

DALL'INCERTEZZA DI MISURA AL CONFRONTO CON VALORI LIMITE

Massimo Garai (1)

1) DIN – Alma Mater Studiorum Università degli Studi di Bologna, Bologna

1. Introduzione

Una delle attività più comuni nei vari settori dell'acustica applicata (ambientale, edilizia, dell'ambiente di lavoro, ecc.) è quella di misurare i valori di determinate grandezze per confrontarli con fissati valori limite, che possono essere indicati da leggi, regolamenti, norme tecniche o anche documenti di tipo contrattuale. È quindi sorprendente che nella maggior parte dei casi si operi in maniera superficiale, senza considerare il ruolo dell'incertezza di misura. Infatti, nel campo dell'acustica i valori limite sono dati in maniera assoluta, cioè senza tolleranza, mentre il valore misurato è sempre affetto da incertezza. Pertanto, la soluzione del problema di provare la conformità o meno ai valori limite è tutt'altro che ovvia; anzi, la soluzione corretta implica la scelta di regole decisionali che dipendono dall'obiettivo del confronto. Spesso queste regole sono assunte in maniera implicita, a volte sulla base di condizionamenti estranei ad un corretto procedimento di tipo scientifico. Fortunatamente, attingendo a nozioni di metrologia e statistica è possibile delineare una metodologia che permette un approccio ottimale al problema, applicando regole decisionali generali allo specifico settore dell'acustica applicata e fornendo inoltre procedure utili nei casi in cui non può essere presa una decisione certa. In questa attività è impegnato un apposito gruppo di lavoro UNI; qui si riportano le principali idee emerse in quella sede, secondo il punto di vista dello scrivente.

2. Generalità

L'incertezza di misura dovrebbe sempre essere dichiarata esplicitamente, per esempio come incertezza estesa accompagnata dal relativo livello di fiducia. Il livello di fiducia preferenziale è pari al 95% [1,2], tranne che in acustica edilizia, dove attualmente si assume un livello di fiducia dell'84% [3]. L'incertezza di misura può essere determinata seguendo tipicamente due approcci: l'approccio analitico, preferibile quando si può calcolare ogni componente dell'incertezza [1,2], o l'approccio sperimentale [1,4], quando non è possibile il calcolo analitico, ma è ugualmente possibile una stima ragionevole, per esempio usando ripetibilità e/o riproducibilità del metodo basate su prove interne ad

un laboratorio e/o confronti inter-laboratorio. In entrambi i casi la misurazione permette di stimare una distribuzione di probabilità avente valor medio pari al valore misurato y , scarto tipo pari all'incertezza tipo $u(y)$ e intervallo di fiducia pari al doppio dell'incertezza estesa $U(y)$ (figura 1).

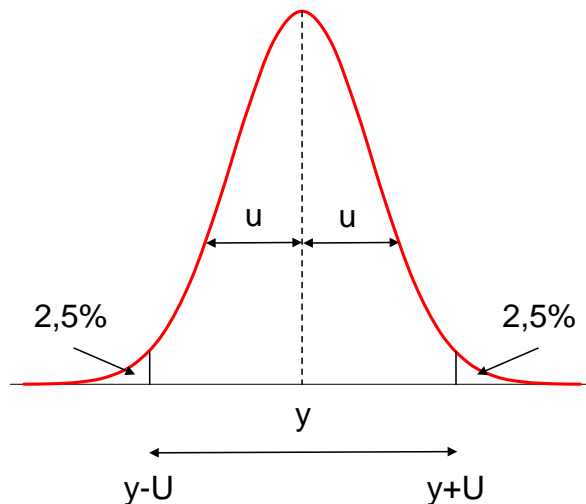


Figura 1 – Distribuzione di probabilità dei valori misurati. La miglior stima y del misurando è il valor medio. L'incertezza tipo u è lo scarto tipo. L'incertezza estesa U determina l'intervallo di fiducia (bilaterale) $[y-U, y+U]$, qui considerato al 95% di livello di fiducia.

Quindi, la misurazione determina l'intervallo di fiducia $[y-U, y+U]$. Questo deve essere confrontato con l'intervallo di specifica, che è quello all'interno del quale i valori del misurando sono considerati accettabili. Sono possibili i seguenti casi:

- intervallo di specifica bilaterale: è delimitato dai un valore limite inferiore (T_L) e da un valore limite superiore (T_U) finiti;
- intervallo di specifica monolaterale limitato inferiormente: è delimitato da un valore limite inferiore (T_L) finito e da un valore limite superiore pari a $+\infty$;
- intervallo di specifica monolaterale limitato superiormente: è delimitato da un valore limite inferiore pari a $-\infty$ e da un valore limite superiore (T_U) finito.

In pratica, in acustica applicata sono più frequenti gli intervalli di specifica monolaterali. Per esempio, secondo il DPCM 5-12-1997:

- l'indice di valutazione del potere fonoisolante di una partizione verticale tra abitazioni deve avere un valore minimo di 50 dB: l'intervallo di specifica è delimitato da $T_L = 50$ dB e $T_U = +\infty$;
- l'indice di valutazione del livello di rumore di calpestio di un solaio tra abitazioni deve avere un valore massimo di 63 dB: l'intervallo di specifica è delimitato da $T_L = -\infty$ e $T_U = 63$ dB.

3. Regole di decisione

Il problema del confronto con valori limite, posto come sopra, diviene un problema di valutazione di conformità o meno di un valore misurato, affetto da incertezza, a valori limite di specifica, considerati esatti. In questo contesto, l'incertezza di misura è simme-

trica attorno al valor medio e indipendente dal valore dello stesso. Il problema della valutazione di conformità è in genere risolto adottando opportune “regole di decisione”, codificate dalle scienze metrologiche e statistiche [5]. Per potere decidere senza ambiguità, è necessario scegliere preventivamente una combinazione di queste regole che sia esaustiva, coerente ed adatta al caso in esame.

Per giustificare la scelta fatta in seguito (punto 4), si riportano dapprima le più comuni regole decisionali di base. Inoltre, per esigenze di spazio si esplicita solo il caso della verifica di conformità ad un valore limite superiore T_U (intervallo di specifica monolaterale e limitato superiormente). La verifica di conformità ad un valore limite inferiore è deducibile per analogia, mentre la verifica di conformità ad un intervallo di specifica bilaterale è ricostruibile riunendo i due casi monolaterali.

3.1 Accettazione o rifiuto semplici

La regola di “accettazione semplice” consiste nel considerare il risultato di una misurazione y come “conforme” semplicemente se rientra nell’intervallo di specifica. La regola di “rifiuto semplice” consiste nel considerare il risultato di una misurazione y come “non conforme” semplicemente se non rientra nell’intervallo di specifica. Con riferimento alla figura 2, i casi 1 e 2 sono conformi, mentre i casi 3 e 4 sono non conformi. Queste regole sono le più elementari e corrispondono al considerare il risultato privo di incertezza. In altre parole, incertezza e livello di fiducia, benché esistenti, non sono presi in considerazione.

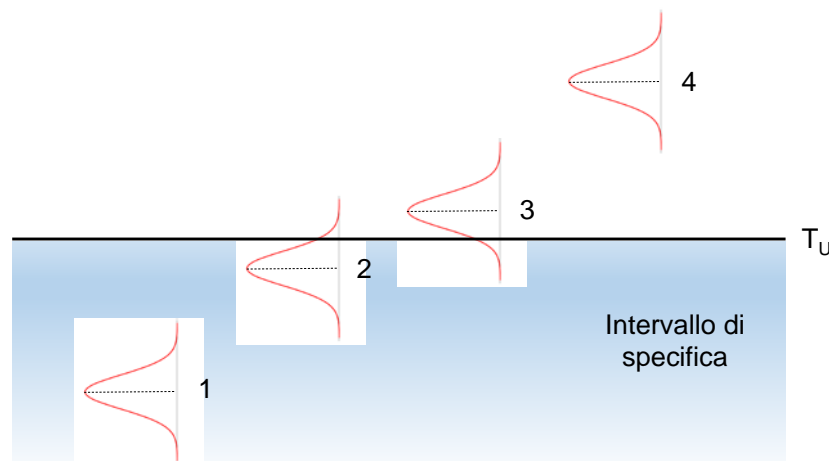


Figura 2 – Illustrazione delle situazioni possibili nella verifica di conformità ad un valore limite superiore T_U .

Questo è quello che si è fatto finora nel campo dell’acustica applicata. Operando in questo modo la probabilità di decisione errata può essere molto alta, fino al 50% (nel caso che il valore stimato del misurando coincida con un valore limite inferiore o superiore). Per esempio, dire che, ai sensi del DPCM 14-11-1997, un livello di rumore ambientale misurato avente valore stimato 65 dB(A) e incertezza tipo 1 dB rispetta il valore limite assoluto di immissione di 65 dB(A) per la classe IV in periodo diurno (coincidenza tra valore misurato e valore limite superiore T_U) comporta una probabilità di decisione errata del 50% (figura 3). Infatti, facendo corrispondere il valore misurato al valor medio e l’incertezza allo scarto tipo di una distribuzione di probabilità simmetrica attorno al valor medio, la probabilità cumulativa che il valore misurato sia maggiore di 65 dB(A) è:

$$(1) \quad P(L_{Aeq,T} > 65) = \int_{65}^{+\infty} p(L_{Aeq,T}) dL_{Aeq,T} = 0,50 \quad [1]$$

Ripetendo la misurazione molte volte, a causa dell'ineliminabile incertezza di misura si troveranno valori minori, uguali o maggiori di 65 dB(A); non vi è nessuna certezza di non superare mai i 65 dB(A), come il DPCM 14-11-1997 richiederebbe.

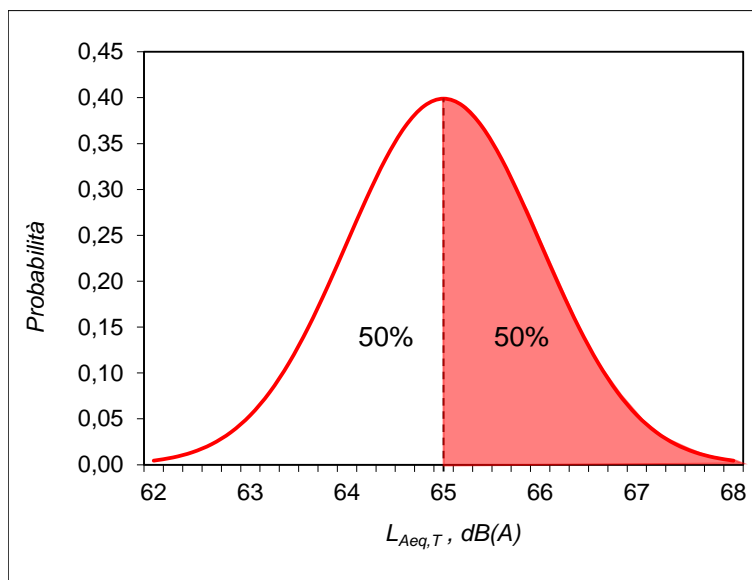


Figura 3 – Curva di probabilità di un livello equivalente misurato avente valor medio 65 dB e incertezza tipo 1 dB. La probabilità cumulativa di superamento del valore limite (superiore) assoluto di immissione di 65 dB per la classe IV in periodo diurno è rappresentata dall'area in rosso.

Le due regole di accettazione e rifiuto semplici possono essere assunte assieme, risultando così esaustive, cioè senza lasciare spazio a risultati ambigui. In tal caso, qualunque sia l'entità del rischio di decisioni sbagliate, esso viene equamente ripartito fra le parti. Per questo motivo vengono anche dette regole a rischio condiviso (“*shared risk*”).

3.2 Accettazione o rifiuto stretti

La regola di “accettazione stretta” consiste nel considerare il risultato di una misurazione y come “conforme” se e solo se rientra nell'intervallo di specifica con tutto l'intervallo di fiducia (caso 1 di figura 2). La regola di “rifiuto stretto” consiste nel considerare il risultato di una misurazione y come non conforme se e solo se non rientra nell'intervallo di specifica con tutto l'intervallo di fiducia (caso 4 di figura 2). Nel caso dell'accettazione stretta si preferisce minimizzare il rischio di una “falsa accettazione” richiedendo che la conformità sia dichiarata solo se la distribuzione di probabilità dei valori del misurando ha nella zona di conformità una probabilità cumulativa almeno pari al livello di fiducia scelto. Nel caso del rifiuto stretto si preferisce minimizzare il rischio di un “falso rifiuto” richiedendo che la non conformità sia dichiarata solo se la distribuzione di probabilità dei valori del misurando ha nella zona di non conformità una probabilità cumulativa almeno pari al livello di fiducia scelto. Se le due regole di accetta-

zione e rifiuto strette sono assunte assieme, rimane un insieme di risultati ambigui non decidibili (casi 2 e 3 di figura 2).

3.3 Accettazione o rifiuto allargati

La regola di “accettazione allargata” consiste nel considerare il risultato di una misurazione y come conforme se e solo se non è esterno all’intervallo di specifica con tutto l’intervallo di fiducia (casi 1, 2 e 3 di figura 2). La regola di “rifiuto allargato” consiste nel considerare il risultato di una misurazione y come non conforme se e solo se non è interno all’intervallo di specifica con tutto l’intervallo di fiducia (casi 2, 3 e 4 di figura 2). Nel caso dell’accettazione allargata si preferisce minimizzare il rischio di un “falso rifiuto” richiedendo che la conformità sia dichiarata a meno che la distribuzione di probabilità dei valori del misurando abbia nella zona di non conformità una probabilità cumulativa almeno pari al livello di fiducia scelto. Nel caso del rifiuto allargato si preferisce minimizzare il rischio di una “falsa accettazione” richiedendo che la non conformità sia dichiarata a meno che la distribuzione di probabilità dei valori del misurando abbia nella zona di conformità una probabilità cumulativa almeno pari al livello di fiducia scelto. Le due regole di accettazione e rifiuto allargati non possono essere assunte assieme, in quanto vi sarebbe un insieme di valori contemporaneamente conformi e non conformi (casi 2 e 3 di figura 2).

4. Scelta della regola decisionale

Dalle considerazioni precedenti emerge che le regole di accettazione o rifiuto semplici non sono adatte a garantire sempre una bassa probabilità di decisione errata e quindi sono da evitare. Uno dei fattori che concorrono alla proliferazione dei contenziosi nel campo dell’acustica applicata è anche l’assunzione di queste regole decisionali. Inoltre, l’evoluzione normativa nazionale ed internazionale è saldamente orientata ad una esplicita considerazione dell’incertezza di misura (per esempio vedere [6]), e quindi le regole di accettazione o rifiuto semplici, che non la considerano, devono anche per questa ragione essere abbandonate.

Se si vuole un insieme di regole decisionali che non lasci spazio ad ambiguità, le due regole di accettazione e rifiuto stretti non possono essere assunte assieme, in quanto darebbero luogo ad un insieme di risultati ambigui (cfr. 3.2). In maniera analoga, le due regole di accettazione e rifiuto allargati non possono essere assunte assieme, in quanto darebbero luogo ad una situazione contraddittoria, cioè ad un insieme di valori contemporaneamente conformi e non conformi (cfr. 3.3).

Ne consegue che occorre scegliere una regola di decisione composta tra le due uniche combinazioni rimaste:

- A) accettazione stretta + rifiuto allargato;
- B) accettazione allargata + rifiuto stretto.

A questo punto occorre introdurre una considerazione fondamentale: la scelta di una di queste due regole di decisione composte **dipende anche dall’obiettivo della valutazione**, che dovrebbe essere sempre esplicitamente dichiarato. Dovrebbe anche essere chiaro che la scelta della regola di decisione non fa parte del processo di misurazione, bensì lo presuppone.

Nella pratica si danno due casi:

- casi di tipo A: si adotta la regola di decisione che combina accettazione stretta e rifiuto allargato, motivandola con la considerazione che la valutazione di con-

formità è finalizzata ad accertare il “rispetto” dei valori limite; in questo caso si vuole essere certi (con il livello di fiducia prefissato) dell’attuazione di adeguate azioni a tutela di chi potrebbe subire gli effetti indesiderati del mancato rispetto dei valori limite;

- casi di tipo B: si adotta la regola di decisione che combina accettazione allargata e rifiuto stretto, motivandola con la considerazione che la valutazione di conformità è finalizzata ad accertare il “**mancato rispetto**” dei valori limite; in questo caso si vuole essere certi (con il livello di fiducia prefissato) del mancato rispetto dei valori limite prima di intraprendere azioni con effetti sanzionatori per i responsabili di tale mancato rispetto.

5. Casi di tipo A

Scelta la regola decisionale composta A, nel confronto tra un valore limite superiore T_U , considerato esatto, ed un valore misurato y accompagnato dalla relativa incertezza estesa U , si possono verificare i casi seguenti (confronto monolaterale con T_U):

- a. **Conformità accertata** (al livello di fiducia considerato): la somma del valore misurato e della relativa incertezza estesa è minore o uguale del valore limite superiore (caso 1 di figura 2).
- b. **Non conformità accertata** (al livello di fiducia considerato): la differenza tra il valore misurato e la relativa incertezza estesa è maggiore del valore limite superiore (caso 4 di figura 2).
- c. **Non conformità presunta** (al livello di fiducia considerato): l’intervallo definito dal valore misurato più o meno l’incertezza estesa include il valore limite superiore (casi 2 e 3 di figura 2).

Nel caso (c) si dovrebbe dichiarare la probabilità, dipendente dalla forma funzionale della distribuzione, che il risultato sia maggiore del valore limite superiore. In tal caso si può valutare, ove possibile e praticabile, di ridurre l’incertezza di misura in modo da rientrare nel caso (a) o nel caso (b).

6. Casi di tipo B

Scelta la regola decisionale composta B, nel confronto tra un valore limite superiore T_U , considerato esatto, ed un valore misurato y accompagnato dalla relativa incertezza estesa U , si possono verificare i casi seguenti (confronto monolaterale con T_U):

- a. **Conformità accertata** (al livello di fiducia considerato): la somma del valore misurato e della relativa incertezza estesa è minore o uguale del valore limite superiore (caso 1 di figura 2).
- b. **Non conformità accertata** (al livello di fiducia considerato): la differenza tra il valore misurato e la relativa incertezza estesa è maggiore del valore limite superiore (caso 4 di figura 2).
- c. **Conformità presunta** (al livello di fiducia considerato): l’intervallo definito dal valore misurato più o meno l’incertezza estesa include il valore limite superiore (casi 2 e 3 di figura 2).

Nel caso (c) si dovrebbe dichiarare la probabilità, dipendente dalla forma funzionale della distribuzione, che il risultato sia maggiore del valore limite superiore. In tal caso si può valutare, ove possibile e praticabile, di ridurre l’incertezza di misura in modo da rientrare nel caso (a) o nel caso (b).

7. Esempi

Nel campo dell'acustica edilizia si privilegia una regola di tipo A, più cautelativa per le persone esposte, in conformità al DPCM 5-12-1997 che ha il "*fine di ridurre l'esposizione umana al rumore*" (art. 1). Sulla stessa linea si trova anche la UNI 11367, che utilizza l'incertezza di misura e di campionamento in senso cautelativo per gli occupanti delle unità immobiliari. Per esempio, si consideri una partizione verticale tra due unità immobiliari avente $R'_w = 50$ dB. Secondo la UNI 11367, prospetto F.2, la misura ha un'incertezza di 1 dB al livello di fiducia dell'84%; dunque il valore utile è:

$$(2) \quad R'_w - U = 50 - 1 = 49 \quad [\text{dB}]$$

Poiché il valore limite inferiore della classe III per le partizioni tra diverse unità immobiliari è 50 dB, la partizione è classificata in classe IV al livello di fiducia dell'84%.

Anche nella valutazione dell'esposizione professionale a rumore si applica sempre una regola di tipo A, più cautelativa per le persone esposte, in conformità al D. Lgs. 81/08 che ha il fine di tutelare la salute e la sicurezza nei luoghi di lavoro, mediante "*l'eliminazione dei rischi e, ove ciò non sia possibile, la loro riduzione al minimo...*" (art. 15, c. 1, c)). Sulla stessa linea si trova anche la UNI EN ISO 9612 [7].

Per esempio, si assuma di avere misurato un livello di esposizione $L_{EX,8h} = 84,3$ dB(A), con un'incertezza estesa $U(L_{EX,8h}) = 1,5$ dB. Gli estremi inferiore e superiore e dell'intervallo di fiducia sono:

$$(3) \quad L_{EX,8h} - U = 84,3 - 1,5 = 82,8 \quad [\text{dB(A)}]$$

$$(4) \quad L_{EX,8h} + U = 84,3 + 1,5 = 85,8 \quad [\text{dB(A)}]$$

Nel D. Lgs. 81/08 (art. 189, c. 1) vengono indicati tre livelli discriminanti: il valore inferiore di azione (80 dB(A)), il valore superiore di azione (85 dB(A)) e il valore limite di esposizione (87 dB(A)). Nel confronto con il valore inferiore di azione si ottiene una non conformità accertata. Nel confronto con il valore superiore di azione si ottiene una non conformità presunta; la probabilità di non superamento del valore superiore di azione è pari al 78% con una corrispondente probabilità di superamento del 22%. Infine, nel confronto con il valore limite di esposizione si ottiene una conformità accertata. Peraltro tale conformità dovrebbe essere verificata tenendo conto dell'attenuazione fornita dai DPI indossati dal lavoratore (D. Lgs. 81/08, art. 193 c. 2).

Nel campo del rumore ambientale le disposizioni di legge lasciano un certo spazio all'interpretazione riguardo all'obiettivo della valutazione. Si potrebbe sostenere che, dato che la L. 447/95 "*stabilisce i principi fondamentali in materia di tutela dell'ambiente esterno e dell'ambiente abitativo dall'inquinamento acustico*" (art. 1, c. 1), si debbano tutelare le persone esposte scegliendo come per gli altri casi una regola di decisione di tipo A. Invece le ARPA, conformemente alle linee guida [8], adottano un approccio di tipo B quando l'accertamento possa portare a sanzionare i responsabili delle emissioni rumorose (L. 447/95, art. 10). La scelta è motivata dal noto principio giuridico *in dubio pro reo*. Questa scelta tutela in misura massima i responsabili delle emissioni rumorose da possibili sanzioni, giuocando l'incertezza a loro favore, ma subordinando a questo obiettivo la tutela delle persone esposte. Per esempio, si supponga che, in una zona dove il valore limite assoluto di immissione è 60 dB(A), un organo di controllo, che deve stabilire la necessità o meno di intraprendere provvedimenti a carico dei

responsabili (per esempio, sanzioni e ordinanze) in caso di superamento del valore limite, abbia misurato $61,5 \pm 1,5$ dB(A). Allora si dovrebbe dichiarare la conformità presunta (nessuna sanzione), poiché (punto 6, caso c)):

$$(5) \quad L_{Aeq,T} - U = 61,5 - 1,5 = 60 \leq 60 = T_U \quad [\text{dB(A)}]$$

Se invece la misurazione fosse eseguita da un tecnico indipendente per verificare l'adeguatezza degli interventi di risanamento realizzati da quegli stessi responsabili, si dovrebbe dichiarare la non conformità accertata (interventi insufficienti), poiché con un livello di fiducia del 95% (punto 5, caso c)):

$$(6) \quad L_{Aeq,T} + U = 61,5 + 1,5 = 63 > 60 = T_U \quad [\text{dB(A)}]$$

Si noti che applicando una regola di tipo A si ha una non conformità accertata.

8. Conclusioni

Il confronto tra i valori misurati di determinate grandezze ed i relativi valori limite è un'attività da compiere con molta attenzione. Da quando si è maggiormente diffusa la consapevolezza della necessità di dichiarare l'incertezza di misura, grazie anche all'azione decisa dei maggiori organismi normativi internazionali, è emerso un punto critico: il rapporto tra valori limite dati in maniera assoluta, cioè senza tolleranza, e valore misurati affetti da incertezza. La soluzione a questo problema implica la scelta di regole decisionali che, a loro volta, dipendono dall'obiettivo del confronto. Attualmente, nel campo dell'acustica applicata, queste regole sono scelte senza averne la piena consapevolezza, aumentando la probabilità di prendere decisioni errate. Invece, proprio perché la scelta dell'una o altra regola determina l'esito della verifica, la scelta deve essere consapevole. Per questo la regola di decisione scelta deve essere sempre esplicitamente dichiarata, chiarendo a chi compete la responsabilità della scelta e qual è l'obiettivo della valutazione di conformità.

9. Bibliografia

- [1] UNI CEI ENV 13005:2000, *Guida all'espressione dell'incertezza di misura*
- [2] UNI/TR 11326:2009, *Acustica - Valutazione dell'incertezza nelle misurazioni e nei calcoli di acustica - Parte 1: Concetti generali*
- [3] UNI 11367:2010, *Acustica in edilizia - Classificazione acustica delle unità immobiliari - Procedura di valutazione e verifica in opera*
- [4] UNI ISO 5725-2, *Accuratezza (esattezza e precisione) dei risultati e dei metodi di misurazione - Parte 2: Metodo base per determinare la ripetibilità e la riproducibilità di un metodo di misurazione normalizzato*
- [5] ISO IEC Guide 98-4, *Uncertainty of measurement – Part 4: Role of measurement uncertainty in conformity assessment*
- [6] CEN/BT/WG 122 N 37 E, *Implementation of the concept of measurement uncertainty in European standards*, 2003
- [7] UNI EN ISO 9212, *Acustica - Determinazione dell'esposizione al rumore negli ambienti di lavoro - Metodo tecnico progettuale*, 2011
- [8] MLG 52/2009, *L'analisi di conformità con i valori di legge: il ruolo dell'incertezza associata a risultati di misura*, ISPRA, 2009