



Ricerca di Sistema elettrico

Misure di qualità dell'aria esterna ed interna in un edificio ad elevate prestazioni adibito ad uffici di proprietà della PA per la ottimizzazione delle portate di aria di ricambio finalizzate all'efficienza energetica

F. Mancini, C. Romeo, A. S. Sferra, F. Nardecchia,
U. Di Matteo, C. Romeo

MISURE DI QUALITÀ DELL'ARIA ESTERNA ED INTERNA IN UN EDIFICIO AD ELEVATE PRESTAZIONI ADIBITO AD UFFICI DI PROPRIETÀ DELLA PA PER LA OTTIMIZZAZIONE DELLE PORTATE DI ARIA DI RICAMBIO FINALIZZATE ALL'EFFICIENZA ENERGETICA

F. Mancini, C. Romeo, A. S. Sferra, F. Nardecchia, U. Di Matteo (Sapienza Università di Roma, Dipartimento di Pianificazione, Design, Tecnologia dell'Architettura)
C. Romeo (ENEA)

Settembre 2017

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

Area D: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Tema di Ricerca: Edifici a energia quasi zero (nZEB)

Progetto D.2.1: Studi sulla riqualificazione energetica del parco esistente di edifici pubblici (scuole, ospedali, uffici della PA centrale e locale) mirata a conseguire il raggiungimento della definizione di edifici a energia quasi zero (nZEB)

Obiettivo d.1: Misure di qualità dell'aria esterna ed interna in un edificio ad elevate prestazioni adibito ad uffici"

Responsabile del Progetto: ing. Luciano Terrinoni, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione ""Misure di qualità dell'aria esterna ed interna in un edificio ad elevate prestazioni adibito ad uffici di proprietà della PA per la ottimizzazione delle portate di aria di ricambio finalizzate all'efficienza energetica""

Responsabile scientifico ENEA: Arch. Carlo Romeo

Responsabile scientifico DPDTA (Sapienza): Prof. Francesco Mancini

Indice

1	SOMMARIO	5
2	INTRODUZIONE	6
3	FABBISOGNI ENERGETICI ED EDIFICI NZEB	7
3.1	GENERALITÀ	7
3.2	FABBISOGNI ENERGETICI PER LA VENTILAZIONE	7
3.3	EDIFICI A ENERGIA QUASI ZERO (NZEB)	10
3.4	AUTOMAZIONE NEGLI EDIFICI NON RESIDENZIALI	11
3.5	CONSIDERAZIONI DI RIEPILOGO	12
4	IAQ: SALUTE E COMFORT	14
4.1	GENERALITÀ	14
4.2	DEFINIZIONE DI QUALITÀ DELL'ARIA ACCETTABILE	16
4.3	ESPOSIZIONE A GRANDI COMPOSTI ORGANICI VOLATILI E CARBONILI NEGLI AMBIENTI INTERNI EUROPEI	16
4.4	INDOOR AIR QUALITY - RIFERIMENTI NORMATIVI	23
4.4.1	<i>Situazione internazionale</i>	23
4.4.2	<i>Situazione americana: il ruolo dell'ASHRAE</i>	24
4.4.3	<i>Situazione comunitaria</i>	25
4.4.4	<i>Situazione italiana</i>	26
4.5	INDICATORE PER LA QUALITÀ DELL'ARIA INTERNA	29
4.6	CONSIDERAZIONI DI RIEPILOGO	30
5	UNA STRATEGIA DI VENTILAZIONE PER RIDURRE I COSTI LEGATI ALLA IAQ	31
5.1	PREMESSA	31
5.2	I COSTI LEGATI ALLA IAQ	31
5.3	OTTIMIZZAZIONE DELLE PORTATE DI ARIA DI RICAMBIO FINALIZZATA ALL'EFFICIENZA ENERGETICA	32
6	GLI INQUINANTI INDOOR	34
6.1	SCELTA DEGLI INQUINANTI DA MISURARE	34
6.2	PROTOCOLLO DI MISURA	34
6.3	POSIZIONAMENTO DELLA STRUMENTAZIONE DI PRELIEVO	35
6.4	MISURE CONTEMPORANEE IN ARIA AMBIENTE OUTDOOR	35
6.5	STRUMENTI DI MISURA	36
6.5.1	<i>BABUC / E Multi-indicatore portatile per la misura di grandezze ambientali</i>	36
6.5.2	<i>Misuratore gas AQ-200</i>	36
6.5.3	<i>Misuratore PM₁₀</i>	37
6.5.4	<i>Strumento multifunzione Testo 435-2</i>	37
7	PROPOSTA DI UN ALGORITMO COMPLESSIVO DI VALUTAZIONE DEI PARAMETRI INDOOR E OUTDOOR, CON L'OBIETTIVO DI ARRIVARE AD UN INDICE NUMERICO DI SINTESI DEL LIVELLO DI QUALITÀ DELL'ARIA	38
7.1	GENERALITÀ	38
7.2	INDICE DI QUALITÀ DELL'ARIA INDOOR (IQAI)	39
7.3	LE CLASSI DELL'INDICE DI QUALITÀ DELL'ARIA INDOOR	40
8	CAMPAGNA DI MONITORAGGIO E SIMULAZIONE ENERGETICA	43
8.1	IL CASO STUDIO: IL PALAZZO EX BANCO NAPOLI DELLA CAMERA DEI DEPUTATI	43
8.2	CAMPAGNA DI MONITORAGGIO	47
8.2.1	<i>Misurazione delle grandezze termo-igrometriche</i>	48
8.2.2	<i>Misurazione delle concentrazioni degli inquinanti</i>	51
8.2.3	<i>Calcolo dell'indice IQAI</i>	57

8.3	SIMULAZIONE ENERGETICA	60
8.3.1	<i>Modellazione dello stato di fatto</i>	60
8.3.2	<i>Analisi energetica dello stato di fatto</i>	65
8.3.2.1	Distribuzione dell'energia termica	65
8.3.2.2	Generazione dell'energia termica	68
8.3.3	<i>Analisi energetica al variare della portata d'aria dell'UTA</i>	69
8.4	CONSIDERAZIONI DI RIEPILOGO	76
9	CONCLUSIONI	77
10	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	78
	APPENDICE: CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO IMPEGNATO NELL'ATTIVITÀ	80

1 Sommario

La riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente è uno dei pilastri su cui si basa la politica energetica del nostro Paese. Larga parte del patrimonio edilizio è stata infatti costruita senza prendere in considerazione il problema dei consumi energetici e si presenta oggi come decisamente più energivora rispetto alle nuove costruzioni.

Con l'obiettivo dell'efficienza energetica e del risparmio di energia negli usi finali elettrici, si hanno ampie e diversificate possibilità di miglioramento, che includono interventi sull'involucro edilizio e sui sistemi impiantistici, con introduzione, ove possibile, di fonti rinnovabili di energia.

In questo ambito si inserisce il tema della riqualificazione energetica del parco esistente di edifici pubblici volta al raggiungimento di una prestazione in linea con quella degli edifici a energia quasi zero (nZEB).

In questo lavoro viene affrontato il problema della qualità ambientale indoor degli edifici nZEB, con particolare attenzione all'aspetto della Indoor Air Quality.

Il lavoro ha visto l'individuazione di un caso-studio rappresentativo della tipologia di edifici di pregio storico e architettonico (sottoposti a vincolo di tutela) adibito ad uso uffici della Pubblica Amministrazione sito in fascia climatica D, che possa essere considerato un edificio ad elevate prestazioni energetiche.

E' stata effettuata una doppia campagna di monitoraggio della qualità dell'aria attraverso la definizione di un protocollo di misura, con campionamento di una serie di inquinanti ritenuti rappresentativi e con predisposizione di un algoritmo per la valutazione numerica di sintesi del livello di qualità dell'aria.

Tale campagna di monitoraggio ha consentito di valutare le variazioni, in termini di qualità dell'aria, conseguenti ad una variazione della portata di aria esterna elaborata dalle unità di trattamento aria.

Parallelamente sono state effettuate delle simulazioni energetiche in regime dinamico, con l'obiettivo di valutare il risparmio energetico conseguente alla riduzione della portata d'aria.

I risultati ottenuti per il caso studio mostrano la possibilità di raggiungere anche significativi risparmi energetici, con lievi variazioni alla qualità dell'aria, soprattutto in una situazione in cui la qualità dell'aria esterna non risulti alta.

The energy requalification of the existing building heritage is one of the pillars of our country energy policy . A large part of the building heritage has been built with no awareness of energy consumption issues and so the old building have critical levels of energy efficiency performance in comparison with the new ones. Aiming to energy efficiency and energy saving in electrical end uses, there are wide and diversified improvement strategies, which include interventions on the building envelope and HVAC systems, with the introduction, where possible, of renewable energy sources . This topic includes the energy redevelopment of the existing public buildings park aimed at achieving a performance as close as possible to almost zero-energy buildings (nZEB). In this work the problem of indoor environmental quality of nZEB buildings is addressed, with particular attention to the appearance of Indoor Air Quality. A representative case-study of a kind of buildings of historical and architectural value (subject to protection constraints) is pointed out; this building is used as offices of the Public Administration located in the climatic band D and it can be evaluated as a high performance energy building. An air quality monitoring campaign was carried out twice, after the definition of a measurement protocol, sampling of a series of pollutants and using an algorithm for the numerical evaluation of the IAQ. This monitoring campaign made it possible to evaluate IAQ trend, resulting from a variation in the external air flow of the air handling units. At the same time, dynamic simulations were carried out, with the aim of evaluate the energy savings coming from the reduction in air flow. The results coming from case study show the possibility of achieving also significant energy savings, with slight variations in air quality, especially in a situation where the quality of the outside air is poor.

2 Introduzione

Il Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA hanno stipulato in data 21 aprile 2016 un Accordo di Programma in base al quale è concesso il contributo finanziario per l'esecuzione delle linee di attività del Piano Triennale 2015-2017 della Ricerca e Sviluppo di Interesse Generale per il Sistema Elettrico Nazionale.

Il presente lavoro si riferisce al Piano Annuale di Realizzazione 2016, per quanto attiene all'Area D "Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici", tema di ricerca "D.2 Edifici a energia quasi zero (nZEB)", progetto D.2.1 "Studi sulla riqualificazione energetica del parco esistente di edifici pubblici (scuole, ospedali, uffici della PA centrale e locale) mirata a conseguire il raggiungimento della definizione di edifici a energia quasi zero (nZEB)", obiettivo "La qualità ambientale indoor degli edifici nZEB".

Il tema sviluppato nell'ambito del presente accordo di collaborazione tra ENEA e Dipartimento di Pianificazione Design Tecnologia dell'Architettura – PDTA - dell'Università di Roma Sapienza riguarda il monitoraggio della qualità dell'aria interna in un edificio ad elevate prestazioni adibito ad uffici di proprietà della Pubblica Amministrazione per la ottimizzazione delle portate di aria di ricambio finalizzata all'efficienza energetica.

3 Fabbisogni energetici ed edifici nZEB

3.1 Generalità

Il fabbisogno complessivo di energia primaria di un edificio è dato dalla somma di tutti i fabbisogni di energia primaria connessi all'uso ed all'occupazione dell'edificio stesso e comprende il fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione invernale, per la climatizzazione estiva, per la ventilazione, per la produzione di acqua calda sanitaria, per l'illuminazione artificiale degli ambienti, per il trasporto di persone e cose (impianti ascensori, marciapiedi e scale mobili), per la cottura dei cibi, per altri usi elettrici.

In Italia, circa il 40% dei consumi energetici complessivi sono attribuibili al comparto dell'edilizia civile (residenziale e terziario), il quale non è, certamente, un esempio di uso efficiente dell'energia. Gran parte degli edifici è stata infatti costruita prescindendo da considerazioni di tipo energetico, in conseguenza di una scarsa sensibilità al problema, che ha iniziato a diventare evidente solo a partire dalla seconda metà degli anni settanta del secolo scorso.

Da quella data la sensibilità al problema del consumo di energia e delle emissioni inquinanti è andata crescendo ed anche a livello legislativo sono stati emanati una serie di provvedimenti, il cui principale obiettivo è la limitazione dei consumi energetici.

Nel campo edilizio, il provvedimento di riferimento è il D.Lgs.192/05, successivamente modificato e integrato da numerosi decreti attuativi. Tale decreto riporta le limitazioni previste ai fabbisogni di energia primaria degli edifici e, in virtù delle limitazioni poste, orienta le nuove costruzioni e le ristrutturazioni edilizie ad un uso dell'energia decisamente più efficiente di quanto avvenuto nel passato. Successivamente alla emanazione del decreto, sono state pubblicate le normative che riportano le modalità di calcolo per la prestazione energetica degli edifici.

A livello procedurale, focalizzando l'attenzione solo sui consumi per la climatizzazione invernale e per la climatizzazione estiva, il calcolo della prestazione energetica di un edificio prevede i seguenti passi:

- calcolo del fabbisogno di energia utile per il riscaldamento ed il raffrescamento;
- calcolo del rendimento e del fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione invernale;
- calcolo del rendimento e del fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione estiva;
- verifica del rispetto delle limitazioni previste dalla legislazione vigente.

Il calcolo dei fabbisogni può essere eseguito con differenti algoritmi e metodologie, a seconda dei dati disponibili e della precisione richiesta. Appare evidente che, al crescere della complessità dell'algoritmo, l'approssimazione dei risultati migliora. La legislazione vigente [1] prevede per il calcolo della prestazione energetica negli edifici, ivi incluso l'utilizzo delle fonti rinnovabili, l'utilizzo del pacchetto di Norme UNI/TS 11300, con l'aggiunta della raccomandazione CTI 14/2013 e della UNI EN 15193 [2][3][4][5][6][7].

3.2 Fabbisogni energetici per la ventilazione

Il calcolo dei fabbisogni energetici per la ventilazione dell'edificio è ricompreso all'interno del calcolo dell'energia per la climatizzazione invernale e estiva e prevede come primo passo il calcolo del fabbisogno di energia utile e come passi successivi il calcolo dei rendimenti degli impianti e del fabbisogno di energia primaria.

Non essendo l'obiettivo di questo lavoro la valutazione del rendimento degli impianti di ventilazione (intesi come insieme dei sottosistemi di produzione, distribuzione, regolazione ed emissione dedicati alla ventilazione), conviene focalizzare l'attenzione solo sui fabbisogni di energia utile per la ventilazione.

Riprendendo la formulazione della norma UNI TS 11300-1, i fabbisogni di energia utile per il riscaldamento ed il raffrescamento dell'edificio sono calcolati su base stagionale e sono il risultato di un bilancio energetico che tiene in considerazione l'energia scambiata con l'ambiente esterno per trasmissione

attraverso l'involucro edilizio, l'energia scambiata con l'ambiente esterno per ventilazione attraverso l'involucro edilizio, gli apporti termici dovuti a sorgenti interne all'edificio, gli apporti termici solari.

$$Q_{H,nd} = Q_{H,ht} - \eta_{H,gn} \cdot Q_{H,gn} = (Q_{H,tr} + Q_{H,ve}) - \eta_{H,gn} \cdot (Q_{H,int} + Q_{H,sol}) \quad (3.1)$$

$$Q_{C,nd} = Q_{C,gn} - \eta_{C,ls} \cdot Q_{C,ht} = (Q_{C,int} + Q_{C,sol}) - \eta_{C,ls} \cdot (Q_{C,tr} + Q_{C,ve}) \quad (3.2)$$

dove:

- $Q_{H,nd}$ e $Q_{C,nd}$ sono rispettivamente il fabbisogno utile di energia dell'edificio per riscaldamento e per il raffrescamento [kWh];
- $Q_{H,ht}$ e $Q_{C,ht}$ sono rispettivamente lo scambio di energia termica totale nel caso di riscaldamento e nel caso di raffrescamento [kWh];
- $Q_{H,gn}$ e $Q_{C,gn}$ sono gli apporti totali di energia termica nel caso di riscaldamento e nel caso di raffrescamento [kWh];
- $Q_{H,tr}$ e $Q_{C,tr}$ sono gli scambi termici per trasmissione;
- $Q_{H,ve}$ e $Q_{C,ve}$ sono gli scambi termici per ventilazione [kWh];
- $Q_{H,int}$ e $Q_{C,int}$ sono gli apporti termici interni [kWh];
- $Q_{H,sol}$ e $Q_{C,sol}$ sono gli apporti termici solari [kWh];
- $\eta_{H,gn}$ e $\eta_{C,ls}$ sono i fattori di utilizzazione degli apporti termici e delle dispersioni termiche [-].

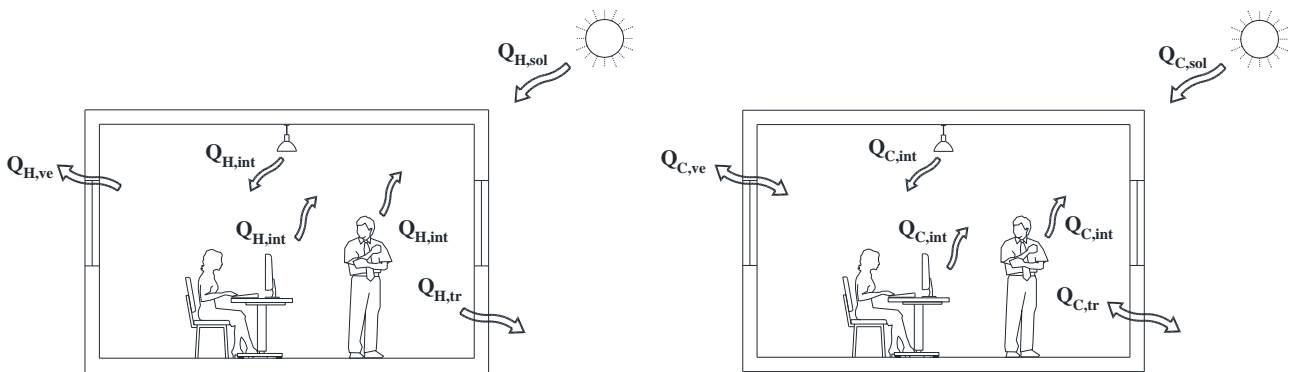


Figura 3.1 – Schematizzazione del bilancio energetico della stagione invernale finalizzato al calcolo del fabbisogno utile di energia per riscaldamento (a sinistra) e per raffrescamento (a destra).

Nel caso di edifici dotati di impianti di ventilazione meccanica e di unità di trattamento dell'aria, considerando anche gli apporti di calore latente, lo scambio di energia per ventilazione può essere scritto come:

$$Q_{H,C,ve} = \int_0^T \rho \cdot q_{ve}(t) \cdot |h_i(t) - h_e(t)| \cdot dt \quad (3.3)$$

dove:

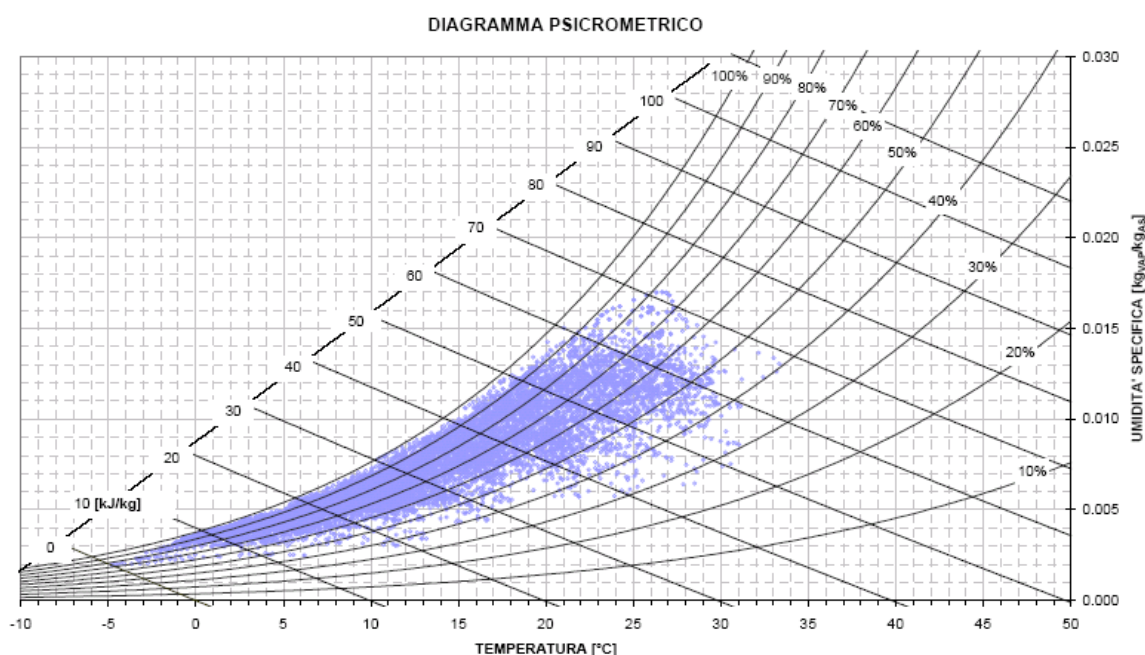
- ρ è la massa volumica dell'aria;
- q_{ve} è la portata in volume di ventilazione;
- h_i e h_e sono l'entalpia dell'aria umida alle condizioni di immissione e dell'ambiente esterno;
- T è il periodo di funzionamento dell'impianto.

Lo scambio di energia per ventilazione, dipende quindi dalla portata di ventilazione, dalle condizioni termoisometriche dell'aria esterna della località che si sta considerando e dalle condizioni termoisometriche (di comfort) che si vogliono raggiungere per l'ambiente interno.

La portata di ventilazione da utilizzare nell'equazione (3.3) si calcola a partire dai valori della portata di ventilazione necessari per garantire le condizioni di qualità dell'aria in ambiente, indipendentemente dal tipo di ventilazione adottata (naturale o meccanica). A tale scopo si fa riferimento alla UNI 10339 [8]; in particolare si utilizza come dato di ingresso la "portata minima di progetto di aria esterna", funzione della destinazione d'uso dell'edificio o zona considerata.

Le condizioni termoisometriche dell'aria esterna dipendono dalla stagione e dalla località che si sta considerando; nel periodo di riscaldamento invernale l'aria esterna è, in generale, più fredda e più secca rispetto alla condizione di comfort interna, mentre nel periodo estivo, l'aria è, in generale, più calda e più umida rispetto alla condizione interna di comfort.

La Figura 3.2 riporta i dati climatici per l'anno tipo, per i capoluoghi di provincia, per ogni ora dell'anno sul diagramma psicrometrico [9] [10]. Dall'esame della figura si può immediatamente notare come esista una grande dispersione dei dati e come, di conseguenza, vari in maniera anche sostanziale l'entalpia specifica dell'aria esterna, passando da una condizione all'altra.



Le condizioni termoisometriche dell'ambiente interno dipendono dalla destinazione d'uso e risultano in generale poco variabili al variare della destinazione d'uso stessa.

In merito alle variabili che influenzano lo scambio di energia per ventilazione, ai fini di questo studio, sarà focalizzata l'attenzione solo sulla portata di ventilazione, ricordando che al crescere della portata di ventilazione crescono proporzionalmente i fabbisogni di energia utile per la ventilazione.

Non sarà presa in considerazione l'influenza sullo scambio di energia per ventilazione delle variabili climatiche relative all'ambiente esterno, avendo più che altro implicazioni riguardanti la strategia di ventilazione (naturale, meccanica, ibrida) o l'opportunità di installare recuperatori di calore, e delle variabili climatiche legate all'ambiente interno, legate alla condizione di comfort che si vuole raggiungere, con l'ovvia considerazione che più la condizione di comfort interna si avvicina alle condizioni dell'aria esterna, minori saranno gli scambi di energia per ventilazione.

3.3 Edifici a energia quasi zero (nZEB)

Con il termine *Edifici ad Energia Quasi Zero (nearly Zero Energy Buildings, nZEB)* si vuole indicare generalmente una categoria di edifici ad elevatissima prestazione energetica, caratterizzati da un fabbisogno energetico annuo molto basso o quasi nullo, coperto interamente, o in misura molto significativa, da fonte rinnovabile in loco.

La dicitura *energia zero* fa quindi riferimento al fatto che tali edifici non debbano ricorrere all'utilizzo di combustibili fossili o all'energia elettrica proveniente dalla rete, per far fronte ai loro bisogni energetici, caratterizzandosi, pertanto, per un consumo di energia primaria non rinnovabile pari a zero.

Poiché gli edifici sono normalmente allacciati alle reti esterne di fornitura dell'energia (gas, elettricità) e in considerazione della natura discontinua delle fonti rinnovabili, ciò che è pari a zero non è in realtà il consumo di energia primaria non rinnovabile, ma il bilancio tra l'energia prelevata e quella autoprodotta, consumata direttamente o immessa in rete.

Ai sensi del D.M. 26 giugno 2015, sono *edifici a energia quasi zero (nZEB)* tutti gli edifici, siano essi di nuova costruzione o esistenti, per cui sono contemporaneamente rispettati:

- tutti i requisiti previsti per le nuove costruzioni (con i valori vigenti dal 1/1/2019 per gli edifici pubblici e dal 1/1/2021 per tutti gli altri edifici);
- gli obblighi di integrazione delle fonti rinnovabili nel rispetto del D.Lgs.28/2011.

La costruzione di nZEB è argomento di estrema attualità.

La comunità Europea ha adottato il 29 luglio 2016 la Raccomandazione R-UE 2016/2018 con l'obiettivo di promuovere la realizzazione di nZEB, indicando chiaramente che entro il 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione dovranno essere nZEB.

La raccomandazione traccia i principi e gli elementi generali da prendere in considerazione ed evidenzia che il livello di prestazione a energia quasi zero per gli edifici di nuova costruzione deve essere superiore a quello ottimale in funzione dei costi per il 2021.

La raccomandazione, in base ai dati ricevuti dai singoli Stati membri sul livello ottimale in funzione dei costi, riporta dei valori di riferimento della prestazione energetica degli edifici a energia quasi zero, in base alle proiezioni dei prezzi e delle tecnologie al 2020, per le diverse aree climatiche dell'Unione Europea.

La Commissione, infine, raccomanda agli Stati membri di sostenere la trasformazione degli edifici esistenti in edifici a energia quasi zero, anche fornendo agli investitori pacchetti strategici che offrano loro la necessaria garanzia di stabilità a lungo termine in materia di edifici efficienti, compresa la ristrutturazione in profondità degli edifici per trasformarli in edifici a energia quasi zero, e di raccogliere dati affidabili per controllare l'impatto delle politiche adottate.

La realizzazione di edifici nZEB e la trasformazione degli edifici esistenti in edifici a energia quasi zero troveranno attuazione grazie ad un deciso miglioramento delle prestazioni passive dell'involucro edilizio, ad un deciso miglioramento dell'efficienza degli impianti e all'introduzione di fonti rinnovabili di energia nel bilancio energetico dell'edificio.

A seguito di tali tendenze, probabilmente, i fabbisogni di energia utile per la ventilazione rimarranno pressoché inalterati, dipendendo dalle condizioni climatiche e dalla portata d'aria di ventilazione, imposta nei suoi valori minimi dalla normativa. In questa maniera, verranno ad acquisire un peso relativo maggiore rispetto a quanto avviene oggi, diventando nel caso di ambienti affollati probabilmente il maggior fabbisogno.

3.4 Automazione negli edifici non residenziali

Per valutare i risparmi energetici connessi all'impiego di sistemi di automazione e controllo degli edifici si può fare riferimento alla norma UNI EN15232 [11]; tale norma riporta le modalità di calcolo di sistemi aventi la funzione di massimizzare l'efficienza energetica degli impianti tecnici in relazione alle condizioni ambientali esterne e ai differenti profili di utilizzo e occupazione dei singoli ambienti dell'edificio, comportando una riduzione dei consumi energetici e fornendo nel contempo i massimi livelli di comfort, sicurezza e qualità. Gli impianti considerati sono quelli di riscaldamento, di preparazione acqua calda sanitaria, di raffrescamento, di ventilazione e condizionamento, di illuminazione, di controllo delle schermature solari, di gestione tecnica dell'edificio. La norma introduce una classificazione in 4 classi di efficienza energetica delle funzioni di controllo degli impianti tecnici degli edifici, così come riportato in Tabella 3.1.

Tabella 3.1 – Classificazione dei sistemi di automazione secondo UNI EN15232.

Classe D NON ENERGY EFFICIENT	Comprende gli impianti tecnici tradizionali e privi di automazione e controllo, non efficienti dal punto di vista energetico
Classe C STANDARD	Corrisponde agli impianti dotati di sistemi di automazione e controllo degli edifici (BACS) "tradizionali", eventualmente dotati di BUS di comunicazione, comunque a livelli prestazionali minimi rispetto alle loro reali potenzialità
Classe B ADVANCED	Comprende gli impianti dotati di un sistema di automazione e controllo (BACS) avanzato e dotati anche di alcune funzioni di gestione degli impianti tecnici di edificio (TBM) specifiche per una gestione centralizzata e coordinata dei singoli impianti
Classe A HIGH ENERGY PERFORMANCE	Corrisponde a sistemi BAC e TBM "ad alte prestazioni energetiche" cioè con livelli di precisione e completezza del controllo automatico tali da garantire elevate prestazioni energetiche all'impianto
BACS: "Building Automation and Control Systems" – Sistemi di automazione e controllo degli edifici TBM: "Technical Home and Building Management" - Gestione tecnica dell'edificio.	

La classe C è considerata dal normatore la classe di riferimento, sebbene gli edifici esistenti, nei quali pochissime funzioni risultano automatizzate, si possano considerare mediamente in Classe D. Per stimare l'impatto dei sistemi di automazione e controllo sulle prestazioni energetiche degli edifici può essere impiegato il metodo semplificato, detto anche metodo dei fattori BAC; questo metodo si basa su una procedura tabellare che permette una stima rapida dell'impatto delle funzioni BAC e TBM sui consumi energetici degli impianti tecnici dell'edificio. In Tabella 3.2, Tabella 3.3 e Tabella 3.4 sono riportati i fattori BAC (per l'energia termica e elettrica) e le relative stime di risparmio energetico in percentuale, ottenibile passando da una classe di efficienza energetica attiva (A, B, C o D) all'altra.

Tabella 3.2 – Energia termica in edifici non residenziali.

Tipologia Edificio/locale	Classi e fattori di efficienza BAC				Risparmio (rif. Classe D)			Risparmio (rif. Classe C)	
	D	C (rif.)	B	A	C/D	B/D	A/D	B/C	A/C
	Senza automazione	Automazione standard	Automazione avanzata	Alta efficienza					
Uffici	1,51	1,00	0,80	0,70	34%	47%	54%	20%	30%
Sale conferenze	1,24	1,00	0,75	0,50	19%	40%	60%	25%	50%
Scuole	1,20	1,00	0,88	0,80	17%	27%	33%	12%	20%
Ospedali	1,31	1,00	0,91	0,86	24%	31%	34%	9%	14%
Hotel	1,31	1,00	0,85	0,68	24%	35%	48%	15%	32%
Ristoranti	1,23	1,00	0,77	0,68	19%	37%	45%	23%	32%
Negozi / Grossisti	1,56	1,00	0,73	0,60	36%	53%	62%	27%	40%

Tabella 3.3 – Energia elettrica in edifici non residenziali.

Tipologia Edificio/locale	Classi e fattori di efficienza BAC				Risparmio (rif. Classe D)			Risparmio (rif. Classe C)	
	D	C (rif.)	B	A	C/D	B/D	A/D	B/C	A/C
	Senza automazione	Automazione standard	Automazione avanzata	Alta efficienza					
Uffici	1,10	1,00	0,93	0,87	9%	15%	21%	7%	13%
Sale conferenze	1,06	1,00	0,94	0,89	6%	11%	16%	6%	11%
Scuole	1,07	1,00	0,93	0,86	7%	13%	20%	7%	14%
Ospedali	1,05	1,00	0,98	0,96	5%	7%	9%	2%	4%
Hotel	1,07	1,00	0,95	0,90	7%	11%	16%	5%	10%
Ristoranti	1,04	1,00	0,96	0,92	4%	8%	12%	4%	8%
Negozi / Grossisti	1,08	1,00	0,95	0,91	7%	12%	16%	5%	9%

Tabella 3.4 – Energia per acqua calda sanitaria in edifici non residenziali.

Tipologia Edificio/locale	Classi e fattori di efficienza BAC				Risparmio (rif. Classe D)			Risparmio (rif. Classe C)	
	D	C (rif.)	B	A	C/D	B/D	A/D	B/C	A/C
	Senza automazione	Automazione standard	Automazione avanzata	Alta efficienza					
Uffici, Sale conferenze, Scuole	1,11	1,00	0,9	0,8	10%	19%	28%	10%	20%
Ospedali									
Hotel									
Ristoranti									
Negozi / Grossisti									

L'introduzione di sistemi di automazione può quindi consentire importanti risparmi energetici, con riduzioni diversificate in base agli impieghi e alle destinazioni d'uso.

I fabbisogni di energia per ventilazione rientrano tra i fabbisogni di energia termica; i risparmi energetici conseguibili sono alti e dipendono dalla condizione di partenza, potendo superare il 50% in quegli edifici in cui non sia inizialmente presente nessun sistema di automazione.

3.5 Considerazioni di riepilogo

L'obiettivo di questo studio è la valutazione della qualità ambientale di un edificio riqualificato con l'obiettivo di raggiungere la qualificazione di edificio nZEB, con particolare attenzione al tema della qualità dell'aria.

Con questa finalità si è posta l'attenzione sui consumi energetici legati alla ventilazione, ricompresi all'interno dei consumi energetici per riscaldamento e per raffrescamento, e dipendenti dalle portate di ventilazione e dalla differenza di entalpia tra l'aria esterna e l'aria interna; si è anche osservato che, probabilmente, a seguito di un intervento di riqualificazione energetica i fabbisogni energetici per ventilazione potranno assumere un'importanza relativa maggiore, in ragione delle prescrizioni relative ai valori minimi di portata.

Al fine di minimizzare l'impatto dei consumi energetici per la ventilazione, sono possibili interventi sui sistemi impiantistici (per incrementarne il rendimento medio stagionale) e sul fabbisogno di energia utile, agendo sulle portate di aria di ricambio, con un controllo da effettuarsi preferibilmente attraverso un sistema di automazione, in maniera tale da massimizzare l'efficienza in relazione alle condizioni ambientali

esterne e ai differenti profili di utilizzo e occupazione dei singoli ambienti dell'edificio, fornendo nel contempo i massimi livelli di comfort, sicurezza e qualità.

4 IAQ: salute e comfort

4.1 Generalità

Lo studio di un processo finalizzato al mantenimento e al miglioramento del comfort ambientale di uno spazio confinato non può prescindere da una valutazione dei determinanti ambientali, in quanto è da tempo noto che un qualsiasi contaminante presente in un ecosistema interagisce con gli organismi viventi. In particolare, la qualità dell'aria riveste un ruolo fondamentale negli ambienti indoor in quanto essa è un determinante della salute. Secondo recenti studi epidemiologici, la salute della popolazione può essere danneggiata dall'esposizione a comuni inquinanti dell'aria anche a livelli di concentrazione molto inferiori rispetto a quanto fosse ritenuto innocuo fino a qualche anno fa.

Con il termine "*ambiente indoor*" ci si riferisce agli ambienti confinati di vita e di lavoro non industriali.

Questa espressione è stata proposta nell'Accordo Stato-Regioni del 27 settembre 2001 e comprende le abitazioni, gli uffici pubblici e privati, le strutture comunitarie (ospedali, scuole, caserme, alberghi, banche, edifici di culto, ecc.), i locali destinati ad attività ricreative e sociali (cinema, ristoranti, bar, negozi, strutture sportive, ecc.) e i mezzi di trasporto pubblico e privato (auto, treno, bus, metropolitana, aereo, nave, ecc.). In questi ambienti, secondo studi condotti nei Paesi dell'UE, la popolazione trascorre più del 90% del proprio tempo e, quindi, la qualità dell'aria rappresenta uno dei principali determinanti della salute.

In Italia, secondo diversi studi condotti, si è rilevata una certa variabilità del tempo trascorso in questi ambienti. In particolare la percentuale di tempo trascorsa in abitazione, in ufficio, sui mezzi di trasporto e all'aria esterna è funzione dell'area geografica, del contesto ambientale esterno, degli stili di vita personali e della stagione dell'anno. Complessivamente gli italiani trascorrono la maggior parte della giornata feriale all'interno dell'abitazione (53-67%), seguita dai luoghi di lavoro o di studio (15-35%) mentre una percentuale piuttosto limitata (2-12%) è trascorsa all'aria aperta. Va notato che questi studi vogliono fornire una indicazione dello stile di vita degli italiani anche se non sono stati considerati i tempi trascorsi in altri ambienti di vita quali palestre, cinema, centri commerciali, ecc.

L'alta percentuale di tempo trascorso in ambienti confinati, unitamente al fatto che tali ambienti risultano per la maggior parte climatizzati e quindi termicamente isolati, porta gli studiosi a condurre studi e ricerche sempre più rigorosi sul problema dell'inquinamento all'interno degli ambienti indoor. A seguito delle crisi energetiche e delle nuove politiche europee sul rendimento energetico nell'edilizia, si è assistito in questi ultimi 10 anni all'introduzione di nuovi e più restringenti criteri tecnico-progettuali per gli edifici volti a limitare i consumi per la climatizzazione degli ambienti confinati. L'introduzione di nuovi materiali più performanti dal punto di vista energetico ed il perfezionamento dei sistemi costruttivi, permette di progettare o ristrutturare edifici rendendoli altamente efficienti, con conseguente spinta a sigillare gli ambienti interni ed a sostituire le modalità naturali di aerazione con mezzi artificiali.

Nello stesso periodo anche l'industria del mobile e dei rivestimenti ha immesso sul mercato tutta una serie di prodotti innovativi che, in alcuni casi, possono rappresentare una importante fonte di inquinamento indoor che può perdurare per tutto il ciclo di vita utile dell'edificio.

In questa maniera le concentrazioni di sostanze chimiche presenti all'interno degli involucri costruiti rischiano di raggiungere livelli notevolmente più alti rispetto all'esterno.

Per una corretta valutazione dell'IAQ di uno spazio confinato è necessario, quindi, caratterizzare gli inquinanti presenti tenendo conto della concentrazione degli stessi nell'aria outdoor immediatamente circostante, attraverso anche la determinazione del rapporto tra la concentrazione degli inquinanti indoor e quella outdoor.

Per alcuni inquinanti chimici o biologici, le cui fonti di emissione principali sono soprattutto all'esterno, tale rapporto risulta essere inferiore all'unità, mentre per alcuni particolari contaminanti legati a materiali da costruzione/arredamento o a infestazioni o colonizzazioni microbiologiche si può avere un rapporto molto superiore all'unità.

Le sostanze in grado di alterare la qualità dell'aria indoor possono essere classificate in tre macro categorie: agenti chimici, agenti biologici e agenti fisici.

Gli agenti chimici sono delle sostanze naturali o artificiali presenti nell'aria sotto forma di gas inorganici che possono provenire dall'inquinamento outdoor oppure da fonti di emissioni interna.

I principali inquinanti chimici provenienti dall'esterno sono:

- ossido e biossido di azoto (NO, NO₂);
- ossidi di zolfo (SO_x);
- monossido di carbonio (CO);
- ozono(O₃);
- particolato aerodisperso (PM10, PM2.5);
- benzene(C₆H₆).

I principali inquinanti chimici provenienti dall'interno sono:

- composti organici volatili (VOC, Volatile Organic Compound);
- formaldeide(CH₂O);
- idrocarburi aromatici policiclici (IPA);
- fumo di tabacco ambientale;
- amianto e fibre minerali sintetiche.

Gli agenti biologici sono degli inquinanti presenti sotto forma di microrganismi (funghi, batteri, virus, parassiti), allergeni indoor (acari della polvere, allergeni di derivazione vegetale e animale) e muffe. La presenza nell'aria indoor di contaminanti biologici comporta un rischio potenziale per la salute degli occupanti dell'ambiente confinato che può essere classificabile in tre tipologie di rischio sanitario: infettivo, tossico e allergico. Gli effetti di questi rischi sanitari si possono manifestare con diversa intensità in relazione a vari fattori quali le condizioni fisiche e la suscettibilità di ciascun individuo che vive lo spazio confinato inquinato.

Gli agenti fisici sono dei fattori governati da leggi fisiche che provocano una trasformazione delle condizioni ambientali in cui si manifestano. Gli agenti fisici di interesse ambientale sono le radiazioni non ionizzanti (campi elettromagnetici), le radiazioni ionizzanti naturali (il radon), il rumore e l'inquinamento luminoso.

Da quanto fin qui riportato, emerge chiaro come gli inquinanti indoor siano numerosi e possano essere originati da una pluralità di sorgenti. Negli ambienti di lavoro (uffici), le principali fonti interne di inquinamento che si possono rilevare sono sintetizzate in Tabella 4.1.

Tabella 4.1 – Fonti interne di inquinamento (uffici).

Fonti	Inquinanti
Materiali da costruzione	Radon, Formaldeide, VOC, Amianto
Arredi	Formaldeide, VOC
Impianti di condizionamento e di ventilazione	Agenti biologici, Particolato aerodisperso, NO ₂ , CO
Stampanti e fotocopiatrici	VOC, Ozono
Materiale di cancelleria	VOC
Fumo di Tabacco (ETS) ¹	Particolato aerodisperso, CO, VOC, Formaldeide

¹ L'articolo 51 della legge 16 gennaio 2003 n. 3 ha esteso il divieto di fumo a tutti i locali chiusi, pubblici e privati, quindi anche a studi professionali, uffici privati, bar, ristoranti ed altri esercizi commerciali, stabilendo il principio che non fumare, nei locali chiusi,

Occorre precisare che mentre l'aria esterna e gli ambienti lavorativi sono soggetti a legislazione volta a ridurre l'esposizione agli agenti inquinanti, la qualità dell'aria negli edifici pubblici e privati, ad oggi, non è regolata da veri e propri riferimenti normativi. Pertanto per scegliere gli inquinanti da monitorare bisogna riferirsi alla letteratura internazionale in tema di qualità dell'aria.

4.2 Definizione di qualità dell'aria accettabile

In linea di principio, l'aria negli ambienti confinati a uso civile dovrebbe presentare un contenuto di contaminanti di origine biologica, fisica e chimica sufficientemente basso e tale da garantire che vi sia un rischio trascurabile per la salute e la sicurezza degli occupanti; inoltre, dovrebbe risultare non sgradevole dal punto di vista della percezione.

Non esiste una definizione di aria di buona qualità universalmente accettata. Attualmente, per ambienti civili, prevale la definizione dell'ASHRAE (2013a) che ritiene la qualità dell'aria interna accettabile quando non contenga contaminanti noti in concentrazioni nocive e per la quale una sostanziale maggioranza delle persone esposte (80% o più) non esprima insoddisfazione.

Tale definizione considera sia il concetto di salute sia quello di comfort, tenendo conto della differente sensibilità tra individui e richiedendo la soddisfazione di una maggioranza e non della totalità.

La norma UNI 10339 riprende questo concetto e infatti, oltre a dare indicazione sui valori minimi di portata per garantire il benessere degli occupanti, pone l'attenzione sul fatto che sorgenti interne di inquinanti (materiali da costruzione, arredi, ecc.) oppure sorgenti esterne ai locali (attività industriali, attività artigianali, traffico) debbano essere valutati specificamente.

In tali casi le caratteristiche dell'impianto di ventilazione devono comunque consentire di assicurare condizioni ambientali igieniche e di benessere, anche in deroga a quanto riportato nella norma stessa, relativamente alle portate minime di ventilazione.

In particolare, nella Norma, si richiama il fatto che la qualità dell'aria esterna (da utilizzare per il ricambio dell'aria interna) debba essere considerata accettabile, con riferimento ai parametri riportati in Tabella 4.2.

Tabella 4.2 – Parametri di qualità accettabile per l'aria esterna – Concentrazioni medie.

Sostanza	Lungo termine			Breve termine		
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	ppm	periodo	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	ppm	periodo
Biossido di zolfo (SO_2)	80	0,03	1 anno	365	0,14	24
Particolato totale	75	-	1 anno	260	-	24
Monossido di carbonio (CO)	-	-	-	40.000	35	1
Monossido di carbonio (CO)	-	-	-	10.000	9	8
Ozono	-	-	-	235	0,12	1
Biossido di azoto (NO_2)	100	0,055	1 anno	-		
Piombo	1,5	-	1 anno	-		

4.3 Esposizione a grandi composti organici volatili e carbonili negli ambienti interni europei

Allo scopo di avere un quadro completo della situazione in Europa, è stata effettuata una revisione della letteratura esistente in materia di qualità dell'aria con riferimento a studi recentemente pubblicati e focalizzati su diverse categorie di ambienti interni (appartamenti, residenze, edifici pubblici, automobili); tale attività è risultata piuttosto impegnativa, soprattutto per quanto riguarda il processo di valutazione dei rischi [12]. Molte delle difficoltà derivano dalla relativa scarsità di dati in molti paesi dell'UE (Spagna, Portogallo e Stati membri più recenti in sud-est Europa); tuttavia, anche negli altri paesi, esistono problemi

è la regola. Fumare, nei locali chiusi, è l'eccezione: oltre che nelle residenze private, si può fumare unicamente in locali riservati ai fumatori. Questi ultimi devono essere dotati di impianti, per la ventilazione ed il ricambio di aria, regolarmente funzionanti, aventi le caratteristiche tecniche fissate con Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri del 23 dicembre 2003.

e incongruenze nei rispettivi set di dati. Il problema più evidente è che all'interno dello stesso paese non esistono dati da un numero sufficiente di città diverse, sebbene sia facilmente immaginabile una grande variabilità dei dati misurati a causa delle differenze socioeconomiche che influenzano sia l'utilizzo dei prodotti di consumo, sia i materiali di costruzione; è poi da considerare che le diverse caratteristiche delle fonti di emissione e le differenze climatiche possono influenzare notevolmente lo scambio di aria tra l'esterno e l'interno; inoltre, alcuni VOC sono emessi dal traffico veicolare e entrano negli ambienti interni (il benzene è l'esempio più caratteristico): per questo motivo l'intensità di traffico e il grado di urbanizzazione influenzano anche la qualità dell'aria interna. Altri fattori determinanti sono il numero e la distribuzione dei campioni raccolti: in molti studi, il numero di campioni non può essere considerato rappresentativo di un'intera area urbana.

La panoramica dei risultati ha indicato che per alcuni contaminanti si osserva un'ampia variabilità, a causa delle diverse caratteristiche di origine:

- contaminanti come il naftalene e lo stirene sono esclusivamente legati a specifici prodotti e comportamenti di consumo; altri contaminanti, come il benzene e il toluene sono prodotti da fonti di emissione esterna e la loro penetrazione nell'aria interna rappresenta un contributo più significativo rispetto alle fonti interne, rendendo difficoltosa l'individuazione della fonte;
- per la formaldeide si hanno livelli più alti nell'Europa settentrionale che nell'Europa meridionale, soprattutto nelle abitazioni; ciò dipende da una diversa strategia di ventilazione tra nord e sud, per via delle diverse condizioni climatiche, con conseguente minor scambio d'aria tra l'ambiente interno e l'ambiente esterno, nonché dall'utilizzo molto più esteso di mobili in legno e del legno come materiale da costruzione nel nord europeo;
- composti come il benzene e il toluene sono due o tre volte più abbondanti nell'aria interna del sud che nel nord dell'Europa; ciò è principalmente associato a fonti interne come materiali da costruzione e fumo di tabacco (ETS) e fonti esterne come il traffico veicolare (con un'influenza molto più elevata sulle concentrazioni di aria interna nel sud che nel nord, a causa della maggiore penetrazione dell'aria all'interno);
- anche per lo stirene e per gli xileni le concentrazioni sono più alte nel sud che nel nord dell'Europa, sebbene la loro origine sia generalmente interna; per quanto riguarda lo stirene e gli xileni, la sorgente principale è il fumo di sigaretta (più alto nel sud che nel nord Europa), anche se molti materiali da costruzione, come tappeti e rivestimenti in parquet (fonti significative dei due prodotti chimici), sono ampiamente diffusi nell'Europa settentrionale.

In media, i dati raccolti indicano che i livelli di inquinamento chimico organico nell'aria interna sono più alti in edifici a destinazione residenziale, rispetto agli edifici a destinazione non residenziale. Ciò è una conseguenza di diverse modalità di occupazione, ma anche del fatto che esistono dei limiti di esposizione professionale negli spazi professionali, mentre non esiste una regolamentazione per gli ambienti residenziali.

I composti selezionati sono stati suddivisi in due sottocategorie, in base al fatto che risultino cancerogeni o meno:

- tra gli agenti cancerogeni rientrano benzene, formaldeide, acetaldeide e naftalene;
- tra gli agenti non cancerogeni rientrano toluene, xilene, stirene, ammoniacca, limonene e α -pinene.

La modalità impiegata per la valutazione del rischio derivante dai composti cancerogeni è il rischio stimato per il cancro (R), secondo la metodologia proposta dalla US EPA [13] e data dalla formula:

$$R = C \cdot IUR \quad (4.1)$$

dove:

- C è la concentrazione di esposizione in $\mu\text{g}/\text{m}^3$;

- IUR è il rischio unitario di inalazione, che è il rischio di contrarre il tumore per esposizione, stimato come risultato dell'esposizione continua ad un generico agente presente nell'aria in concentrazione pari a 1 µg/m³.

IUR è l'espressione del fattore di potenzialità tumorale per i composti inalati (OEHHA) [14]. Il fattore di potenzialità tumorale è una estrapolazione lineare dagli studi su animali ad alto dosaggio o su esseri umani a basse dosi di esposizione ambientale utilizzando una stima di massima probabilità (per dati epidemiologici) o il limite massimo di confidenza del 95% (per gli studi sugli animali).

Per la stima dei rischi cancerogeni, sono stati utilizzati due valori IUR per ciascun composto derivato rispettivamente da due diversi organismi di regolamentazione, da US EPA e da OEHHA.

Per i composti non cancerogeni, la caratterizzazione del rischio è stata basata sul concetto di Margine di Sicurezza (MoS), definito come la massima quantità di esposizione (MAE) che non produce alcun effetto misurabile negli animali (o negli esseri umani studiati) diviso per la quantità effettiva di Esposizione (E) in una popolazione, data dalla formula:

$$MOS = \frac{MAE}{E} \tag{4.2}$$

I valori MAE per la valutazione sono stati ripresi dallo studio INDEX [15] per l'esposizione a lungo termine, quindi caratterizzati come limiti di esposizione (ELs). In breve, EL per ciascuna sostanza chimica è stata ricavata dopo l'identificazione degli studi chiave (studio critico) che descrivono gli effetti tossicologici appropriati (tra quelli selezionati da autorità ambientali e sanitarie come WHO, US EPA, ATSDR², OEHHA, UBA³ e ECHC⁴) per la derivazione di concentrazioni di riferimento basate sulla salute e fattori di incertezza (estrapolazione dal livello di effetto avverso osservato più basso (LOAEL) al NOAEL), estrapolazione delle varie specie, variabilità inter-individuale, popolazione sensibile ecc.).

I rispettivi valori IUR e EL sono riportati in Tabella 4.3 e in Tabella 4.4.

Tabella 4.3 – Valori del Rischio Unitario di Inalazione (IUR) utilizzati per il processo di valutazione dei rischi.

	Valori di IUR (casi / µg/m ³) per i composti cancerogeni	
	EPA	OEHHA
Formaldeide	1,3 E-05	6,0 E-06
Benzene	6,0 E-06	2,9 E-05
Acetaldeide	2,2 E-06	2,7 E-06
Naftalina		3,4 E-05

Tabella 4.4 – Valori del limite di esposizione (EL) utilizzati per il processo di valutazione dei rischi.

	Valori di EL (µg/m ³) per i composti non cancerogeni	
	INDEX	OEHHA
Formaldeide	30	9
Toluene	300	300
Xilene	200	300
Stirene	250	300
Ammoniaca	100	300
Pinene	450	
Limonene	450	

² ATSDR: Agency for Toxic Substances and Disease Registry (USA).

³ UBA: Federal Environmental Agency of Germany

⁴ EC-HC: Health Committee of the European Commission.

Per stimare i rischi, sono state utilizzate distribuzioni di esposizione. Queste distribuzioni di esposizione sono state ricavate da informazioni relative ai modelli di attività temporali, al tempo trascorso all'interno, ai luoghi di lavoro, ecc. I diversi ambienti sono stati trattati in modi diversi in termini di tempo trascorso in essi e sono stati utilizzati fattori ponderati in base all'attività. Non sono state prese in considerazione attività che non fanno parte delle attività quotidiane della popolazione (ad esempio visite a musei e stadi). Le distribuzioni dei valori di concentrazione interna di diverse città all'interno dello stesso Paese sono state opportunamente elaborate per ottenere la distribuzione media della concentrazione nel Paese.

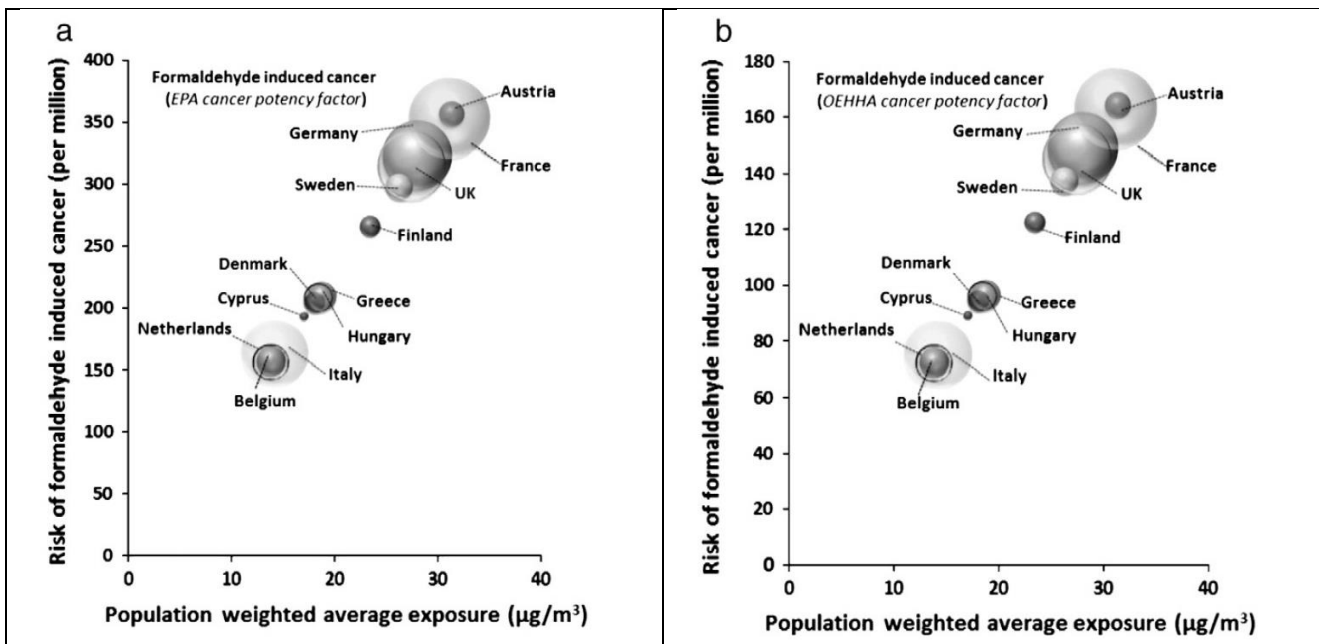


Figura 4.1 – Rischi di cancro (IUR) per esposizione alla formaldeide sulla base di a) EPA e b) OEHHA.

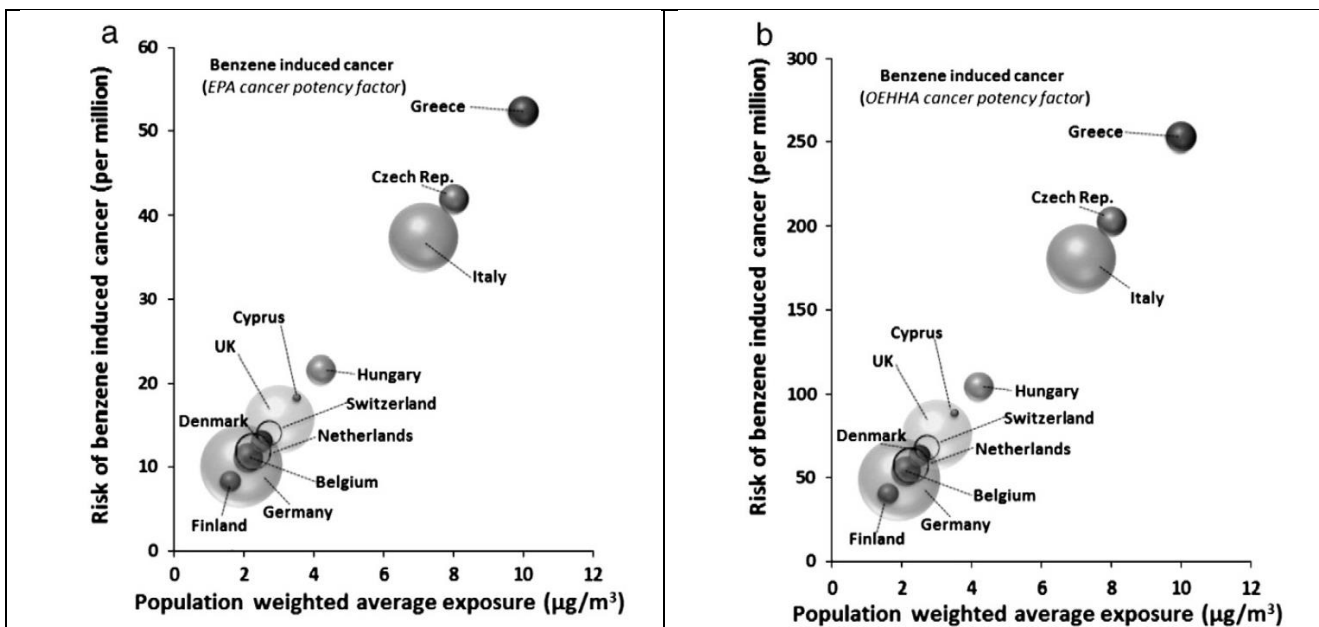


Figura 4.2 Rischi di cancro (IUR) per esposizione al benzene sulla base di a) EPA e b) OEHHA.

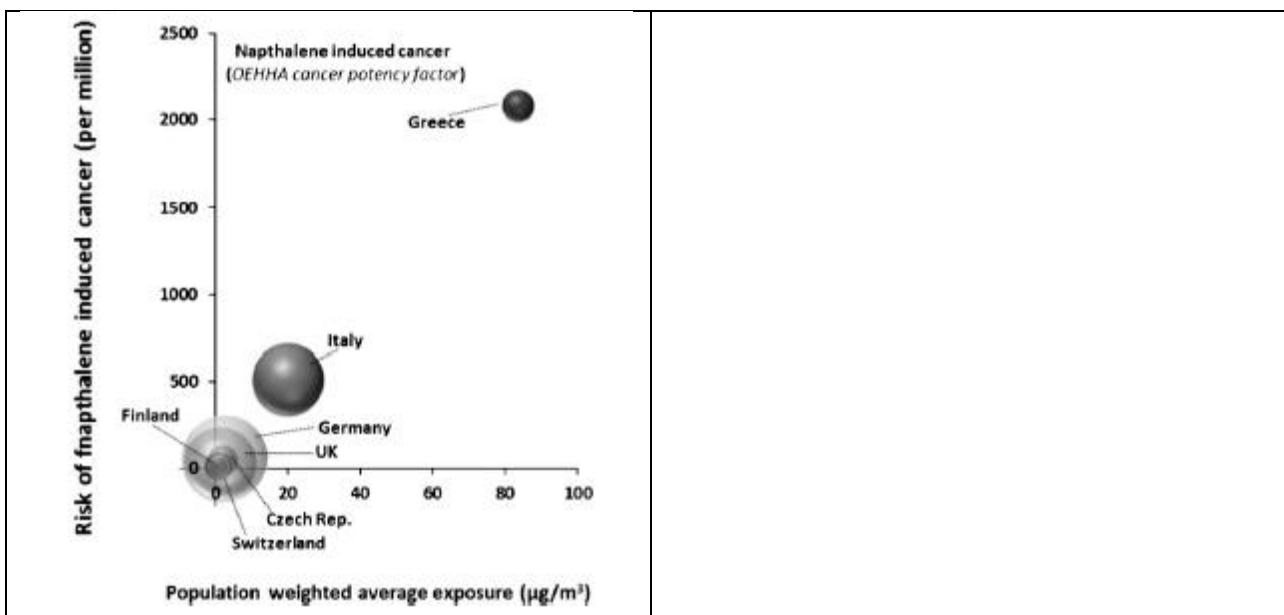


Figura 4.3 – Rischi di cancro (IUR) per esposizione al naftalene sulla base di OEHA.

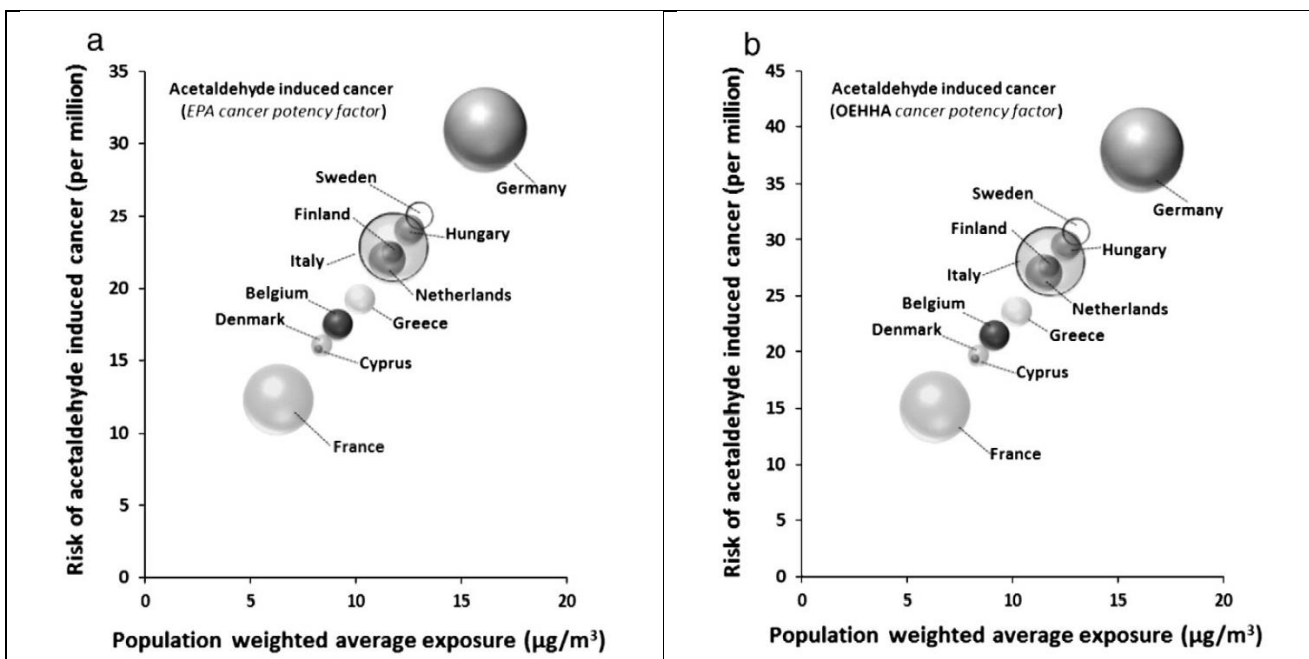


Figura 4.4 – Rischi di cancro (IUR) per esposizione all’acetaldeide sulla base di a) EPA e b) OEHA.

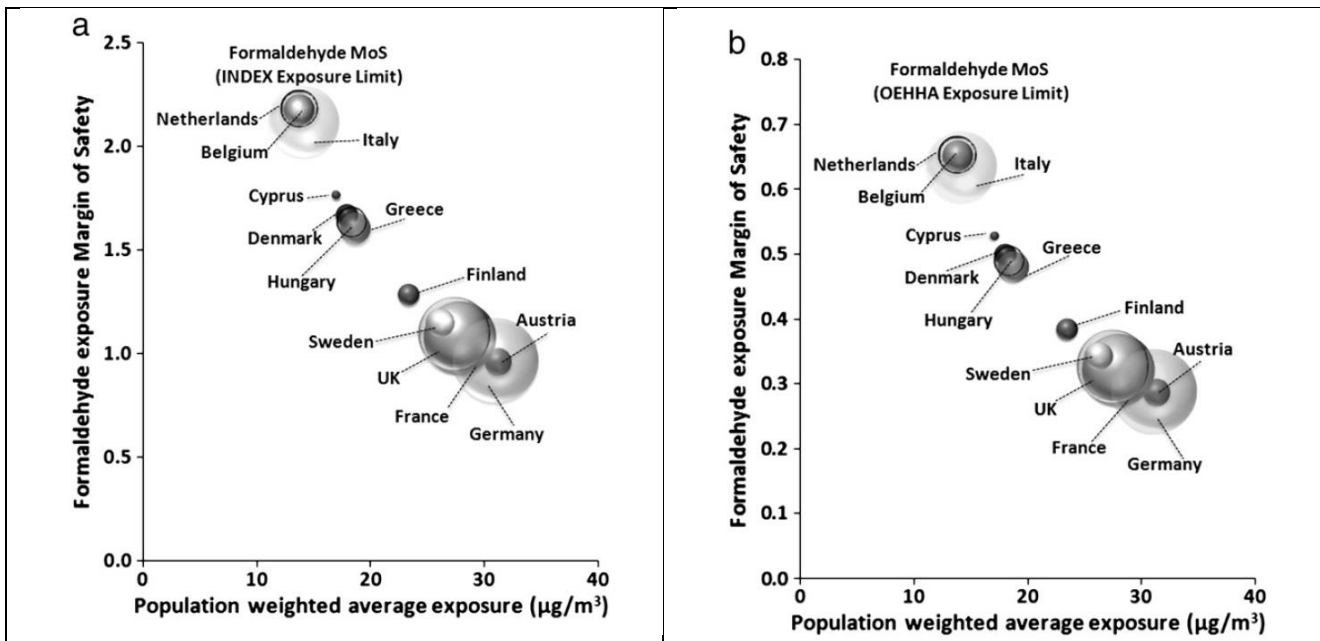


Figura 4.5 – Margine di sicurezza (MoS) per esposizione alla formaldeide sulla base di a) INDEX e b) OEHHA.

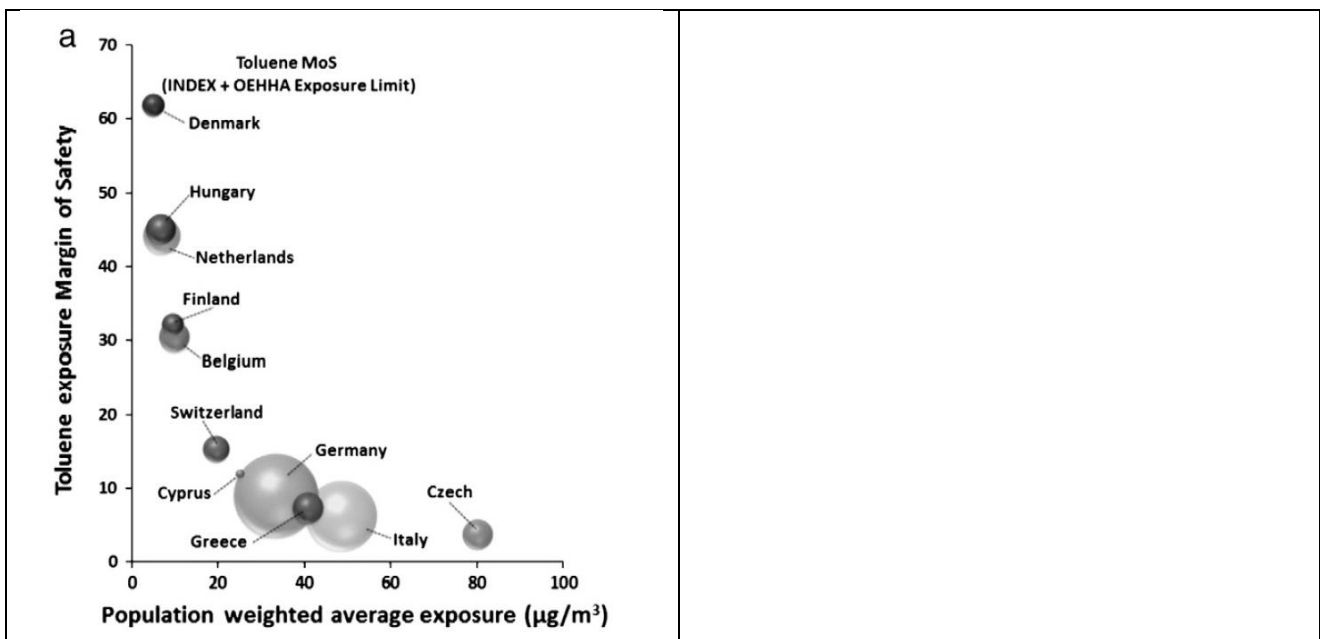


Figura 4.6 – Margine di sicurezza (MoS) per esposizione al toluene sulla base di a) INDEX e OEHHA.

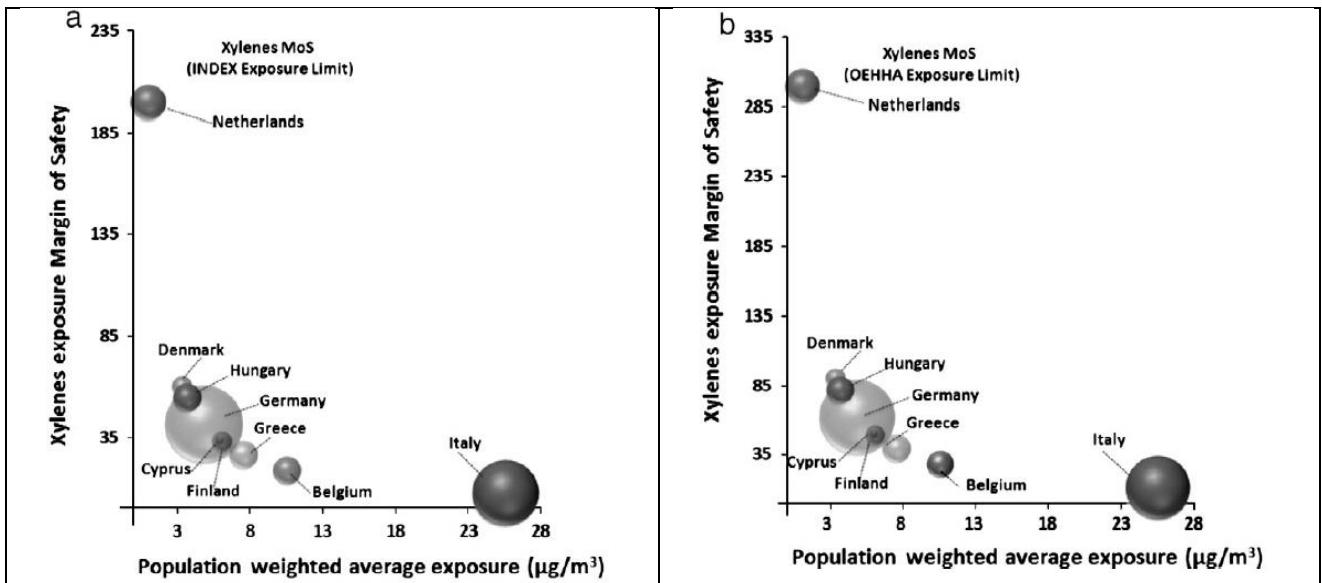


Figura 4.7 – Margine di sicurezza (MoS) per esposizione allo xilene sulla base di a) INDEX e b) OEHHA.

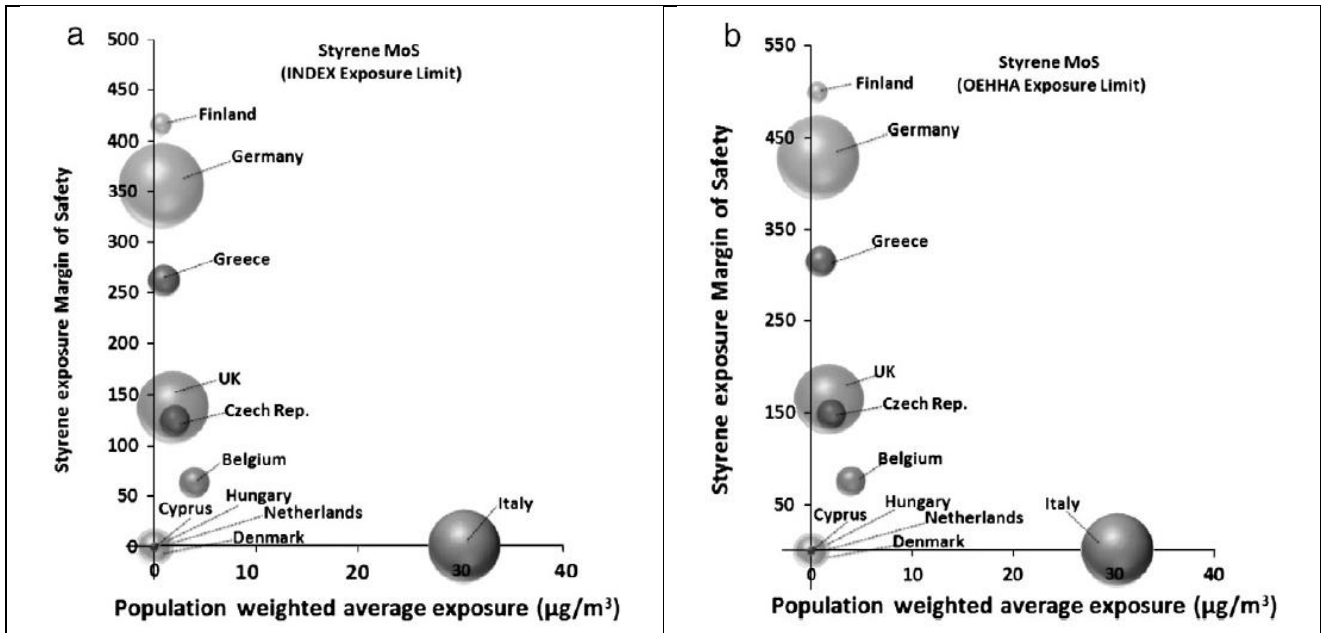


Figura 4.8 – Margine di sicurezza (MoS) per esposizione allo stirene sulla base di a) INDEX e b) OEHHA.

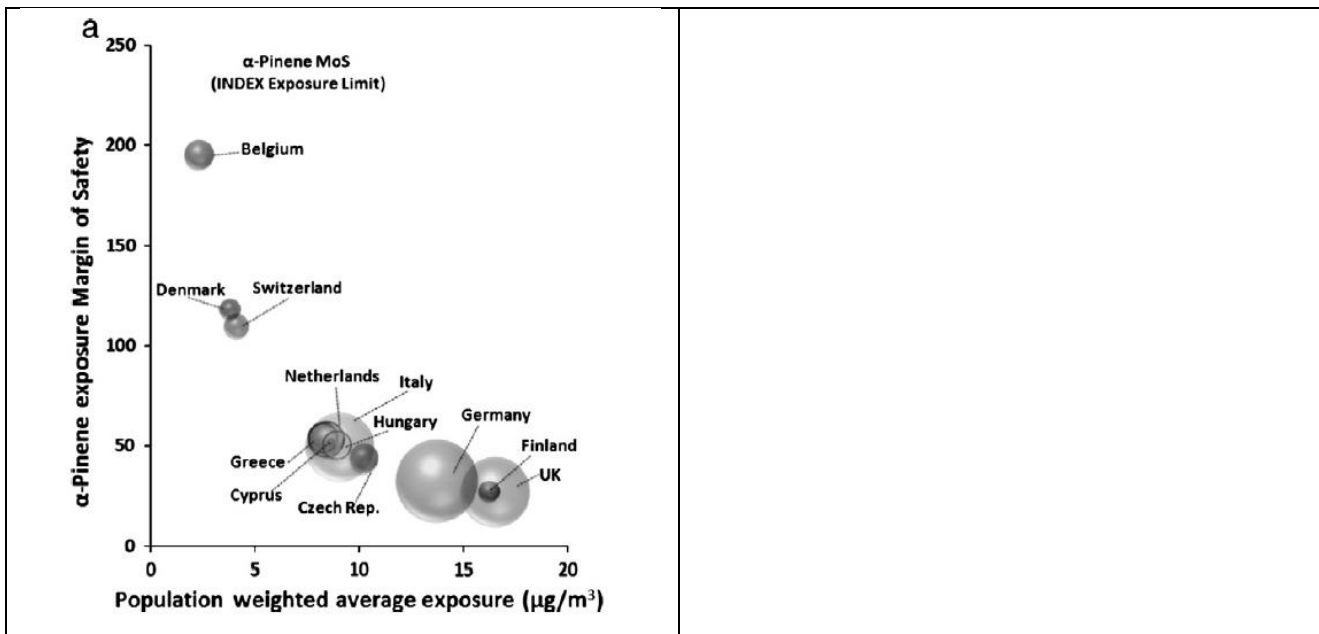


Figura 4.9 – Margine di sicurezza (MoS) per esposizione all' α -pinene sulla base di a) INDEX.

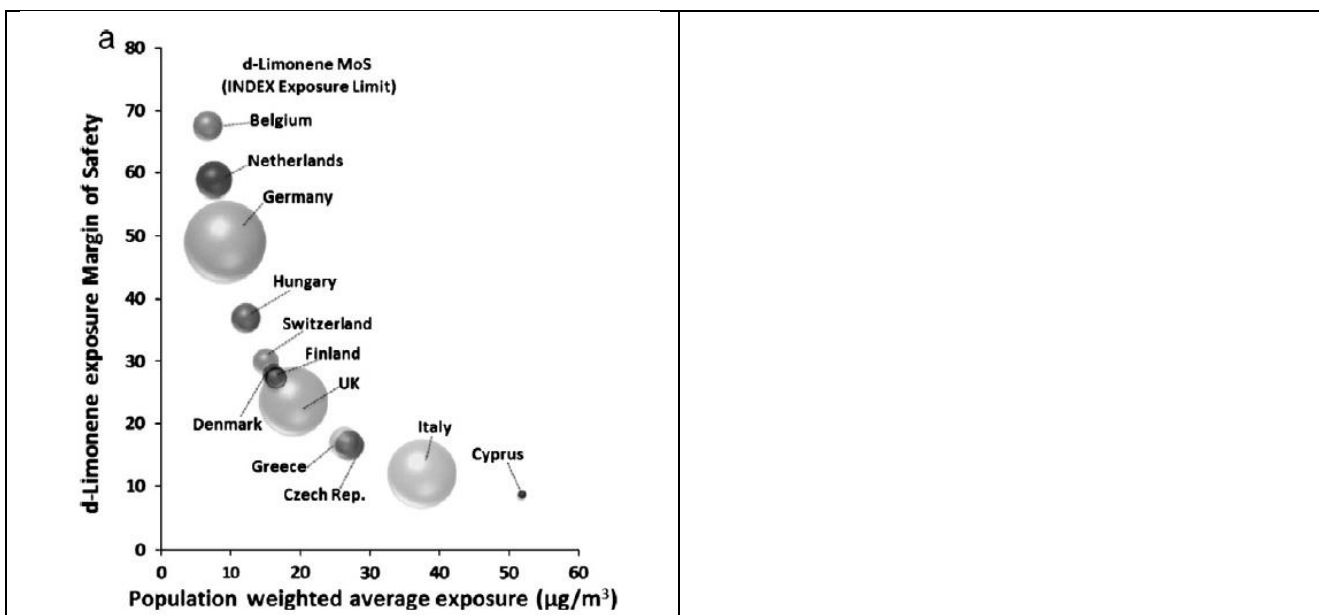


Figura 4.10 – Margine di sicurezza (MoS) per esposizione al limonene sulla base di a) INDEX.

4.4 Indoor Air Quality - Riferimenti normativi

4.4.1 Situazione internazionale

Le tematiche legate alla qualità dell'aria indoor hanno subito negli ultimi anni una crescente attenzione [16] [17][18][19][20]. La Commissione europea ha finanziato diversi studi in questo ambito con lo scopo di accrescere il quadro conoscitivo sul tema (THADE, EnVIE, AIRMEX, EXPOLIS) ma tra i più importanti va ricordato INDEX (Critical Appraisal of the Setting and Implementation of Indoor Exposure Limits in the EU) finanziato dalla DG Sanco della Commissione Europea (Directorate General for Health and Consumer Affairs) e coordinato dal Joint Research Centre della Commissione Europea in collaborazione con i maggiori esperti europei in materia di inquinamento dell'aria indoor. Tale studio ha permesso di individuare una lista di sostanze prioritarie per la presenza negli ambienti confinati, per rilevanza tossicologica quali benzene,

biossido di azoto, formaldeide, monossido di carbonio e naftalene con conseguente indicazioni delle opzioni di gestione del rischio.

L'Organizzazione Mondiale della Sanità ha sempre prestato attenzione alla tematica della qualità dell'aria indoor, in particolare all'individuazione e alla valutazione delle sue implicazioni igienico-sanitarie. A tal proposito ha elaborato per la prima volta nel 2010, a livello di Regione Europea, le linee guida per la qualità dell'aria *indoor* per alcuni specifici inquinanti atmosferici presenti in ambienti confinati ("Guidelines for Indoor Air Quality" WHO, World Health Organization). Le sostanze considerate sono benzene, biossido di azoto, idrocarburi policiclici aromatici (soprattutto benzo[a]pirene), naftalene, monossido di carbonio, radon, tricloroetilene e Tetracloroetilene, inquinanti per i quali le conoscenze scientifiche relative agli effetti sull'uomo sono state giudicate sufficientemente salde.

È opportuno ricordare che i valori guida o di riferimento rappresentano un parametro di riferimento, ma non il solo, per una valutazione del rischio inalatorio della popolazione. Infatti, la vulnerabilità della popolazione e le condizioni di esposizione sono elementi fondamentali da conoscere per una corretta comprensione del problema.

Tali linee guida sono basate su valutazioni di rischio ritenute accettabili alla luce della complessiva evidenza scientifica disponibile, forniscono dei livelli di concentrazione al di sotto dei quali l'esposizione per tutta la durata della vita, o per un determinato periodo di tempo, non costituiscono un rischio sanitario, mettendo fine all'utilizzo nelle valutazioni del rischio, dei VLEP (Valori Limite di Esposizione Professionale Industriale - DLgs 81/08) o dei TLV (Threshold Limit Value) proposti dall'ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists), ridotti di 1/10 o 1/100.

Tale superamento dell'utilizzo dei VLEP era stato auspicato qualche anno prima, nel 2007, dal Comitato Scientifico SCHER (Scientific Committee on Health and Environmental Risks) della Commissione Europea, con il documento "Opinion on risk assessment on indoor air quality". L'elaborato raccomandava che la valutazione dei rischi deve essere sempre focalizzata sui gruppi più vulnerabili, rappresentati da bambini, donne in gravidanza, persone anziane (over 65), persone sofferenti di asma e altre malattie respiratorie e malattie cardiovascolari, seguendo un approccio case-by-case. Per i gruppi d'individui particolarmente sensibili e vulnerabili potenzialmente esposti agli inquinanti in esame, il problema della contemporanea presenza di più fattori di rischio può richiedere valutazioni specifiche approfondite, che devono basarsi su un'adeguata conoscenza del contesto.

Ancor prima, il documento "Indoor Air Pollutants: Exposure and Health Effects", redatto dall'OMS agli inizi degli anni '80, riportava come risultasse inappropriato l'utilizzo dei valori limiti di esposizione professionale industriale per gli ambienti indoor non industriali, e come per tali ambienti fosse necessario lo sviluppo di specifici riferimenti. La pubblicazione delle recenti linee guida ha contribuito al loro superamento.

4.4.2 Situazione americana: il ruolo dell'ASHRAE

La missione di ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) è quella di fornire indicazioni nell'ambito del condizionamento e della ventilazione dell'aria al fine di promuovere un mondo sostenibile. Il sistema HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) è fondamentale per mantenere livelli accettabili di qualità dell'aria in quasi tutti gli spazi occupati. L'obiettivo primario di un sistema HVAC è quello di garantire comfort e salute per gli occupanti. ASHRAE adempie la propria missione attraverso la ricerca, la scrittura di standard, la pubblicazione e la formazione continua.

Di conseguenza ASHRAE ha sviluppato e continua a mantenere diversi standard e linee guida relative alla qualità dell'aria interna. Questi standard costituiscono la base dei requisiti di progettazione IAQ in gran parte degli Stati Uniti. I seguenti sono i più noti e comunemente citati:

- ANSI / ASHRAE Standard 62.1: ventilazione per un'accettabile qualità dell'aria interna. Questo standard, pubblicato per la prima volta nel 1973, prevede la ventilazione e altri requisiti correlati

alla qualità dell'aria per gli edifici diversi dagli edifici residenziali a bassa residenza e dalle strutture sanitarie;

- ANSI / ASHRAE Standard 62.2: ventilazione e qualità dell'aria interna accettabile in edifici residenziali. Questo standard, pubblicato per la prima volta nel 2003, riguarda gli edifici residenziali a basse emissioni. I requisiti di ventilazione da questo standard sono stati adottati anche in codici, tra cui il titolo 24 della California e nei programmi LEED for Homes e nell'ambito del programma airPlus indoor (EPA).
- ANSI / ASHRAE / ASH Standard 170: ventilazione delle strutture sanitarie. Lo standard 170 ha riunito diversi standard di ventilazione utilizzati in tutto il Nord America in un unico documento. Oggi si fa riferimento quasi esclusivamente ai codici di costruzione per i requisiti di ventilazione negli ospedali e negli altri centri sanitari.
- ANSI / ASHRAE Standard 52.2: Metodi di controllo dei sistemi generali di pulizia dei sistemi di ventilazione per garantire l'efficienza di rimozione del particolato. Questo standard è utilizzato per misurare e valutare le prestazioni dei filtri delle particelle.
- ANSI / ASHRAE / USGBC / IES Standard 189.1: Standard per la progettazione di edifici residenziali ed ad uso uffici ad alto rendimento, verdi, tranne le costruzioni residenziali a bassa resa. Sviluppato in collaborazione con la società USGBC e Illuminating Engineering Society (IES), questo standard prevede rigorosi requisiti relativi alla qualità dell'aria interna in edifici sostenibili. Lo Standard è stato sviluppato in modo da poter essere adottato come parte di sistemi di valutazione sostenibile, programmi di incentivazione e ordinamenti per l'edilizia verde.

Gli standard 62.1, 62.2, 170 e 189.1 sono in continua manutenzione con aggiornamenti che devono essere pubblicati circa ogni tre anni.

4.4.3 Situazione comunitaria

Nel contesto europeo, l'attività della OMS ha sollecitato diversi Paesi che hanno inserito nelle loro legislazioni valori guida e/o di riferimento, questo ha anche contribuito all'attuazione di campagne nazionali di monitoraggio su specifici inquinanti chimici indoor.

In particolare, Francia, Belgio, Finlandia, Norvegia e Portogallo hanno assunto valori guida nazionali per una serie di inquinanti chimici.

Detti valori sono stati supportati da alcuni studi che hanno messo in relazione le concentrazioni di questi inquinanti rilevati in ambienti indoor con le valutazioni di esposizione inalatoria da parte della popolazione. Per la Finlandia, il Belgio e per la Francia i valori guida hanno valore legale, mentre per gli altri Paesi in cui tali valori sono raccomandati, possono essere utilizzati per valutare e migliorare la qualità dell'aria. In tutti i Paesi i valori guida proposti sono correlati dai relativi metodi per una corretta valutazione (ad esempio, strategia di campionamento e analisi) da utilizzare per confrontare i valori misurati con quelli proposti.

Altri Paesi, come Germania, Austria, Paesi Bassi e Regno Unito, hanno istituito gruppi di lavoro multidisciplinari con il compito specifico di elaborare valori guida per la qualità dell'aria negli ambienti indoor che sono utilizzati dagli organismi governativi di controllo, al fine di individuare e valutare le sorgenti principali e attivare le necessarie soluzioni o mitigazioni della contaminazione.

Tra i diversi Paesi UE, la Francia è stata tra le prime a rispondere mediante una serie di atti normativi integrati, ai crescenti problemi legati agli ambienti indoor; introducendo nella propria normativa, con il "Décret no 2011-1727 du 2 décembre 2011 relatif aux valeurs-guides pour l'air intérieur pour le formaldéhyde et le benzène", valori guida per formaldeide e benzene.

In aggiunta alle indicazioni tecniche o alle norme prodotte dalle istituzioni di alcuni Paesi, vanno ricordati i documenti di riferimento europeo, elaborati dagli organismi di normazione come il CEN (Comitato Europeo di Normazione) e quelli dell'ISO (International Organization for Standardization), che da tempo sono impegnati nello sviluppo di metodiche standardizzate con cui effettuare le misurazioni (metodologie di campionamento, di analisi e di valutazione dei livelli misurati).

Nel dettaglio si riportano le seguenti norme:

- EN 14412: La norma fornisce linee guida per la scelta, l'utilizzo e la manutenzione dei campionatori diffusivi utilizzati per analizzare gli inquinanti gassosi nell'aria in ambienti confinati, comprese le strategie e la pianificazione delle misurazioni;
- EN ISO 16000: specifica la pianificazione delle misurazioni dell'inquinamento. Nel caso delle misurazioni dell'aria in ambienti confinati, l'accurata pianificazione del campionamento e l'intera strategia di misurazione assumono un significato particolare poiché il risultato della misurazione può avere conseguenza di lunga portata, per esempio, relativamente alla necessità di un'azione riparatrice o al successo di tale azione;
- ISO 12219: riguarda l'aria all'interno dei veicoli, i metodi per il controllo dell'indoor nelle cabine e le emissioni dal veicolo;
- EN ISO 16017: fornisce una guida generale per il campionamento e l'analisi dei composti organici volatili (VOC) nell'aria. Si applica ad atmosfere di ambienti di lavoro, per vapori aerodispersi di VOC presenti in un intervallo di concentrazione approssimativamente da 0,002 a 100 mg/m³ di singoli composti organici per un tempo di esposizione di 8 h, oppure da 0,3 mg/m³ a 300 mg/m³ di singoli composti organici per un tempo di esposizione di quattro settimane;
- EN 15242: descrive il metodo per calcolare le portate d'aria negli edifici da utilizzarsi per applicazioni quali il calcolo dell'energia, il calcolo del carico termico di riscaldamento e raffreddamento, il benessere estivo e la valutazione della qualità dell'aria degli ambienti interni.
- EN 13779: si applica alla progettazione e alla realizzazione dei sistemi di ventilazione e climatizzazione per gli edifici non residenziali caratterizzati dall'occupazione umana, ad esclusione delle applicazioni in processi industriali. La norma definisce i principali parametri rilevanti per tali impianti. La norma non si occupa degli edifici a ventilazione naturale;
- EN 15251: specifica: - i parametri relativi all'ambiente interno che influiscono sulla prestazione energetica degli edifici; - la modalità per definire dei parametri di input relativi all'ambiente interno per la valutazione dell'edificio inteso come sistema e per i calcoli della prestazione energetica; la norma stabilisce inoltre: - i metodi per la valutazione a lungo termine dell'ambiente interno ottenuta, a partire dal calcolo o da risultati di misure; - i criteri di misurazione che potrebbero essere utilizzati, se necessario, per valutare la conformità per mezzo di un'ispezione; - i parametri da utilizzare negli ambienti interni negli edifici esistenti; - il modo in cui le diverse categorie di criteri relativi all'ambiente interno possono essere utilizzate, anche se non impone i criteri che devono essere utilizzati. La norma si applica essenzialmente agli edifici non industriali per cui i criteri relativi all'ambiente interno sono definiti dall'occupazione umana, in cui l'attività produttiva o di processo non abbia un impatto sostanziale sull'ambiente interno. E norma applicabile alle abitazioni individuali, condomini, uffici, scuole, ospedali, alberghi e ristoranti, impianti sportivi, edifici ad uso commerciale all'ingrosso e al dettaglio.

Tali norme sono state in parte recepite in Italia dall'UNI (Ente Nazionale Italiano di Unificazione).

4.4.4 Situazione italiana

In Italia, l'attenzione al tema della qualità dell'aria indoor risale fin da primi anni '90 con l'istituzione della "Commissione Nazionale per l'Inquinamento degli Ambienti Confinati" presso il Ministero dell'Ambiente con lo scopo di elaborare linee guida sui livelli di qualità dell'aria dei diversi inquinanti, sviluppare norme sulle fonti di inquinamento e standard relativi a materiali e prodotti con limiti di emissione consentiti e predisporre azioni di rimedio. In tale ambito era stata anche proposta la seguente definizione di inquinamento indoor: *"presenza nell'aria di ambienti confinati di contaminanti fisici, chimici e biologici, non presenti naturalmente nell'aria esterna di sistemi ecologici aperti di elevata qualità."*

Le proposte di tale Commissione rimasero a livello di studio e non ci fu un vero e proprio sviluppo della normativa italiana a tal riguardo. Nonostante negli ultimi anni diverse siano state le iniziative avviate, queste ultime non costituiscono una politica globale ed integrata in materia di qualità dell'aria indoor.

Nel 1998 il Ministero della Sanità istituì una Commissione tecnico-scientifica con il compito di fornire linee di indirizzo tecnico volte a promuovere lo sviluppo di iniziative di prevenzione primaria e secondaria in materia di inquinamento degli ambienti confinati e di approfondimento delle conoscenze sulle cause di inquinamento e sul relativo impatto sulla salute.

Il lavoro della Commissione ha trovato seguito nel 2001 con l'Accordo siglato tra il Ministero della Salute e Regioni e Province autonome concernente le "Linee guida per la tutela e la promozione della salute negli ambienti confinati" (Accordo 27 settembre 2001). L'elaborato presenta un programma generale di prevenzione e le linee strategiche per la sua messa in opera.

A seguire, l'accordo tra Governo e Regioni ha prodotto il documento "Linee guida per la definizione di protocolli tecnici di manutenzione predittiva sugli impianti di climatizzazione" [Prov. 5 ottobre 2006, 2636] le quali si basano sul presupposto che impianti di climatizzazione non opportunamente installati o gestiti possono influire sulla qualità dell'aria indoor causando rischi per la salute ed il benessere degli occupanti.

Un ulteriore contributo alla tutela della salute pubblica, in materia di qualità dell'aria indoor, è rappresentato dall'introduzione della Legge n.3/2003, art. 51, "Tutela della salute dei non fumatori", entrata in vigore il 10/01/2005, che estende il divieto di fumo a tutti i locali chiusi ad eccezione di quelli privati non aperti ad utenti o al pubblico e di quelli riservati ai fumatori e come tali contrassegnati. Tale provvedimento ha portato ad un sensibile miglioramento della qualità dell'aria degli ambienti confinati in quanto il fumo di tabacco rappresenta una delle fonti di inquinanti più pericolose.

Le citate linee guida sono però ancora lontane dal fornire indicazioni sui valori guida o sugli standard da adottare ma rappresentano, comunque, un utile e importante contributo. Non esistendo valori di concentrazione limite per gli inquinanti indoor, si fa riferimento ai limiti di concentrazione previsti dalla normativa per l'inquinamento atmosferico esterno, che in Italia è definita dal D.lgs. n.155 del 13/08/2010.

L'unica misura cautelativa per gli ambienti confinati nella normativa italiana riguarda la formaldeide: la Circolare n. 57 del 22/06/1983 del Ministero della Sanità fissa come limite massimo di esposizione il valore di 0,1 ppm negli ambienti di vita e di soggiorno nei quali siano stati utilizzati schiume di urea-formaldeide, compensati, truciolati, conglomerati di sughero, ma anche manufatti provenienti da settori diversi da quello dell'edilizia, quali il settore tessile, quello della carta, delle vernici, degli abrasivi, della moquette, ecc..

Al fine di garantire la protezione della salute umana nel loro impiego negli ambienti di vita e soggiorno è stato emanato il Decreto Ministeriale 10 ottobre 2008 che stabilisce disposizioni riguardanti la fabbricazione, l'importazione e l'immissione in commercio di pannelli a base di legno e manufatti con essi realizzati contenenti formaldeide. Il Decreto prevede che tali prodotti non possano essere immessi in commercio se la concentrazione di formaldeide nell'aria dell'ambiente di prova supera il valore di 0,1 ppm (0,124 mg/m³).

Attualmente, nella legislazione italiana non esiste uno specifico riferimento in materia di qualità dell'aria indoor ma diverse Commissioni e gruppi di lavoro sono a lavoro. Tra questi il "Gruppo di studio nazionale sull'inquinamento indoor", attivato dall'I.S.S. (Istituto Superiore di Sanità), nel quale sono rappresentate varie componenti (Ministero della Salute, Regioni, Istituti di Ricerca, Università), sta lavorando per fornire un concreto contributo tecnico per gli operatori del settore pubblico e privato impegnati nell'affrontare le complessità del tema indoor, al fine di consentire una omogeneità di azioni a livello nazionale, i cui risultati potranno portare ad appropriate strategie di sanità pubblica mirate alla riduzione della esposizione negli ambienti indoor.

Tabella 4.5 – Inquinanti dell’aria indoor: valori guida di qualità dell’aria di alcuni Paesi europei e rischio unitario (Unit Risk, UR) delle linee guida OMS relativi ad alcuni inquinanti⁵.

Inquinante unità di misura	OMS aria ambiente	OMS aria indoor	Francia	Germania	Paesi Bassi	Regno Unito	Belgio Regione fiamminga	Finlandia ***	Austria	Portogallo	Norvegia	Polonia residen- ziale	Polonia uffici pubblici
Benzene µg/m ³	No VG 0,17 (UR/lifetime) 10 ⁻⁶ 1,7 (UR/lifetime) 10 ⁻⁵	No VG 0,17 (UR/lifetime) 10 ⁻⁶ 1,7 (UR/lifetime) 10 ⁻⁵	30 (24 h) 10 (1 a) AR: 10 LP: 5 dal 1/1/ 2013, 2 dal 1/1/ 2016 0,2 (UR/lifetime) 10 ⁻⁶ 2 (UR/lifetime) 10 ⁻⁷	–	20	5 (1 a)	≤ 2 VI: 10	–	–	5 (8 h)	--	10 (24 h)	20 (8 h)
Formaldeide µg/m ³	100 (30 min)	100 (30 min)	50 (2 h) 10 (1 a) 30 da 1/1/2013 10 da 1/1/2023 AR: 100 LP: 10 da 2019 (2012 nuovi edifici) 30 (2009) 50 (2009)	120	120 (30 min) 10 (1 a) 1,2 (LP)	100 (30 min)	10 (30 min) VI: 100 (30 min)	50	100 (30 min) 60 (24 h)	100 (8 h)	100 (30 min)	50 (24 h)	100 (8 h)
CO mg/m ³	100 (15 min) 60 (30 min) 30 (1 h) 10 (8 h)	100 (15 min) 35 (1 h) 10 (8 h) 7 (24 h)	100 (15 min) 60 (30 min) 30 (1 h) 10 (8 h)	1,5 (8 h) RWI 6 (30 min) RWI 60 (30 min) RWII 15 (8 h) RWII	100 (15 min) 60 (30 min) 30 (1 h) 10 (8 h)	100 (15 min) 60 (30 min) 30 (1 h) 10 (8 h)	5,7 (24 h) VI: 30 (1 h)	8	–	10 (8 h)	25 (1 h) 10 (8 h)	25 (1 h)	10 (8 h)
NO₂ µg/m ³	200 (1 h) 40 (1 a)	200 (1 h) 40 (1 a)	200 (1 h) 40 (1 a)	350 (30 min) RWII 60 (7 gg) RWII	200 (1 h) 40 (1 a)	300 (1 h) 40 (1 a)	135 (1 h) VI: 200 (1 h)	–	–	–	200 (1 h) 100 (24 h)	–	–
Naftalene µg/m ³	–	10 (1 a)	10 (1 a)	20 (7 gg) RWI 200 (7 gg) RWII	25	–	–	–	–	–	–	100 (24 h)	150 (8 h)
Stirene µg/m ³	260 (7 gg) 70 (30 min)	–	–	30 (7 gg) RWI 300 (7 gg) RWII	900	–	–	1	40 (7 gg) 10 (1 h)	–	--	20 (24 h)	30 (8 h)
IPA (BaP) ng/m ³	No VG 0,012 (UR/lifetime) 10 ⁻⁶ 0,12 (UR/lifetime) 10 ⁻⁵	No VG 0,012 (UR/lifetime) 10 ⁻⁶ 0,12 (UR/lifetime) 10 ⁻⁵	–	–	1,2	0,25 (1 a)	–	–	–	–	–	–	–
Tetracloro- etilene µg/m ³	250 (1 a) 8000 (30 min)	250 (1 a)	1380 (1-14 gg) 250 (1 a) VR: 250 LP: 250 dal 1/1/ 2015	1 (7 gg)	250	–	≤ 100	–	250 (7 gg)	–	–	–	–
Tricloro- etilene µg/m ³	No VG 2,3 (UR/lifetime) 10 ⁻⁶ 23 (UR/lifetime) 10 ⁻⁵	No VG 2,3 (UR/lifetime) 10 ⁻⁶ 23 (UR/lifetime) 10 ⁻⁵	800 (14 gg-1 a) AR: 10. VR: 2 LP da OMS: 2,0 (UR/lifetime) 10 ⁻⁶ 20 (UR/lifetime) 10 ⁻⁵	1 (7 gg)	–	–	≤ 200	–	–	–	--	150 (24 h)	200 (8 h)
Dicloro- metano µg/m ³	3000 (24 h) 450 (7 gg)	–	–	200 (24 h) RWI 2000 (24 h) RWII	200 (1 a)	–	–	–	–	–	–	–	–
Toluene µg/m ³	260 (7 gg) 1000 (30 min)	–	–	300 (1-14 gg) RWI 3000 (1-14 gg) RWII	200 (1 a)	–	≤ 260	–	75 (1 h)	–	–	200 (24 h)	250 (8 h)
COV µg/m ³	–	–	–	–	200 (1 a)	–	≤ 200	–	–	600 (8 h)	400	400	–
PM₁₀	50 (24 h) 20 (1 a)	–	50 (24 h) 20 (1 a) AR: 75 LP: 15	–	50 (24 h) 20 (1 a)	–	≤40 (24 h)	50	–	50 (8 h)	90 (8 h)	90 (8 h)	–
PM_{2,5}	25 (24 h) 10 (1 a)	–	25 (24 h) 10 (1 a) AR: 50 LP: 10	25 (24 h)	25 (24 h) 10 (1 a)	–	≤15 (1 a)	–	–	25 (8 h)	40 (8 h)	40 (8 h)	–

⁵ a: anno; g: giorno; gg: giorni min: minuti; AR: Azione Rapida; LP: Lungo Periodo; No VG: No Valore Guida; VI: Valore Intervento; VR: Valore di Riferimento; RW I: Richtwert I, concentrazione di una singola sostanza al di sotto della quale allo stato attuale delle conoscenze non si aspettano danni alla salute. Il valore guida RW I viene dedotto dal RW II. RW II: Richtwert II, concentrazione di una sostanza il cui superamento richiede un intervento immediato, è valore operativo.

4.5 Indicatore per la qualità dell'aria interna

Non esiste un indicatore standard condiviso per la qualità dell'aria interna.

La qualità dell'aria interna è quindi espressa come risultato di un determinato tasso di ventilazione o come concentrazione risultante di CO₂ (UNI EN 15251 [21]).

La ventilazione richiesta è basata su criteri di salute e comfort, risultando, nella maggior parte dei casi, che i criteri relativi alla salute sono soddisfatti già dalla ventilazione richiesta per il comfort:

- gli effetti sulla salute possono essere attribuiti a componenti specifici di emissione, che devono essere controllati per raggiungere bassi valori di concentrazione;
- il comfort è correlato alla qualità dell'aria percepita (odore, irritazione); in questo caso, diverse fonti di emissione possono produrre odori, sebbene non vi sia un accordo generale su come le diverse fonti di odori debbano essere sommate.

Nell'attuale standardizzazione, i criteri di ventilazione possono essere espressi in tre modi diversi:

- A. calcolo della portata di ventilazione richiesta per la presenza di persone e per i diversi componenti costruttivi;
- B. calcolo della portata di ventilazione richiesta per persona o per unità di superficie;
- C. calcolo della portata di ventilazione in base ad un bilancio di massa e ad un livello prefissato della concentrazione di CO₂.

Nel calcolare la portata di ventilazione richiesta per la presenza di persone e per i materiali da costruzione (componenti costruttivi), con forti analogie tra i metodi indicati nei primi due punti precedenti, si procede, in funzione della categoria (e quindi in funzione della percentuale presunta di insoddisfatti), con un approccio prescrittivo e con una formulazione del tipo.

$$q_{tot} = n \cdot q_p + A \cdot q_B \quad (4.3)$$

- q_{tot} è la portata di ventilazione espressa in [L/s];
- n è il numero di persone di un ambiente;
- q_p è la portata di ventilazione unitaria (a persona), [L/s/pers];
- A è la superficie dell'ambiente [m²];
- q_B è la portata di ventilazione per unità di superficie per le emissioni dei materiali da costruzione, espressa in [L/s/m²].

Tabella 4.6 – Valori indicativi dei tassi di ventilazione consigliati per edifici non residenziali per tre categorie di inquinamento da materiali da costruzione.

Categoria	PPD [%]	Portata d'aria per persona q_p [L/s/pers]	Edificio con emissioni da materiali molto basse ⁶ q_B [L/s/m ²]	Edificio con emissioni da materiali basse ⁷ q_B [L/s/m ²]	Edificio con emissioni da materiali non basse q_B [L/s/m ²]
I	15	10	0,5	1	2
II	20	7	0,35	0,7	1,4
III	30	4	0,2	0,4	0,8

⁶ L'edificio ha emissioni inquinanti molto basse se tutti i materiali sono molto poco inquinanti e non è permesso fumare (né lo è mai stato). Materiali con emissioni molto basse sono materiali tradizionali naturali come pietra, vetro e metalli, notoriamente sicuri per le emissioni e materiali per cui l'emissione di composti organici volatili totali (TVOC) è inferiore a 0,1 mg/m²h, l'emissione di formaldeide è inferiore a 0,02 mg/m²h, l'emissione di ammoniaca è inferiore a 0,01 mg/m²h; l'emissione di composti cancerogeni (IARC) è inferiore a 0,002 mg/m²h; il materiale inoltre non deve emettere odori (PPD per odori inferiore al 10%).

⁷ L'edificio ha emissioni inquinanti basse se la maggioranza dei materiali è poco inquinante. I materiali a basso tenore di inquinamento sono materiali tradizionali naturali come pietra e vetro, notoriamente sicuri per le emissioni e materiali per cui l'emissione di composti organici volatili totali (TVOC) è inferiore a 0,2 mg/m²h, l'emissione di formaldeide è inferiore a 0,05 mg/m²h, l'emissione di ammoniaca è inferiore a 0,03 mg/m²h; l'emissione di composti cancerogeni (IARC) è inferiore a 0,005 mg/m²h; il materiale inoltre non deve emettere odori (PPD per odori inferiore al 15%).

Più interessante e più opportuno per edifici ad alta prestazione energetica, come sono gli nZEB, è l’approccio prestazionale, attraverso il quale la portata di ventilazione è stabilita in base ad un bilancio di massa e ad un livello prefissato della concentrazione di CO₂ che si vuole raggiungere.

In questo caso, dando per scontato l’impiego di aria esterna per la diluizione della CO₂ prodotta negli ambienti interni, si possono stabilire le portate di ventilazione sulla base di un bilancio di massa, in funzione della categoria (e quindi in funzione della percentuale presunta di insoddisfatti) così come riportato nella Tabella 4.7.

Tabella 4.7 – Esempi di concentrazioni di CO₂ consigliate sopra la concentrazione esterna.

Categoria	PPD [%]	Concentrazioni di CO ₂ ce sopra la concentrazione esterna [ppm]
I	15	350
II	20	500
III	30	800
IV	>30	> 800

Se la ventilazione viene controllata automaticamente (DCV), la portata di ventilazione deve essere adeguata al fine di mantenere la concentrazione massima calcolata di sostanze inquinanti. La portata di ventilazione può quindi variare tra un valore massimo e un valore minimo, con l’accortezza di mantenere comunque una portata di ventilazione minima durante i periodi di occupazione dell’edificio.

4.6 Considerazioni di riepilogo

Il tema della qualità dell’aria risulta estremamente complesso includendo aspetti relativi alla salute delle persone ed aspetti relativi al comfort.

Per alcuni dei più importanti inquinanti atmosferici interni sono stati pubblicati valori di orientamento della qualità dell’aria interna da alcuni Stati membri dell’UE; tuttavia, il verificarsi di queste sostanze chimiche nell’aria interna non è ancora regolamentato pienamente, in primo luogo perché non vi sono informazioni sufficienti per la valutazione dei rischi. Tra i diversi Paesi, inoltre, si riscontrano fattori di rischio e esposizioni molto diversificati, in dipendenza dell’impiego di materiali e tecniche di costruzione diverse, di condizioni climatiche diverse e di abitudini diverse.

Nella necessità di rispettare requisiti relativi alla salute e al comfort, grazie alla regolamentazione ed al controllo delle fonti di emissione, si può affermare che le portate di ventilazione per il comfort sono in generale sufficienti anche a soddisfare i criteri relativi alla salute.

In questi casi, il calcolo delle portate di ventilazione può essere di tipo prescrittivo, stabilendo le portate d’aria oppure di tipo prestazionale, stabilendo un valore obiettivo della concentrazione di un determinato inquinante, quale ad esempio l’anidride carbonica.

L’approccio prestazionale risulta sicuramente più efficace, ai fini del contenimento dei consumi energetici, soprattutto in combinazione con un sistema di automazione, in grado di adeguare le portate alla concentrazione obiettivo (di set-point).

Tuttavia, in molti casi, soprattutto in condizioni di aria esterna inquinata, cade l’assunto alla base del calcolo delle portate, ovvero la portata d’aria calcolata per il comfort non è in grado di soddisfare i requisiti per la salute, potendo addirittura rappresentare un veicolo all’introduzione di contaminanti dall’esterno verso l’interno.

Per questi casi, risulta necessario un approccio diverso, ancora prestazionale, che fissi un valore obiettivo anche per la concentrazione di altri inquinanti, pesando opportunamente gli aspetti relativi alla salute e gli aspetti relativi al comfort.

5 Una strategia di ventilazione per ridurre i costi legati alla IAQ

5.1 Premessa

Nei paragrafi precedenti si è discusso dei fabbisogni energetici di un edificio e delle problematiche relative alla qualità dell'aria in ambiente indoor.

Si è osservato che i fabbisogni energetici di ventilazione, in un edificio nZEB possono diventare rilevanti, soprattutto laddove siano prescritte grandi portate di ventilazione. Si è anche detto che interventi sui sistemi impiantistici possono ridurre i consumi energetici connessi alla ventilazione; in particolare, è stata sottolineata l'efficacia dei sistemi di automazione, che possono consentire di massimizzare l'efficienza dell'impianto, adeguandone il funzionamento, al variare delle condizioni ambientali esterne e dei profili di utilizzo e occupazione, mantenendo in ogni caso i massimi livelli di comfort, sicurezza e qualità.

Per quanto riguarda la qualità dell'aria, si è detto della complessità del tema, delle difficoltà di monitoraggio e controllo e delle peculiarità di ogni situazione che rendono problematica una generalizzazione a tutte le situazioni, con riferimento alla categoria di edificio e soprattutto alla sua collocazione.

In generale, condizioni di qualità dell'aria accettabili sono raggiunte grazie al controllo delle fonti di inquinamento e grazie alla diluizione degli inquinanti con aria esterna, partendo dall'assunto fondamentale che l'aria esterna sia più povera di inquinanti dell'aria interna. In questi casi, la portata di ventilazione può essere stabilita con un approccio prescrittivo o prestazionale, risultando quest'ultimo più efficace per il contenimento dei consumi energetici soprattutto in combinazione con un sistema di automazione.

In condizioni di aria esterna più inquinata dell'aria interna, viene meno l'assunto fondamentale e si rende necessaria la definizione di una strategia di ventilazione appropriata.

5.2 I costi legati alla IAQ

La maggior parte dei tentativi di predisposizione di Linee Guida nel settore della qualità dell'aria indoor si basano sulla limitazione di uno specifico contaminante, sulla base di considerazioni di tipo diverso, relative al comfort (e quindi anche alla produttività in ambiente di lavoro) o relative alla salute degli occupanti.

Al comfort e alla produttività sono collegati una serie di aspetti positivi quali l'aumento dei ricavi o la riduzione dei costi per le attività lavorative svolte. Più nel dettaglio, sono tre gli aspetti su cui porre l'attenzione:

- la prestazione lavorativa o la produttività del lavoratore;
- l'astensione dal lavoro per malattia;
- l'insorgere dei sintomi relativi alla cosiddetta Sindrome dell'edificio malato (Sick Building Syndrome – SBS) che si manifesta sotto forma di effetti nocivi specifici sulla salute o sotto forma di uno stato di disagio nei momenti di permanenza nell'edificio (irritazione degli occhi, del naso o della gola, tosse, difficoltà respiratorie o altri disturbi respiratori inferiori, mal di testa, sonnolenza e stanchezza)[22][23][24].

I meccanismi che legano la qualità dell'aria agli aspetti sopra elencati rimangono scientificamente incerti e probabilmente basati su quantità molto variabili o difficili da misurare, per cui esistono soltanto formule empiriche che collegano direttamente ogni risultato al tasso di ventilazione.

La prestazione lavorativa è stata associata alla ventilazione in numerosi studi [25]. In alcuni studi si evidenzia il legame tra la produttività e la diluizione dei composti organici volatili, in altri studi si evidenzia il legame tra la produttività e la diluizione della CO₂ anche se ci sono prove contraddittorie [26]; in altri studi

si evidenzia il ruolo della ventilazione nel miglioramento della IAQ percepita [27], anche se incrementi della produttività sono osservati anche quando la IAQ percepita è invariato[28]. L'incremento della produttività può essere correlato all'incremento delle prestazioni cognitive, con impatti maggiori nei settori ad alto compenso lavorativo[29].

L'astensione dal lavoro per malattia è legata ad una scarsa ventilazione [30]. Il presunto meccanismo è che le malattie infettive si diffondono più facilmente in ambienti con scarsa ventilazione, sebbene molti studi non siano riusciti a trovare il legame tra l'assenza di malattie e tassi di ventilazione molto alti.

I sintomi della SBS sono stati collegati a bassi tassi di ventilazione in diversi studi. La relazione si presume sia legata al ruolo della ventilazione nel diluire gli inquinanti atmosferici generati negli ambienti interni, ma, anche in questo caso, i meccanismi esatti (modalità, percorsi, specie irritanti sensoriali e fattori che contribuiscono) non sono ben compresi.

Gli impatti sulla salute della IAQ rappresentano dei rischi collettivi cui è sottoposta tutta la società e i cui costi non sono probabilmente percepibili da un responsabile decisionale legato all'edificio. Ci sono molti potenziali rischi sanitari legati alla IAQ, ma pochi sono certi e ben caratterizzati [31]; ad esempio, i composti organici volatili (VOC) sono troppo variabili in termini di composizione e troppo incerti nell'impatto sanitario [32][33][34], anche se alcuni dei loro effetti a breve termine possono essere almeno parzialmente riassunti in relazioni empiriche per valutarne l'impatto. Diverso è il discorso per $PM_{2.5}$ e per O_3 , due inquinanti originati in ambiente esterno, ampiamente studiati e che presentano una sufficiente stabilità delle fonti, dei meccanismi di trasporto e degli impatti sulla salute.

Nella definizione della giusta portata di ventilazione, il problema è rappresentato dalla necessità ovvia di massimizzare il comfort e minimizzare i rischi per la salute, non dimenticando di considerare i consumi energetici legati alla ventilazione.

Si è visto come esista un legame diretto tra le portate d'aria di ventilazione e i consumi energetici.

Al contrario il problema della diluizione degli inquinanti non presenta una correlazione altrettanto semplice e diretta; si tratta di conciliare soluzioni al problema che risultano tra di loro in contrasto: per diluire certi inquinanti conviene incrementare la portata di aria esterna, mentre per diluire altri inquinanti la soluzione può essere rappresentata da una diminuzione della portata di aria esterna.

In ogni caso, la soluzione al problema passa da una minimizzazione dei costi complessivi (CC), somma dei costi legati alla produttività (CP), alla salute (CS) e ai consumi energetici legati alla ventilazione (CE), con l'eventuale introduzione di pesi (a , b , c) per esaltare l'importanza di un aspetto rispetto agli altri.

$$CC = a \cdot CP + b \cdot CS + c \cdot CE \quad (5.1)$$

La semplice formulazione che porta alla definizione del costo complessivo nasconde la grande difficoltà di definire i costi dei tre aspetti, soprattutto quelli relativi alla produttività e alla salute, al variare dei contesti ambientali e lavorativi.

5.3 Ottimizzazione delle portate di aria di ricambio finalizzata all'efficienza energetica

Essendo i consumi energetici direttamente legati alla portata di ventilazione, con l'obiettivo dell'efficienza energetica, è necessario stabilire sotto quali condizioni e con quali mezzi si possa procedere ad una riduzione della portata d'aria di ventilazione, nel rispetto della normativa vigente.

Si è visto, infatti, che la norma UNI 10339, oltre a dare indicazione sui valori minimi di portata per garantire il benessere degli occupanti, consente delle deroghe nel caso in cui siano presenti condizioni di inquinamento specifico, rappresentate da sorgenti interne o esterne particolari, con particolare riguardo al

fatto che la qualità dell'aria esterna (da utilizzare per il ricambio dell'aria interna) debba essere considerata accettabile.

Si è anche visto come, per la norma UNI EN 15251, siano possibili approcci prescrittivi o prestazionali al problema e come per la qualità dell'aria interna siano previste diverse classi di qualità, in base alle differenze di concentrazione di CO₂ tra l'aria interna e l'aria esterna.

In un'ottica di edificio nZEB e quindi di edificio ad elevata prestazione energetica, l'approccio di calcolo al problema della IAQ non può che essere di tipo prestazionale, stabilendo un valore obiettivo della concentrazione di CO₂ che si vuole raggiungere e stabilendo di conseguenza le portate di ventilazione sulla base di un bilancio di massa, modulando la portata d'aria esterna in funzione delle condizioni di reale occupazione dell'edificio.

Per massimizzare l'efficacia di tale approccio risulta necessaria la presenza di un sistema di automazione, che misuri la concentrazione di CO₂ nell'aria interna e che agisca di conseguenza.

Qualora negli ambienti interni vi fossero sorgenti di inquinanti diversi dalla CO₂, sarebbe necessario valutare con le stesse modalità le portate di ventilazione per la diluizione di ognuno degli inquinanti.

Questo approccio può rimanere valido fintanto che l'aria esterna è più povera di inquinanti dell'aria interna e fintanto che la qualità dell'aria esterna può essere ritenuta accettabile, ovvero fintanto che non si abbiano superamenti dei limiti di concentrazione di uno degli inquinanti.

In questo caso l'introduzione di aria esterna comporta anche l'introduzione di inquinanti e quindi diventa necessaria una valutazione più dettagliata della situazione, che pesi gli aspetti della produttività (comfort), della salute e dei consumi energetici.

Volendo minimizzare i costi relativi alla salute e ai consumi energetici, si può procedere con una riduzione della portata di ventilazione, consapevoli del fatto che ciò comporterà probabilmente una riduzione del comfort e della produttività e quindi un incremento dei costi associati a questi aspetti.

Ogni qualvolta si dovesse procedere con una riduzione della portata, dovranno essere monitorate con maggior cura le concentrazioni degli inquinanti nell'ambiente interno e dovrà essere verificata, attraverso interviste al personale, la percentuale di insoddisfatti nei confronti della IAQ.

6 Gli inquinanti INDOOR

6.1 Scelta degli inquinanti da misurare

L'illustrazione effettuata in precedenza ha consentito di osservare come gli inquinanti indoor siano numerosi e come possano essere originati da diversi sorgenti.

Per le finalità dello studio, che riguarda il monitoraggio della qualità dell'aria interna in un edificio adibito ad uffici pubblici ai fini dell'ottimizzazione delle portate di aria di ricambio per l'efficienza energetica, si è deciso di scegliere alcuni inquinanti che possano descrivere la variazione dell'inquinamento indoor al variare della portata di ventilazione dell'impianto di climatizzazione [35][36].

In particolare si è deciso di scegliere i seguenti inquinanti:

- l'ozono (O_3), che è un gas velenoso, che si forma a livello del suolo quando altri inquinanti, principalmente ossidi di azoto e composti organici volatili, reagiscono a causa della presenza della radiazione solare; le persone particolarmente suscettibili ai rischi di esposizione all'ozono sono le donne in gravidanza e le persone più adulte;
- i VOC termine con il quale si individuano tutta una serie di composti chimici a base di carbonio che si trovano sotto forma di vapore; questi inquinanti sono presenti sia negli ambienti indoor (in quanto i VOC possono essere emessi da una gran quantità di prodotti quali vernici, colle, mobili, tessuti, stampanti, prodotti di pulizia, fumo di tabacco, materiali da costruzione) che outdoor (emessi da veicoli, o da attività industriali);
- il PM_{10} ovvero un mix di particelle solide e liquide (particolato) che si trovano in sospensione nell'aria aventi un diametro aerodinamico inferiore a $10 \mu m$; questo particolato può avere origine sia da fenomeni naturali (processi di erosione, dispersione di pollini, ecc.) sia da attività antropiche, in particolar modo dai processi di combustione e dal traffico veicolare (particolato primario);
- l'anidride carbonica (CO_2), che rappresenta il più comune fra gli inquinanti dovuti agli occupanti di uno spazio confinato, essendo il maggior costituente dei prodotti del metabolismo umano.

Il set di inquinanti da monitorare è costituito da alcuni inquinanti che permettono di descrivere sia l'inquinamento indoor che outdoor, e da alcuni che invece attengono unicamente all'inquinamento indoor. In questo modo è possibile mettere in relazione il contributo dell'inquinamento esterno al variare delle portate di ventilazione in impianti ad aria primaria.

Oltre al monitoraggio degli inquinanti chimici è stato condotto un monitoraggio dei parametri termoigrometrici indoor.

Negli ambienti campionato sono stati rilevati i seguenti fattori climatici: umidità relativa, temperatura dell'aria, temperatura media radiante, velocità dell'aria.

6.2 Protocollo di misura

Per definire l'opportuna strategia di monitoraggio degli inquinanti è indispensabile definire in modo inequivocabile quali siano gli obiettivi della misura e conoscere, ove possibile, le caratteristiche degli ambienti, delle sorgenti e delle attività svolte dagli occupanti.

Questo perché la quantità e le caratteristiche chimico-fisiche degli inquinanti dipendono da diversi fattori quali:

- la reattività delle sostanze monitorate;
- i processi di formazione di nuove particelle (particelle secondarie);
- l'interazione con le superfici dei materiali presenti;
- il contributo di inquinanti presenti nell'aria ambiente e nell'aria esterna (outdoor).

Le attività di campionamento e misura del O₃, PM₁₀, VOC e CO₂ consentono di disporre di dati e delle informazioni utili per:

- 1) fornire una descrizione oggettiva del livello di inquinamento *indoor* ed *outdoor* e stimarne i relativi contributi;
- 2) fornire una valutazione oggettiva delle modifiche del microclima ambientale collegate alla variazione delle portate d'aria primaria, che consenta di valutare l'insorgere di situazioni non confortevoli per i fruitori degli ambienti;
- 3) collezionare specifiche informazioni per agevolare i processi decisionali dei tecnici competenti, in sede di valutazione delle misure di efficienza energetica negli impianti di climatizzazione, con riferimento alla variazione delle portate di aria primaria in un dato ambiente *indoor*;
- 4) verificare il rispetto di valori guida o di riferimento stabiliti dalle Autorità competenti o da Organismi internazionali (es. WHO).

Si è, quindi, proceduto alla pianificazione dell'attività di monitoraggio per definire il periodo temporale di osservazione (durata della misura) per ottenere il valore di concentrazione di interesse. Poiché l'obiettivo della ricerca è il monitoraggio dell'*indoor air quality* ai fini dell'ottimizzazione delle portate di aria di ricambio per un miglioramento delle prestazioni energetiche di un edificio di pregio architettonico, si è deciso di avere una conoscenza dei valori medi orari, effettuando dei campionamenti di breve durata.

Per valutare l'efficacia delle azioni di efficientamento adottate, si è proceduto ad effettuare il monitoraggio nelle stesse condizioni prima e dopo l'intervento di efficientamento effettuato. Poiché la durata del campionamento è inferiore alla durata prevista dal valore guida, le misure ottenute consentiranno di fare delle considerazioni di tipo orientativo e non puntuale.

Se l'obiettivo è la valutazione dell'efficacia delle azioni adottate, le modalità di monitoraggio (es. durata) devono essere le stesse prima e dopo l'intervento-rimedio effettuato.

Il periodo di riferimento è stato dalle 10:00 alle 16:00. Durante il periodo di riferimento i campionamenti dei parametri monitorati (VOC, O₃, PM₁₀, CO₂) sono stati effettuati con infissi chiusi e posizionando i campionatori al centro della stanza ad una altezza di 1,50 m e per la durata di 30 min.

Si vuole osservare che il protocollo di misura scelto non intende definire una procedura e dei criteri atti a verificare il livello di rischio sanitario delle persone occupanti lo spazio confinato ma ha l'unico scopo di valutare l'inquinamento indoor al variare delle portate di ventilazione.

6.3 Posizionamento della strumentazione di prelievo

Tutte le sonde per la caratterizzazione termo-igrometrica sono state fissate allo stativo e quindi al cavalletto del BABUC (cfr. paragrafo 6.5.1), all'altezza di 1,00 m dal pavimento. Mentre le apparecchiature per la determinazione dei parametri di *indoor air quality* sono state posizionate, per tutta la durata dei campionamenti, ad un'altezza di 1,5 m da terra, corrispondente all'altezza media delle prime vie respiratorie umane.

6.4 Misure contemporanee in aria ambiente outdoor

Al fine di individuare il contributo dell'ambiente esterno ai livelli di concentrazione indoor degli inquinanti monitorati sono state condotte misure, quasi in contemporanea, degli stessi inquinati in modo da acquisire informazioni circa l'entità del contributo esterno. Questo perché i processi di ventilazione meccanica presenti nella struttura realizzano un costante scambio tra l'aria outdoor e l'aria indoor introducendo un'intrusione di inquinanti esterni.

I campionamenti in aria ambiente outdoor sono stati effettuati nelle vicinanze della presa d'aria primaria dell'impianto di condizionamento dell'edificio in studio e lontano dalle bocche di espulsione dell'aria.

6.5 Strumenti di misura

6.5.1 BABUC / E Multi-indicatore portatile per la misura di grandezze ambientali

BABUC/E è uno strumento indicatore di grandezze fisico-ambientali e chimiche, come temperatura, umidità, velocità dell'aria, e pressione. È in grado di essere immediatamente connesso a qualsiasi sonda e può visualizzare i valori istantanei di tutte le grandezze acquisite oppure, di ciascuna di esse, i valori statistici come media, minima, massima, ecc. BABUC/E possiede tre ingressi: due per sonde analogiche, ed uno per sonde impulsive.

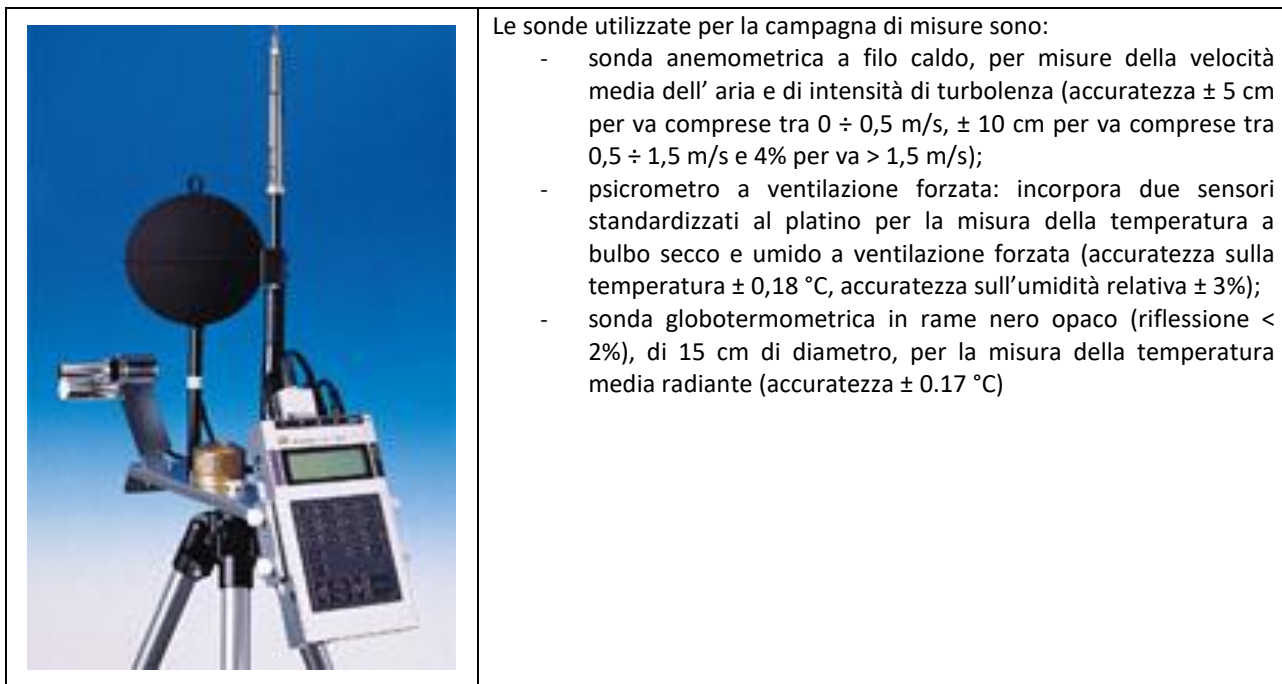


Figura 6.1 – BABUC/E.

6.5.2 Misuratore gas AQ-200

Il misuratore di gas Aeroqual è un misuratore per il monitoraggio delle concentrazioni di ozono nell'aria. Il misuratore di gas può essere dotato di sensori che si differenziano per il range di misura, esistono inoltre sensori adatti alla misura di altri tipi di gas che vengono riconosciuti automaticamente quando si collega il sensore al dispositivo.



Figura 6.2 – Misuratore gas AQ-200

7 Proposta di un algoritmo complessivo di valutazione dei parametri indoor e outdoor, con l'obiettivo di arrivare ad un indice numerico di sintesi del livello di qualità dell'aria

7.1 Generalità

La costruzione di un indice numerico composito per sintetizzare il livello di qualità dell'aria interna è certamente un compito delicato e pieno di insidie. Questo perché la varietà delle sostanze inquinanti potenzialmente presenti in un ambiente confinato rende di fatto impossibile l'individuazione di un indicatore sintetico d'inquinamento dell'aria valido in generale. A questo vanno aggiunti, inoltre, gli ostacoli che derivano dalla disponibilità dei dati e dalla scelta dei singoli indicatori, al loro trattamento per confrontarli (normalizzazione) ed aggregarli (ponderazione e aggregazione).

Nonostante i problemi menzionati, gli indici compositi sono ampiamente utilizzati da diverse organizzazioni sia nazionali che internazionali per misurare fenomeni sociali economici ed ambientali.

In questo studio è stato elaborato un indice per definire una qualità dell'aria indoor di un edificio adibito ad uso ufficio pubblico. Come ricordato in più occasioni in questo documento, l'elaborazione di un indice composito è un compito complesso le cui diverse fasi coinvolgono diverse alternative e possibilità che influenzano la qualità e l'affidabilità dei risultati.

I principali problemi che sono stati affrontati riguardano la scelta del quadro teorico, la selezione degli indicatori più rappresentativi e il loro trattamento al fine di confrontarli e di aggregarli. Le diverse fasi seguite possono essere così sintetizzate:

1. definizione del fenomeno da misurare; l'obiettivo dello studio è quello di monitorare la qualità dell'aria interna in un edificio adibito ad ufficio pubblico, in relazione alla variazione della portata d'aria primaria, ai fini di una valutazione dell'ottimizzazione delle portate di aria di ricambio per aumentare l'efficienza energetica dell'edificio; per cui gli obiettivi finali attengono a valutazioni energetiche e non a livelli di salubrità (epidemiologica) dell'aria interna indoor;
2. selezione di un gruppo di indicatori specifici; il gruppo di lavoro ha individuato un set di 4 indicatori (CO_2 , O_3 , VOC, PM_{10}); questi indicatori sono stati selezionati sulla base di considerazioni, quali la loro significatività e la loro speditività nelle metodologie di misura ed analisi; questa fase di selezione è stata piuttosto delicata in quanto il risultato finale è il frutto di una mediazione e di una sintesi fatta per limitare da una parte il numero dei descrittori della qualità dell'aria senza comprometterne il livello di approfondimento, e dall'altro di non precludersi l'utilizzo di strumentazione portatile e speditiva;
3. pesatura dei singoli indicatori; questa fase rappresenta la parte più delicata della procedura in quanto potrebbe risentire fortemente della soggettività del gruppo di lavoro; pertanto per ovviare agli inconvenienti derivante dalla soggettività del singolo studioso si è deciso di fare affidamento ad un processo partecipato attraverso un confronto a coppie dove ogni peso-criterio viene valutato rispetto agli altri pesi-criteri; si è quindi costruita una matrice dei confronti a coppie, che risulta essere quadrata e simmetrica rispetto alla diagonale principale;
4. metodo di aggregazione; il metodo di aggregazione dell'indice proposto è del tipo additivo, per cui sono stati sommati i valori ponderati ottenuti dai singoli indicatori ambientali; questa scelta è dipesa da un lato dall'obiettivo del lavoro e dall'altro dal tipo di "utenti" (fruitori finali); in particolare, si è voluto utilizzare una funzione matematica addittiva perché facilmente comprensibile e semplice per poter dare trasparenza alla metodologia di analisi proposta.

7.2 Indice di qualità dell'aria indoor (IQAI)

Lo scopo dell'IQAI (*Indice di Qualità dell'Aria Indoor*) proposto è quello di fornire una valutazione circa la qualità dell'aria all'interno di uno spazio confinato che possa permettere di valutare le modifiche e le influenze sulla qualità dell'aria interna al variare dei flussi di aria primaria dell'impianto di climatizzazione.

Lo stato attuale delle conoscenze non permette di conoscere, in modo preciso, né l'effetto di ogni inquinante al netto degli altri, né l'effetto sinergico della presenza di più inquinanti, per cui in mancanza di evidenze scientifiche tali da giustificare procedure di calcolo più sofisticate, è stato adottato il criterio guida nella definizione degli indici che è quello della semplicità e soprattutto in relazione agli scopi del loro utilizzo che sono generalmente di tipo comparativo e non di rischio epidemiologico associato.

L'indice di qualità dell'aria indoor viene calcolato come somma dei singoli indicatori relativi a ciascun inquinante considerato, moltiplicati per il peso loro attribuito. Come già detto, per il calcolo dell'indice vengono utilizzati quattro inquinanti, la CO₂, O₃, VOC, e il PM₁₀, alcuni dei quali presentano effetti sull'uomo di tipo acuto.

Per cui l'indice IQAI si calcola con la seguente formula:

$$IQAI = \sum_{x=1}^4 p_x \cdot I_x \quad (7.1)$$

dove:

- I_x è il valore normalizzato dell'indicatore dell'inquinante considerato;
- p_x è il peso dell'inquinante considerato;
- x è l'inquinante considerato.

Per i diversi tipi di inquinante è stato definito un criterio per poter passare dalla scala di misura originaria ad una scala di misura adimensionale. Pertanto si è stabilito, per ogni inquinante, una corrispondenza tra i valori nelle unità di misura originarie e una scala predefinita per il relativo indicatore secondo la seguente relazione:

$$I_x = \frac{I_A - I_B}{C_B - C_A} \times (C_x - C_B) + I_B \quad (7.2)$$

dove:

- I_A è valore dell'indice corrispondente al valore superiore;
- I_B è valore dell'indice corrispondente al valore inferiore;
- C_x è il valore della concentrazione dell'inquinante x-esimo;
- C_A è il valore superiore della concentrazione dell'inquinante considerato;
- C_B è il valore inferiore della concentrazione dell'inquinante considerato;

I valori per determinare l'indicatore adimensionale sono riportati in Tabella 7.1.

Tabella 7.1 – Valori delle concentrazioni per determinare l'indicatore adimensionale.

Livelli dell'indice	I _B	Buono		Moderato		Scadente		Pessimo	
		I _A	C _B	C _A	C _B	C _A	C _B	C _A	C _B
		0		> 1		> 2		> 3	
		≤ 1		≤ 2		≤ 3		≤ 4	
Inquinante		C _B	C _A	C _B	C _A	C _B	C _A	C _B	C _A
CO ₂ (ppm)		0	≤ 350	> 350	≤ 600	> 600	≤ 1000	> 1000	5000
O ₃ (ppm)		0	≤ 0,04	> 0,04	≤ 0,08	> 0,08	≤ 0,12	> 0,12	0,3
VOC (ppm)		0	≤ 0,3	> 0,3	≤ 0,9	> 0,9	≤ 3,0	> 3,0	4,6
PM ₁₀ (µg/m ³)		0	≤ 30	> 30	≤ 80	> 80	≤ 120	> 120	200

I valori delle concentrazioni sono stati desunti da studi riportati in letteratura scientifica (U.S. Environmental Protection Agency (EPA), WHO, etc.)

7.3 Le classi dell'Indice di Qualità dell'Aria Indoor

I valori dell'indice sono stati raggruppati in quattro classi con una ampiezza degli intervalli uniforme e pari a 1. L'adozione di un numero ridotto di classi è legata ad una più semplice valutazione degli scenari di efficienza energetica simulati.

In Tabella 7.2 sono riportate le classi identificate, con i corrispondenti intervalli di valori numerici e i relativi cromatismi.

Tabella 7.2 – Classi identificate – Intervalli e cromatismi.

Valori dell'Indice di Qualità Aria Indoor	Livello di qualità	Colore
$0 = IQAI \leq 1$	Buono	Verde
$1 < IQAI \leq 2$	Moderato	Giallo
$2 < IQAI \leq 3$	Scadente	Arancione
$3 < IQAI \leq 4$	Pessimo	Rosso

L'applicazione della (7.1), con l'introduzione di pesi opportuni per i quattro inquinanti considerati conduce al calcolo dell'IQAI e alla definizione della matrice attraverso la quale valutare la qualità dell'aria.

Nelle figure seguenti sono riportate le matrici per diverse combinazioni dei pesi attribuiti ai quattro inquinanti.

In particolare:

- in Figura 7.1, la matrice per il calcolo dell'IQAI è stata ottenuta ponendo pesi identici per i quattro inquinanti ($P_{PM10}=0,25$; $P_{VOC}=0,25$; $P_{O3}=0,25$; $P_{CO2}=0,25$);
- in Figura 7.2, la matrice per il calcolo dell'IQAI è stata ottenuta ponendo un peso maggiore all'anidride carbonica e quindi privilegiando gli aspetti relativi al comfort e all'produttività rispetto agli aspetti relativi alla salute ($P_{PM10}=0,15$; $P_{VOC}=0,15$; $P_{O3}=0,15$; $P_{CO2}=0,55$);
- in Figura 7.3, la matrice per il calcolo dell'IQAI è stata ottenuta ponendo un peso minore all'anidride carbonica e quindi privilegiando gli aspetti relativi alla salute rispetto agli aspetti relativi al comfort e all'produttività ($P_{PM10}=0,30$; $P_{VOC}=0,30$; $P_{O3}=0,30$; $P_{CO2}=0,10$).

La definizione dei pesi degli indicatori è collegata alla (5.1), ragionando esclusivamente in termini di costi, stante la difficoltà di valutare e di generalizzare a diverse situazioni i costi legati alla produttività e i costi relativi alla salute.

Una modalità alternativa, sicuramente di più facile attuazione, prevede la consultazione di un panel di studiosi, selezionati sulla base della esperienza maturata nel settore della qualità dell'aria. Tale modalità di definizione dei pesi sarà approfondita in una fase successiva della ricerca.

In questa fase, in via preliminare saranno impiegati pesi identici per i quattro inquinanti.

8 Campagna di monitoraggio e simulazione energetica

Il tema sviluppato nell'ambito del presente accordo di collaborazione tra ENEA e Dipartimento di Pianificazione Design Tecnologia dell'Architettura – PDTA - dell'Università di Roma Sapienza riguarda il monitoraggio della qualità dell'aria interna in un edificio ad elevate prestazioni adibito ad uffici di proprietà della Pubblica Amministrazione per la ottimizzazione delle portate di aria di ricambio finalizzata all'efficienza energetica».

Sulla base di quanto indicato nei capitoli precedenti relativamente all'ottimizzazione delle portate d'aria finalizzata all'efficienza energetica (cap. 5) e relativamente all'IQAI per la valutazione della qualità dell'aria (cap.7) si è proceduto ad una campagna di monitoraggio e ad una simulazione energetica volta a validare la metodologia proposta.

In particolare, è stato selezionato un edificio avente caratteristiche tali da consentire l'applicazione del metodo e sono state effettuate misure con gli impianti di ventilazione funzionanti alla portata nominale e misure con gli impianti di ventilazione funzionanti a metà della portata nominale. Parallelemente sono state effettuate delle simulazioni energetiche volte a valutare il risparmio energetico tra le due situazioni.

8.1 Il caso studio: il palazzo ex Banco Napoli della Camera dei Deputati

Il palazzo Banco di Napoli, compreso tra via del giardino Theodoli, via del Parlamento e via del Corso, è attualmente sede degli uffici amministrativi della Camera dei Deputati e conserva ancora nell'ampio salone centrale a piano terra, gli antichi sportelli bancari del banco di Napoli di cui era sede.

Si colloca ad un'altitudine di 20 metri sul livello del mare, ad una latitudine nord di 41°53' e una longitudine est di 12°28'. Ha complessivamente una superficie in pianta netta di 4.673 m² (superficie lorda di 6.676 m²) e un volume netto di 17.636 m³ (volume lordo di 25.195 m³).



Figura 8.1 – Vista dell'edificio e ubicazione

Il Banco Napoli si inserisce all'interno della città storica rientrando nel tessuto di origine medioevale (T1) come definito dalle Norme tecniche del PRG vigente nel comune di Roma. Si tratta di specifiche morfologie d'impianto dei "Tessuti di origine medievale" (T1) della Città Storica condizionati da alcuni grandi edifici speciali antichi sia nell'impianto planimetrico che nelle strutture in elevazione.

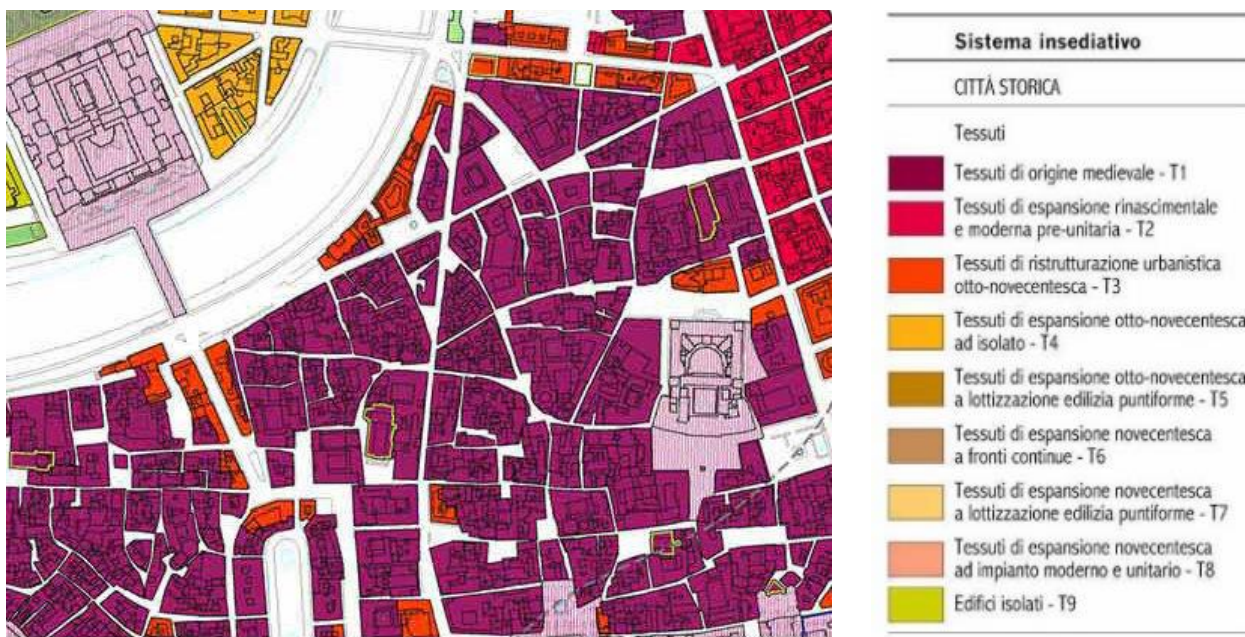


Figura 8.2 – Tessuto urbanistico in cui ricade il Palazzo Banco Napoli

Le caratteristiche costruttive dell’involucro sono state individuate mediante indagine storica e analisi strumentali non distruttive. Le strutture portanti verticali, sia di bordo che interne, sono di tipo massivo costituite da murature intonacate con muratura mista in pietre e mattoni, tale da conferire all’edificio un’elevata inerzia termica; gli spessori sono variabili da 89 a 45 cm, e risultano maggiori ai piani bassi e minori ai piani alti dell’edificio; la trasmittanza calcolata dipende dallo spessore delle pareti e varia da 0,60 a 1,08 W/m²K; anche la massa frontale varia, in funzione degli spessori, da 1360 a 656 kg/m². I solai di copertura non sono isolati termicamente e risultano in parte praticabili con pavimentazione e in parte non praticabile (trasmittanza termica media pari a 1,51 W/m²K). Anche il solaio inferiore è privo di materiale isolante e ha una trasmittanza termica pari a 1.34 W/m²K.

Le chiusure trasparenti, in larga parte non originali, sono di diverse geometrie, con telaio in legno e vetrocamera 4-12-4 (trasmittanza termica 3,74 W/m²K). Tutte le superfici finestrate hanno schermature solari esterne costituite da persiane.

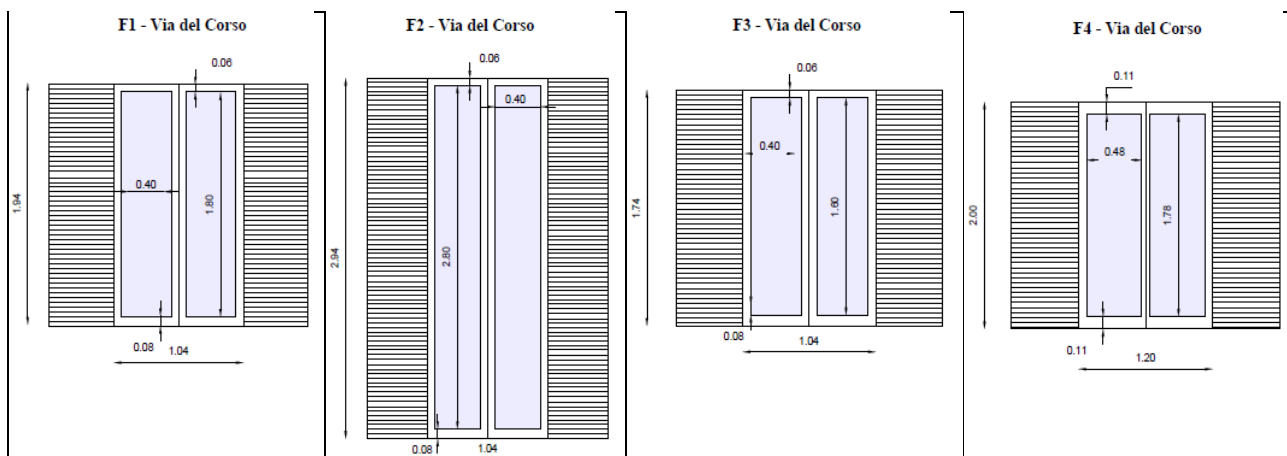


Figura 8.3 – Abaco finestre

Rispetto alla costruzione originaria, l’edificio è stato oggetto di vari interventi, in parte volti al miglioramento della prestazione energetica. Tuttavia essendo un bene di interesse storico, e quindi sottoposto a vincoli di conservazione, gli interventi sull’intero sistema edificio-impianto sono stati pianificati in una visione strategica che ha tenuto conto dell’elevato pregio del complesso.

PIANTA: Piano 1° A
PIANTA: Piano 2° BCD



Figura 8.4 - Vista in piano Piano 1°

PIANTA: Piano 2° A
PIANTA: Piano 3° BCD

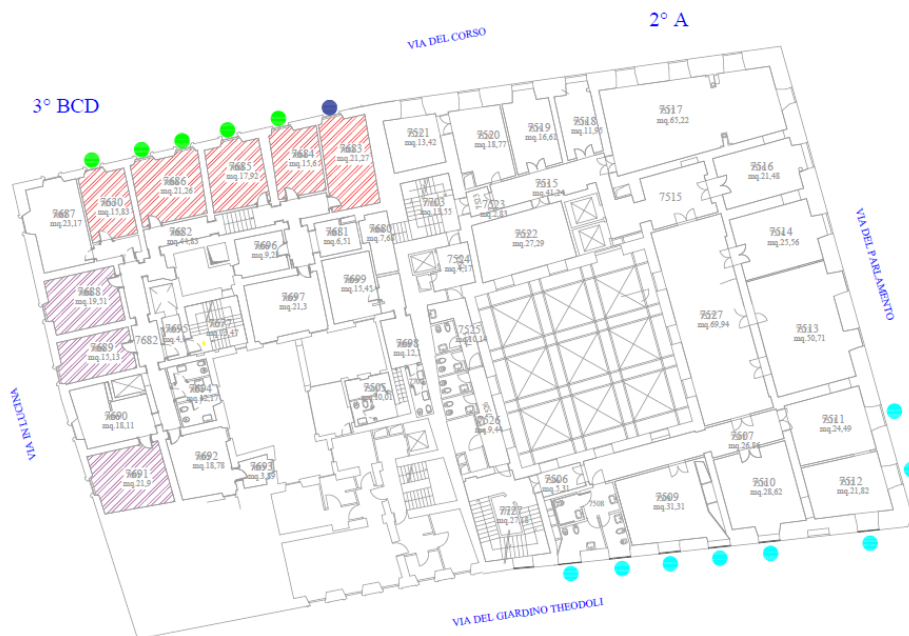


Figura 8.5 - Vista in piano Piano 2°

PIANTA: Piano 3° A
3° A



Figura 8.6 - Vista in piano Piano 3°

L'edificio è collegato alle reti pubbliche di fornitura dell'energia elettrica e del gas ed è dotato di pannelli solari di tipo termico per la preparazione dell'acqua calda sanitaria.

Dal punto di vista elettrico, il Palazzo ex Banco Napoli è collegato alla rete elettrica locale di ACEA, con un punto di consegna in Media Tensione, a 20.000 V; la cabina di trasformazione MT/BT è posizionata al primo piano seminterrato dell'edificio; a valle della cabina di trasformazione, è posizionato il quadro generale di bassa tensione. Le utenze sono raggruppate in tre sezioni al fine di garantire la giusta sicurezza di alimentazione (sezione di emergenza con UPS, sezione privilegiata sotto gruppo elettrogeno e sezione normale).

Dal punto di vista termico sono presenti diverse tipologie di impianto, al servizio di zone con destinazione d'uso diversa e con orari di occupazione diversi:

- Zona Uffici palazzo A, climatizzata con un impianto del tipo aria primaria e ventilconvettori; l'unità di trattamento aria è posizionata in copertura, ha una portata di 6.000 m³/h; i ventilconvettori sono del tipo a quattro tubi;
- Zona Uffici palazzo B – C –D climatizzata con un impianto del tipo aria primaria e ventilconvettori; l'unità di trattamento aria è posizionata in copertura, ha una portata di 12.500 m³/h; i ventilconvettori sono del tipo a quattro tubi;
- Zona Banca Atrio ed ingresso climatizzata con impianto a tutt'aria; l'unità di trattamento aria è posizionata in copertura, ha una portata di 17.500 m³/h;
- Zona sotterraneo, climatizzata con un impianto del tipo aria primaria e ventilconvettori; l'unità di trattamento aria è posizionata al piano sotterraneo, ha una portata di 6.000 m³/h; i ventilconvettori sono del tipo a quattro tubi;
- Zona Polizia e controllo visitatori, climatizzata con un impianto ad espansione diretta;
- Servizi igienici, riscaldati con radiatori e dotati di opportuni sistemi di estrazione.

Sulla copertura dell'edificio sono posizionate la centrale termica (in un locale dedicato) e la centrale frigorifera (in zona tecnica all'aperto) e i collettori solari per la preparazione dell'acqua calda sanitaria:

La centrale termica è dotata di 4 caldaie tradizionali marca BONGIOVANNI tipo BONGAS 2/14 potenzialità di 263,3 kW ciascuna alimentate a gas.

A lato della centrale termica sempre sul corpo di fabbrica A lato via del Parlamento sono posizionate le due pompe di calore che costituiscono la centrale frigorifera, modello 30RQ 0402-0129-PEE, potenza frigorifera ciascuna di 366 kWf e potenza termica 407 kWt.

Sono inoltre presenti 3 impianti VRF dislocati sui due corpi dell'edificio a servizio dell'atrio, dei locali Polizia e dell'area di controllo visitatori e delle cabine elettriche (pompa di calore Daikyn per la cabina elettrica da 35 kWf e 38 kWt; pompa di calore Panasonic da 22 kWf e 25 kWt per l'ingresso principale; pompa di calore Panasonic da 22 kWf e 25 kWt per locali polizia).

La produzione di acqua calda sanitaria avviene presso la centrale termica in copertura ed è integrata da un sistema di 13 collettori solari, per una superficie complessiva di 26 m².



Figura 8.7 – Vista della centrale termica, di una delle pompe di calore e delle unità esterne dell'impianto VRF



Figura 8.8 – Vista dei collettori solari, dell'unità di trattamento aria al servizio degli Uffici B- C –D e del relativo sistema di regolazione

La gestione degli edifici prevede gli orari di accensione degli impianti riportati nella tabella seguente.

Tabella 8.1 – Orari di funzionamento degli impianti di climatizzazione

Orario estivo			Orario invernale		
Lun-Ven	Sab	Dom	Lun-Ven	Sab	Dom
8-19	Spento	Spento	7-13 16-19	7-13	Spento

8.2 Campagna di monitoraggio

All'esterno del Palazzo Ex Banco Napoli sono state effettuate misure sia a livello stradale, in Via Del Giardino Theodoli (strada interdotta al traffico veicolare), che sulla copertura, dove sono ubicate le captazioni di aria esterna delle unità di trattamento aria.

All'interno, sono state scelte stanze a destinazione d'uso ufficio, servite dalle due UTA, che forniscono aria primaria rispettivamente agli uffici lato A e agli uffici lato BCD. Sono state campionate due stanze per ogni piano e per ogni lato a partire dal secondo piano del Palazzo, scegliendo quegli ambienti che garantissero una occupazione costante con finestre rigorosamente chiuse per tutto l'orario lavorativo (Tabella 8.2).

Tabella 8.2 – Stanze campionate.

LATO/PIANO	NUMERO	OCCUPAZIONE
2 - BCD	7662	3 persone
2 - BCD	7659	2 persone
2 - A	7519	2 persone
2 - A	7520	2 persone
3 - BCD	7685	2 persone
3 - BCD	7687	2 persone
3 - A	7543	2 persone
3 - A	7544	2 persone

Le misure sono state effettuate in due diverse condizioni di funzionamento, con le due UTA funzionanti alla portata nominale (ex-ante) e con le due UTA funzionanti ad una portata pari alla metà della portata nominale (ex post), avendo attuato un intervento sui ventilatori di mandata e di ripresa delle unità di trattamento aria.

Il protocollo di misura di qualità dell'aria ha previsto rilevazioni e campionamenti delle variabili termoigrometriche che si sono svolte parallelamente alle misure di qualità dell'aria, nelle stesse giornate e con le stesse modalità.

8.2.1 Misurazione delle grandezze termo-igrometriche

Le misure ex ante sono state svolte nelle giornate del 14/07/2017 e del 21 /07/2017 con l'impianto funzionante alla portata nominale.

I risultati delle misure effettuate sono riportati in Figura 8.9 e in Tabella 8.3.

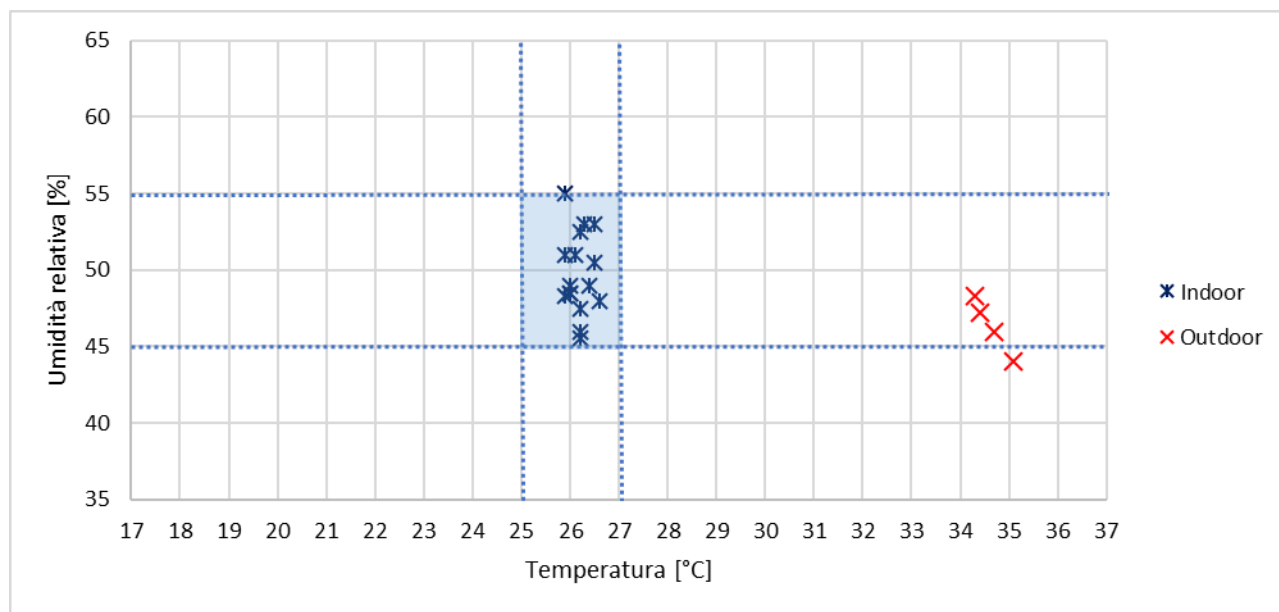


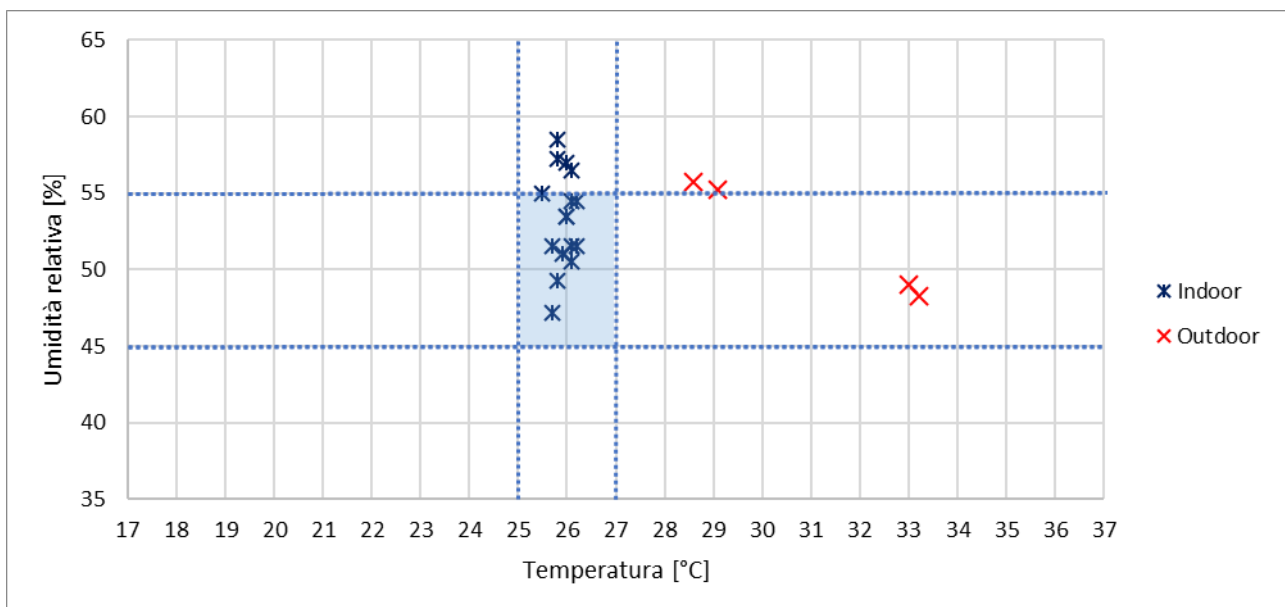
Figura 8.9 – Grandezze termoigrometriche (ex-ante).

Dall'esame del grafico si può osservare come l'impianto di climatizzazione, in funzionamento alla portata nominale, risulti in grado di mantenere i parametri ambientali all'interno dell'intervallo di comfort (temperatura = 26°C ±1; umidità relativa = 50%±5).

Tabella 8.3 – Grandezze termoigrometriche (ex-ante).

			T media della campagna di misura [°C]	UR media delle campagna di misura [%]
14/7/2017	OUTDOOR	copertura	34,4	47,2
		lato strada Via Giardino Theodoli	34,3	48,3
	INDOOR	7662	25,9	48,3
		7659	26,5	53
		7519	25,9	55
		7520	26,2	52,5
		7685	26	49
		7687	26	48,5
		7543	25,9	51
7544	26,3	53		
21/7/2017	OUTDOOR	copertura	35,1	44
		lato strada Via Giardino Theodoli	34,7	46
	INDOOR	7662	26,2	45,5
		7659	26,6	48
		7519	26,1	51
		7520	26,4	49
		7685	26,2	47,5
		7687	26,2	46
		7543	26	48,5
7544	26,5	50,5		

Le misure termoigrometriche ex post sono state svolte nelle giornate del 01/09/2017 e del 15/09/2017 con l'impianto funzionante ad una portata pari alla metà della portata nominale. I risultati delle misure effettuate sono riportati in Figura 8.10 e in Tabella 8.4.



dai ventilconvettori, mentre insorgano problemi nel controllo dell'umidità relativa, che tende ad assumere valori più alti, uscendo per alcuni ambienti dall'intervallo di comfort.

Tabella 8.4 – Grandezze termoigrometriche (ex-post).

			T media della campagna di misura [°C]	UR media delle campagna di misura [%]
1/9/2017	OUTDOOR	copertura	33,2	48,3
		lato strada Via Giardino Theodoli	33	49
	INDOOR	7662	25,7	47,2
		7659	26,2	51,5
		7519	26	53,5
		7520	26,1	51,5
		7685	25,8	49,3
		7687	26,1	50,5
		7543	25,9	51
		7544	26,2	54,5
15/9/2017	OUTDOOR	copertura	29,1	55,2
		lato strada Via Giardino Theodoli	28,6	55,7
	INDOOR	7662	25,8	57,2
		7659	26,1	54,5
		7519	25,8	58,5
		7520	26,1	56,5
		7685	25,5	55,0
		7687	26,0	53,5
		7543	25,7	51,5
		7544	26,0	57

8.2.2 Misurazione delle concentrazioni degli inquinanti

Parallelamente alle misure termoisometriche si sono svolte le misure di qualità dell'aria, rilevando le concentrazioni degli inquinanti selezionati (anidride carbonica, PM₁₀, VOC, ozono).

I risultati delle misure effettuate sono riportati in Tabella 8.5 e in Tabella 8.6.

Tabella 8.5 – Concentrazioni degli inquinanti (ex-ante).

			CO ₂ [ppm]	PM10 [µg/m ³]	VOC [ppm]	O ₃ [ppm]
14/7/2017	OUTDOOR	copertura	341	57	0,036	0
		lato strada Via Giardino Theodoli	360	55	0,042	0
	INDOOR	7662	730	41	0,029	0
		7659	750	38	0,026	0
		7519	770	40	0,029	0
		7520	755	38	0,029	0
		7685	740	41	0,032	0
		7687	745	38	0,026	0
		7543	765	39	0,029	0
7544	770	41	0,032	0		
21/7/2017	OUTDOOR	copertura	340	59	0,027	0
		lato strada Via Giardino Theodoli	358	61	0,033	0
	INDOOR	7662	610	41	0,026	0
		7659	650	38	0,026	0
		7519	670	40	0,029	0
		7520	655	40	0,026	0
		7685	680	37	0,029	0
		7687	660	38	0,026	0
		7543	680	37	0,029	0
7544	660	39	0,029	0		

Tabella 8.6 – Concentrazioni degli inquinanti (ex-post).

			CO ₂ [ppm]	PM10 [µg/m ³]	VOC [ppm]	O ₃ [ppm]
1/9/2017	OUTDOOR	copertura	355	56	0,024	0
		lato strada Via Giardino Theodoli	352	58	0,027	0
	INDOOR	7662	740	36	0,013	0
		7659	750	38	0,012	0
		7519	720	33	0,012	0
		7520	730	38	0,011	0
		7685	760	36	0,012	0
		7687	730	34	0,012	0
7543	720	38	0,011	0		
7544	715	37	0,012	0		
15/9/2017	OUTDOOR	copertura	348	57	0,022	0
		lato strada Via Giardino Theodoli	355	61	0,022	0
	INDOOR	7662	712	37	0,012	0
		7659	760	38	0,012	0
		7519	720	39	0,012	0
		7520	720	38	0,009	0
		7685	730	36	0,012	0
		7687	700	38	0,012	0
7543	690	38	0,009	0		
7544	710	39	0,012	0		

I grafici che seguono riportano i risultati delle misure effettuate, nella situazione ex-ante e nella situazione ex-post, per ognuno degli inquinanti selezionati, con esclusione dell’ozono, la cui concentrazione, dalle misure effettuate, è risultata sempre pari a zero. Si sottolinea tale ultima circostanza, osservando che le misure effettuate hanno indicato sempre il valore zero, risultando quindi la concentrazione di ozono sempre nulla o comunque inferiore alla sensibilità della strumento utilizzato.⁸

Per comodità di rappresentazione, in ascissa, per tutti i grafici, è stata riportata la temperatura, conformemente a quanto fatto sopra per le grandezze termoigrometriche. In aggiunta, per lo sfondo dei grafici è stata utilizzata una colorazione corrispondente ai livelli indicati al paragrafo 7.2.

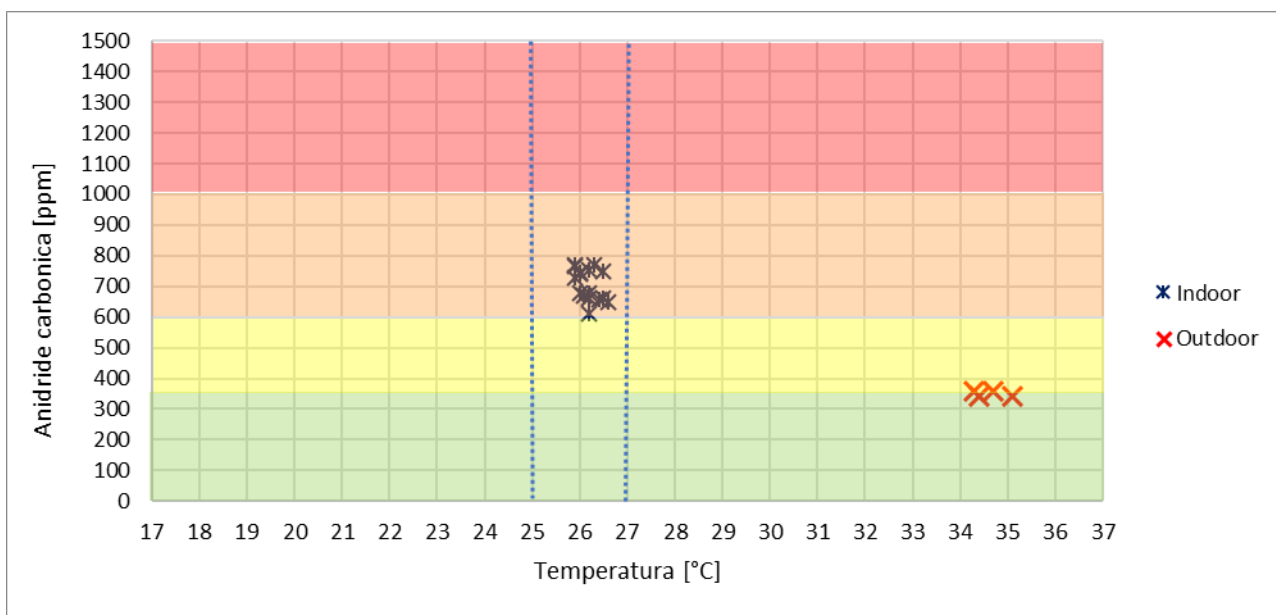


Figura 8.11 – Anidride carbonica (ex-ante).

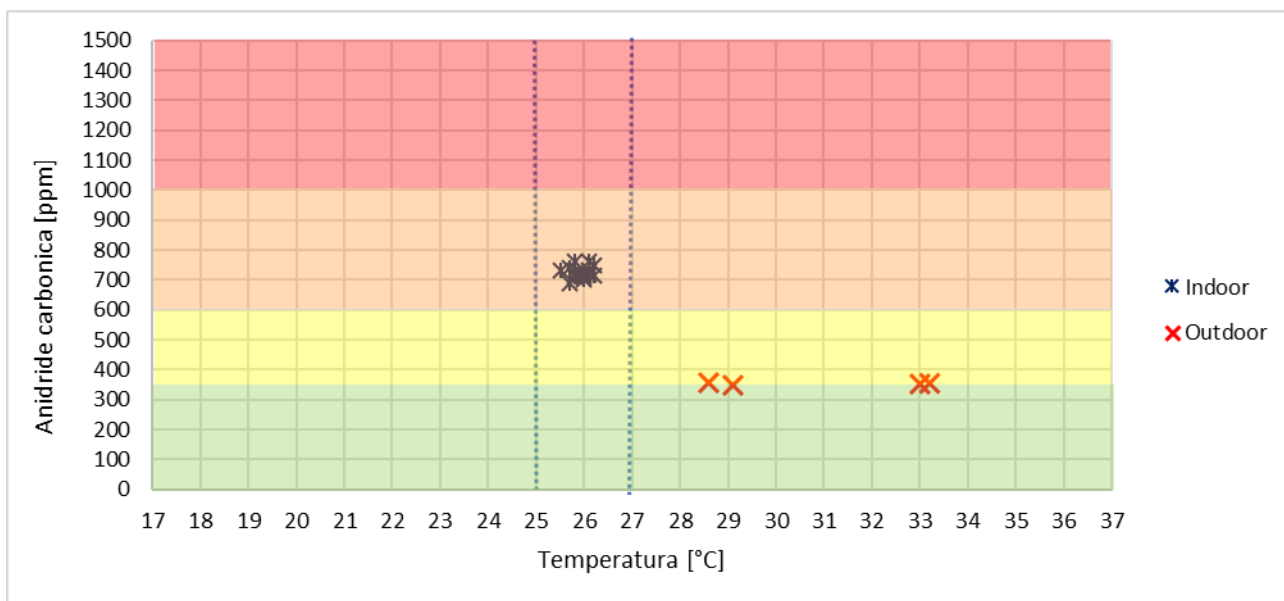


Figura 8.12 – Anidride carbonica (ex-post).

⁸ In aggiunta a quanto osservato, il risultato delle simulazioni effettuate conduce necessariamente a un approfondimento volto all’individuazione di un ulteriore inquinante da monitorare utile a caratterizzare l’inquinamento esterno.

L'osservazione congiunta di Figura 8.11 e Figura 8.12 consente di affermare che, tra la situazione ex-ante e la situazione ex-post, si hanno differenze minime, passando il valore della concentrazione media (tra i vari ambienti) da 705 ppm a 725 ppm, con un peggioramento che non incide in modo significativo sul livello dell'indice relativo all'anidride carbonica, che rimane in entrambe le situazioni al valore "scadente".

In termini relativi, prendendo come riferimento l'aria esterna, caratterizzata da una concentrazione di anidride carbonica pressochè costante (~350 ppm), l'incremento dovuto alle sorgenti interne rimane molto simile nelle due situazioni, conseguenza diretta della diminuzione della portata.

In particolare, i grafici di Figura 8.13 e Figura 8.14 riportano la classificazione per livelli così come riportata in Tabella 4.7 (UNI EN 15251).

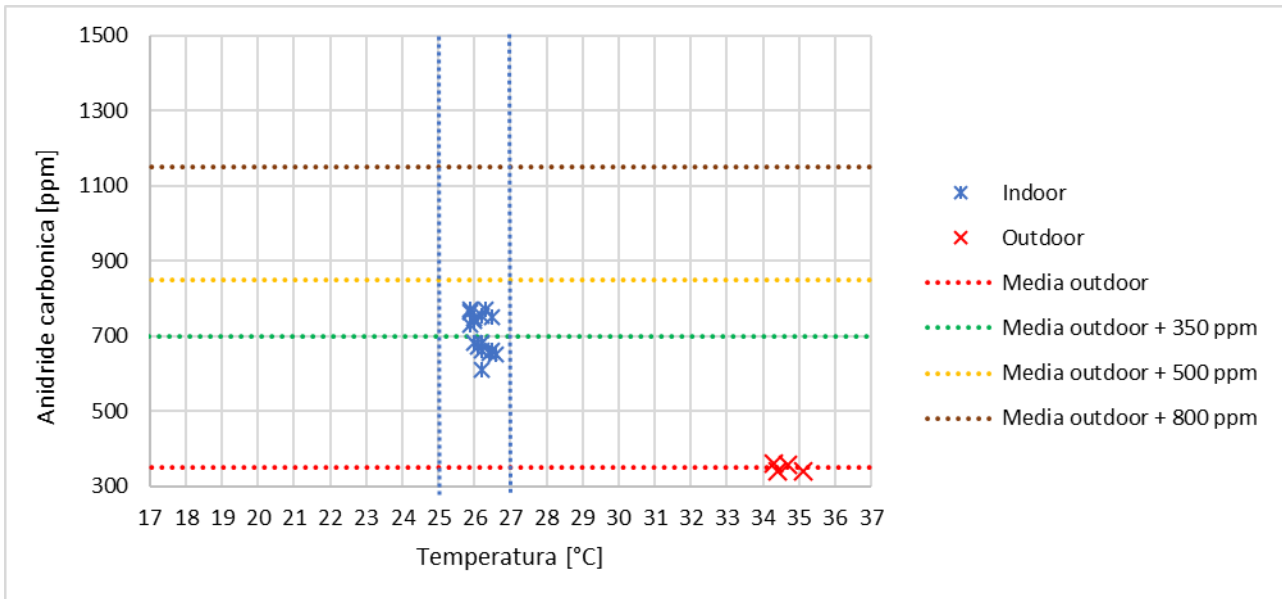


Figura 8.13 – Anidride carbonica (ex-ante).

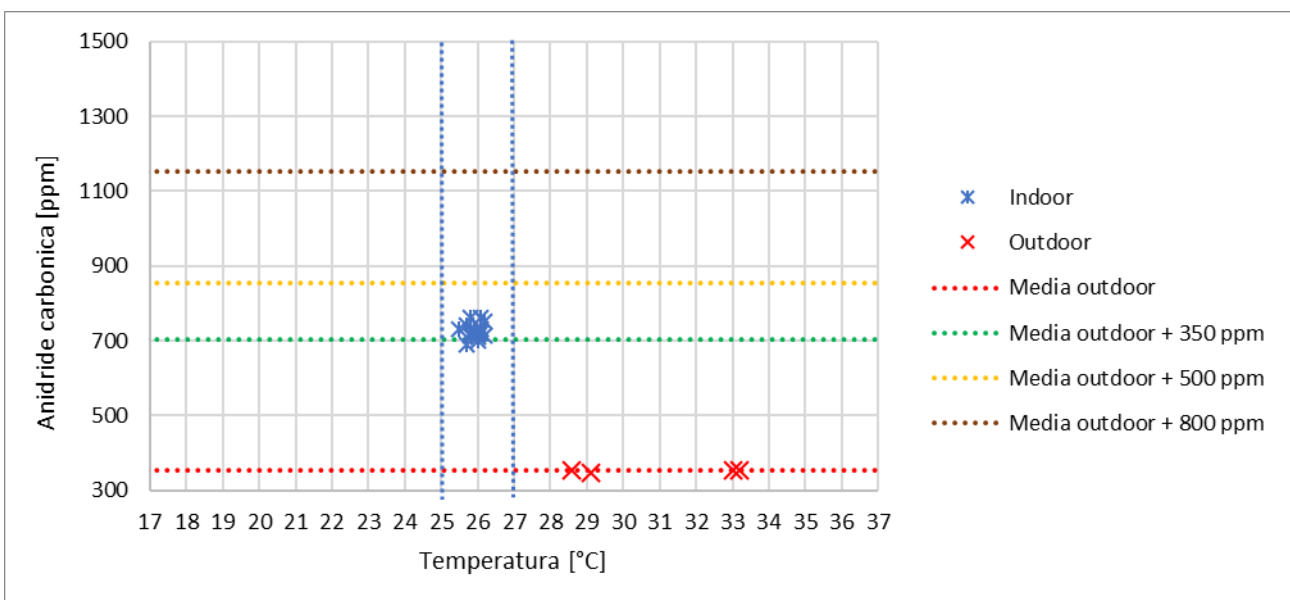


Figura 8.14 – Anidride carbonica (ex-post).

Anche utilizzando questo diverso approccio, si osservano poche differenze, sebbene in questo caso particolare, essendo tutti gli ambienti a cavallo della linea di separazione tra "Categoria I" e "Categoria II" si avrebbe un declassamento di alcuni degli ambienti osservati.

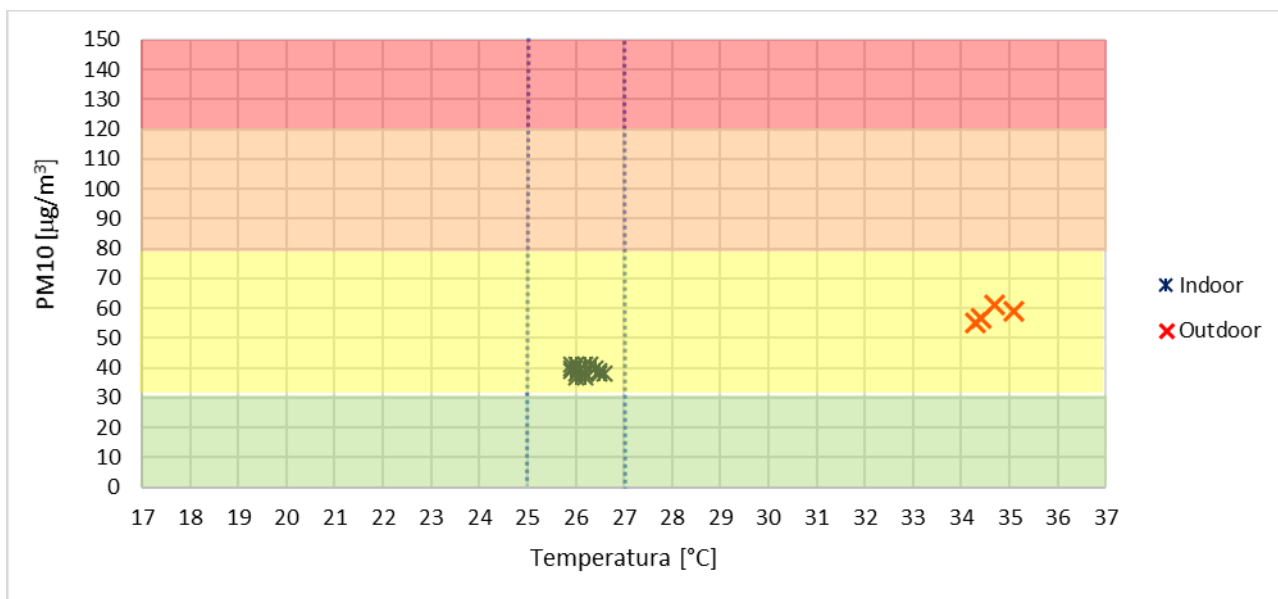


Figura 8.15 – PM10 (ex-ante).

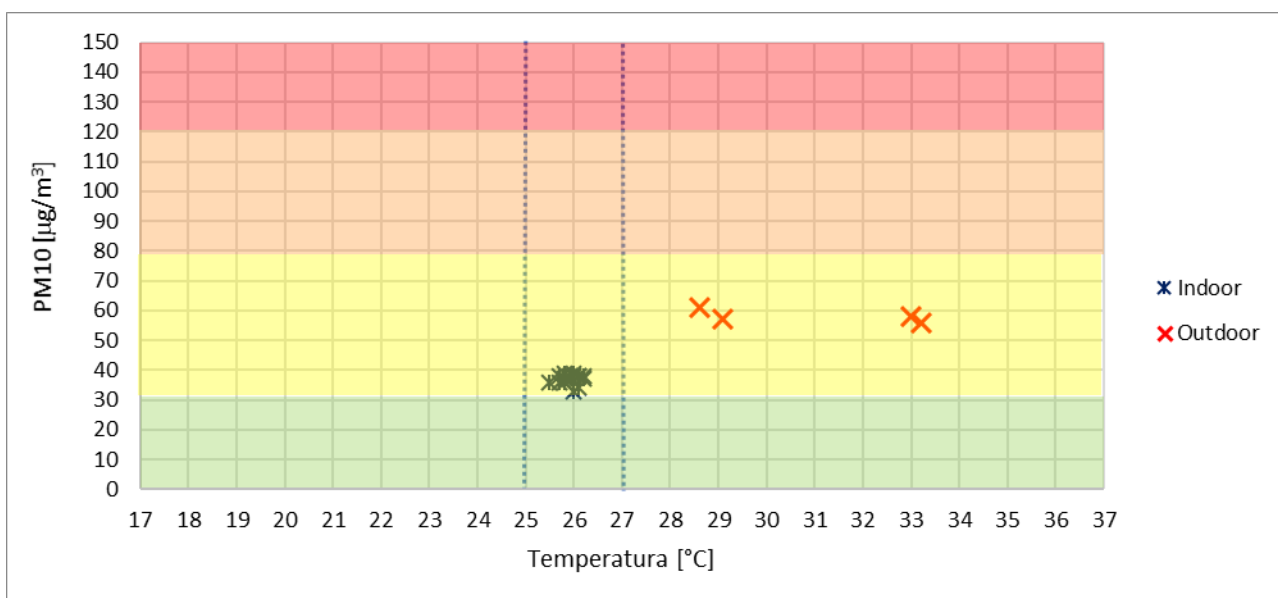


Figura 8.16 – PM10 (ex-post).

L’osservazione congiunta di Figura 8.15 e Figura 8.16 consente di affermare che, tra la situazione ex-ante e la situazione ex-post, si hanno differenze minime, passando il valore della concentrazione media (tra i vari ambienti) da $39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con un miglioramento che non incide in modo significativo sul livello dell’indice relativo al PM10, che rimane in entrambe le situazioni al valore “moderato”.

In termini relativi, prendendo come riferimento l’aria esterna, caratterizzata da una concentrazione di PM10 mediamente più alta ($58 \mu\text{g}/\text{m}^3$), la diminuzione dovuta all’azione dei filtri risulta leggermente più alta nella situazione ex-post, conseguenza diretta della diminuzione della portata.

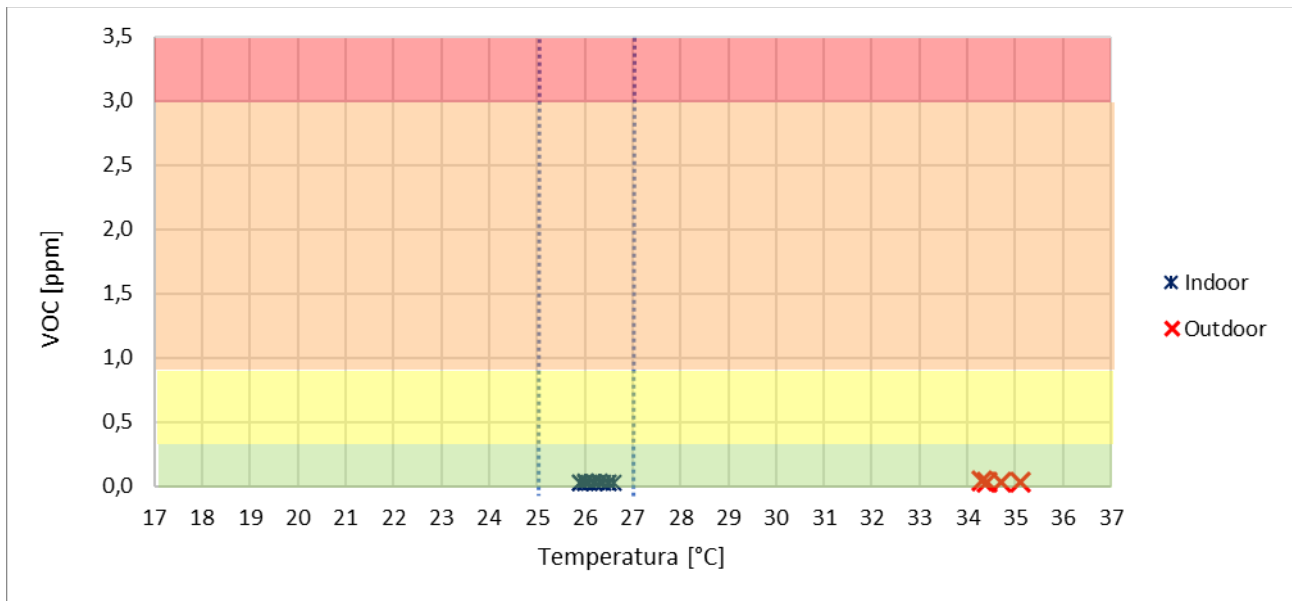


Figura 8.17 – VOC (ex-ante).

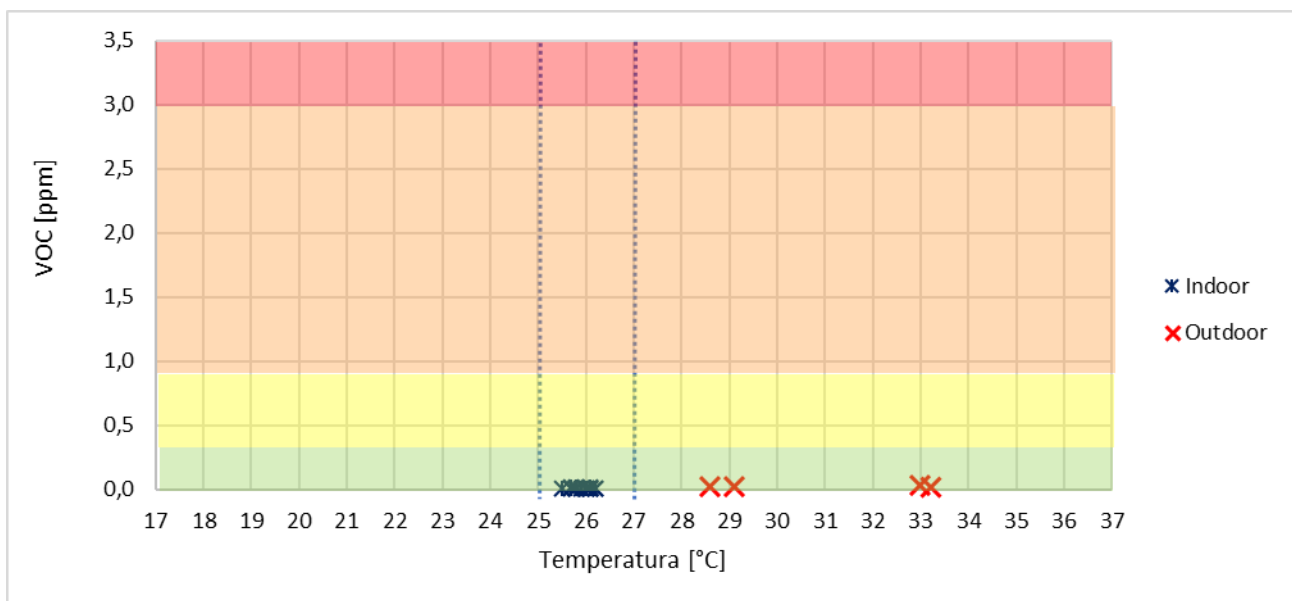


Figura 8.18 – VOC (ex-post).

L'osservazione congiunta di Figura 8.17 e Figura 8.18, nella modalità di rappresentazione conforme alle precedenti non consente di cogliere le differenze tra la situazione ex-ante e la situazione ex-post, che rimangono entrambe ben dentro al valore "buono".

Per una migliore lettura dei risultati conviene cambiare la scala di rappresentazione, focalizzando l'attenzione su un intervallo più stretto (Figura 8.19 e Figura 8.20).

In questa maniera si possono cogliere le differenze tra la situazione ex-ante caratterizzata da una concentrazione media di 0,028 ppm e la situazione ex-post caratterizzata da una concentrazione media di 0,011 ppm.

In termini relativi, prendendo come riferimento l'aria esterna, caratterizzata da una concentrazione di VOC mediamente più alta (0,034 nella situazione ex-ante e 0,0024 ppm nella situazione ex-post), la diminuzione dovuta all'azione dei filtri risulta più alta nella situazione ex-post, conseguenza diretta della diminuzione della portata.

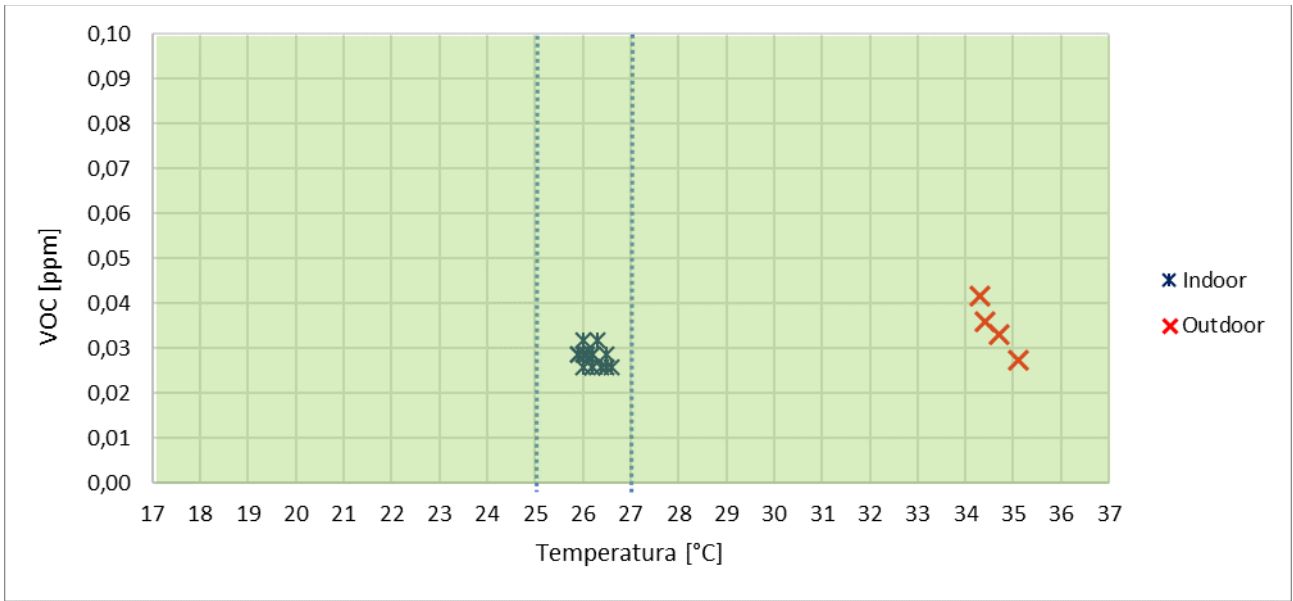


Figura 8.19 – VOC (ex-ante).

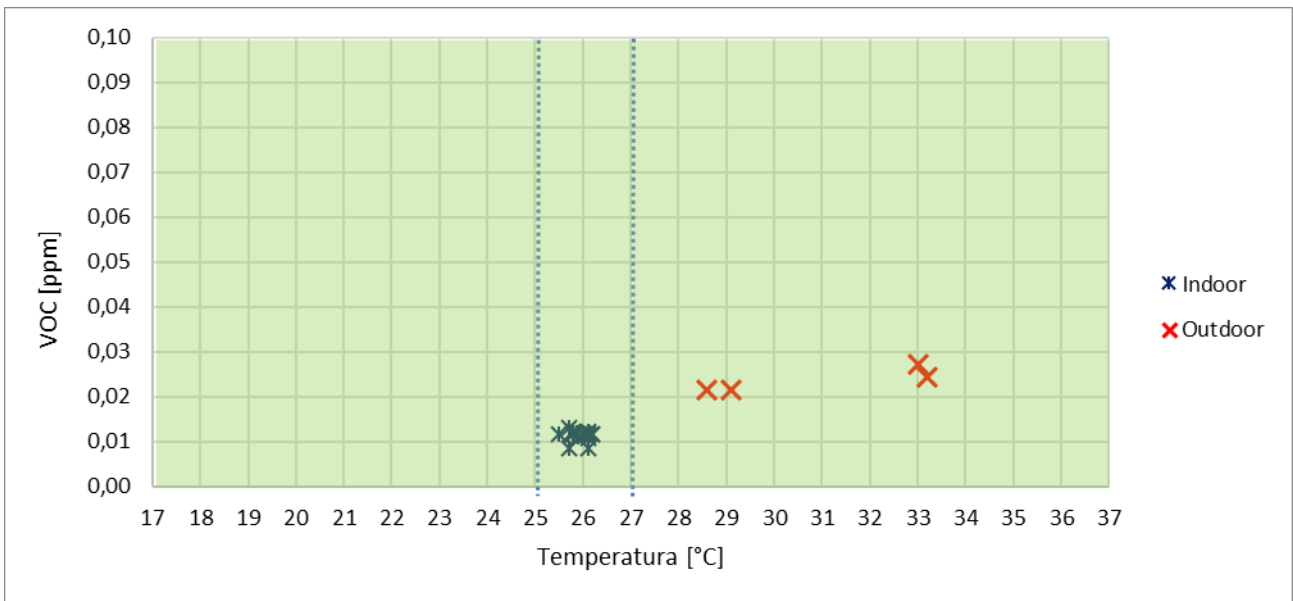


Figura 8.20 – VOC (ex-post).

8.2.3 Calcolo dell'indice IQAI

Avendo esaminato gli andamenti e le variazioni degli inquinanti monitorati e confrontato le situazioni ex-ante e ex-post, si procede ora al calcolo dell'indice IQAI e alla classificazione della qualità dell'aria.

La Tabella 8.7 e la Tabella 8.8 riportano il calcolo dell'IQAI, a partire dai dati delle concentrazioni degli inquinanti nella situazione ex-ante e nella situazione ex-post, avendo attribuito pesi identici ai quattro inquinanti ($P_{PM10}=0,25$; $P_{VOC}=0,25$; $P_{O_3}=0,25$; $P_{CO_2}=0,25$) e applicando, per estensione, l'indicatore IQAI anche all'aria esterna.

Tabella 8.7 – Concentrazioni degli inquinanti e IQAI (ex-ante).

			CO ₂ [ppm]	PM10 [µg/m ³]	VOC [ppm]	O ₃ [ppm]	IQAI
14/7/2017	OUTDOOR	copertura	341	57	0,024	0	0,66
		lato strada Via Giardino Theodoli	360	55	0,027	0	0,67
	INDOOR	7662	730	41	0,013	0	0,91
		7659	750	38	0,012	0	0,91
		7519	770	40	0,012	0	0,93
		7520	755	38	0,011	0	0,91
		7685	740	41	0,012	0	0,92
		7687	745	38	0,012	0	0,90
		7543	765	39	0,011	0	0,92
7544	770	41	0,012	0	0,94		
21/7/2017	OUTDOOR	copertura	340	59	0,022	0	0,42
		lato strada Via Giardino Theodoli	358	61	0,022	0	0,43
	INDOOR	7662	610	41	0,012	0	0,83
		7659	650	38	0,012	0	0,84
		7519	670	40	0,012	0	0,87
		7520	655	40	0,009	0	0,86
		7685	680	37	0,012	0	0,86
		7687	660	38	0,012	0	0,85
		7543	680	37	0,009	0	0,86
7544	660	39	0,012	0	0,86		

Tabella 8.8 – Concentrazioni degli inquinanti e IQAI (ex-post).

			CO ₂ [ppm]	PM10 [µg/m ³]	VOC [ppm]	O ₃ [ppm]	IQAI
1/9/2017	OUTDOOR	copertura	355	56	0,125	0	0,66
		lato strada Via Giardino Theodoli	352	58	0,145	0	0,66
	INDOOR	7662	740	36	0,1	0	0,88
		7659	750	38	0,09	0	0,89
		7519	720	33	0,1	0	0,85
		7520	730	38	0,1	0	0,88
		7685	760	36	0,11	0	0,89
		7687	730	34	0,09	0	0,86
		7543	720	38	0,1	0	0,87
7544	715	37	0,11	0	0,87		
15/9/2017	OUTDOOR	copertura	348	57	0,095	0	0,40
		lato strada Via Giardino Theodoli	355	61	0,115	0	0,42
	INDOOR	7662	712	37	0,09	0	0,86
		7659	760	38	0,09	0	0,90
		7519	720	39	0,1	0	0,88
		7520	720	38	0,09	0	0,87
		7685	730	36	0,1	0	0,87
		7687	700	38	0,09	0	0,86
		7543	690	38	0,1	0	0,85
7544	710	39	0,1	0	0,87		

Con le stesse modalità di rappresentazione usate in precedenza, la Figura 8.21 e la Figura 8.22 riportano i risultati del calcolo dell'IQAI.

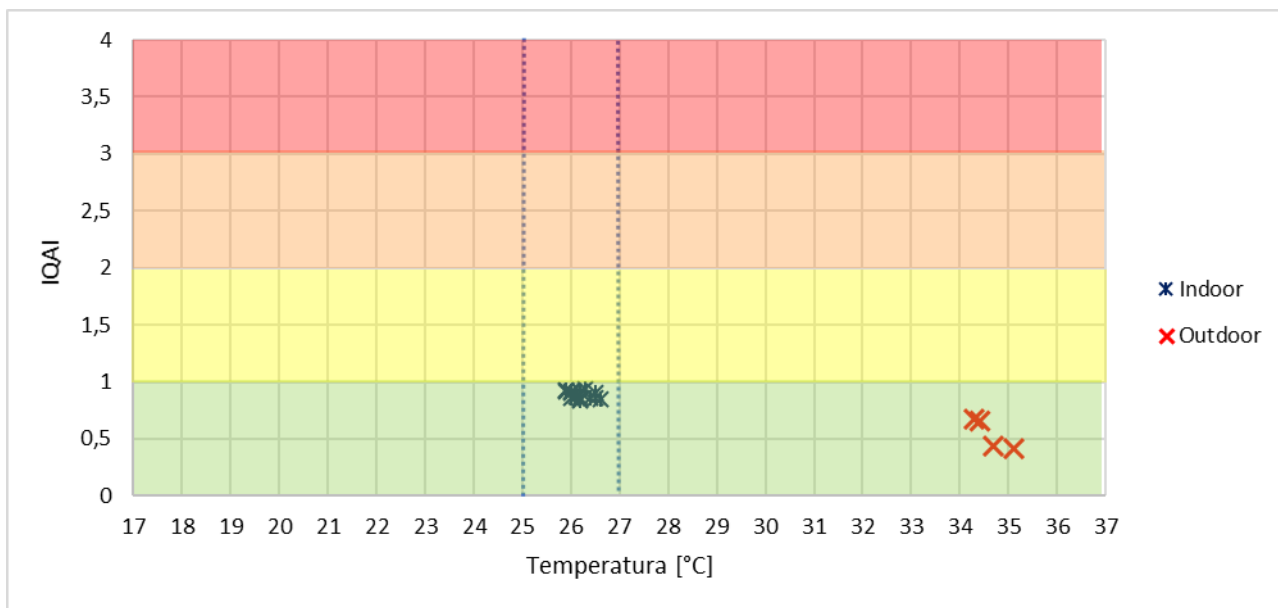


Figura 8.21 – IQAI (ex-ante).

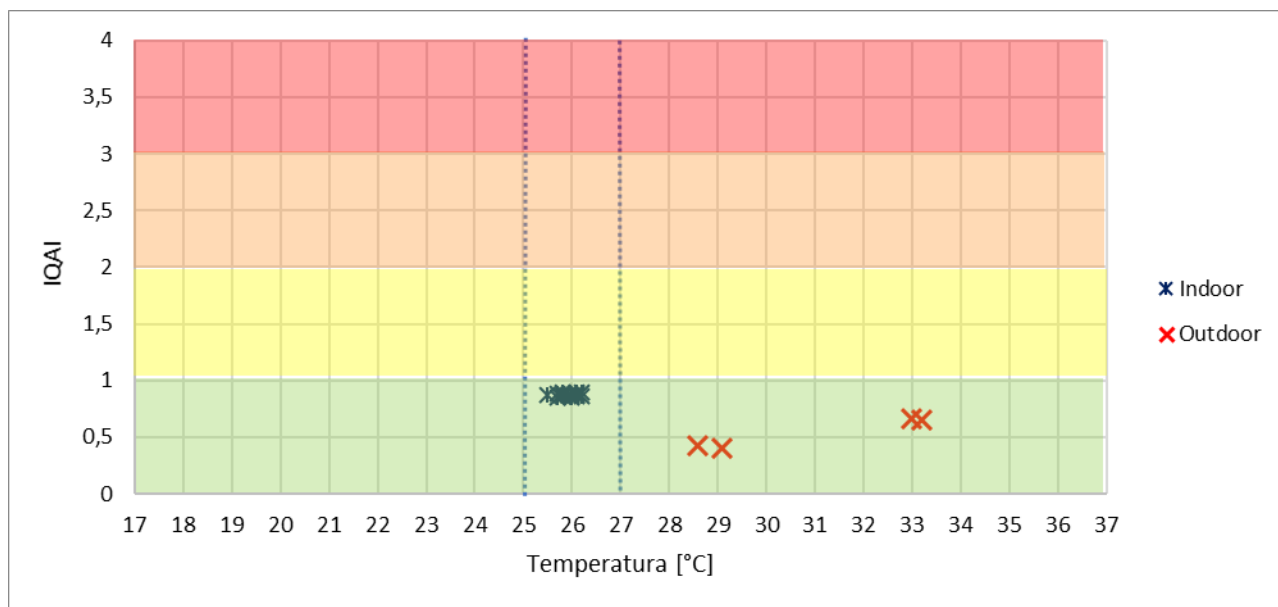


Figura 8.22 – IQAI (ex-post).

L’osservazione congiunta di Figura 8.21 e Figura 8.22 consente di affermare che non ci sono differenze sostanziali tra la situazione ex-ante e la situazione ex-post, che rimangono entrambe al livello “buono”.

In particolare, applicando l’indicatore anche all’aria esterna:

- nella situazione ex-ante a partire da aria esterna per la quale si ha $IQAI = 0,54$, per l’aria interna si ha $IQAI = 0,89$;
- nella situazione ex-post a partire da aria esterna per la quale si ha $IQAI = 0,54$, per l’aria interna si ha $IQAI = 0,87$, con un leggero miglioramento.

Ai fini di una ulteriore valutazione, non avendo rilevato valori significativi per l’ozono in nessuna delle misurazioni effettuate, confermando la scelta effettuata di utilizzare pesi identici tra i vari inquinanti, in Figura 8.23 e in Figura 8.24 sono riportati i risultati del calcolo, nella situazione ex-ante e nella situazione

ex-post, avendo attribuito pesi identici ai tre inquinanti rilevati e un peso simbolico all'ozono ($P_{PM10}=0,33$; $P_{VOC}=0,33$; $P_{O_3}=0,01$; $P_{CO_2}=0,33$) e applicando, per estensione, l'indicatore IQAI anche all'aria esterna.

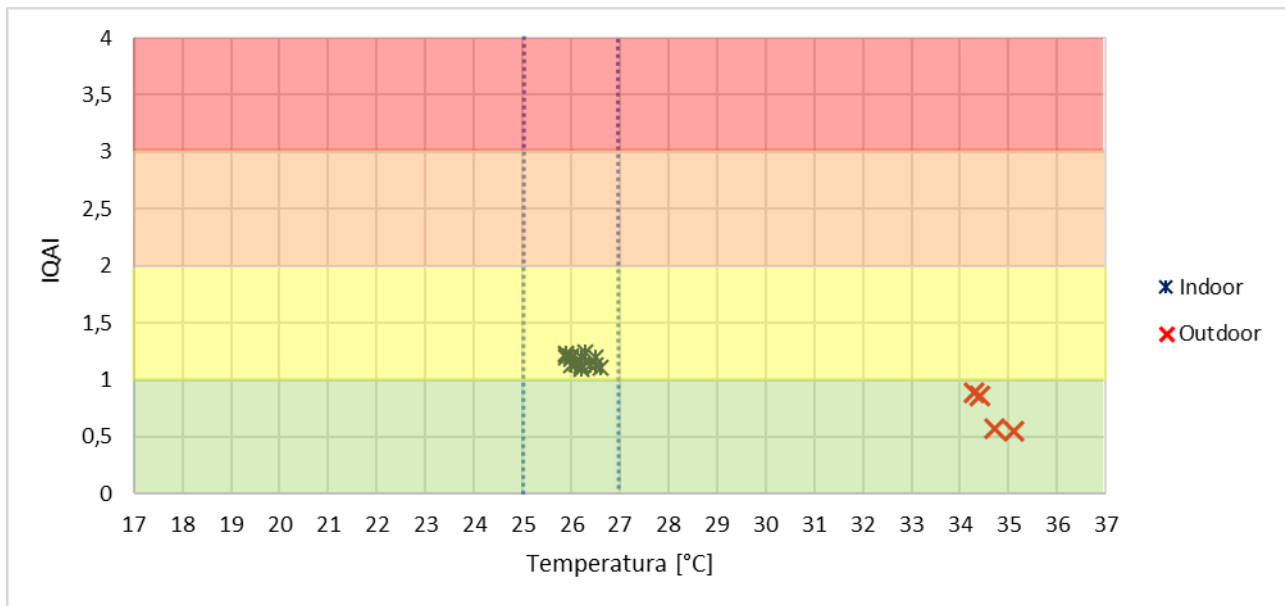


Figura 8.23 – IQAI (ex-ante).

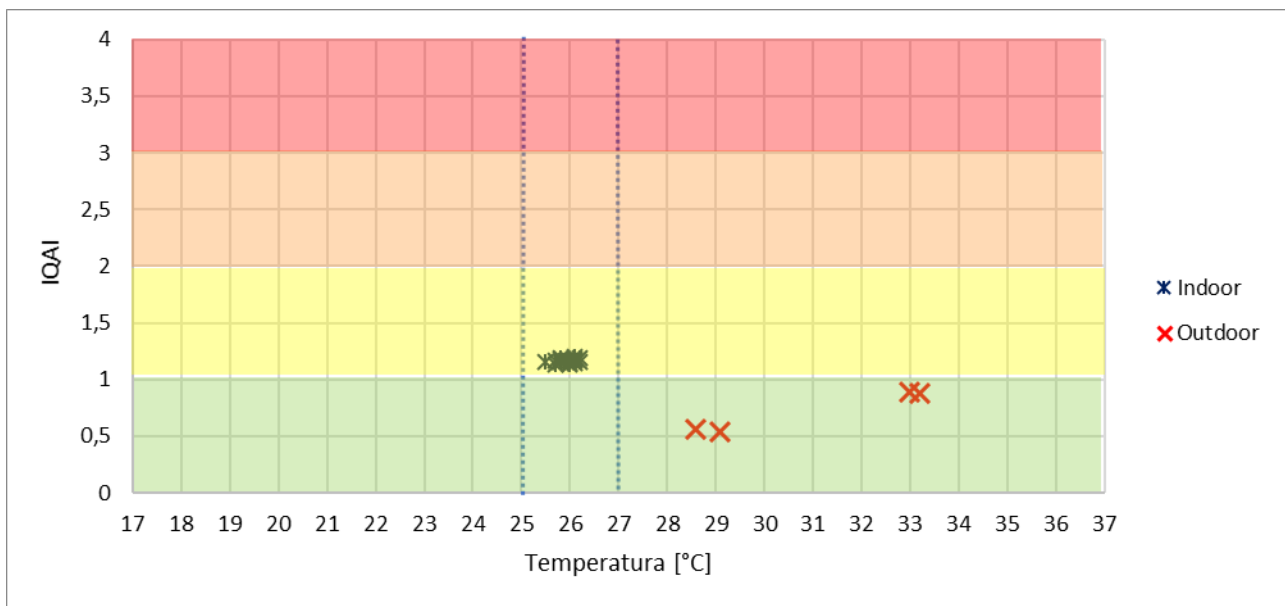


Figura 8.24 – IQAI (ex-post).

L'osservazione congiunta di Figura 8.23 e Figura 8.24 consente di confermare quanto detto in precedenza ovvero che non ci sono differenze sostanziali tra la situazione ex-ante e la situazione ex-post, che rimangono entrambe, in questa ulteriore valutazione al livello "discreto".

In particolare, applicando l'indicatore anche all'aria esterna:

- nella situazione ex-ante a partire da aria esterna per la quale si ha $IQAI=0,72$, per l'aria interna si ha $IQAI=1,17$;
- nella situazione ex-post a partire da aria esterna per la quale si ha $IQAI=0,71$, per l'aria interna si ha $IQAI=1,15$, con un leggero miglioramento.

8.3 Simulazione energetica

8.3.1 Modellazione dello stato di fatto

Le leggi vigenti italiane rimandano, sia per la certificazione energetica che per la diagnosi energetica, alle norme tecniche della serie UNI/TS 11300 (applicazione nazionale della UNI EN ISO 13790), con riferimento al metodo statico mensile per il calcolo dei fabbisogni di energia termica, ma non precludono, ritenendolo anzi in alcuni casi preferibile, l'utilizzo di metodi di simulazione più dettagliati, che permettano di tener conto in maniera adeguata dei fenomeni dinamici. I metodi dinamici, infatti, permettono di simulare in modo dettagliato tutti i flussi energetici con cadenza oraria e per tutti i giorni l'anno; in questa maniera, è possibile prendere in considerazione, ad esempio, le differenze di temperatura e di utilizzo dei locali tra i diversi periodi della giornata; si può quindi simulare realisticamente la chiusura serale di un ufficio, l'effettivo irraggiamento solare che varia durante le ore del giorno, l'accensione o lo spegnimento degli impianti e delle apparecchiature nelle varie ore, l'effetto di accumulo di calore nelle pareti, ecc.

Per la diagnosi dell'edificio oggetto di studio si è deciso di adoperare il metodo dinamico, attraverso una simulazione che prevede l'utilizzo del software TRNSYS (TRNSYS 16 è composto da tre moduli che permettono all'utente di svolgere le funzioni sopra elencate, TRNSYS Simulation Studio, TRNSYS Build, TRNSYS Edit).

I dati di input per la modellazione sono stati ricavati dal rilievo delle strutture e degli impianti, dal monitoraggio delle grandezze ambientali, da interviste ai gestori e agli occupanti sulle modalità di utilizzo dei locali, sul livello di comfort percepito e sull'evoluzione storica del sistema edificio-impianto.

Il monitoraggio orario di temperature e assorbimenti è stato utilizzato per meglio calibrare la modellazione dinamica semplificata ed in particolare:

- per inserire temperature esterne e set-point interni aderenti al funzionamento reale;
- per valutare l'inerzia termica effettiva dell'involucro edilizio;
- per validare gli assorbimenti elettrici risultanti dalla simulazione, unitamente ai dati risultanti delle fatturazioni energetiche.

La prima fase di simulazione è stata rivolta alla modellazione dell'edificio nella sua configurazione attuale, con l'obiettivo di ricalcare il più precisamente possibile i consumi reali, in modo da creare un legame causa-effetto con le caratteristiche del sistema edificio-impianto.

Si è proceduto all'individuazione delle zone termiche da analizzare nel corso dello studio. La ripartizione dei vari piani in zone termiche è stata effettuata seguendo le indicazioni della norma UNI/TS 11300-1 secondo la quale "ogni porzione di edificio, climatizzata ad una determinata temperatura con identiche modalità di regolazione, costituisce una zona termica"⁹. Seguendo tale definizione è stato possibile suddividere tutto l'edificio in 63 zone termiche, le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 8.9.

La caratterizzazione di ogni singola zona termica è stata effettuata determinandone le proprietà indispensabili per il calcolo del regime termico all'interno dell'edificio (dimensioni, definizione di pareti confinanti con altre zone termiche o con l'ambiente esterno, caratteristiche termotecniche delle superfici opache e trasparenti, definizione dei carichi termici interni alla zona termica, ricambi d'aria, caratteristiche degli impianti di riscaldamento, di raffrescamento e di ventilazione, caratteristiche igrometriche dell'aria, definizione dei parametri per il comfort termico).

⁹ La zonizzazione non è richiesta se si verificano contemporaneamente le seguenti condizioni:

a) le temperature interne di regolazione per il riscaldamento differiscono di non oltre 4K; b) gli ambienti non sono raffrescati o comunque le temperature interne di regolazione per il raffrescamento differiscono di non oltre 4K; c) gli ambienti sono serviti dallo stesso impianto di climatizzazione; d) se vi è un impianto di ventilazione meccanica, almeno l'80% dell'area climatizzata è servita dallo stesso impianto di ventilazione con tassi di ventilazione nei diversi ambienti che non differiscono di un fattore maggiore di 4; e) se vi è il controllo dell'umidità, le umidità relative interne di regolazione differiscono non oltre 20 punti percentuali".

Tabella 8.9 – Zone termiche.

	Heating		Cooling		Ventilation		Cod.	Heating		Cooling		Ventilation	
	Cod.	Num.	Cod.	Num.	Cod.	Num.		Cod.	Num.	Cod.	Num.	Cod.	Num.
AIU1					BM3	3	B1W1	R	3				
AIU2							B1W2	R	4				
AIU3					D	7	A2U1	FCE	10	FCE	10	BM4	6
AIC1					BM1	2	A2U2	FCD	8	FCD	8	BM5	5
					D	8	A2C1	FCC	5	FCC	5	BM4	1
AIC2					D	1	A2C2						
AIW1	R	3			D	3	A2W1	R	5				
AIW2	R	5			D	6	A2W2	R	3				
AIW3	R	4			D	1	B2U1	FCB	1	FCB	1	BM4	4
BIU1	R	3						FCC1	8	FCC1	8	BM3	3
AOU1	FCE	4	FCE	4	BM1	1		FCD	3	FCD	3	BM2	2
	FCD	3	FCD	3	BM5	1	B2U2	FCC	3	FCC	3	BM5	3
					BM3	1	B2C1						
AOU2							B2W1	R	3				
AOU3	FCD	3	FCD	3	BM8	1	B2W2	R	3				
AOU4	FCE	4	FCE	4			B3U1	FCC	11	FCC	11	BM4	11
AOC1	FCF	3	FCF	3	BM8	3	B3U2	FCE	3	FCE	3	BM3	3
AOC2	FCD	2	FCD	2	BM6	2	B3C1						
BOU1	FCD	1	FCD	1			B3W1	R	3				
BOU2	FCB	1	FCB	1			B3W2	R	3				
BOU3	FCC	1	FCC	1			A3U1	FCC	8	FCC	8	BM6	7
BOC1					BM6	2	A3U2	FCC	6	FCC	6	BM6	7
BOW1					D	4	A3U3	FCD	3	FCD	3	BM6	3
A1U1	FCE	10	FCE	10	BM5	3	A3C1	FCC	3	FCC	3		
	FCD	2	FCD	2	BM7	3	A3W1	R	8				
	FCC	2	FCC	2	BM6	2	A3W2	R	3				
A1U2	FCC	2	FCC	2	BM5	1	B4U1	FCC	4	FCC	4	BM3	2
A1U3	FCD	3	FCD	3	BM5	1	B4U2	FCD	10	FCD	10	BM4	10
A1U4	FCE	2	FCE	2	BM6	1	B4C1						
A1C1					BM9	2	B4W1	R	3				
A1W1	R	3					B4W2	R	3				
A1W2	R	5					B5U1	FCC	8	FCC	8	BM2	9
B1U1	FCC1	9	FCC1	9	BM5	4	B5C1						
	FCD	1	FCD	1	BM2	6	B5C2						
	FCE	1	FCE	1	BM3	4	B5W1	R	2				
B1U2					BM3	3	B5W2	R	2				
B1C1													

Dove:

- R=Radiatori
- FCX= Fan Coil di tipo X
- BM= bocchetta di mandata UTA (250 m³/h)
- D= Diffusore (150 m³/h)

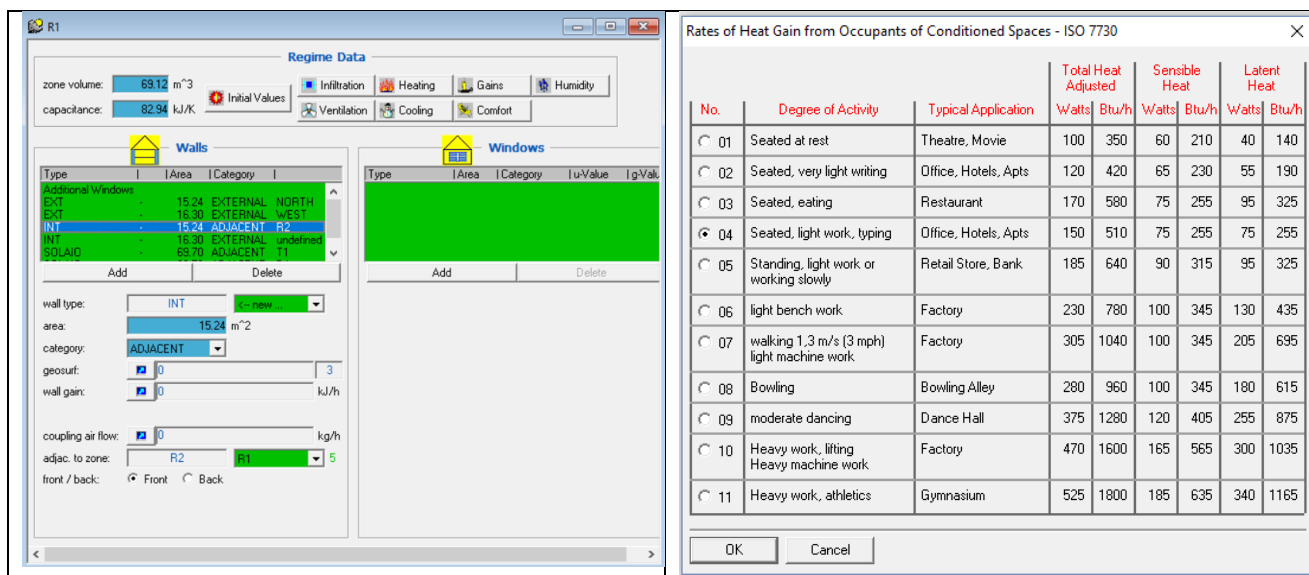


Figura 8.25 - Interfaccia TRNSYS per la definizione dei parametri di zona e per l'apporto termico derivante dall'occupazione.

Trnsys Build dà l'opportunità all'utente di impostare le caratteristiche dell'impianto di riscaldamento, raffrescamento e ventilazione tramite opportune interfacce accessibili direttamente dal "Zone Manager" denominate rispettivamente Heating, Cooling e Ventilation (temperatura di set-point del riscaldamento, potenza termica per il riscaldamento, percentuale di potenza termica fornita per radiazione, valore di umidità relativa in ambiente di set-point, temperatura di set-point del raffrescamento, potenza termica di raffrescamento, temperatura aria esterna, radiazione solare incidente).

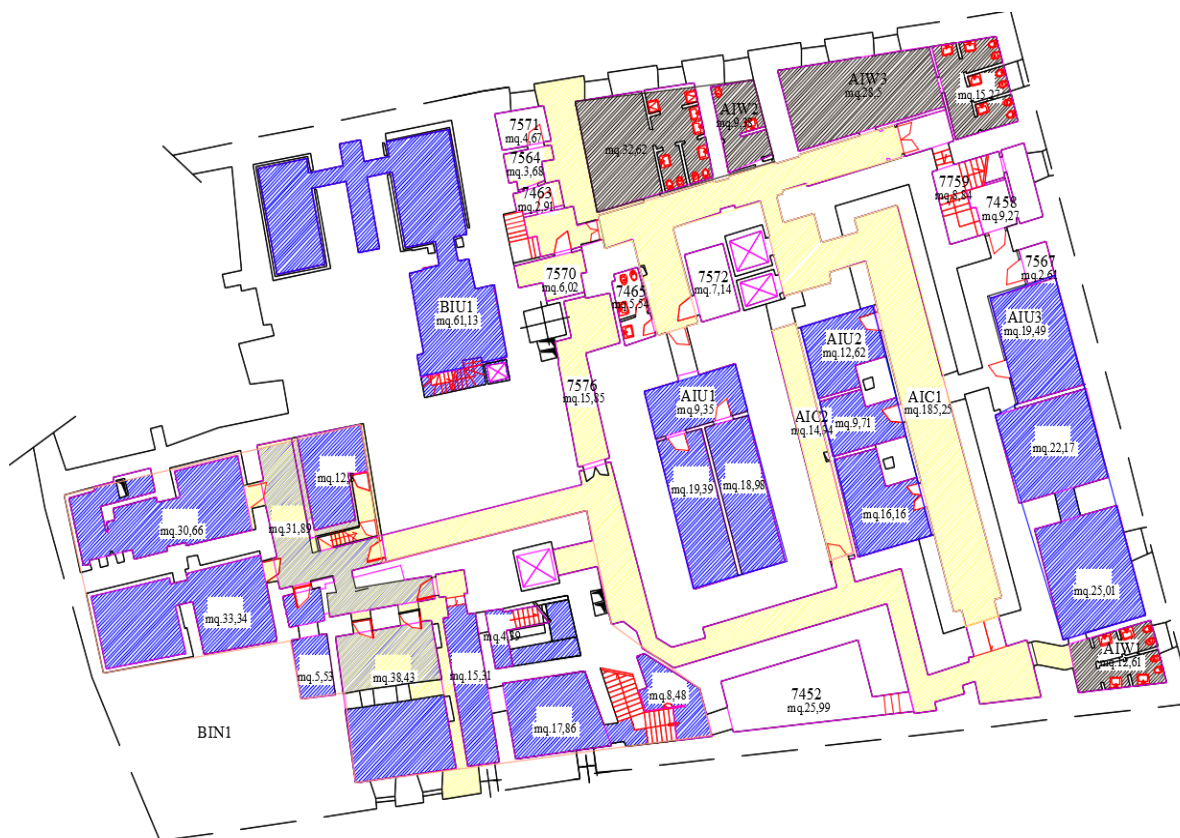


Figura 8.26 - Planimetria piano interrato

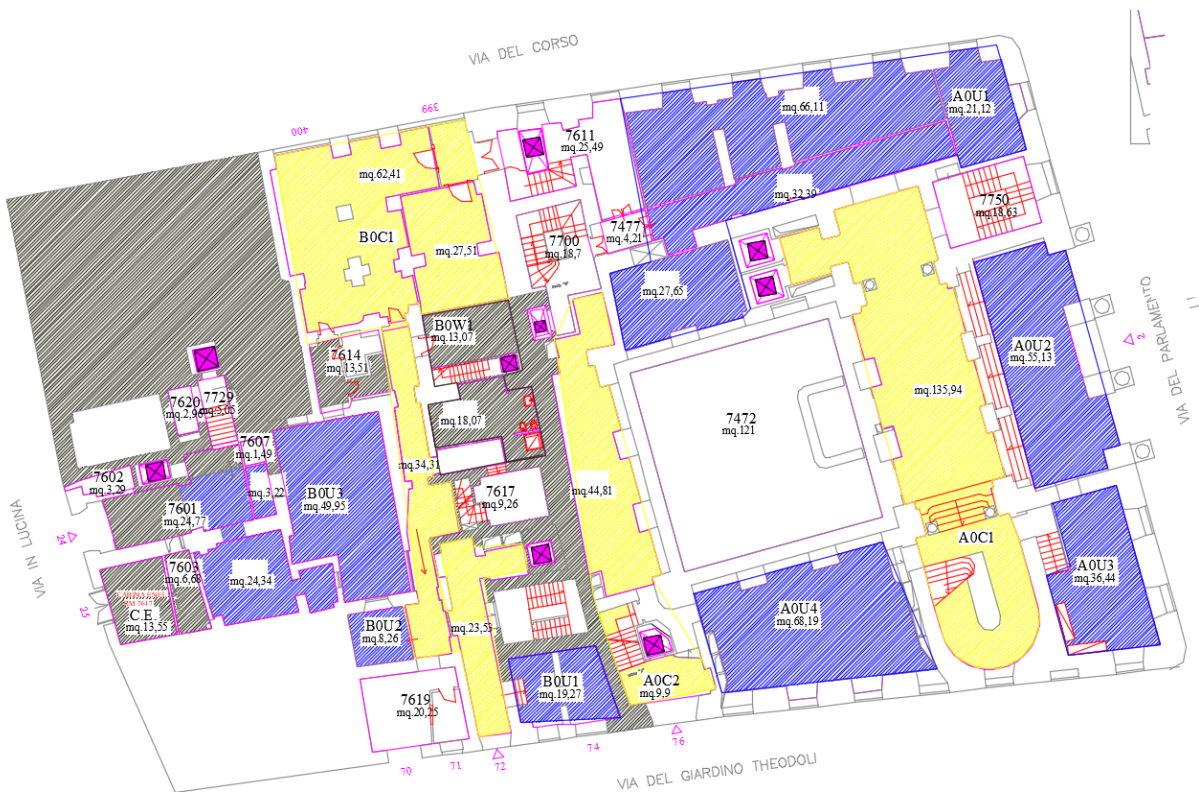


Figura 8.27 - Planimetria piano terra

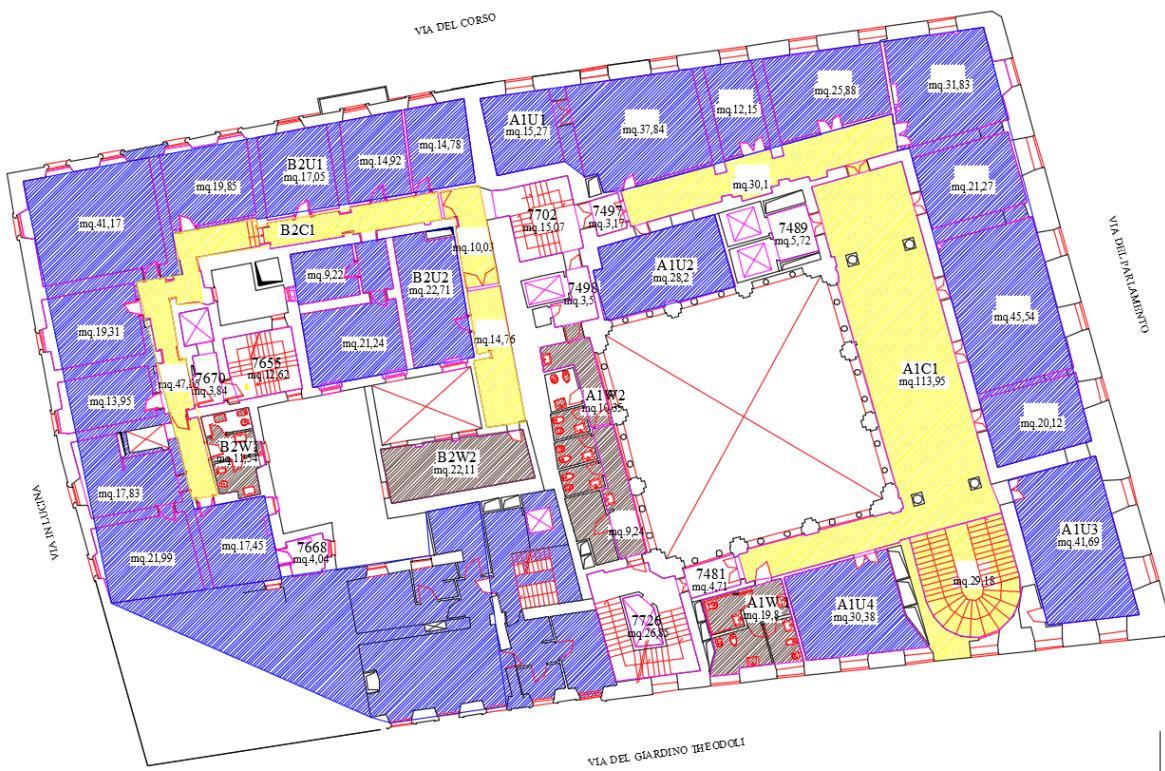


Figura 8.28 - Planimetria piano primo

3° BCD

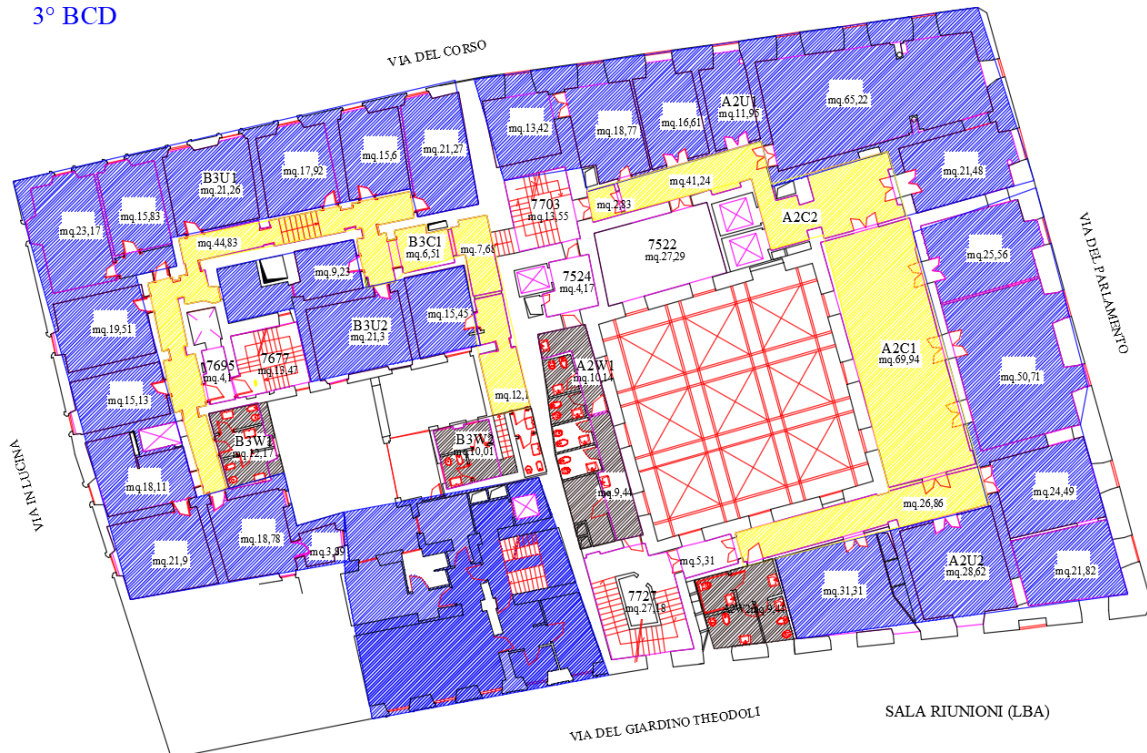


Figura 8.29 - Planimetria piano secondo



Figura 8.30 - Planimetria piano terzo

8.3.2 Analisi energetica dello stato di fatto

Nel seguente paragrafo verranno illustrati i risultati ottenuti con il modello precedentemente illustrato relativi allo stato di fatto dello stabile oggetto dello studio. L'analisi condotta analizza i consumi derivanti dal condizionamento degli ambienti, evidenziando la ripartizione dei consumi elettrici e termici tra le varie zone termiche. I risultati ottenuti sono poi successivamente confrontati con i consumi fatturati in bolletta.

8.3.2.1 Distribuzione dell'energia termica

Come precedentemente illustrato l'impianto di condizionamento dell'aria è un impianto misto ad aria primaria e ventilconvettori con ventilconvettori a quattro tubi posti in ogni locale ad esclusione dei servizi. In Figura 8.31 è riportata l'energia termica oraria fornita all'edificio tramite i fan coils in riscaldamento e in raffreddamento. Dai grafici è possibile notare come la durata del periodo di riscaldamento sia superiore a quella del raffreddamento, ma d'altra parte il picco di potenza frigorifera (circa 280 kW) è nettamente superiore al picco di potenza termica (circa 190 kW).

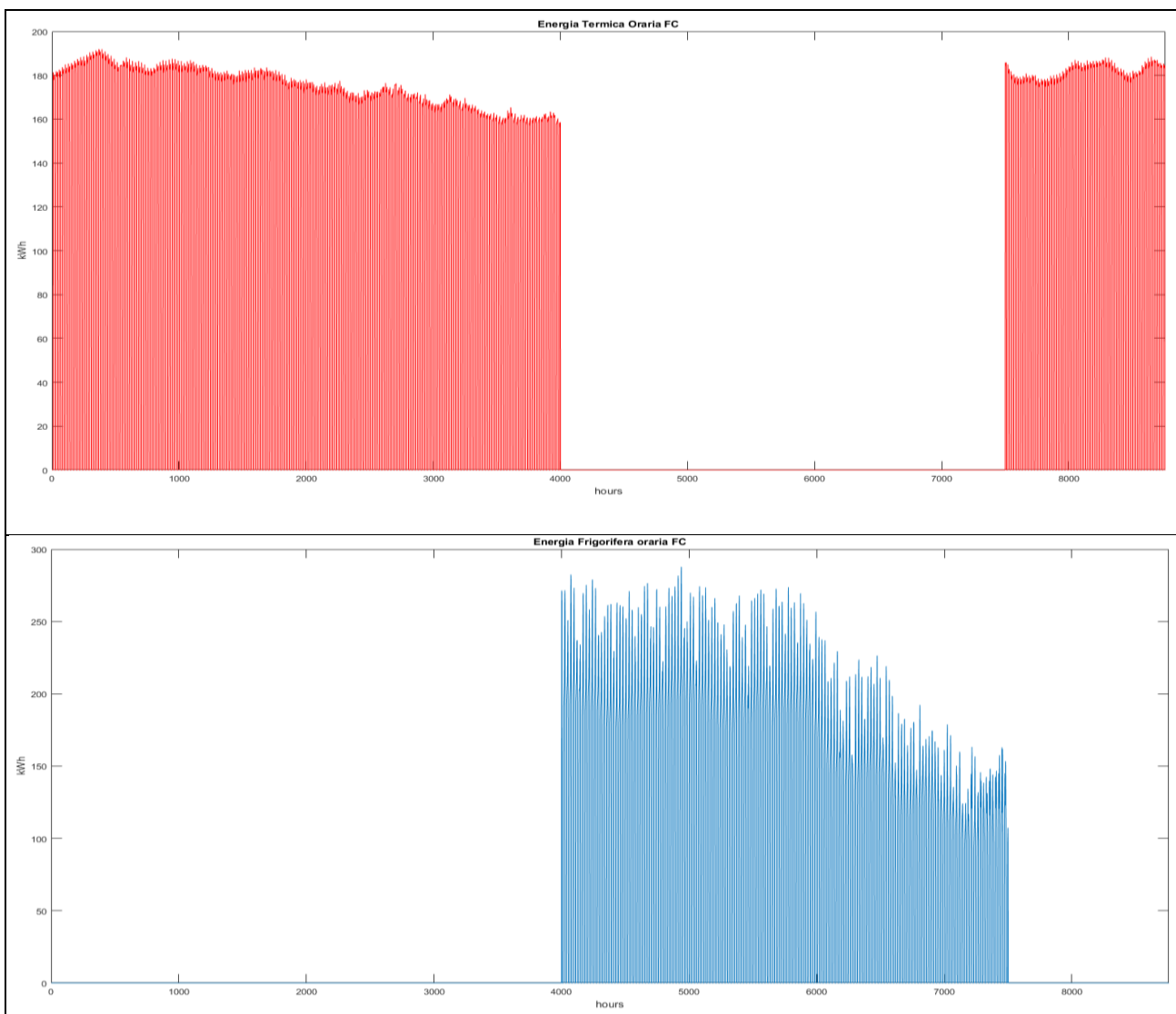


Figura 8.31 - Andamento energia termica oraria fornita dai ventilconvettori (riscaldamento, in alto; raffrescamento, in basso).

In Figura 8.32 sono riportati gli andamenti di energia frigorifera e termica oraria ceduta all’aria trattata dalle quattro UTA presenti nell’edificio, ipotizzando che tutte le UTA elaborino la propria portata nominale. Al fine di garantire una migliore comprensione del testo si elencano di seguito le UTA presenti all’interno dell’edificio con le rispettive denominazioni scelte per il presente studio:

- UTA BANK: asserva la banca presente nell’edificio A e alcuni altri locali del medesimo edificio (con una portata nominale di 17500 m³/h);
- UTA B: asserva l’intero edificio B, comprensivo dei locali appratenti alla polizia e generalmente denominato “Edificio C” (con una portata nominale 12500 m³/h);
- UTA A: asserva gli uffici presenti nell’edificio A (con una portata nominale di 6000 m³/h);
- UTA INT: asserva l’intero piano interrato comprensivo dei locali tecnici (con una portata nominale di 6000 m³/h).

Si può notare come l’UTA BANK fornisca una quantità di energia termica in riscaldamento e in raffrescamento pressoché simile all’UTA B, nonostante abbia una portata d’aria nominale superiore. I valori riportanti l’energia oraria media (calcolata sull’anno) e massima oraria per le UTA e per i Fan Coils sono riportati in Tabella 8.10.

Tabella 8.10 – Valori energia termica/frigorifera oraria fornita

IMPIANTO	Riscaldamento	Riscaldamento	Raffrescamento	Raffrescamento
	[kWh _{medi} /ora]	[kWh _{max} /ora]	[kWh _{medi} /ora]	[kWh _{max} /ora]
FAN COILS	52,87	191,87	37,16	287,51
UTA BANK	14,51	59,75	9,09	62,57
UTA B	18,44	72,07	8,88	67,32
UTA A	6,08	19,69	4,16	22,03
UTA INT	3,98	13,79	1,18	10,89

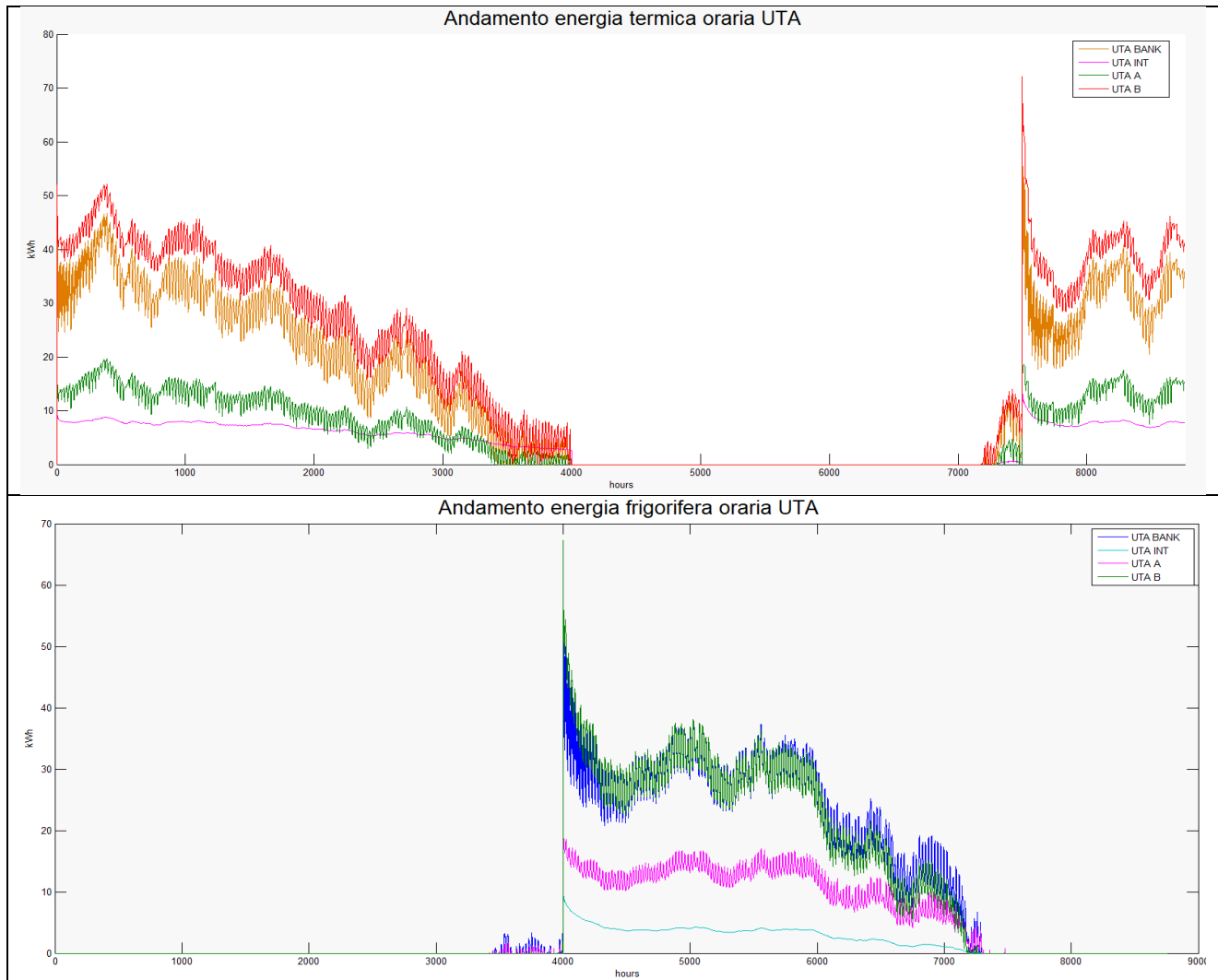


Figura 8.32 - Andamento energia frigorifera oraria fornita dalle 4 UTA (funzionamento invernale, in alto; funzionamento estivo, in basso).

Una volta definito il profilo termico orario dell'impianto di condizionamento dell'edificio è stato possibile ottenere l'energia termica e frigorifera annua.

In Tabella 8.11 e in Figura 8.32, sono riportati i valori di energia termica e frigorifera annua ripartiti in funzione del apparato di distribuzione.

È facile notare come i fan coils abbiano un peso maggiore (del 9 % per il riscaldamento e del 22 % per il raffrescamento) rispetto alle UTA nel garantire le condizioni di benessere termico all'interno degli ambienti climatizzati.

Tabella 8.11 – Energia termica e frigorifera annua utilizzata dalle diverse utenze

RIPARTIZIONE ENERGIA ANNUA		
APPARATO	[MWh termici]	[MWh frigoriferi]
UTA BANK	127,07	79,36
UTA B	161,53	77,77
UTA A	53,27	36,46
UTA INT	34,85	10,37
FAN COILS	463,25	325,57
RADIATORI	25,45	-

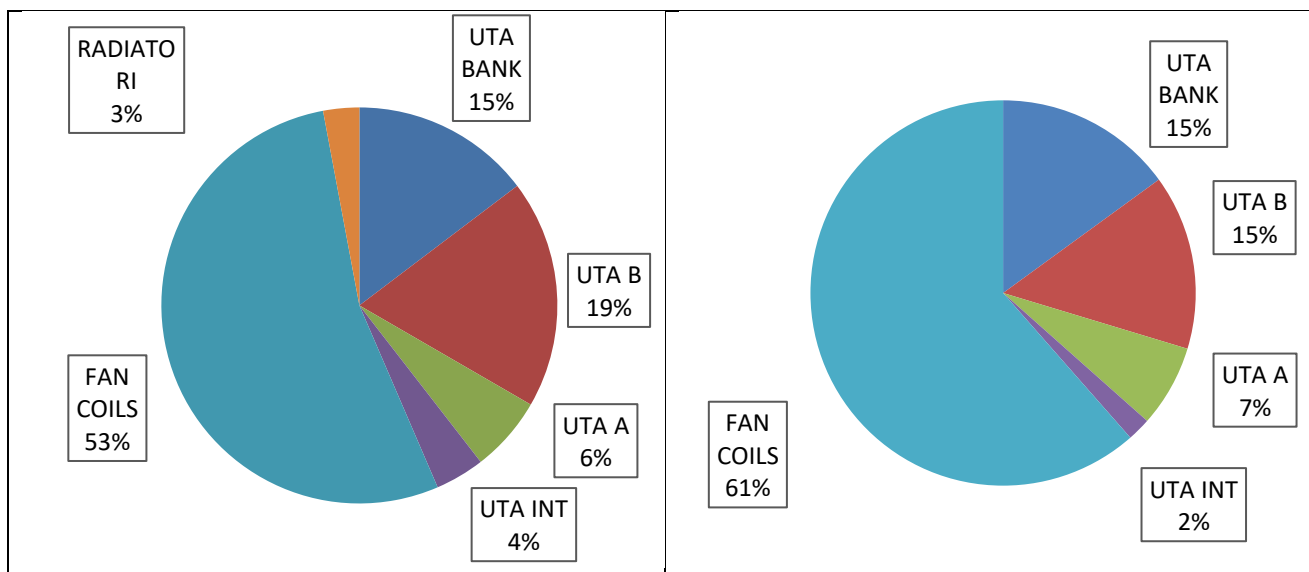


Figura 8.33 - Ripartizione energia distribuita (funzionamento invernale, a sinistra; funzionamento estivo, a destra).

8.3.2.2 Generazione dell'energia termica

Gli impianti termici di generazione sono principalmente tre:

- 2 Pompe di calore che alimentano i Fan coils, l'UTA BANK, l'UTA A e l'UTA B;
- 4 caldaie a metano per il circuito radiatori e per le batterie di post-riscaldamento di UTA BANK, UTA A e UTA B;
- 3 VRF ad espansione diretta per l'UTA al piano interrato e la climatizzazione dei locali della polizia.

Il consumo elettrico dei VRF e delle due pompe di calore è riportato in Figura 8.34, mentre in Tabella 8.12 è riportato l'assorbimento annuale di energia elettrica dalla rete di distribuzione di Acea-reti.

Tabella 8.12 – Assorbimento elettrico annuo.

APPARATO DI GENERAZIONE	[MWh/anno]
POMPE DI CALORE	406,9
VRF	84,9
TOTALE (climatizzazione)	491,8
TOTALE (consumi elettrici complessivi)	874,1

Confrontando il consumo annuale derivante dalla climatizzazione con il consumo reale riportato in bolletta è stato possibile riscontrare come il consumo elettrico della climatizzazione si attesti a circa il 56% del consumo elettrico totale.

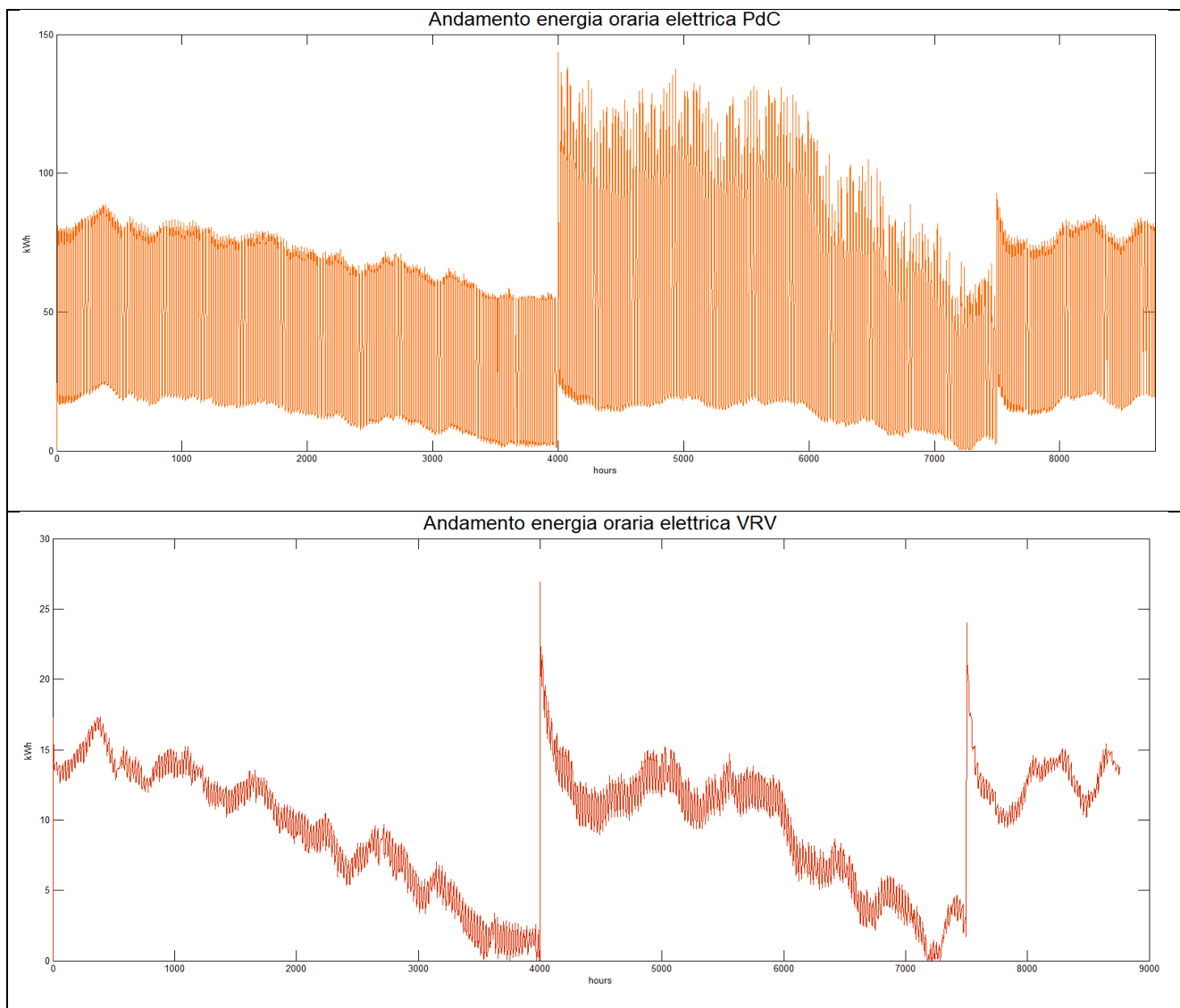


Figura 8.34 - Andamento energia elettrica oraria assorbita dalle pompe di calore (in alto) e dai VRV (in basso).

8.3.3 Analisi energetica al variare della portata d'aria dell'UTA

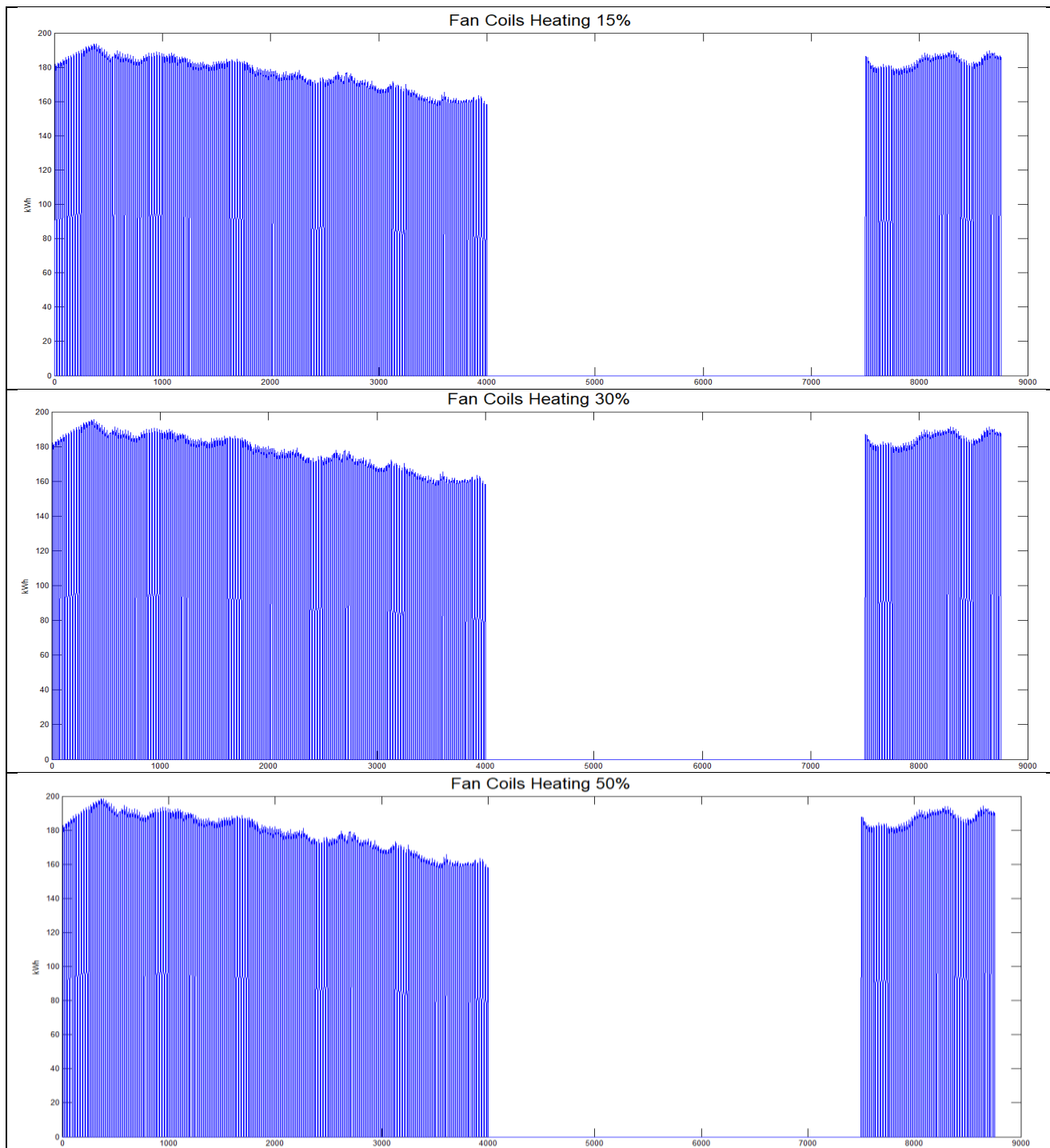
Volendo valutare il risparmio energetico raggiungibile con una riduzione della portata di aria esterna elaborata dalle unità di trattamento aria, sono stati simulati tre diversi scenari di riduzione:

- A. Riduzione della portata d'aria degli impianti UTA del 15% e quindi portata ridotta pari all'85% della portata nominale;
- B. Riduzione della portata d'aria degli impianti UTA del 30 % e quindi portata ridotta pari al 70% della portata nominale;
- C. Riduzione della portata d'aria degli impianti UTA del 50 % e quindi portata ridotta pari al 50% della portata nominale.

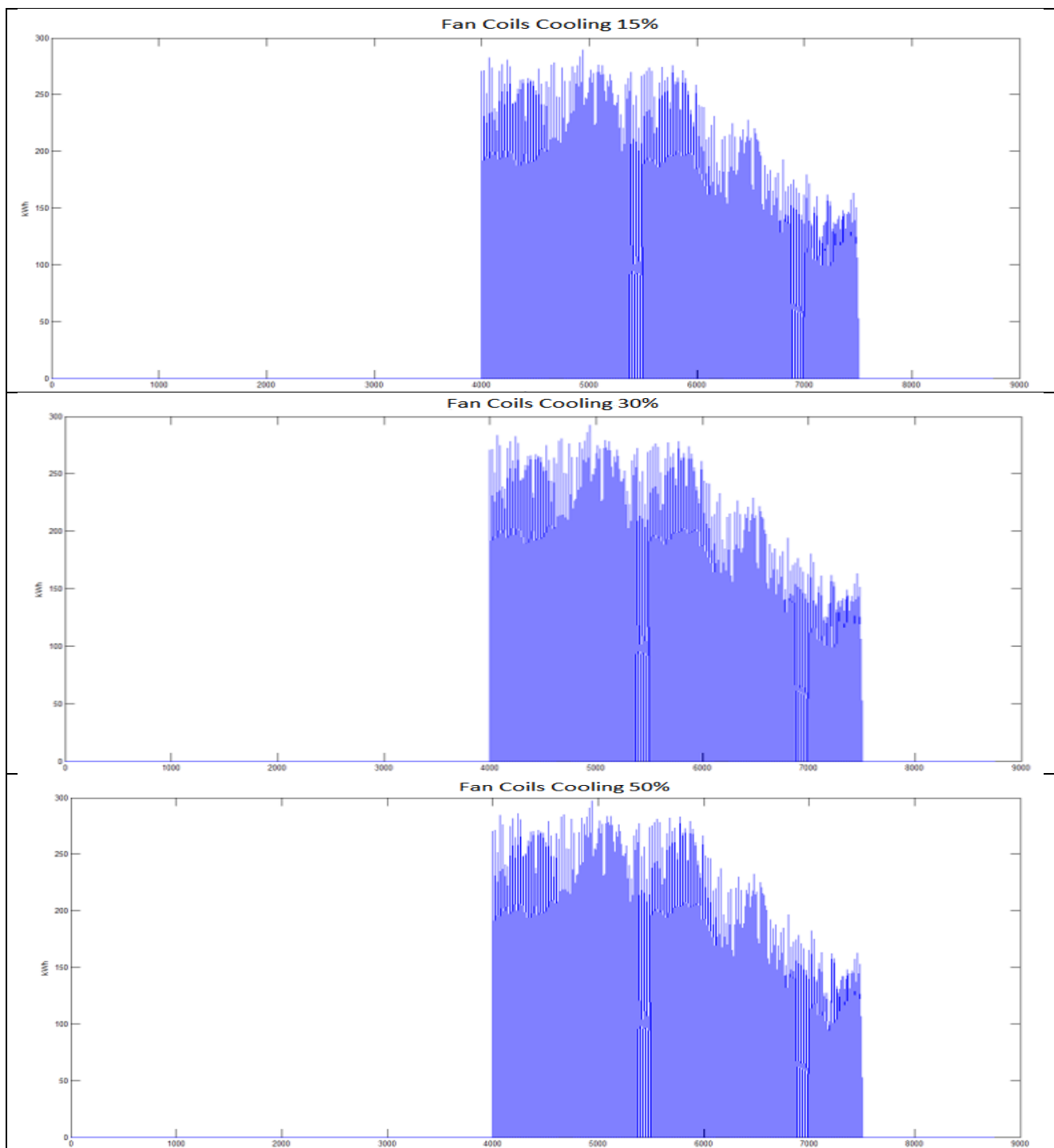
Lo scenario C corrisponde alla situazione monitorata con la campagna di misurazioni; per gli altri scenari non sono state svolte campagne di misurazioni e sono stati simulati solo per avere indicazioni intermedie, vista l'agilità del metodo nel simulare nuovi scenari, come variazione del modello base.

Dai grafici riportati in Figura 8.35 e in Figura 8.36 e dai valori riportati in Tabella 8.13 risulta che al diminuire della portata d'aria primaria, il circuito Fan Coils fornisce via via una potenza termica leggermente maggiore al fine di garantire la temperatura di progetto all'interno dei locali climatizzati.

Tale circostanza si riscontra soprattutto nei transitori di avviamento, in conseguenza del minor contributo alla compensazione del carico termico dato dall'aria primaria, ancorchè in condizioni nominali di neutralità termica.



**Figura 8.35 - Grafici andamento orario energia termica fan coil.
(Scenario A in alto, Scenario B in mezzo, Scenario C in basso)**



**Figura 8.36 - Grafici andamento orario energia frigorifera fan coil.
(Scenario A in alto, Scenario B in mezzo, Scenario C in basso)**

Tabella 8.13 - Valori energia termica e frigorifera oraria (media e di picco) fornita dai Fan Coils e differenze percentuali rispetto allo scenario base

SCENARIO	Riscaldamento				Raffrescamento			
	[kWh _{medi} /ora]	[%]	[kWh _{max} /ora]	[%]	[kWh _{medi} /ora]	[%]	[kWh _{max} /ora]	[%]
BASE	52,87		191,87		37,16		287,51	
A	53,13	0,5%	193,56	0,9%	37,47	0,8%	289,58	0,7%
B	53,44	1,1%	195,46	1,9%	37,85	1,9%	292,21	1,6%
C	53,97	2,1%	198,58	3,5%	38,54	3,7%	297,12	3,3%

Per quanto riguarda le unità di trattamento aria, a seguito della riduzione della portata d'aria elaborata, mantenendo inalterata la temperatura di immissione in ambiente, si ottiene un risparmio energetico sempre maggiore all'aumentare della riduzione della portata, così come evidenziato dalle figure e tabelle seguenti.

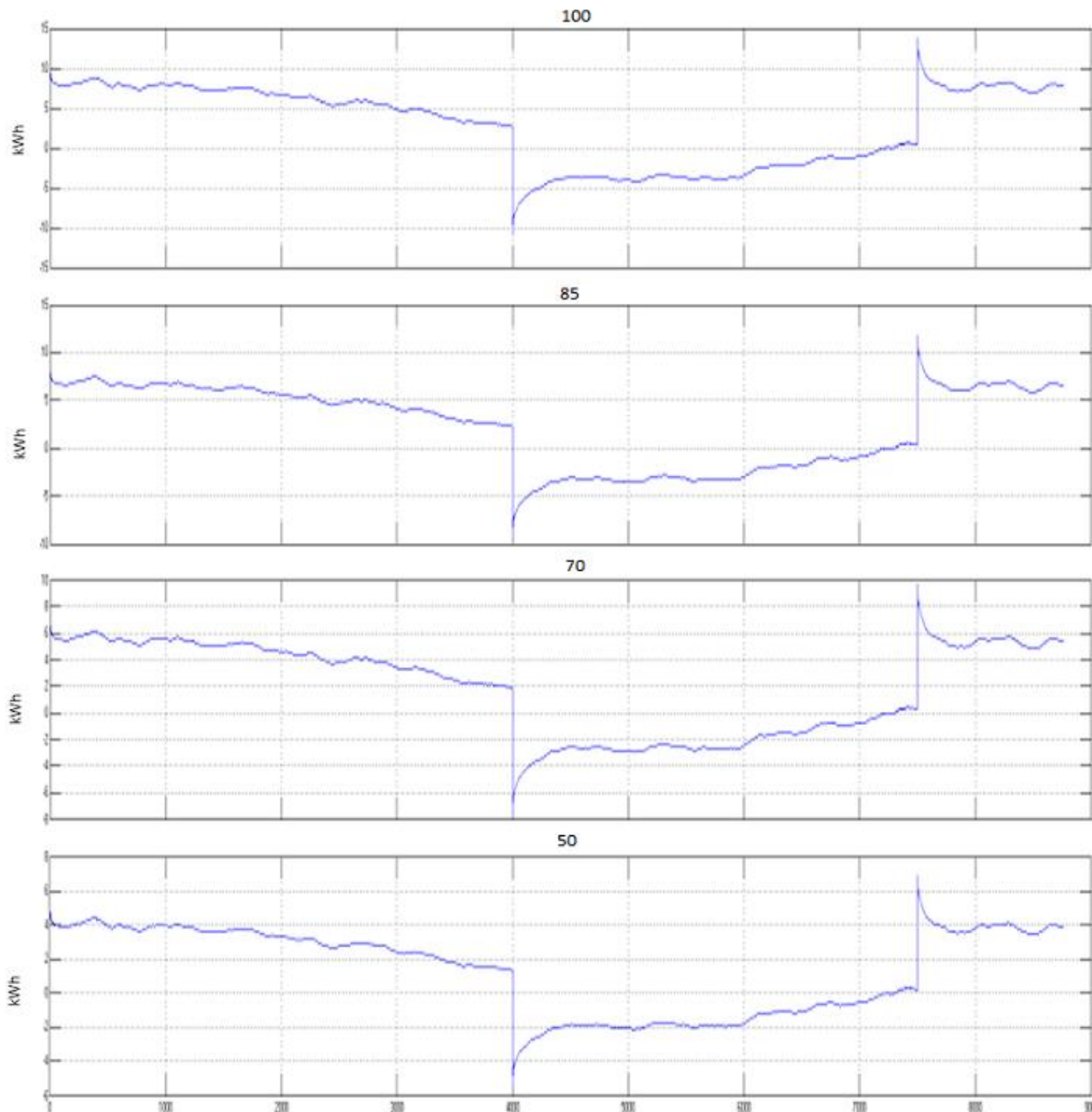


Figura 8.37 - Andamento energia oraria UTA INT.
 (Dall'alto Scenario BASE, Scenario A, Scenario B, Scenario C).

Tabella 8.14 – Energia termica annua e frigorifera UTA INT e differenze percentuali rispetto al caso base

Scenario	Riscaldamento		Raffrescamento	
	[kWh/anno]	[%]	[kWh/anno]	[%]
BASE	34.858		10.372	
A	29.630	-15,0%	8.816	-15,0%
B	24.401	-30,0%	7.260	-30,0%
C	17.429	-50,0%	5.186	-50,0%

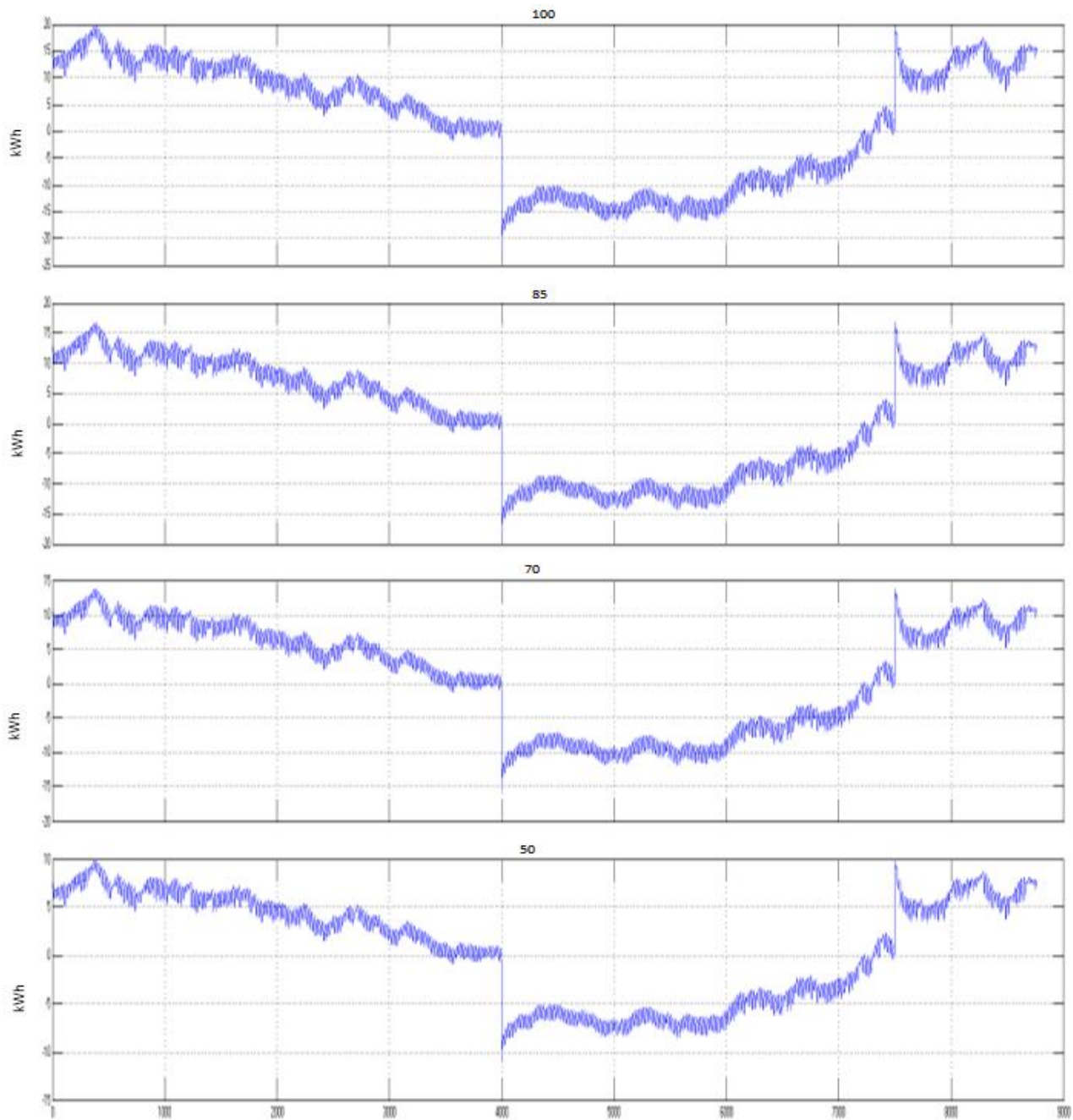
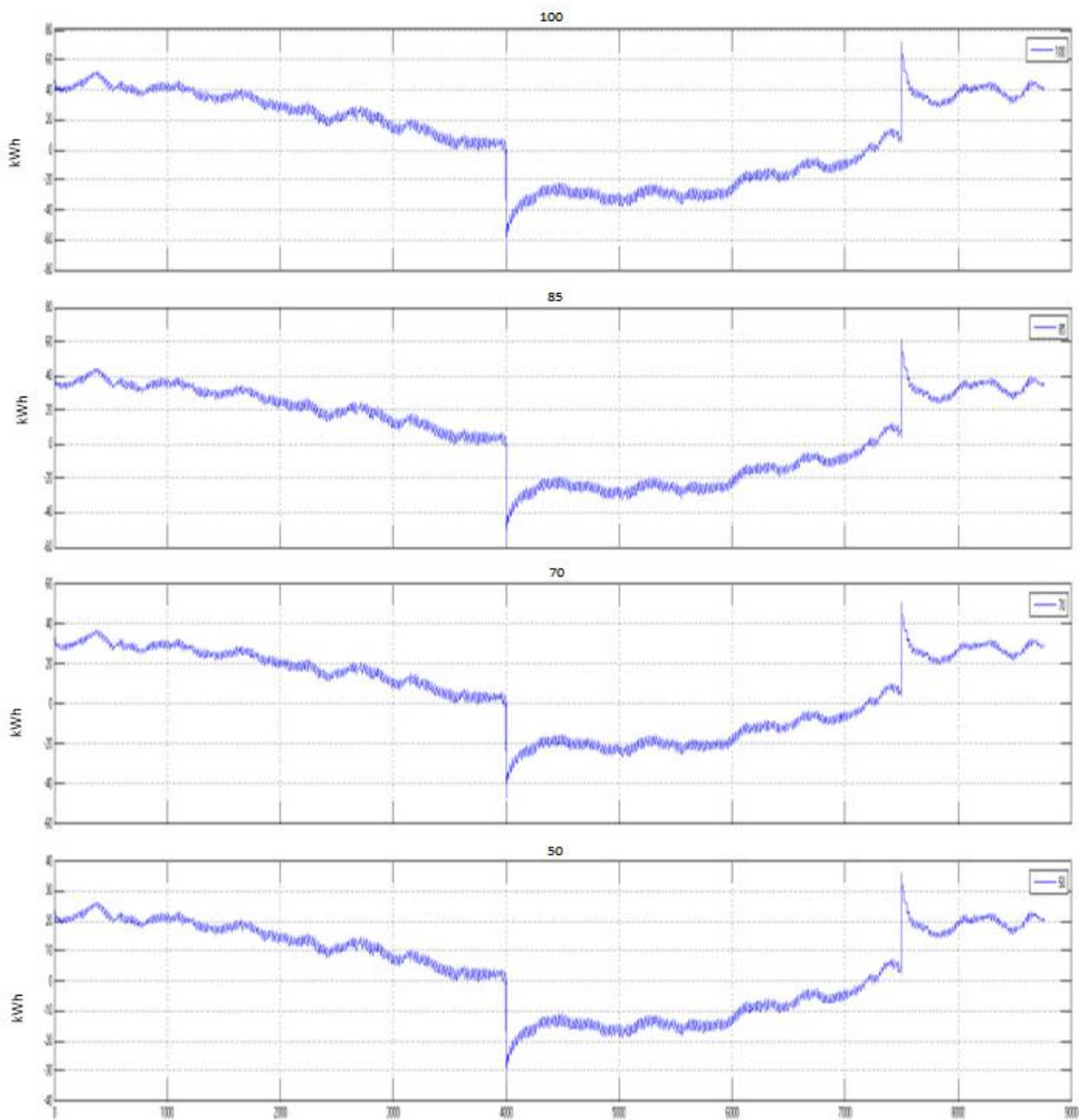


Figura 8.38 - Andamento energia oraria UTA A.
(Dall'alto Scenario BASE, Scenario A, Scenario B, Scenario C).

Tabella 8.15 – Energia termica annua e frigorifera UTA A e differenze percentuali rispetto al caso base

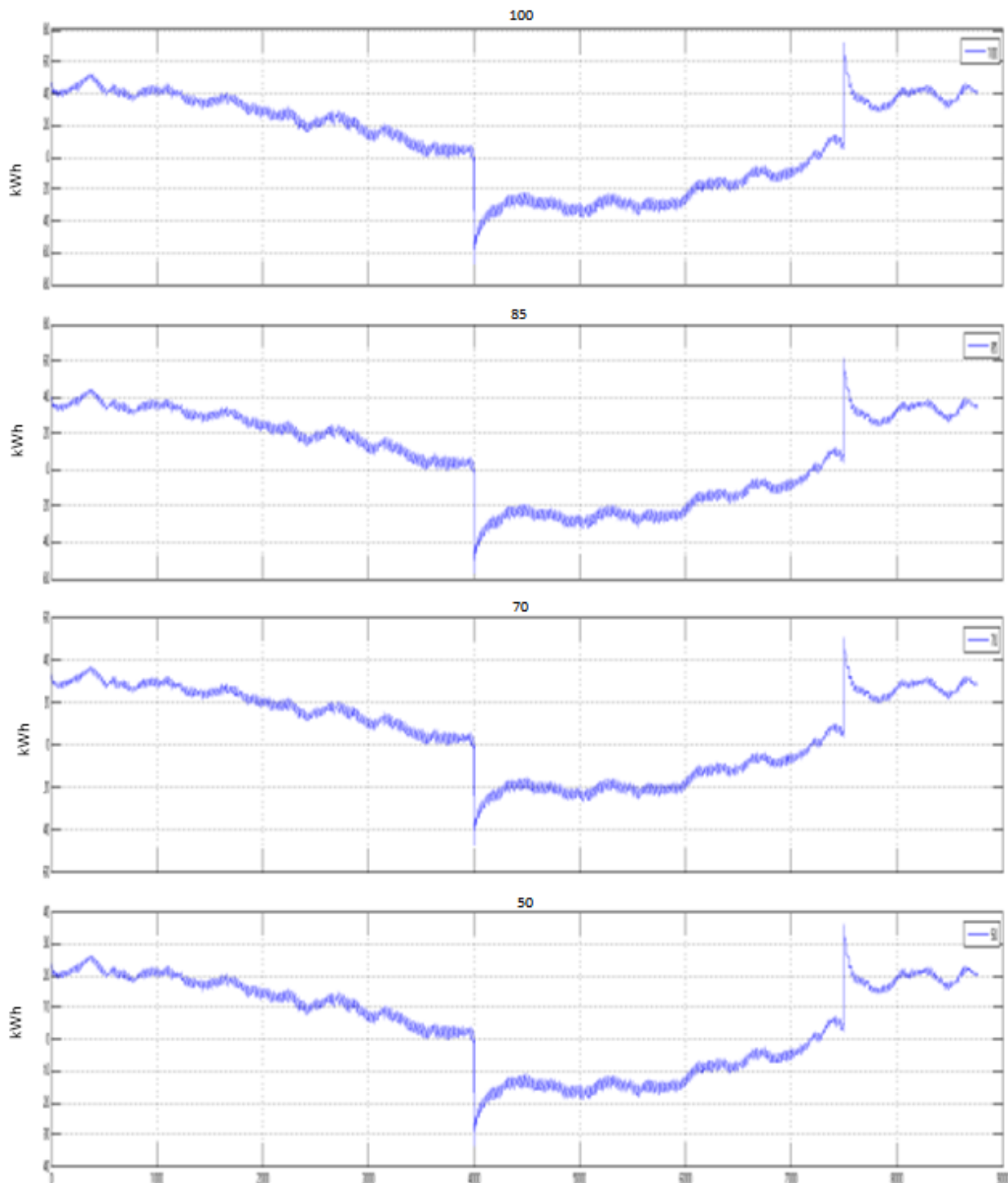
Scenario	Riscaldamento		Raffrescamento	
	[kWh/anno]	[%]	[kWh/anno]	[%]
BASE	53.270		36.462	
A	45.279	-15,0%	18.231	-15,0%
B	37.289	-30,0%	25.523	-30,0%
C	26.635	-50,0%	39.681	-50,0%



**Figura 8.39 - Andamento energia oraria UTA BANK.
(Dall’alto Scenario BASE, Scenario A, Scenario B, Scenario C).**

Tabella 8.16 – Energia termica annua e frigorifera UTA BANK e differenze percentuali rispetto al caso base

Scenario	Riscaldamento		Raffrescamento	
	[kWh/anno]	[%]	[kWh/anno]	[%]
BASE	127.070		79.361	
A	108.010	-15,0%	67.457	-15,0%
B	89.450	-30,0%	55.553	-30,0%
C	63.534	-50,0%	39.681	-50,0%



**Figura 8.40 - Andamento energia oraria UTA B.
(Dall'alto Scenario BASE, Scenario A, Scenario B, Scenario C).**

Tabella 8.17 – Energia termica annua e frigorifera UTA B e differenze percentuali rispetto al caso base

Scenario	Riscaldamento		Raffrescamento	
	[kWh/anno]	[%]	[kWh/anno]	[%]
BASE	161.530		77.777	
A	137.300	-15,0%	66.110	-15,0%
B	113.071	-30,0%	54.443	-30,0%
C	80.765	-50,0%	38.888	-50,0%

Analizzando gli assorbimenti elettrici nei diversi scenari simulati, si osserva un minor assorbimento e quindi un risparmio energetico passando dallo Scenario Base agli Scenari caratterizzati da una maggiore riduzione della portata di aria esterna elaborata dalle UTA, come conseguenza del leggero incremento dei consumi dei fan coils connesso al maggior consumo nei transistori di avviamento e e della diminuzione dei consumi delle UTA legata alla diminuzione delle portate.

Tabella 8.18 – Energia elettrica annua e risparmio energetico

Scenario	PdC	VRV	TOTALE	RISPARMIO ENERGETICO
	[kWh/anno]	[kWh/anno]	[kWh/anno]	[%]
BASE	476.041	15.768	491.809	0%
A	444.079	13.403	457.482	7%
B	422.876	11.037	433.913	12%
C	396.975	7.884	404.859	18%

Dalla Tabella 8.18 risulta evidente come l’effetto della riduzione della portata dell’unità di trattamento dell’aria comporti un risparmio energetico che va dal 7% dello Scenario A (riduzione della portata d’aria del 15%), al12% dello Scenario B (riduzione della portata del 30%), ad un massimo del 18% per lo Scenario C, caratterizzato da una riduzione della portata d’aria del 50%.

8.4 Considerazioni di riepilogo

L’obiettivo della campagna di monitoraggio e della simulazione energetica effettuati è stata la valutazione delle variazioni della qualità dell’aria e dei consumi energetici, a seguito di una diminuzione della portata d’aria esterna elaborata dalle unità di trattamento aria.

Dalla campagna di monitoraggio è risultato che a seguito di un dimezzamento della portata d’aria non si hanno variazioni significative della qualità dell’aria.

In particolare si è osservato un lieve peggioramento nel controllo di umidità relativa e concentrazione di anidride carbonica, parametri nominalmente e generalmente contrallati dalle unità di trattamento aria. Tali lievi peggioramenti non appaiono minimamente significativi, potendo comportare, nella misura in cui sono stati osservati, un minimo incremento della percentuale di insoddisfatti.

Allo stesso tempo, si è osservato un miglioramento lieve dell’indicatore scelto (IQAI), soprattutto a seguito della diminuzione delle concentrazioni nell’aria interna di VOC e PM₁₀.

Tale seconda indicazioni appare senz’altro più significativa, in relazione al più ampio significato dell’indicatore IQAI, che include anidride carbonica, ozono, VOC e PM₁₀ e che è stato scelto proprio per sintetizzare aspetti diversi della qualità dell’aria, in termini non solo di comfort ambientale ma anche di salute degli occupanti¹⁰.

Infine, la campagna di simulazioni, come era lecito aspettarsi, ha dimostrato che, a seguito di una riduzione della portata, si riducono i consumi energetici dell’edificio, in misura proporzionale alla riduzione di portata e all’incidenza dei consumi legati ai trattamenti dell’aria sui consumi complessivi di climatizzazione e sui consumi complessivi dell’edificio.

¹⁰ Sebbene con le limitazioni già esposte al paragrafo 7.2.

9 Conclusioni

In questo lavoro è stato affrontato il problema della qualità ambientale indoor di un edificio della pubblica amministrazione, posto nel centro di Roma e sul quale sono state effettuate misurazioni di qualità dell'aria e simulazioni energetiche.

E' stato definito un indicatore sintetico per la valutazione della qualità dell'aria (IQAI) ed è stata effettuata una doppia campagna di monitoraggio della Indoor Air Quality, con unità di trattamento d'aria normalmente funzionanti alla portata nominale e con unità di trattamento aria funzionanti a metà della portata nominale; nel corso di tale campagna sono state rilevate le concentrazioni di una serie di inquinanti ritenuti rappresentativi della qualità dell'aria (anidride carbonica, ozono, VOC e PM₁₀).

Le risultanze della campagna di monitoraggio e dell'applicazione dell'indicatore hanno mostrato un lieve miglioramento dell'indicatore IQAI, a seguito del dimezzamento della portata, in ragione del minor trascinarsi di inquinanti operato dalla minor portata di aria esterna.

Parallelemente le simulazioni energetiche hanno consentito di quantificare l'entità del risparmio energetico raggiungibile, che nel caso specifico, con un dimezzamento della portata di aria esterna, può arrivare al 18% dei consumi connessi alla climatizzazione.

Tale percentuale è ovviamente dipendente dalle particolari caratteristiche dell'edificio e può diventare decisamente più alta in edifici nZEB, nei quali i consumi energetici per il riscaldamento e per il raffrescamento sono più bassi e hanno un'importanza relativa minore rispetto ai consumi legati ai trattamenti dell'aria esterna.

I risultati ottenuti per il caso studio mostrano la possibilità di raggiungere anche significativi risparmi energetici, con lievi variazioni alla qualità dell'aria, soprattutto in una condizione in cui la qualità dell'aria esterna non risulti alta.

Resta la necessità di una validazione più ampia dell'indicatore sintetico proposto e di una estensione dei risultati ad altri casi studio, con variazione della destinazione d'uso, con variazione della tipologia impiantistica e con una diversa collocazione dell'edificio.

10 Riferimenti bibliografici

- [1] Decreto Ministero dello Sviluppo Economico 26 giugno 2015 - Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici.
- [2] Raccomandazione CTI 14/2013 “Prestazioni energetiche degli edifici – Determinazione dell’energia primaria e della prestazione energetica EP per la classificazione dell’edificio” e successive norme tecniche che ne conseguono;
- [3] UNI/TS 11300-1 - Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell’edificio per la climatizzazione estiva ed invernale (2014)
- [4] UNI/TS 11300-2 - Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l’illuminazione in edifici non residenziali (2014)
- [5] UNI/TS 11300-3 - Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 3: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva (2010)
- [6] UNI/TS 11300-4 - Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 4: Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria (2012)
- [7] UNI EN 15193-1:2017 - Prestazione energetica degli edifici - Requisiti energetici per illuminazione.
- [8] UNI 10339:1995 - Impianti aeraulici a fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura.
- [9] M. Pagliarini, F. Parrini - Definizione delle zone climatiche - Atti del II seminario informativo - CNR - PFE - RERE - Milano 5-6/03/1979.
- [10] A. Lavagnini, M. Pagliarini, F. Parrini - Definizione delle zone climatiche - Atti del III seminario informativo - CNR - PFE - RERE - Milano 3-4/03/1980.
- [11] UNI EN 15232-1:2017 - Prestazione energetica degli edifici - Parte 1: Impatto dell'automazione, del controllo e della gestione tecnica degli edifici - Moduli M10-4,5,6,7,8,9,10
- [12] Dimosthenis A. Sarigiannis, Spyros P. Karakitsios, Alberto Gotti, Ioannis L. Liakos, Athanasios Katsoyiannis, Exposure to major volatile organic compounds and carbonyls in European indoor environments and associated health risk, In Environment International, Volume 37, Issue 4, 2011, Pages 743-765, ISSN 0160-4120.
- [13] US Environmental Protection Agency. Guidelines for carcinogen risk assessment. Fed. Regist. 1986;51:33992–5003 September 24
- [14] OEHHA (Office of Environmental Health Hazard Assessment). Toxicity criteria database. <http://www.oehha.ca.gov/risk/ChemicalDB/index.asp> 2009.
- [15] Kotzias D, Geiss O, Tirendi S. The AIRMEX (European Indoor Air Monitoring and Exposure Assessment) Project report. European Commission; 2005a <http://web.jrc.ec.europa.eu/project/airmex/index.htm>.
- [16] Confronti Internazionali - Orientamenti normativi comunitari sulla qualità dell'aria indoor: quali proposte per l'Italia, Gaetano Settimo, Daniela D'Alessandro, E&P 2014.
- [17] Inquinamento Indoor: aspetti generali e casi studio in Italia, ISPRA 2010.
- [18] Rapporti Istisan - La qualità dell'aria indoor: attuale situazione nazionale e comunitaria. L'esperienza del Gruppo di Studio Nazionale sull'Inquinamento Indoor, ISS 2014.
- [19] Inquinamento indoor – Manuale per la prevenzione, A. Messineo, E. Di Rosa, S. Battistini, EPC Editore, 2016
- [20] La qualità dell’aria in ambienti confinati: nuovi orientamenti nazionali e comunitari, Notiziario dell’ ISS, G. Settimo, 2012
- [21] UNI EN 15251:2008 - Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica

- [22] W.J. Fisk, A.G. Mirer, M.J. Mendell, Quantitative relationship of sick building syndrome symptoms with ventilation rates, *Indoor Air* 19 (2009) 159-165.
- [23] J.F. Kreider, P.S. Curtiss, A. Rabl, *Heating and Cooling of Buildings: Design for Efficiency*, revised second ed., 2 edition, CRC Press, Boca Raton, 2009.
- [24] M.G. Apte, W.J. Fisk, J.M. Daisey, Associations between indoor CO₂ concentrations and sick building syndrome symptoms in U.S. Office buildings: an analysis of the 1994e1996 base study data, *Indoor Air* 10 (2000) 246 e 257.
- [25] P. Wargocki, D.P. Wyon, P.O. Fanger, The performance and subjective responses of call-center operators with new and used supply air filters at two outdoor air supply rates, *Indoor Air* 14 (2004).
- [26] R. Maddalena, M.J. Mendell, K. Eliseeva, W.R. Chan, D.P. Sullivan, M. Russell, U. Satish, W.J. Fisk, Effects of ventilation rate per person and per floor area on perceived air quality, sick building syndrome symptoms, and decision-making, *Indoor Air* (2014).
- [27] X. Zhang, P. Wargocki, Z. Lian, Human responses to carbon dioxide, a followup study at recommended exposure limits in non-industrial environments, *Build. Environ.* 100 (2016) 162-171.
- [28] S.M. Joshi, The sick building syndrome, *Indian J. Occup. Environ. Med.* 12 (2008) 61-64
- [29] R. Kosonen, F. Tan, The effect of perceived indoor air quality on productivity loss, *Energy Build.* 36 (2004) 981-986.
- [30] D.K. Milton, P.M. Glencross, M.D. Walters, Risk of sick leave associated with outdoor air supply rate, humidification, and occupant complaints, *Indoor Air* 10 (2000) 212-221.
- [31] M.J. Mendell, E.A. Eliseeva, M. Spears, W.R. Chan, S. Cohn, D.P. Sullivan, W.J. Fisk, A longitudinal study of ventilation rates in California office buildings and self-reported occupant outcomes including respiratory illness absence, *Build. Environ.* 92 (2015).
- [32] A. Rackes, M.S. Waring, Modeling impacts of dynamic ventilation strategies on indoor air quality of offices in six US cities, *Build. Environ.* 60 (2013) 243-253.
- [33] P. Wolkoff, C.K. Wilkins, P.A. Clausen, G.D. Nielsen, Organic compounds in office environments - sensory irritation, odor, measurements and the role of reactive chemistry, *Indoor Air* 16 (2006) 7-19.
- [34] A. Rackes, M.S. Waring, Do time-averaged, whole-building, effective volatile organic compound (VOC) emissions depend on the air exchange rate? A statistical analysis of trends for 46 VOCs in U.S. offices, *Indoor Air* (2015).
- [35] *Manuale critico di sanità pubblica a cura di Francesco Calamo Specchia.*
- [36] Carrer, P., Maroni, M., Alcini, D., Cavallo, D., Fustinoni, S., Lovato, L., Visigalli, F., Assessment through Environmental and Biological Measurements of Total Daily Exposure to Volatile Organic Compounds of OfficeWorkers in Milan, Italy, *Indoor Air* 2000; 10: 258–268.

Appendice: curriculum scientifico del gruppo di lavoro impegnato nell'attività

Francesco Mancini

Ingegnere meccanico, Dottore di Ricerca in Energetica, Ricercatore di Fisica Tecnica Ambientale presso la Facoltà di Architettura dell'Università La Sapienza di Roma.

Docente dal 2002 presso la stessa Facoltà, dove è attualmente titolare dell'insegnamento di Impianti Tecnici.

Dal 1999 svolge attività di ricerca prima presso il Dipartimento di Fisica Tecnica poi presso il Dipartimento di Pianificazione, Design, Tecnologia dell'Architettura, dove si occupa prevalentemente delle seguenti tematiche:

- procedure e metodologie per il controllo e il miglioramento della qualità energetico-ambientale in edilizia, con particolare riferimento allo studio del comportamento passivo dell'involucro edilizio;
- sistemi impiantistici a basso consumo di energia primaria, che impiegano fonti rinnovabili di energia o sistemi impiantistici ad alta efficienza;
- definizione di strategie di manutenzione per incrementare l'efficienza energetica di un patrimonio edilizio.

È autore di 70 pubblicazioni scientifiche aventi come oggetto le ricerche svolte.

Adriana Scarlet Sferra

Ricercatore ICAR12 a tempo indeterminato dal 2010 - Sapienza Università di Roma; ASN alle funzioni di Professore di seconda fascia nel settore 08/C1. Titolare del corso Tecnologia dell'Architettura 1 CdL magistrale Architettura UE. Si occupa di qualità ambientale degli edifici dall'analisi delle caratteristiche e prestazioni dei materiali per valutare: criteri di selezione, modalità operative, esiti attesi, nelle fasi di produzione, trasporto, posa in opera, esercizio, demolizione, dismissione. Utilizza la metodologia life cycle assessment con riscontri con il Processo Edilizio e con il nuovo Codice degli appalti ottimizzando i parametri di qualità tecnica, tempi, costi nel rispetto dell'ambiente - riducendo consumi energetici e utilizzando fonti di energia rinnovabili. Coordinatore generale della ricerca (2010-2013) Italia-Svezia: Sustainable Urban Cells - "Energy and Environment: Sustainable Cities; (CITERA e KTH). Relatore su invito, con memoria scritta, a numerosi convegni nazionali e internazionali Autore di oltre 50 pubblicazioni.

Fabio Nardecchia

Assegnista di ricerca Post-Doc presso il dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica (DIAEE). Laureato in Ingegneria Astronautica (2009) e Dottore di Ricerca in Energia e Ambiente (2017). Ha svolto supporto alla didattica per i corsi di Aerodinamica, Gasdinamica, Fisica Tecnica, Edifici Ecosostenibili e Progettazione delle Smart Cities. Principali campi di studio: termofluidodinamica monofase e bifase, tecniche dello scambio termico convettivo e conduttivo, tecniche di misura nella fisica tecnica, scambiatori e dissipatori di calore, microgravità, termofisica degli ambienti abitati, impianti di climatizzazione, efficienza energetica in edilizia, simulazione, integrazione e ottimizzazione di sistemi energetici, pianificazione energetica, reti energetici, fonti rinnovabili. Autore di oltre 20 pubblicazioni su riviste internazionali o in atti di congressi. Docente per il corso di perfezionamento in Smart Cities e Communities. Titolare di consulenze o collaboratore per vari contratti di ricerca nell'ambito della diagnosi, dell'efficienza, della normativa, della pianificazione e della conversione energetica.

Umberto Di Matteo

Ingegnere civile edile e dottore di ricerca in Fisica Tecnica, è Professore Associato di Fisica Tecnica Ambientale (SC 09/C2 ssd ING-IND/11). È docente di Fisica Tecnica Ambientale e di Impianti di climatizzazione e condizionamento presso la Facoltà di Scienze e Tecnologie Applicate dell'università degli Studi Guglielmo Marconi. È presidente della sezione italiana dell'ISES (International Solar Energy Society). Coordinatore di diversi progetti di ricerca nel settore degli edifici e nel campo della sostenibilità ambientale. La sua attuale attività di ricerca riguarda essenzialmente le tematiche dell'uso efficiente dell'energia e la sostenibilità ambientale dei processi produttivi. Ha condotto ricerche sia a livello sperimentale sia attraverso modellazione ed analisi numeriche. In particolare, si è occupato di problematiche legate alla termofisica dell'edificio e alla trasmissione del calore, nonché degli impatti ambientali (LCA, CFP) di processi produttivi sia industriali che agroalimentari. È autore o co-autore di oltre 60 lavori scientifici nei settori della trasmissione del calore, della termofisica degli edifici, dell'acustica e della LCA.