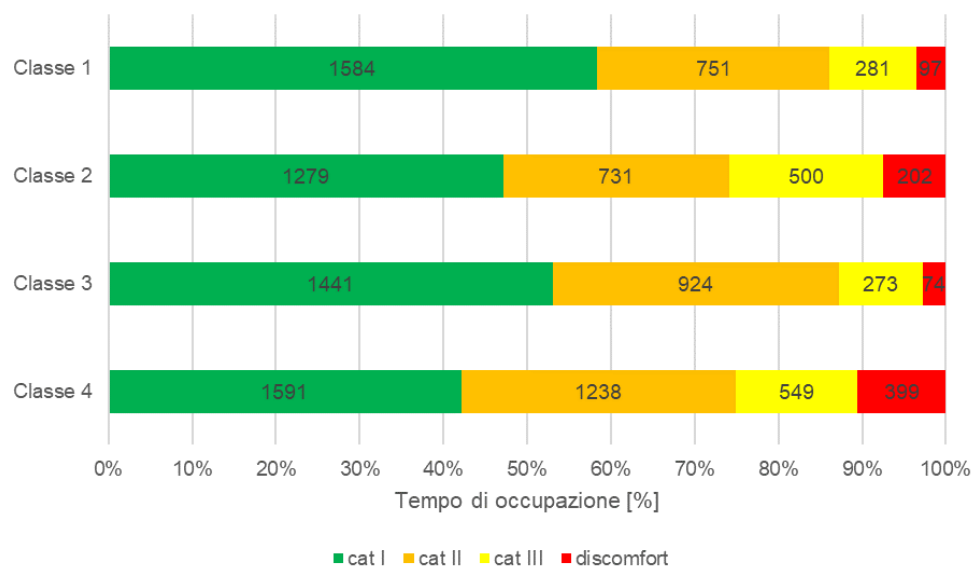


Figura 8. Ore di occupazione divise per classe monitorata e per categoria di comfort adattivo secondo EN 16798-1.

3.3 Overheating

Frequenza e durata del surriscaldamento (overheating) all'interno di ogni aula presa a campione possono essere valutate grazie alla combinazione di due indicatori: il numero di ore di overheating ed il grado di overheating.

Il numero di ore di overheating rappresenta il numero di ore in cui la temperatura dell'aria interna (T_{ind}) è maggiore della temperatura di comfort di riferimento (T_{ref}) quando l'aula è occupata dagli studenti.

$$OHH = \sum h \parallel T_{ind} > T_{ref}$$

Il grado di overheating rappresenta invece il numero di gradi di differenza tra temperatura dell'aria interna (T_{ind}) e la temperatura di comfort di riferimento quando la temperatura dell'aria è superiore alla temperatura di comfort e l'aula è occupata.

$$OHD = \sum h \parallel T_{ind} - T_{ref} \text{ and } T_{ind} > T_{ref}$$

Secondo la norma UNI EN 16798-1:2019 la temperatura di riferimento è pari a 25.5°C nelle scuole dell'infanzia (categoria di comfort I) e 26°C nelle altre scuole (categoria di comfort II).

Tali indicatori sono da calcolarsi separatamente per stagione di riscaldamento e non.

3.4 Overcooling

Frequenza e durata di temperature troppo fredde (overcooling) all'interno di ogni aula presa a campione possono essere valutate grazie alla combinazione di due indicatori: il numero di ore di overcooling ed il grado di overcooling.

Il numero di ore di overcooling rappresenta il numero di ore in cui la temperatura dell'aria interna (T_{ind}) è minore della temperatura di comfort di riferimento (T_{ref}) quando l'aula è occupata dagli studenti.

$$OCH = \sum h \parallel T_{ind} < T_{ref}$$

dove

h = nr di ore occupate

T_{ind} = temperatura dell'aria interna

T_{ref} = temperatura di comfort di riferimento

Il grado di overcooling rappresenta invece il numero di gradi di differenza tra temperatura dell'aria interna (T_{ind}) e la temperatura di comfort di riferimento quando la temperatura dell'aria è inferiore alla temperatura di comfort e l'aula è occupata.

$$OCD = \sum h \parallel T_{ref} - T_{ind} \text{ and } T_{ind} < T_{ref}$$

Secondo la norma UNI EN 16798-1:2019 la temperatura di riferimento è pari a 21°C nelle scuole dell'infanzia (categoria di comfort I) e 20°C nelle altre scuole (categoria di comfort II).

Gli indicatori sono da calcolarsi separatamente per stagione di riscaldamento e non.

4 Indicatori di comfort acustico

La progettazione acustica delle aule scolastiche è finalizzata al raggiungimento di condizioni acustiche per una buona intelligibilità del parlato. Per intelligibilità del parlato si intende la percentuale di parole o frasi correttamente comprese da un ascoltatore rispetto alla totalità delle frasi pronunciate da un parlatore. Il fine è quello di ridurre da un lato lo sforzo vocale degli insegnanti e dall'altro di migliorare l'attenzione e l'apprendimento degli studenti.

In Italia la nuova norma UNI 11532 – 2, che sarà a breve pubblicata, introduce i requisiti da considerare in fase di progettazione e di verifica nelle scuole. La norma è volontaria per gli edifici privati ma ha carattere cogente per gli edifici pubblici, in quanto richiamata dal decreto dell'11 ottobre 2017 "Criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici" [18]. Il Decreto infatti fa riferimento alla norma UNI 11532 per quanto riguarda gli aspetti legati al confort acustico e alla norma UNI 11367:2010, "Classificazione acustica delle unità immobiliari - Procedura di valutazione e verifica in opera" [19], per quanto riguarda gli aspetti di isolamento acustico. Di seguito vengono anticipati i parametri che saranno introdotti con ogni probabilità nella nuova norma, come descritto recentemente da Astolfi et al. [20].

4.1 Lo Speech Transmission Index (STI)

Il principale *key performance indicator* per l'acustica delle aule scolastiche è lo Speech Transmission Index (STI), che quantifica l'effetto combinato di rumore di fondo e di riverberazione sulla riduzione dell'intelligibilità di parlato, con o senza sistemi di amplificazione sonora [21]. Il parametro si ottiene tramite una procedura con la quale si determina la riduzione dell'indice di modulazione di un segnale di test che riflette le caratteristiche del parlato continuo, dalla sua emissione alla sua ricezione (Figura 9).

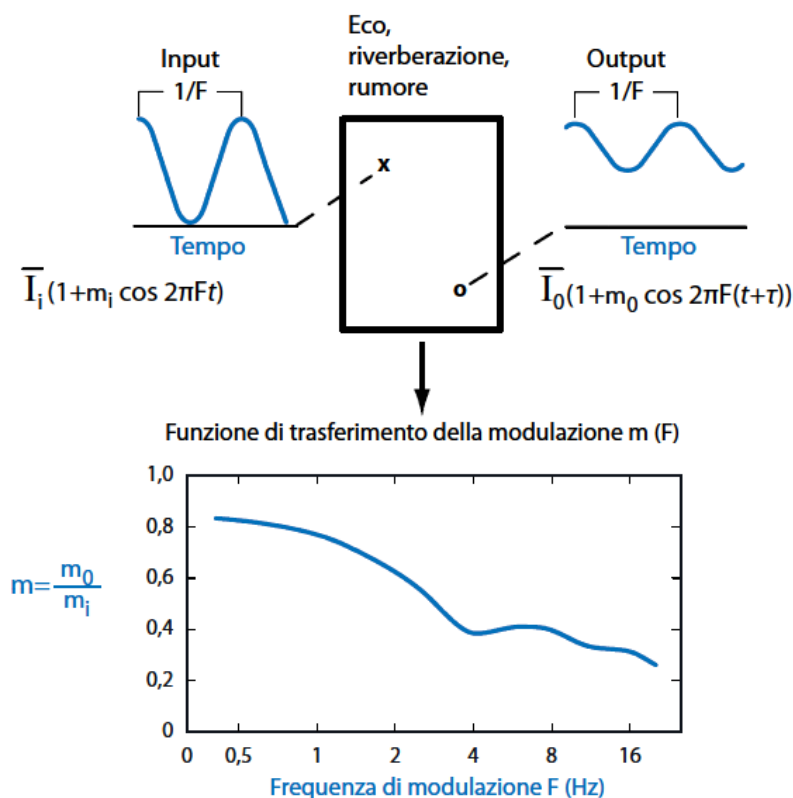


Figura 9. Schema che illustra la procedura con la quale si determina la riduzione dell'indice di modulazione di un segnale di test che riflette le caratteristiche del parlato continuo. Fonte: Astolfi et al., 2010 [21]

L'indice può assumere valori tra 0 e 1 ed è stato correlato a scale soggettive di intelligibilità (Tabella 4) riferita a persone adulte.

Tabella 4. Scala di valutazione di intelligibilità.

Valutazione di intelligibilità	STI [-]
Eccellente	> 0,75
Buono	0,60 – 0,75
Discreto	0,45 – 0,60
Scadente	0,30 – 0,45
Pessimo	< 0,30

I valori del fattore di riduzione dell'indice di modulazione $m_{f,F}$ si possono ottenere da misure indipendenti del rapporto segnale-rumore e della risposta all'impulso dell'ambiente, attraverso la seguente equazione:

$$m_{f,F} = \frac{\int_0^{\infty} e^{-j2\pi Ft} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \cdot \frac{1}{\left(1 + 10^{\frac{-(S/N)_f}{10}}\right)}$$

dove

$p(t)$ è la risposta all'impulso misurata in assenza di rumore [Pa];

S/N_f è il rapporto segnale – rumore, ovvero la differenza fra il livello del segnale e dello del rumore nella banda f considerata [dB];

F è la frequenza di modulazione [Hz].

Facendo riferimento ad un campo sonoro diffuso, per distanze dalla sorgente molto maggiori della distanza critica, l'indice di modulazione si può ottenere dalla seguente equazione:

$$m_{f,F} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi \cdot F \cdot T_f}{13,8}\right)^2}} \cdot \frac{1}{1 + 10^{\frac{-(S/N)_f}{10}}}$$

dove T_f è il tempo di riverberazione in secondi alla frequenza f .

Per l'indice STI si considerano 7 bande di ottava (frequenza f), da 125 Hz a 8000 Hz, e 14 frequenze di modulazione F , comprese tra 0,63 e 12,5 Hz, in intervalli di un terzo d'ottava. Si ottengono in questo modo 98 (7 x 4) valori dell'indice di modulazione m che vengono infine sintetizzati nell'indice STI.

Il parametro, oltre che dal rumore e dalla riverberazione, dipende dalle caratteristiche di emissione della voce umana, in particolare dall'intensità di emissione, variabile a seconda dello sforzo vocale del parlatore, dalla direttività della sorgente del parlatore e da altri fattori di natura linguistica (struttura grammaticale della lingua) e semantica (senso generale del messaggio parlato) [21].

L'approccio seguito dalla norma UNI 11532 – 2 è quello di considerare uno sforzo vocale dell'insegnante "normale", secondo la classificazione data dalla norma ANSI 3.5 [19], per ambienti sotto 250 m³ (corrispondente ad un livello L_{Aeq} pari a 60 dB(A) a 1 m dall'insegnante), fino a "elevato", per ambienti sopra i 250 m³, con o senza sistemi di amplificazione (corrispondente a 70 dB(A)) [20]. L'aula viene così progettata in modo che, garantendo tempi di

riverberazione e livelli di rumore dagli impianti e ambientale raccomandati dalla norma, si ottengano valori di STI che garantiscano buone condizioni di comprensione del parlato.

Se da un lato il rumore generato dagli impianti e il rumore ambientale esterno possono essere stimati in fase di progettazione, il rumore legato all'attività scolastica viene trascurato in fase sia di progetto che di collaudo. I livelli di rumore all'interno degli ambienti scolastici vengono controllati indirettamente attraverso la progettazione di strutture di facciata e di partizioni interne con adeguato potere fonoisolante e, direttamente, attraverso il controllo del rumore generato dalle componenti impiantistiche [20].

4.2 Indicatori acustici e riferimenti per la misura

La Tabella 5 riporta i parametri da considerare e i riferimenti normativi per la loro misurazione in opera, assieme ai valori obbiettivo.

Tabella 5. Indicatori acustici e riferimenti normativi per la loro misurazione in opera.

Parametro	Metodo di misura	Valore di riferimento
$D_{2m,nT,w}$ - Descrittore dell'isolamento acustico normalizzato di facciata	UNI EN ISO 16283-3:2016 [22]	43 dB
R'_w - Descrittore del potere fonoisolante apparente di partizioni fra ambienti di differenti unità immobiliari	UNI EN ISO 16283-1:2014 [23]	56 dB
L'_{nw} - Descrittore del livello di pressione sonora di calpestio normalizzato fra ambienti di differenti unità immobiliari	UNI EN ISO 16283-2:2018 [24]	53 dB
L_{ic} - Livello sonoro corretto immesso da impianti a funzionamento continuo in ambienti diversi da quelli di installazione	UNI 8199:2016 [25]	28 dB
L_{id} - Livello sonoro massimo corretto immesso da impianti a funzionamento discontinuo in ambienti diversi da quelli di installazione	UNI 8199:2016 [26]	34 dB
$D_{nT,w}$ - Descrittore dell'isolamento acustico normalizzato di partizioni fra ambienti sovrapposti della stessa unità immobiliare	UNI EN ISO 16283-1:2014 [23]	55 dB
$D_{nT,w}$ - Descrittore dell'isolamento acustico normalizzato di partizioni fra ambienti adiacenti della stessa unità immobiliare	UNI EN ISO 16283-1:2014 [23]	50 dB
L'_{nw} - Descrittore del livello di pressione sonora di calpestio normalizzato fra ambienti sovrapposti della stessa unità immobiliare	UNI EN ISO 16283-2:2018 [24]	53 dB
$L_{ic,int}$ - Livello di rumore generato da impianti a funzionamento continuo installati all'interno dell'aula	UNI 8199:2016 [25]	UNI 11532 – 2 (in attesa di pubblicazione), Astolfi et. [20]
L_{amb} - Livello del rumore ambientale nell'aula arredata e non occupata, derivante dal rumore ambientale esterno e dagli impianti a funzionamento continuo	UNI 8199:2016 [25]	UNI 11532 – 2 (in attesa di pubblicazione), Astolfi et. [20]
RT – tempo di riverberazione	UNI EN ISO 3382-2:2008 [26]	UNI 11532 – 2 (in attesa di pubblicazione), Astolfi et. [20]
STI – Speech Transmission Index	IEC 60268-16:2011 [27]	UNI 11532 – 2 (in attesa di pubblicazione), Astolfi et. [20]
C50 - Chiarezza	UNI EN ISO 3382-1:2009 [28]	UNI 11532 – 2 (in attesa di pubblicazione), Astolfi et. [20]

I valori di riferimento per $L_{ic,int}$ e L_{amb} sono riportati in Tabella 6, in funzione della tipologia di ambiente [20].

Tabella 6. Valori di riferimento per livello di rumore generato da impianti a funzionamento continuo installati all'interno dell'aula ($L_{ic,int}$) e livello del rumore ambientale nell'aula arredata e non occupata, derivante dal rumore ambientale esterno e dagli impianti a funzionamento continuo (L_{amb}).

Tipologia di ambiente	$L_{ic,int}$ dB(A)	L_{amb} dB(A)
Classi e biblioteche con $V < 250 \text{ m}^3$	≤ 34	≤ 38
Classi e biblioteche con $V \geq 250 \text{ m}^3$	≤ 38	≤ 41
Ufficio singolo	≤ 35	≤ 38
Spazi espositivi, aule studio	≤ 45	≤ 48
Palestre, piscine, uffici amministrativi, laboratori, aree aperte al pubblico, mense, corridoi, reception	≤ 45	≤ 48

La norma UNI 11532 – 2, secondo quanto riportato da Astolfi et al. [20], identifica le seguenti categorie d'uso dell'ambiente scolastico:

1. Categoria A1: aule per insegnamento della musica e del canto;
2. Categoria A2: classi per insegnamento e comunicazione;
3. Categoria A3.1: classi per insegnamento e comunicazione inclusiva;
4. Categoria A3.2: classi per workshop o laboratori;
5. Categoria A4: classi per workshop o laboratori inclusivi;
6. Categoria A5: ambienti per lo sport.

I tempi di riverberazione ottimali saranno forniti dalla norma UNI 11532 – 2 per ambienti con un tasso di occupazione pari all'80%, in funzione del tipo di attività e del volume dell'ambiente. Solo per la categoria A5 i valori si riferiscono ad ambienti non occupati [20].

Tabella 7. Tempi di riverberazione ottimali secondo la norma UNI 11532-2.

Category	80% occupied room	
A1	$T_{ott,A1} = (0.45 \log V + 0.07)$	$30 \text{ m}^3 \leq V < 1000 \text{ m}^3$
A2	$T_{ott,A2} = (0.37 \log V - 0.14)$	$50 \text{ m}^3 \leq V < 5000 \text{ m}^3$
A3	$T_{ott,A3} = (0.32 \log V - 0.17)$	$30 \text{ m}^3 \leq V < 5000 \text{ m}^3$
A4	$T_{ott,A4} = (0.26 \log V - 0.14)$	$30 \text{ m}^3 \leq V < 500 \text{ m}^3$
Category	Unoccupied room	
A5	$T_{ott,A5} = (0.75 \log V - 1.00)$	$200 \text{ m}^3 \leq V < 10000 \text{ m}^3$
	$T_{ott,A5} = 2.00$	$V \geq 10000 \text{ m}^3$

La conversione tra i valori riferibili allo stato di occupazione dell'ambiente e i valori misurati in ambiente arredato ma non occupato può essere eseguita secondo la seguente equazione, in bande d'ottava tra 125 Hz e 4000 Hz:

$$T_{inocc} = \frac{T_{occ}}{1 - T_{occ} \frac{\Delta A_{pers}}{0.16V}}$$

dove

T_{occ} è il tempo di riverberazione ottimale nell'ambiente con occupazione pari all'80% [s];

T_{inocc} è il tempo di riverberazione ottimale misurato in ambiente arredato ma non occupato [s];

V è il volume dell'ambiente [m^3];

ΔA_{pers} è l'area di assorbimento equivalente delle persone [m^2]

I valori di riferimento per l'indicatore STI si applicano alle categorie di ambienti A1, A2, A3 e A4, ad ambiente arredato e non occupato. La misura dei parametri STI e C50 richiede l'utilizzo di una sorgente sonora con direttività approssimabile a quella di un parlatore. I valori sono riportati nella tabella seguente [20].

Tabella 8. Valori di riferimento per l'indicatore STI

	$V < 250 m^3$	$V \geq 250 m^3$
Senza impianto di amplificazione sonora o con impianto spento	≥ 0.55 con livello a 1 m in asse dalla sorgente pari a 60 dB(A)	≥ 0.50 con livello a 1 m in asse dalla sorgente pari a 70 dB(A)
Con impianto di amplificazione sonora	≥ 0.60 con livello della sorgente pari a quello in condizioni di normale funzionamento dell'impianto di amplificazione	

L'indicatore C50 può essere usato in alternativa all'indicatore STI per le categorie A1, A2, A3 e A4 esclusivamente per ambienti con volume inferiore a $250 m^3$. I valori di riferimento per ambienti arredati e non occupati sono riportati nella tabella seguente [20].

Tabella 9. Valori di riferimento per l'indicatore C50.

	$< 250 m^3$
Senza impianto di amplificazione sonora o con impianto spento	≥ 2 dB

5 Indicatori energetici

5.1 Uso energetico ventilazione

Al fine di valutare l'impatto energetico del sistema di ventilazione meccanica sono stati selezionati due indicatori: uno si riferisce alla portata di ventilazione e il secondo si riferisce al consumo elettrico per ventilazione [1]. Entrambi gli indicatori vengono normalizzati rispetto all'area ventilata di riferimento (ad esempio l'area dell'aula scolastica) in modo da poter confrontare edifici diversi tra loro.

Le portate di ventilazione meccanica vengono misurate indirettamente attraverso anemometri posizionati nei canali o direttamente con balometro. Le portate di ventilazione naturale vengono invece derivate dal livello di CO2 nella stanza e dallo stato di apertura delle finestre. Per poter confrontare più aule tra di loro, anche di edifici diversi e valutare la qualità dell'aria in funzione del livello di ventilazione, la portata di ventilazione viene normalizzata rispetto all'area ventilata.

$$\overline{FR}_{MV} = \frac{FR_{MV}}{A_{VENT}}$$

dove

FR_{MV} = portata di ventilazione [m3/hr]

A_{vent} = area ventilata netta [m²]

La portata di ventilazione va calcolata su base oraria e rappresentata attraverso serie temporali o bar plot.

Il consumo elettrico della macchina di ventilazione viene normalizzato rispetto all'area ventilata che rappresenta l'area netta delle aule scolastiche. Il consumo elettrico non viene misurato direttamente. Nel caso di ventilazione decentralizzata (una o più macchine di ventilazione per aula), il consumo elettrico può essere calcolato in funzione della portata d'aria trattata e dello Specific Power Input (Wh/m³) dichiarato nella scheda tecnica. Nel caso di ventilazione centralizzata, il consumo elettrico totale di ventilazione dell'edificio viene calcolato come precedentemente descritto considerando anche consumi elettrici aggiuntivi dovuti ad eventuali perdite di distribuzione. Il consumo per aula può essere calcolato con una proporzione tra il volume totale delle zone trattate dal sistema di ventilazione, le portate di ventilazione ed il volume dell'aula stessa.

$$\bar{Q}_{el_MV} = \frac{Q_{el_MV}}{A_{vent}}$$

dove

Q_{el_MV} = consumo elettrico del sistema di ventilazione [kWh]

A_{vent} = area ventilata netta [m²]

Il consumo elettrico della macchina di ventilazione deve essere calcolato su un periodo di riferimento che deve essere specificato di caso in caso a seconda della campagna di misure.

5.2 Uso energetico riscaldamento

Anche il consumo di riscaldamento non può essere monitorato direttamente ma può essere derivato da informazioni sulle modalità di gestione dell'impianto, dalle bollette energetiche e dalle efficienze di generazione, distribuzione ed emissione dichiarate in fase di progetto o da scheda tecnica qualora fossero disponibili.

Essendo il controllo del sistema di riscaldamento centralizzato nella maggioranza dei casi, sarà possibile confrontare solo i consumi di riscaldamento totali dell'edificio, piuttosto che delle singole aule, su base mensile. Al fine del confronto, tale consumo verrà normalizzato per area riscaldata come riportato di seguito [1].

$$Q_{heat_sm} = \frac{\sum_{i=1}^N Q_{heat_gen_i}}{A_H}$$

dove

$Q_{heat_gen_i}$ = calore generato dal generatore i [kWh]

A_H = area riscaldata [m²]

Al fine di confrontare i consumi di riscaldamento per lo stesso edificio ma su periodi diversi potrebbe essere utile normalizzare il consumo anche per gradi giorno in modo da limitare influenza sui consumi della temperatura esterna:

$$Q_{heat_sm} = \frac{\sum_{i=1}^N Q_{heat_gen_i}}{A_H * HDD}$$

Dove

HDD = numero di gradi giorno per il periodo considerato

6 Conclusioni

La Tabella 10 riassume gli indicatori prestazionali che sono stati selezionati per descrivere in maniera quantitativa la qualità dell'aria all'interno delle scuole e per valutare misure di miglioramento delle prestazioni energetiche dell'edificio e della qualità dell'ambiente all'interno delle classi.

Tabella 10. Tabella riassuntiva indicatori selezionati.

Tipologia	Indicatore		Grafico
Qualità dell'aria	$I_i = \frac{C_i}{ELV_i}$	Concentrazione media del contaminante in relazione al valore limite di esposizione sul periodo di riferimento	radar
	distribuzione statistica delle concentrazioni di ciascun inquinante indoor sul periodo di riferimento		Box plot
	Numero di ore in cui la concentrazione di CO2 rilevata durante le ore di occupazione e mediata sull'ora rientra nei limiti delle categorie di qualità dell'aria identificate dalla norma EN 16798-2: 2019		Barre %
	Indicatori di contaminazione biologica: Unità Formanti Colonia (UFC/m ³), Indice Globale di Contaminazione Microbica (IGCM/m ³), Indice di Contaminazione da batteri Mesofili (ICM), Indice di Amplificazione (IA).		-
	DALY	Numero di anno di vita "sana" persi a causa dell'esposizione alle sostanze inquinanti indoor rilevate nell'ambiente	-
Comfort termico	PMV-PPD	Sensazione termica e percentuale di persone insoddisfatte	Istogramma di frequenza e box-plot
	Comfort adattivo	Numero di ore in cui la temperatura operativa rilevata durante le ore di occupazione e mediata sull'ora rientra nei limiti delle categorie di comfort adattivo identificate dalla norma EN 16798-2: 2019	Barre %
	OHH	Numero di ore di overheating	-
	OHD	Gradi di overheating	--
	OCH	Numero di ore di overcooling	-
	OCD	Gradi di overcooling	-
Comfort acustico	STI	Speech Transmission Index	-
Energia	$\overline{FR}_{MV} = \frac{FR_{MV}}{A_{VENT}}$	Portata di ventilazione normalizzata	-
	$\bar{Q}_{el_MV} = \frac{Q_{el_MV}}{A_{vent}}$	Consumo elettrico di ventilazione normalizzato	--
	$Q_{heat_sm} = \frac{\sum_{i=1}^N Q_{heat_gen_i}}{A_H}$	Consumo di riscaldamento normalizzato per area	-
	$Q_{heat_sm} = \frac{\sum_{i=1}^N Q_{heat_gen_i}}{A_H * HDD}$	Consumo di riscaldamento normalizzato per area e gradi giorno	-

7 Bibliography

- [1] Daniele Antonucci, Wilmer Pasut, Francesco Babich, Stefano Avesani, 2018, Eurac KPI database, Institute for renewable energy, Eurac Research, <http://kpidb.eurac.edu/>
- [2] Cerplan (Cost Effective renovation Plan) Web GIS, Eurac Research, <http://webgis.eurac.edu/cerplan/>.
- [3] Marc O. Abadie, Pawel Wargocki, Indoor Air Quality Design and Control in Low-energy Residential Buildings- Annex 68 | Subtask 1: Defining the metrics | In the search of indices to evaluate the Indoor Air Quality of low-energy residential buildings, 2017
- [4] WHO, 2010. WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants. World Health Organization Regional Office for Europe, Bonn, Germany.
- [5] ANSES, 2007. Valeurs guides de qualité d'air intérieur: le Formaldéhyde. Rapport du groupe de travail Afsset « Valeurs Guide de qualité d'Air Intérieur », ISBN 978-2-11-096714-5.
- [6] Agenzia CasaClima, Linee guida CasaClima school 1.0, 2018
- [7] The INDEX project final report, Critical Appraisal of the Setting and Implementation of Indoor Exposure Limits in the EU, 2005.
- [8] WHO, 2005. Air quality guidelines. Global update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf?ua=1
- [9] Louis Cony Renaud Salis, Marc Abadie, Pawel Wargocki, Carsten Rode, Towards the definition of indicators for assessment of indoor air quality and energy performance in low-energy residential buildings, Energy and Buildings, Volume 152, 2017, Pages 492-502, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.054>
- [10] Teichman K, Howard-Reed C, Persily A, Emmerich S. 2016. Characterizing Indoor Air Quality Performance Using a Graphical Approach. NIST Technical Note 1868
- [11] EN 16798-2: 2019 Energy performance of buildings - Ventilation for buildings - Part 2: Interpretation of the requirements in EN 16798-1 - Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustic.
- [12] Sicurezza e benessere nelle scuole. Indagine sulla qualità dell'aria e sull'ergonomia. Inail 2015. https://www.inail.it/cs/internet/docs/allegato_sicurezza_e_benessere_nelle_scuole.pdf
- [13] WHO. 2016. DALY. http://www.who.int/healthinfo/global_burden_disease/metrics_daly/en/
- [14] Logue, J. M., Price, P. N., Sherman, M. H., & Singer, B. C. (2012). A method to estimate the chronic health impact of air pollutants in U.S. residences. *Environmental health perspectives*, 120(2), 216–222. doi:10.1289/ehp.1104035
- [15] UNI EN ISO 7730: 2006 Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale
- [16] ASHRAE 55-2017 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy
- [17] UNI EN 16798-1: 2019 Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 1: Parametri di ingresso dell'ambiente interno per la progettazione e la valutazione della prestazione energetica degli edifici in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica
- [18] Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare, Decreto ministeriale 11 ottobre 2017, *Criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici*.
- [19] UNI 11367:2010, *Acustica in edilizia - Classificazione acustica delle unità immobiliari - Procedura di valutazione e verifica in opera*.
- [20] Astolfi A. et al., *The new Italian standard UNI 11532 on acoustics for schools*, 2019, Proceedings of ICA 2019.
- [21] Astolfi, A., & Giovannini, M. *Acustica delle aule scolastiche. Requisiti prestazionali, soluzioni di progetto, verifiche a calcolo e in opera*, 2010, Rockwool, Milano.
- [22] UNI EN ISO 16283-3:2016, *Acustica - Misure in opera dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 3: Isolamento acustico di facciata*.
- [23] UNI EN ISO 16283-1:2014, *Acustica - Misure in opera dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 1: Isolamento acustico per via aerea*.
- [24] UNI EN ISO 16283-2:2018, *Acustica - Misure in opera dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 2: Isolamento dal rumore di calpestio*.

- [25] UNI 8199:2016, *Acustica in edilizia - Collaudo acustico di impianti a servizio di unità immobiliari - Linee guida contrattuali e modalità di misurazione all'interno degli ambienti serviti.*
- [26] UNI EN ISO 3382-2: 2008, *Acustica - Misurazione dei parametri acustici degli ambienti - Parte 2: Tempo di riverberazione negli ambienti ordinari.*
- [27] IEC 60268-16:2011, *Sound system equipment - Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index.*
- [28] UNI EN ISO 3382-1:2009, *Acustica - Misurazione dei parametri acustici degli ambienti - Parte 1: Sale da spettacolo*