

Università Politecnica delle Marche
Facoltà di Ingegneria



Dottorato di ricerca XV ciclo
Curriculum: "Ingegneria Civile, Ambientale, Edile e Architettura"

Progetto EUREKA - Borsa di Dottorato di ricerca per l'innovazione cofinanziata da:
Università Politecnica delle Marche, Regione Marche e Filippetti S.p.A.

**“MODELLAZIONE DEL DECADIMENTO INDOOR DELLA CONCENTRAZIONE
DI CO₂ PER LA DETERMINAZIONE DELLA PERMEABILITÀ ALL'ARIA
DELL'INVOLUCRO EDILIZIO”**

Tutor accademico
Prof. Ing. Berardo Naticchia

Tutor aziendale
Ing. Andrea Ilari

Dottorando
Dott. Ing. Michele Pascucci

INDICE

INTRODUZIONE.....	4
1 ASPETTI GENERALI DEL PROBLEMA DELLA VENTILAZIONE.....	7
1.1 Condizioni ambientali interne	7
1.2 Sorgenti inquinanti indoor	8
1.2.1 Inquinanti indoor	9
1.3 Qualità dell'aria di un ambiente interno	12
1.3.1 Qualità percepita dell'aria	12
1.3.2 "Olf e decipol"	14
1.3.3 Ventilazione	18
1.4 Impatto energetico della ventilazione.....	22
2 CONTESTO LEGISLATIVO E NORMATIVO.....	26
2.1 La legislazione comunitaria.....	26
2.2 La legislazione in Italia	26
2.2.1 Il D.Lgs. 192/2005 e s.m.i.....	27
2.2.2 I Regolamenti comunali	28
2.3 Normativa tecnica.....	30
2.3.1 Normative di supporto alla EPBD	30
2.3.2 Normative generali per la determinazione di portate d'aria.....	32
2.3.3 Muffe e condense	37
2.3.4 Ventilazione e risparmio energetico.....	38
2.3.5 Ventilazione e sicurezza degli impianti: UNI 7129-2:2008.....	50
2.3.6 Normativa di prodotto	51
3 STATO DELL'ARTE DEI METODI DI MISURA DELLE INFILTRAZIONI D'ARIA.....	54

3.1	Metodo della pressurizzazione	57
3.1.1	Analisi delle incertezze di misura	60
3.2	Tracer Gas Test	62
3.2.1	Constant Injection Test Method	62
3.2.2	Constant Concentration Test Method.....	63
3.2.3	MODELLO DI RIFERIMENTO: Concentration Decay Test Method	64
4	MODELLO ESTESO DI DECADIMENTO DELLA CONCENTRAZIONE INDOOR DI CO ₂	66
4.1	La CO ₂ come gas tracciante	66
4.1.1	La produzione indoor di CO ₂	67
4.1.2	Concentrazione outdoor di CO ₂	69
4.1.3	Effetto della permeabilità	73
4.1.4	Effetto della stratificazione	79
4.2	Grey-box modelling	83
4.3	Metodologia.....	89
4.3.1	Sistema di misurazione	89
4.3.2	Ambiente di prova.....	92
4.4	Implementazione del modello	93
4.5	Ambiente di sviluppo	95
4.5.1	Metodo della Massima Verosomiglianza.....	96
4.6	Risultati e discussioni	97
5	CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	107
	APPENDICE A: Continuous time stochastic modelling in R	110
	Pacchetto CTSM-R	110

Struttura del Modello	110
Implementazione codice.....	111
APPENDICE B: COZIR™ Ultra Low Power Carbon Dioxide Sensor – Caratteristiche tecniche	114
Bibliografia	115

INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni si è assistito ad una crescente attenzione verso il tema della qualità dell'aria indoor, degli ambienti confinati.

La questione è di notevole importanza soprattutto perché nella società di oggi le persone trascorrono la maggior parte della loro vita in ambienti chiusi; diretta conseguenza di ciò è stato il raddoppiarsi negli ultimi due decenni di malattie allergiche e asmatiche.

Non è quindi possibile prescindere da questo problema specialmente nell'ottica di tutela della salute umana.

La qualità dell'aria interna negli ultimi anni è diminuita drasticamente a causa di diversi fattori quali: il risparmio energetico e la conseguente diminuzione della ventilazione, nuovi materiali da costruzione e nuove fonti di inquinamento indoor, oltre ad una presenza frequente di fumo di sigaretta (ETS).

Le numerose campagne di risparmio energetico, unite agli elevati prezzi dell'energia, hanno spinto molte persone a rendere il più possibile ermetiche le loro abitazioni riducendo anche il tasso di ventilazione; ciò significa che la quantità di aria esterna fornita dalle infiltrazioni attraverso l'involucro e gli infissi non è più sufficiente a fornire il necessario ricambio d'aria.

L'introduzione e l'utilizzo di nuovi materiali, come ad esempio i polimeri e le fibre, hanno contribuito all'aumento di emissioni di inquinanti andando a compromettere sempre più la qualità dell'aria interna.

Anche se ad oggi sono disponibili numerosi standard e linee guida per la valutazione del tasso di ventilazione minimo in base a vari parametri, questi sono ben lungi dall'essere esaustivi: c'è la necessità infatti di conoscere i requisiti di accettabilità dell'aria interna in base agli obiettivi di benessere, comfort e prestazioni energetiche e i tassi di emissione da tutte le fonti.

Purtroppo però esistono migliaia di sostanze emesse dalle persone, dagli arredi, e dall'ambiente esterno; se per il primo componente si dispone di dati sufficienti, per la componente "edificio" la documentazione è molto scarna.

L'idea del progetto è di utilizzare il decadimento della CO₂ come strumento di diagnosi delle infiltrazioni all'aria di un edificio ai fini della classificazione dell'involucro edilizio.

Infatti, tale aspetto risulta di fondamentale importanza per vari motivi, quali:

- Minori dissipazioni energetiche;
- Isolamento acustico (l'aria in movimento veicola le onde sonore);
- Comfort interno;
- Qualità dell'aria indoor;
- Prevenzione della condensa interstiziale.

Lo scopo è proporre una metodologia alternativa alle procedure standard per il calcolo della tenuta all'aria, previste dall'attuale stato dell'arte, che risulti più efficiente da un punto di vista logistico ed economico, di facile applicazione, in grado di mantenere comunque un elevato target di accuratezza.

Attualmente, la tenuta all'aria di un involucro edilizio, viene misurata attraverso il metodo della pressurizzazione (anche noto come "blower door test") che consiste nell'iniettare o aspirare l'aria contenuta negli ambienti creando una variazione di pressione tra interno ed esterno. Tale metodo risulta poco vantaggioso in termini di costi, invasività e flessibilità della misura.

La metodologia presentata prevede l'utilizzo contemporaneo dei dati raccolti da sensori di CO₂ opportunamente installati, e di un modello esteso del "Concentration Decay Test Method", introdotto dalla norma ASTM E741 "Determination air change in a single zone by means of tracer gas dilution", per il decadimento del gas tracciante individuato; tale sistema permette di definire la portata d'aria attraverso una procedura di stima dei parametri e di simulazione del processo.

Il modello, di tipo *grey box*, integra un set di equazioni differenziali stocastiche, per descrivere la dinamica del sistema fisico analizzato, e un insieme di equazioni a tempo discreto, per le osservazioni sperimentali; tale approccio permette di prendere in considerazione sia l'incertezza che il rumore della misura sperimentale. Nella prima parte del lavoro, sono stati analizzati gli aspetti generali dell'inquinamento indoor e della ventilazione, per poi proseguire con una disamina

dei principali riferimenti normativi in materia, dalla scala europea fino a quella regionale; nella seconda parte si è analizzato lo stato dell'arte relativo alla valutazione della permeabilità all'aria di un involucro edilizio; infine, nella terza e ultima parte, si è analizzato il modello esteso proposto per il decadimento della concentrazione di CO₂, in grado di stimare l'infiltrazione dell'involucro edilizio, che contribuisce alla valutazione della permeabilità.

I test effettuati hanno mostrato che un approccio grey box modeling per il decadimento di un gas tracciante risulta avere un'accuratezza maggiore rispetto a quella offerta dal *Concentration Decay Test Method*, col vantaggio di essere poco invasivo e dal costo contenuto, ed evidenziando una sostanziale differenza rispetto ai valori standard imposti da normativa.

1 ASPETTI GENERALI DEL PROBLEMA DELLA VENTILAZIONE

1.1 Condizioni ambientali interne

E' noto che le condizioni ambientali interne di un edificio dipendono da più fattori, quali le condizioni di illuminazione, acustiche, termoigrometriche e di qualità dell'aria; ciò nonostante sono in genere le ultime due ad essere più spesso associate a condizioni ambientali interne inaccettabili.

Tuttavia, la possibilità di intervenire su tali fattori è condizionata dal livello di conoscenze attualmente raggiunto nei due campi scientifici più direttamente investiti dal problema, ossia quello che analizza le condizioni di benessere termoigrometrico e quello che si occupa di qualità dell'aria interna.

Per quanto riguarda il primo, al momento si dispone di strumenti progettuali, di tecnologie per la realizzazione ed il controllo, di metodi e strumenti di misura ed anche di normative adeguate.

Inoltre il livello di approfondimento raggiunto è tale da consentire la comprensione delle relazioni esistenti fra i diversi fattori e la relativa influenza sugli occupanti, prevedendone gli effetti già allo stadio di progetto.

Riguardo alla qualità dell'aria indoor, invece, il livello di conoscenze oggi raggiunto, nonostante i progressi degli ultimi anni, non è ancora tale da fornire agli operatori di campo strumenti di lavoro adeguati.

Come conseguenza di tutto ciò, le ricerche sulla qualità chimico-fisico-batteriologica dell'aria e la realizzazione di livelli accettabili di qualità dell'aria negli ambienti interni costituiscono, al giorno d'oggi, l'impegno prevalente sia dei ricercatori della materia che delle industrie operanti nel campo dell'edilizia, del riscaldamento, della ventilazione e dei sistemi di condizionamento.

1.2 Sorgenti inquinanti indoor

Il livello delle conoscenze oggi raggiunto consente di affermare che, in aggiunta a quanto esposto, anche l'introduzione di nuove tecniche e nuovi materiali da costruzione, di materiali sintetici per i rivestimenti, per l'isolamento acustico e termico ha giocato un ruolo determinante nell'insorgere di tali problemi.

Si sa inoltre che anche alcuni materiali da costruzione tradizionali e da arredamento possono emettere sostanze inquinanti, talune anche radioattive (radon e suoi derivati): nel complesso, circa il 90% dei materiali utilizzati nell'edilizia e nell'arredamento presenta effetti inquinanti più o meno marcati.

Radon viene inoltre immesso negli edifici dal sottosuolo assieme all'aria che penetra, attirata da piccole differenze di pressione, attraverso crepe nelle strutture vicine alle fondamenta o dalle fessure intorno a porte e finestre o ancora dai fori per il passaggio di condutture e cavi elettrici, o disciolto nell'acqua potabile.

Inoltre gli studi condotti hanno mostrato come la scorretta gestione o manutenzione degli impianti di ventilazione possa trasformarli in terreno di coltura e/o veicolo per microrganismi e sostanze inquinanti.

Le attività degli occupanti e le condizioni igieniche rivestono infine un ruolo importante: la polvere, in particolare (sia quella dispersa nell'aria che quella depositata sulle superfici tessili), costituisce un fattore inquinante molto comune.

Nel complesso, quindi, è possibile sinteticamente classificare come sorgenti inquinanti i *materiali edili* utilizzati nell'edificio, gli *arredi*, la presenza (eventuale) di *impianti di ventilazione* (ed anche il tipo di impianto), di *macchinari ed elettrodomestici*, gli *occupanti* e le *relative attività che vi svolgono*, compresa la gestione del sistema edificio-impianto.

Per l'elevato numero di sorgenti di emissione presenti in spazi ristretti e la conseguente elevata presenza di sostanze inquinanti l'inquinamento indoor si presenta quindi come una forma di inquinamento estremamente complessa, difficilmente controllabile.

1.2.1 Inquinanti indoor

L'inquinamento indoor è stato correttamente definito da Meloni e Grassi (1990) come “qualsiasi alterazione delle caratteristiche chimico-fisiche dell'aria, determinata sia da variazioni di concentrazione dei suoi normali costituenti, sia, e soprattutto, dalla presenza di sostanze estranee alla sua composizione normale, in grado di determinare effetti di danno e/o molestia all'uomo ed agli organismi viventi”.

Gli inquinanti presenti nell'aria degli ambienti interni sono in gran parte gli stessi rilevabili all'esterno ed, in alcuni casi, provengono direttamente da sorgenti esterne: di questi ultimi, solo una minima parte proviene dal terreno, derivando, la gran parte (anche solo di quella che vi penetra per infiltrazione) dall'atmosfera esterna.

Le sostanze presenti con concentrazioni più elevate si originano, generalmente, nell'interno dell'edificio stesso o nelle strutture immediatamente sottostanti ed i loro valori elevati sono dovuti al fatto che devono risiedere in spazi relativamente ristretti.

Esse possono essere di tipo chimico, fisico o biologico e presentano ampia variabilità di concentrazione, in dipendenza soprattutto del tasso con cui ciascun inquinante viene immesso nell'atmosfera o nel terreno e del tasso di ventilazione esistente.

Un altro fattore importante che ne determina la concentrazione è la velocità di reazione con le specie chimiche presenti nell'aria o con le superfici interne: in particolare per la rimozione del biossido di azoto queste reazioni dimostrano la stessa efficacia della ventilazione.

Nel complesso la variabilità nei tassi di ingresso e di ventilazione e nelle velocità di reazione fanno sì che le concentrazioni della maggior parte degli inquinanti differiscano anche di diversi ordini di grandezza: in proposito l'esempio più rappresentativo è quello del radon, nelle cui concentrazioni si sono riscontrate variazioni anche di quattro ordini di grandezza.

La quantità di particelle in sospensione e l'andamento dei flussi d'aria nell'edificio influenzano inoltre anche la forma chimica e la concentrazione dei prodotti di

decadimento delle sostanze radioattive presenti nell'aria interna (in particolare del radon).

La concentrazioni dei gas e dei vapori sono generalmente espresse in parti per milione in peso ($\text{ppm}_p = 1 \text{ mg/kg}$) o più frequentemente in volume ($\text{ppm}_v = 1 \text{ cm}^3/\text{m}^3$), oppure in unità di massa per unità di volume (mg/m^3 o $\mu\text{g}/\text{m}^3$). In particolare si ha:

$$\frac{\text{ppm}_v * \text{peso molecolare}}{24.45} = \text{mg}/\text{m}^3$$

La tabella 1.1 riporta i fattori di conversione da ppm_v a mg/m^3 (o $\mu\text{g}/\text{m}^3$) per alcune fra le più comuni sostanze inquinanti indoor.

<i>inquinante</i>	<i>fattore di conversione</i>
Monossido di carbonio (CO)	1 ppm = 1.149 mg/m ³
Biossido di carbonio (CO ₂)	1 ppm = 1.806 mg/m ³
Biossido di azoto (NO ₂)	1 ppm = 1.880 mg/m ³
Formaldeide (HCHO)	1 ppm = 1.231 mg/m ³

Tabella 1-1: Fattori di conversione da ppmv a mg/m^3 per alcuni inquinanti indoor (a 1 bar e 20°C).

Le concentrazioni di radon o altre sostanze radioattive sono invece espresse in picoCurie per litro (pCi/l) o per chilogrammo (pCi/kg) o ancora in Becquerel su metro cubo (Bq/m^3), dove il *Curie* ed il *Becquerel* sono unità di misura dell'*attività* di una sostanza radioattiva (il Curie fa parte del Sistema Internazionale), che rappresenta *il numero di nuclei della sostanza che decadono nell'unità di tempo*. In particolare il Curie rappresenta *il numero di decadimenti radioattivi che ha luogo in un secondo in un grammo di Radio-226 (37 miliardi)*, ossia $1 \text{ Ci} = 3.7 \cdot 10^{10}$ decadimenti al secondo, mentre il Becquerel è pari, indipendentemente dalla natura della radiazione, ad *un decadimento al secondo*. Pertanto $1 \text{ Ci} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$ ed $1 \text{ pCi}/\text{l} = 37 \text{ Bq}/\text{m}^3$.

Per quantificare invece l'esposizione alle radiazioni ionizzanti si fa riferimento alla *dose assorbita*, che indica *la quantità di energia che viene assorbita sotto forma di radiazione*: a tal fine un'unità di misura frequentemente utilizzata è il *Sievert (Sv)*, che esprime *la quantità di energia fornita dalla radiazione all'unità di massa*. Si ha $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$.

Si definisce inoltre *dose equivalente* il prodotto della dose assorbita per il *fattore di qualità della radiazione*, che ne quantifica il potenziale di danno biologico. La *dose equivalente effettiva* è data invece dalla *somma dei prodotti delle varie dosi equivalenti relative ai diversi organi e tessuti, pesate con riferimento ai rischi rispettivi*.

I valori di concentrazione limite possono invece essere espressi in termini di *MAC (Maximum Allowable Concentration)* e di *AIC (Acceptable Indoor Concentration)*. Per chiarire il significato di tali termini, tutti inerenti i valori di concentrazione massima ammissibile, occorre precisare che essi sono basati su criteri di tipo occupazionale.

In ambienti di lavoro, cinema, teatri, ed in generale in tutti quegli ambienti nei quali la permanenza è ridotta nel tempo (in genere meno di 8 ore) e gli occupanti si trovano in buone condizioni fisiche, è giustificata la definizione di valori di concentrazione tollerabile relativamente elevati. In tal caso è appropriato parlare in termini di *concentrazione massima ammissibile (MAC)*. In ambienti residenziali invece, che generalmente sono occupati stabilmente soprattutto da bambini ed anziani, ossia da persone più vulnerabili, è necessario che i valori massimi ammissibili per le concentrazioni delle varie sostanze inquinanti risultino necessariamente più bassi. Per tale tipo di ambienti è opportuno quindi ragionare in termini di *concentrazione interna accettabile (AIC)*, che sta ad indicare la concentrazione di soglia al di sotto della quale non si constatano effetti negativi sull'uomo, o, se se ne osservano, questi sono trascurabili.

1.3 Qualità dell'aria di un ambiente interno

1.3.1 Qualità percepita dell'aria

Come si è visto, la qualità dell'aria interna ad un ambiente è funzione di parecchi fattori, spesso interagenti in maniera complessa ed ancora non completamente nota. Sinteticamente il giudizio delle persone riguardo le sue condizioni si esprime nel concetto di *qualità percepita dell'aria*, che rappresenta l'espressione di come esse realizzano la propria percezione dell'aria sotto forma di odori, irritazione o altri effetti sensoriali.

In generale, gli occupanti di un ambiente richiedono, riguardo alle condizioni dell'aria in esso presente, che questa sia fresca, non viziata né irritante, e non dannosa per la salute.

Nasce pertanto l'esigenza di controllare la "qualità" dell'aria interna, sia in termini igienico sanitari, che di gradevolezza. La sua qualità può essere, in particolare, correlata al grado di soddisfazione espresso dagli occupanti, sulla base della piacevolezza nella respirazione e del rischio per la salute che comporta.

Riguardo a quest'ultimo, un'esigenza fondamentale è che l'aria non contenga contaminanti (sotto forma di gas, vapori, microrganismi e particolato) che superino valori limite di concentrazione, né fattori nocivi come la tossicità, la radioattività, ecc.

Conseguentemente la qualità dell'aria è alta se essa durante la respirazione viene percepita come fresca e piacevole e se il rischio di provocare malesseri agli occupanti risulta trascurabile.

La definizione di accettabilità per l'aria contenuta nello standard ASHRAE 62-1989 considera tale duplice aspetto di salubrità e di gradimento da parte degli occupanti. In particolare, la norma definisce come accettabile *l'aria che non contenga sostanze inquinanti in concentrazioni pericolose ed in cui la gran parte delle persone presenti si trovi in condizioni di soddisfazione.*

Tuttavia, per valutare la qualità dell'aria indoor usualmente si utilizzano due approcci differenti, che concentrano rispettivamente l'attenzione sulle sue

caratteristiche, analizzando i livelli di concentrazione raggiunti dai vari inquinanti, e sulle persone che lo occupano, caratterizzando le sensazioni che l'aria respirata produce su di esse.

In relazione a quest'ultimo approccio, Fanger (1988) ha proposto una metodologia analoga a quella utilizzata per il benessere termoigrometrico, che consente di esprimere quantitativamente la percezione dell'aria, in dipendenza delle varie emissioni inquinanti, tramite la percentuale di insoddisfazione. La qualità percepita dell'aria di un determinato ambiente viene giudicata da un campione di persone (che possono essere visitatori occasionali o già addestrati al riconoscimento degli odori) che ne indica il gradimento in base alla prima impressione ricevuta entrando nel locale.

In particolare, vengono introdotti due nuovi indici, l'*olf* ed il *decipol*, atti a quantificare l'inquinamento dell'aria rispettivamente all'emissione ed in relazione alla sua percezione da parte degli esseri umani. L'inquinamento viene quindi espresso in *olf* di intensità della sorgente che, per un assegnato tasso di ventilazione, possono essere convertiti in *decipol* di aria percepita.

Poiché queste due nuove unità rappresentano un elemento essenziale per la caratterizzazione quantitativa delle sorgenti inquinanti, per il calcolo dei requisiti di ventilazione e per le misure di qualità dell'aria, nel seguito sarà riservata loro una disamina relativamente dettagliata (vedi paragrafo successivo).

In conclusione, è opportuno almeno accennare all'esistenza di un terzo metodo di valutazione della qualità dell'aria di un ambiente che, per caratterizzare il relativo inquinamento, si avvale della definizione di opportuni parametri caratteristici dell'ambiente stesso. Uno dei parametri utilizzati, ad esempio, è il cosiddetto *fattore di rivestimento*, che è dato dal rapporto fra le superfici di rivestimento tessile presenti in un ambiente ed il volume dell'ambiente stesso. Tale parametro, indicando l'estensione di un certo tipo di sorgenti inquinanti, fornisce una stima dell'inquinamento da esse provocato. Nella pratica, tuttavia, parametri di tale tipo si sono dimostrati scarsamente affidabili nei risultati.

1.3.2 “Olf e decipol”

Per più di un secolo la qualità dell'aria è stata giudicata solo in base alla sua composizione chimica.

In ambienti industriali si sono stabiliti valori di soglia per ciascun componente chimico ed ulteriori limiti al di sotto dei quali il rischio può essere considerato accettabile.

In ambienti non industriali (uffici, scuole o abitazioni), invece, l'applicazione di un analogo criterio non ha fornito risultati soddisfacenti; alle basse concentrazioni quali sono quelle in esame anche le analisi chimiche forniscono poche informazioni riguardo gli effetti dei diversi inquinanti sugli esseri umani.

In seguito a ciò, storicamente il successivo passaggio logico è stato la constatazione della frequente superiorità dei sensi umani rispetto alle analisi chimiche e l'utilizzo dell'uomo in alternativa come misuratore. L'uso di campioni di soggetti umani è comune, d'altra parte, a parecchi altri campi della scienza (ad esempio le scienze dell'alimentazione).

In proposito vanno citati, come già accennato, gli studi di Fanger (1988) che, seguendo un approccio analogo a quello utilizzato per il benessere termoigrometrico, ha proposto una metodologia che consente di esprimere quantitativamente, tramite la percentuale di insoddisfatti, la qualità percepita dell'aria in dipendenza delle varie emissioni inquinanti.

A titolo di esempio, la figura 1.1 (EEC, 1992) riporta la percentuale di visitatori insoddisfatti in ambienti in cui le uniche sorgenti inquinanti sono rappresentate dagli occupanti, in funzione della concentrazione di CO₂, scelta in questo caso come indice della concentrazione di bioeffluenti. La figura 1.2 (Fanger et al., 1988) riporta invece, ancora per il caso di aria inquinata da bioeffluenti umani, la percentuale di insoddisfatti in funzione del tasso di ventilazione per persona standard (lavoratore adulto in stato sedentario ed in condizioni di comfort termico).

L'idea di base scaturita da tali studi è stata quella di esprimere ogni sorgente inquinante in funzione di una nota sorgente di riferimento.

La nuova unità definita allo scopo è chiamata *olf* e rappresenta *il tasso di emissione di sostanze inquinanti (bioeffluenti) da parte di una persona standard*, ossia da un adulto in posizione sedentaria, in condizioni di benessere e con uno standard igienico equivalente a 0.7 bagni/giorno.

Ogni altra sorgente inquinante viene quindi espressa tramite la potenza della sorgente equivalente, definita come il numero di persone standard (espresse in *olf*) necessarie per causare la stessa insoddisfazione provocata dalla sorgente inquinante reale.

L'*olf* trova corrispondenza in analoghe unità di misura utilizzate in altri campi, quali il *lumen* in illuminotecnica ed il *watt* in acustica.

Per definire l'*olf* si è scelta come sorgente di riferimento l'inquinamento prodotto dagli esseri umani sia perché i bioeffluenti emessi da un essere umano sono oramai ben noti, sia perché si dispone di maggiori informazioni sull'insoddisfazione causata da bioeffluenti umani piuttosto che da altri tipi di inquinanti: per più di un secolo, infatti, negli standard di ventilazione si è assunto che la maggiore sorgente inquinante, in edifici non industriali, fosse rappresentata dall'uomo.

L'esistenza di sorgenti inquinanti diverse dagli occupanti è stata provata infatti solo di recente, in seguito all'evidenza che anche in spazi non occupati il numero degli insoddisfatti risultava significativo. Si constatava inoltre come, anche se i livelli di concentrazione dei principali inquinanti risultavano bassi, parecchie persone trovavano inaccettabili le condizioni dell'aria ed, in alcuni casi, la loro percentuale cresceva se l'impianto veniva reso operativo.

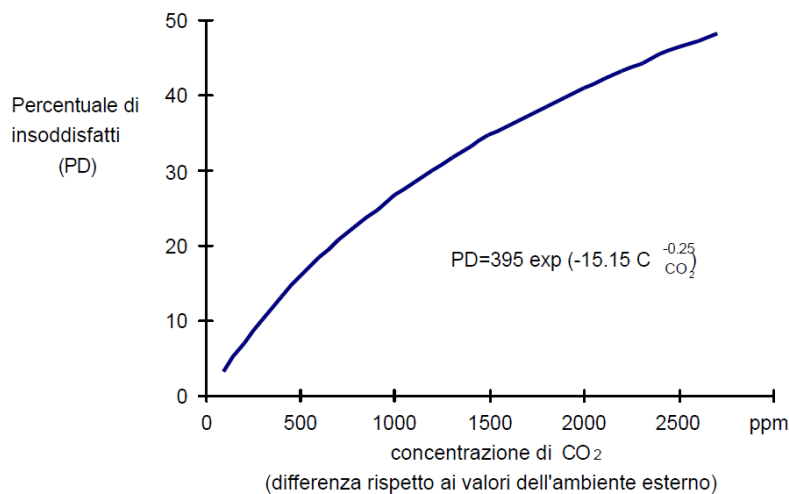


Figura 1-2: Percentuale di insoddisfatti in funzione della concentrazione di anidride carbonica in ambienti in cui l'unica fonte di inquinamento è costituita dagli occupanti.

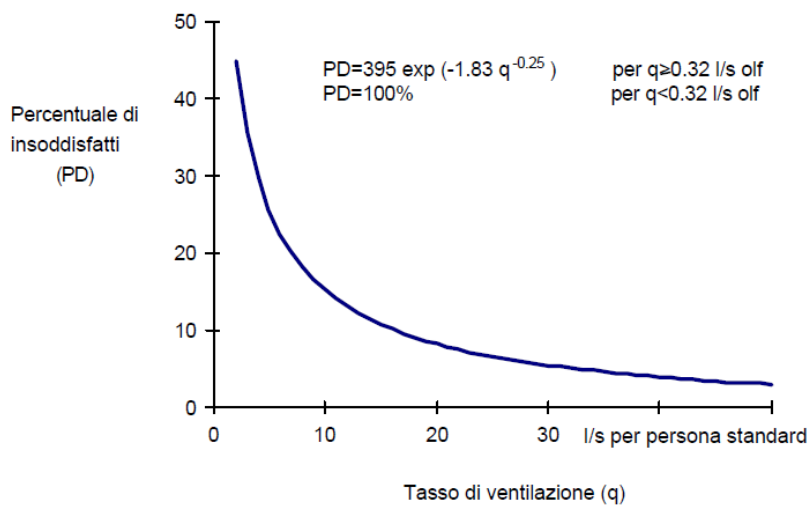


Figura 1-3: Percentuale di insoddisfatti in funzione del tasso di ventilazione in un ambiente in cui il tasso di inquinamento è pari ad 1 olf.

Analogamente, per quantificare l'inquinamento dell'aria così come viene percepito dagli esseri umani si è introdotta una nuova unità, il *pol*.

Poiché la concentrazione dell'inquinamento dell'aria dipende dalla sorgente inquinante e dalla diluizione causata dalla ventilazione in interno e dal vento in esterno, il *pol* è stato definito come *l'inquinamento causato da una persona standard (un olf), ventilata con 1 l/s di aria non inquinata*. Pertanto:

$$1 \text{ pol} = 1 \text{ olf} \quad \left[\frac{l}{s} \right]$$

Per utilizzare unità di misura più conformi alle reali grandezze delle quantità in gioco, si è convenuto di utilizzare un sottomultiplo del pol, il *decipol*, costituito da un decimo di pol, che rappresenta pertanto *l'inquinamento causato da una persona standard* (un olf), sottoposta ad una ventilazione di 10 l/s di aria non inquinata, ossia:

$$1 \text{ decipol} = 0.1 \text{ olf} \quad \left[\frac{l}{s} \right]$$

La qualità percepita dell'aria viene quindi definita come quella concentrazione di bioeffluenti umani che causerebbe la stessa insoddisfazione provocata dall'inquinamento reale.

La figura 1.4 (Fanger, 1988) riporta la relazione intercorrente tra qualità dell'aria espressa per mezzo della percentuale di visitatori insoddisfatti ed in decipol.

Va tuttavia precisato che il decipol esprime solo la qualità dell'aria percepita dagli esseri umani, non i possibili rischi per la salute.

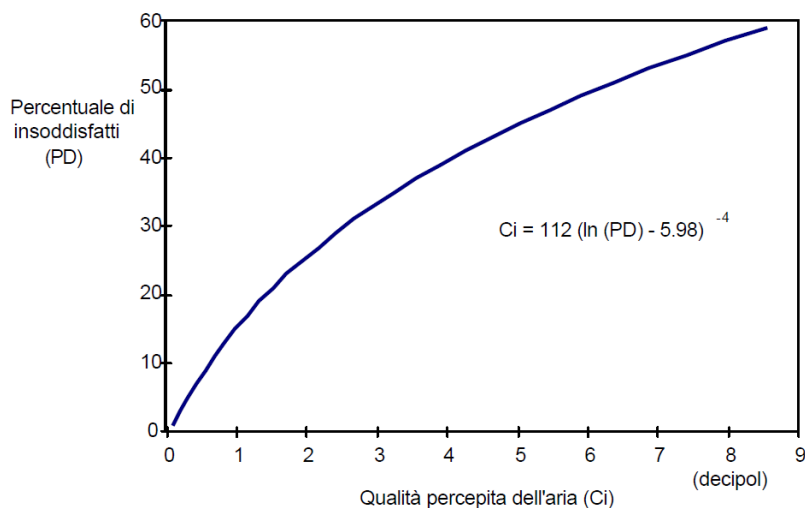


Figura 1-4: Relazione tra la qualità percepita dell'aria espressa in percentuale di insoddisfatti ed in decipol.

Come l'olf, anche il decipol trova corrispondenza in analoghe unità luminose ed acustiche: in particolare, per quanto riguarda l'illuminotecnica, esso corrisponde al *lux*, che esprime l'illuminamento percepito dall'occhio umano, mentre in acustica corrisponde al *decibel* ponderato in curva "A", utilizzato per quantificare i suoni percepiti dall'orecchio.

L'uso delle due nuove unità introdotte non è ristretto agli ambienti interni, ma può anche soddisfacentemente caratterizzare l'inquinamento esterno.

Esse pertanto, consentendo la definizione quantitativa sia delle sorgenti inquinanti che del relativo inquinamento percepito, risultano, come si vedrà in seguito, basilari per il calcolo dei requisiti di ventilazione e per le misure di qualità dell'aria, sia in interno che in esterno.

1.3.3 Ventilazione

La qualità dell'aria di un ambiente può essere controllata intervenendo sia sulle sorgenti inquinanti che sulla ventilazione.

Un'appropriata ventilazione, meccanica o naturale, consente infatti, miscelando l'aria interna ad un ambiente e realizzandone così un'indispensabile redistribuzione, di rimuovere e/o diluire i contaminanti ivi generati e di ottenerne la qualità desiderata.

Per ogni ambiente occorre determinare la massima concentrazione ammissibile per i diversi contaminanti e prevedere, in base alle attività che vi svolgono, tassi di ventilazione adeguati, commisurati alla quantità di sostanze emesse nell'unità di tempo ed alla loro tossicità, che consentano di mantenervi livelli accettabili di qualità dell'aria.

Negli ambienti residenziali il valore del ricambio d'aria è limitato in basso dalla necessità di smaltire, in condizioni normali, gli odori corporali, gli inquinanti endogeni di origine umana e l'umidità; tuttavia tale valore può risultare inadeguato in situazioni particolari, ad esempio nel caso di impiego di materiali che emettono radon e formaldeide, di uso di apparecchi di combustione, in presenza di molti fumatori, ecc.

La più semplice, e spesso l'unica, grandezza utilizzata per quantificare la ventilazione è la *portata* Q di aria di rinnovo introdotta nell'ambiente (espressa in m^3/h o l/s). Tuttavia frequentemente viene utilizzata anche un'altra grandezza, denominata *numero di ricambi* (o *tasso di ricambio*) *d'aria* n , che consente di svincolarsi dalle dimensioni del sistema e si ottiene dividendo

la portata Q per il volume V dell'ambiente. Se V è espresso in m^3 , n viene espresso in $1/\text{h}$ ed è detto *numero di ricambi orari*. L'inverso di n è detto invece *costante di tempo nominale della ventilazione*.

Entrambe queste grandezze dipendono esclusivamente dalle dimensioni dell'ambiente ventilato e dall'entità della portata d'aria di rinnovo e vengono genericamente indicate con il termine di *indicatori di portata*.

Esse tuttavia non forniscono indicazioni sulle modalità di distribuzione dell'aria e di diffusione degli inquinanti all'interno di un ambiente, per la cui conoscenza è necessario disporre di particolari informazioni relative sia agli aspetti fluidodinamici che all'interazione fra distribuzione dell'aria e modalità di rilascio degli inquinanti stessi.

Tuttavia, poiché ciò che è importante per gli occupanti è la qualità dell'aria nella zona di respirazione, la non uniformità dell'aria di un ambiente e l'ubicazione delle fonti di inquinamento rivestono particolare importanza, poiché influenzano le esigenze di ventilazione.

Per tenere conto di tale aspetto sono stati definiti particolari indicatori (che risultano più specificamente rivolti a valutare le prestazioni di un impianto di ventilazione meccanica), che sono noti rispettivamente come *indicatori di distribuzione dell'aria* ed *indicatori di qualità dell'aria*.

Fra questi ultimi, particolare importanza riveste un indice denominato *efficacia di ventilazione*, che rappresenta *la frazione di aria esterna immessa nell'ambiente che raggiunge la zona di occupazione* e viene definito quantitativamente dal rapporto tra le concentrazioni di inquinamento nell'aria di estrazione C_e e nella zona di respirazione C_i (EEC, 1992):

$$\varepsilon_v = C_e/C_i$$

o, come è stata più recentemente definita:

$$\varepsilon_v = \frac{C_e - C_s}{C_i - C_s}$$

in cui C_s rappresenta la concentrazione di inquinamento nell'aria di mandata.

ε_v dipende sia dalla distribuzione dell'aria che dall'ubicazione delle fonti di inquinamento, per cui può assumere valori diversi per inquinanti diversi. In particolare essa dipende dall'ubicazione e dalle caratteristiche sia dei terminali di mandata e di estrazione che delle sorgenti inquinanti e risulta legata, inoltre, alla temperatura e velocità dei flussi d'aria immessi nell'ambiente.

Se l'aria e gli inquinanti sono perfettamente miscelati l'efficacia di ventilazione è pari ad 1: ciò significa che la concentrazione di un dato inquinante ha lo stesso valore in ogni punto dell'ambiente e quindi anche in corrispondenza del sistema di estrazione.

Nella realtà accade che la concentrazione all'estrazione sia in generale diversa (minore o maggiore) che in ambiente. Se è maggiore, l'efficienza del sistema risulta maggiore di 1, la qualità dell'aria nella zona di respirazione risulta quindi migliore di quella nella zona di estrazione ed è pertanto possibile rispettare gli standard di qualità dell'aria adottando minori portate di ricambio.

Se la concentrazione all'estrazione è invece minore che in ambiente, l'efficienza risulta minore di 1, la qualità dell'aria nella zona di interesse è peggiore e quindi la portata di ricambio necessaria risulta maggiore.

ε_v può essere misurata sperimentalmente o calcolata ricorrendo a simulazioni numeriche.

Tuttavia la ventilazione, intesa come il ricambio dell'aria in un ambiente, acquista significato solo se si ammette che i contaminanti siano prodotti all'interno dell'ambiente stesso e che l'aria esterna non sia quindi contaminata: una tale ipotesi, ovviamente, non è rigorosamente verificata, ma può essere considerata accettabile. Per ambienti a tenuta d'aria l'ipotesi è, ovviamente, automaticamente verificata.

Riguardo a tali ambienti è tuttavia necessario effettuare una considerazione. In essi accade spesso che la qualità dell'aria peggiori se viene attivato l'impianto di ventilazione e risulti migliore persino quando l'ambiente è ventilato solo dai leggeri flussi di infiltrazione: in generale, gli edifici ventilati naturalmente presentano qualità di aria migliori.

Spesso, infatti, gli impianti si comportano da amplificatori per la crescita di microrganismi, soprattutto in mancanza di controlli e manutenzione adeguata, rendendosi inoltre responsabili di diffusioni microbiche e di immissioni di contaminanti nell'ambiente.

Per prevenire ciò e garantire corrette prestazioni sono necessarie periodiche operazioni di manutenzione; in particolare, gli organi che necessitano di maggiori attenzioni risultano i filtri, gli scambiatori di calore e gli umidificatori.

Inoltre, se le sorgenti inquinanti presentano caratteristiche di emissione fortemente variabili nel tempo (ad esempio ambienti con forti variazioni della densità di occupazione), al fine di evitare fastidiose concentrazioni di inquinanti, il tasso di ventilazione meccanica va regolato in maniera da compensarne eventuali variazioni.

Va esaminata, in tal caso, la possibilità di adottare *sistemi di ventilazione controllata*, il cui uso si sta diffondendo negli ultimi anni, in cui la portata d'aria è governata dalla concentrazione di un opportuno inquinante presente in ambiente ed adottato come variabile-guida.

Tali sistemi presentano il duplice vantaggio di garantire una migliore qualità dell'aria e di ridurre al minimo il ricambio d'aria, e quindi i consumi per il suo trattamento termoigrometrico.

Essi risultano tuttavia economicamente convenienti solo se la produzione di inquinanti è *abbondante, fortemente variabile nel tempo ed imprevedibile, in relazione sia al momento che al punto di emissione* (Fracastoro, 1991). Se, al contrario, la produzione è modesta, sostanzialmente costante e prevedibile nel tempo è sufficiente adottare un sistema tradizionale a portata costante, utilizzando al più un sistema ad estrazione locale se il punto di produzione è noto in anticipo.

1.4 Impatto energetico della ventilazione

Tra i parametri che influenzano in maniera significativa il bilancio energetico di un edificio è presente senza dubbio anche la ventilazione, come si evince dalla figura 1-5:

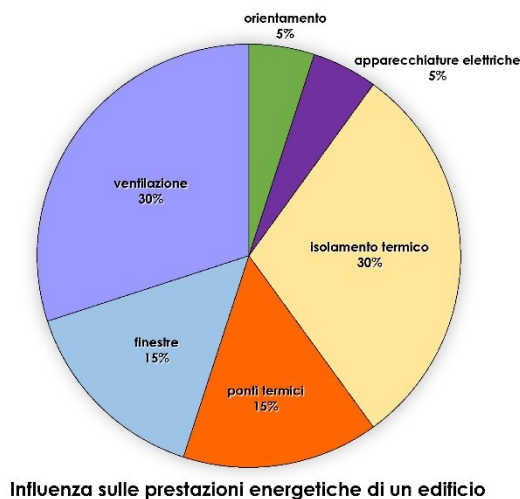


Figura 1-5: influenza dei principali fattori sulle prestazioni energetiche di un edificio

La ventilazione è strettamente correlata alla tenuta all'aria dell'involucro edilizio ovvero al grado di ermeticità del sistema involucro costituito da vari elementi costruttivi interconnessi in vario modo.

La scarsa ermeticità dell'involucro causa:

- Aumento dispersioni termiche nel periodo invernale per convezione con conseguente aumento del fabbisogno per riscaldamento;
- Rischio di formazione di condensa all'interno delle stratigrafie a causa del passaggio del vapore acqueo dall'interno verso l'esterno (inverno) e dall'esterno verso l'interno (estate) con conseguente peggioramento della funzione isolante delle strutture;
- Riduzione del comfort degli ambienti interni per la presenza di spifferi che provocano un abbassamento locale della temperatura superficiale (discomfort locale) o dell'entrata all'interno del locale di flussi d'aria

fredda/calda (inverno/estate) con conseguente diminuzione/aumento del tasso di umidità relativa;

- Ponti acustici, l'aria che entra attraverso gli spifferi è un buon veicolo per il trasporto dei rumori esterni;
- Riduzione del rendimento degli impianti a ventilazione meccanica con recuperatore di calore. Il calore contenuto nell'aria calda una volta disperso all'esterno attraverso le fessure non potrà essere recuperato.

D'altro canto un'elevata ermeticità comporta un abbassamento della qualità interna dell'aria; infatti, dalla seguente figura, è molto semplice dedurre l'inversa proporzionalità esistente tra qualità dell'aria e consumo energetico: all'aumentare del tasso di ricambio d'aria migliora l'IAQ ma peggiora il fabbisogno energetico per la ventilazione.

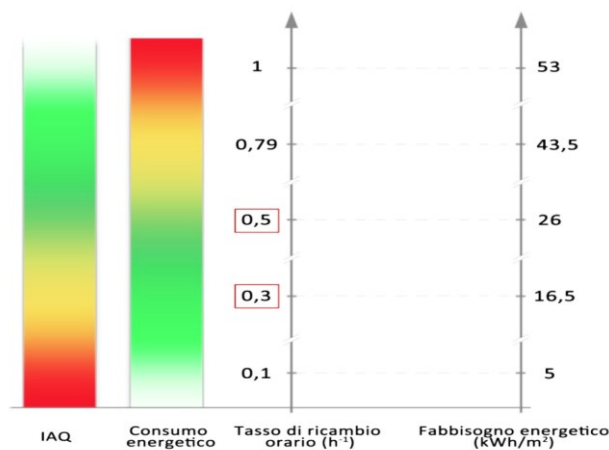


Figura 1-6: Rapporto tra consumo energetico e qualità dell'aria indoor

Per evidenziare l'importanza della ventilazione rapportata al fabbisogno energetico, prendiamo come esempio un caso reale in cui, tramite diversi interventi, si è riusciti a migliorare la classe energetica dell'appartamento in esame.

L'appartamento oggetto di studio è situato all'interno di un edificio nel quartiere di Corticella alla periferia nord della città di Bologna.

Si tratta di un edificio a tipologia in linea a 8 piani, con orientamento Est-Ovest, la cui costruzione è stata terminata nel 1970.

L'impianto distributivo è costituito da quattro vani scala che servono ciascuno due appartamenti, per un totale di 64 appartamenti, tutti doppio affaccio Nord-Sud e con metrature variabili tra 70 e 120 m² di superficie utile.

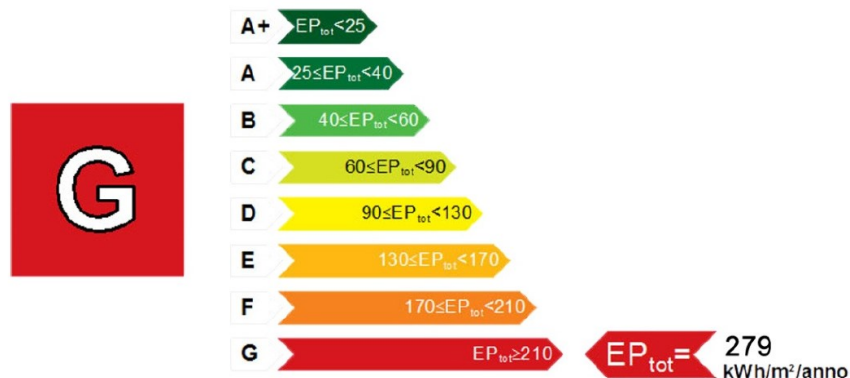
L'edificio è dotato di una sottostazione impiantistica a servizio di una rete di teleriscaldamento, facente capo alla centrale termica.

Si riporta in Tabella 1-2 i dati relativi alle superfici e ai volumi dell'alloggio.

Ambiente		SP (m ²)	h (m)	V (m ³)
1	Ingresso	3,9	2,8	10,9
2	Soggiorno	19,8	2,8	55,4
3	Disimpegno	4,5	2,8	12,6
4	Cucina	14	2,8	39,2
5	Letto singolo	10,5	2,8	29,4
6	Letto singolo	14,5	2,8	40,6
7	Letto matrimoniale	14,5	2,8	40,6
8	Disimpegno	3,2	2,8	9,0
9	Bagno	8	2,8	22,4
10	Bagno	7	2,8	19,6
Totale		100	-	279,7

Tabella 1-2: dati relativi ai volumi e alle superfici dell'appartamento

L'appartamento, con un tasso di ricambio d'aria pari a $n=0.3 \text{ h}^{-1}$ come indicato dalla UNI TS 11300-1:2008, risulta essere in classe G, in quanto l'energia primaria totale EP_{tot} risulta essere pari a $279 \left[\frac{kWh}{m^2 \text{ anno}} \right]$.



Gli interventi effettuati hanno previsto:

- Miglioramento dell'impianto esistente: sostituzione degli attuali *fan-coil* con radiatori dotati di valvole termostatiche e ripartitori di calore.
- Bilanciamento dell'impianto attraverso la sostituzione dell'attuale sistema di pompaggio con pompe a velocità variabile; installazione di valvole di sfioro alla base delle colonne montanti dell'impianto per tenere sotto controllo le pressioni differenziali in rete; installazione di *autoflow* per bilanciare le portate delle colonne.
- Intervento sull'involucro: coibentazione con pannelli di EPS (sp.12 cm) delle pareti laterali (Est e Ovest), del solaio di copertura e di quello del primo piano.
- Realizzazione della coibentazione delle pareti esterne frontali (Nord e Sud).
- Sostituzione degli infissi dell'edificio con serramenti dotati di prestazioni termoisolanti migliori.

I risultati sono stati un tasso di ricambio d'aria pari a $n=0.79 \text{ h}^{-1}$ e un passaggio ad una classe energetica A, grazie ad un valore di energia primaria totale EP_{tot} pari a $19.8 \left[\frac{kWh}{m^2 \text{ anno}} \right]$.



In definitiva, si può notare come si è riusciti, tramite determinati interventi, ad aumentare il tasso di ricambio d'aria (e quindi la qualità della stessa), diminuendo sensibilmente il fabbisogno energetico.

2 CONTESTO LEGISLATIVO E NORMATIVO

Nei paragrafi seguenti vengono trattati i principali riferimenti normativi e legislativi sul tema della ventilazione. Partendo dalle disposizioni europee, recepite a livello nazionale, vengono analizzate, oltre alle varie normative tecniche, anche a quelle americane che, sebbene riferite ad un contesto differente da quello italiano, rappresentano un autorevole supporto.

Tali strumenti purtroppo, non sono sempre facilmente sovrapponibili tra loro e non trovano facile applicabilità; ciò poiché l'Italia, a differenza di altri paesi comunitari, avendo sempre trascurato l'importante aspetto della ventilazione negli ambienti, si trova in un caso particolare di carenza e difformità legislativa.

2.1 La legislazione comunitaria

La Comunità Europea ha emanato nel 2002 la Direttiva 91 dal titolo "Energy Performance of Buildings Directive (EPBD)". Essa nasce per promuovere una maggiore efficienza energetica in edilizia e focalizza l'importanza del raggiungimento di un'elevata qualità ambientale anche grazie al controllo della ventilazione, dell'umidità e della purezza dell'aria.

Per la piena applicazione dell'EPBD il CEN (Comitato Europeo di Normazione) ha predisposto 31 norme, delle quali 7 si occupano di ventilazione nell'edilizia, tra cui la UNI EN 15242 e la UNI EN 15251, in seguito descritte.

La Direttiva 2010/31/UE (EPBD 2) modifica i contenuti della Direttiva del 2002, rafforzando la necessità di aumentare l'efficienza energetica dell'Unione Europea per conseguire l'obiettivo di ridurre del 20% il consumo energetico entro il 2020.

2.2 La legislazione in Italia

La direttiva EPBD doveva essere recepita da tutti gli Stati membri della Comunità Europea; il primo documento emanato in Italia è stato il D.Lgs. 192/05, ampliato e aggiornato dopo un anno dal D.Lgs. 311/06.

Dal 4 agosto 2013 è in vigore la Legge 90/2013, di conversione con modificazioni del D.L. 63/2013: il provvedimento recepisce la Direttiva 2010/31/UE, dettando le

nuove regole sulla prestazione energetica degli edifici nuovi e di quelli oggetto di notevoli ristrutturazioni, aggiornando il D.Lgs. 192/2005. Sono confermate le proroghe al 31 dicembre 2013 delle detrazioni del 65% per interventi di riqualificazione energetica degli edifici e del 50% per le ristrutturazioni edilizie.

2.2.1 Il D.Lgs. 192/2005 e s.m.i.

In questo decreto, recante il titolo “Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell’edilizia” la ventilazione non è trattata in maniera specifica (non compare nemmeno nella serie di definizioni all’allegato A) ma è presente implicitamente in altre considerazioni, come la limitazione della formazione di condensa e di proliferazione di muffe.

L’allegato E “Relazione tecnica di cui all'articolo 28 della legge 9 gennaio 1991, n. 10, attestante la rispondenza alle prescrizioni in materia di contenimento del consumo energetico degli edifici” al punto 5 richiede al progettista di compilare alcuni dati relativi agli impianti termici, descrivendo eventuali sistemi di ventilazione forzata; come anche alcuni autori sottolineano (Raisa, et al., 2010) sarebbe forse stato più opportuno richiedere semplicemente una descrizione del sistema di ventilazione adottato.

Alla lettera a) del punto 6 “Principali risultati dei calcoli”, che riguarda l’involucro edilizio e i ricambi d’aria, è richiesto al progettista di indicare la classe di permeabilità all’aria dei serramenti esterni (senza fare cenno però ad un calcolo delle portate per infiltrazione), il numero di ricambi orari come media nelle 24 ore e la portata di ricambio G solo nei casi di ventilazione meccanica.

Nella prassi progettuale è però consuetudine errata dichiarare un ricambio minimo convenzionale di 0,5 h⁻¹, retaggio delle modalità di compilazione della relazione ex Legge 10/91, senza prevedere un progetto del sistema di ventilazione.

Alla lettera c) del comma 9, allegato I (sostituito dall’art. 4 del D.P.R. 59/09 ma rimasto invariato e integrato) si identifica la ventilazione naturale come la tecnica migliore e da preferire, ma nel caso in cui non sia efficace, si suggerisce l’impiego di un sistema di ventilazione meccanica; questo deve avvenire rispettando il comma

13 dell'art. 5 del D.P.R. 412/93 che sottolinea l'adozione di un recuperatore di calore quando un impianto supera un determinato numero annuo di ore di funzionamento.

All'interno del D.Lgs. 311 non sono quindi definiti valori convenzionali per il ricambio d'aria negli edifici residenziali, diversamente da quanto accadeva nel D.P.R. 412/1993. Il D.P.R. 59/09 impone di fare riferimento, per il calcolo dei fabbisogni dell'edificio e quindi per la certificazione energetica al corpo normativo delle UNI TS 11300, in seguito analizzate.

Anche alla luce delle successive modifiche e integrazioni al D.Lgs. 192/2005 è evidente come questo presenti ancora numerose lacune sul tema della ventilazione, andando in pratica a disattendere i requisiti definiti dalla EPBD.

2.2.2 I Regolamenti comunali

A livello comunale sono emanati i Regolamenti Edilizi e i Regolamenti Urbanistici Edilizi (RUE) con valore cogente; hanno quindi la priorità su qualsiasi altra disposizione. In questa trattazione si riporta a titolo di esempio le indicazioni contenute nel RUE della città di Ancona. In particolare l'art. 80 indica che:

1. Gli edifici devono essere progettati e realizzati in modo che ogni locale possa fruire in tutte le stagioni di aerazione adeguata alla sua destinazione.
2. L'aerazione dei locali può essere naturale oppure artificiale con sistemi permanenti adeguati alla destinazione dei locali medesimi.
3. Possono fruire di aerazione artificiale i locali già individuati all'articolo 79, comma 3.
4. La ventilazione artificiale può essere assicurata mediante un condotto di aereazioni indipendenti per ogni locale servito, sfociante sulla copertura e dotato di elettro aspiratore con accensione automatica collegata all'interruttore dell'illuminazione, oppure negli edifici con più di tre piani, può essere ottenuta mediante un unico condotto collettivo ramificato. Tale condotto deve essere dotato di elettroaspiratore centralizzato, ad aspirazione continua, posto sulla copertura.

5. I locali destinati alla permanenza di persone, i quali fruiscono di aerazione naturale, devono avere almeno un serramento esterno opportunamente dimensionato e posizionato, dotato di una o più parti apribili.
6. L'altezza media dei locali destinati alla residenza o ad altri usi che prevedano la presenza continuativa di persone non deve essere minore di m. 2,70.
7. La minima distanza tra il pavimento ed il soffitto finito non deve comunque essere inferiore a m. 2,20.
8. L'altezza media può essere ridotta a m. 2,40 nei gabinetti e negli antigabinetti degli edifici con destinazione residenziale e non residenziale, negli spogliatoi, negli spazi destinati al disimpegno ed alla circolazione orizzontale e verticale.
9. Può essere autorizzata un'altezza diversa da quella indicata ai punti precedenti nelle opere di recupero del patrimonio edilizio esistente, sia nel caso che si mantengano altezze già esistenti e sia nel caso di modifiche alle quote originarie dei solai, quando non si proceda ad un incremento del numero dei piani e quando comunque non si modifichino gli usi preesistenti.
10. La minima altezza degli spazi sottostanti ai soppalchi non deve essere minore di m. 2,20; almeno la medesima minima altezza deve intercorrere tra il pavimento finito dei soppalchi ed il soffitto finito dei locali, ove i soppalchi siano destinati alla permanenza di persone.
11. Nei casi di soppalchi aperti, affacciati direttamente sul locale sottostante, costituenti pertanto con quest'ultimo un unico vano, la relativa superficie si considera abitabile qualora il rapporto tra il volume dell'ambiente e la superficie è almeno pari a m. 3, fermo restando quanto previsto al precedente comma.
12. La superficie utile degli alloggi deve corrispondere ai requisiti fissati dalle disposizioni del decreto del ministero della sanità 5 luglio 1975, pubblicato nella gazzetta ufficiale del 18 luglio 1975, n. 190.

13. I gabinetti degli alloggi, fatta eccezione per quelli ad uso esclusivo degli utenti di una sola camera da letto, devono essere disimpegnati dai singoli locali.
14. Il dimensionamento minimo dei singoli vani deve fare riferimento alle disposizioni di legge di cui al citato D.M. 5 luglio 1975.

2.3 Normativa tecnica

L'apparato normativo sulla ventilazione è molto ricco; in questa trattazione le diverse norme sono suddivise in base ai temi principali trattati.

2.3.1 Normative di supporto alla EPBD

È già stato sottolineato in precedenza che, per l'applicazione dell'EPBD, il CEN ha predisposto ben 31 norme, di cui 5 riguardanti la ventilazione nell'edilizia residenziale, di seguito descritte.

UNI EN 15251:2008

La norma, recante il titolo "Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica" è applicabile ad abitazioni individuali, condomini, uffici, scuole, ospedali, alberghi e ristoranti, impianti sportivi, edifici ad uso commerciale all'ingrosso e al dettaglio. Viene presentato inizialmente il concetto di "categoria di qualità" dell'edificio e in Tabella 2-1 si riportano le descrizioni delle categorie e i requisiti ad esse connesse.

<i>Categoria</i>	<i>Spiegazione</i>
I	Alto livello di aspettativa; è raccomandata per spazi occupati da persone molto sensibili e fragili (come persone con handicap, ammalati, bambini molto piccoli o anziani) che hanno bisogno di requisiti specifici
II	Livello normale di aspettativa; dovrebbe essere utilizzata per le nuove costruzioni o per le ristrutturazioni
III	Un accettabile moderato livello di aspettativa; dovrebbe essere usata per gli edifici esterni
IV	Valori al di fuori dei criteri delle precedenti categorie; questa categoria dovrebbe essere accettata solo per una limitata parte dell'anno

Tabella 2-1: Descrizione delle categorie di qualità dell'edificio secondo UNI EN 15251:2008

UNI EN 15239:2008 e UNI EN 15240:2008

Entrambe le norme descrivono una metodologia per l'ispezione degli impianti: la 15239, applicabile a edifici residenziali e non, riguarda i sistemi di ventilazione meccanica e include alcune raccomandazioni per apportare miglioramenti ai sistemi stessi. Al paragrafo 4.2 si sottolinea come l'apertura manuale dei serramenti, in un edificio riscaldato, faccia disperdere energia per "riscaldare le strade". La norma 15240 tratta invece l'ispezione degli impianti di climatizzazione presenti negli edifici per riscaldare o raffrescare i locali.

UNI EN 15242:2008

La norma (*"Metodi di calcolo per la determinazione delle portate d'aria negli edifici, comprese le infiltrazioni"*) descrive il metodo per calcolare le portate di aria di ventilazione per edifici da utilizzarsi per applicazioni come i calcoli energetici, il calcolo dei carichi termici, il benessere estivo e la valutazione della qualità dell'aria negli ambienti interni.

La metodologia si applica a edifici ventilati meccanicamente, sistemi ibridi e apertura delle finestre per mezzo di operazione manuale per l'aerazione o per il raggiungimento del comfort in estate. Al punto 3.14 viene fornita la definizione di

efficienza di ventilazione, descritta come la relazione tra le concentrazioni di inquinamento nell'aria di apporto, nell'aria estratta e nell'aria interna nella zona di respirazione (nella zona occupata) e viene espressa da:

$$\varepsilon_v = \frac{C_{eta} - C_{sup}}{C_{ida} - C_{sup}}$$

dove:

ε_v = efficienza di ventilazione

C_{eta} = concentrazione di inquinamento nell'aria estratta

C_{ida} = concentrazione di inquinamento nell'aria interna (zona di respirazione nella zona occupata)

C_{sup} = concentrazione di inquinamento nell'aria di apporto

UNI EN 15243:2008

La norma definisce le modalità di calcolo di temperature, carichi sensibili e fabbisogno energetico degli ambienti per la progettazione; oltre a determinare i carichi degli impianti definisce l'approccio per il calcolo della prestazione energetica globale di edifici con impianti di climatizzazione dei locali.

2.3.2 Normative generali per la determinazione di portate d'aria

In questo paragrafo viene esposta la norma UNI 10339:1995 e la bozza di revisione e le norme americane redatte dall'Ashrae, la 62.1:2010 e la 62.2:2010.

UNI 10339

“*Impianti aeraulici a fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti*” è il titolo della norma che per anni è stata un riferimento alla progettazione impiantistica.

E' tutt'ora in fase di revisione per poter correttamente soddisfare tutti i requisiti imposti dalle norme europee in ambito EPBD.

E' utile comunque riportare il prospetto III e il prospetto VIII (Tabella 2.2 e Tabella 2.3) che costituisce tuttora il principale riferimento per il dimensionamento degli impianti di ventilazione. Il prospetto III riporta, per varie destinazioni d'uso, le portate minime di aria esterna o di estrazione da garantire mentre il prospetto VIII indica gli indici di affollamento per individuare il numero di persone negli ambienti e individuare le portate complessive di rinnovo.

Categorie di edifici	Portata di aria esterna o di estrazione		Note
	Q_{op} (10^{-3} m ³ /s per persona)	Q_{os} (10^{-3} m ³ /s m ²)	
EDIFICI ADIBITI A RESIDENZA E ASSIMILABILI			
RESIDENZE A CARATTERE CONTINUATIVO			
- Abitazioni civili:			
• soggiorni, camere da letto	11	-	A
• cucina, bagni, servizi		estrazioni	
- Collegi, luoghi di ricovero, case di pena, caserme, conventi:			
• sale riunioni	9*	-	-
• dormitori/camere	11	-	-
• cucina	-	16,5	-
• bagni/servizi		estrazioni	A

Tabella 2.2: Portate di aria esterna in edifici adibiti ad uso civile (estratto da prospetto III UNI 10339)

<i>Classificazione degli edifici per Categoria</i>	N_s
EDIFICI ADIBITI A RESIDENZA E ASSIMILABILI	
• Abitazioni civili:	
Soggiorni, camere letto	0,04
• Collegi, luoghi di ricovero, case di pena, caserme, conventi:	
Soggiorni	0,20
Sale riunioni	0,60
Dormitori	0,10
Camere letto	0,05
• Alberghi, pensioni:	

Ingresso, soggiorni	0,20
Sale conferenze (piccole)	0,60
Camere letto	0,05

Tabella 2.3: Indici di affollamento ns per metro quadrato di superficie (estratto da prospetto VIII UNI 10339)

ANSI/ASHRAE STANDARD 62.1:2010

Lo Standard 62.1-2010 (*Ventilation and acceptable indoor air quality in low-rise residential buildings*) è applicabile a tutti gli ambienti in cui è prevista la presenza di persone, ad esclusione delle case unifamiliari e plurifamiliari uguali o inferiori a tre piani. Nella norma sono contenute due metodologie per il calcolo delle portate d'aria, una più semplice basata sulle portate d'aria in funzione della tipologia di spazio da ventilare e una più complessa basata sul controllo della concentrazione massima di inquinanti e sulla qualità dell'aria percepita.

Il primo metodo prevede il calcolo di V_{bz} , la portata di aria esterna che deve essere garantita nella zona in cui si respira (*breathing zone*)

$$V_{bz} = R_p \cdot P_z + R_a \cdot A_z$$

dove:

A_z = superficie utile dello spazio occupato [m^2]

P_z = affollamento, inteso come numero massimo di persone contenute all'interno della zona occupata in condizioni standard

R_p = portata di aria esterna richiesta per persona $\left[\frac{l}{s \cdot pers}\right]$

R_a = portata di aria esterna richiesta per unità di superficie $\left[\frac{l}{s \cdot m^2}\right]$

I valori di R_p e R_a sono tabellari.

La seconda metodologia è basata invece sulla qualità dell'aria percepita (IAQ) e sul controllo della concentrazione massima di inquinanti. La norma, al punto 6.3.1.4 (Approcci progettuali) indica quattro possibilità tra cui un'analisi basata sul bilancio in 60 massa per un singolo ambiente. Alcune equazioni per il calcolo della

portata di ventilazione sono riportate in Tabella 2.4 tratta dall'appendice A della norma.

Required Recirculation Rate			Required Outdoor Airflow	Space Contaminant Concentration
Filter Location	Flow	Outdoor Airflow		
None	VAV	100%	$V_o = \frac{N}{E_v F_r (C_s - C_o)}$	$C_s = C_o + \frac{N}{E_v F_r V_o}$
A	Constant	Constant	$V_o = \frac{N - E_v R V_r E_f C_s}{E_v (C_s - C_o)}$	$C_s = \frac{N + E_v V_o C_o}{E_v (V_o + R V_r E_f)}$
A	VAV	Constant	$V_o = \frac{N - E_v F_r R V_r E_f C_s}{E_v (C_s - C_o)}$	$C_s = \frac{N + E_v V_o C_o}{E_v (V_o + F_r R V_r E_f)}$
A	VAV	Proportional*	$V_o = \frac{N - E_v F_r R V_r E_f C_s}{E_v F_r (C_s - C_o)}$	$C_s = \frac{N + E_v F_r V_o C_o}{F_r E_v (V_o + R V_r E_f)}$
B	Constant	Constant	$V_o = \frac{N - E_v R V_r E_f C_s}{E_v [C_s - (1 - E_f) C_o]}$	$C_s = \frac{N + E_v V_o (1 - E_f) C_o}{E_v (V_o + R V_r E_f)}$
B	VAV	100%	$V_o = \frac{N}{e F_r [C_s - (1 - E_f) C_o]}$	$C_s = \frac{N + e F_r V_o (1 - E_f) C_o}{e F_r V_o}$
B	VAV	Constant	$V_o = \frac{N - E_v F_r R V_r E_f C_s}{E_v [C_s - (1 - E_f) C_o]}$	$C_s = \frac{N + E_v V_o (1 - E_f) C_o}{E_v (V_o + F_r R V_r E_f)}$
B	VAV	Proportional	$V_o = \frac{N - E_v F_r R V_r E_f C_s}{E_v F_r [C_s - (1 - E_f) C_o]}$	$C_s = \frac{N + E_v F_r V_o (1 - E_f) C_o}{E_v F_r (V_o + R V_r E_f)}$

* Proportional indicates that the outdoor airflow varies with the supply airflow, such that the outdoor airflow is equal to the design value times the flow reduction factor F_r .

Tabella 2.4: Portata d'aria esterna richiesta e concentrazione dei contaminanti (tratta da ASHRAE 62.1:2010)

dove:

A,B = posizione dei filtri

V = portata in volume

C = concentrazione dell'inquinante

e = efficienza di ventilazione

Ef = efficienza di filtrazione

Fr = fattore di riduzione della portata

N = tasso di generazione dell'inquinante

R = fattore di ricircolo

Xo = quantità riferita allo spazio esterno

Xr = quantità di ritorno

Xs = quantità riferita allo spazio interno

ANSI/ASHRAE STANDARD 62.2:2010

Questa norma rappresenta il punto di riferimento nella progettazione a livello Americano.

Lo standard 62.2 è applicabile nella quasi totalità degli edifici residenziali statunitensi (“*low-rise residential buildings*”) e definisce i requisiti minimi dei sistemi di ventilazione meccanica e naturale e dell’involucro per conseguire livelli accettabili di qualità dell’aria interna.

Il capitolo 4 si occupa dell’aspetto primario di ventilazione dell’intera abitazione: a tal fine devono essere installati per ogni unità abitativa sistemi di ventilazione meccanica, al fine di garantire una portata d’aria non inferiore ai valori ricavati dalle formule seguenti:

$$Q_{fan} = 0.01A_{floor} + 7.5(N_{br} + 1) \text{ oppure } Q_{fan} = 0.05A_{floor} + 3.5(N_{br} + 1)$$

dove:

Q_{fan} = portata del ventilatore [l/s]

A_{floor} = superficie utile dell’appartamento [m^2]

N_{br} = numero delle camere da letto, non inferiore a 1

L’affollamento che si assume è pari a due persone in un monolocale, o in un appartamento con una camera da letto, e una persona aggiuntiva per ogni camera da letto in più. Se la densità è maggiore bisogna aggiungere 3,5 l/s per ogni persona eccedente. In alternativa alle due equazioni riportate sopra è possibile utilizzare i valori esposti in Tabella 2.5.

Superficie (m^2)	Numero di Stanze da letto				
	0-1	2-3	4-5	6-7	>7
<139	14	21	28	35	42
139,1-279	21	28	35	42	50
279,1-418	28	35	42	50	57
418,1-557	35	42	50	57	64
557,1-697	42	50	57	64	71
>697	50	57	64	71	78

Tabella 2.5: Portate di ventilazione richieste (da ASHRAE 62.2:2010)

Si vuole far notare che questi valori sono ricavati per un'altezza degli ambienti tipica delle residenze americane, per cui si riporta, a titolo informativo, la Tabella 2.6 corretta per altezze di ambienti media uguale a 2,7 m e con riferimento al valore medio dell'area negli intervalli considerati.

Superficie (m ²)	Numero di Stanze da letto				
	0-1	2-3	4-5	6-7	>8
70	0,27	0,4	0,54	0,67	0,81
209	0,13	0,18	0,22	0,27	0,32
349	0,11	0,13	0,16	0,19	0,22
488	0,1	0,11	0,14	0,16	0,18
627	0,09	0,11	0,12	0,14	0,15
697	0,1	0,11	0,12	0,14	0,15

Tabella 2.6: Portate di ventilazione corrette per un'altezza di 2,7 m (Raisa, et al., 2010)

Oltre al requisito di ventilazione globale, nello Standard 62.2 è espresso anche il requisito di garantire delle portate di estrazione dai bagni e dalle cucine, che possono essere fatte in modo continuo o intermittente. Nelle cucine la portata da estrarre è pari a 50 l/s, se il sistema è intermittente e 5 h⁻¹ (usando il volume della cucina) se continuo. Le portate di estrazione dai bagni sono rispettivamente 25 l/s per funzionamento intermittente e 10 l/s per funzionamento continuo: tali valori sono notevolmente superiori a quelli delle norme europee.

2.3.3 Muffe e condense

Si è già discusso del fatto che la qualità dell'aria interna sia un parametro fondamentale di progettazione in quanto le persone trascorrono la maggior parte della giornata all'interno di edifici.

La presenza di agenti biologici nell'aria interna è attribuita a una eccessiva umidità e un'inadeguata ventilazione. Sfavorevoli combinazioni di umidità e temperatura interna possono quindi portare alla condensazione di acqua sulle superfici, seguita dalla lenta decomposizione dei materiali e alla crescita di microbi, come muffe,

funghi e batteri, che emettono successivamente spore, cellule, frammenti e composti organici volatili nell'aria ambiente. Oltretutto l'umidità porta al lento degrado chimico e biologico dei materiali da costruzione, inquinando ulteriormente l'aria interna.

La continua esposizione a contaminanti microbici è clinicamente associato a sintomi respiratori, allergie, asma e reazioni immunologiche. Numerosi studi effettuati in paesi Europei, ma anche negli Stati Uniti e Canada hanno mostrato come nel 2004 almeno il 20% degli edifici possiede uno o più segni di umidità.

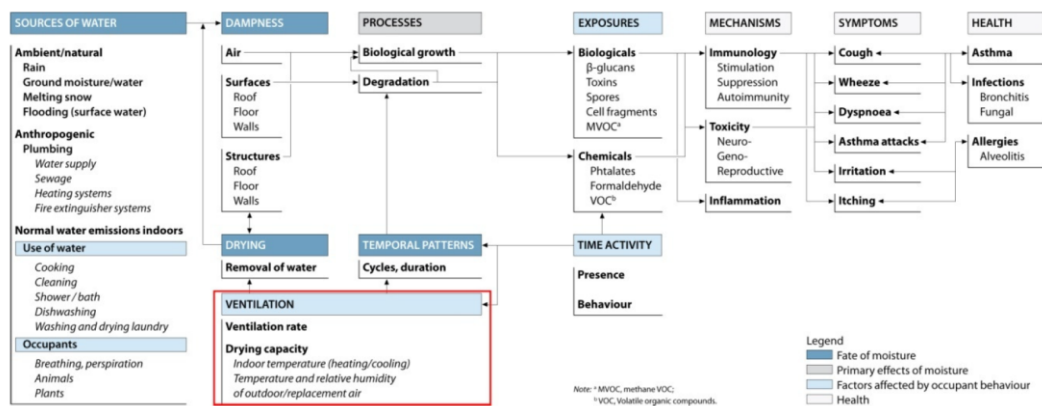


Figura 2.1: Legame tra umidità e salute (WHO EUROPE 2009)

In Figura 2.1 è evidenziato il ruolo della ventilazione, cioè quello di rimuovere o diluire gli inquinanti, controllare temperatura e umidità all'interno degli ambienti, ridurre i problemi respiratori, assicurare almeno 10 l/s per persona per ridurre i sintomi della sindrome da edificio malato e garantire il minimo comfort.(WHO EUROPE 2009).

2.3.4 Ventilazione e risparmio energetico

Il tema del risparmio energetico è, oggi più che mai, di straordinaria importanza, soprattutto alla luce delle ultime indicazioni contenute nella nuova versione dell'EPBD, la Direttiva 2010/31/UE. Si rafforza la necessità di aumentare l'efficienza energetica all'interno dell'Unione Europea per conseguire l'ambizioso obiettivo di ridurre del 20% il consumo energetico entro il 2020: obiettivo primario

è che entro il 31 dicembre 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione siano ad energia quasi zero, anticipando al 31 dicembre 2018 questa regola per gli edifici di proprietà di enti pubblici. In tutto ciò gioca un ruolo fondamentale la ventilazione ma soprattutto la qualità dell'aria interna, fattore di crescente importanza.

La norma UNI EN 12831:2006 si occupa di calcolare le potenze di picco per il dimensionamento degli impianti, mentre il calcolo dei fabbisogni energetici degli edifici è sviluppato nelle normative UNI EN ISO 13790:2008 e la serie delle specifiche tecniche UNI TS 11300 (in particolare la UNI TS 11300-1, attualmente in revisione, basata sulla UNI EN ISO 13790).

UNI EN 12831

Come detto questa norma fornisce i metodi di calcolo delle dispersioni termiche di progetto e del carico termico in condizioni di progetto. Può essere utilizzata per tutti gli edifici con altezza interna non maggiore di 5 m, ipotizzati in regime termico stazionario. Al paragrafo 7.2 la norma fornisce il metodo di calcolo della dispersione termica di progetto per ventilazione $\Phi_{v,i}$, per uno spazio riscaldato (i)

$$\Phi_{v,i} = H_{v,i} (\theta_{int,i} - \theta_e) \quad [W]$$

dove:

$H_{v,i}$ = coefficiente di dispersione termica di progetto per ventilazione $\left[\frac{W}{K}\right]$

$\theta_{int,i}$ = temperatura interna di progetto dello spazio riscaldato (i) [K]

θ_e = temperatura esterna di progetto [K]

Il coefficiente di dispersione termica di progetto per ventilazione, $H_{v,i}$, di uno spazio riscaldato (i) viene calcolato come:

$$H_{v,i} = \dot{V}_i \cdot \rho \cdot c_p \quad W/K$$

dove:

\dot{V}_i = portata d'aria dello spazio riscaldato i-esimo $\left[\frac{m^3}{s} \right]$

ρ = densità dell'aria a $\theta_{int,i}$ $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$

c_p = capacità termica dell'aria a $\theta_{int,i}$ $\left[\frac{kJ}{kgK} \right]$

Assumendo costanti i valori di ρ e c_p l'equazione di prima si semplifica in

$$H_{v,i} = 0,34 * \dot{V}_i$$

con \dot{V}_i espresso in $\left[\frac{m^3}{h} \right]$

La norma distingue quindi la procedura di calcolo della portata d'aria per il volume riscaldato in relazione alla presenza o meno di sistema di ventilazione meccanica.

Senza sistema di ventilazione

In assenza di sistemi di ventilazione, si suppone che l'aria di rinnovo abbia le caratteristiche termiche dell'aria esterna. Pertanto, la dispersione termica è proporzionale alla differenza tra la temperatura interna di progetto e la temperatura dell'aria esterna. Il valore della portata d'aria dello spazio riscaldato i-esimo, utilizzato per il calcolo del coefficiente di dispersione termica di progetto per ventilazione, è pari a

$$\dot{V}_i = \max (\dot{V}_{inf,i}, \dot{V}_{min,i})$$

dove:

$\dot{V}_{inf,i}$ = portata d'aria per infiltrazione, dovuta al flusso d'aria attraverso le fessure e le giunzioni nell'involucro dell'edificio

$\dot{V}_{min,i}$ = portata d'aria minima richiesta per ragioni igieniche

Con sistema di ventilazione

Se è presente un sistema di ventilazione, l'aria di rinnovo non deve necessariamente avere le caratteristiche termiche dell'aria esterna, ad esempio quando si utilizza un recuperatore di calore o quando l'aria viene preriscaldata; in questi casi si tiene

conto della differenza di temperatura tra l'aria di rinnovo e quella esterna di progetto, applicando un fattore di riduzione.

La portata d'aria dello spazio riscaldato i-esimo vale:

$$\dot{V}_i = \dot{V}_{inf,i} + \dot{V}_{su,i} * (f_{v,i} + \dot{V}_{mech,inf,i})$$

dove:

$\dot{V}_{inf,i}$ = portata d'aria per infiltrazione dello spazio riscaldato i-esimo $\left[\frac{m^3}{h}\right]$

$\dot{V}_{su,i}$ = portata d'aria di rinnovo dello spazio riscaldato i-esimo $\left[\frac{m^3}{h}\right]$

$\dot{V}_{mech,i,inf}$ = portata d'aria di estrazione in eccesso dello spazio riscaldato i-esimo calcolata secondo il punto 7.2.3.2 della norma $\left[\frac{m^3}{h}\right]$

$f_{v,i}$ = fattore di riduzione della temperatura, dato da:

$$f_{v,i} = \frac{\theta_{int,i} - \theta_{su,i}}{\theta_{int,i} - \theta_e}$$

$\theta_{su,i}$ = temperatura dell'aria immessa nello spazio riscaldato i-esimo $[\text{°C}]$

La portata di estrazione in eccesso è sostanzialmente non nulla quando la portata di estrazione è maggiore di quella immessa. La norma rimanda alla UNI EN 13465 (sostituita dalla UNI EN 15242) per il metodo di calcolo preciso delle portate d'aria negli edifici, ma propone comunque metodi semplificati al paragrafo 7.2.2 e 7.2.3

Igiene – portata d'aria minima

Per ragioni di igiene è richiesta una portata di aria minima; quando non sono disponibili informazioni nazionali, la portata d'aria minima, \dot{V}_{mini} , di uno spazio riscaldato (i), può essere determinata con la seguente:

$$\dot{V}_{mini} = n_{min} * V_i$$

dove:

n_{min} = tasso minimo orario di ventilazione esterna $[h^{-1}]$

V_i = volume dello spazio riscaldato (i), calcolato in base alle dimensioni interne [m³]

Se non vi sono indicazioni a livello nazionale la norma suggerisce di fare riferimento ad alcuni dati del CR 1752, anche se oggi si deve ritenere più attendibile il riferimento alla UNI EN 15251, pubblicata dopo la UNI EN 12831. Questa rimanda comunque alla propria appendice D, in particolare al prospetto D.6 (Tabella 2.7) dove si suggeriscono i tassi minimi di ventilazione esterna n_{min} .

Tipo di ambiente	n_{min} h ⁻¹
Ambiente abitabile (predefinito)	0,5
Cucina o bagno con finestra	1,5
Ufficio	1,0
Sala riunioni, aula scolastica	2,0

Tabella 2.7: Tasso minimo di ventilazione esterna, n_{min} (da UNI EN 12831:2006)

Questi valori sono basati sulle dimensioni interne; se nel calcolo si utilizzano le dimensioni esterne, i valori devono essere moltiplicati per il rapporto tra il volume interno V_i e il volume esterno dello spazio (solitamente 0,8). Se sono presenti dei caminetti aperti è opportuno tenere conto dei maggiori tassi di ventilazione richiesti per l'aria comburente.

Infiltrazione attraverso l'involucro dell'edificio – portata d'aria

Il paragrafo 7.2.2 propone un metodo di calcolo per valutare le infiltrazioni attraverso l'involucro edilizio in maniera analoga a quanto avveniva nella UNI EN 832, che però è stata ritirata. Viene proposta la seguente:

$$\dot{V}_{inf,i} = 2 * V_i * n_{50} * e_i * \mathcal{E}_i$$

dove:

n_{50} = tasso orario di ventilazione risultante da una differenza di pressione di 50 Pa tra l'interno e l'esterno dell'edificio, compresi gli effetti delle prese d'aria [h⁻¹]

e_i = coefficiente di schermatura

\mathcal{E}_i = fattore di correzione per l'altezza, che tiene conto della maggiore velocità del vento all'aumentare dell'altezza dello spazio dal livello del suolo

Nell'equazione sopra viene introdotto il fattore 2 in quanto il valore di n_{50} è dato per l'intero edificio. Il calcolo deve considerare il caso più sfavorevole, vale a dire quando tutta l'aria penetra per infiltrazione da un unico lato dell'edificio. Per i valori di n_{50} , e_i e \mathcal{E}_i , qualora non siano disponibili dati nazionali, si possono applicare quelli forniti all'appendice D (Tabella 2.8, Tabella 2.9 e Tabella 2.10)

Costruzione	n_{50} h ⁻¹		
	Grado di tenuta all'aria dell'involucro dell'edificio (qualità della tenuta delle finestre)		
	alto (alta qualità della tenuta di porte e finestre)	medio (finestre a doppio vetro, tenuta normale)	basso (finestre a vetro singolo, senza sigillante)
abitazioni unifamiliari	<4	4 - 10	>10
altre abitazioni o edifici	<2	2 - 5	>5

Tabella 2.8: Tassi di ventilazione per l'intero edificio, n_{50} (secondo UNI EN 12831:2006)

Classe di schermatura	e		
	Spazio riscaldato senza aperture esposte	Spazio riscaldato con un'apertura esposta	Spazio riscaldato con più di un'apertura esposta
Nessuna schermatura (edifici in zone ventose, edifici alti in centri cittadini)	0	0,03	0,05
Schermatura media (edifici in campagna con alberi o altri edifici attorno, periferia)	0	0,02	0,03
Forte schermatura (edifici di media altezza in centri cittadini, edifici in zone boschive)	0	0,01	0,02

Tabella 2.9: Coefficiente di schermatura e (da UNI EN 12831:2008)

Altezza dello spazio riscaldato al di sopra del livello del suolo (altezza del centro della stanza dal livello del suolo)	ε
0 - 10 m	1,0
>10 - 30 m	1,2
>30 m	1,5

Tabella 2.10: Fattore di correzione per l'altezza ε (da UNI EN 12831:2006)

UNI EN ISO 13790:2008

Questa norma europea permette di calcolare il fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento di ambienti di edifici residenziali e non. Vengono presentati metodi di calcolo di tipo semplificato (mensile o stagionale) o anche più accurati (orari) utilizzando profili d'utenza come temperature di regolazione, ecc.

Il paragrafo 7.2.1.1 introduce il calcolo, secondo il metodo mensile o stagionale per il fabbisogno di energia termica per il riscaldamento continuo che, per ciascuna zona dell'edificio è indicato dall'equazione:

$$Q_{H,nd} = Q_{H,ht} - \eta_{H,gn} Q_{H,gn} \quad [\text{MJ}]$$

dove:

$Q_{H,nd}$ = fabbisogno di energia termica dell'edificio per riscaldamento [MJ]

$Q_{H,ht}$ = scambio termico totale nella modalità di riscaldamento [MJ]

$Q_{H,gn}$ = apporti termici totali nella modalità di riscaldamento [MJ]

$\eta_{H,gn}$ = fattore adimensionale di utilizzazione degli apporti

Analogamente il fabbisogno di energia termica per il raffrescamento continuo è dato da (par. 7.2.1.2)

$$Q_{C,nd} = Q_{C,gn} - \eta_{C,ls} Q_{C,ht} \quad [\text{MJ}]$$

dove:

$Q_{C,nd}$ = fabbisogno di energia termica dell'edificio per raffrescamento [MJ]

$Q_{C,ht}$ = scambio termico totale nella modalità di raffrescamento [MJ]

$Q_{C,gn}$ = apporti termici totali nella modalità di raffrescamento [MJ]

$\eta_{C,ls}$ = fattore adimensionale di utilizzazione delle dispersioni termiche

Il contributo della ventilazione è incluso nel termine $Q_{H,ht}$ (e $Q_{C,ht}$) che risulta essere composto da due termini, uno riferito allo scambio termico per trasmissione e uno per ventilazione secondo l'equazione

$$Q_{ht} = Q_{tr} + Q_{ve} = \quad [MJ]$$

dove:

Q_{tr} = scambio termico totale per trasmissione [MJ]

Q_{ve} = scambio termico totale per ventilazione [MJ]

Il punto 9 della norma definisce lo scambio termico per ventilazione e in particolare il paragrafo 9.2 si riferisce al metodo stagionale o mensile per cui risulta (nel solo caso di riscaldamento):

$$Q_{ve} = H_{ve,adj} * (\theta_{int,set,H,z} - \theta_e) \quad [MJ]$$

dove (per ciascuna zona dell'edificio z):

$H_{ve,adj}$ = coefficiente globale di scambio termico per ventilazione, corretto per la differenza di temperatura interna-esterna (se applicabile) $[\frac{W}{K}]$

$\theta_{int,set,H}$ = temperatura di regolazione per il riscaldamento della zona [K]

θ_e = temperatura dell'ambiente esterno [K]

t = durata del passo di calcolo [Ms]

Il valore del coefficiente globale di scambio termico per ventilazione $H_{ve,adj}$, è calcolato come indicato dalla seguente equazione

$$H_{ve,adj} = \rho_a c_a (\sum_k b_{ve,k} q_{ve,k,mn})$$

dove:

$\rho_a c_a$ = capacità termica volumica dell'aria = 1200 $[\frac{J}{m^3K}]$

$q_{ve,k,mn}$ = portata d'aria mediata sul tempo del flusso d'aria $[\frac{m^3}{s}]$

$b_{ve,k}$ = fattore di correzione della temperatura per il flusso di aria k , con valore , $b_{ve,k} \neq 1$ se la temperatura dell'aria immessa, $\theta_{sup,k}$, non è uguale alla temperatura dell'ambiente esterno, come nel caso di pre-riscaldamento, pre-raffrescamento o recupero termico

k = ciascun flusso di aria pertinente, come l'infiltrazione, la ventilazione naturale o meccanica e/o la ventilazione aggiuntiva per il raffrescamento notturno.

La portata d'aria mediata sul tempo del flusso d'aria k, $q_{ve,k,mn}$, è calcolata secondo la seguente

$$q_{ve,k,mn} = f_{ve,t,k} \cdot q_{ve,k} \quad [\frac{m^3}{s}]$$

dove:

$q_{ve,k}$ = portata d'aria del flusso d'aria k $[\frac{m^3}{s}]$

$f_{ve,t,k}$ = frazione di tempo in cui si verifica il flusso d'aria k, calcolata come la frazione del numero di ore al giorno (per tempo continuo $f_{ve,t,k} = 1$), determinata dalla stessa sorgente di $q_{ve,k}$

Nel caso in cui sia presente un'unità di recupero termico, il fattore di correzione della temperatura, $b_{ve,k}$, per flusso d'aria è uguale a

$$b_{ve,k} = (1 - f_{ve,frac,k} \cdot \eta_{hru})$$

dove:

η_{hru} = efficienza dell'unità di recupero termico

$f_{ve,frac,k}$ = frazione del flusso di aria k considerato che attraversa l'unità di recupero termico

UNI TS 11300-1:2008

La specifica tecnica UNI TS 11300-1:2008 (*“Determinazione del fabbisogno di energia termica dell’edificio per la climatizzazione estiva ed invernale”*) definisce le modalità per l’applicazione nazionale della UNI EN ISO 13790:2008 con riferimento al metodo mensile per il calcolo dei fabbisogni di energia termica per riscaldamento e raffrescamento. In fase di revisione, è comunque di valore cogente, ai sensi del DPR 59/09.

Il capitolo 12 della norma si occupa della ventilazione; in particolare il paragrafo 12.1 “Portata di ventilazione” suddivide la trattazione in due parti.

La prima parte riguarda il calcolo di progetto o standard (utilizzato per redigere la Certificazione Energetica), per il quale, nel caso di aerazione o ventilazione naturale:

- per gli edifici residenziali e per gli edifici adibiti ad attività industriali ed artigianali si assume un tasso di ricambio d'aria pari a 0,3 vol/h;
- per tutti gli altri edifici si assumono i tassi di ricambio d'aria riportati nella UNI 10339. I valori degli indici di affollamento sono assunti pari al 60% di quelli riportati nella suddetta norma ai fini della determinazione della portata di progetto.
- Per gli edifici dotati invece di sistemi di ventilazione meccanica a semplice flusso (aspirazione) il tasso di ricambio d'aria è fissato pari a:

$$q_{ve} = q_{ve,des} \cdot k$$

dove:

$q_{ve,des}$ = portata d’aria di progetto

k = coefficiente di contemporaneità di utilizzo delle bocchette aspiranti. In assenza di dati precisi si può assumere $k = 1$ per sistemi a portata fissa e $k = 0,6$ per sistemi a portata variabile.

Per gli edifici dotati di sistemi di ventilazione meccanica a doppio flusso il tasso di ricambio d’aria è fissato pari a:

$$q_{ve} = q_{ve,des} \cdot k \cdot (1 - \eta_{ve})$$

dove:

$q_{ve,des}$ = portata d'aria di progetto del sistema per ventilazione meccanica,
 η_{ve} = fattore di efficienza dell'eventuale recuperatore di calore dell'aria
 (pari a 0 se assente).

La seconda parte riguarda la “valutazione adattata all’utenza” in cui si afferma che per scopi differenti da quelli di progetto o standard (cioè di valutazione dei fabbisogni energetici), è possibile effettuare una determinazione della portata di ventilazione tenendo conto anche dei requisiti relativi alla qualità dell’aria interna. La norma specifica che nel caso di aerazione e di ventilazione naturale non è possibile determinare con certezza le portate di rinnovo in quanto il tasso di ricambio d’aria di un edificio dipende da diversi fattori: condizioni climatiche al contorno (velocità, direzione del vento e differenza di temperatura tra interno e esterno), permeabilità dell’involucro e comportamento dell’utenza. I valori che si ottengono possono essere quindi notevolmente diversi da quelli indicati per la valutazione di progetto o standard.

Ai fini della determinazione della portata di ventilazione richiesta per soddisfare l’esigenza di qualità dell’aria interna la norma rimanda alle UNI EN 13779 (per edifici non residenziali) e UNI EN 15251 mentre per un calcolo dettagliato della portata di ventilazione rimanda alla UNI EN 15242.

Il paragrafo 12.2 tratta la ventilazione notturna (“*free cooling*”), il cui effetto viene valutato secondo quanto riportato nel punto 9.4.3 della UNI EN ISO 13790:2008. La versione tuttora in fase di revisione si presenta strettamente correlata alla UNI 10339 che a breve dovrebbe entrare in inchiesta pubblica.

In particolare, al paragrafo 12.1, per il calcolo della portata di ventilazione media mensile si fa riferimento alla UNI 10339, mentre per gli edifici residenziali (categoria E.1) la portata minima di progetto di aria esterna, $q_{ve,0}$ è espressa da:

$$q_{ve,0} = \frac{n V}{3600}$$

dove:

n = tasso di ricambio d'aria [h^{-1}]

V = volume netto della zona termica considerata [m^3]

La norma sottolinea poi come, nel paragrafo 12.2, per gli stessi edifici, la portata minima di progetto di aria esterna, $q_{ve,0}$ si debba calcolare secondo l'equazione vista sopra, assumendo un tasso di ricambio d'aria di progetto pari a $0,5 \text{ h}^{-1}$.

All'inizio dello stesso paragrafo si sottolinea che nelle condizioni di riferimento, ovvero per ventilazione per sola aerazione, la portata media giornaliera mensile $q_{ve,k,mn}$, deve essere calcolata secondo la seguente formula:

$$q_{ve,k,mn} = q_{ve,0,k} * f_{ve,t,k} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

dove:

$q_{ve,0,k}$ = portata minima di progetto di aria esterna [$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$]

$f_{ve,t,k}$ = fattore di correzione che rappresenta la frazione di tempo in cui si attua il flusso d'aria k-esimo e che tiene conto dell'effettivo profilo di utilizzo e delle infiltrazioni che si hanno quando non si opera l'aerazione.

I valori di quest'ultimo fattore sono riportati, nella norma, nel prospetto E.2 in funzione della destinazione d'uso. Per le abitazioni civili risulta $f_{ve,t,k} = 0,6$ per cui si ricava

$$q_{ve,k,mn} = \frac{0,5*V}{3600} * 0,6 = \frac{0,3*V}{3600}$$

In sostanza nulla cambia rispetto ai valori di ricambi orari proposti dalla 11300 tuttora in vigore ($n = 0,3 \text{ h}^{-1}$).

2.3.5 Ventilazione e sicurezza degli impianti: la norma UNI 7129-2:2008

Il tema della ventilazione è trattato anche nella UNI 7129-2:2008 che rappresenta la normativa di riferimento nel campo della progettazione, installazione e collaudo degli apparecchi a gas per uso domestico. Essa può essere applicata all'installazione di apparecchi aventi singola portata termica nominale massima non maggiore di 35 kW e alla realizzazione della ventilazione e/o aerazione dei locali di installazione.

La norma riporta inizialmente una serie di definizioni:

- **Apparecchio di Tipo A:** apparecchio non previsto per il collegamento a camino/canna fumaria o a dispositivo di evacuazione dei prodotti della combustione all'esterno del locale in cui l'apparecchio è installato. Il prelievo dell'aria comburente e l'evacuazione dei prodotti della combustione avvengono nel locale di installazione.
- **Apparecchio di Tipo B:** apparecchio previsto per il collegamento a camino/canna fumaria o a dispositivo che evacua i prodotti della combustione all'esterno del locale in cui l'apparecchio è installato. Il prelievo dell'aria comburente avviene nel locale di installazione e l'evacuazione dei prodotti della combustione avviene all'esterno del locale stesso
- **Apparecchio di Tipo C:** apparecchio il cui circuito di combustione (prelievo dell'aria comburente, camera di combustione, scambiatore di calore e evacuazione dei prodotti della combustione) è a tenuta rispetto al locale in cui l'apparecchio è installato. Il prelievo dell'aria comburente e l'evacuazione dei prodotti della combustione avvengono direttamente all'esterno del locale.
- **Ventilazione:** Afflusso dell'aria necessaria alla combustione - **Aerazione:** Ricambio dell'aria necessaria sia per lo smaltimento dei prodotti della combustione, sia per evitare miscele con un tenore pericoloso di gas non combustibili (definizione differente da quella proposta dalla UNI EN 12792:2005 la quale specificava che per aerazione si intende una

“ventilazione naturale per mezzo dell’apertura delle finestre”; nel prosieguo di questa tema si farà quindi riferimento alla definizione riportata dalla UNI 7129-2:2008).

2.3.6 Normativa di prodotto

La direttiva 89/106/CEE sui prodotti da costruzione definisce i requisiti essenziali per garantire l’affidabilità del prodotto e definisce la marcatura CE per sottolinearne la conformità. Tra questi prodotti ricadono i componenti dei sistemi di ventilazione, trattati dalle norme UNI EN 13141-x e UNI EN 13142:2013.

2.3.6.1 UNI EN 13141-x

Questa norma, che recepisce la direttiva europea, è suddivisa in dieci parti, articolate come in Tabella 2.11:

UNI EN 13141-1:2004	Ventilazione degli edifici - Verifica delle prestazioni di componenti/prodotti per la ventilazione degli alloggi - Dispositivi di diffusione dell'aria montati all'esterno e all'interno
UNI EN 13141-2:2010	Ventilazione degli edifici - Verifica delle prestazioni di componenti/prodotti per la ventilazione degli alloggi - Bocchette per l'estrazione e l'immissione dell'aria
UNI EN 13141-3:2004	Ventilazione degli edifici - Verifica delle prestazioni di componenti/prodotti per la ventilazione degli alloggi - Cappe per uso domestico
UNI EN 13141-4:2011	Ventilazione degli edifici - Verifica delle prestazioni di componenti/prodotti per la ventilazione degli alloggi - Ventilatori utilizzati negli impianti di ventilazione degli alloggi
UNI EN 13141-5:2005	Ventilazione degli edifici - Verifica delle prestazioni di componenti/prodotti per la ventilazione degli alloggi - Aspiratori statici e dispositivi di uscita in copertura
UNI EN 13141-6:2004	Ventilazione degli edifici - Verifica delle prestazioni di componenti/prodotti per la ventilazione degli alloggi - Kit per impianti di estrazione per abitazioni unifamiliari
UNI EN 13141-7:2011	Ventilazione degli edifici - Verifica delle prestazioni di componenti/prodotti per la ventilazione degli alloggi - Verifica delle prestazioni di unità di ventilazione meccanica di immissione ed estrazione (compreso il recupero di calore) di impianti di ventilazione meccanica destinati ad abitazioni unifamiliari
UNI EN 13141-8:2008	Ventilazione degli edifici - Verifica delle prestazioni di componenti/prodotti per la ventilazione degli alloggi - Verifica delle prestazioni di unità di ventilazione meccanica di immissione ed estrazione (compreso il recupero di calore) di impianti di ventilazione meccanica destinati ad ambienti singoli
UNI EN 13141-9:2008	Ventilazione degli edifici - Verifica delle prestazioni di componenti/prodotti per la ventilazione degli alloggi - Dispositivi di immissione dell'aria igroregolabili montati all'esterno
UNI EN 13141-10:2008	Ventilazione degli edifici - Verifica delle prestazioni di componenti/prodotti per la ventilazione degli alloggi - Dispositivi di estrazione dell'aria igroregolabili

Tabella 2.11: Articolazione della norma UNI EN 13141

UNI EN 13142:2013

Questa norma, intitolata “Ventilazione per edifici. Componenti/prodotti per la ventilazione residenziale. Caratteristiche di prestazione richieste e facoltative” introduce numerosi parametri relativi alle perdite d’aria esterne e interne, agli aspetti acustici ed energetici (efficienza di recupero, potenza specifica, ecc) e alla filtrazione; interessante è soprattutto la distinzione tra i sistemi SDHR (Centralized Single Dwellings Units with Heat Recovery, sistemi centralizzati per abitazioni unifamiliari con recupero di calore) e i sistemi SRHR (Single Room Units with Heat Recovery, unità per singolo ambiente con recupero di calore).

Fondamentale parametro è NTPF (“Nominal temperature performance factor”), fattore nominale di efficienza di temperatura alla portata volumetrica di riferimento, dato da:

$$NTPF = \frac{\eta_{\theta,su} \times \rho \times c_p \times \Delta\theta}{SPI}$$

dove:

$\eta_{\theta,su}$ = rapporto di temperatura in accordo alla UNI EN 13141-7:2011

ρ = densità dell'aria, pari a $1,2 \text{ kg/m}^3$

c_p = calore specifico pari a 1007 J/kgK

$\Delta\theta$ = differenza di temperatura nominale, pari a 13 K (da UNI EN 13141-7:2011)

SPI = potenza elettrica specifica di ventilazione $\left[\frac{W}{m^3/s} \right]$

Questo parametro è fondamentale soprattutto per confrontare i sistemi a recupero di calore con scambiatori e quelli con pompe di calore, a recupero termodinamico. Non è però del tutto esaustivo, come sottolineano altri autori (Raisa, et al., 2010) in quanto tende a premiare sistemi con assorbimenti elettrici bassi ma non tiene conto del rapporto tra l'energia recuperata e quella massima recuperabile dall'aria espulsa.

3 STATO DELL'ARTE DEI METODI DI MISURA DELLE INFILTRAZIONI D'ARIA

La permeabilità all'aria dell'involucro dipende, come ovvio, dalle tipologia edilizia; in linea del tutto generale, possono essere considerati zone o punti critici le aree di giunzione infisso - parete, i cassonetti, i cavedi tecnici, le condutture per impianti, gli accessi a soffitte o cantine non riscaldate; non vanno poi trascurate le condizioni climatiche esterne, la geometria dell'edificio ed i gradienti di temperatura interno esterno.

In alcuni Paesi europei, negli Stati Uniti ed in Canada sono stati effettuati in questo settore studi sperimentali, mirati alla valutazione delle infiltrazioni d'aria e dei ricambi di aria negli edifici residenziali, sintetizzati qui di seguito.

Per quanto riguarda gli Stati Uniti, nell'ASHRAE Fundamentals è riportata un "interessante analisi sul contributo percentuale alle infiltrazioni di aria dovuto ai diversi componenti edilizi:

- giunzioni tra pareti murarie (dal 18 al 50% in media 35%);
- soffitto (dal 3 al 30%; in media 18%);
- sistema di riscaldamento-raffrescamento ad aria in ventilazione forzata (dal 3 al 28%; in media 18%);
- finestre e porte (dal 6 al 22%; in media 15%);
- canna fumaria del camino (da 0 al 30%; in media 12%);
- ventilatori negli ambienti condizionati (dal 2 al 12%; in media 5%);
- pareti opache, a causa della diffusione (meno dell'1%).

Nel Nord Europa, già negli anni '70, furono condotte ricerche approfondite sul problema; in particolare, nel 1983, l'AIVC (Air Infiltration and Ventilation Centre) pubblicò la guida "Air Infiltration Control in Housing – A Guide to International Practice" che, basandosi principalmente sull'esperienza svedese, descrive i vari aspetti legati alla problematica della permeabilità all'aria dell'involucro, tra cui i consumi energetici, la qualità dell'aria interna, la modellazione del flusso d'aria ed i metodi di misurazione.

Negli ultimi anni l'interesse per il tema è sicuramente cresciuto, anche grazie alla maggiore sensibilità su tutti gli aspetti riguardanti il risparmio energetico in edilizia. Nelle Tabelle 3.1 e 3.2 sono riportati i risultati di alcuni studi recentemente condotti rispettivamente in Estonia, su 32 edifici di diversa tipologia costruttiva, ed in Grecia, su 20 edifici mono-familiari, al variare del volume e dell'altezza dell'edificio e della velocità del vento. In tutti i casi riportati, per determinare il numero di ricambi di aria, n_{50} , e la portata specifica d'infiltrazione, w_{50} , che si ottengono sotto una differenza di pressione di 50 Pa, è stato utilizzato il metodo della pressurizzazione mediante ventilatore, standardizzato dalla norma UNI EN 13829, che permette di stimare indirettamente la portata di infiltrazione e di localizzare eventuali perdite per exfiltrazione.

Tipologia Edifici	numero di edifici	n_{50} [h ⁻¹]	w_{50} [m ³ h ⁻¹ m ⁻²]
1 piano	9	2,3	1,9
2 piani	23	5,9	5,1
Costruite in sito	17	6,0	5,3
Prefabbricate	15	3,5	2,9
Con ventilazione naturale	4	11,0	10,1
Con ventilazione meccanica	16	4,4	3,5
Con ventilazione e recupero termico	12	3,5	3,1
Valore medio sui 32 edifici		4,2	4,9

Tabella 3.1: Ricambi d'aria misurato in 32 edifici in Estonia. n_{50} = ricambi di aria per differenza di pressione di 50 Pa; w_{50} = portata specifica d'infiltrazione per differenza di pressione di 50 Pa.

In Tabella 3.3 sono riportati i risultati di un confronto tra i diversi valori di permeabilità nei Paesi del nord Europa, del Canada e degli Stati Uniti; va ribadito che i risultati, in certi casi apparentemente discordanti tra loro, si riferiscono a campioni e a tipologie edilizie molto diverse tra loro; uno per tutti, si pensi al fatto che nel Nord Europa sono molto diffusi gli edifici in legno, mentre l'architettura greca è tipicamente mediterranea.

Nazione, periodo di misura	Numero edifici	n_{50} [h^{-1}]	
		Medio	Min – Max
Belgio, 1995-98	51	7,8	1,8-25
Canada, 1985-95	222	3,1	0,4-11
Estonia, 1999-2000	19	9,6	4,9-32
Estonia, 2003-05	32	4,9	0,7-14
Finlandia, 1981-98	171	5,9	1,6-18
Finlandia, 2002-04	100	3,9	0,5-8,9
Grecia, 2005	20	7	1,87-11,3
Inghilterra	471	13,1	2,0-30
Norvegia, 1984	10	4,0	3,3-5,4
Svezia, 1978	205	3,7	st.dev.0,24
USA [16]	12.902	29,7	0,5-84

Tabella 3.2: Confronto tra i ricambi di aria misurati in alcuni Paesi europei, in Canada e negli Stati Uniti.

Tipologia di edificio	Livello di infiltrazione	q_{50} [$m h^{-1}$]	n_{50} [h^{-1}]	w_{50} [$m h^{-1}$]
Monofamiliare	Basso	2,5	1,9	4,5
	Medio	5,0	3,8	9,0
	Alto	10,0	7,5	18,0
Pluri-familiari e non residenziali	Basso	2,5	1,0	2,8
	Medio	5,0	2,0	5,5
	Alto	10,0	4,0	11,0
Industria	Basso	5,0	1,5	7,5
	Medio	10,0	3,0	15,0
	Alto	20,0	6,0	30,0

Tabella 3.3: Valori di permeabilità all'aria, ricambi di aria e portata specifica di infiltrazione misurate sotto differenze di pressione di 50 Pa per diverse tipologie di edificio e per diversi livelli di infiltrazione.

n = ricambi d'aria, h^{-1}

q = permeabilità all'aria

V = volume interno, m^3

\dot{V} = portata di infiltrazione di aria, m^3h^{-1} ;

\dot{V}_L = portata di infiltrazione di aria corretta, m^3h^{-1} ;

w = portata specifica di infiltrazione.

Nel seguito viene analizzata la procedura da seguire per effettuare la valutazione della permeabilità all'aria dell'involucro edilizio con due differenti metodi: il

metodo della pressurizzazione (con particolare riferimento al problema dell'incertezza della misura) e il metodo del gas tracciante.

3.1 Metodo della pressurizzazione

Il metodo della pressurizzazione, anche noto come Blower Door Test (BDT), consente di valutare le infiltrazioni di aria a partire dalla misura delle portate di d'aria, $\dot{V}_{\Delta p}$ che si hanno sotto diversi valori della differenza di pressione interno-esterno, Δp . Il metodo, che sarà meglio descritto nel seguito, consiste nel generare meccanicamente una differenza di pressione positiva o negativa tra l'interno e l'esterno dell'involucro, immettendo (o estraendo) aria nell'edificio (dall'edificio) con l'ausilio di un ventilatore, e misurando le portate di aria di infiltrazione.

Il metodo per valutare direttamente le portate di infiltrazione è quello dei gas traccianti, oggetto della norma 12569, che è più semplice rispetto al blower door test, ma meno ripetibile.

Negli anni '70, Kronvall e Persily, confrontando i valori dei ricambi d'aria n50 ricavati da misure effettuate in New Jersey e in Svezia con il metodo BDT e con quello dei gas traccianti, proposero di calcolare il valore dell'infiltrazione naturale dividendo per 20 il valore dei ricambi di aria n50, misurato con il Blower Door Test. Purtroppo questa relazione, che presenta il vantaggio di essere molto semplice, non tiene in alcun conto né le effettive condizioni climatiche medie in cui si trova l'edificio, in termini di velocità del vento e temperatura, né della tipologia edilizia, in termini, per esempio, di altezza, esposizione al vento, forma prevalente delle fessure.

Nel 1987 Sherman ha proposto, per correggere i valori relativi al Nord America, un fattore empirico di correzione, N, espresso come il prodotto di diversi fattori dipendenti dalla zona climatica, dalla presenza di schermature, dell'altezza dell'edificio e delle dimensioni delle fessure. Successivamente, nel 1988, Dubrul ha ripreso lo studio di Sherman, riferendolo ad alcuni Paesi europei e trovando un valore di N compreso tra 10 e 30. In definitiva, quindi, non esiste attualmente un consenso sui valori da utilizzare per convertire i ricambi d'aria in valori di

permeabilità all'aria, ma non bisogna dimenticare che il metodo della pressurizzazione ha uno scopo principalmente diagnostico.

In generale, il blower door test, schematizzato in Figura 3.1, può essere usato nei seguenti casi:

- per stimare la permeabilità all'aria di un intero edificio, o di parte di esso, ad una assegnata differenza di pressione e valutarne la conformità rispetto ad una specifica di impermeabilità;
- per identificare le zone di infiltrazione (utilizzando anche termocamere o anemometri per una maggiore efficacia);
- per determinare la riduzione della permeabilità in seguito ad un intervento di retrofit, quale la sostituzione degli infissi o delle porte.

Il test, inoltre, può essere applicato sia per valutare la permeabilità del sistema edificio-impianto nelle effettive condizioni d'uso dell'edificio (lo stato dell'involucro edilizio dovrebbe rappresentare le sue condizioni nella stagione in cui è utilizzato l'impianto di riscaldamento-raffrescamento), che per valutare la permeabilità del solo involucro edilizio (sigillando tutte le aperture esistenti nell'involucro).

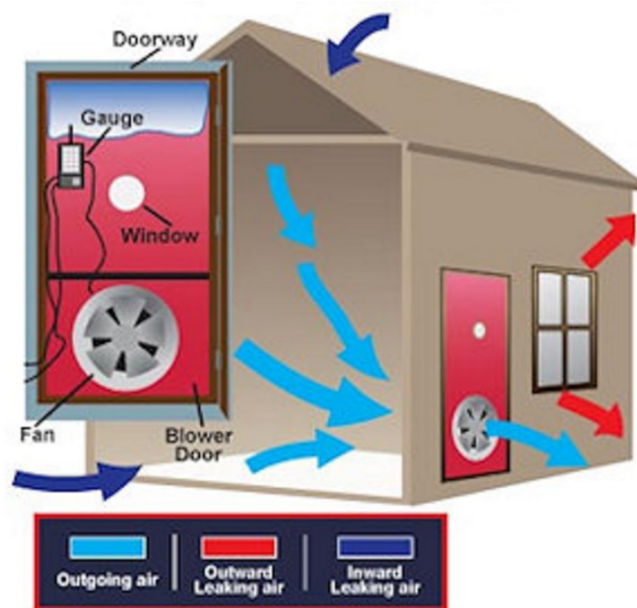


Figura 3.1: Schema del blower door test.

In Figura 3.2 è riportato il diagramma di flusso della procedura di prova.

Elaborazione dei risultati di misura e diagnosi Una volta effettuate le misurazioni, è necessario correggere i valori delle pressioni misurate Δp_m , e delle portate misurate, così come previsto dalla norma.

In definitiva, la portata di aria di infiltrazione si ricava dall'equazione:

$$\dot{V}_L = C_L(\Delta p)^n$$

Le principali grandezze d'interesse, alla differenza di pressione di riferimento di 50 Pa, sono date dalle equazioni:

Le principali grandezze d'interesse, alla differenza di pressione di riferimento di 50 Pa, sono date dalle equazioni:

- portata di infiltrazione di aria, \dot{V}_{50} , in m^3h^{-1} , definita come la portata di aria attraverso l'involucro edilizio (include il flusso, attraverso giunti, fessure e superfici porose, indotto dall'apparecchiatura di movimentazione dell'aria utilizzata):

$$\dot{V}_{50} = C_L(50)^n$$

- numero di ricambi orari, n_{50} , in h^{-1} , definiti come la portata di infiltrazione di aria per unità di volume interno, V :

$$n_{50} = \dot{V}_{50}/V$$

- permeabilità all'aria, q_{50} , in mh^{-1} , definita come la portata di aria di infiltrazione per unità di superficie dell'involucro, A_E :

$$q_{50} = \dot{V}/A_E$$

- portata specifica di infiltrazione di aria, w_{50} , in mh^{-1} definita come la portata di infiltrazione di aria per superficie netta di pavimento, A_F :

$$w_{50} = \dot{V}/A_F$$

I valori ottenuti con le precedenti equazioni vanno poi confrontati con quelli suggeriti dalla norma UNI EN 15242.

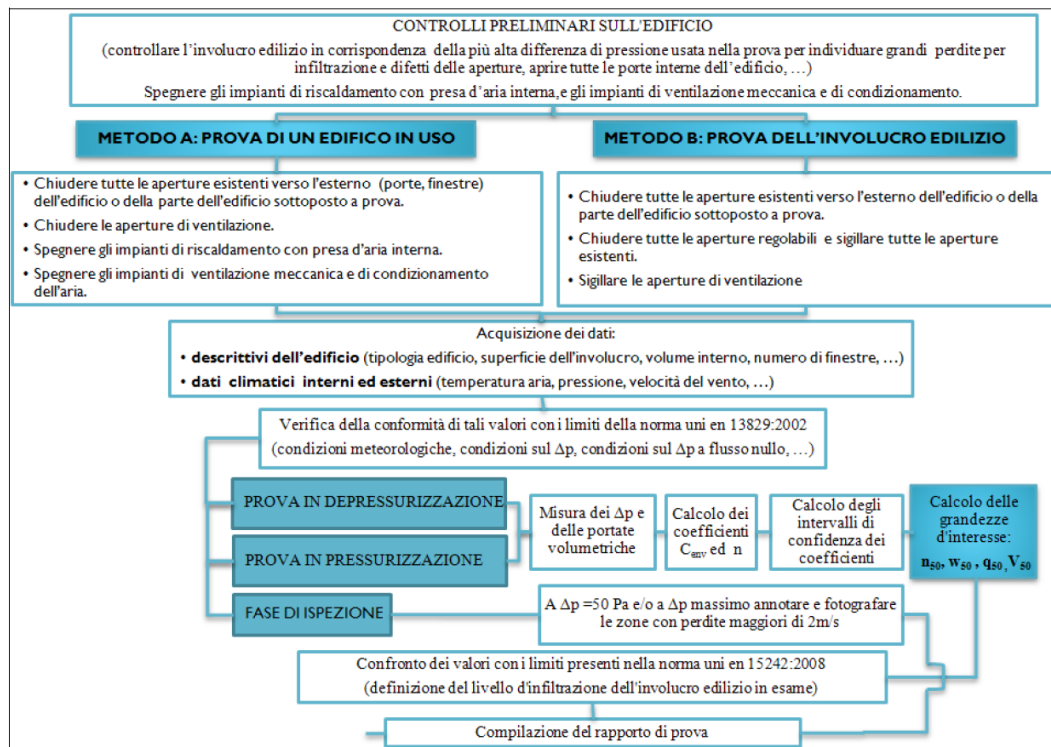


Figura 3.2: Diagramma di flusso della procedura di prova

3.1.1 Analisi delle incertezze di misura

L'incertezza di misura del numero di ricambi di aria n_{50} è naturalmente influenzata dalle prestazioni metrologiche di tutti gli strumenti di misura utilizzati, nonché dall'incertezza dello stesso metodo di elaborazione.

Tipicamente l'incertezza di misura risulta compresa tra il 5 ed il 10%, ma a causa della non ripetibilità delle misure in presenza del vento o di un forte gradiente di temperatura per edifici a più piani, può assumere valori del 20-40%.

In Tabella 3.4 vengono riportate le principali cause di incertezza nella misura della permeabilità mediante il metodo del Blower Door Test e le relative strategie per la riduzione degli errori di misura.

	Causa	Descrizione	Correzione Compensazione Insensibilizzazione	Incertezza
Misurando	Modello di caratterizzazione portata- ΔP	Accuratezza del modello (influenza della densità dell'aria interna ed esterna, calcolo dei coefficienti di correzione della portata)	<ul style="list-style-type: none"> •Aumento del numero di livelli di ΔP. 	Medio
	Costanza della portata	Portata non stazionaria.	<ul style="list-style-type: none"> •Ripetizione della misura per più volte. 	Trascurabile
Catena di misura	Misuratore di ΔP	Misura della differenza di pressione (risoluzione, deriva della caratteristica nel tempo; errore sulla taratura)	<ul style="list-style-type: none"> •Aumento del ΔP massimo. •Scelta di un idoneo strumento di misura. 	Elevato (minore di 2 Pa)
	Misuratore di portata	Misura della portata (risoluzione, deriva della caratteristica nel tempo, errore sulla taratura)	<ul style="list-style-type: none"> •Taratura dello strumento . •Scelta di un idoneo strumento di misura. 	Medio (minore del 7%V.L.)
	Sensori di temperatura	Misura della temperatura dell'aria influenzata dalla cavità	<ul style="list-style-type: none"> •Utilizzo di sensori di temperatura schermati. 	Trascurabile (minore di 1°C)
Ambiente	Influenza del vento	Influenza sul valore letto del ΔP	<ul style="list-style-type: none"> •Realizzazione delle misure in condizioni climatiche esterne di bassa ventosità. 	Elevato
	Influenza della temperatura	Influenza sul valore letto della portata	<ul style="list-style-type: none"> •Misura delle condizioni termodinamiche 	Medio

Tabella 3.4: Cause di errore e loro correzione, compensazione o insensibilizzazione.

3.2 Tracer Gas Test

La normativa di riferimento è l'ASTM E741 "DETERMINATION AIR CHANGE IN A SINGLE ZONE BY MEANS OF TRACER GAS DILUTION" e indica tre diverse metodi standard per la misurazione del ricambio d'aria tramite l'utilizzo di gas tracciante, indicata per le misure all'interno di edifici, o in generale in posti chiusi, che hanno la caratteristiche di "singola zona", ovvero come lo spazio, o serie di spazi, all'interno del quale la concentrazione del gas tracciante rimane costante e l'unico scambio d'aria avviene con l'esterno.

In particolare, vengono suggeriti 3 tecniche di calcolo:

- Constant Injection Test Method
- Constant Concentration Test Method
- Concentration Decay Test Method

3.2.1 Constant Injection Test Method

In questa metodologia una quantità definita di gas tracciante viene costantemente iniettata per un certo periodo di tempo; all'aumentare della concentrazione del gas tracciante col tempo, si raggiunge un valore stabile (concentrazione di equilibrio), che dipende dal volume della stanza V_R , il tasso ricambio d'aria, e il tasso di emissioni. A quel punto, vengono presi uno o più campioni di aria e viene determinata la concentrazione del gas per ogni campione. Il tasso medio di ricambio d'aria viene calcolato come:

$$\bar{A} = E / C_{eq} \cdot V_r$$

Dove:

E = tasso di emissione [$\mu g/h$]

C_{eq} = concentrazione di equilibrio [$\mu g/m^3$]

V_r = volume della stanza [m^3]

Nella figura 3.3 è raffigurato un esempio di applicazione del metodo analizzato.

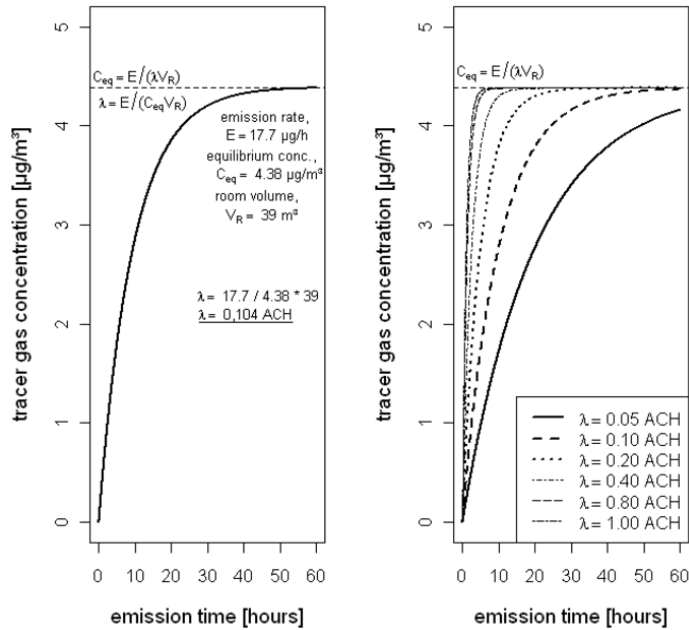


Figura 3.3: a) constant injection method; b) concentrazione del gas tracciante dopo iniezioni costanti a differenti ricambi d'aria.

3.2.2 Constant Concentration Test Method

Per monitorare la variazione del flusso di ricambio dell'aria, la misura e il controllo della concentrazione del gas tracciante viene misurata tramite una strumentazione automatica. La strumentazione misura la concentrazione e di conseguenza inietta un quantitativo di gas nella stanza per mantenerne uniforme della concentrazione. Il flusso di ricambio d'aria viene calcolato per ogni intervallo di misurazione dal rapporto tra il gas tracciante aggiunto, e la concentrazione desiderata concentrazione:

$$Q_{ave} = \frac{\sum_{t=t_1}^{t_2} \sum_{i=1}^N Q_{tracer}(t, i)}{\sum_{t=t_1}^{t_2} C(t)}$$

Dove:

Q_{ave} = flusso di ricambio aria [m^3/h]

Q_{tracer} = aria iniettata ad ogni tempo t e punto di iniezione i [m^3/h]

In figura 3.4 è mostrata una sintesi della procedura di prova.

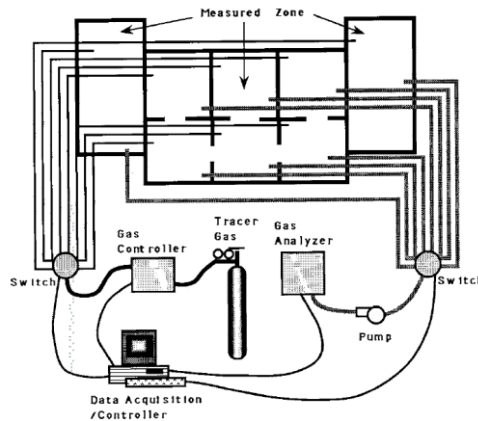


Figura 3.4: Sintesi della strumentazione e della procedura di misura per il Constant Concentration Test Method

3.2.3 MODELLO DI RIFERIMENTO: Concentration Decay Test Method

Per determinare tasso di ricambio dell'aria, si deve introduce un piccolo volume di gas tracciante, in maniera uniforme, all'interno della zona considerata, e quindi misurare la concentrazione di gas ad intervalli noti. Si calcola il tasso medio di ricambio d'aria come la differenza tra i logaritmi delle concentrazioni di gas tracciante iniziali e finali diviso l'intervallo di tempo. In figura 3.5 è mostrata una sintesi della procedura di prova.

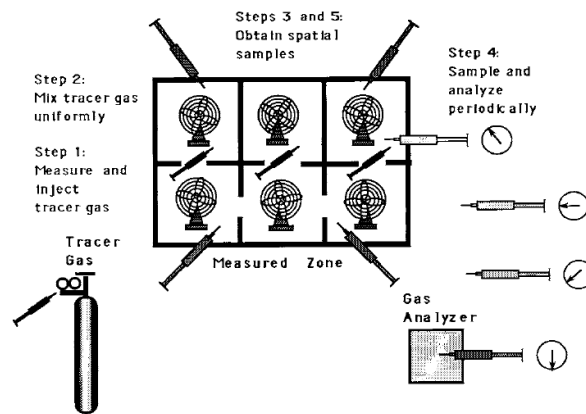


Figura 3.5: Sintesi della strumentazione e della procedura di misura per il Concentration Decay Test Method

$$\bar{A} = [\ln C(t_2) - \ln C(t_1)] / t_2 - t_1$$

dove:

$C(t_1)$ = concentrazione del gas tracciante all'istante iniziale del test t_1

$C(t_2)$ = concentrazione del gas tracciante all'istante iniziale del test t_2

t_1 = istante iniziale del test t_1

t_2 = istante iniziale del test t_2 .

4 MODELLO ESTESO DI DECADIMENTO DELLA CONCENTRAZIONE INDOOR DI CO₂

Lo scopo è quello di proporre una procedura per la valutazione della permeabilità di un edificio utilizzando i dati raccolti tramite *smart meters*, opportunamente installati, che possa sostituire gli attuali metodi imposti dalla normativa.

Per mettere a punto questa procedura, l'idea è quella di estendere il "Concentration Decay Test Method" introdotto dalla norma ASTM E741 attraverso un approccio *grey box modeling*.

Tale approccio permette di attribuire ai parametri di un modello stocastico che descrive la fisica del problema un significato ben preciso; di conseguenza, tramite la stima di tali parametri, è possibile ottenere dei valori rappresentativi della realtà. In questo senso, l'analisi di un modello stocastico può divenire strumento di diagnosi, oltre che di gestione.

Infatti, l'introduzione di modelli stocastici nello studio dei sistemi di *management* ha ottenuto un notevole successo nella comunità scientifica, in quanto offre la possibilità di stabilire un controllo non solo adattativo, ma anche predittivo, delle strutture, con conseguente efficientamento delle strategie di gestione degli impianti. La letteratura scientifica presenta studi di modelli predittivi principalmente sulla *heat dynamics* e quindi nella gestione degli impianti di ventilazione.

Il potenziale dell'inclusione del livello di concentrazione di gas traccianti, quali la CO₂, nei sistemi di energy e air quality management, è ben condiviso dalla comunità scientifica; tuttavia nella maggior parte dei casi, le applicazioni sono di tipo reattivo, piuttosto che predittivo.

4.1 La CO₂ come gas tracciante

Diversi gas traccianti sono stati utilizzati e analizzati negli ultimi decenni. Il gas tracciante ideale dovrebbe essere sicuro (non tossico, anallergico, non infiammabile), non reattivo (non deve reagire chimicamente o fisicamente con l'ambiente) e facilmente misurabile (preferibilmente con strumentazione a basso

costo che in grado di rilevare basse concentrazioni); inoltre, il gas tracciante deve essere in grado di mescolarsi perfettamente con l'aria (densità simile) e deve essere facilmente distinguibile dagli altri costituenti dell'aria.

La tabella 4.1 mostra le caratteristiche di comuni gas traccianti raccomandati.

Tracer gas	Density compared to the air	Advantages	Disadvantages
Krypton-85 ⁸⁵ Kr	2.93	- 1 ppm in the air	- Heavy - Expensive
Nitrous oxide N ₂ O	1.53	- Low cost - Density relatively close to the air	- Interference with H ₂ O and CO ₂
Sulfur hexafluoride SF ₆	5.11	- Not present in the air - No harm to human beings	- Very heavy - Expensive - High greenhouse effect
Carbon dioxide CO ₂	1.53	- Easily available: very low cost - Maximal detection threshold: 30000 ppm	- Exists in the air

Tabella 4.1: caratteristiche dei più comuni gas traccianti

Partendo da questi presupposti, l'anidride carbonica si è dimostrato il gas più vicino alle caratteristiche di gas tracciante, in quanto presenta una densità vicina a quella dell'aria, risulta non esplosivo e non tossico alle basse concentrazioni, ed è facilmente reperibile, soprattutto se si utilizzano gli occupanti come sua fonte naturale.

4.1.1 La produzione indoor di CO₂

Gli esseri umani producono anidride carbonica in misura proporzionale alla velocità del loro metabolismo. Fra i gas metabolici tale composto è quello quantitativamente più abbondante: per tale ragione e per il suo caratteristico odore sgradevole essa viene da più di un secolo utilizzata come indicatore dell'inquinamento provocato dalle persone sedentarie ed, in generale, anche della concentrazione di altri bioeffluenti umani.

Inoltre, negli ultimi anni la concentrazione di CO₂ è divenuta sempre più un parametro fondamentale adottato nelle indagini di qualità dell'aria indoor: soprattutto in ambienti ad elevato tasso di occupazione, quali teatri, auditorium, ecc., essa viene generalmente utilizzata per controllare gli apporti di aria esterna (valutando la percentuale di aria immessa dai sistemi di condizionamento), il suo grado di miscelazione con l'aria interna ed, in generale, le prestazioni dei sistemi di trattamento dell'aria.

Nel complesso, quindi, la concentrazione di CO₂ viene utilizzata come indicatore surrogato della ventilazione in relazione alle valutazioni di adeguatezza della diluizione degli inquinanti prodotti dagli occupanti, e come parametro di controllo dei tassi.

In particolare, secondo la norma ASHRAE 62-1989, la relazione fra la concentrazione di CO₂ e l'apporto di aria esterna è dato dalla seguente espressione:

$$Q = \frac{N}{C_s - C_0}$$

in cui Q rappresenta il tasso di ventilazione per occupante, N il tasso di produzione di CO₂ per persona e C_s e C₀ la sua concentrazione rispettivamente nell'ambiente interno ed esterno.

La massima concentrazione ammissibile in ambienti chiusi è di 5000 ppm (9 g/m³) in termini di MAC e di 1000-2500 ppm (1.8-4.5 g/m³) in termini di AIC.

Lo standard ASHRAE 62 raccomanda tuttavia, per garantire il comfort in relazione agli odori corporali, di non superare le 1000 ppm, che corrispondono a 8 l/s per persona per uno standard occupazionale di 7 persone su 89 m². Tale limite viene fissato in base solo alla sua associazione con l'odore corporeo e non con gli effetti dell'anidride carbonica stessa sulla salute o sul comfort e si basa su una concentrazione esterna di 300 ppm (indirettamente questa associazione è fra il tasso di ventilazione per persona e la velocità con cui una persona produce sostanze odorose): in generale, comunque, nella norma tale valore di ventilazione viene raccomandato come valore minimo da adottare per la gran parte degli ambienti occupati.

Infatti superando il livello di 600 ppm (circa 1 g/m³) gli insoddisfatti crescono significativamente (la percentuale di insoddisfatti in funzione della concentrazione di anidride carbonica in ambienti in cui le uniche sorgenti inquinanti sono rappresentate dagli occupanti è stata riportata in figura 1): pertanto, se i livelli

riscontrati superano le 800 ppm (1.44 g/m³) è consigliabile controllare i tassi di immissione dell'aria esterna.

Per evitare problemi alla salute la concentrazione in ambienti chiusi non dovrebbe superare le 3500 ppm (6.3 g/m³), tuttavia in concentrazioni inferiori a 5000 ppm la CO₂ non è dannosa per l'uomo; concentrazioni superiori a 10000 ppm (18 g/m³) provocano invece malesseri reversibili, mentre concentrazioni superiori a 40000 ppm (72 g/m³) risultano tossiche.

Le concentrazioni che tipicamente si riscontrano in ambienti chiusi sono basse, per cui il livello di sicurezza si riesce a mantenere adottando tassi di ventilazione molto ridotti. Pertanto, nella pratica, per le basse concentrazioni che si registrano, l'anidride carbonica risulta innocua e non viene percepita dagli esseri umani.

4.1.2 Concentrazione outdoor di CO₂

L'anidride carbonica è uno dei principali gas ad effetto serra presenti nell'atmosfera del nostro pianeta. Svolge un ruolo fondamentale nei meccanismi vitali del regno animale e vegetale ma, assieme ad alcuni altri gas, appartiene ai cosiddetti GHG ovvero Green House Gases. L'anidride carbonica così come gli ossidi di azoto (NO_x), il vapore acqueo (H₂O), il metano (CH₄), gli idrocarburi alogenati (CFC, HCFC, HFC) e l'ozono (O₃), ha la capacità di trattenere parte della radiazione infrarossa emessa dal pianeta Terra e dall'atmosfera. La sua molecola, infatti, presenta ampie bande di assorbimento nella regione IR a lunghezze d'onda compresa tra i 12 e i 18 μm: l'intervallo in cui si concentra la maggior parte dell'energia irradiata dalla Terra nello spazio. Un aumento dell'assorbimento di queste radiazioni e un successivo irraggiamento a temperature inferiori, proprie degli strati alti dell'atmosfera, comporta una riduzione consistente dell'energia termica che dalla terra viene dispersa nell'atmosfera. Ne consegue che un'eccessiva presenza di questi gas nell'atmosfera porta ad un aumento del calore trattenuto all'interno dell'atmosfera che si manifesta con un incremento della temperatura media del nostro pianeta. Nella figura che segue, infatti, vengono illustrati i

meccanismi principali che determinano e mantengono l'effetto serra sul nostro pianeta.

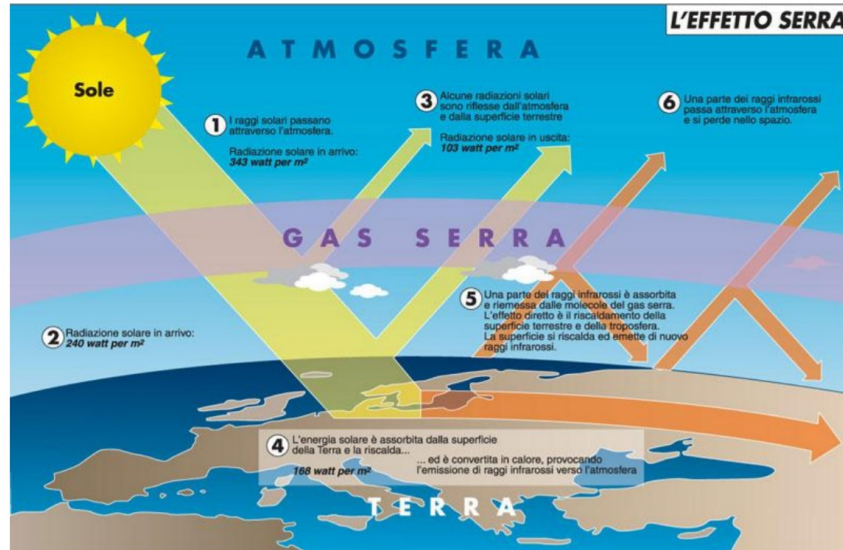


Figura 4.1: L'effetto serra: la radiazione IR in uscita assorbita dai gas serra viene riemessa oppure convertita in calore

Come appare dalla figura è evidente che i gas ad effetto serra assorbendo nelle bande dell'infrarosso trattengono una parte della radiazione emessa dall'atmosfera e dalla superficie terrestre. Una volta assorbita questa radiazione viene riemessa in tutte le direzioni e una parte ritorna alla superficie terrestre contribuendo a riscaldare sia la superficie che l'aria. Il fenomeno di ritorno a terra di questa radiazione è detto effetto serra e fa sì che la temperatura media della superficie terrestre sia mediamente di 15 °C. La preoccupazione è che l'aumento della concentrazione dei gas serra, in particolar modo dell'anidride carbonica, possa causare il ritorno alla superficie di una quantità superiore di radiazione infrarossa, incrementando la temperatura media della superficie oltre i 15 °C. Un riscontro a questo timore viene presentato nel grafico seguente che vuole mostrare il legame esistente tra le evidenze del cambiamento climatico e i picchi atmosferici di concentrazione dell'anidride carbonica. Esso riassume i risultati ottenuti da numerosi studi recenti di paleoclimatologia e dalle analisi dei ghiacci polari che hanno stabilito come, fino a pochi secoli fa, la composizione dell'atmosfera fosse

fortemente correlata al clima. Ad aumenti delle temperature medie del pianeta corrispondevano incrementi consistenti dei gas serra.

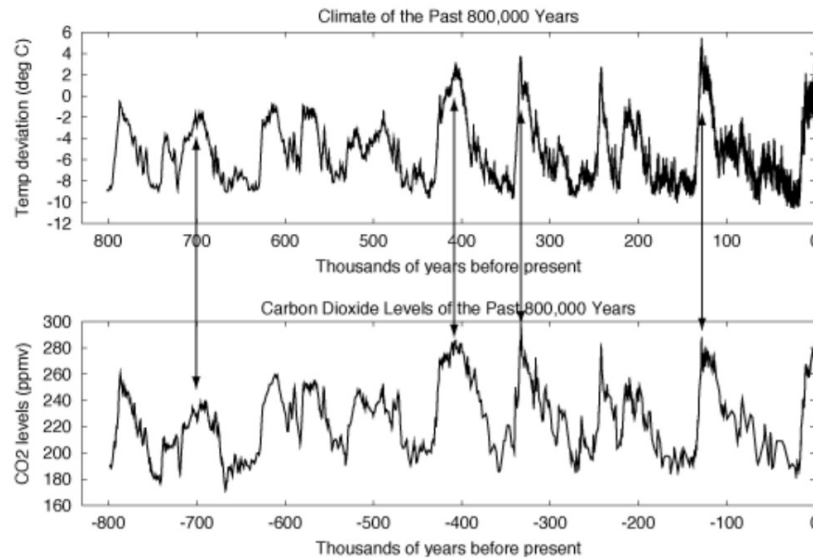


Figura 4.2: Fluttuazioni storiche della temperatura media del nostro pianeta al variare del profilo di concentrazione dell'anidride carbonica.

L'alterazione del delicato equilibrio climatico terrestre è iniziata con l'interferenza tra le azioni dell'uomo e i meccanismi naturali che ha portato ad una accelerazione dei lenti cicli naturali. Il problema infatti non è l'effetto dei gas serra quanto la velocità con cui l'equilibrio viene turbato: l'intervento umano ha liberato in breve tempo l'energia immagazzinata nei combustibili fossili e ha generato prodotti di combustione (primo tra tutti appunto l'anidride carbonica) che hanno iniziato ad interagire pesantemente con i cicli della biosfera. Il cambiamento climatico è pertanto strettamente legato alla concentrazione dei GHG in atmosfera e la quantità attuale di questi gas è determinata sia da fenomeni naturali che derivanti da attività antropogeniche. Mentre il cambiamento climatico indotto da cause naturali si manifesta mediante innumerevoli piccole perturbazioni, quello da cause antropiche porta a cambiamenti anche molto rapidi. Va sottolineato che il carbonio gassoso viene anche rilasciato e riassorbito continuamente anche mediante processi naturali legati al mare, al suolo e alla vegetazione. In una situazione di equilibrio i flussi si equivalgono e l'attività antropica incide per non più del 5 % delle emissioni naturali di CO₂. Tuttavia solo una parte (circa la metà) può essere assorbita dai meccanismi

naturali e l'eccedenza comporta un'accelerazione senza precedenti della concentrazione di CO₂. Il grafico che segue mostra il peso relativo delle emissioni di origine naturale rispetto a quella antropica.

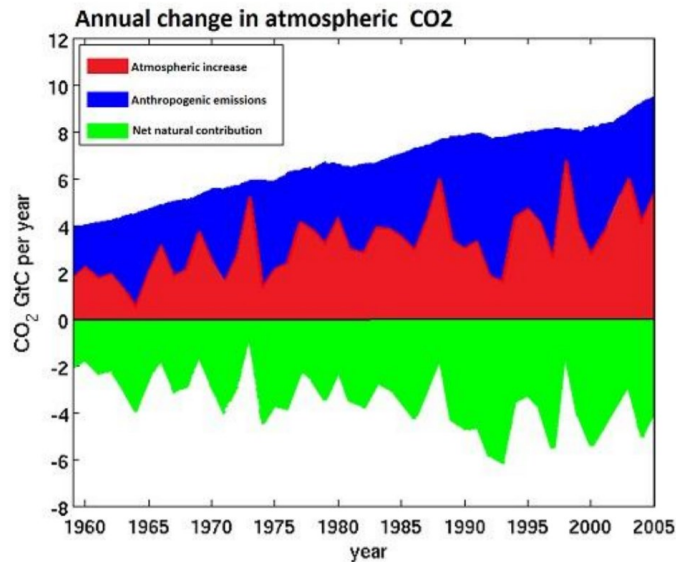


Figura 4.3: Andamento delle emissioni di origine naturale ed antropica di CO₂ nell'arco temporale che va dal 1960 al 2005.

le principali fonti antropiche di emissione sono:

- la combustione di combustibili fossili per generare elettricità, specialmente a base di carbone e in misura minore di olio o gas naturale;
- la combustione di sostanze per il trasporto terrestre, aereo, marino e ferroviario di persone e merci ;
- alcuni processi industriali che possono emettere anidride carbonica sia da combustione che da reazione chimica (produzione di cementi, industria del ferro e dell'acciaio, produzione di sostanze chimiche).

Come in ogni sistema dinamico l'accumulo di una certa sostanza è determinato dal bilancio tra i termini sorgente e quelli di consumo, così la concentrazione dei gas serra è il risultato del bilancio tra sorgenti e assorbitori di GHG. Negli ultimi secoli però le sorgenti di gas ad effetto serra sono cresciute esponenzialmente rispetto ai meccanismi di assorbimento sia naturali che

antropici portando ad accumuli crescenti e dunque all'accelerazione dei meccanismi naturali.

Ad oggi, la concentrazione dell'anidride carbonica nell'atmosfera che si attesta, per la prima volta, su un valore pari a 400 parti per milione (ppm) a livello globale. La soglia dei 400 (ppm) era già stata raggiunta nel 2015 dopo un periodo di equilibrio durato un biennio. La novità, questa volta, sta appunto nella vastità e nella durata del fenomeno che, dicono gli scienziati, coinvolge ormai tutte le zone del pianeta e sarà destinato a rimanere oltre quota 400 ppm per molte generazioni.

4.1.3 Effetto della permeabilità

L'aerazione/ventilazione può avvenire in modo:

- naturale, per differenza di pressione tra la pressione statica e la pressione del vento, e/o per differenze di temperatura;
- artificiale, tramite ventilatori od altri dispositivi meccanici di immissione/estrazione o con sistemi di ricircolo aria previo trattamento.

In generale, l'aria esterna immessa con sistemi meccanici agisce in modo "controllato", e quindi non considerata nel presente trattato; mentre quella per infiltrazione, attraverso fessure, porte, finestre, muri e altro, ha comportamenti casuali ed è determinata dalla differenza di pressione tra interno ed esterno.

La quantità di aria infiltrata dipende dalla dimensione delle aperture, dalla tortuosità dei percorsi, dalle crepe o dalle discontinuità delle chiusure perimetrali.

I fattori che influenzano i flussi di aria sono:

- posizione delle aperture;
- area d'apertura;
- tipo e modalità di apertura.

Le aperture per il passaggio dell'aria sono costituite da:

- finestre apribili;
- dispositivi specifici per la ventilazione, quali griglie e bocchette, ecc.;
- porte, portoni, ecc.;

- passaggi comunicanti con l'esterno o con altri ambienti interni adiacenti, aperti occasionalmente o in modo stabile o in modo alternato con maggiore o minore frequenza.

Da tener presente inoltre che la pressione generata dal vento sulle superfici dell'involucro edilizio dipende dalla velocità del vento stesso, dalla forma dell'edificio ed dal suo orientamento rispetto alla direzione del vento.

Aerazione naturale e distribuzione degli spazi

Per individuare il movimento dell'aria in un ambiente confinato è necessario considerare la distribuzione degli spazi e delle aperture in quanto esse determinano i flussi dell'aria stessa e la direzione prevalente del vento sulle superfici esterne. Infatti, aperture esterne complanari influenzano l'aerazione generata dal vento. L'entità e l'efficacia dell'aerazione dipendono fortemente dalla direzione del vento. Aperture esterne poste a quote diverse possono modificare i movimenti di aria verticali generati dai gradienti termici interni.

Qui di seguito si riporta la descrizione di come l'aria si muove orizzontalmente e verticalmente in un ambiente indoor.

Aerazione naturale e distribuzione orizzontale degli spazi

Nella distribuzione orizzontale si deve considerare la potenzialità di aerazione dovuta al vento.

Nella distribuzione orizzontale degli spazi il movimento dell'aria dipende dal gradiente di pressione, l'aria tende a circolare dal lato sopravvento verso il lato sottovento; ovvero dal lato a pressione maggiore verso il lato a minor pressione. Sopravento/sottovento sono concetti relativi, in quanto dipendenti dalla direzione del vento: le finestre (aperture), gli oggetti o le zone sopravvento sono quelli che sono colpiti prima, rispetto ad altre, dal vento.

L'efficacia dell'aerazione dipende, principalmente, dall'angolo d'incidenza del vento rispetto alla parete su cui è posizionata l'apertura di ingresso dell'aria.

Qui di seguito si riportano alcuni esempi di distribuzione orizzontale dell'aria in un ambiente confinato. La Figura 4.4a riporta l'andamento dei flussi di aria per ventilazione naturale passante in un ambiente confinato con due aperture contrapposte, di cui una posta sopravvento e l'altra sottovento che determinano una condizione di aerazione efficace. Nel caso di vento con direzione perpendicolare alle pareti dell'edificio e obliqua rispetto alla congiungente le aperture (Figura 4.4b) si avrà un'ulteriore efficacia dell'aerazione dovuta al rimescolamento dell'aria.

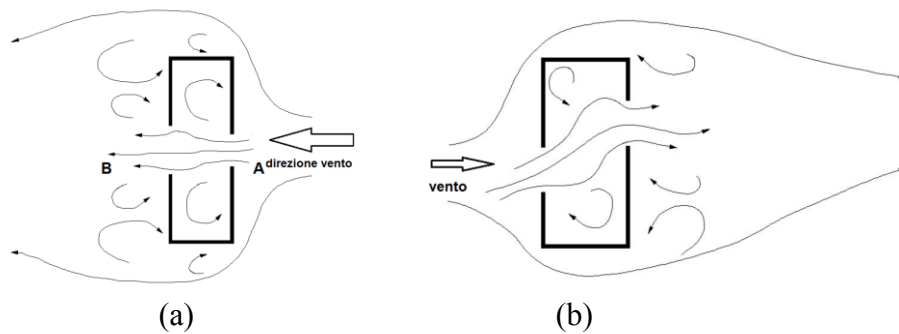


Figura 4.4: (a) Distribuzione orizzontale, andamento dei flussi di aria per ventilazione naturale passante in un ambiente confinato con una apertura/finestra posta sopravvento (A) e l'altra sottovento (B); (b) Distribuzione orizzontale andamento dei flussi di aria per ventilazione naturale passante in un ambiente confinato e con unica apertura/finestra posta sopravvento che determina una condizione di aerazione molto efficace (congiungente le aperture obliqua rispetto alla direzione del vento)

Un'ulteriore efficacia dell'aerazione, rispetto a quella prodotta dal vento perpendicolare alle aperture, si ha nel caso di direzione obliqua (angolo di incidenza $< 45^\circ$) del vento rispetto alle facciate dell'edificio, sia con aperture contrapposte (Figura 4.5a), sia con aperture poste su tre pareti contigue (Figura 4.5b).



Figura 4.5: (a) Andamento dei flussi di aria per ventilazione naturale passante in un ambiente confinato e con 2 aperture contrapposte con direzione obliqua (angolo di incidenza $< 45^\circ$) del vento rispetto alle facciate dell'edificio che genera una ventilazione più efficace; (b) Andamento dei flussi di aria per ventilazione naturale passante in un ambiente confinato e con aperture poste su tre pareti e con direzione del vento obliqua (angolo di incidenza $< 45^\circ$) rispetto alle facciate dell'edificio.

Nel caso di aerazione passante da vento, la differenza di quota tra le aperture di ingresso e di uscita dell'aria influenza il movimento di aria e conseguentemente le modalità di rimescolamento.

La Figura 4.6 riporta alcuni esempi di andamento del flusso di aria interno ad un ambiente, in funzione della posizione verticale delle aperture. La Figura 4.7 riporta un esempio di efficacia dell'aerazione naturale ai fini rimozione/diluizione inquinanti di un appartamento con due differenti direzioni del vento. Nel caso della Figura 13a la ventilazione naturale passante in un appartamento con direzione del vento inclinata rispetto alla perpendicolare alle pareti perimetrali genera un'aerazione meno idonea rispetto a quella della Figura 13b in cui la direzione del vento è perpendicolare. Ciò è dovuto ad una non idonea ubicazione delle unità ambientali rispetto alle direzioni dei venti prevalenti.

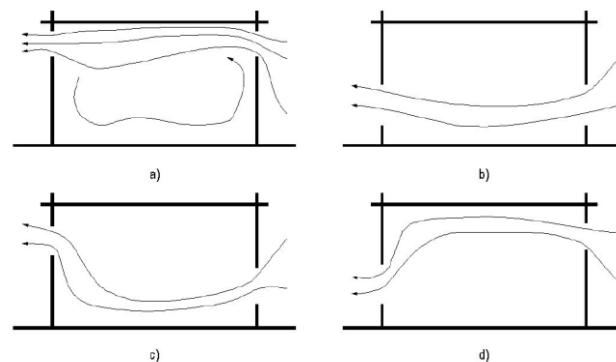


Figura 4.6: Andamento del flusso di aria interno ad un ambiente, in funzione della posizione verticale delle aperture: a) aperture poste alla stessa quota in alto; b) aperture poste alla stessa quota; c) aperture poste a quote diverse(quella sopravento a quota inferiore); d) aperture poste a quote diverse(quella sopravento a quota superiore)

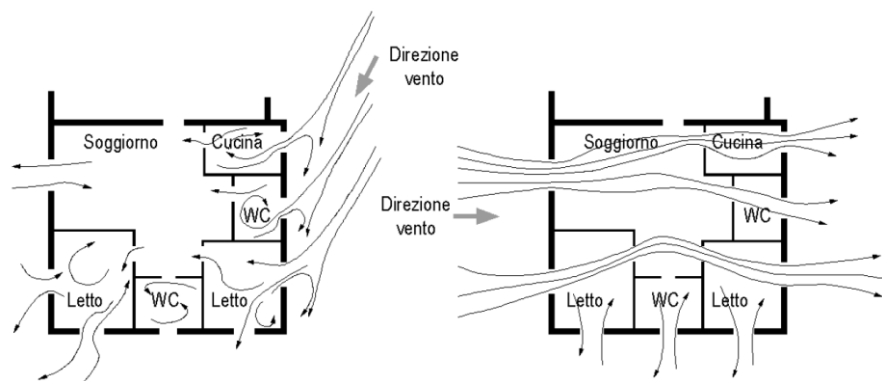


Figura 4.7: Esempi di flussi di aria per ventilazione naturale passante in un appartamento: a) con direzione del vento inclinata rispetto alla perpendicolare alle pareti perimetrali; b) con direzione del vento perpendicolare alle pareti perimetrali

Aerazione naturale e distribuzione verticale degli spazi

Nella distribuzione verticale degli spazi, aperture esterne poste a quote diverse influenzano il movimento di aria verticale generato dal gradiente di temperatura.

In generale, gli ambienti con maggior produzione di calore posti in basso tendono ad esaltare l'effetto camino che determina un movimento dal basso verso l'alto in funzione del gradiente di temperatura tra le quote verticali.

Aperture posizionate in basso e sopravento e aperture posizionate in alto e sottovento determinano un effetto camino che viene accentuato in presenza di un gradiente termico.

Un'azione combinata dei due effetti, direzione vento ed effetto camino, si ottiene con le aperture d'uscita a torrino, collocate in corrispondenza del colmo del tetto (Figura 4.8).

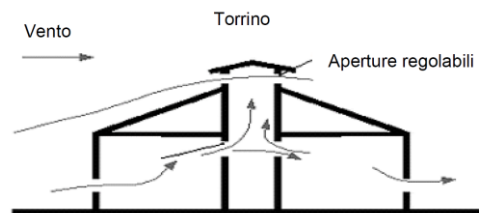


Figura 4.8. Schema di aperture a torrino sul tetto e relativi flussi di aria

I torrini possono essere a doppio flusso (accoppiamento estrazione e immissione).

Il torrino con due flussi accoppiati (Figura 4.9) è suddiviso in due condotti: uno per l'ingresso del flusso di aria (generato dal vento), l'altro per l'uscita del flusso. La regolazione d'ingresso e d'uscita del flusso può anche avvenire tramite serramenti a doghe orientabili.

La pendenza del tetto deve essere di almeno 25° , in modo da garantire che non si creino zone di depressione in corrispondenza dell'apertura d'ingresso del flusso. È da considerare la possibilità di formazione di cortocircuito dell'aria alla base dei condotti che comporterebbe una scarsa aerazione.

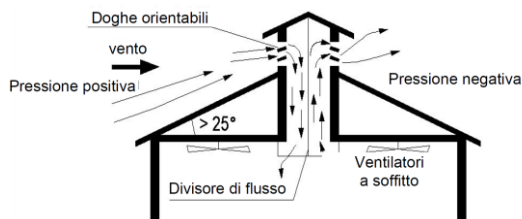


Figura 4.9: Aperture a torrino sul tetto e relativi flussi di aria: torrino a doppio flusso per lo sfruttamento combinato vento + effetto camino.

Aperture (finestre)

La portata di aria che attraversa una apertura (finestra) è direttamente proporzionale alla sua area; il rapporto tra l'area di ingresso del flusso e quella di uscita influisce sulla portata. Pertanto in presenza di aperture chiudibili/regolabili e in presenza di schermi andrà considerata la regolazione della loro apertura, e in definitiva l'area effettiva di passaggio dell'aria. Qui di seguito si riportano alcuni tipi di aperture (finestre):

– Apertura a rotazione su asse verticale od orizzontale Le finestre con apertura a rotazione su asse verticale, comprendenti la finestra a battente (singolo o doppio) e il bilico verticale, hanno un'area di apertura di circa il 90% di quella di chiusura, nella finestra a battente, e di circa il 70% nel bilico e regolano la direzione di flusso in senso orizzontale (Figura 4.10).

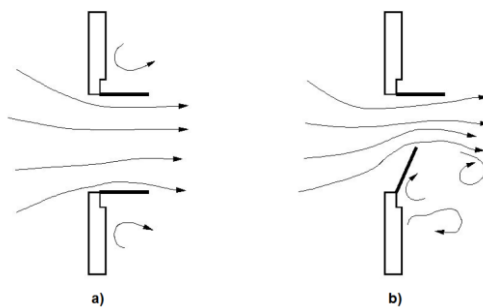


Figura 4.10: Flussi di aria attraverso finestra, con apertura a rotazione su asse verticale, a doppia anta: a) con entrambe le ante aperte; b) con una anta semiaperta (vista in pianta)

Le finestre a rotazione su asse orizzontale (vasistas, la ribalta e il bilico orizzontale), hanno un'area di apertura ridotta (1/3 dell'area della chiusura nel vasistas e nella ribalta, 2/3 nel bilico), e regolano la direzione di flusso in senso verticale (Figura 4.11).

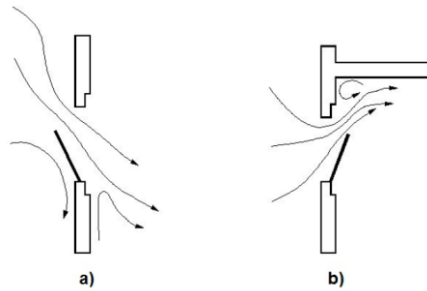


Figura 4.11: Flussi di aria attraverso finestra, con apertura a rotazione su asse verticale, a doppia anta (vista in sezione):
a) a ribalta (vista in sezione); b) a vasistas

- *Apertura scorrevole (verticalmente od orizzontalmente)*

Le finestre scorrevoli, sia verticali che orizzontali, hanno un'area di apertura al massimo il 50% dell'area totale di chiusura, salvo per il tipo scorrevole orizzontale ad incasso; la regolazione della direzione di flusso avviene in senso verticale od orizzontale, secondo la modalità di apertura (Figura 4.12).

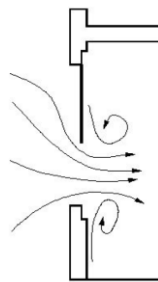


Figura 4.12: Flussi di aria attraverso finestra, con apertura a scorrimento verticale, a doppia anta (vista in sezione)

- *Apertura combinata a rotazione e scorrevole*

Le finestre ad apertura combinata, quali il vasistas bilanciato (scorrevole + rotazione su asse orizzontale) e il vasistas (rotazione su asse orizzontale + rotazione su asse verticale), regolano il flusso secondo la modalità d'apertura adottata.

4.1.4 Effetto della stratificazione

Nel modello esteso per il decadimento della concentrazione di CO₂ proposto, considerando che è stato sviluppato al fine di classificare un edificio, non vengono

presi in considerazione gli effetti di stratificazione. Le motivazioni che hanno condotto a questa scelta sono principalmente due:

- la variazione di concentrazione di un gas in un ambiente di dimensioni pari ad una stanza è trascurabile;
- le variazioni del coefficiente di diffusione di un gas tra “strati” differenti sono irrilevanti rispetto al processo di diffusione che si vuole modellare, considerando che al primo ordine di approssimazione non si hanno effetti gravitazionali.

Si presentano di seguito gli aspetti teorici e matematici che giustificano le affermazioni precedenti.

Gravitational Stratification

Si consideri un gas isotermico (temperatura T_0 , massa molare M_{mol} , densità ρ_g), la densità del gas dipende realmente solo da M_{mol} :

$$\rho_g = \frac{M_{mol} \cdot P}{R \cdot T_0}$$

dove $R = 8.3142 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ è la costante dei gas (si sta considerando un gas perfetto).

Considerando l'effetto del campo gravitazionale ($g = 9.8 \text{ m s}^{-2}$) su una superficie piana a quota $z = 0$, l'equilibrio idrostatico implica che si ha una variazione di pressione $P(z)$ ad ogni aumento o diminuzione della quota; precisamente:

$$\frac{dP}{P} = -\frac{M_{mol} \cdot g}{R \cdot T_0} \cdot z$$

Integrando:

$$P = P_0 \cdot \exp\left(-\frac{M_{mol} \cdot g}{R \cdot T_0} \cdot z\right)$$

Dove $P_0 = P(z = 0)$.

Il risultato è un decremento esponenziale della pressione con l'altezza. A livello atmosferico non abbiamo una temperatura costante, mentre all'interno della stanza è possibile, in prima approssimazione, considerare un ambiente isotermico a livello locale. L'esponente (adimensionale) permette di individuare una lunghezza di scala per la stratificazione:

$$L_z = \frac{R \cdot T_0}{M_{mol} \cdot g}$$

Per cui si può scrivere dunque:

$$P = P_0 \cdot \exp\left(-\frac{z}{L_z}\right)$$

L_z modula la variazione della pressione in funzione della quota. Considerando la massa molare della CO_2 ($44,01 \text{ g mol}^{-1}$) ed una temperatura costante di 293 K si ha che $L_z \approx 5.64 \text{ km}$; quindi in prima approssimazione, considerando la quota rispetto al pavimento di una stanza di un ufficio ($z = 0$), si ha:

$$\frac{z}{L_z} \ll 1$$

Ne risulta che è possibile espandere l'esponenziale come serie di Taylor. Si consideri un'espansione al primo ordine:

$$P = P_0 \cdot \left(1 - \frac{z}{L_z}\right)$$

La variazione della quota all'interno di una stanza introduce una variazione di pressione in percentuale molto piccola ($\approx 0,04 \%$) che si traduce, per la definizione di densità di un gas, in una variazione pressochè trascurabile della densità, e dunque della concentrazione.

Gas Diffusion in Gas

Al fine di valutare il processo di diffusione della CO₂, sarebbe opportuno quantificare il flusso totale su una certa distanza ΔL che separa due volumi di gas con concentrazioni differenti (c_1 e c_2). Tale flusso (F) è dato dalla Legge di Fick:

$$F = D_g \cdot \frac{c_1 - c_2}{\Delta L}$$

Dove D_g è il coefficiente di diffusione del gas. Generalmente tale coefficiente dipende dalla viscosità η_g e dalla densità del gas ρ_g :

$$D_g = f \cdot \left(\frac{\eta_g}{\rho_g} \right)$$

dove f è un fattore dell'ordine delle unità.

Dalle definizioni di densità e viscosità, ne consegue facilmente la dipendenza del coefficiente di diffusione dalla pressione e dalla temperatura:

$$D_g \propto \left(\frac{1}{P} \right) \quad D_g \propto \left(T^{3/2} \right)$$

Per quanto detto sulle variazioni di pressione all'interno di una stanza, in cui la temperatura può essere considerata costante, il coefficiente di diffusione tra esterno ed interno (processo che si vuole modellare) è lo stesso per i due livelli di concentrazione, seppur questi possano risultare leggermente diversi. Per quel che concerne il processo di diffusione tra i due livelli - essendo la differenza tra concentrazioni bassa per quanto detto sugli effetti gravitazionali - in prima approssimazione tale flusso sarà trascurabile rispetto a quello indoor/outdoor che induce il decadimento di CO₂.

4.2 Grey-box modelling

Considerando la complessità dei sistemi fisici che le strategie ingegneristiche mirano a governare, lo sviluppo di modelli matematici avanzati risulta vincolante per poter descrivere l'evoluzione di tali sistemi e, dunque, definire gli standards e condurre una diagnosi dell'approccio gestionale.

Affinché un modello predittivo sia considerato attendibile, dovrebbe:

1. Poter catturare il comportamento non-lineare del sistema;
2. Fornire i mezzi per controllare il rumore dovuto alle approssimazioni ed agli errori di misura.

Ovvero, la vera sfida per l'approccio matematico è quello di colmare il gap tra il modello statistico e quello fisico, per poter integrare un sistema ingegneristico coerente ed affidabile.

Esistono differenti tipi di Modelli:

- Black-box/ Grey-box/ White-box
- Lumped / Distribuiti
- Lineari / Non-Lineari
- Time-Invariant / Time-Varying
- Discreti / Continui
- Deterministici / Stocastici
- Parametrici / Non- Parametrici.

La scelta del modello è principalmente determinata dall'intento della modellazione, dalla conoscenza a priori del sistema, dai dati reali disponibili e dagli strumenti a disposizione.

Il modello proposto per l'estensione del "Concentration Decay Test Method", introdotto dalla già citata norma ASTM E741 per il decadimento della CO₂ è un modello *grey-box* lineare stocastico, a tempo continuo.

Due sono le caratteristiche principali di un modello *grey-box*:

- La combinazione delle informazioni contenute nei dati con la conoscenza a priori del fenomeno fisico

- L'importanza di poter interpretare direttamente i parametri come proprietà fisiche del sistema, seppur quest'ultimo non sia completamente descritto dalle equazioni del sistema.

I modelli *grey-box* in questo senso sono un valido compromesso tra modelli *white-box* e *black-box*; i primi sono sistemi che possono essere completamente descritti da equazioni deterministiche, mentre i secondi rappresentano una mera relazione input-output validata dal Database accumulato.

L'integrazione di aspetti fisici e statistici alla base dei modelli *grey-box* permette quindi di:

- Includere le informazioni a priori date dalla fisica del sistema
- Formulare modelli non-lineari e non-stazionari
- Gestire i dati mancanti
- Stimare variabili d'ambiente che non possono essere misurate
- Stimare parametri di sistemi dinamici piuttosto complessi, che hanno un determinato contenuto fisico.

I modelli *white-box*, come accennato, sono rappresentati da equazioni differenziali ordinarie che forniscono una descrizione deterministica del sistema esaminato:

$$d\mathbf{X}_t = \mathbf{f}(\mathbf{X}_t, \mathbf{U}_t, t)dt \quad t \geq 0$$

dove \mathbf{f} rappresenta una funzione nota all'istante t del vettore di stato \mathbf{X} del sistema e del vettore \mathbf{U} costituito dalle variabili di input. Semplificando, la variazione delle variabili di stato ad ogni istante successivo è dato dalla funzione \mathbf{f} , che seppur complicata è nota.

L'evoluzione delle variabili di stato si discosterà da quella calcolata teoricamente in base a quanto il modello deterministico rappresenta un'approssimazione della dinamica del sistema, a quanti contributi ed input non noti sono trascurati ed infine a quanto più grande risulta l'errore di misura dei valori di input e di quelli iniziali.

I modelli *grey-box* includono gli effetti di questi fattori introducendo un termine di rumore associato ad un processo stocastico; formalmente la dinamica del sistema è rappresentata da un set di equazioni differenziali stocastiche, come segue:

$$d\mathbf{X}_t = \mathbf{f}(\mathbf{X}_t, \mathbf{U}_t, \boldsymbol{\theta})dt + \mathbf{G}(\mathbf{X}_t, \mathbf{U}_t, \boldsymbol{\theta})d\mathbf{W}_t \quad \mathbf{X}_{t_0} = \mathbf{X}_0$$

Con

- $\mathbf{X}_t \in R^n$: vettore di stato del sistema
- $\mathbf{U}_t \in R^m$: vettore input del sistema noti
- \mathbf{f} : termine di drift (*matrice nx1*), ovvero l'andamento deterministico in assenza di rumore
- \mathbf{G} : termine di diffusione (*matrice nxd*), ovvero lo spread rispetto alla traiettoria deterministica- quanto le traiettorie in qualche modo si possono discostare rispetto al modello ideale.
- \mathbf{W}_t : processo di Wiener di dimensione d con covarianza incrementale \mathbf{Q}_t
- $\boldsymbol{\theta} \in \Theta \subseteq R^p$: vettore dei parametri non noti.

Si consideri il caso unidimensionale ($d=1$), per comprendere il motivo per cui si utilizza un processo di Wiener per modellare l'azione di un rumore bianco.

Usualmente si definisce *processo stocastico a tempo discreto* una successione di variabili aleatorie $X_1, X_2, X_3 \dots, X_N : (X_n)_N$.

Si definisce invece *processo stocastico a tempo continuo* ogni famiglia $(X_t)_{t \geq 0}$ di variabili aleatorie indicizzate da una variabile continua.

In definitiva, volendo dare una definizione generale, un processo stocastico è una famiglia di variabili aleatorie indicizzata da qualche insieme di parametri. Fondamentale è il doppio punto di vista con cui si può studiare un processo stocastico: da un lato è possibile fissare il valore dell'indice e ragionare sulla distribuzione di probabilità della variabile aleatoria (in particolare la media attesa e la deviazione standard), dall'altro possiamo osservare una realizzazione del processo, ovvero un insieme di valori accaduti o che possono potenzialmente accadere.

La classe fondamentale di processi stocastici è quella costituita dai processi gaussiani, che permettono di descrivere il rumore bianco.

Se si considera una successione discreta di variabili aleatorie, due possibili modi del *white noise gaussiano* possono essere:

1. $X_n = a_n + \epsilon_n$, $(a_n)_N$ successione di numeri reali;
2. $X_n = aX_{n-1} + \epsilon_n$, $X_0 = b$ con a,b numeri reali.

dove $(\epsilon_n)_N$ è una successione di variabili gaussiane con media nulla e varianza costante- condizione necessaria del rumore bianco.

L'esempio più noto del secondo modello è la "passeggiata aleatoria" (*random walk*) definita da:

$$X_n = X_{n-1} + \epsilon_n, \quad X_0 = 0$$

A tempo continuo il *white noise gaussiano a tempo continuo* non è definibile in modo tradizionale; bisognerebbe introdurre la teoria delle distribuzioni. Si può però percorrere una dimostrazione alternativa, definendo il processo in tempo continuo analogo al *random walk* unidimensionale; si tratta proprio del *Processo di Wiener*, un processo stocastico a tempo continuo reale (a valori reali) $W(t), t \geq 0$, definito in uno spazio di probabilità (Ω, F, P) , tale che:

- I. $W(0) = 0$
- II. è un processo ad incrementi indipendenti, cioè per ogni scelta dell'indice dei tempi n ($0 \leq t_1 < t_2 < \dots < t_n$), si ha che:
 $W(t_2) - W(t_1), W(t_3) - W(t_2), \dots, W(t_n) - W(t_{n-1})$ sono indipendenti.
- III. per $t > s$, $W(t) - W(s)$ è distribuita come una normale di media 0 e varianza $t - s$, cioè:

$$W(t) - W(s) \sim N(0, t - s)$$

Per essere più precisi si tratta di un moto browniano "standard" (caratterizzato dal coefficiente di $t - s$ nella varianza al punto (iii)) ed unidimensionale.

Le proprietà (i)-(iii) individuano univocamente tutte le probabilità finito-dimensionali del processo; si può verificare infatti che:

$$\begin{aligned}
& P[W(t_1) \in F_1, W(t_2) \in F_2, \dots, W(t_n) \in F_n] = \\
& = \int_{(F_1 \times F_2 \times \dots \times F_n)} p(t_n - t_{n-1}; x_n | x_{n-1}) \cdots \\
& \quad \cdot p(t_2 - t_1; x_2 | x_1) p(t_1; x_1 | 0) dx_1 dx_2 \cdots dx_n
\end{aligned}$$

dove le densità di probabilità di transizione sono date da:

$$p(t; x|y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(x - y)^2}{2t}\right\}, \quad t > 0$$

Il concetto che deve emergere è il fatto che la probabilità congiunta di avere tutti gli eventi di una traiettoria specifica è data dal prodotto delle probabilità delle singole transizioni tra istanti successivi (indipendenza degli incrementi); inoltre i singoli eventi hanno una densità gaussiana dato l'evento precedente (*random walk*). Per comprendere il motivo dell'inserimento del processo di Wiener per modellare il contributo di un rumore bianco di fondo nella dinamica, in maniera molto naive, si può l'equazione differenziale stocastica del modello in un formalismo "discreto" (discretizzazione di Eulero). Si ha (in 1-D):

$$X_{t+1} - X_t = f(X_t, U_t, \theta) \cdot 1 + G(X_t, U_t, \theta) \cdot (W_{t+1} - W_t)$$

Dove l'incremento del processo di Wiener ha una distribuzione normale così come è previsto dalla definizione di *white-noise*.

Nel caso di modelli di CO₂ *dynamics*, le variabili di stato del sistema corrispondono ai livelli di concentrazione dei gas traccianti nei "nodi" del sistema – nomenclatura che diventerà più chiara con la rappresentazione circuitale del sistema descritta nella implementazione del modello. Le variabili di input rappresentando le condizioni al contorno del sistema, che devono poter essere controllate e misurate. L'approccio *grey-box modelling* si basa sul fatto che i dati raccolti sulle variabili di stato forniscono serie storiche e rappresentano, dunque, una parte finita di una realizzazione del processo stocastico in questione. Più precisamente ogni data-set coincide con uno solo tra i possibili infiniti tracciati che il processo può generare.

Se è possibile determinare le proprietà del processo ed ipotizzare la dipendenza temporale, è possibile dare forma al modello statistico. Tipicamente lo scopo è fare inferenza sulle future realizzazioni del processo, per integrare una gestione predittiva del sistema; al fine, invece, di utilizzare il modello a scopo diagnostico, il punto cruciale risulta la stima dei parametri e la validità della loro natura fisica. Le osservazioni che costituiscono le serie storiche sono a tempo discreto, dipendono dallo stato del sistema, dagli input e dai parametri; inoltre, sono necessariamente soggette al rumore dato dall'accuracy e dalla stabilità del sistema di misurazione. Formalmente, i dati reali possono essere rappresentati come segue:

$$Y_{t_j} = h(X_{t_j}, U_{t_j}, \theta) + \epsilon_{t_j}$$

dove

- $X_{t_j} \in R^n$: osservazione delle variabili di stato all'istante t_j
- $U_{t_j} \in R^m$: vettore input del sistema noti all'istante t_j
- h : funzione di osservazione
- ϵ_{t_j} : *white-noise* Gaussiano con covarianza Σ_{t_j}

Le osservazioni sono disponibili ad istanti $t_0 < t_1 < t_2 \dots \dots < t_j < \dots \dots < t_N$, supponendo che N sia il numero totale dei dati della serie storica in esame.

Tipicamente si ipotizza che X_0, W_t ed ϵ_{t_j} siano indipendenti $\forall t \neq t_j$.

L'analisi delle serie storiche ed il fitting delle medesime tramite l'equazione differenziale stocastica in tempo continuo, che esprime la fisica del sistema, rappresentano il fulcro della modellazione *grey-box*. Considerando i dataset collezionati, il passaggio decisivo consiste nella stima dei parametri attraverso l'utilizzo di tool dedicati che implementano metodi statistici opportuni. La simulazione del modello, via software di programmazione, permette poi la validazione dello stesso.

Si costruisce così un framework sistematico, attraverso cui emergono anche le *liabilities* del modello.

Tale approccio garantisce il vantaggio di decomporre l'errore totale in errore "aleatorio" di processo ed errore di misura; la possibilità di stimare la covarianza

tra i due errori - minore sarà la dipendenza più valido sarà del modello – permette di prescindere la natura fisica del sistema dal sistema di misurazione.

Concludendo i passaggi chiave della modellazione grey-box che prevede un approccio statistico sono:

- **Model Identification:** identificazione della struttura del modello che consiste principalmente nella formalizzazione dei processi dinamici e degli aspetti fisici che determinano gli stessi;
- **Parameter Estimation:** utilizzo di metodi statistici (e.g. Metodo della Massima Verosomiglianza) per la stima dei parametri e la valutazione della significatività degli stessi;
- **Model Validation:** test di verifica della descrizione dei dati tramite il modello con metodi classici, verifica delle autocorrelazioni.

4.3 Metodologia

Di seguito si illustrano il sistema di misurazione e l'ambiente di prova, attraverso i quali sono stati raccolti i dati per la stima dei parametri e la successiva validazione del modello esteso di decadimento. La stima dei parametri sarà propedeutica alla valutazione dei ricambi d'aria dell'involucro edilizio specifico del case study.

Le prove sono state caratterizzate da:

- Porte chiuse
- Finestre chiuse
- Ventilazione spenta
- Assenza occupanti

4.3.1 Sistema di misurazione

Ai fini della realizzazione di studi sulla permeabilità all'aria dell'involucro edilizio sono stati monitorati i livelli di concentrazione dell'anidride carbonica, CO₂, all'interno di un ufficio al secondo piano della sede della Filippetti Spa, sita in via Marconi n.102, per una serie di weekend compresi tra il 4 agosto e il 10 ottobre 2016.

L'infrastruttura di comunicazione della SmartNetwork è costituita da:

- n.1 gateway con modulazione FSK collegata ad una presa LAN presente in sito.
- n. 6 sensori di CO₂ Cozir™ Ultra Low Power Carbon Dioxide Sensor, con range di misura 0÷5000 ppm.

Nello specifico,

- n.4 sensori sono stati posizionati all'interno del locale da monitorare con differenti quote; precisamente, con riferimento alla quota del pavimento, la disposizione finale dei sensori è stata la seguente:
 - n. 2 all'altezza di 1m;
 - n.1 a 0,5 m;
 - n. 1 a 2 m;
 - n. 1 sensore è stato posizionato nel corridoio adiacente;
 - n. 1 sensore è stato posizionato all'esterno, in posizione centrale.

Si riporta di seguito l'elenco dei sensori installati ai fini del monitoraggio dei livelli di CO₂.

ID sensore CO₂	Posizione
CO ₂ 504	Balcone ufficio
CO ₂ 505	Ufficio +2,00 m da quota pavimento
CO ₂ 506	Ufficio +0,50 m da quota pavimento
CO ₂ 507	Ufficio +1,00 m da quota pavimento
CO ₂ 508	Ufficio +1,00 m da quota pavimento
CO ₂ 509	Corridoio esterno ad ufficio

Tab 4.2: Elenco dei sensori installati

I sensori forniscono come output le seguenti grandezze:

- Concentrazione di CO₂ [ppm];
- Temperatura dell'aria [°C];
- Umidità dell'aria [%].

Si riportano nella figura seguente lo schema delle grandezze da misurare e la relativa nomenclatura dei dispositivi installati.

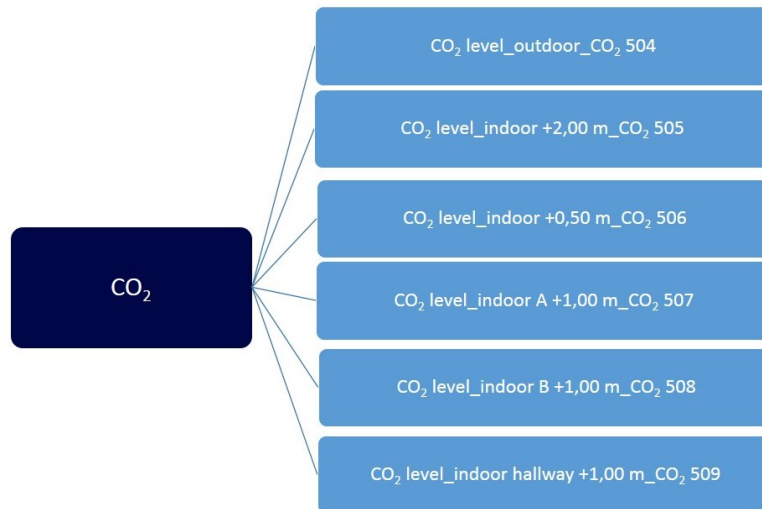


Figura 4.13: Schema misure CO₂

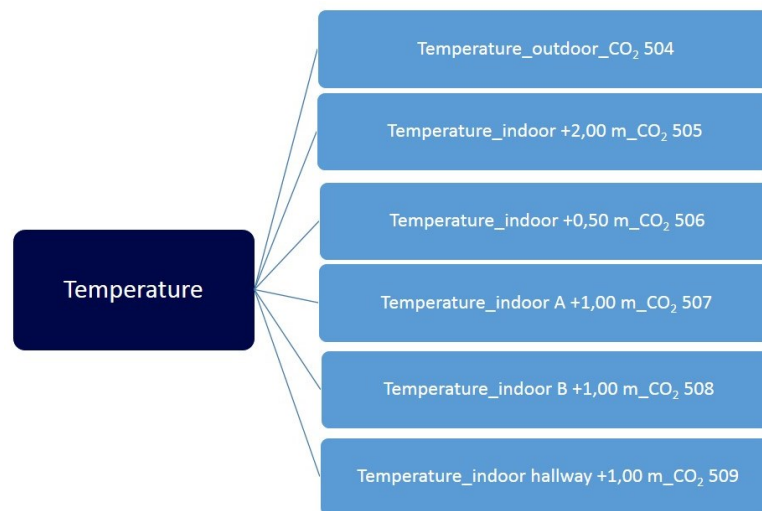


Figura 4.14: Schema misure temperatura

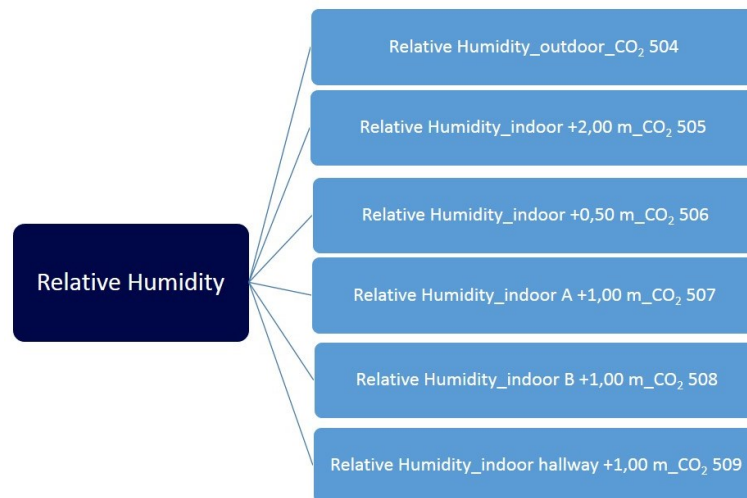


Figura 4.15: Schema misure umidità relativa

4.3.2 Ambiente di prova

L'ambiente di utilizzato per i test è un locale situato al secondo piano di una palazzina uffici, presenta una superficie di circa 52 mq e un volume di circa 130 mc. L'ambiente risulta delimitato per i tre lati interni da pareti in cartongesso e struttura metallica di circa 8 cm di spessore totale, la parete esterna presenta un tamponamento in blocchi *poroton* di 25 cm e 8 cm di isolante termico non igroscopico. La parete esterna risulta tuttavia per la maggior parte della superficie occupata da infissi fissi e mobili in alluminio e doppio vetro, caratterizzati dalla classe 3 di permeabilità all'aria secondo la UNI EN 12207. La parete di separazione dall'ambiente del corridoio, presenta due porte vetrate scorrevoli, di dimensioni 120 x 210 cm. Gli orizzontamenti sono: solaio di interpiano in latero – cemento, solaio di copertura a falda in legno. Quest'ultimo risulta essere un tetto rovescio costituito da pannelli sandwich con strato di finitura esterna in alluminio.

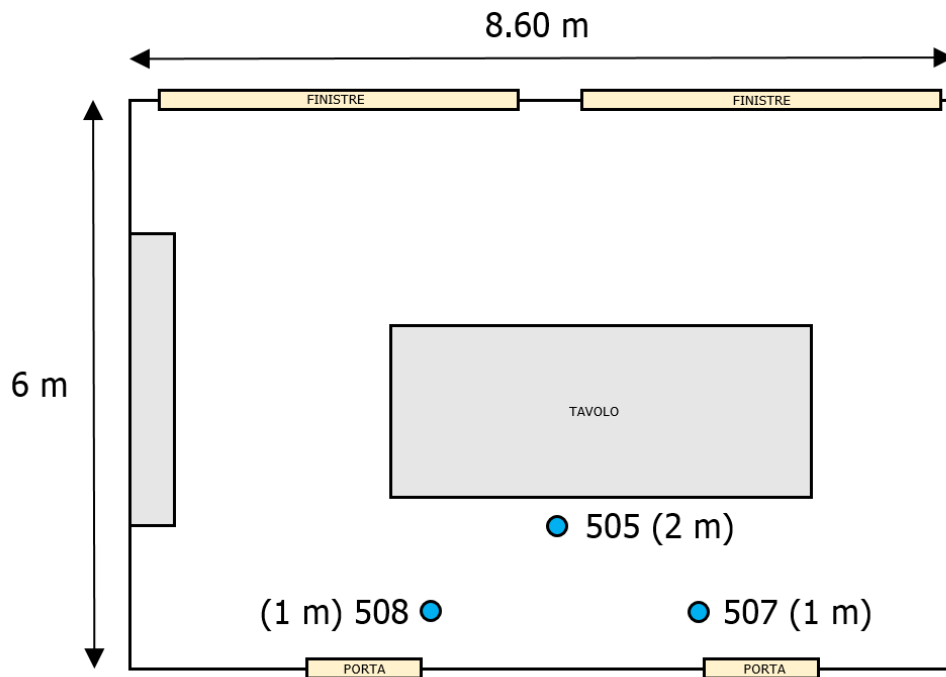


Figura 1.16: Disposizione Sensori CO₂.

4.4 Implementazione del modello

Lo scopo della ricerca presentata è proporre un modello esteso per il decadimento della concentrazione di CO₂ che possa fornire un metodo di valutazione della permeabilità di un edificio alternativo alle pratiche usuali. Per identificare il modello di decadimento della concentrazione di CO₂ bisogna comprendere quali sono gli attori che intervengono nella dinamica del processo.

Il livello di concentrazione di CO₂ all'interno di una stanza di un edificio può essere determinato, in un sistema a parametri concentrati, a partire dal principio di conservazione della massa, dato un volume definito V_r , che coincide con il volume d'aria contenuto nella stanza considerata; ovvero, si parte da una dinamica deterministica per la concentrazione interna bilanciando la portata di CO₂ tra l'esterno dell'edificio e la stanza in esame.

La variazione di concentrazione di CO₂ interna (C_i) è determinata dall'equazione seguente:

$$\frac{dC_i}{dt} V_r = (C_e - C_i) * Q_e$$

dove:

V_r è il volume dell'aria della stanza in questione;

C_e è la concentrazione di CO₂ esterna;

Q_e è il tasso di ventilazione, attraverso cui determinare la permeabilità dell'edificio.

Questo modello coincide con l'approccio classico del Tracer Gas Test, che si desidera estendere; si ha che lo stato del sistema è descritto da una singola variabile, il livello di concentrazione interno C_i , e due input esterni, la concentrazione outdoor C_e ed il volume V_r – più precisamente V_r rappresenta una condizione al contorno.

Al fine di introdurre input del sistema non noti, si aggiunge un termine stocastico:

$$\frac{dC_i}{dt} V_r = (C_e - C_i) * Q_e + \sigma * dW$$

Il primo step di generalizzazione del modello per il decadimento della concentrazione esterna, dunque, consiste nell'inserimento di un termine di diffusione con varianza costante; da un punto di vista pratico, questa scelta implica che gli errori di processo intervengono in maniera costante nella dinamica. Fisicamente, come mostrato dall'ambiente di misura, degli input costanti potrebbero essere individuati nella dispersione di CO₂ tramite il tetto a falde in legno.

Il modello, nella logica di bilanciamento delle portate, può essere interpretato tramite un circuito elettrico RC-serie, come mostrato in Figura 4.17:

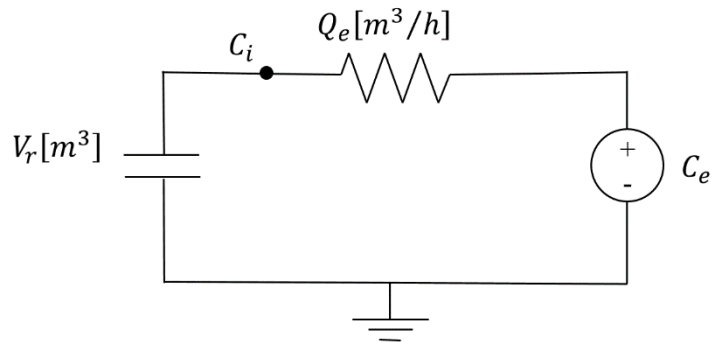


Figura 4.17: Rappresentazione circuitale del modello 1.

Il gradiente di concentrazione dovuto alla differenza tra i livelli di concentrazione, interno ed esterno, determina un flusso di CO₂, che “scarica” il volume della stanza. Infine le rilevazioni dei sensori costituiscono un set di dati a tempo discreto, attraverso cui stimare i parametri dell’equazione stocastica rappresentativa della fisica sottostante:

$$Y_{t_k} = C_{i,t_k} + e_k$$

dove:

C_{i,t_k} rappresenta la concentrazione interna di CO₂ all’istante t_k ;
 e_k rappresenta l’errore di misura, legato all’accuracy dei sensori.

4.5 Ambiente di sviluppo

La stima dei parametri per il modello presentato è stata effettuata utilizzando un toolbox specifico implementabile in R per la modellazione di sistemi stocastici in tempo continuo, “Continuous Time Stochastic Modeling” (CTSM-R).

Il pacchetto permette di inserire le equazioni differenziali che rappresentano la fisica del modello, i dati raccolti e procede autonomamente con la stima dei parametri in gioco. Nell’impostazione del modello è necessario inserire i domini di definizione delle variabili ed una stima dell’errore di misura.

Il pacchetto utilizza il metodo della massima verosomiglianza (“Maximum Likelihood Estimation”, MLE) per la stima dei parametri.

4.5.1 Metodo della Massima Verosimiglianza

Il metodo della massima verosimiglianza, in statistica, è un procedimento matematico per determinare uno stimatore.

Estraendo un campione costituito da n variabili casuali X_i indipendenti ed identicamente distribuite da una popolazione \mathbf{X} con funzione di densità di probabilità $f(x, \theta)$, si costruisce la funzione di verosimiglianza che rappresenta la densità di probabilità del campione stesso: in quest'ambito si ipotizza che essa sia funzione del vettore dei parametri θ , mentre le realizzazioni campionarie X_i sono fisse.

Analiticamente si ha:

$$L(Y_i | \theta) = \prod_{i=1}^n f(X_i | Y_{i-1}, \theta)$$

dove:

$$Y_{i-1} = [X_{i-1}, X_{i-2}, \dots, X_0]$$

La funzione statistica $\theta = t(X_1, X_2, \dots, X_n)$ è detta stimatore di massima verosimiglianza se, in corrispondenza di ciascun campione estratto, assegna un valore al vettore θ che massimizza la funzione di verosimiglianza. Formalizzando:

$$\max L(X, \theta) = L(X, \theta)$$

Ovviamente la stima di massima verosimiglianza è definita in questo modo:

$$\theta = \arg \max L(x, \theta)$$

Per poter calcolare lo stimatore MLE (Maximum Likelihood Estimator) si ricorre alla funzione log-verosimiglianza ottenuta attraverso l'applicazione del logaritmo naturale, quindi risulta:

$$l(X, \theta) = \ln L(X, \theta)$$

Dato che la funzione logaritmica è una trasformazione monotona crescente, con il passaggio alla log-verosimiglianza non si perdono le caratteristiche della funzione L , in termini di crescita e decrescenza.

4.6 Risultati e discussioni

La stima dei parametri, per il modello di decadimento esteso proposto, è stata effettuata utilizzando come input del codice (in R) i dati sulla concentrazione di CO₂ raccolti nei giorni **23-24 Settembre 2016**.

Per analizzare i dati, sicché lo studio di fattibilità di qualsiasi esperimento fisico richiede preliminarmente la valutazione del rumore associato alle misure, più precisamente del rapporto segnale/rumore che è possibile ottenere, risulta evidente l'importanza di scegliere metodi ad hoc per migliorare il rapporto segnale/rumore ottenibile cioè per estrarre convenientemente il segnale utile dal rumore e dai disturbi.

Le strategie più comuni per ridurre il rapporto segnale-rumore sono:

1. Il filtraggio dei dati, per ricostruire la forma originale del segnale e consentire la misura dei parametri;
2. I metodi a correlazione, che mirano a rivelare la presenza di un segnale (di forma data) in presenza di rumore, stabilendone, per esempio, il tempo di occorrenza, senza necessariamente ricostruirne la forma originale.

A tal proposito, è stato scelto un intervallo di circa 30 h (dalle 18:30 del Venerdì alle 24:00 del Sabato), in quanto il decadimento della concentrazione di CO₂ risulta significativo rispetto all'errore di misura del sensore; nelle altre rilevazioni l'effetto del rumore altera la valutazione della differenza tra concentrazioni successive. Per la riduzione del rumore, in VBA per Excel è stato implementato un filtro a media mobile per il dataset raccolto individuato, che parte dalla valutazione della periodicità osservata nelle differenze prime dei valori di concentrazione ad ogni step. In questo modo si cerca di integrare la media di lungo periodo, con effetto di

smoothing del segnale - seppur bisogna porre attenzione a non introdurre effetti di ritardo/anticipo.

In entrambi i casi, analizzando le variazioni rapide di concentrazione del gas tracciante, si è scelto un intervallo di 15 rilevazioni per la media mobile. Le acquisizioni vengono fatte con una frequenza di una ogni 2 minuti. Questo implica che la finestra temporale della media mobile è di circa 30 minuti.

Nei seguenti grafici si riportano i dati raccolti dai due sensori:

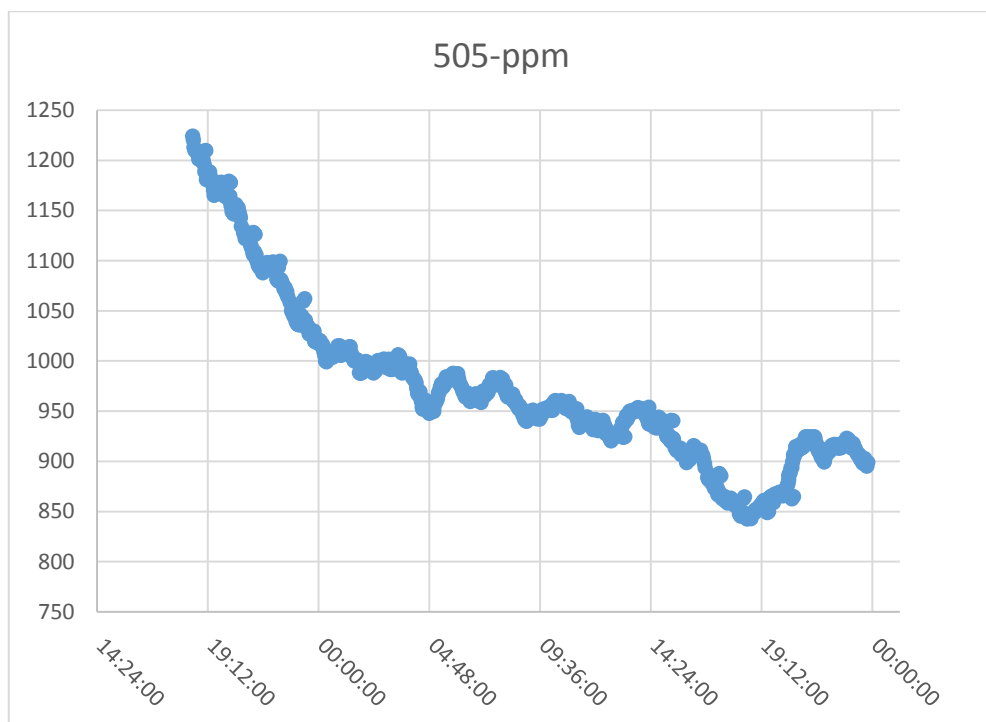


Grafico 4.1: Andamento della concentrazione di CO₂ – sensore 505

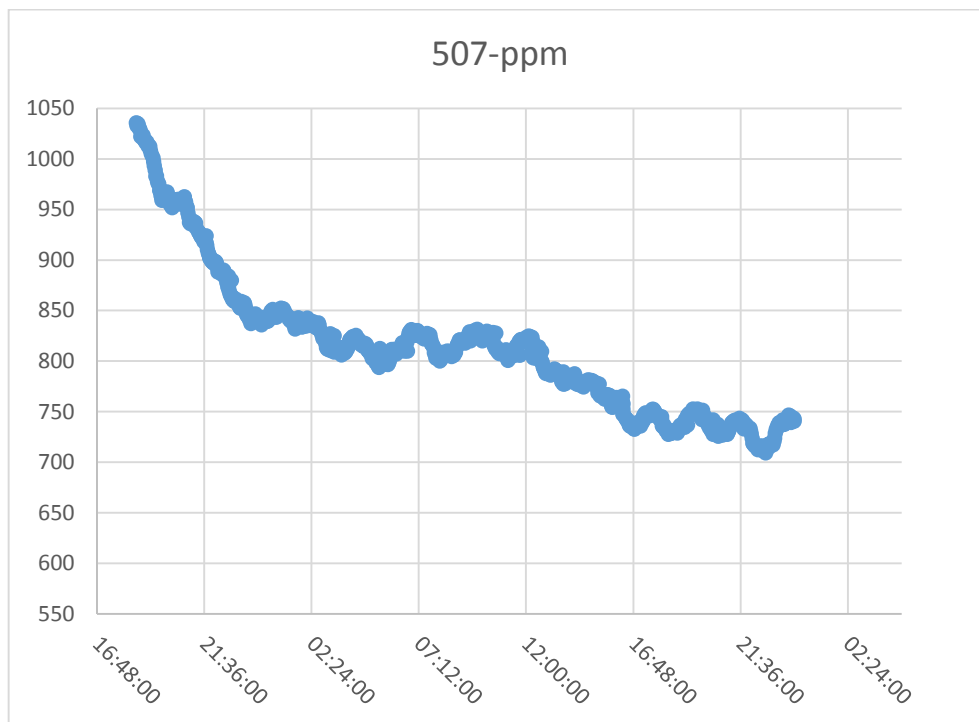


Grafico 4.2: andamento della concentrazione di CO₂ – sensore 507

Il decadimento esponenziale atteso risulta evidente. La skewness della curva esponenziale nel modello è rappresentata dal drift, ovvero la funzione attraverso cui la variazione del livello di concentrazione dipende dal tempo. Per come è stato costruito il modello, il drift è funzione della concentrazione stessa, tipico di un andamento esponenziale.

Si osserva un'offset nei livelli di concentrazione di CO₂ di circa 150 ppm rispetto ai valori standard indoor che possono essere ricondotti sia a problemi firmware dei sensori nella valutazione della variabile, e dunque ad un problema di calibrazione, sia ad un contributo addizionale di CO₂.

I dati mostrano che tra i due sensori si ha una discrepanza costante di circa 150-200 ppm. Questi valori rientrano nell'offset, precedentemente osservato, per cui non si può parlare di effetto di stratificazione.

Entrambi i dataset sono stati analizzati considerando il modello stocastico precedentemente illustrato:

$$dC_i = \frac{Q_e}{V_r} (C_e - C_i) \cdot dt + \sigma \cdot dw$$

dove:

- V_r è il volume dell'aria della stanza in questione;
- C_e è la concentrazione di CO₂ esterna;
- Q_e è il tasso di ventilazione, attraverso cui determinare la permeabilità dell'edificio.

Riguardo la concentrazione esterna, si è scelto di considerarla costante, pari a 450 ppm CO₂, dal momento che non sono presenti valori storici noti, per due motivi:

- Scarsa reperibilità presso i comuni servizi di data sharing;
- Il sensore installato esternamente ha presentato problemi di deriva, che hanno reso i dati inefficaci.

Con queste condizioni tuttavia il modello non ha prodotto risultati, dimostrandosi non convergente; infatti, se si analizzano i dati mostrati nei grafici precedenti, il decadimento esponenziale non converge ad un valore plausibile per la concentrazione esterna.

Si è dunque ipotizzata la presenza di una seconda sorgente di CO₂: dal momento che le porte a servizio della stanza, seppur chiuse, possiedono una permeabilità non trascurabile rispetto a quella delle pareti esterne, è stato scelto il corridoio come *reservoir* di biossido di carbonio. Questo contributo addizionale potrebbe chiarire l'elevato livello di concentrazione di CO₂.

Si è dunque implementato un secondo codice (Appendice 1) in cui la nuova equazione stocastica che rappresenta il sistema risulta essere la seguente:

$$dC_i = \left[\frac{Q_e}{V_r} (C_e - C_i) + \frac{Q_x}{V_r} (C_x - C_i) \right] \cdot dt + \sigma \cdot dw$$

Dove:

- C_x = concentrazione di CO₂ nel corridoio
- Q_x = tasso di ventilazione corridoio - stanza

Il modello, nella logica di bilanciamento delle portate, può essere interpretato tramite il seguente circuito:

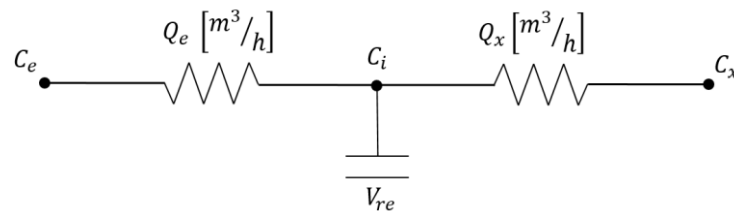


Figura 4.18: Rappresentazione circuitale del modello 2..

Si è optato per inserire in input dati di concentrazione del corridoio, dal momento che un sensore era stato installato nella zona antecedente l'ingresso della stanza; tuttavia, molto probabilmente a causa del rumore, il modello non converge; quindi si è deciso di far stimare al software i valori di Q_x e di simulare le concentrazioni nel corridoio.

Per l'implementazione del modello, i domini di definizione delle variabili in gioco sono stati inseriti come segue:

Variabile	Valore Iniziale	Lower Bound	Upper Bound
C_i	1200 ppm	600 ppm	1500 ppm
C_x	1000 ppm	600 ppm	1500 ppm
C_e	450 ppm	Const	Const
Q_e	20	10	250
Q_x	20	10	250
V_{re}	120	40	150

Tab. 4.3: domini di definizione delle variabili

Si è deciso di far stimare il volume della stanza in esame dal codice in quanto, come già accennato, non è stato possibile prendere in considerazione l'effetto del soffitto in legno.

Nelle seguenti tabelle sono mostrati i dati stimati dal modello, sia utilizzando il dataset del sensore e i parametri utili alla valutazione della sua attendibilità che il pacchetto CTSM-R permette di calcolare:

```

Coefficients:
      Estimate Std. Error   t value   Pr(>|t|)   dF/dPar dPen/dPar
Ci0  1.0095e+03  2.9818e+00  3.3854e+02  0.0000e+00 -5.5484e-06  0.0003
Ce   6.0000e+02           NA           NA           NA           NA           NA
Cx   8.9581e+02  5.6222e+01  1.5934e+01  0.0000e+00  4.6797e-05 -0.0002
e11  1.1562e+00  1.1468e-01  1.0083e+01  0.0000e+00 -1.7706e-08  0.0000
p11  2.6044e+00  4.2800e-02  6.0850e+01  0.0000e+00  3.7163e-07  0.0000
Qe   1.0935e+01  6.9720e+00  1.5685e+00  1.1715e-01  1.0412e-05 -0.0125
Qx   1.0931e+01  4.3082e+00  2.5372e+00  1.1356e-02 -3.7380e-05 -0.0126
Vre  1.4083e+02  7.3749e+01  1.9096e+00  5.6525e-02 -1.4016e-06  0.0251

Correlation of coefficients:
      Ci0  Cx   e11  p11  Qe   Qx
Cx   0.01
e11  0.16  0.00
p11 -0.15  0.01 -0.42
Qe   0.01  0.75  0.00  0.00
Qx   0.01  0.80  0.00  0.00  0.99
Vre  0.00  0.57  0.01 -0.01  0.93  0.87

```

Tab. 4.4: Parameter Estimation 507 sensor

```

Coefficients:
      Estimate Std. Error   t value   Pr(>|t|)   dF/dPar dPen/dPar
Ci0  1.2400e+03  4.3276e+00  2.8654e+02  0.0000e+00 -2.0428e-06  0.0026
Ce   6.0000e+02           NA           NA           NA           NA           NA
Cx   1.2000e+03  7.9261e+01  1.5140e+01  0.0000e+00  6.8414e-05  0.0018
e11  2.4139e+00  8.2057e-02  2.9417e+01  0.0000e+00 -1.4035e-06  0.0000
p11  2.7524e+00  5.1041e-02  5.3926e+01  0.0000e+00 -3.9961e-06  0.0000
Qe   1.1773e+01  2.0951e+01  5.6195e-01  5.7431e-01  1.0685e-04 -0.0037
Qx   1.1959e+01  1.8370e+01  6.5101e-01  5.1523e-01 -7.0601e-05 -0.0031
Vre  1.3299e+02  2.1944e+02  6.0605e-01  5.4465e-01 -5.1485e-05  0.0068

Correlation of coefficients:
      Ci0  Cx   e11  p11  Qe   Qx
Cx   0.00
e11 -0.22  0.00
p11  0.15  0.01 -0.39
Qe   0.00  0.94  0.00  0.00
Qx   0.01  0.94  0.00  0.01  1.00
Vre  0.00  0.95  0.00  0.00  1.00  0.99

```

Tab. 4.5: Parameter Estimation 505 sensor

dove:

- *Estimate* = valore del parametro stimato
- *Std. Error* = incertezza del parametro stimato

- t value = valore della distribuzione t di Student, utilizzata come test per la validazione del modello
- $Pr(>|t|)$ = la probabilità che il campione nella distribuzione t di Student sia oltre i limiti definiti dal t value, ovvero la probabilità che il valore iniziale delle variabili e/o i parametri siano non significativi; se tale valore non è basso significa che sono stati utilizzati un numero eccessivo di parametri
- $dF/dPar$ = derivata della funzione obiettivo rispetto al valore iniziale del parametro; se il valore non è vicino allo 0, la soluzione trovata non è il vero optimum;
- $dPen/dPar$ = derivata della *penalty function* rispetto al valore iniziale del parametro; se il valore è comparabile al valore di $dF/dPar$, il valore iniziale delle variabili e/o i parametri è vicino ai vincoli imposti.

Nelle seguenti figure vengono rappresentati, per i sensori 505 e 507:

- grafico inferiore: correlazione tra i valori misurati dai sensori e quelli simulati dal modello;
- grafico superiore: differenza tra i valori teorici del modello e quelli simulati.

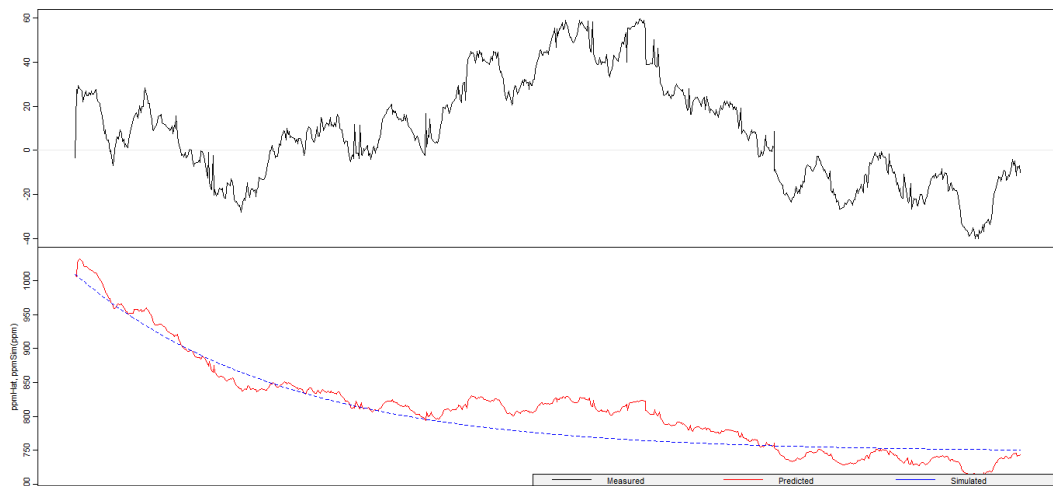


Fig. 4.19: 507-Correlation

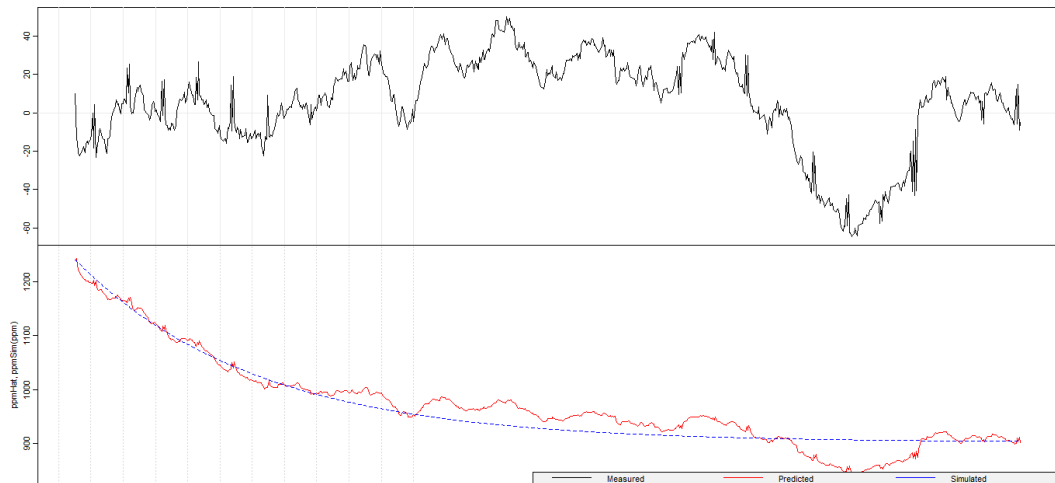


Fig. 4.20: 505 Correlation

I residui, ovvero la differenza tra la simulazione ed il modello teorico esponenziale, sono al massimo di 30 ppm che può risultare non significativo rispetto all'accuracy del sensore.

Confrontando i dati simulati con un quelli misurati dallo stesso sensore in più weekend, è stato possibile validare il modello.

Un esempio è visibile nel seguente grafico, in cui si può notare che, essendo la Q_e bassa e quindi il tempo di scarica lungo, è necessario considerare un intervallo di tempo idoneo per valutare il tasso di ricambio d'aria, prendendo in considerazione tale comportamento; tuttavia, il rumore non è trascurabile in relazione ai dati acquisiti ed influisce sul modello.

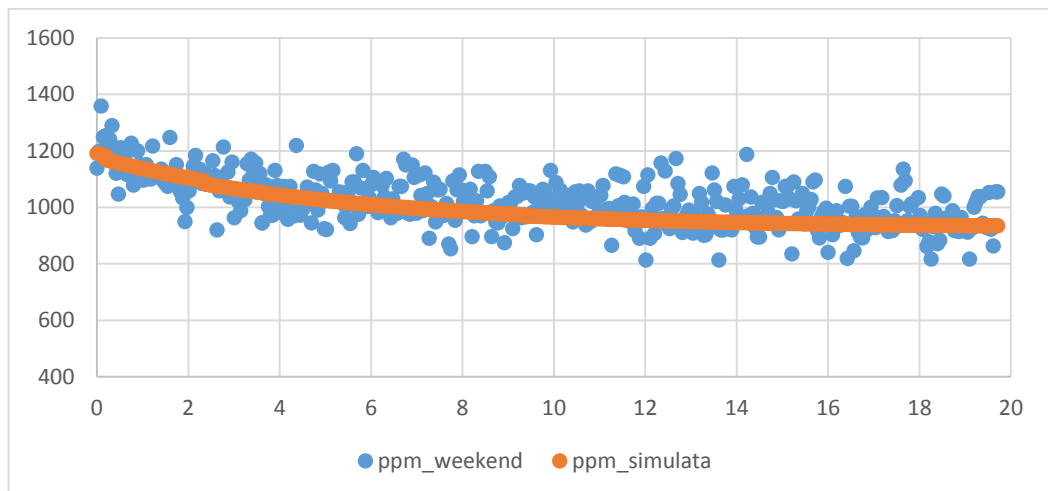


Grafico 4.3: Confronto tra i dati simulati e quelli misurati

Dai dati del 505 si ricava un valore di ricambio d'aria pari a:

$$\bar{A} = Q_e/V_{re} = 12.77/132.99 = 0.096 \left[1/h\right]$$

Dai dati del 507 si ricava un valore di ricambio d'aria pari a:

$$\bar{A} = Q_e/V_{re} = 10.93/140.83 = 0.078 \left[1/h\right]$$

Come è possibile vedere nel caso del 505 la valutazione della Q_e risulta meno "affidabile". Abbiamo uno *Std error* di un ordine di grandezza superiore. Tuttavia entrambi i risultati sono confrontabili; questo implica che il fenomeno della stratificazione non influisce sulla valutazione delle proprietà dell'involucro, come atteso. Se avessimo utilizzato il modello deterministico per il Concentration Decay Method, con entrambi i dataset, avremmo avuto un valore di ricambio d'aria pari a:

$$\bar{A}_{CCM} = 0.005 \left[1/h\right]$$

Introducendo un errore stocastico, il valore aumenta di quasi due ordini di grandezza.

D'altra parte, i risultati ottenuti sono di un ordine di grandezza inferiore rispetto ai valori standard delle normative; due potrebbero essere le spiegazioni:

- dai metodi standard per la classificazione degli involucri edilizi si ricava una sovrastima dei ricambi d'aria;
- è stata considerata una singola stanza dell'edificio; per poter valutare l'intero edificio è necessario integrare gli altri elementi che costituiscono la costruzione; la combinazione di più elementi potrebbe inserire altri contributi alla stima dei ricambi d'aria.

Considerando la validità del modello, questo porterebbe ad una rivoluzione soprattutto nella gestione degli impianti di ventilazione per garantire una qualità

dell'aria idonea alle funzionalità e renderebbe complessa l'ottimizzazione energetica.

5 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Negli ultimi anni, la crescente attenzione per l'efficienza energetica degli edifici ed i vincoli normativi a questa connessi hanno portato ad un notevole aumento della sensibilità verso il miglioramento delle prestazioni energetiche del sistema edificio-impianto.

In tale ambito, la permeabilità all'aria dell'involucro edilizio riveste senz'altro un ruolo non secondario, per l'influenza che esercita sia sulle dispersioni energetiche che sul comfort termico. Infatti, questa grandezza, che è strettamente connessa con il numero di ricambi d'aria e di conseguenza con il livello di qualità dell'aria interna, influisce anche sul discomfort termico da correnti d'aria.

In questo trattato si è concentrata l'attività di ricerca su quest'ultimo aspetto, con l'obiettivo di mettere a punto uno strumento di semplice applicazione per la determinazione della permeabilità globale all'aria dell'involucro edilizio, e che permetta di:

- Restituire misure di permeabilità globale
- Possibilità di applicazione senza l'interruzione del regolare uso degli ambienti in cui sono effettuate le misure
- Possibilità di applicazione a qualunque tipologia di involucro e posizione dell'ambiente

In particolare, ci si è soffermati sulla valutazione dei ricambi d'aria di un edificio, in quanto risulta essere un parametro significativo per

- *dispersioni termiche*: nel calcolo del fabbisogno termico di un edificio si tiene conto anche della dispersione termica totale per ventilazione.

Infatti, nella formula

$$\Phi_{v,t} = H_v \cdot (\theta_{int,t} - \theta_e)$$

compare il coefficiente di dispersione termica totale per ventilazione ($H_v = V \cdot \theta \cdot \rho$), funzione del volume massimo tra quello passante per infiltrazione e quello minimo richiesto per garantire le condizioni igieniche. Al

momento, il volume d'aria per infiltrazione, si ottiene solamente da formule e tabelle presenti in normativa (UNI EN ISO 12831). Difatti,

$$V_{inf,i} = 2 \cdot V_i \cdot n_{50} \cdot e_i \cdot \varepsilon_i$$

dove:

$V_{inf,i}$ = volume dello spazio riscaldato;

n_{50} = tasso orario di ventilazione risultante da una differenza di pressione di 50 Pa tra l'interno e l'esterno dell'edificio, compresi gli effetti delle prese d'aria;

e_i = coefficiente di schermatura;

ε_i = fattore di correzione per l'altezza, che tiene conto della maggiore velocità del vento all'aumentare dell'altezza dello spazio dal livello del suolo;

- *qualità dell'aria*: Negli edifici è necessario un tasso di ricambio d'aria minimo per garantire la salubrità dell'aria interna dei locali. Attualmente, i ricambi minimi vengono definiti secondo normativa come:

$$V_{min,i} = V_i \cdot n_{min}$$

dove:

V_i = volume dello spazio riscaldato;

n_{min} = tasso minimo orario di ventilazione esterna [h^{-1}];

Il tasso minimo orario di ventilazione esterna, varia in base al tipo di ambiente, come riportato nella norma UNI EN ISO 12831:

prospetto D.6 Tasso minimo di ventilazione esterna, n_{min}

Tipo di ambiente	n_{min} h ⁻¹
Ambiente abitabile (predefinito)	0,5
Cucina o bagno con finestra	1,5
Ufficio	1,0
Sala riunioni, aula scolastica	2,0

Fig. 5.1: tasso minimo di ricambio d'aria secondo la UNI EN ISO 12831

A valle di tali considerazioni, si è deciso di utilizzare la norma ASTM E741 "DETERMINATION AIR CHANGE IN A SINGLE ZONE BY MEANS OF

TRACER GAS DILUTION”, che indica tre diverse metodi standard per la misurazione del ricambio d’aria tramite l’utilizzo di gas tracciante, indicata per le misure all’interno di edifici, o in generale in posti chiusi, che hanno la caratteristiche di “singola zona”, ovvero come lo spazio, o serie di spazi, all’interno del quale la concentrazione del gas tracciante rimane costante e l’unico scambio d’aria avviene con l’esterno. In particolare, il procedimento utilizzato è stato il “Concentration Decay Test Method”, che calcola il tasso di ricambio d’aria in seguito al decadimento di un gas tracciante; il gas tracciante utilizzato è stato l’anidride carbonica, considerando gli occupanti come fonte naturale.

Il “Concentration Decay Test Method” considera un decadimento esponenziale della concentrazione interna, in assenza di fonti, fino al raggiungimento della concentrazione outdoor. Questo modello deterministico può essere esteso attraverso un approccio grey box modeling, in cui si inserisce un contributo stocastico: in questo modo si può attribuire un significato fisico ai parametri. Nel modello utilizzato, il parametro che modula il decadimento rappresenta proprio la portata d’aria dell’involucro, e di conseguenza permette di calcolare i ricambi d’aria.

Tale metodo è risultato di facile applicazione, soprattutto considerando l’attuale stato dell’arte (ex: blower door test), dal punto di vista della vastità dei campi d’applicazione, dell’invasività della strumentazione, e dei costi.

Inoltre buona approssimazione dei dati

Infine, il metodo ha evidenziato una sostanziale differenza rispetto ai valori standard imposti da normativa, costituendo una base da cui partire per la definizione di un’alternativa valida.

Concludendo, in questa architettura non sono stati inseriti degli studi relativi all’influenza della pressione dell’aria; la correlazione di tali misure con il decadimento del gas tracciante potrebbero essere una delle strade percorribili in futuro per l’estensione del modello.

APPENDICE A: Continuous time stochastic modelling in R

Pacchetto CTSM-R

La stima dei parametri del modello è stata condotta tramite l'utilizzo del software per l'analisi statistica R. Precisamente, è stato utilizzato un pacchetto specifico: **Ctsm-R**. SI tratta di una libreria che fornisce un framework attraverso cui identificare e stimare modelli stocastici in tempo continuo (*grey-box modelling*) CTSM-R permette di stimare modelli sia non lineari che non stazionari.

Struttura del Modello

La struttura generale di un modello da implementare attraverso CTSM-R è un modello nello spazio degli stati:

$$dx_t = f(x_t, u_t, t, \theta) dt + \sigma(u_t, t, \theta) dw_t$$

$$y_t = h(x_k, u_k, t_k, \theta) + e_k$$

La (1) è un'equazione differenziale stocastica a tempo continuo e dunque la descrizione fisica del sistema; la seconda equazione sono le osservazioni a tempo discreto del sistema sottostante.

Nel pacchetto CTSM-R, i parametri del modello (θ) vengono stimati attraverso il metodo della Massima Verosomigianza. La funzione di Likelihood di una serie storica è la densità di probabilità congiunta (pdf):

$$L(\theta, Y_N) = p(Y_N | \theta)$$

Dove Y_N rappresenta la serie storica delle N osservazioni.

I parametri stimati dal pacchetto CTSM-R sono quelli che rendono massimo il funzionale L, ovvero quelli che rendono massima la probabilità di Y_N , probabilità condizionata ovviamente.

La stima dei parametri, data la definizione di probabilità congiunta, è una procedura che richiede l'implementazione di un metodo di ottimizzazione. Il pacchetto CTSM-R dispone di un metodo di ottimizzazione basato sui Kalman Filters.

Implementazione codice

Di seguito viene riportato un esempio del codice di calcolo utilizzato:

```
options(replace.assign=TRUE, width=76)

## Init by deleting all variables and functions
rm(list=ls())
## Set the working directory
setwd(".")

## Use the CTSM-R package, note that first the package must be
installed, see the Installation section in the CTSM-R Userguide
library(ctsmr)

## List with global parameters
prm <- list()
## Number of threads used by CTSM-R for the estimation computations
prm$threads <- 1
## Source the scripts with functions in the "functions" folder.
Just a neat way of arranging helping functions in R
files <-
dir("C:/Users/michele.pascucci/Documents/Simulazione_Co2/functions
", full.names=TRUE)
for(i in 1:length(files)) source(files[i])

## Read the data into a data.frame
X1 <-
read.csv("C:/Users/michele.pascucci/Documents/Simulazione_Co2/Rinp
ut/Nuovi-48h/507/0507_23-26sett.csv", sep=";", header=TRUE)
X2 <-
read.csv("C:/Users/michele.pascucci/Documents/Simulazione_Co2/Rinp
ut/Nuovi-48h/505/0505_23-26sett.csv", sep=";", header=TRUE)
## X$t is now hours since start of the experiment. Create a column
in the POSIXct format for plotting etc.

X1$timedate <- asP("2016-09-23 19:00:00") + X1$t * 3600
## @knitr plotData, fig.height=5
## Plot the time series (see "functions/plotTSBeg.R" to see the
plot setup function)
plotTSBeg(2)
gridSeq1 <- seq(asP("2016-08-23"), by="hours", len=30)
##
plot(X1$timedate, X1$ppm, type="p", xlab="", ylab="ppm
Co2", yaxt="n") # Prepare plot
axis(2, pretty(scalerange(X1$ppm, 1))) # y axis
abline(v=gridSeq1, h=0, col="grey85", lty=3) # Grid
lines(X1$timedate, X1$ppm) # draw lines
```



```

plotTSXAxis(X1$timedate, format="%d-%h")

X2$timedate <- asP("2016-09-26 19:00:04") + X2$t * 3600
gridSeq2 <- seq(asP("2016-09-26"), by="hours", len=30)
##
plot(X2$timedate, X2$ppm, type="p", xlab="", ylab="ppm - Co2-507", yaxt="n") # Prepare plot
axis(2, pretty(scalerange(X2$ppm, 1))) # y axis
abline(v=gridSeq2, h=0, col="grey85", lty=3) # Grid
lines(X2$timedate, X2$ppm) # draw lines
plotTSXAxis(X2$timedate, format="%d-%h")

X <- X2
model <- ctsm$new()
## Add system equations and thereby also states
model$addSystem(dCi ~ ((Qx*(1/Vre)*(Cx-Ci))+(Qe*(1/Vre)*(Ce-Ci))*dt + exp(p11)*dwl)
model$addObs(ppm ~ Ci)
#model$addObs(ppm2 ~ C2i)
#model$addObs(ppm3 ~ C1i)
model$setVariance(ppm ~ exp(e11))
#model$addInput(Cx)

## @knitr initialValues, tidy=FALSE
## Set the initial value (for the optimization) of the value of the
state at the starting time point
model$setParameter( Ci = c(init=1204, lb=600, ub=1800) )
model$setParameter( Cx = c(init=1000, lb=600, ub=1800) )
model$setParameter( Ce = c(init=450) )
model$setParameter( Qe = c(init=30, lb=20, ub=150) )
model$setParameter( Qx = c(init=100, lb=40, ub=150) )
#model$setParameter( Vrx = c(init=80, lb=40, ub=100) )
model$setParameter( Vre = c(init=130, lb=40, ub=250) )
model$setParameter( e11 = c(init=-1, lb=-50, ub=10) )
model$setParameter( p11 = c(init=1, lb=-50, ub=10) )
#model$setParameter( p22 = c(init=1, lb=-50, ub=10) )
#model$setParameter( p12 = c(init=1, lb=-50, ub=10) )
#model$setParameter( p13 = c(init=1, lb=-50, ub=10) )
#model$setParameter( p33 = c(init=1, lb=-50, ub=10) )

## @knitr estimate, results="hide"
## Run the parameter optimization
#for(i in length(bigX))
#{fit <- model$estimate(data= bigX[i], threads = prm$threads)}
fit <- model$estimate(data= X, threads = prm$threads)

## @knitr summaryfit
## See the summary of the estimation

```

```

print(summary(fit,extended=TRUE))

## @knitr n-StepPred & simulation
## Calculate the one-step predictions of the state (i.e. the
residuals)
tmp <- predict(fit, n.ahead = 1)[[1]]
## Calculate the residuals and put them with the data in a data.frame
X

X$residuals1 <- X$ppm - tmp$output$pred
X$ppmHat <- tmp$output$pred
Sim <- simulate(fit)[[1]]
X$residuals2 <- X$ppm - Sim$output$sim
## @knitr residualsACF, fig.height=3
## Plot the auto-correlation function and cumulated periodogram in
a new window
par(mfrow=c(1,3))
## The blue lines indicates the 95 confidence interval, meaning
that if it is
## white noise, then approximately 1 out of 20 lag correlations
will be slightly outside
acf(X$residuals1, lag.max=6*12, main="Residuals ACF")
## The periodogram is the estimated energy spectrum in the signal
spec.pgram(X$residuals1, main="Raw periodogram")
## The cumulated periodogram
cpgram(X$residuals1, main="Cumulated periodogram")

## @knitr residualsplot
## Plot the time series (see "functions/plotTSBeg.R" to see the
plot setup function)
plotTSBeg(2)
gridSeq <-gridSeq2
plot(X$timeDate,X$residuals2[,1],xlab="yTi
(\\circ)C",ylab="",type="n")
abline(v=gridSeq,h=0,col="grey92")
lines(X$timeDate,X$residuals2[,1])
##
plot(X$timeDate,X$ppm,type="n",xlab="",ylab="ppmHat, ppmSim(ppm)")
abline(v=gridSeq,h=0,col="grey85",lty=3)
#lines(X$timeDate,X$ppm,col=1)
lines(X$timeDate,X$ppmHat[,1],col=2)
lines(X$timeDate,Sim$output$sim[,1],col="blue",lty=2)
legend("bottomright",c("Measured","Predicted","Simulated"),lty=1,co
l=c(1,2,"blue"),bg="grey95",ncol=3,y.intersp=0,x.intersp=0.85,
cex=1)
##

```

APPENDICE B: COZIR™ Ultra Low Power Carbon Dioxide Sensor – Caratteristiche tecniche

Il sensore COZIR™ utilizza la tecnologia a infrarossi NDIR per misurare la concentrazione di anidride carbonica nell'ambiente o all'interno di miscele di gas. Tale tecnologia permette, tramite una sorgente a infrarossi, di generare un fascio che attraversa la miscela da analizzare; durante il percorso la presenza di CO₂ attenua il fascio a determinate frequenze e tale attenuazione dipende dalla concentrazione del gas.

Di seguito le caratteristiche tecniche del sensore:

General Performance	
Warm-up Time	< 10s. 1.2 secs to first reading.
Operating Conditions	0°C to 50°C (Standard) -25°C to 55°C (Extended range) 0 to 95% RH, non-condensing
Recommended Storage	-30°C to +70°C
CO₂ Measurement	
Sensing Method	Non-dispersive infrared (NDIR) absorption Patented Gold-plated optics Patented Solid-state source and detector
Sample Method	Diffusion
Measurement Range	0-2000ppm, 0-5000ppm, 0-1%
Accuracy	±50 ppm +/- 3% of reading
Calibration	Autocalibration
Non Linearity	< 1% of FS
Pressure Dependence	0.13% of reading per mm Hg in normal atmospheric conditions.
Operating Pressure Range	950 mbar to 1050 mbar
Response Time	30 secs to 3 mins (Configurable via filter type and application) Reading refreshed twice per second.

Bibliografia

- Fanger P.O., 1988, Introduction of the olf and the decipol units to quantify air pollution perceived by humans indoors and outdoors, *Energy and Buildings*, n. 12, pp. 1-6.
- Fanger P.O., Lauridsen J., Bluyssen P. and Clausen G., 1988, Air pollution sources in offices and assembly halls, quantified by the olf unit, *Energy and Buildings*, n. 12, pp. 7-19.
- EEC, 1992, Guidelines for Ventilation Requirements in Buildings, European Concerted Action: Indoor Air Quality and its impact on man (COST Project 613), Report n. 11, Commission of the European Communities, Luxembourg.
- Raisa, Valentina, Schiavon, Stefano e Zecchin, Roberto, *Teoria e tecnica della ventilazione*. Milano: Editoriale Delfino, 2010.
- WHO EUROPE 2009. Dampness and moulds. Copenhagen : World Health Organization.
- Fracastoro G.V., 1991, La ventilazione controllata, *Il Condizionamento dell'aria*, n. 12, dicembre 1991, pp. 1631-1635.
- Brandimarti, V. 2013. Tesi di Laurea in Ingegneria Edile-Architettura, Università di Bologna. Diagnosi e riqualificazione energetica nell'edilizia economico-popolare: il caso di studio di un edificio del quartiere PEEP di Corticella. 2013.
- Alberti M., Berrini M., Dovera D., Melone A., Zambrini M., 1994, *Strumenti per la valutazione di impatto ambientale degli edifici*, CNR, Progetto Finalizzato Edilizia, Ed. BEMA.
- Kronvall J. Testing of houses for air leakage using a pressure method. *ASHRAE Transactions*, 84(1), 72–9, 1978.
- Sherman M. Estimation of Infiltration for Leakage and Climate Indicators. *Energy and Building*, 10, 81, 1987.

- Dubrul C. Inhabitants behaviour with respect to ventilation. Technical Note 23. Sint-Stevens-Woluwe: Air Infiltration and Ventilation Centre, 1988.
- Di Camillo F., La ventilazione in ambito residenziale: aspetti tecnico - normativi ed applicazione ad un caso di studio, Tesi di Laurea in Ingegneria Edile-Architettura, a.a. 2012/13.
- ASTM E741- 00 (Reapproved 2006), Standard test method for determining air change in a single zone by means of a tracer gas dilution.
- Laussmann D., Helm D., Air Change Measurements Using Tracer Gases, INTECH Open Access Publisher, 2011
- Meloni C. e Grassi C., 1990, *Inquinamento indoor e patologia respiratoria*, Il Condizionamento dell'aria, luglio 1990.
- Santarsiero A., Musmeci L., Ricci A., Corasaniti S., Coppa P., Bovesecchi G., Merluzzi R., Fuselli S., 2015, Parametri microclimatici ed inquinamento indoor, Serie Rapporti ISTISAN 15|25.
- G. Badino – The legend of carbon dioxide heaviness. Journal of Cave and Karst Studies, v. 71, no. 1, p. 100–107, aprile 2009.
- D'Ambrosio F.R., Dell'Isola M., Palmiero M., Pica A., Misura della permeabilità all'aria degli edifici residenziali, Conference Paper: 64° Congresso Nazionale ATI, At L'Aquila, Italy, Volume: I, Settembre 2009.
- W.J. Fisk, A.T. De Almeida, Sensor-based demand-controlled ventilation: a review, Energy and Buildings 29, 35-45, 1998.
- Bouchane S., Energy auditing and saving for a four floor building, Student thesis of Faculty of Engineering and sustainable development, department of building, energy and environmental engineering, 2015.
- R. Becker et al., Improving energy performance of school buildings while ensuring indoor air quality ventilation, Building and Environment 42, 3261–3276, 2007.
- Clito A., Tracer gas technique for measurement of air infiltration and natural ventilation: case studies and new devices for measurement of mechanical

air ventilation in ducts, *International Journal of Low-Carbon Technologies* 2015, 10, 188–204.

- D. Barbieri, M. Pietrafesa, G. Rizzo, *Qualità dell'aria interna e requisiti di ventilazione: classificazione degli inquinanti, riferimenti normativi, metodi di calcolo*, Università degli studi di Reggio Calabria, istituto di Ingegneria Civile ed Energetica, Quaderni di fisica tecnica ed energetica, 1996.
- L. Pagliano, M. Pietrobon, P. Zangheri, *Definizione degli indici e livelli di fabbisogno dei vari centri di consumo energetico degli edifici adibiti a uffici - usi termici - analisi del potenziale di risparmio energetico*, Report Ricerca Sistema Elettrico, Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA, marzo 2009.

Quest'opera è rilasciata nei termini della licenza

Attribuzione - Non commerciale - Condividi allo stesso modo 4.0 Internazionale
il cui testo è disponibile al sito <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>.