



Ricerca di Sistema elettrico

Misure di qualità dell'aria esterna ed interna in un edificio ad elevate prestazioni in ambienti ad elevato affollamento ed aperti al pubblico 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

MISURE DI QUALITÀ DELL'ARIA ESTERNA ED INTERNA IN UN EDIFICIO AD ELEVATE PRESTAZIONI IN AMBIENTI AD ELEVATO AFFOLLAMENTO ED APERTI AL PUBBLICO DI PROPRIETÀ DELLA PA PER LA OTTIMIZZAZIONE DELLE PORTATE DI ARIA DI RICAMBIO FINALIZZATE ALL'EFFICIENZA ENERGETICA

F. Mancini, A. S. Sferra, F. Nardecchia - Dipartimento di Pianificazione, Design, Tecnologia dell'Architettura
Sapienza Università di Roma
C. Romeo - ENEA

Settembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

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. Domenico Iatauro, 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 in ambienti ad elevato affollamento ed aperti al pubblico 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 Dipartimento PDTA, Sapienza: Prof. Francesco Mancini

Indice

1	SOMMARIO	4
2	INTRODUZIONE	5
3	INQUADRAMENTO DELL'ATTIVITÀ DI RICERCA - EFFICIENZA ENERGETICA- COMFORT TERMICO E QUALITÀ DELL'ARIA INDOOR	6
4	BREVE RIASSUNTO ATTIVITÀ ANNO PRECEDENTE	9
4.1	UNA STRATEGIA DI VENTILAZIONE PER RIDURRE I COSTI LEGATI ALLA IAQ.....	10
4.2	OTTIMIZZAZIONE DELLE PORTATE DI ARIA DI RICAMBIO FINALIZZATA ALL'EFFICIENZA ENERGETICA.....	10
4.3	INDICE DI QUALITÀ DELL'ARIA INDOOR (IQAI)	11
4.4	DESCRIZIONE DEL CASO STUDIO	12
4.5	CAMPAGNA DI MONITORAGGIO.....	14
5	ANALISI DI LETTERATURA PER CONFERMA INDICATORE	16
5.1	BIOEDILIZIA E QUALITÀ DELL'ARIA INDOOR.....	16
5.2	QUALITÀ DELL'ARIA INDOOR E SALUTE.....	20
5.3	PARTICOLARITÀ DEGLI EDIFICI UNIVERSITARI.....	21
6	IL PROTOCOLLO DI MISURA	22
6.1	POSIZIONAMENTO DELLA STRUMENTAZIONE DI PRELIEVO	22
6.2	MISURE CONTEMPORANEE IN ARIA AMBIENTE OUTDOOR.....	22
6.3	STRUMENTI DI MISURA	22
6.3.1	<i>BABUC / E Multi-indicatore portatile per la misura di grandezze ambientali.....</i>	22
6.3.2	<i>Misuratore gas AQ-200.....</i>	23
6.3.3	<i>Misuratore PM₁₀</i>	23
6.3.4	<i>Strumento multifunzione Testo 435-2.....</i>	24
7	CAMPAGNA DI MONITORAGGIO E SIMULAZIONE ENERGETICA.....	25
7.1	IL CASO STUDIO: L'AULA MAGNA DELLA SEDE DI VALLE GIULIA DELLA FACOLTÀ DI ARCHITETTURA.....	25
7.1.1	<i>Descrizione dell'edificio e della sua collocazione</i>	25
7.1.2	<i>Analisi dell'edificio allo stato attuale.....</i>	27
7.1.3	<i>Descrizione dell'Aula Magna e del suo impianto di climatizzazione</i>	28
7.1.4	<i>Il dimensionamento degli impianti di climatizzazione a tutt'aria</i>	32
7.1.5	<i>Considerazioni sul dimensionamento dell'UTA al servizio dell'Aula Magna</i>	34
7.2	SIMULAZIONE ENERGETICA	36
7.2.1	<i>Analisi energetica dello stato di fatto</i>	39
7.2.2	<i>Analisi scenari con variazione della portata</i>	44
7.2.3	<i>Confronto tra gli scenari simulati.....</i>	49
7.3	CAMPAGNA DI MISURA.....	49
7.3.1	<i>Misurazione delle grandezze termo-igrometriche</i>	51
7.3.2	<i>Misurazione delle concentrazioni degli inquinanti.....</i>	52
7.3.3	<i>Calcolo dell'indice IQAI.....</i>	58
7.4	CONSIDERAZIONI DI RIEPILOGO	61
8	CONCLUSIONI.....	63
9	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	65
	APPENDICE: CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO IMPEGNATO NELL'ATTIVITÀ	69

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) della Pubblica Amministrazione, adibito ad attività universitaria 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, accompagnati da lievi variazioni della qualità dell'aria.

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 a university 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 dicembre 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 2017, 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 d.1 "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 di proprietà della Pubblica Amministrazione per la ottimizzazione delle portate di aria di ricambio finalizzata all'efficienza energetica.

Tale lavoro si configura come una prosecuzione dell'attività svolta nell'annualità precedente, che ha avuto come obiettivo la valutazione della qualità dell'aria in un caso studio (il palazzo ex Banco Napoli della Camera dei Deputati) ritenuto rappresentativo di un edificio ad elevate prestazioni adibito ad uffici di proprietà della Pubblica Amministrazione.

I risultati ottenuti per il caso studio hanno mostrato 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. E' stata comunque rilevata la necessità di una estensione dei risultati ad altri casi studio.

Per queste ragioni, in questa annualità, si è inteso valutare un diverso caso studio, con variazione della destinazione d'uso, con variazione della tipologia impiantistica e con una diversa collocazione dell'edificio.

3 Inquadramento dell'attività di ricerca - Efficienza Energetica- Comfort Termico e Qualità dell'Aria Indoor

Il dibattito riguardante il cambiamento climatico, l'esaurimento dei combustibili fossili e la sicurezza energetica evidenzia la necessità di un ambiente costruito più sostenibile al fine di ridurre il consumo energetico e le emissioni inquinanti nel settore dell'edilizia. Il raggiungimento di questi obiettivi è una sfida che richiede una ricerca innovativa volta ad integrare le dinamiche dell'offerta e della domanda di energia negli edifici per sostenere nuove politiche, piani e azioni per ridurre gli oneri ambientali, includendo studi volti a caratterizzare i comportamenti degli utenti finali nella dinamica della domanda di energia e non tralasciando considerazioni relative al comfort ambientale [1].

Ai nostri giorni, le persone trascorrono larga parte del loro tempo (60-90%) in ambienti chiusi [2][3]; per questo motivo la qualità dell'aria interna (IAQ) è una delle principali preoccupazioni per la salute ambientale in Europa [4][5] e ha un impatto determinante sulla salute degli abitanti di edifici nel mondo [6][7][8][9], principalmente dei gruppi più sensibili, quali bambini e anziani.

La qualità dell'ambiente interno (IEQ) è correlata alla IAQ ed è definita in letteratura [10] come il complesso di comfort termico, visivo, acustico, vibrazionale ed ergonomico e di qualità dell'aria interna. Il comfort termico è un fattore decisivo per la salute e per la produttività del lavoro/studio delle persone [6][10][11][12][13] e significativi costi economici e sociali possono sorgere quando viene trascurato.

Il comfort termico è definito come la condizione mentale per cui si esprime soddisfazione nei riguardi dell'ambiente termico [14]; può essere valutato mediante una valutazione obiettiva e i principali fattori da considerare sono la temperatura dell'aria interna, la temperatura media radiante, l'umidità e la velocità dell'aria [10]. È stata anche individuata [15] una correlazione tra ambienti interni freddi (legati al basso isolamento delle costruzioni) e la mortalità stagionale in Europa meridionale e occidentale, arrivando a suggerire che il miglioramento delle condizioni interne e la protezione socioeconomica potrebbero portare a una diminuzione della mortalità invernale nei climi invernali miti.

Per quanto riguarda il comfort visivo, si è osservato che un buon livello di illuminazione contribuisce a un ambiente interno adatto, sottolineando l'efficacia dell'illuminazione diurna ai fini dell'apprendimento [16].

Relativamente al problema della qualità dell'aria indoor, si è osservato che l'IAQ ha effetti acuti e cronici sulla salute degli occupanti [17]; è direttamente correlata ai tassi di ventilazione e alla concentrazione di inquinanti, che a loro volta sono correlati alla sindrome da costruzione malata (SBS) [18]. In ambiente chiuso, l'IAQ è correlata a cause sia chimiche che fisiche (ossidi di carbonio, CO e CO₂, fumo di tabacco ambientale, formaldeide, composti organici volatili (VOC), velocità di ventilazione, temperatura, umidità, radiazioni ionizzanti e non ionizzanti) [19]; è noto che l'introduzione di aria esterna può contribuire a fornire una IAQ percepita accettabile [20]. L'Organizzazione mondiale della sanità (OMS) ha pubblicato le linee guida sulla qualità dell'aria interna per inquinanti selezionati e i loro effetti sulla salute con l'obiettivo di garantire la realizzazione di ambienti interni più sicuri [21].

Una revisione degli studi sulla IAQ nelle scuole [22] ha evidenziato che le aule nello studio non erano adeguatamente ventilate, causando sintomi correlati alla salute a causa dell'alta concentrazione di CO₂, dell'esposizione a composti organici volatili (VOC), di muffe e di VOC e di allergeni microbici. Molti studi hanno studiato l'influenza della CO₂ indoor sulla salute degli occupanti e sulla qualità dell'aria percepita [23][24]. Uno studio sull'associazione di CO₂ con la salute degli occupanti negli edifici commerciali e istituzionali di 30.000 occupanti in circa 400 edifici ha indicato la correlazione tra concentrazione di CO₂ e i sintomi di SBS [25]. La concentrazione di CO₂ è considerata un indicatore del tasso di ventilazione per occupante, dal momento che non esiste un indicatore condiviso per la qualità dell'aria negli ambienti chiusi. Uno studio condotto tra i paesi europei (Belgio, Danimarca, Francia, Germania, Italia, Polonia, Svezia e Regno Unito (Inghilterra e Galles) [26] ha mostrato come le normative per la IAQ negli edifici residenziali risultino spesso incomplete.

Per i motivi citati, è fondamentale che gli edifici garantiscano una buona qualità dell'ambiente interno agli occupanti.

Il dilemma EE-TC-IAQ [27] (Efficienza Energetica- Comfort Termico e Qualità dell'Aria Indoor) rappresenta un impegno significativo nel campo della progettazione e della gestione degli edifici.

Fino a poco tempo fa, le questioni riguardanti la qualità dell'ambiente interno sono state affrontate separatamente dalle questioni riguardanti l'efficienza energetica negli edifici. Questo è il motivo per cui la letteratura scientifica riporta molti casi di studio che analizzano uno degli aspetti, ma pochi studi integrati. Ad esempio, un approccio di tipo integrato è quello riportato in [28], che pone l'attenzione sia alla riduzione del consumo energetico negli edifici scolastici sia alle condizioni ambientali interne. Con riferimento all'edilizia residenziale, in [29] viene considerata sia la qualità dell'aria interna sia l'efficienza energetica.

Viene anche proposta una riflessione sull'evoluzione della riduzione dello spazio utile del pavimento nelle abitazioni e sulla tenuta all'aria degli infissi, che può portare a tassi di infiltrazione dell'aria molto ridotti [30]; in particolare, si afferma che ridurre i tassi di ventilazione per migliorare l'efficienza energetica, senza incorporare una strategia di ventilazione efficace, si traduce in un ambiente interno più tossico, che potrebbe avere un impatto a lungo termine sulla salute pubblica; sebbene lo studio fosse principalmente rivolto all'edilizia residenziale, le stesse considerazioni potrebbero essere rivolte agli spazi in cui le persone trascorrono la maggior parte del loro tempo quotidiano, come uffici e scuole [31], dove tassi di ventilazione bassi possono significativamente compromettere la produttività [9].

Nell'affrontare il "dilemma", i comportamenti degli utenti non possono essere trascurati, in quanto determinanti per il consumo di energia. Come correttamente osservato in [3], non sono gli edifici che consumano energia, ma sono le persone; questo risulta immediatamente evidente ragionando del comfort termico, notoriamente influenzato, oltre che dai fattori ambientali, anche dai comportamenti degli utenti (come l'attività e l'isolamento dell'abbigliamento); ad esempio, se il tasso metabolico è in qualche modo condizionato dall'attività e non può essere facilmente alterato, gli strati di abbigliamento possono corrispondere ad una significativa regolazione individuale (adattamento) [32][33].

L'adattamento delle persone potrebbe essere essere uno dei principali fattori-guida per l'efficienza energetica.

Ultimamente, a causa della crescente diffusione di sistemi di ventilazione meccanica negli edifici, le persone sembrano avere, in alcuni casi peggiorato i propri livelli di comfort. Infatti, nei paesi in cui i sistemi di climatizzazione e di ventilazione meccanica non sono ancora così diffusi, o dove le condizioni dell'aria esterna vanno al di là delle "tipiche" condizioni europee, le persone si sentono maggiormente a loro agio (cioè si sentono neutrali o accettano le condizioni sperimentate) rispetto agli attuali standard di comfort [34][35][36][37][38][14][39].

Lo sforzo che gli standard hanno fatto per incorporare i modelli adattivi relativi al comfort termico in una prestazione edilizia più sostenibile è degno di nota. Allargando i confini del comfort, è stato osservato che è possibile raggiungere adeguati livelli di comfort anche in edifici ventilati non meccanicamente, andando oltre l'approccio degli anni '70 del secolo scorso al risparmio energetico, caratterizzato da una eccessiva regolamentazione, che ha portato in alcuni casi anche ad una maggiore concentrazione di inquinanti in ambienti chiusi [40].

E' anche importante osservare che in molti casi si è in presenza di una sorta di "analfabetismo tecnologico" [37] che porta ad una mancanza di controllo dei sistemi di gestione degli edifici e ad una mancanza di azioni di valutazione post-occupazione [41], che risultano vitali per identificare opportunità di messa a punto dei sistemi edificio-impianto. Fondamentalmente, vengono suggeriti migliori sistemi di gestione degli edifici e la pianificazione di misure passive volte alla qualità dell'ambiente interno, anche quando i sistemi impiantistici

sono speti o gli edifici non risultano occupati; azioni adattive come, per esempio, l'apertura di finestre o porte possono essere determinanti, al fine di aumentare i tassi di ventilazione e abbassare i livelli di concentrazione degli inquinanti indoor. E' possibile coniugare gli effetti positivi [42] di diversi metodi di ventilazione e di diverse strategie di controllo sul consumo di energia. Inoltre, risulta importante [43] una corretta gestione dei sistemi di automazione e controllo degli edifici (BACS) per l'ottimizzazione delle prestazioni.

4 Breve riassunto attività anno precedente

La costruzione di nuovi edifici e la riqualificazione degli edifici esistenti mirano al raggiungimento di standard molto elevati di efficienza energetica, per arrivare ad un consumo energetico quasi nullo. Per raggiungere questo obiettivo gli edifici saranno molto isolati, saranno dotati di sistemi impiantistici ad alta efficienza e utilizzeranno fonti energetiche rinnovabili in larga misura. Una sfida importante per ridurre il consumo energetico in queste strutture è rappresentata dall'uso efficiente della ventilazione, che può essere messo in atto sia con una riduzione dei tassi di ventilazione sia con l'utilizzo di sistemi avanzati e metodi di controllo.

E' importante osservare che l'uso efficiente della ventilazione non deve aumentare i rischi collegati ad una riduzione della qualità dell'aria interna (IAQ).

Il lavoro della precedente annualità¹ ha affrontato il problema della qualità ambientale indoor e dei consumi energetici ad essi correlati per un edificio della pubblica amministrazione, posto nel centro di Roma e sul quale sono state effettuate misurazioni di qualità dell'aria e simulazioni energetiche (il palazzo ex Banco Napoli della Camera dei Deputati).

L'obiettivo era di fornire una base scientifica utilizzabile per strategie progettuali e di controllo, impiegando apparati di misura di comune accesso e utilizzazione.

E' stato definito un indicatore di sintesi della qualità dell'aria (IQAI), ottenuto a partire dal campionamento di una serie di inquinanti ritenuti significativi. Tale indicatore è stato utilizzato per valutare le variazioni di qualità dell'aria conseguenti ad una riduzione della portata di aria esterna, attraverso una doppia campagna di misurazioni; inoltre, mediante simulazione dinamica, è stato stimato il potenziale di risparmio energetico.

Dalla campagna di monitoraggio (vedi anche par. 4.4) è risultato che a seguito di un dimezzamento della portata d'aria non si hanno variazioni significative della qualità dell'aria; si è osservato un lieve peggioramento nel controllo di umidità relativa e anidride carbonica, parametri nominalmente e generalmente controllati 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 indicazione 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 occupanti.

Parallelamente le simulazioni energetiche, come era lecito aspettarsi, hanno 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. Tale riduzione 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.

¹ Come già ricordato, il lavoro di questa annualità si configura come una prosecuzione dell'attività svolta nell'annualità precedente. Al fine di una piena comprensione del lavoro, conviene pertanto richiamare per sommi capi quanto svolto in presenza, rimandando al report per la trattazione completa.

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

Il tema della qualità dell'aria risulta estremamente complesso includendo considerazioni relative alla salute delle persone, alla produttività ed al comfort, alle quali sono collegati una serie di aspetti positivi quali l'aumento dei ricavi o la riduzione dei costi per le attività lavorative svolte; i meccanismi che legano la qualità dell'aria agli aspetti sopra individuati 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.

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 [44][45].

Tuttavia, se esiste un legame diretto tra le portate d'aria di ventilazione e i consumi energetici, 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 [46].

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. La semplice formulazione (4.1) 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.

$$CC = a \cdot CP + b \cdot CS + c \cdot CE \quad (4.1)$$

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

Essendo i consumi energetici direttamente legati alla portata di ventilazione, con l'obiettivo della riduzione dei consumi, è necessario stabilire sotto quali condizioni e con quali mezzi si possa procedere ad una riduzione della portata d'aria di ventilazione, nel rispetto degli standard vigenti.

Lo standard italiano [48], 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.

La norma UNI EN 15251 [49] considera approcci prescrittivi o prestazionali al problema e prevede per la qualità dell'aria interna 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 degli inquinanti [50] 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 [51] [52] [53].

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. Quando l'aria esterna è inquinata, 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 [54], consapevoli del fatto che ciò comporterà probabilmente una riduzione del comfort e della produttività e quindi un incremento dei costi associati a questi aspetti.

4.3 Indice di qualità dell'aria indoor (IQAI)

La costruzione di un indice numerico composito per sintetizzare il livello di qualità dell'aria interna è certamente un compito complesso; inoltre, 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 di validità generale [55] [56] [57]. Diversi indici IAQ sono stati proposti in precedenza e si differenziano in base agli approcci utilizzati: un indice per singolo inquinante [58], aggregazione semplice [59], aggregazione riferita alla concentrazione potenzialmente più alta e più bassa dell'inquinante di interesse misurato nel patrimonio edilizio [60] e aggregazione sulla base dell'impatto sanitario [61].

Al fine di valutare i livelli di qualità dell'aria sia esterna che interna, in assenza di uno standard di riferimento unico, è stato definito un protocollo di misurazione che si basa su un indice di qualità per l'aria interna, chiamato IQAI, in grado di valutare la qualità dell'aria tenendo conto di quattro inquinanti (CO₂, VOC, PM₁₀ e Ozono). Dal momento che lo stato attuale delle conoscenze non consente di conoscere esattamente l'effetto di eventuali inquinanti o l'effetto sinergico della presenza di sostanze più inquinanti, nella definizione dell'indice è stato adottato il criterio guida della semplicità [56], anche in ragione del suo impiego che vuole essere comparativo e non associato direttamente al rischio epidemiologico.

Per quanto detto, l'IQAI viene calcolato sommando i singoli indicatori per ciascun inquinante considerato, moltiplicato per un peso specifico. Come accennato in precedenza, per il calcolo dell'indice vengono utilizzati quattro inquinanti, CO₂, O₃, VOC e PM₁₀, quindi l'IQAI viene calcolato utilizzando l'equazione (4.2)

$$IQAI = \sum_{x=1}^4 p_x \cdot I_x \quad (4.2)$$

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:

$$I_x = \frac{I_A - I_B}{C_B - C_A} \times (C_x - C_B) + I_B \quad (4.3)$$

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 stati desunti dalla letteratura scientifica [21] [62] [63] [64] e sono riportati in Tabella 4.1.

Tabella 4.1 – Valori delle concentrazioni per determinare l'indicatore adimensionale.

		Buono		Moderato		Scadente		Pessimo	
Livelli dell'indice	I _B	0		> 1		> 2		> 3	
	I _A	≤ 1		≤ 2		≤ 3		≤ 4	
Inquinante		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

4.4 Descrizione del Caso Studio

Per iniziare il processo di validazione di questa metodologia, è stato deciso di effettuare un primo test di monitoraggio di un edificio per uffici con un sistema di ventilazione automatizzato, situato in un'area altamente urbanizzata di Roma, dove spesso la qualità dell'aria esterna raggiunge livelli critici a causa del traffico veicolare e delle attrezzature di combustione.

Lo scopo del monitoraggio era quello di valutare l'andamento della qualità dell'aria interna in funzione della progressiva riduzione delle portate d'aria in presenza di elevate condizioni di inquinamento atmosferico esterno, valutando il conseguente conseguimento di risparmi energetici attraverso un'analisi dinamica del comportamento dell'edificio stesso.

L'edificio monitorato è il palazzo ex-Banco di Napoli (Figura 4.1), compreso tra via del giardino Theodoli, via del Parlamento e via del Corso, attualmente sede degli uffici amministrativi della Camera dei Deputati.



Figura 4.1 – Vista dell'edificio e ubicazione

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

L'impiantistica e le dotazioni sono classiche di un edificio per uffici; per la climatizzazione 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 a quattro tubi; l'unità di trattamento aria è posizionata in copertura, ha una portata di 6.000 m³/h;
- Zona Uffici palazzo B – C –D climatizzata con un impianto del tipo aria primaria e ventilconvettori a quattro tubi; l'unità di trattamento aria è posizionata in copertura, ha una portata di 12.500 m³/h;
- 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 a quattro tubi; l'unità di trattamento aria è posizionata al piano sotterraneo, ha una portata di 6.000 m³/h;
- Zona Polizia e controllo visitatori, climatizzata con un impianto ad espansione diretta;
- Servizi igienici, riscaldati con radiatori e dotati di opportuni sistemi di estrazione.

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

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:

- Riduzione della portata d'aria del 15% e quindi portata ridotta pari all'85% della portata nominale;
- Riduzione della portata d'aria del 30 % e quindi portata ridotta pari al 70% della portata nominale;
- Riduzione della portata d'aria 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; le simulazioni sono state effettuate solo per avere indicazioni intermedie, vista l'agilità del metodo nel simulare nuovi scenari, come variazione del modello base.

Tabella 4.2 – 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%

Analizzando gli assorbimenti elettrici nei diversi scenari simulati, si è osservato un risparmio energetico passando dallo Scenario Base agli Scenari caratterizzati da una riduzione della portata di aria esterna elaborata dalle UTA.

Tabella 4.3 – 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 4.3 risulta evidente come la riduzione della portata delle unità di trattamento dell'aria comporti un risparmio energetico che va dal 7% dello Scenario A (riduzione della portata d'aria del 15%), al 12% 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%.

4.5 Campagna di monitoraggio

Il monitoraggio termo-igrometrico e della qualità dell'aria è stato effettuato sia all'esterno dell'edificio (nell'area circostante l'edificio e sul tetto) sia in alcune stanze selezionate per la loro posizione e per la necessità di avere un'occupazione costante durante le misurazioni (le sale campionate hanno una occupazione variabile tra 2 e 3 persone, con finestre rigorosamente chiuse durante l'orario di lavoro).

La Figura 4.2 mostra i risultati delle misure effettuate relativamente a temperatura e umidità relativa, nelle due condizioni esaminate, a portata d'aria nominale (ex-ante) e a portata d'aria dimezzata (ex-post).

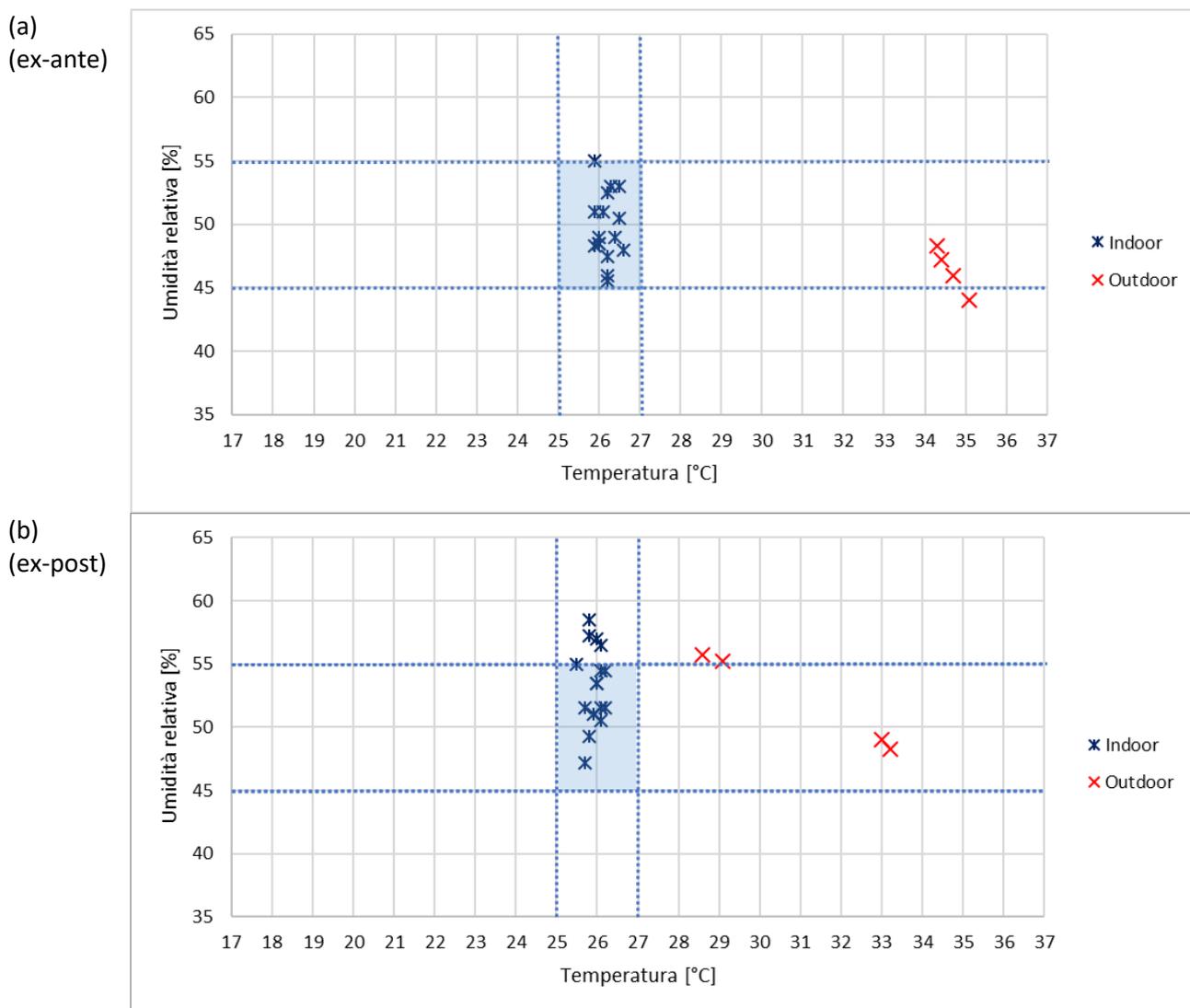


Figura 4.2 - Temperatura e umidità relativa.

Dall'esame di Figura 4.2 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). Diversamente, l'impianto di climatizzazione, in funzionamento ad una portata pari alla metà della portata nominale, non risulta pienamente in grado di mantenere i parametri ambientali all'interno dell'intervallo di comfort (temperatura = 26°C ±1; umidità relativa = 50%±5). In particolare, trattandosi di un impianto ad aria primaria e ventilconvettori, si osserva come, al diminuire della portata, non si manifesti nessun problema nel controllo della temperatura, essendo questa controllata 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.

Parallelamente alle misure termoigrometriche si sono svolte le misure di qualità dell'aria, rilevando le concentrazioni degli inquinanti selezionati (anidride carbonica, PM₁₀, VOC, ozono). Dopo aver esaminato gli andamenti e le variazioni degli inquinanti monitorati e confrontato le situazioni ex-ante e ex-post, è stato effettuato il calcolo dell'indice IQAI, per poter arrivare alla classificazione della qualità dell'aria.

I grafici di Figura 4.3 riportano i risultati del 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 ($P_{PM10}=0,25$; $P_{VOC}=0,25$; $P_{O3}=0,25$; $P_{CO2}=0,25$) e applicando, per estensione, l'indicatore IQAI anche all'aria esterna.

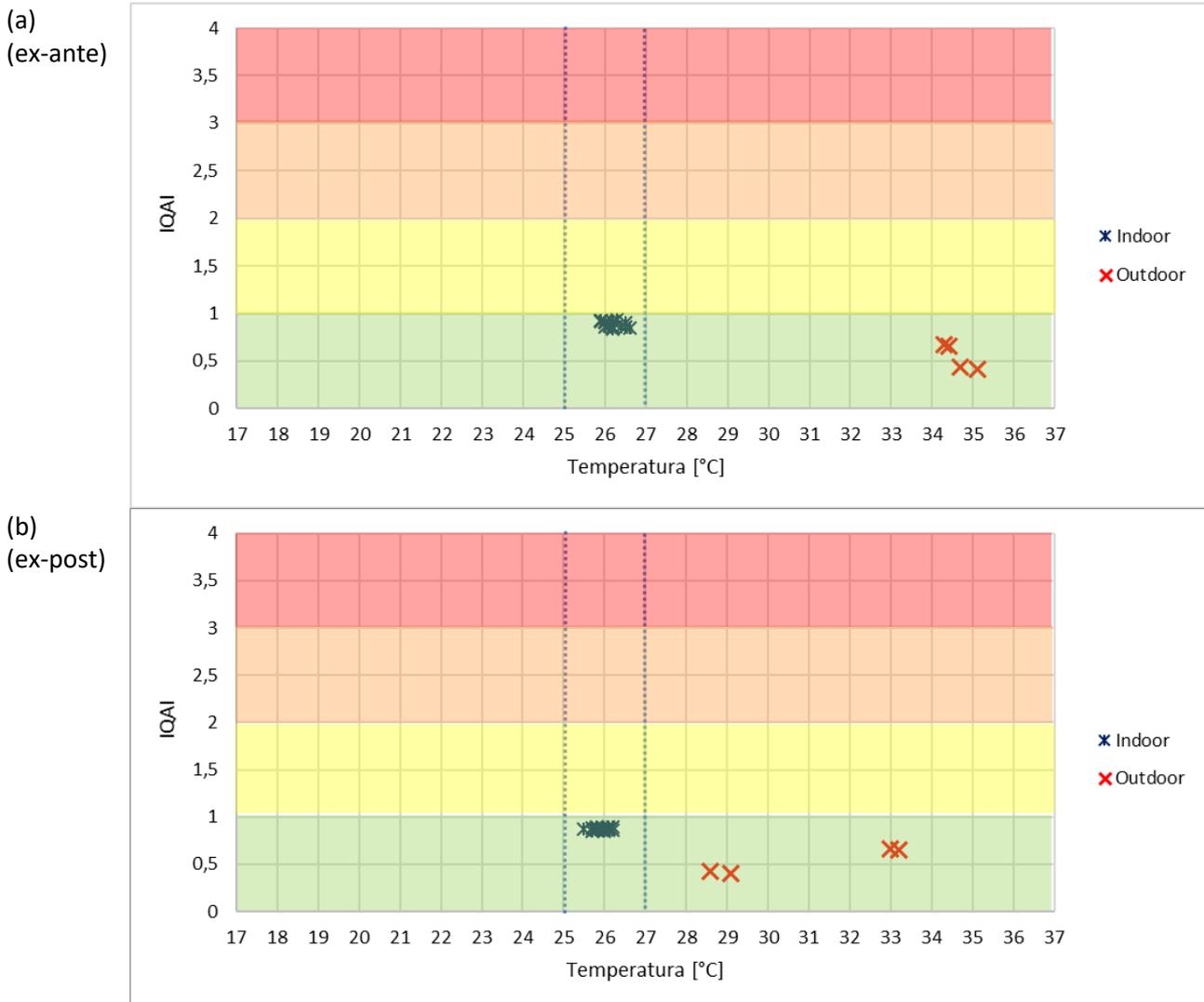


Figura 4.3 - IQAI; (a) ex-ante; (b) ex-post.

L'osservazione congiunta dei grafici di Figura 4.3 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.

5 Analisi di letteratura per conferma indicatore

Preliminarmente all’attività di misura è stata replicata un’attività di ricerca bibliografica, volta a considerare nuovamente lo stato dell’arte in materia di valutazione della qualità dell’aria.

La ricerca ha portato a confermare l’indicatore IQAI proposto nella precedente annualità sulla base di una serie di conferme trovate andando a considerare diversi schemi di certificazione riguardanti la bioedilizia in diverse zone geografiche, e diversi studi volti a legare la qualità dell’aria interna alla salute, anche con riferimento al caso specifico degli edifici universitari.

5.1 Bioedilizia e Qualità dell’Aria Indoor

Le certificazioni riguardanti la bioedilizia mirano a realizzare edifici sostenibili che siano sani, a risparmio energetico e rispettosi dell’ambiente. Per avere ambienti costruiti in modo sano per gli occupanti, è necessario mantenere un’elevata qualità dell’ambiente interno [65].

Per definire la sostenibilità degli edifici, i requisiti possono essere suddivisi in diverse categorie, come l’efficienza energetica, il consumo di risorse e la salute. In ogni categoria, ci sono diverse sezioni ; i ciascuna sezione sono definiti in dettaglio diversi requisiti. Per ciascun requisito in uno schema di bioedilizia, viene utilizzato un sistema di punteggio per valutare in che misura il requisito è raggiunto. Il punteggio finale totale rappresenta la sostenibilità del ciclo di vita dell’edificio e viene calcolato dopo aver valutato tutti i requisiti dello schema. Pertanto, il punteggio finale totale è una funzione dei punteggi nelle rispettive categorie, sezioni e requisiti.

Il requisito della qualità dell’aria interna, come sottogruppo dei requisiti riguardanti la qualità dell’ambiente interno, viene preso in considerazione in diversa misura, nelle certificazioni di bioedilizia in tutto il mondo.

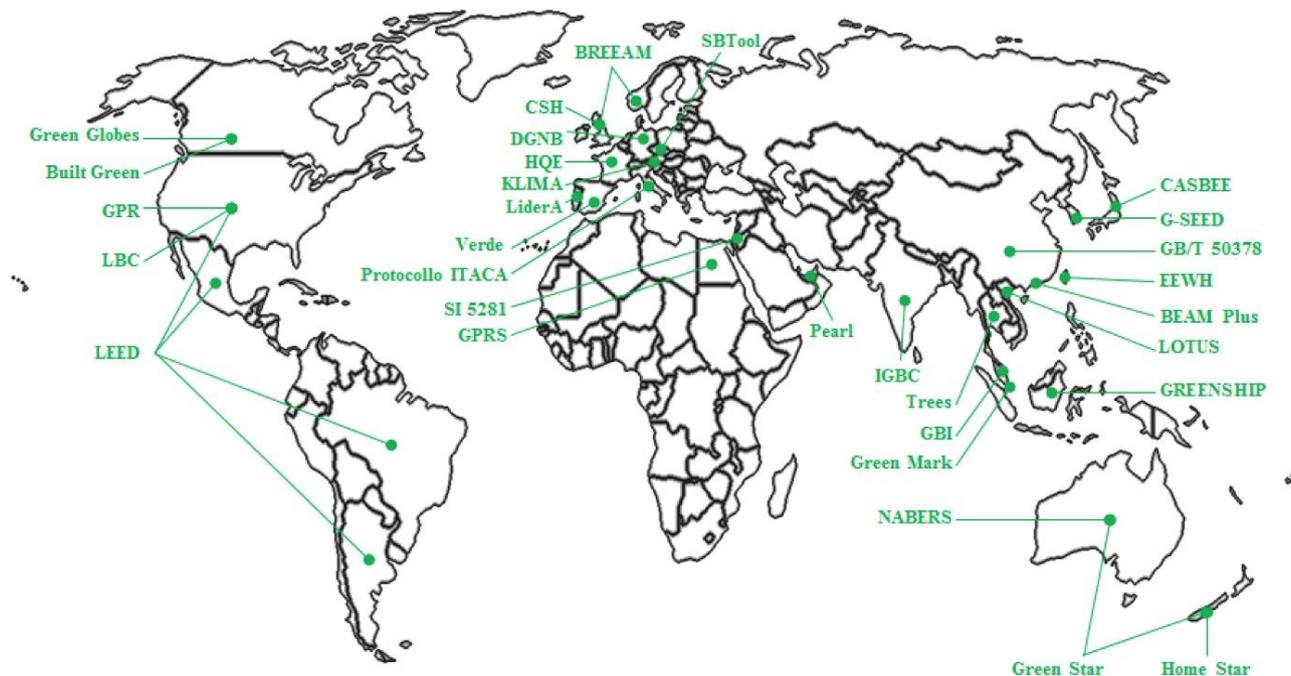


Figura 5.1 – Certificazioni di bioedilizia in tutto il mondo

Il contributo medio della IAQ ai certificati di bioedilizia è del 7,5%, come mostrato in Figura 5.2.

In generale, i certificati di edilizia ecologica americana pongono maggiormente l'accento sulla IAQ rispetto ai sistemi utilizzati in altri paesi. Il contributo medio di IAQ ai certificati di certificazione per l'edilizia verde americana è pari al 9,4%. Tuttavia, il contributo più alto di IAQ a livello mondiale è del 10,6% per la certificazione Trees in Thailandia. Il massimo contributo della IAQ ai certificati europei è del 10% per la certificazione KLIMA in Austria.

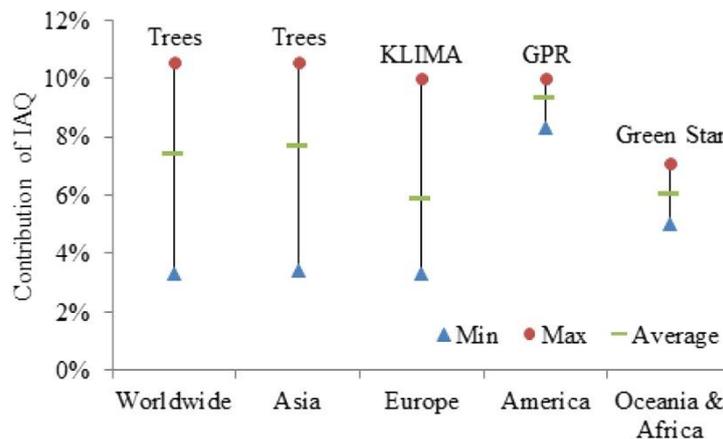


Figura 5.2 – Contributo della IAQ nelle certificazioni di bioedilizia per continente.

Nei diversi schemi di certificazione, gli inquinanti atmosferici interni sono stati presi in considerazione in diversa misura, come mostrato in Figura 5.3. In alcuni casi (EEWH, Protocollo ITACA e Home Star), nessun inquinante specifico dell'aria interna è individuato.

Gli inquinanti atmosferici indoor più frequentemente considerati sono VOC, formaldeide e anidride carbonica (CO₂):

- i VOC sono presi in considerazione nell'84% dei certificati di bioedilizia, principalmente per rappresentare gli inquinanti chimici interni, in molti casi non identificando composti specifici nella categoria;
- la CO₂ è considerata un inquinante interno nel 65% delle certificazioni;
- l'inquinamento da amianto è preso in considerazione nel 45% delle certificazioni, non solo per gli edifici esistenti ma anche per le nuove costruzioni;
- i microbi, come funghi e batteri, sono considerati nel 32% delle certificazioni;
- il controllo delle concentrazioni di particelle nell'aria indoor (PM10 o PM2,5) è presente nel 16% delle certi fi cazioni.

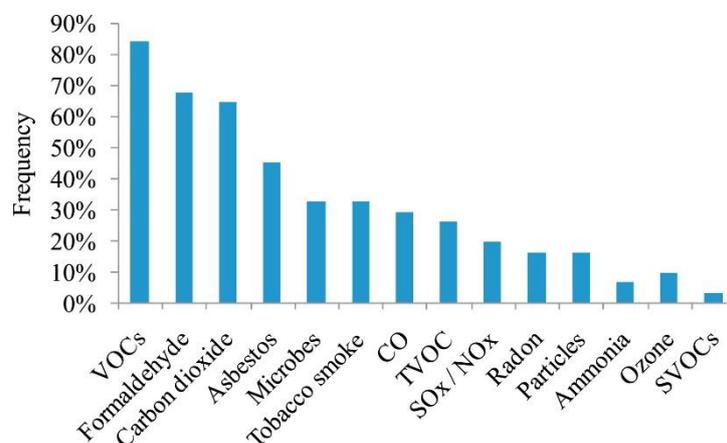


Figura 5.3 – Frequenza degli inquinanti dell'aria indoor nei certificati di bioedilizia in tutto il mondo.

In Europa, Asia, America, Oceania e Africa la presenza di inquinanti dell'aria indoor è enfatizzata in diversa misura.

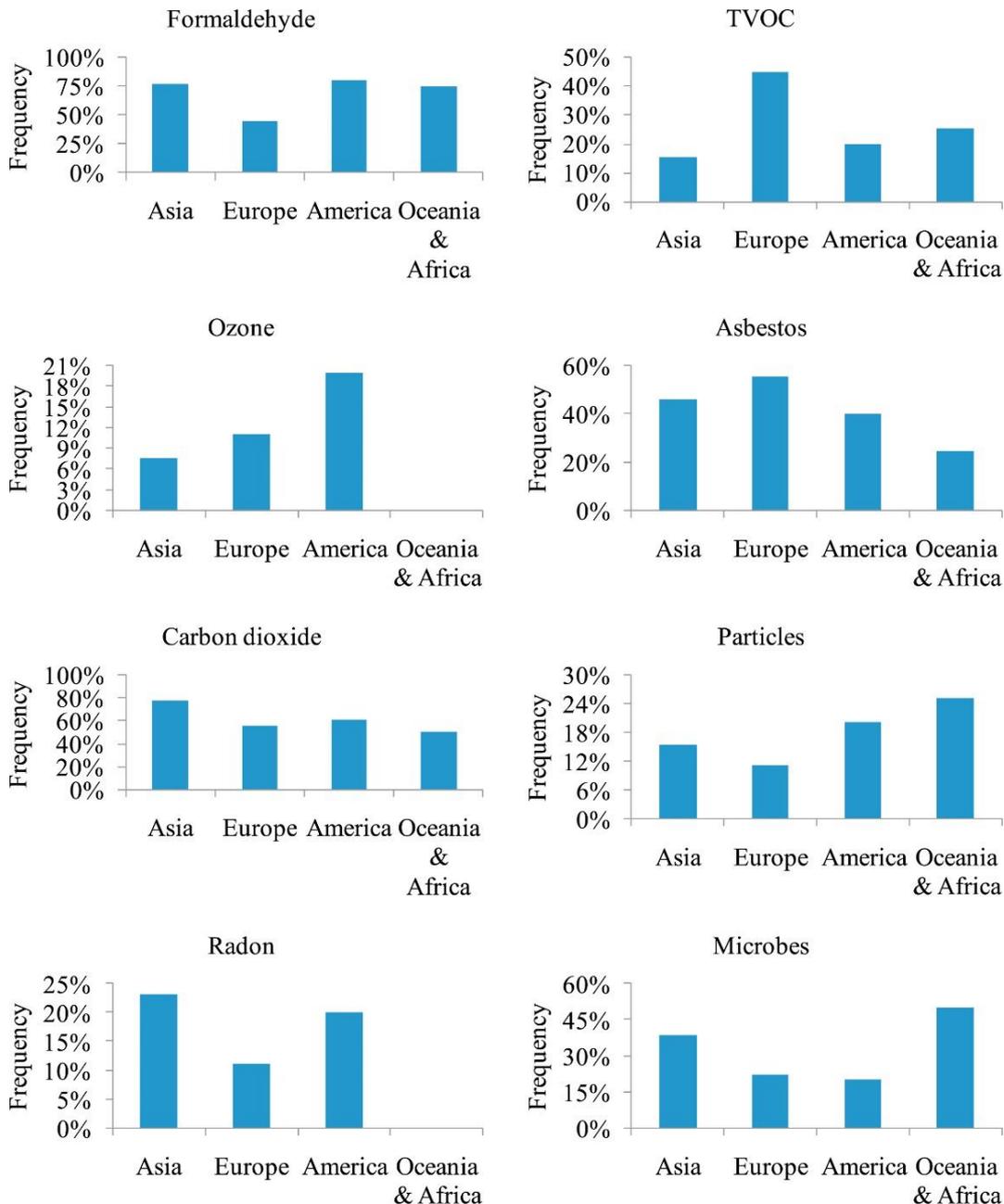


Figura 5.4 – Frequenza degli inquinanti indoor significativi nelle certificazioni per continente.

Per quanto riguarda la fase di gestione dell'edificio, il controllo delle sorgenti di emissione, la ventilazione e la misurazione della qualità dell'aria interna sono i tre principali percorsi utilizzati negli schemi di bioedilizia (Figura 5.5).

In tutti gli schemi di certificazione, la ventilazione è considerata come la misura prioritaria per gestire la IAQ. Il controllo delle fonti di emissione è incluso nel 77% degli schemi di certificazione e si rivolge principalmente alle emissioni dei materiali da costruzione.

La misurazione della qualità dell'aria interna è inclusa nel 65% degli schemi di certificazione, potendo essere facoltativa, in alcuni casi.

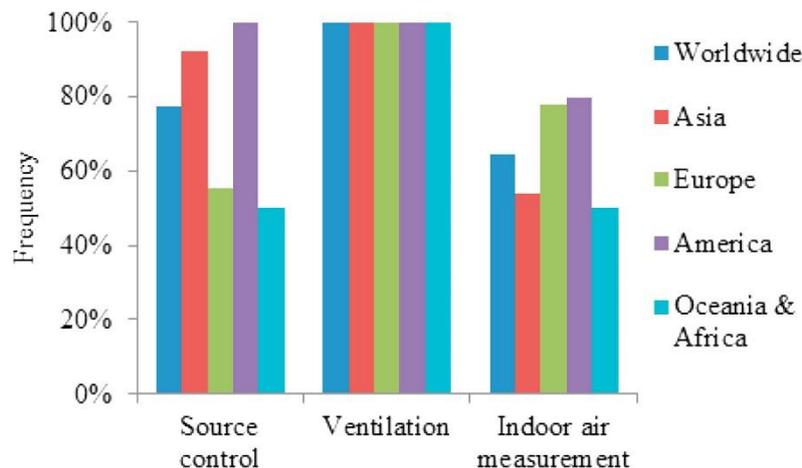


Figura 5.5 - IAQ nella gestione dell'edificio.

La misurazione dell'aria interna può avvenire prima o durante l'occupazione al chiuso, a seconda dello schema di certificazione. Negli schemi che propongono la misurazione dell'aria interna, gli inquinanti considerati per la IAQ possono essere diversi, come mostrato in Figura 5.6; in media, tre inquinanti sono misurati in ciascuna certificazione.

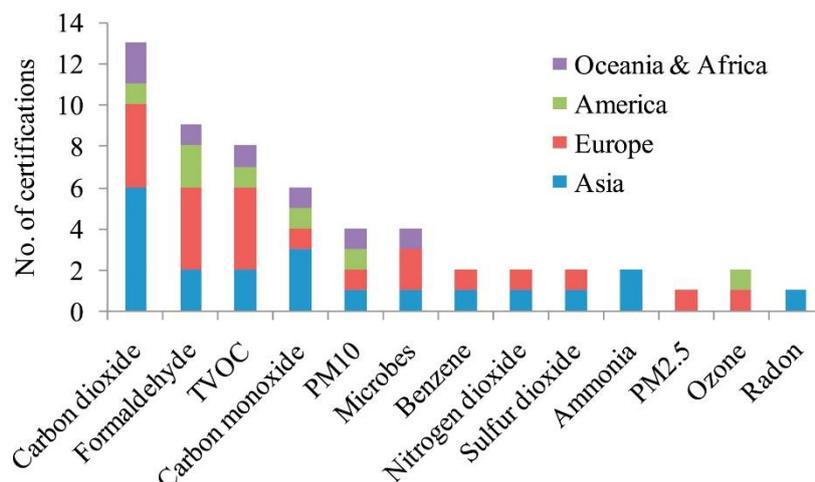


Figura 5.6 - Inquinanti dell'aria interna misurati.

Le strategie di campionamento dell'aria interna non sono menzionate in dettaglio nella maggior parte delle certificazioni che propongono la misurazione dell'aria interna.

In generale, il numero e la posizione dei punti di campionamento dipendono dalla dimensione dell'edificio e devono rappresentare spazi occupati "normali". Informazioni dettagliate su come misurare gli inquinanti dell'aria interna di solito non sono incluse nei sistemi di bioedilizia.

Le concentrazioni misurate di inquinanti dell'aria interna sono di solito confrontate con valori soglia; gli intervalli delle soglie di concentrazione possono variare tra i certificati in base a diversi punti di valutazione o tempi di esposizione.

5.2 Qualità dell’Aria Indoor e salute

Gli ambienti interni rappresentano un mix di inquinanti esterni prevalentemente associati al traffico veicolare e alle attività industriali, che possono entrare con infiltrazioni e/o sistemi di ventilazione naturale e meccanica, nonché contaminanti interni, originati all'interno dell'edificio, da fonti di combustione (come combustibili bruciati, carbone e legno, prodotti del tabacco e candele), emissioni di materiali e arredi, sistemi di riscaldamento e raffreddamento centralizzati, dispositivi di umidificazione, processi di umidità, apparecchiature elettroniche, prodotti per la pulizia della casa, animali domestici e il comportamento degli occupanti dell'edificio (cioè, fumare, dipingere, ecc.). [66]

La IAQ può essere influenzata da varie sostanze chimiche, inclusi i gas (ad es. Monossido di carbonio, ozono, radon), composti organici volatili (VOC), particolato (PM) e fibre, contaminanti organici e inorganici e particelle biologiche come batteri, funghi, e polline. L'ampio numero di variabili che influiscono sulla IAQ porta inevitabilmente a una vasta gamma di studi e articoli scientifici pubblicati su riviste di molti tipi di materie scientifiche (ad esempio, chimica, medicina, scienze ambientali, ecc.).

In particolare, un campionamento di aria interna è stato effettuato a Palermo [67] per determinare 181 VOC emessi da diverse fonti (combustibili, traffico, discariche, torrefazione del caffè, laboratorio di cibo di strada, lavori di costruzione, uso interno di incenso e candele, laboratorio odontotecnico, ecc.) utilizzando campionatori automatici e gascromatografia-spettrometria di massa per l'analisi dei VOC.

Per quanto riguarda l’aria interna nelle abitazioni, uno studio effettuato in Macedonia [68] ha tentato di fornire maggiori informazioni sulla IAQ di 25 abitazioni. Gli inquinanti atmosferici misurati includevano VOC totali, PM e anche umidità relativa e pressione sonora. Gli autori hanno trovato interessanti dipendenze tra le caratteristiche degli edifici (anno di costruzione, anno di ristrutturazione, presenza di fumatori e sistema di riscaldamento) e le misure chimico-fisiche (temperatura, umidità relativa, TVOC, PM_{2,5} e PM₁₀) usando approcci statistici.

Anche l’IAQ in ambienti chiusi è stato studiato nel nord di Taiwan nelle stazioni della metropolitana [69] al fine di valutare l'insorgenza e i livelli di sostanze chimiche (inclusi umidità, temperatura, monossido di carbonio, anidride carbonica, formaldeide, TVOCs, ozono, PM₁₀ e PM_{2,5} e concentrazioni di agenti microbici). Una potenziale minaccia per la IAQ negli ambienti interni può essere correlata al contributo delle concentrazioni di inquinanti esterni e ai tassi di infiltrazione, che influenzano le concentrazioni a cui le persone sono esposte al chiuso.

In uno studio effettuato su ambienti interni ed esterni presso un ospedale universitario [70] si è invece osservato che l’IAQ (con misurazione di VOC, acroleina, formaldeide, biossido di azoto, PM_{2.5}, benzene), era principalmente correlata a fonti e attività interne, non mostrando evidenza di contributi significativi di fonti locali esterne note a nessuno dei parametri IAQ misurati. Ridurre al minimo gli inquinanti dell'aria interna è fondamentale per edifici scolastici ad alte prestazioni, a causa degli effetti potenzialmente dannosi che VOC, particolato, allergeni, muffe e gas di combustione possono avere sulla salute e il benessere degli studenti. Oltre alla loro capacità di scatenare attacchi di asma o allergie, alcuni di questi inquinanti sono noti per causare sintomi simil-influenzali, mal di testa, nausea e irritazione degli occhi, del naso e della gola; inoltre, una recente ricerca suggerisce che l'ambiente fisico di un edificio scolastico può anche svolgere un ruolo importante nelle prestazioni accademiche.

Uno studio effettuato su 144 aule in 37 scuole elementari convenzionali e ad alte prestazioni negli Stati Uniti [71] ha valutato concentrazioni di VOC e parametri IAQ e ha scoperto che aromatici, alcani e terpeni sono i VOC più frequenti, con concentrazioni simili tra edifici convenzionali ed edifici ad alte prestazioni.

In [72] viene valutato l’impatto del rinnovamento energetico sulla IAQ, sui tassi di ricambio dell’aria e sulla soddisfazione degli occupanti negli edifici residenziali slovacchi, confrontando coppie di edifici residenziali multifamiliari identici a ventilazione naturale (uno rinnovato di recente, l’altro nelle sue condizioni originali).

Il confronto è stato eseguito mediante questionari rivolti agli utenti e mediante misurazioni di parametri ambientali (T, UR) e inquinanti dell'aria interna (CO₂, NO₂, formaldeide e VOC).

In [73] viene presentato un sistema di misurazione per il monitoraggio delle prestazioni degli edifici rivolto anche alla qualità ambientale interna (IEQ). Il sistema include vari sensori per la misura di temperatura, umidità relativa, illuminamento e occupazione; la qualità dell'aria è considerata attraverso la misurazione di CO₂, VOC, PM_{2,5}.

In [74] è stato sviluppato un set di parametri per la valutazione della prestazione energetica e per la IAQ negli edifici residenziali degli Stati Uniti. Gli inquinanti indoor modellati includono PM_{2,5}, O₃, NO₂ e diversi composti organici volatili (VOC) e aldeidi. Le concentrazioni degli inquinanti indoor ponderate per la popolazione sono state utilizzate anche per stimare il carico sanitario cronico delle esposizioni residenziali al chiuso.

In [75] vengono valutati gli effetti di implementazioni al sistema ibrido di ventilazione delle aule di un edificio scolastico attraverso questionari rivolti agli utenti e attraverso la misurazione di CO₂ e VOC.

In [76] è presentata una ricerca finalizzata a studiare la qualità dell'aria in edifici residenziali. Anche in questo caso viene effettuata la misurazione di parametri ambientali (temperatura, umidità relativa) e della concentrazione di inquinanti ritenuti significativi, quali composti organici volatili e particolato.

5.3 Particolarità degli edifici universitari

Il raggiungimento di una buona qualità ambientale (IEQ) negli edifici esistenti è argomento di estrema attualità, correlato alla forte domanda di retrofit degli edifici in Europa. Gli edifici non residenziali esistenti pongono sfide principalmente dovute a modelli di occupazione che si evolvono, alla mancanza di controllo sul comfort e a strutture edilizie spesso obsolete [77]. Non fanno eccezione i campus universitari e gli istituti scolastici, noti anche per consumare quantità elevate di energia a causa di orari di attività che coinvolgono tutta la giornata e tutto l'anno, con occupazione di uffici, biblioteche, aule, sale conferenze e laboratori [78].

Molti degli edifici esistenti nei campus sono vecchi e l'opportunità di progettare un campus sostenibile è limitata. Tuttavia, il loro potenziale di risparmio energetico può essere aumentato attraverso retrofit energetici efficienti, gestione energetica efficace, analisi dei modelli di consumo energetico intrinseco e uso delle energie rinnovabili [79][80]. Gli interventi di retrofit offrono l'opportunità di migliorare la IAQ negli edifici e una buona IAQ è fondamentale per un elevato standard di istruzione [81]. Uno studio IEQ condotto su un edificio scolastico [82] ha valutato l'indice IAQ e lo ha dimostrato come un buon indicatore del comfort, della salute e dei costi operativi dell'edificio. È stata evidenziata una forte associazione tra l'IEQ, il comfort e la soddisfazione, la prestazioni studio/lavoro e anche il consumo energetico.

Una ricerca su scuole non riqualificate in Portogallo [83] ha identificato in generale un comfort insufficiente e una IAQ non adeguata, dovuti principalmente ad una bassa temperatura dell'aria interna, accompagnata da bassi tassi di ventilazione.

Una ricerca su edifici scolastici e uffici ha evidenziato grandi possibilità di risparmio energetico [84], introducendo la ventilazione meccanica controllata a richiesta (DCV), ovvero un sistema di ventilazione con portate d'aria controllate sulla base di una misurazione della qualità dell'aria interna (IAQ) e di un parametro di comfort termico (generalmente la temperatura). L'utilizzo della DCV consente un funzionamento a portate d'aria ridotte durante una grande quantità del tempo di funzionamento e quindi risparmi energetici, connessi al funzionamento dei ventilatori e alle batterie di riscaldamento e di raffreddamento.

6 Il protocollo di misura

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.

6.1 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 6.3.1), 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.

6.2 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.

6.3 Strumenti di misura

6.3.1 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.



Le sonde utilizzate per la campagna di misure sono:

- sonda anemometrica a filo caldo, per misure della velocità media dell'aria e di intensità di turbolenza (accuratezza ± 5 cm per va comprese tra $0 \div 0,5$ m/s, ± 10 cm per va comprese tra $0,5 \div 1,5$ m/s e 4% per va $> 1,5$ m/s);
- psicrometro a ventilazione forzata: incorpora due sensori standardizzati al platino per la misura della temperatura a bulbo secco e umido a ventilazione forzata (accuratezza sulla temperatura $\pm 0,18$ °C, accuratezza sull'umidità relativa $\pm 3\%$);
- sonda globotermometrica in rame nero opaco (riflessione $< 2\%$), di 15 cm di diametro, per la misura della temperatura media radiante (accuratezza ± 0.17 °C)

Figura 6.1 – BABUC/E.

6.3.2 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.



Sensore ozono (O₃) AQ-OZL

- Range di misura: 0 ... 0,5 ppm
- Rilevamento minimo: 0,001 ppm
- Precisione: $< \pm 0,008$ / 0 ... 0,1 ppm
- Risoluzione: 0,001 ppm
- Temperatura: 0 ... +40 °C
- Umidità: 10 ... 90 %

Sensore PID AQ-PDL / VOC PDL (rilevatore fotoionizzazione)

- Range di misura: 0 ... 20 ppm
- Rilevazione minima: 0,01 ppm
- Precisione: $< \pm 10$ %
- Risoluzione: 0,01 ppm
- Temperatura: 0 ... +40 °C
- Umidità: 10 ... 90 %

Figura 6.2 – Misuratore gas AQ-200

6.3.3 Misuratore PM₁₀

Il monitor di aerosol TSi DustTrak fornisce una valutazione attendibile dell'esposizione del lavoratore a contaminanti in aria come polvere, fumo, fumi e nebbie misurando le concentrazioni di particelle PM-10. Una pompa integrale richiama le particelle solide e liquide per la misurazione. Il monitor Dusttrak aerosol è un fotometro portatile a batteria, che misura e registra le concentrazioni di polveri in aria. Le applicazioni comuni comprendono studi di qualità dell'aria interna, monitoraggio del posto di lavoro industriale e controlli tecnici, monitoraggio ambientale e perimetrale.

7 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 di proprietà della Pubblica Amministrazione adibito ad attività universitaria per la ottimizzazione delle portate di aria di ricambio finalizzata all'efficienza energetica».

Con l'obiettivo di una ottimizzazione della portata esterna d'aria finalizzata all'efficienza energetica e relativamente all'IQAI per la valutazione della qualità dell'aria, 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. Parallelamente sono state effettuate delle simulazioni energetiche volte a valutare il risparmio energetico tra le due situazioni.

7.1 Il caso studio: l'Aula Magna della sede di Valle Giulia della Facoltà di Architettura

7.1.1 Descrizione dell'edificio e della sua collocazione

L'edificio che ospita l'Aula Magna oggetto dello studio è la sede di Valle Giulia della Facoltà di Architettura dell'Università degli Studi di Roma "Sapienza", collocato all'interno della cosiddetta *Valle delle Accademie*, nel Municipio II del Comune di Roma (Figura 7.1).

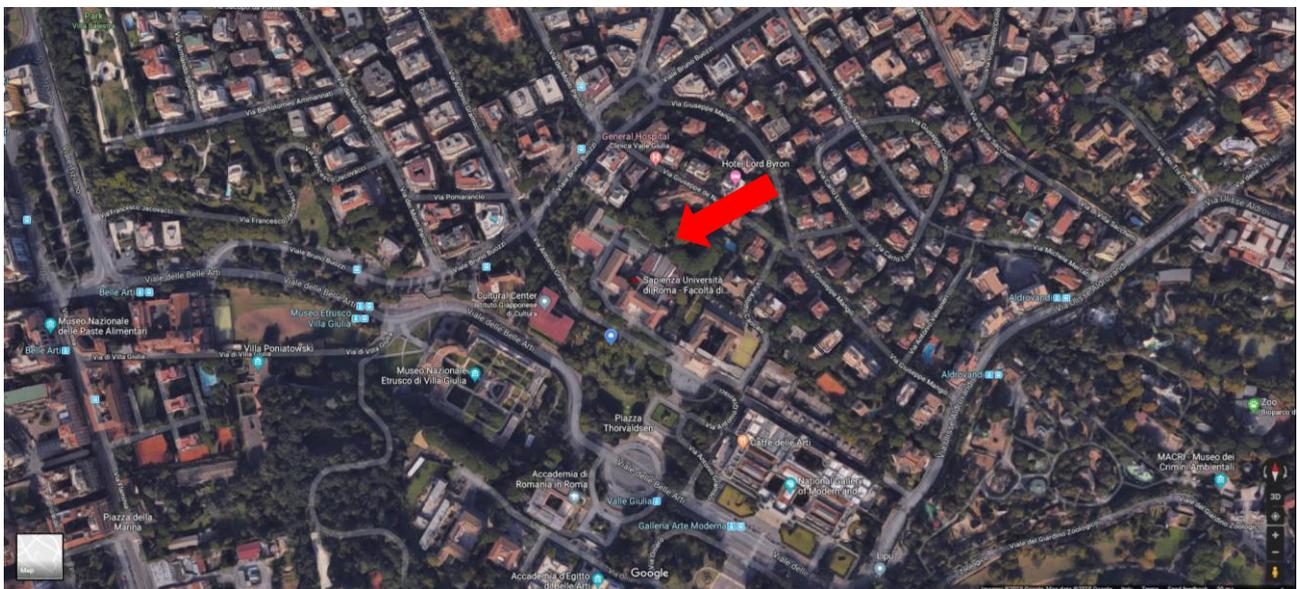


Figura 7.1 – Collocazione dell'edificio (Fonte Google Maps).

La costruzione dell'edificio iniziò alla fine del 1930 su progetto dell'architetto Enrico del Debbio; alla fine del 1931, ci si rese immediatamente conto della necessità di un primo ampliamento, con aggiunta di due nuove aule di lezione e dell'aula magna di allora (Figura 7.2).

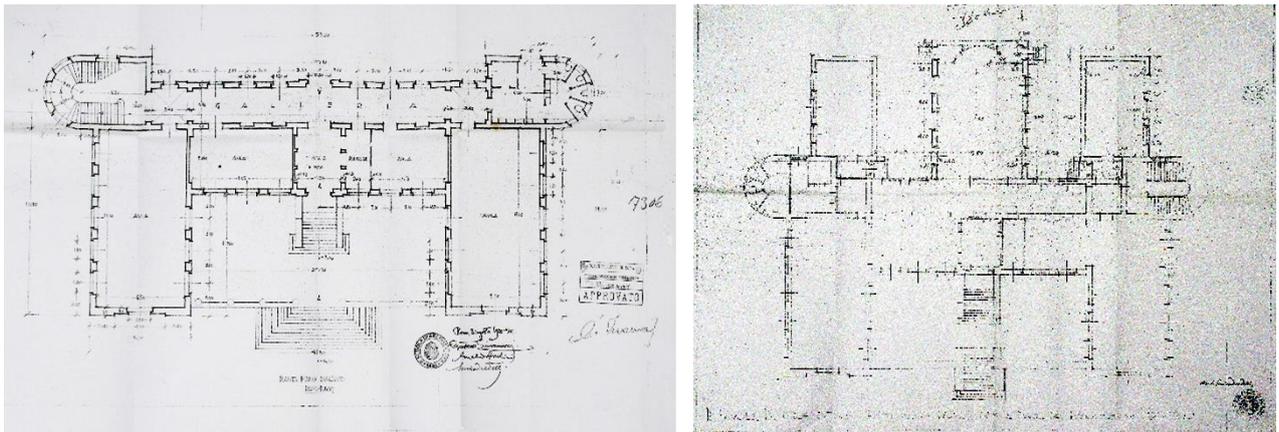


Figura 7.2 – Del Debbio E.,1930. Progetto originario della Facoltà di Architettura di Roma, pianta (a sinistra): Del Debbio E.,1931. Progetto di ampliamento della Facoltà di Architettura di Roma, pianta (a destra).

All’edificio così realizzato si aggiunse, nel 1934, un corpo basso a forma di C nella parte posteriore che, saldandosi con i due corpi laterali, rinchioda in una corte articolata l’aula magna di allora. L’edificio rimane tale fino agli anni ‘50 del secolo scorso.

Fu subito denunciata la necessità di un restauro e di un ampliamento radicale dell’esistente. Nel 1953, concessa alla facoltà l’area adiacente l’edificio esistente, si diede il via alla realizzazione del primo progetto di ampliamento (Figura 7.3, a sinistra), detto “Ampliamento I”. La scelta fu quella dell’aggiunta di un corpo a forma di L, nella parte frontale, sensibilmente arretrato rispetto all’edificio esistente, a sottolineare una sorta di gerarchia, che si salda ad esso all’altezza della galleria con la demolizione di una torretta. Su questa nuova ala, nel corpo di giunzione con il vecchio edificio, vengono spostati il nuovo ingresso e il nuovo scalone d’accesso ai piani superiori.

Nel 1959, terminato l’Ampliamento I, sorgono nuove necessità e Del Debbio redige un nuovo progetto detto Ampliamento II, approvato dopo varie modifiche nel 1962 (Figura 7.3, a destra). Nell’estate del 1962 iniziarono i lavori per la costruzione della nuova Aula Magna, che vennero immediatamente sospesi dal Comune, per alcune questioni sorte con la confinante Ambasciata del Belgio. L’Ampliamento II non fu mai portato a termine, ad esclusione dell’Aula Magna, oggetto del presente studio. Terminati i lavori dell’Aula Magna, nel 1963, si pensò ad un Ampliamento III, che rispettasse le imposizioni di distacco e di altezze dalla confinante Ambasciata del Belgio, ma che non venne mai realizzato a causa dell’incertezza dei finanziamenti.

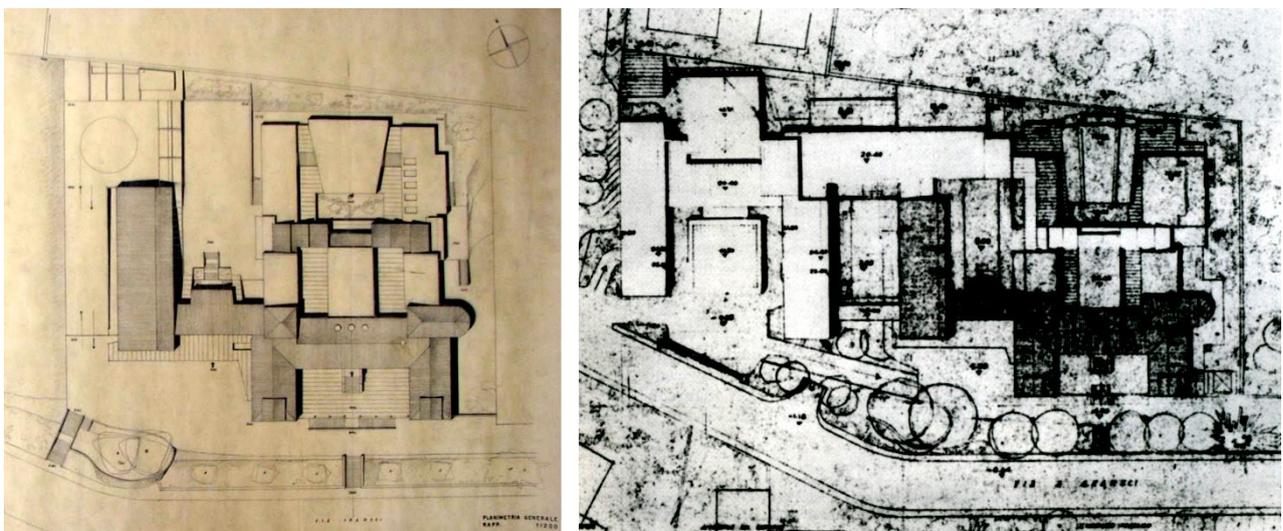


Figura 7.3 – Del Debbio E., 1951. “Ampliamento I” della Facoltà di Architettura di Roma, planivolumetrico (a sinistra); Del Debbio E., 1959. “Ampliamento II” della Facoltà di Architettura di Roma, planivolumetrico (a destra).



Figura 7.4 – Vista dall’alto dell’edificio con indicazione dell’Aula Magna (Fonte Google Maps).



Figura 7.5 – Vista dell’ingresso principale.

7.1.2 Analisi dell’edificio allo stato attuale

Per caratterizzare dal punto di vista energetico l’edificio, nello stato attuale, è stata effettuata la raccolta di tutti i dati riguardanti l’involucro e gli impianti.

E’ stato realizzato un vasto abaco delle pareti perimetrali verticali che costituiscono l’involucro opaco attraverso indagini non distruttive; l’indagine diretta sugli spessori murari ha consentito di determinare la tipologia delle strutture murarie; la ricerca delle fonti storiche ha permesso di dedurre l’assenza di isolamenti termici, resi obbligatori solo successivamente alla costruzione dell’edificio. Le strutture murarie possono essere raggruppate in quattro diverse tipologie:

- muratura piena in blocchi di tufo;

- muratura a cassetta con paramento interno in mattoni forati, intercapedine e paramento esterno in mattoni pieni;
- muratura in calcestruzzo armato;
- muratura in mattoni pieni.

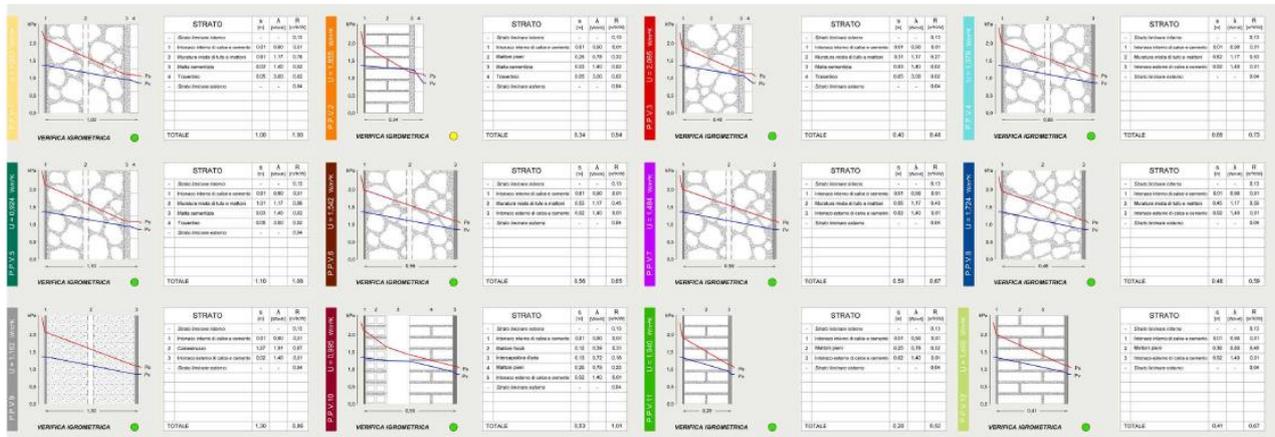


Figura 7.6 – Estratto dell’abaco delle pareti perimetrali.

Anche per l’involucro trasparente è stato redatto un abaco sulla base dell’indagine a vista effettuata. I serramenti sono stati classificati in quattro diverse tipologie:

- vetro singolo 4 mm, telaio in ferro $U = 6,14 \text{ W/m}^2\text{K}$;
- vetro singolo 4 mm, telaio in alluminio senza taglio termico $U = 6,16 \text{ W/m}^2\text{K}$;
- vetro-camera 4-12-4 con aria, telaio in alluminio senza taglio termico $U = 4,03 \text{ W/m}^2\text{K}$;
- vetro-camera 4-6-4 con aria, telaio in alluminio a taglio termico $U = 3,64 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Tutto l’edificio è servito da un impianto di riscaldamento, con un’unica centrale termica costituita da due caldaie a gas a temperature scorrevole da 600 kW ciascuna; i terminali di impianto sono in generale radiatori; il sistema di regolazione provvede unicamente a regolare la temperatura di mandata dell’acqua in funzione della temperatura esterna, mentre non è presente nessun sistema di regolazione della temperatura dei vari ambienti. La mancanza di un controllo locale della temperatura comporta molto spesso dei surriscaldamenti degli ambienti, ben oltre la temperatura di comfort invernale, creando discomfort per gli occupanti e procurando un inutile dispendio di energia; tali surriscaldamenti si verificano soprattutto nelle aule, in conseguenza degli elevati apporti interni e delle radiazioni solari attraverso le ampie superfici vetrate.

L’assenza di sistemi impiantistici per il controllo della temperatura estiva rende in generale poco confortevole l’utilizzo estivo degli ambienti, soprattutto di quelli caratterizzati da un’alta incidenza della radiazione solare. Gli ambienti dotati di impianto di raffrescamento estivo sono pochi, con impianti installati solo recentemente; oltre agli uffici amministrativi, i quali utilizzano sistemi a pompa di calore con unità singole di piccole dimensioni (monosplit), gli impianti di raffrescamento all’interno dell’edificio sono sostanzialmente di due tipi:

- un impianto di raffrescamento a ventilconvettori con tre refrigeratori d’acqua posti nelle immediate prossimità delle aule servite (il gruppo di aule 4, 12, 19);
- impianti ad espansione diretta del tipo multisplit al servizio di aule isolate con unità esterne nelle immediate prossimità delle aule servite (aula, 1, aula2, aula 3, aula 15).

Solo l’Aula Magna è dotata di un impianto di climatizzazione; tale impianto è del tipo a tutt’aria ed è costituito da un gruppo frigo polivalente da 220 kWf e da due unità di trattamento aria da 7.000 m³/h ciascuna.

7.1.3 Descrizione dell’Aula Magna e del suo impianto di climatizzazione

Il Caso Studio di questo lavoro rappresentato dall’Aula Magna dell’edificio, scelta in ragione della tipologia impiantistica e della destinazione d’uso; essa costituisce una piccola porzione dell’edificio e la sua

configurazione attuale in parte deriva dalla configurazione originaria, in parte deriva dalla recente ristrutturazione conclusasi nel 2005.

L'Aula Magna ha una superficie utile di circa 370 m² e un volume netto di circa 2.500 m³. Ha una struttura a gradoni e ospita 400 posti a sedere.

Nella configurazione attuale, le pareti che circondano l'Aula sono tutte opache, con la sola piccola eccezione rappresentata da due porte che funzionano da uscite di sicurezza. Con la ristrutturazione del 2005, infatti, le finestre posizionate sui lati lunghi, nella parte alta delle pareti sono state chiuse, per facilitare la collocazione dei canali dell'impianto di climatizzazione e dei relativi terminali.

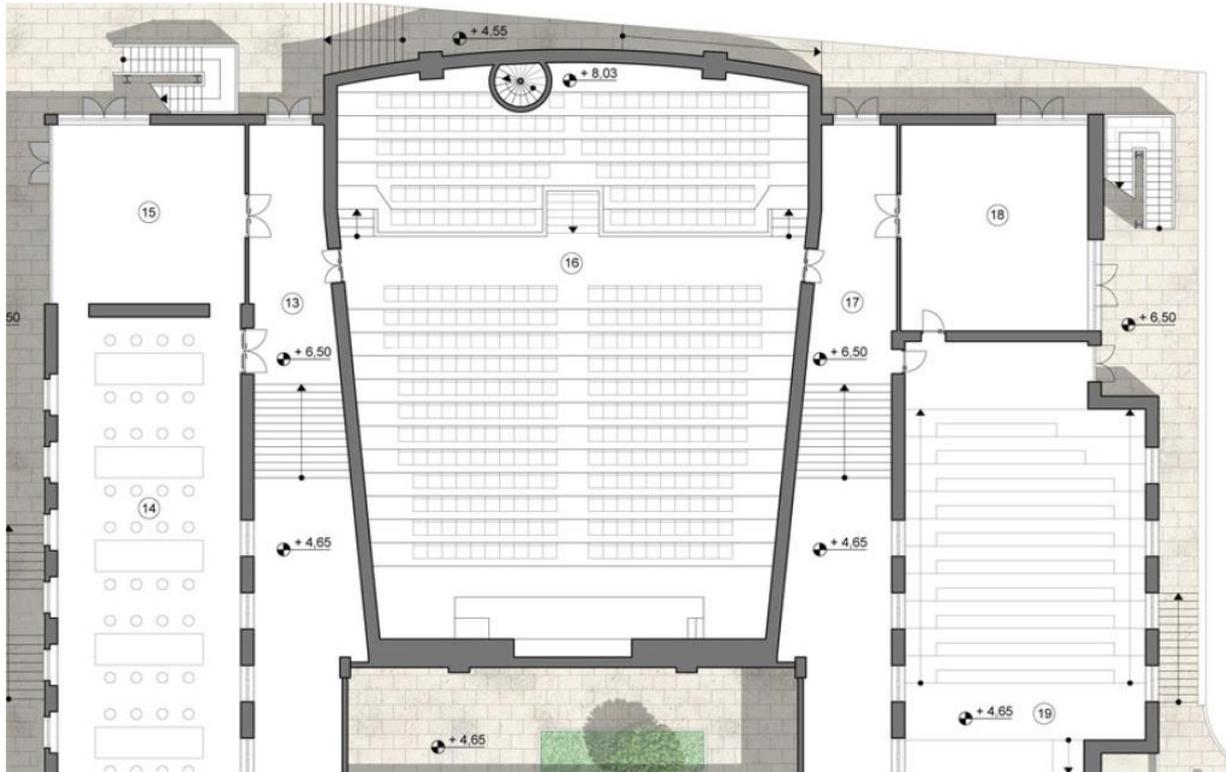


Figura 7.7 – Pianta dell’Aula Magna.

Le pareti di fondo confinano con l’ambiente esterno, mentre le pareti laterali sono in parte interne ed in parte esterne, sebbene nella parte esterna siano presenti le canalizzazioni dell’impianto di climatizzazione e il relativo carter di protezione. La copertura è totalmente rivolta verso l’ambiente esterno, mentre il pavimento confina in parte con il terreno ed in parte con ambienti interrati ricavati al di sotto della parte alta dell’aula.

Le pareti di fondo sono costituite da una muratura in calcestruzzo armato, hanno uno spessore di 130 centimetri e una trasmittanza di 1,16 W/m²K.

Le pareti laterali sono costituite da una muratura piena in blocchi di tufo, hanno uno spessore di soli 48 cm, con una trasmittanza pari a 1,73 W/m²K.

La copertura verso l’ambiente è costituita da una soletta mista; ha uno spessore di 32 cm ed una trasmittanza di 1,66 W/m²K. Il pavimento verso terra ha uno spessore di 40 cm ed è costituito da un massetto in calcestruzzo posizionato sopra ciottoli e pietre frantumate. La trasmittanza è pari a 1,1 W/m²K.



Figura 7.8 – Vista dal basso dell’Aula Magna.



Figura 7.9 – Vista dall’alto dell’Aula Magna.

A livello impiantistico l’Aula Magna è dotata di un impianto di climatizzazione a tutt’aria esterna, che elabora una portata di 14.000 m³/h con due unità di trattamento aria da 7.000 m³/h ognuna. Le unità di trattamento aria sono nella configurazione classica (pre-riscaldamento, umidificazione adiabatica, raffreddamento, post-riscaldamento) e sono dotate di recuperatore di calore di tipo sensibile sull’aria di espulsione.



Figura 7.10 – Vista dall’alto dell’Aula Magna (Fonte Google Maps).

(1) Gruppo polivalente; (2) pompe e serbatoi d’accumulo; (3) carter di protezione canalizzazioni; (4) unità di trattamento aria; (5) unità di trattamento aria



Figura 7.11 – Unità di trattamento aria e circuiti di regolazione.

La produzione dei fluidi termovettori caldo e freddo per il funzionamento delle batterie avviene mediante un gruppo polivalente del tipo aria-acqua a quattro tubi (potenza assorbita 66,4 kW, resa termica nominale 236,0 kW, resa frigorifera nominale 209,0 kW); il gruppo polivalente è a servizio esclusivo delle due unità di trattamento aria; sulle linee di mandata di entrambi i circuiti caldo e freddo sono presenti due serbatoi inerziali da 200 litri aventi la funzione di volano termico; la regolazione delle batterie avviene mediante valvole a tre vie, comandate da un PLC a bordo macchina.



Figura 7.12 – Gruppo polivalente, pompe e serbatoi di accumulo.

L'immissione di aria all'interno dell'Aula Magna avviene mediante ugelli ad alta induzione posizionati nella parte alta dei lati lunghi (vedi anche Figura 7.8 e Figura 7.9) ; la ripresa avviene mediante serrande posizionate sui lati corti dell'aula e inglobate negli arredi.

7.1.4 Il dimensionamento degli impianti di climatizzazione a tutt'aria

Negli impianti di climatizzazione a tutt'aria, all'immissione di aria è affidato il compito di controllare la qualità dell'aria, l'umidità relativa e anche la temperatura; questa soluzione viene comunemente impiegata laddove ci sia la necessità di elevate portate d'aria, per ambienti ad uso collettivo (aule, sale conferenze, cinema, teatri) e per quelle destinazioni d'uso caratterizzate da carichi termici bassi in rapporto alla portata d'aria necessaria alla qualità dell'aria.

Essendo la medesima portata d'aria a provvedere al controllo dei parametri ambientali, il dimensionamento dell'impianto è effettuato sulla base di una serie di bilanci, riferiti alla portata in massa di inquinanti, alla portata in massa di vapore d'acqua e alla potenza termica, desumibili dagli schemi di Figura 7.13, Figura 7.14, Figura 7.15.

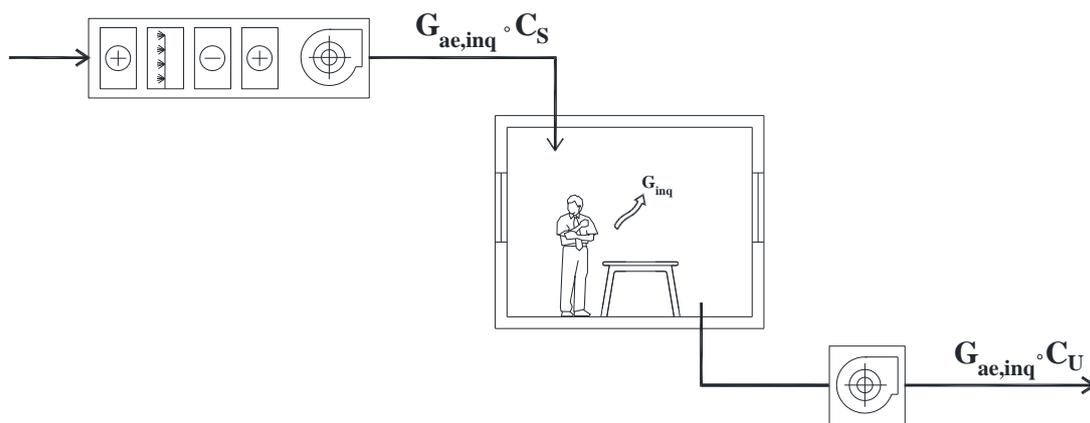


Figura 7.13 - Schematizzazione del bilancio della portata dell'inquinante.

$$G_{ae,inq} \cdot C_s + G_{inq} = G_{ae,inq} \cdot C_u \tag{7.1}$$

dove:

- $G_{ae,inq}$ è la portata d'aria esterna necessaria a diluire l'inquinante;

- C_u e C_s sono rispettivamente la concentrazione dell'inquinante nell'aria estratta e nell'aria immessa.

L'equazione (7.1) ha validità generale e può essere riferita a qualsiasi inquinante; viene di solito riferita all'inquinante ritenuto significativo della particolare situazione e destinazione d'uso; negli ambienti civili, l'inquinante considerato è generalmente l'anidride carbonica.

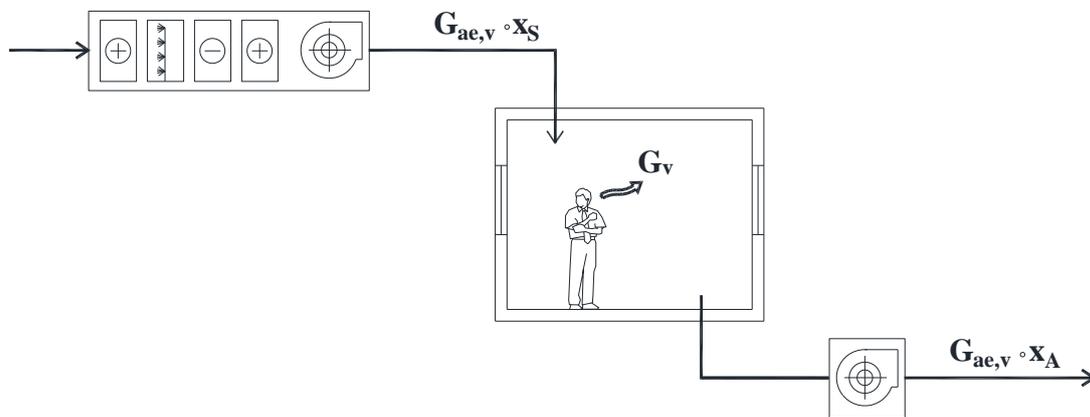


Figura 7.14 - Schematizzazione del bilancio della portata di vapore d'acqua.

$$G_{ae,v} \cdot x_S + G_v = G_{ae,v} \cdot x_A \quad (7.2)$$

dove:

- $G_{ae,v}$ è la portata d'aria esterna necessaria a compensare la produzione locale di vapore;
- x_A e x_S sono rispettivamente l'umidità specifica nell'aria estratta e nell'aria immessa.

Per il controllo della temperatura, dovranno essere compensati i carichi termici, con immissione di una portata d'aria detta portata d'aria totale (G_{tot}), calda in inverno e fredda in estate, nel rispetto dei bilanci descritti dalle equazioni (7.3) e (7.4).

$$G_{tot,inv} \cdot c_p \cdot T_{S,inv} = G_{tot,inv} \cdot c_p \cdot T_{A,inv} + \Phi_{H,nd} \quad (7.3)$$

$$G_{tot,est} \cdot c_p \cdot T_{S,est} + \Phi_{C,nd} = G_{tot,est} \cdot c_p \cdot T_{A,est} \quad (7.4)$$

dove:

- $\Phi_{H,nd}$ e $\Phi_{C,nd}$ sono rispettivamente il carico termico invernale e il carico termico estivo;
- $G_{tot,inv}$ e $G_{tot,est}$ sono rispettivamente la portata d'aria esterna necessaria a compensare il carico termico invernale e il carico termico estivo;
- T_A e T_S sono rispettivamente la temperatura dell'aria estratta e dell'aria immessa, con i pedici a indicare anche il riferimento alla stagione invernale e alla stagione estiva.

Essendo l'impianto preposto al controllo congiunto di qualità dell'aria, umidità relativa e temperatura, si dovranno confrontare la portata d'aria necessaria alla qualità dell'aria ($G_{ae,inq}$), la portata d'aria necessaria al controllo dell'umidità relativa ($G_{ae,v}$) e la portata d'aria necessaria al controllo della temperatura nella stagione invernale e nella stagione estiva ($G_{tot,inv}$ e $G_{tot,est}$).

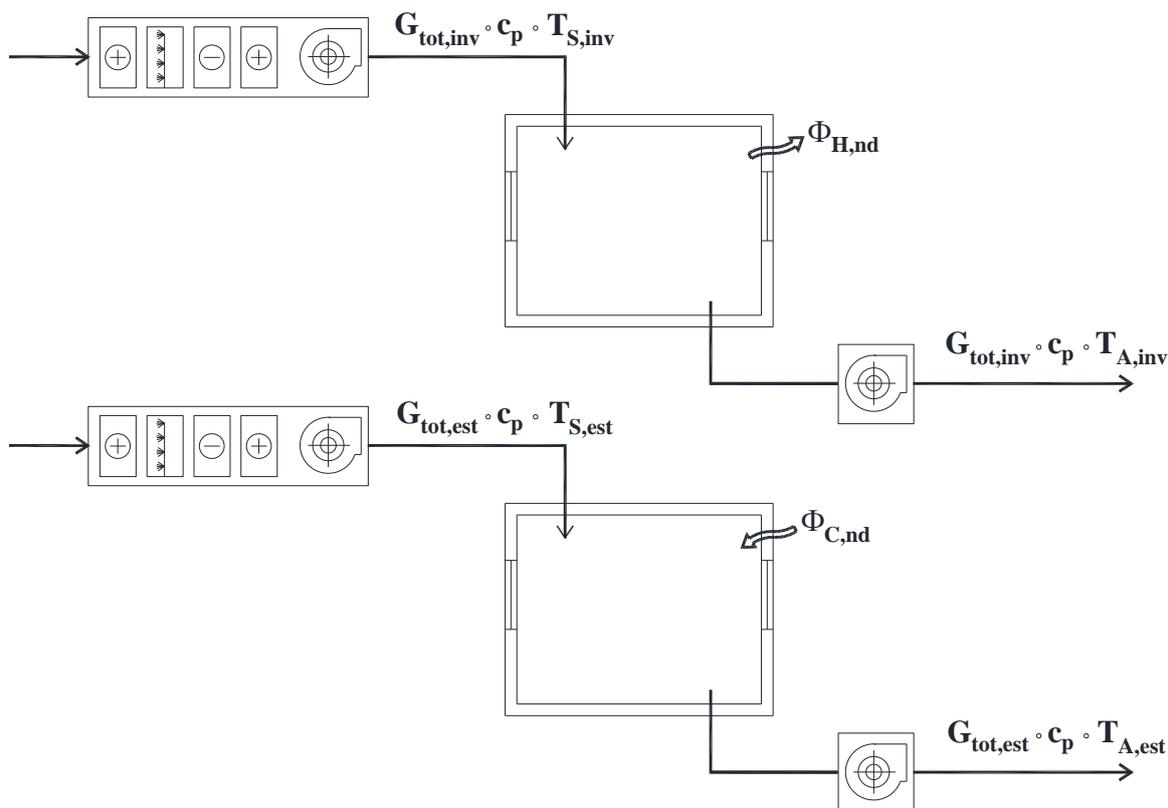


Figura 7.15 - Schematizzazione del bilancio della potenza termica per un impianto a tutt'aria, per la stagione invernale (in alto) ed estiva (in basso).

Nell'effettuare il confronto, deve essere tenuto in considerazione che la portata d'aria necessaria a controllare gli inquinanti e l'umidità relativa è necessariamente aria esterna, mentre per il controllo della temperatura si può ricorrere anche ad aria ricircolata.

Potrà accadere che:

- $G_{ae} \geq G_{tot}$ ed in tal caso si avranno necessariamente impianti a tutt'aria esterna;
- $G_{ae} < G_{tot}$ ed in tal caso si potranno avere a tutt'aria con ricircolo.

A livello di configurazione impiantistica, le due scelte possono presentare una diversa flessibilità alla variazione della portata di aria esterna. Infatti, se le camere di miscela sono in generale dotate di serrande per regolare il quantitativo di aria esterna ed il quantitativo di aria ricircolata, in generale, i recuperatori di calore possono non prevedere questa possibilità, soprattutto se non di recente installazione.

7.1.5 Considerazioni sul dimensionamento dell'UTA al servizio dell'Aula Magna

I dati di input utilizzati per dimensionare l'impianto dell'Aula Magna sono i seguenti:

- 400 persone, 25 m³/h persona (UNI 10339) e quindi portata di aria esterna non inferiore a 10.000 m³/h;
- carico termico sensibile invernale pari a 30 kW;
- carico estivo sensibile estivo pari a 46 kW;
- carico latente estivo e invernale pari a 20 kW.

Sulla base dei dati di input e applicando quanto riportato al paragrafo 7.1.4, si verifica la condizione per cui la portata necessaria per controllare il carico termico è maggiore della portata di aria esterna; si ha quindi la possibilità di scegliere tra un impianto a tutt'aria esterna o un impianto a tutt'aria con ricircolo.

Il progettista ha evidentemente optato per la prima delle due possibilità, inserendo tuttavia un recuperatore di calore di tipo sensibile sull'aria di estrazione, utile ad un pretrattamento dell'aria in ingresso. L'effetto di tale scelta è una portata unitaria che supera le indicazioni minime della UNI 10339 passando da 25 m³/h a persona a 35 m³/h persona.

La configurazione dei recuperatori presenti nelle due unità di trattamento aria non consente l'eventuale ricircolo dell'aria.

In Figura 7.16 e in Figura 7.17 sono riportati rispettivamente uno schema delle due unità di trattamento aria e i trattamenti dell'aria sul diagramma psicrometrico.

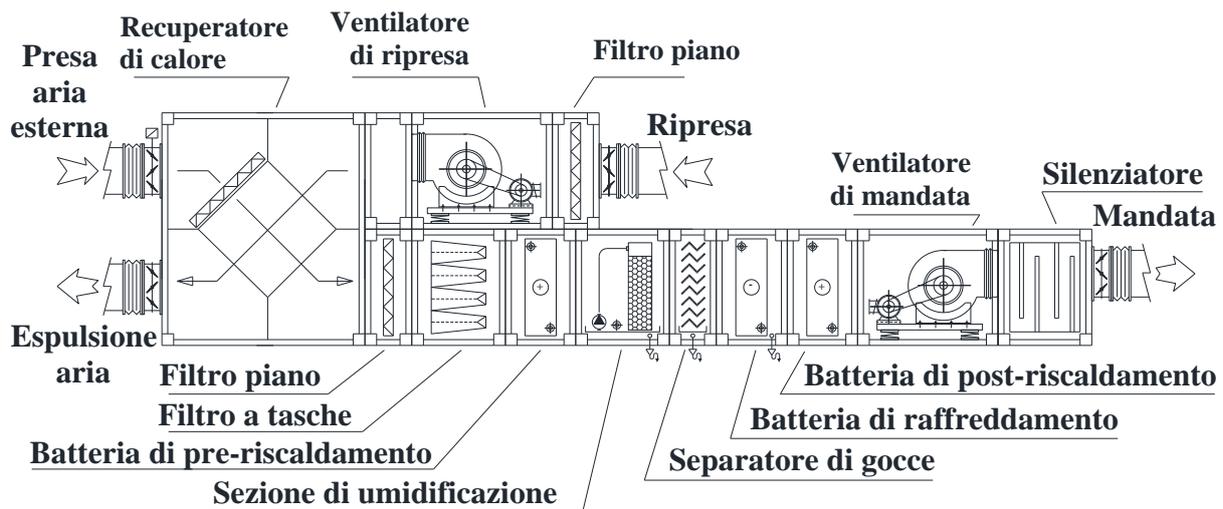


Figura 7.16 – Schema delle unità di trattamento aria.

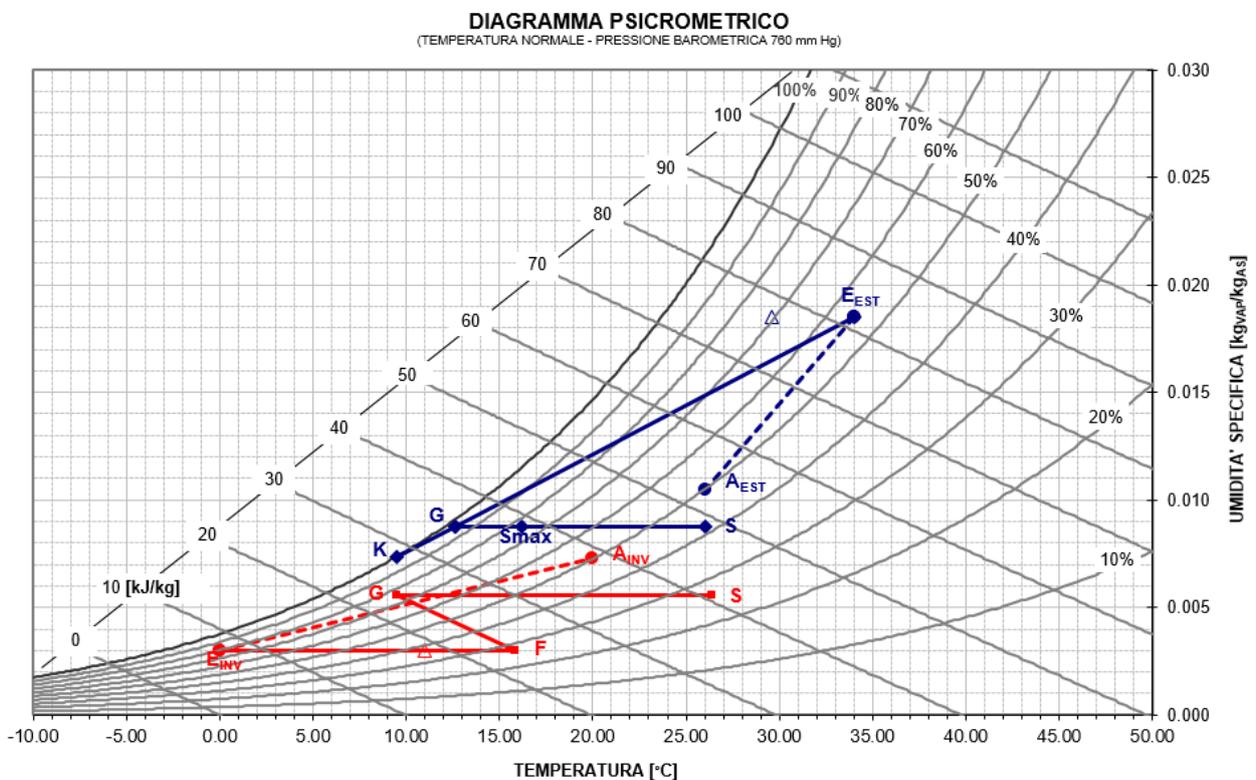


Figura 7.17 – Trattamenti dell'aria umida delle due unità di trattamento aria.

7.2 Simulazione energetica

La caratterizzazione energetica dell'Aula Magna è stata effettuata adoperando il metodo dinamico, attraverso una simulazione che prevede l'utilizzo del software TRNSYS18; tale software è stato sviluppato dall'Università del Wisconsin e da quella del Colorado intorno al 1975 e viene periodicamente aggiornato e migliorato da una serie di istituzioni internazionali quali il Solar Energy Laboratory negli Stati Uniti, l'Aiugasol Enginyeria in Spagna e il Transsolar GmbH Energietechnik in Germania.

L'analisi compiuta viene definita dinamica in quanto, nella definizione di alcuni parametri, essi non sono costanti nel tempo bensì variano. Mentre in un regime stazionario si ipotizza una temperatura interna dell'abitazione fissa ed una temperatura esterna costante, come indicano i procedimenti normativi, in un regime dinamico si considerano i dati climatici su base oraria e quindi tali parametri sono variabili nel corso della giornata. La simulazione stazionaria permette di analizzare solo parzialmente le prestazioni di un edificio perché considera la variazione ciclica delle temperature e i contributi dovuti alla radiazione solare trascurabili. Al contrario quella dinamica riesce a fornire un'analisi più completa e dettagliata delle prestazioni di un edificio sia in regime invernale che estivo, in quanto tiene conto dei contributi prodotti dall'inerzia termica dell'involucro e dalla ventilazione (naturale e meccanica se presente). Il reale comportamento termico dell'edificio è dunque funzione delle oscillazioni delle condizioni interne, dipendenti dalla modalità di occupazione e di gestione degli impianti, e delle fluttuazioni delle condizioni climatiche esterne.

Pertanto, essendo di fondamentale importanza considerare l'inerzia termica nell'analisi di un edificio, si è scelto di usare un programma che fosse in grado di realizzare una simulazione dinamica.

TRNSYS è a sua volta composto da diversi sottoprogrammi:

- Simulation Studio - è propriamente il motore di calcolo della simulazione con cui si possono creare diversi scenari più o meno complessi tramite l'accostamento di una serie di componenti, detti type;
- TRNDII - contiene i codici dei componenti usati in Simulation Studio, ed è capace di leggerli, richiamarli e determinare così la convergenza dei risultati;
- TRNExe - esegue la simulazione vera e propria tramite un processo iterativo e ad ogni passo risolve i sistemi di equazioni precedentemente definiti;
- TRNBuild - è un'interfaccia che permette la realizzazione del modello dell'edificio tramite la definizione di zone climatiche, di cui successivamente Simulation Studio determinerà i parametri di interesse.

Attraverso TRNSYS è possibile modellare l'edificio dividendolo in zone termiche, rappresentative di ambienti che hanno in comune i valori delle grandezze termoigrometriche, ovviamente in stretta dipendenza con il numero di ambienti che si vuole simulare.

Nel presente studio si è modellata una singola zona termica, caratterizzata attraverso le seguenti grandezze termoigrometriche:

- temperatura minima della zona [°C]
- temperatura massima della zona [°C]
- umidità relativa minima [%]
- umidità relativa massima [%]
- ricambi d'aria [vol/h]

In Figura 7.18 è rappresentata l'interfaccia attraverso la quale il software permette di definire le caratteristiche di ogni zona termica:

- dimensioni della zona termica;
- definizione di pareti confinanti con altre zone termiche (Adjacent) o con l'ambiente esterno (External);
- caratteristiche termotecniche delle superfici opache e trasparenti;
- definizione dei carichi termici interni alla zona termica;
- frequenza oraria di ricambi d'aria;
- caratteristiche dell'impianto di riscaldamento;
- caratteristiche dell'impianto di raffrescamento;

- caratteristiche dell'impianto di ventilazione;
- caratteristiche igrometriche dell'aria.

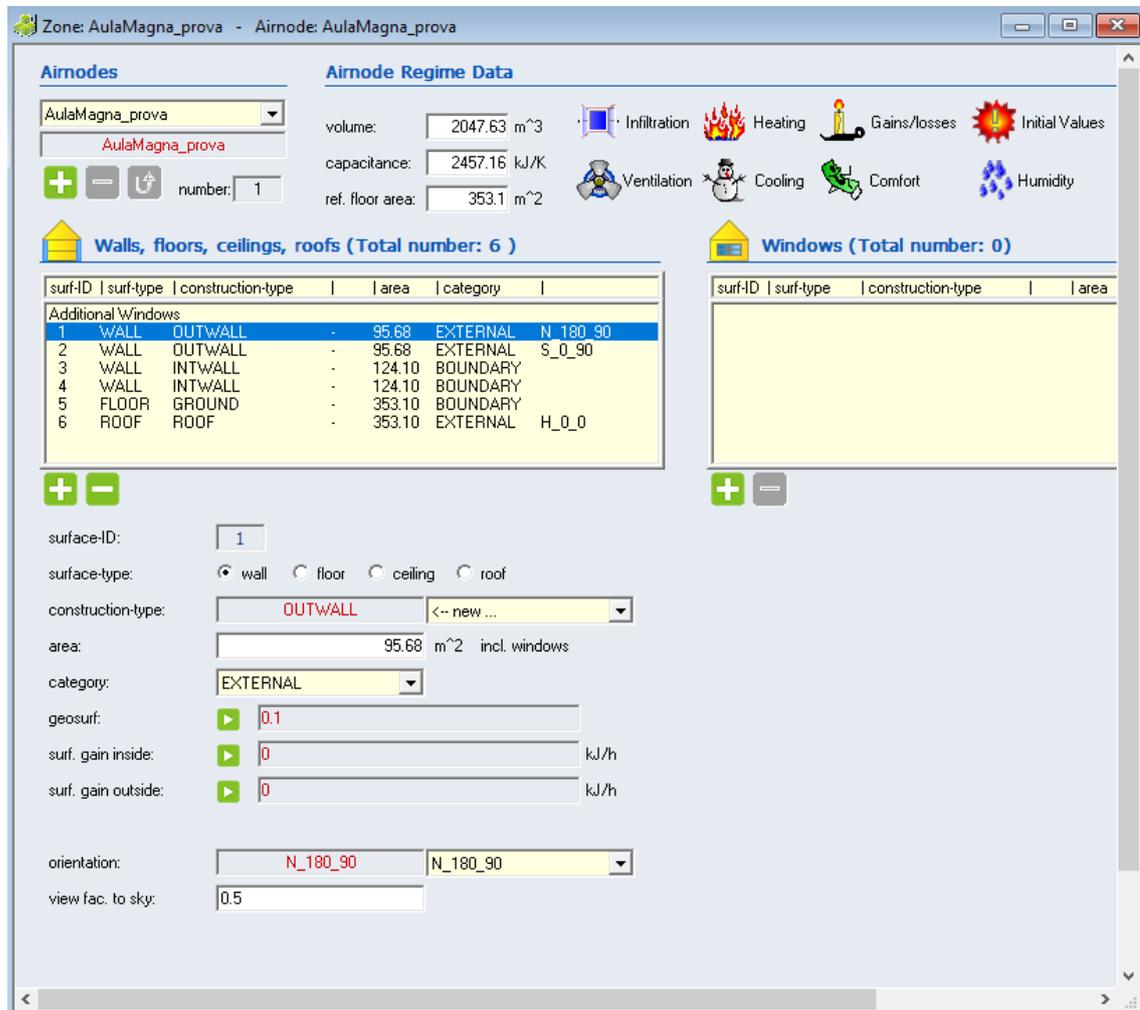


Figura 7.18 – Interfaccia TRNSYS per la definizione dei parametri di zona.

Attraverso questa interfaccia è possibile impostare i dati riguardanti i carichi interni (Gains/Losses) ed i sistemi di ventilazione, riscaldamento e raffrescamento che comunicheranno poi con il Simulation Studio in cui è possibile, attraverso l'uso di diversi Type, simulare diversi impianti e fonti energetiche. Il modello così creato permette l'analisi del regime termico all'interno dell'edificio tramite la valutazione dei parametri finora citati.

Al fine di analizzare il funzionamento dell'impianto di climatizzazione installato nell'Aula Magna, sono stati scelti gli output forniti dal modello TRNBuild da implementare e simulare nel modulo Trnsys Simulation Studio.

Gli output relativi alla singola zona termica sono:

- temperatura dell'aria all'interno della zona termica;
- umidità relativa all'interno della zona termica;
- potenza termica sensibile fornita dal sistema di riscaldamento;
- potenza termica sensibile fornita dal sistema di raffrescamento.

Il modello Trnsys Simulation Studio è composto poi da una serie di Type con cui si può modellare l'impianto di climatizzazione dell'edificio, gestire i dati di input, eseguire il controllo degli elementi presenti nell'edificio e gestire i risultati delle simulazioni.

Per simulare l'impianto attualmente presente nell'Aula Magna, si è utilizzato un Type 151 che provvede a calcolare i carichi termici richiesti alle diverse batterie dell'UTA; a partire dai valori calcolati si procede poi a calcolare i relativi carichi elettrici richiesti al gruppo polivalente.

I dati climatici vengono valutati attraverso gli elementi Type 15.6, Type 65d e blocco equazioni; al Type 15.6 è assegnato il compito di leggere il file di dati meteo e calcolare le varie componenti (diretta, diffusa e riflessa) di irradiazione per le superfici comunque inclinate e orientate che compongono la struttura.

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.

La prima fase di simulazione è stata rivolta alla modellazione dell'edificio nella sua configurazione attuale, in modo da creare un legame causa-effetto con le caratteristiche del sistema edificio-impianto.

Come detto in precedenza, è stata individuata una singola zona termica per la quale sono state determinate le proprietà indispensabili per il calcolo del regime termico all'interno dell'aula (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).

In Figura 7.34 delle immagini 3D del modello dell'Aula Magna.

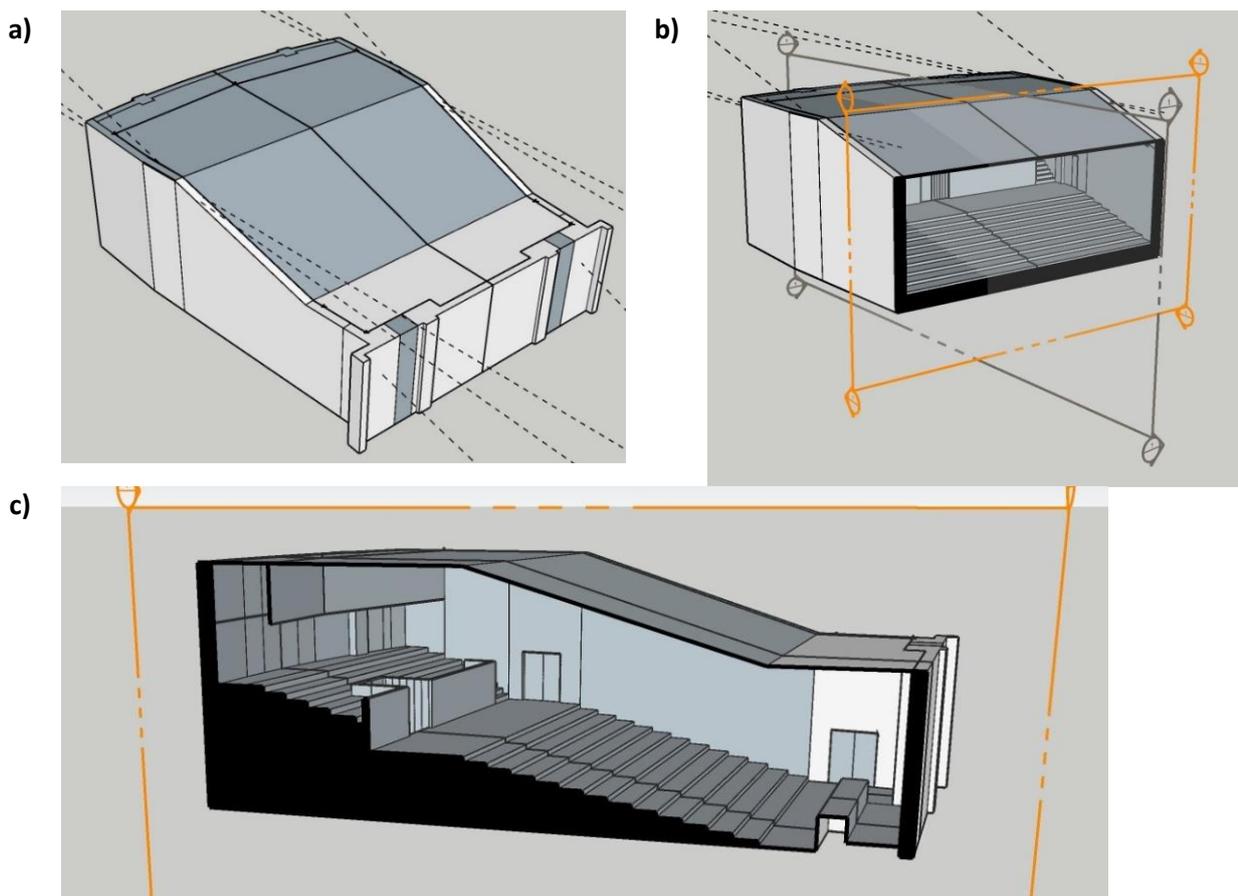


Figura 7.19 –3D dell'Aula Magna a) dall'esterno, b) sezione trasversale c) sezione longitudinale.

I rendimenti del gruppo polivalente (COP ed EER) sono stati valutati al variare della temperatura esterna nel periodo estivo ($T_{est,cool}$) ed in quello invernale ($T_{est,heat}$), utilizzando le equazioni (7.5) e (7.6).

$$COP = f_{COP} \cdot \frac{1}{1 - \frac{T_i}{T_s}} \quad (7.5)$$

$$EER = f_{EER} \cdot \frac{1}{\frac{T_s}{T_i} - 1} \quad (7.6)$$

dove:

- T_i rappresenta la temperatura inferiore all'interno del ciclo che corrisponde alla temperatura al condensatore ($T_{cond,heat}$) in fase di riscaldamento e alla $T_{esterna}$ in fase di raffreddamento;
- T_s rappresenta la temperatura superiore all'interno del ciclo che corrisponde alla temperatura all'evaporatore ($T_{evap,cool}$) in fase di raffreddamento e a $T_{esterna}$ in fase di riscaldamento.

I fattori f_{COP} e f_{EER} sono stati calcolati con i dati di targa della macchina; $P_{el,n}$ è la potenza elettrica nominale del gruppo polivalente, $T_{cond,heat}$ e $T_{evap,cool}$ rappresentano la temperatura media rispettivamente al condensatore ed all'evaporatore nel periodo di raffreddamento e di riscaldamento uguali a 9.5 °C e 42.5 °C rispettivamente.

A partire dalla situazione iniziale sono stati simulati altri tre scenari, caratterizzati da una riduzione della portata trattata dalle unità di trattamento aria del 15%, del 30% e del 50%, con l'obiettivo di studiare la risposta del sistema in termini di consumi energetici e in termini di controllo dei parametri ambientali, ovvero controllando che la temperatura all'interno dell'Aula Magna rimanesse entro i limiti di comfort (inverno 20°C, 50% UR; estate 26°C, 50% UR).

Tabella 7.1 – Scenari simulati.

		Scenario 100%	Scenario 85%	Scenario 70%	Scenario 50%
Portata aria	[m ³ /h]	14.000	11.900	9.800	7.000
Potenza PdC riscaldante max	[kW]	472	401	330	236
Potenza PdC refrigerante max	[kW]	418	355	293	209
Potenza riscaldante batterie UTA	[kW]	155	132	108,5	77,5
Potenza raffrescante batteria UTA	[kW]	221	188	155	110,5

7.2.1 Analisi energetica dello stato di fatto

Per svolgere le simulazioni si sono considerati tre tipi di carichi interni:

- carichi termici dovuti alle persone;
- carichi termici legati al sistema di illuminazione;
- carichi termici legati alle apparecchiature elettriche.

Per ognuno di questi carichi questi, si è inserito un valore massimo che viene poi gestito con le relative schedule che assumeranno un valore compreso tra 0 e 1. Il carico dovuto alle persone corrisponde a 150 W/m² e corrisponde al valore di aula completamente piena. Quello per l'illuminazione è stato considerato uguale a 72 kJ/h/m² di tipo completamente radiativo essendo l'illuminazione di tipo a LED. Per quanto riguarda il carico dovuto alle apparecchiature questo è stato considerato essere 14 W/m², un carico che rappresenta la presenza di 1 proiettore acceso con un apporto di 500 W e 50 laptop con una potenza media di 90 W.

Per gestire i carichi interni si sono usate due tipi di schedule, una per l'occupazione e l'illuminazione ed una per l'impianto di climatizzazione.

Si è poi costruita una schedula settimanale considerando 2 giorni con lezioni mattutine, 2 giorni con lezioni pomeridiane ed 1 giorno di conferenza in modo tale da simulare il funzionamento dell'impianto in condizioni diverse.

Di seguito, si riportano le schedule di occupancy utilizzate (Figura 7.20). In Figura 7.21 invece sono visibili quelle di accensione dell'impianto di climatizzazione.

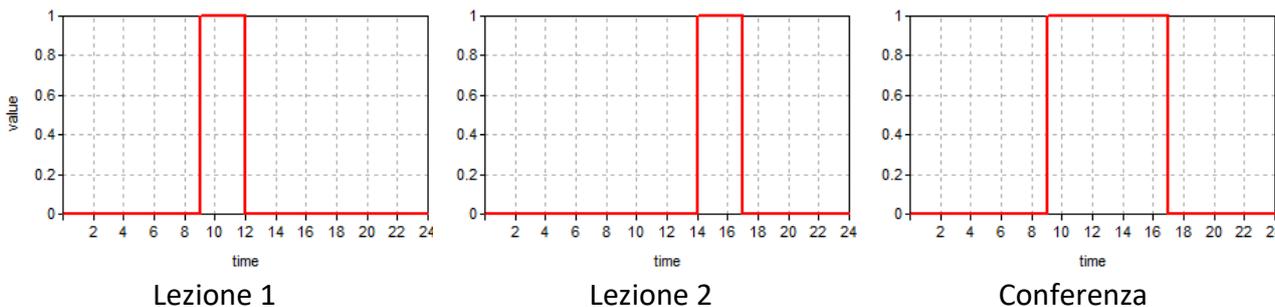


Figura 7.20 Schedule di presenza e di accensione dell'impianto di illuminazione.

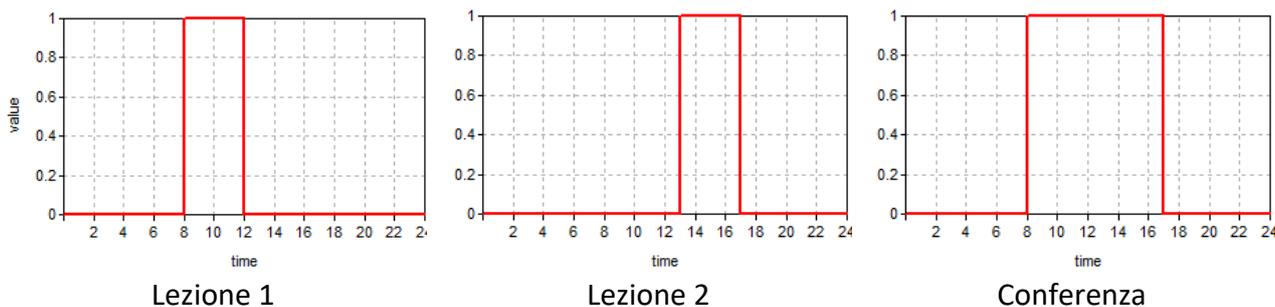


Figura 7.21 Schedule di accensione dell'impianto di climatizzazione

La Figura 7.22 riporta il risultato delle simulazioni effettuate, in termini di potenza termica media oraria fornita dall'UTA all'Aula Magna (in blu) e in termini di potenza elettrica media oraria consumata dal gruppo polivalente (in verde).

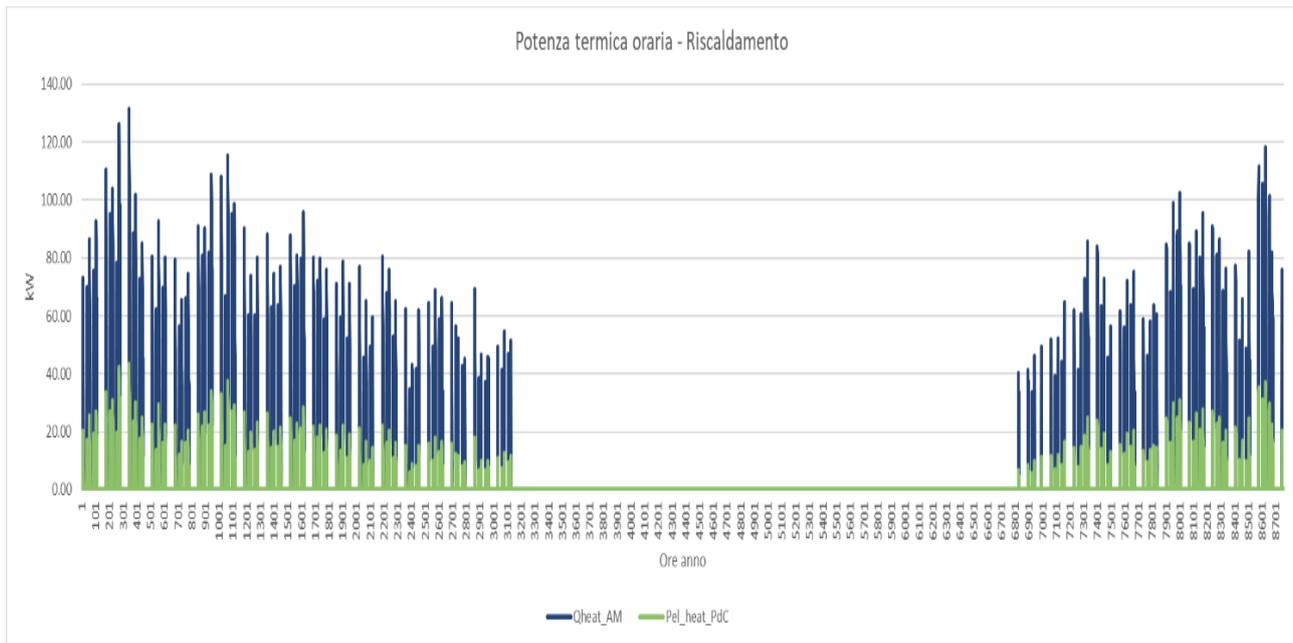


Figura 7.22 – Potenza termica ed elettrica per riscaldamento.

Il valore massimo della potenza termica fornita dall’UTA all’ambiente è uguale a 131,49 kW mentre il valore medio (calcolato tra i valori diversi da zero) ammonta a 64,46 kW. Il valore massimo e medio della potenza elettrica del gruppo polivalente ammontano rispettivamente a 43,25 kW e 16,87 kW. Si ottiene quindi un consumo elettrico totale annuo, relativo alla stagione di riscaldamento, uguale a 9.618 kWh/a per fornire un’energia termica totale uguale a 36.741 kWh/a.

In Figura 7.23 vengono riportate la potenza termica refrigerante media oraria fornita dall’UTA all’Aula Magna (AM) in MARRONE e quella elettrica media oraria consumata dal gruppo polivalente rappresentato da una Pompa di Calore (PdC) in celeste. Entrambe le potenze sono espresse in kW.

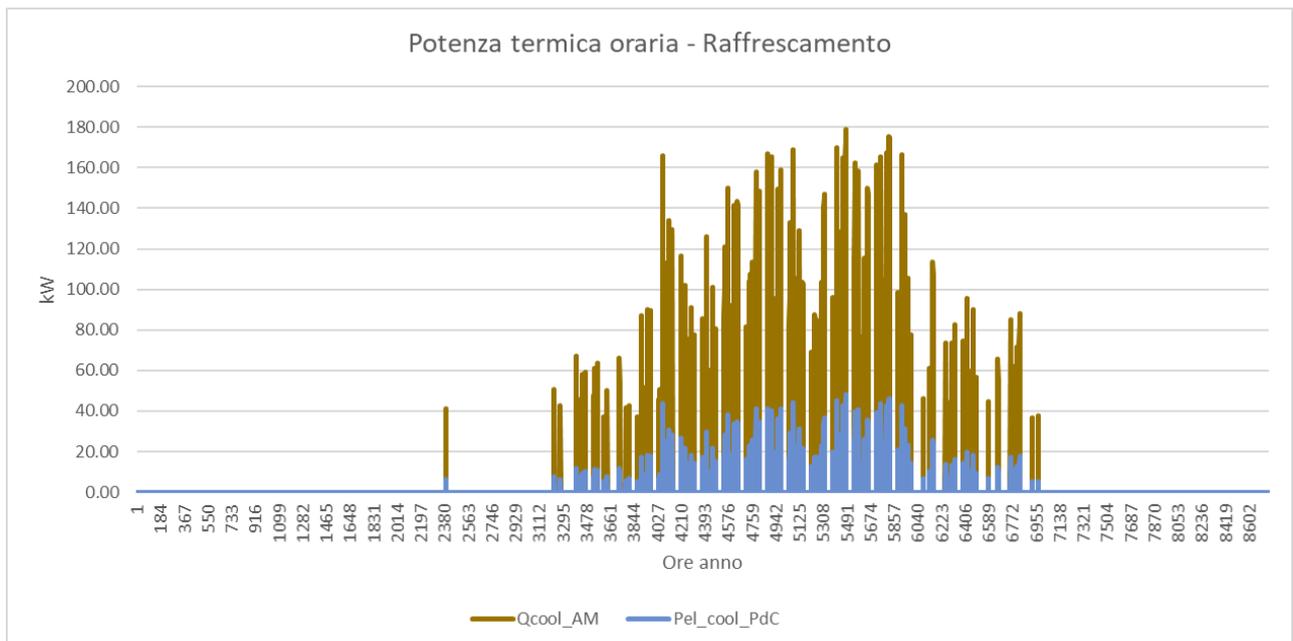


Figura 7.23 – Potenza termica ed elettrica per raffrescamento.

Il valore massimo della potenza refrigerante fornita dall'UTA all'ambiente è uguale a 178,84 kW mentre il valore medio (calcolato tra i valori diversi da zero) ammonta a 96,19 kW. Il valore massimo e medio della potenza elettrica alla pompa di calore invece ammontano rispettivamente a 48,11 kW e 20,95 kW. Bisogna inoltre considerare l'apporto termico della batteria di post-riscaldamento, questa richiede una potenza termica media di 33,51 kW che, tuttavia essendo prelevata dal circuito di recupero del gruppo polivalente, non provoca consumi elettrici, se non quelli per la circolazione del fluido termovettore. Il consumo elettrico totale annuo per il raffrescamento è di 7.604 kWh/a. In Figura 7.24 si può vedere l'andamento della temperatura dell'aria interna all'Aula Magna.

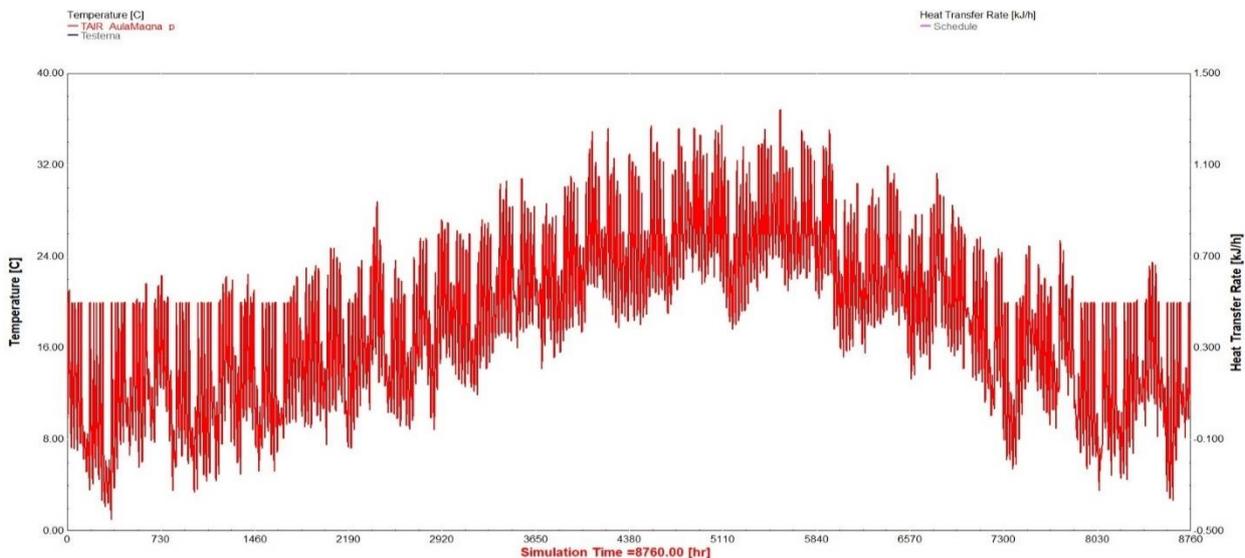


Figura 7.24 – Temperatura aria interna Aula Magna

Si può notare che, soprattutto nei mesi estivi, la temperatura interna supera molto spesso il valore di comfort di 26°C; questo però succede esclusivamente nei momenti in cui non è presente nessuno all'interno dell'aula e quindi l'impianto è spento.

In Figura 7.25 si mostra l'andamento della temperatura interna all'Aula Magna (in rosso) insieme a quello della schedule di presenza (in rosa) di un tipico giorno estivo.

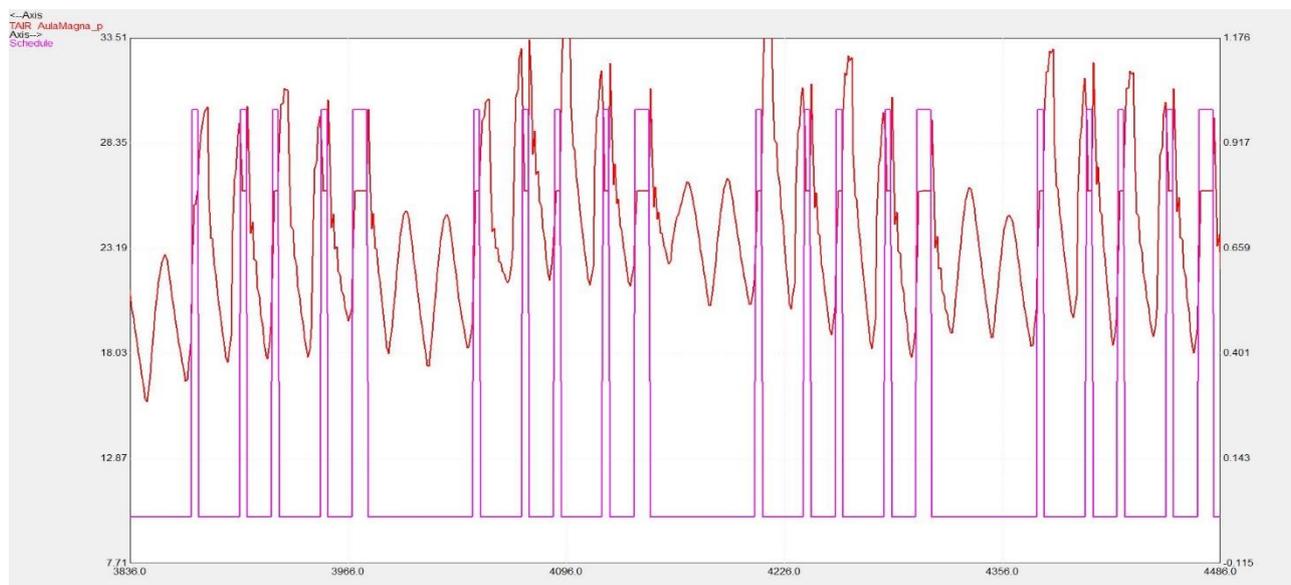


Figura 7.25 – Figura 8. Temperatura aria interna Aula Magna vs Schedule presenze Aula Magna

Come si può vedere, la temperatura interna dell'Aula Magna rispetta sempre il limite superiore di 26°C quando la funzione schedule assume un valore uguale ad 1 (presenza).

Si riporta anche l'andamento dell'umidità relativa, espressa in %, all'interno dell'Aula Magna in Figura 7.26.

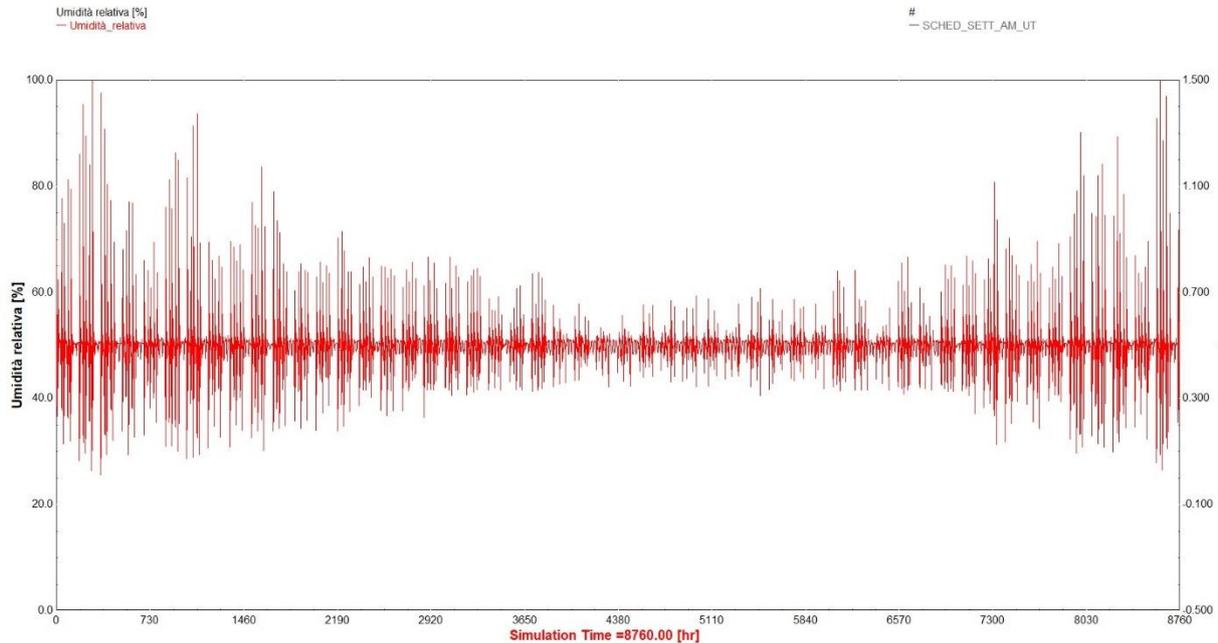


Figura 7.26 – Umidità relativa aria interna Aula Magna espressa in %.

In Figura 7.27, è riportato uno zoom del periodo invernale dove si registrano le oscillazioni maggiori, per confermare che, quando l'Aula risulta occupata, l'impianto di climatizzazione riesce a mantenere l'umidità relativa a valori prossimi al 50%.

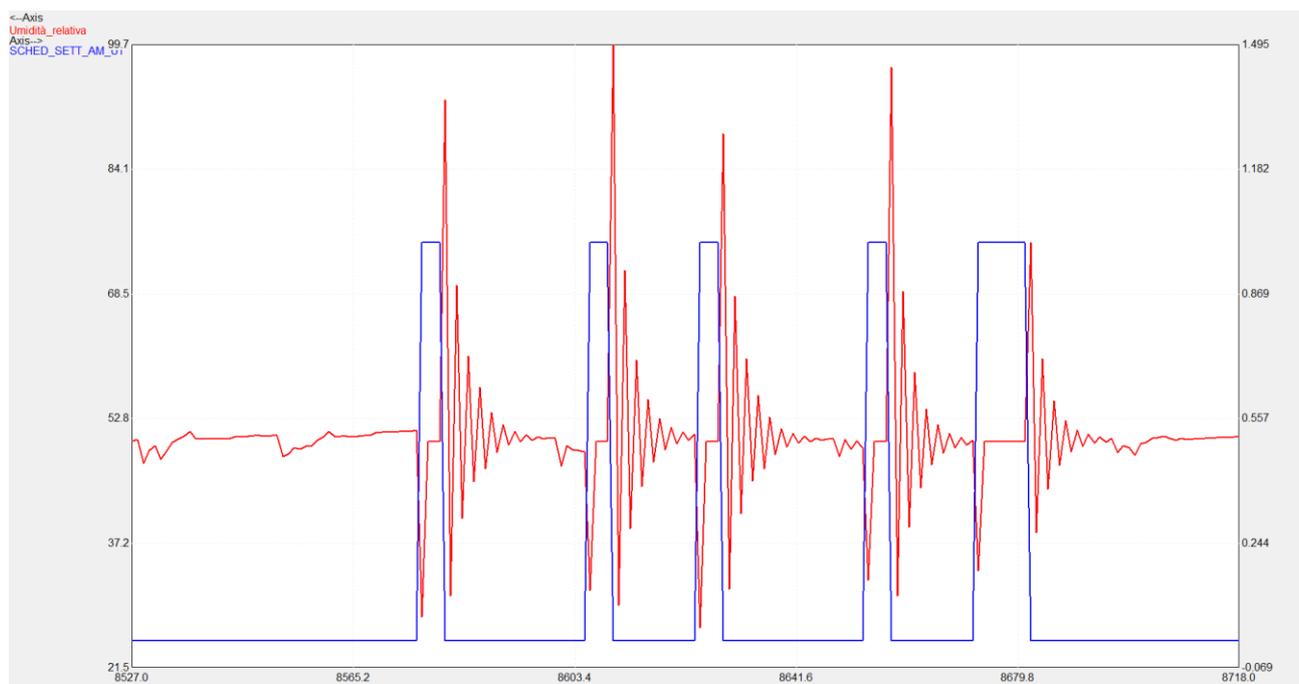


Figura 7.27 – Umidità relative aria interna Aula Magna espressa in % vs Schedule presenze Aula Magna

7.2.2 Analisi scenari con variazione della portata

In Figura 7.28 a) b) c) sono riportate la potenza termica media oraria per riscaldare che viene fornita dall'UTA all'Aula Magna e la potenza elettrica consumata dalla pompa di calore per portate d'aria pari rispettivamente all'85%, al 70% e al 50% della portata nominale.

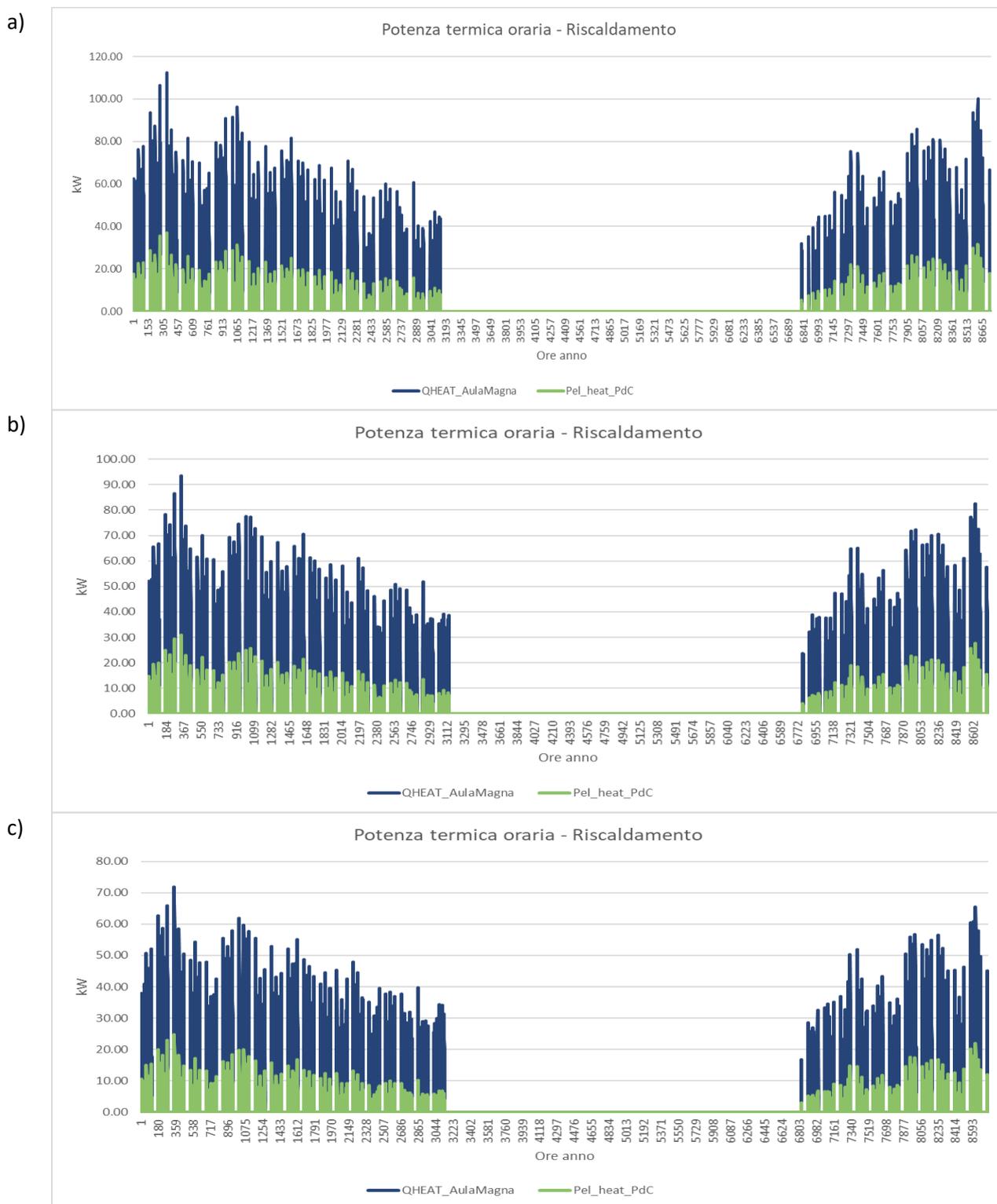


Figura 7.28 – Energia termica e elettrica per la climatizzazione invernale al variare della portata d'aria rispetto al valore nominale - a) 85%; b) 70% e c) 50%.

I valori massimi e medi della potenza termica fornita dall'UTA all'ambiente e di quella elettrica spesa dalla pompa di calore per rifornire le batterie dell'UTA sono riportati in Tabella 7.2.

Tabella 7.2 – Potenza e energia nel funzionamento invernale per gli scenari simulati.

	Qheat medio [kW]	Qheat max [kW]	Eheat TOT [MWh]	Pel heat medio [kW]	Pel heat max [kW]	Eel heat TOT [MWh]
Scen. 85%	55,19	112,51	29,417	14,5	37	7,745
Scen. 70%	45,44	93,39	23,176	11,94	30,78	6,088
Scen. 50%	33,22	71,92	15,315	8,64	24,77	3,984

In Figura 7.29 a) b) c) sono riportate la potenza termica refrigerante media oraria che viene fornita dall'UTA all'Aula Magna e la potenza elettrica consumata dalla pompa di calore per portate d'aria pari rispettivamente all'85%, al 70% e al 50% della portata nominale.

I valori massimi e medi della potenza termica refrigerante fornita dall'UTA all'ambiente e di quella elettrica spesa dalla PdC per rifornire le batterie dell'UTA sono riportati in Tabella 7.3.

Tabella 7.3 – Potenza e energia nel funzionamento estivo per gli scenari simulati.

	Qcool medio [kW]	Qcool max [kW]	Qcool TOT [MWh]	Pel cool medio [kW]	Pel cool max [kW]	Pel cool TOT [MWh]
Scen. 85%	18,57	44,71	32,186	18,57	44,71	7
Scen. 70%	75,47	153,85	29,282	16,36	41,31	6,349
Scen. 50%	62,18	137,19	25,306	13,39	36,77	5,451

Il dato più interessante che si può dedurre da questa analisi è che anche dimezzando la portata d'aria trattata dall'UTA, dimezzando quindi la potenza termica riscaldante e refrigerante del sistema, si riesce comunque a mantenere la temperatura all'interno dell'Aula Magna all'interno del range voluto quando richiesto (aula occupata).

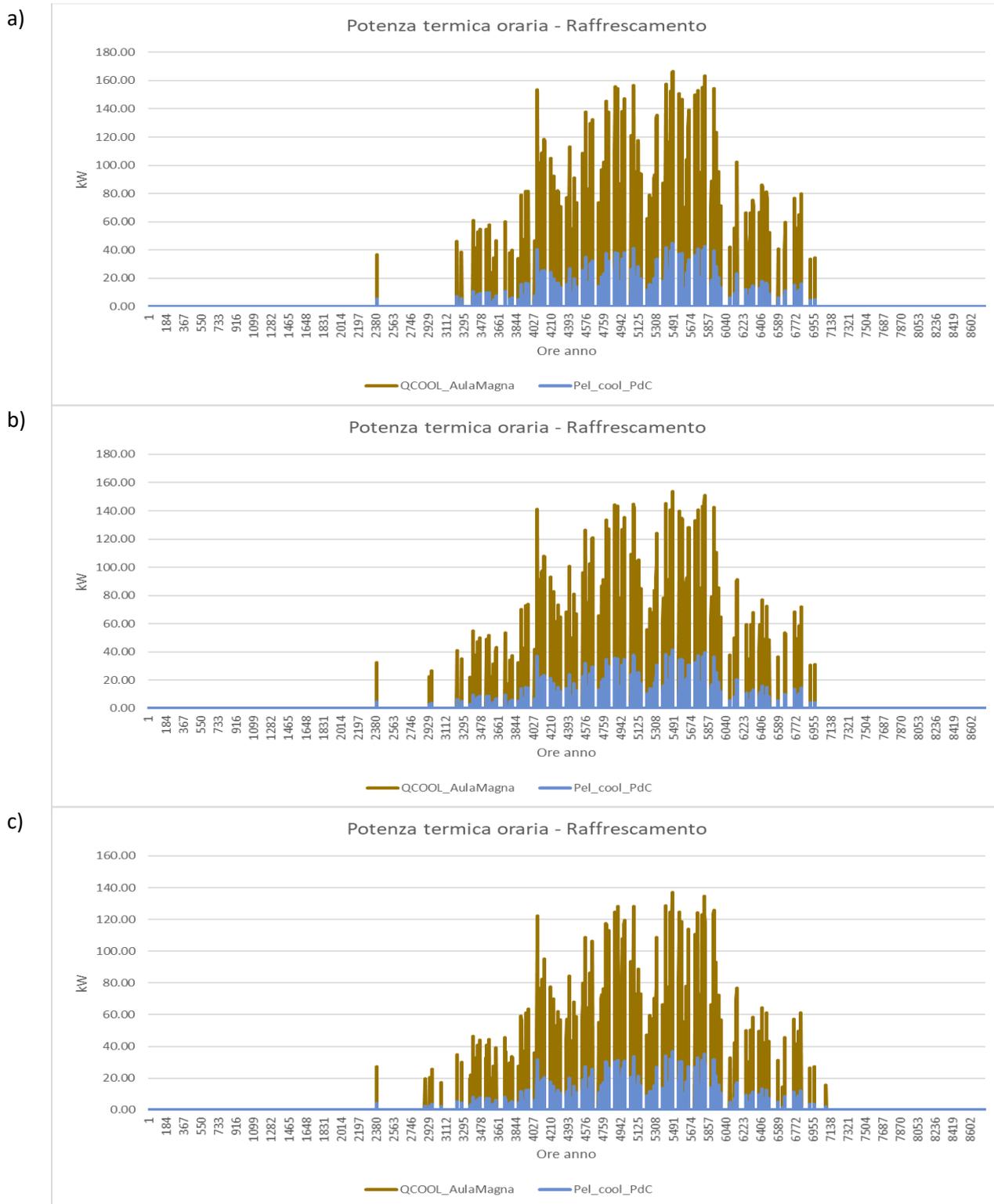


Figura 7.29 – Energia termica e elettrica per la climatizzazione estiva al variare della portata d’aria rispetto al valore nominale - a) 85%; b) 70% e c) 50%.

In Figura 7.30 e in Figura 7.31 si riportano rispettivamente la temperatura all’interno dell’aula durante l’anno e un dettaglio della temperatura all’interno dell’aula durante due settimane estive insieme all’andamento dell’occupazione dell’aula per mostrare che i limiti di temperatura vengono rispettati solo quando l’aula non è occupata.

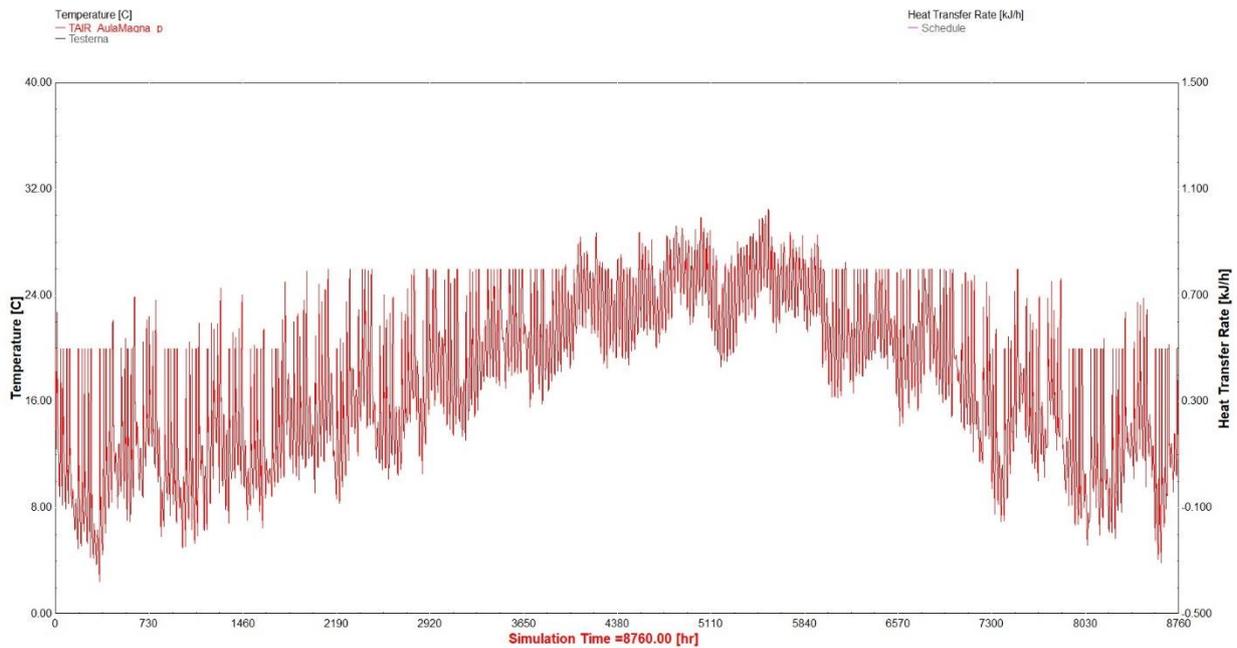


Figura 7.30 – Temperatura aria interna Aula Magna con portata dell’UTA ridotta al 50%.

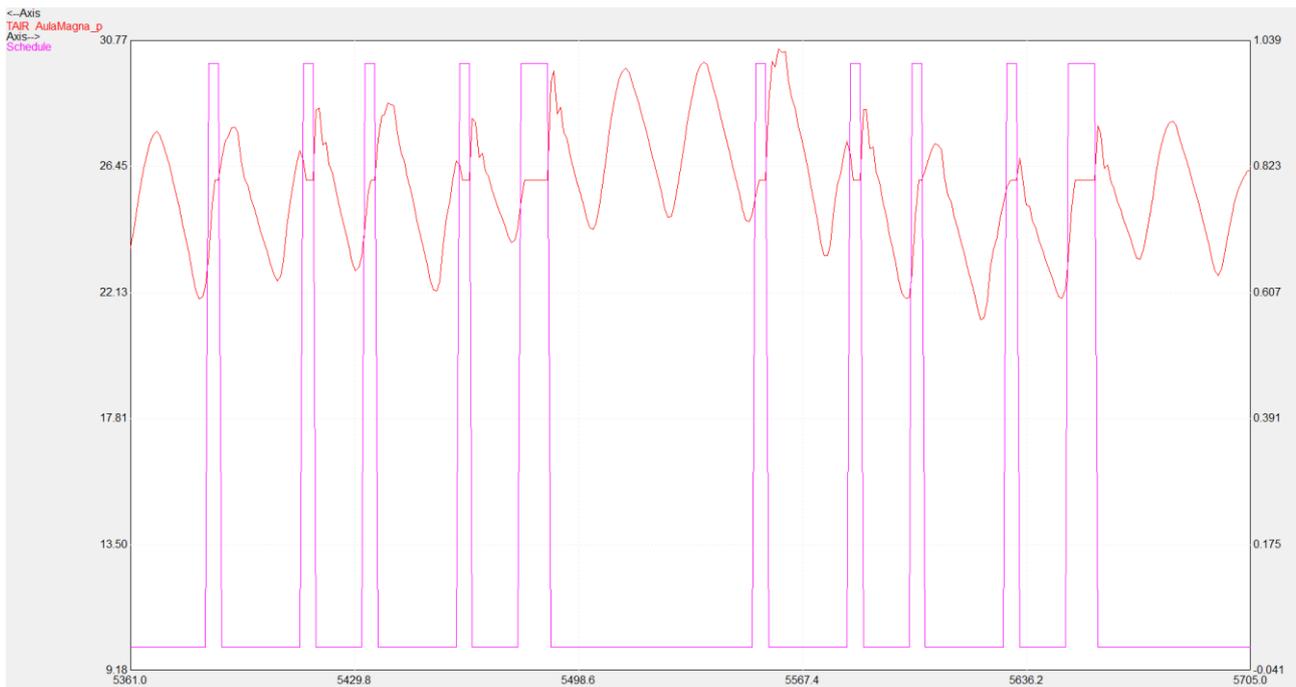


Figura 7.31 – Temperatura aria interna Aula Magna vs Schedule presenze Aula Magna con portata aria dell’UTA ridotta al 50%.

Come si può notare la temperatura viene mantenuta nel range richiesto durante i periodi di occupazione dell’Aula Magna.

In Figura 7.32 e in Figura 7.33 si riportano l’umidità relativa durante l’anno ed un dettaglio di questa confrontato con la schedule di occupazione dell’aula durante due settimane invernali.

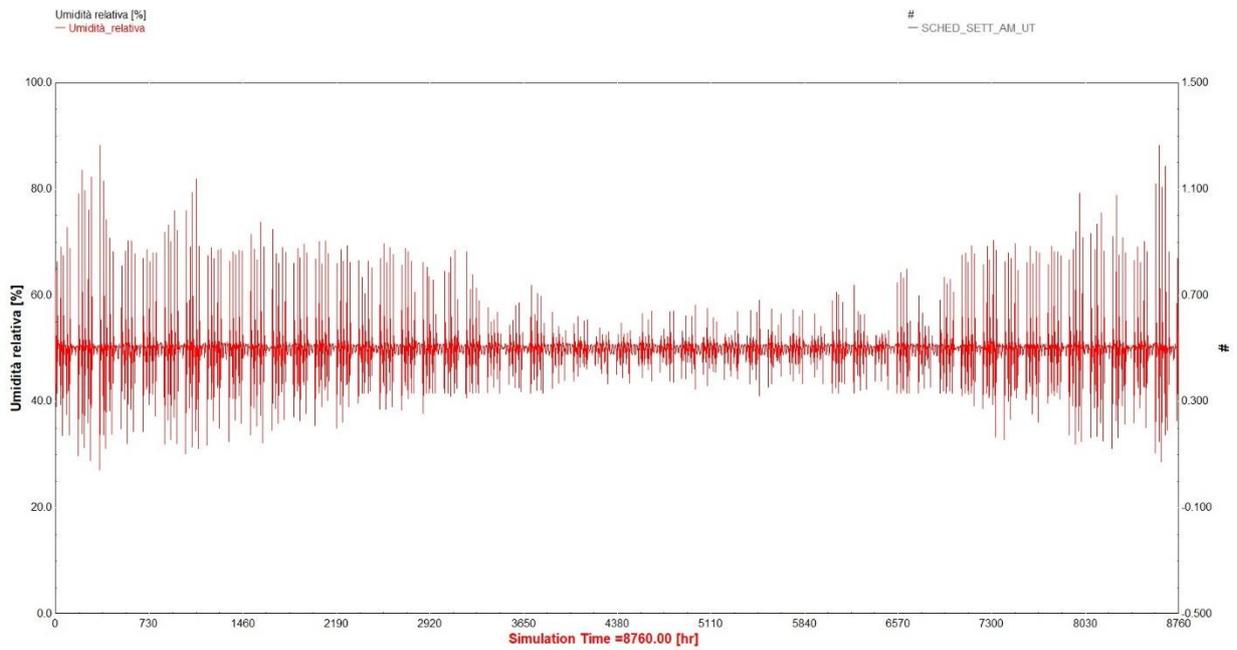


Figura 7.32 – Umidità relative aria interna Aula Magna espressa in % con portata d’aria ridotta al 50%.

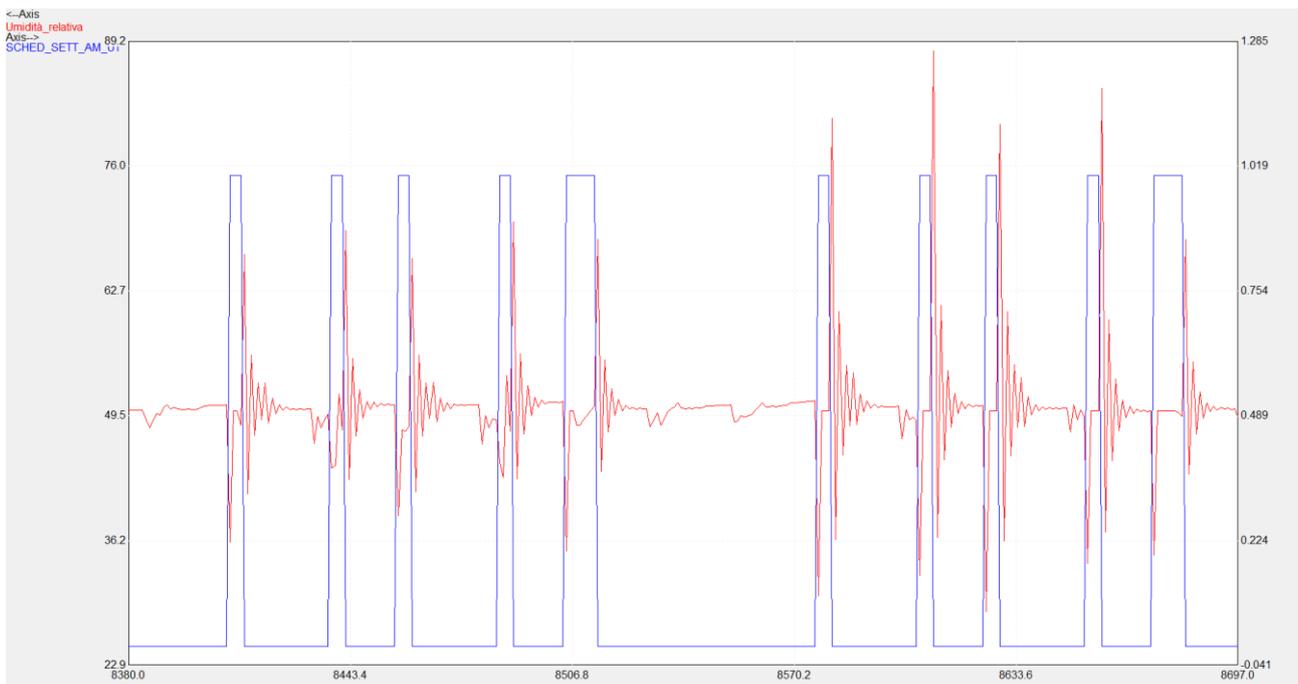


Figura 7.33 – Umidità relative aria interna Aula Magna espressa in % vs Schedule presenze Aula Magna con portata UTA ridotta al 50%

Come si può vedere anche i limiti di umidità relativa vengono rispettati nonostante la minore portata d’aria immessa nell’aula.

7.2.3 Confronto tra gli scenari simulati

La simulazione energetica è stata effettuata allo scopo di valutare da un lato i risparmi energetici conseguenti alla riduzione della portata, dall'altro la capacità dell'impianto a mantenere il comfort ambientale anche con portata ridotta.

Si è osservata una riduzione dei consumi energetici e dalle simulazioni è emerso anche che l'impianto, ancorchè funzionante a portata ridotta può ancora mantenere il comfort ambientale.

In Tabella 7.4 sono riportati i consumi elettrici annuali al variare della portata d'aria nell'UTA.

Tabella 7.4 – Consumi elettrici per gli scenari simulati.

	Scen. 100%	Scen. 85%		Scen. 70%		Scen. 50%	
	Consumo [kWh/a]	Consumo [kWh/a]	Diff. [%]	Consumo [kWh]	Diff. [%]	Consumo [kWh]	Diff. [%]
Climatizzazione invernale	9.618	7.745	19,5%	6.088	36,7%	3.984	58,6%
Climatizzazione estiva	7.604	7.000	7,9%	6.349	16,5%	5.451	28,3%
Totale annuo	17.222	14.745	14,4%	12.437	27,8%	9.435	45,2%

Dal confronto tra i diversi scenari valutati, si osserva una generale riduzione dei consumi energetici, maggiore nel periodo invernale e minore nel periodo estivo.

Con portata ridotta del 50%, nel periodo invernale si raggiungono risparmi del 58,6%, mentre nel periodo estivo si hanno risparmi più bassi (-28,3%). Su base annua i risparmi sono pari al 45,2%.

7.3 Campagna di misura

L'Aula Magna della Facoltà di Architettura non è utilizzata tutti i giorni; pertanto le misure sono state effettuate in concomitanza di eventi che si svolgono nell'Aula e che hanno previsto un'occupazione per tutta la giornata.

Tabella 7.5 – Giornate di misura e occupazione.

28/05/2018	250 persone
08/06/2018	270 persone
11/06/2018	250 persone
12/06/2018	250 persone
18/06/2018	300 persone
20/06/2018	250 persone
26/06/2018	300 persone
28/06/2018	270 persone
04/07/2018	250 persone
05/07/2018	230 persone
12/07/2018	200 persone
10/09/2018	250 persone

Le misure sono state effettuate in due diverse condizioni di funzionamento, con le due UTA funzionanti contemporaneamente alla portata nominale (ex-ante) e una sola UTA funzionante e quindi con l'impianto a ad una portata pari alla metà della portata nominale (ex post), avendo semplicemente spento una delle unità di trattamento aria.

In nessuna delle giornate di misura si è avuta la piena occupazione dell'Aula, che ha una capienza di 400 posti.



Figura 7.34 – Viste dell’Aula Magna.

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

All’esterno dell’Aula Magna sono state effettuate misure sulla copertura dell’edificio, dove sono ubicate le prese di aria esterna delle unità di trattamento aria.

All’interno, la misurazione è stata effettuata in una posizione centrale dell’Aula, nella parte di corridoio tra le quattro zone di seduta.

7.3.1 Misurazione delle grandezze termo-igrometriche

I risultati delle misure effettuate sono riportati in Tabella 7.6, in Figura 7.35 per la condizione ex-ante (portata nominale) e in Figura 7.36 per la condizione ex-post (portata dimezzata).

Tabella 7.6 – Grandezze termoigrometriche (ex-ante).

		T media [°C]	UR media [%]	T media [°C]	UR media [%]	T media [°C]	UR media [%]
		OUTDOOR		INDOOR (ex-ante)		INDOOR (ex-ante)	
28/05/2018	250 persone	24,0	68,4	25,5	50,3	26,1	58,1
08/06/2018	270 persone	27,2	63,0	26,0	48,9	26,0	58,1
11/06/2018	250 persone	28,5	58,5	25,9	50,0	26,0	54,3
12/06/2018	250 persone	28,3	62,5	25,9	50,7	26,1	55,5
18/06/2018	300 persone	28,5	67,5	25,8	50,1	25,9	50,5
20/06/2018	250 persone	29,6	51,8	26,0	50,1	25,9	53,9
26/06/2018	300 persone	28,0	47,6	25,4	49,8	26,1	49,9
28/06/2018	270 persone	29,8	66,8	25,6	48,9	25,9	50,5
04/07/2018	250 persone	30,3	68,2	25,8	49,2	25,9	51,1
05/07/2018	230 persone	29,8	66,8	25,6	48,9	25,9	50,5
12/07/2018	200 persone	29,2	57,0	25,8	48,9	25,9	50,5
10/09/2018	250 persone	25,3	68,4	25,9	50,7	25,9	53,5

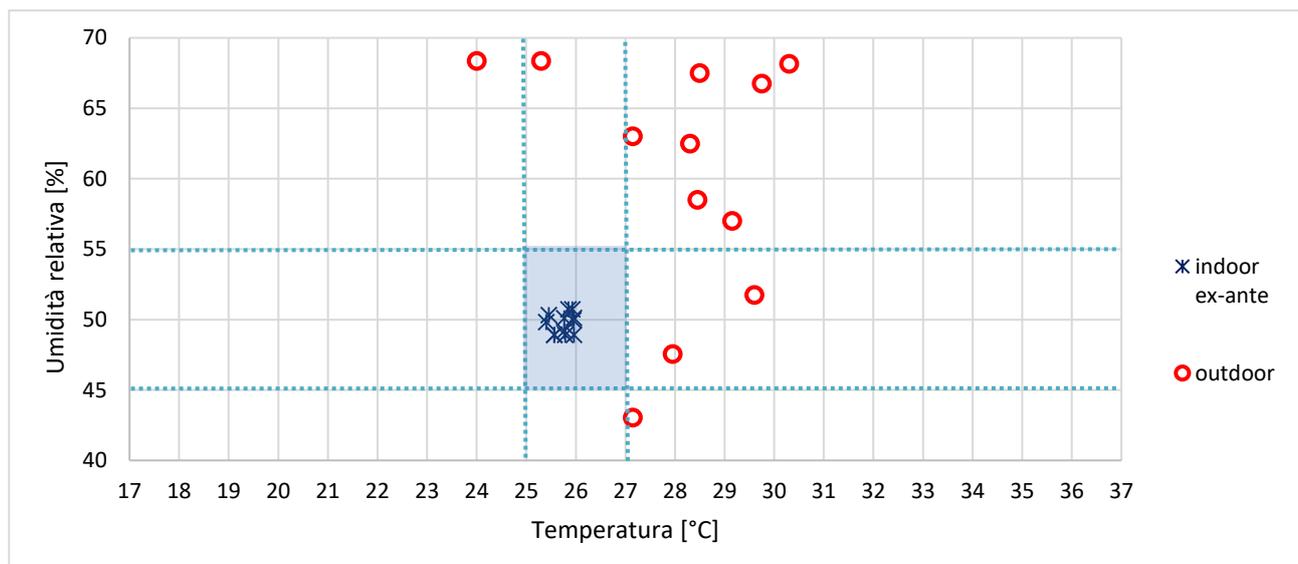


Figura 7.35 – Grandezze termoigrometriche (ex-ante).

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).

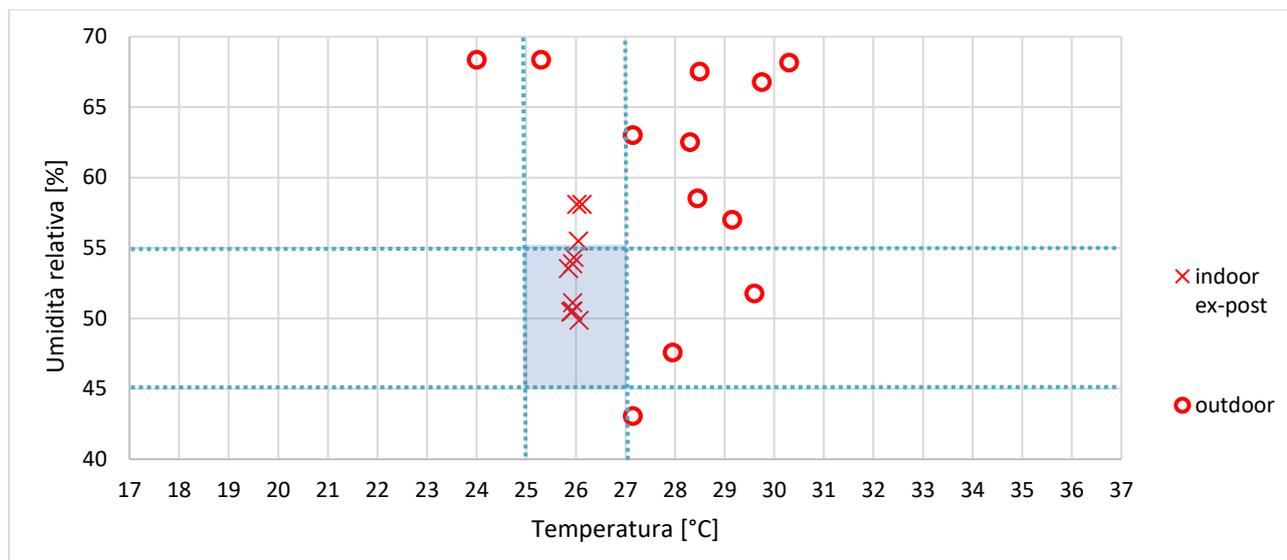


Figura 7.36 – Grandezze termoigrometriche (ex-post).

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

In particolare, si osserva come al diminuire della portata non si manifesti nessun problema nel controllo della temperatura, mentre insorgano problemi nel controllo dell’umidità relativa, che tende ad assumere valori più alti, uscendo in alcuni casi dall’intervallo di comfort.

La motivazione va ricercata nel rapporto tra la portata d’aria trattata e i carichi sensibili e latenti, secondo i bilanci descritti in precedenza:

- al dimezzarsi della portata, passando da 14.000 m³/h a 7.000 m³/h, l’impianto rimane in grado di garantire l’equilibrio di progetto della potenza termica vapore descritto dall’equazione (7.4), dal momento che in nessuna delle condizioni di prova si è trovato a dover compensare il carico sensibile massimo, in ragione di condizioni climatiche esterne più miti rispetto alla condizione di progetto e di una non completa occupazione dell’Aula;
- diversamente, al dimezzarsi della portata, passando da 14.000 m³/h a 7.000 m³/h, l’impianto non è risultato sempre in grado di garantire l’equilibrio di progetto della portata di vapore descritto dall’equazione (7.2); anche in questo caso non si è registrata mai la condizione di carico latente massimo, tuttavia l’occupazione registrata è sempre stata superiore alla metà dell’occupazione di progetto.

7.3.2 Misurazione delle concentrazioni degli inquinanti

Parallelamente alle misure termoigrometriche 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 7.7.

Tabella 7.7 – Concentrazioni degli inquinanti.

Data	Occup.	CO ₂ [ppm]			PM10 [µg/m ³]			VOC [ppm]			O ₃ [ppm]		
		Out	In (ex-ante)	In (ex-post)	Out	In (ex-ante)	In (ex-post)	Out	In (ex-ante)	In (ex-post)	Out	In (ex-ante)	In (ex-post)
28/05	250	344	580	690	41,5	36,7	31,0	0,020	0,023	0,024	0,00	0,00	0,00
08/06	270	340	557	692	23,0	20,0	19,2	0,020	0,016	0,010	0,00	0,00	0,00
11/06	250	345	556	669	22,5	20,1	18,8	0,015	0,016	0,022	0,00	0,00	0,00
12/06	250	347	548	664	22,5	19,9	18,0	0,020	0,015	0,010	0,00	0,00	0,00
18/06	300	348	564	691	27,5	23,6	23,5	0,025	0,018	0,018	0,00	0,00	0,00
20/06	250	349	571	672	25,5	20,6	18,7	0,020	0,014	0,017	0,00	0,00	0,00
26/06	300	344	583	709	17,5	21,7	21,2	0,020	0,013	0,022	0,00	0,00	0,00
28/06	270	343	497	594	36,5	18,6	17,3	0,025	0,020	0,012	0,00	0,00	0,00
04/07	250	345	499	606	39,5	24,0	22,7	0,020	0,018	0,017	0,00	0,00	0,00
05/07	230	343	497	594	36,5	18,6	17,3	0,025	0,020	0,012	0,00	0,00	0,00
12/07	200	340	499	602	27,5	25,0	22,8	0,025	0,024	0,015	0,00	0,00	0,00
10/09	250	348	545	663	28,5	22,5	20,0	0,025	0,017	0,010	0,00	0,00	0,00

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.

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 4.3.

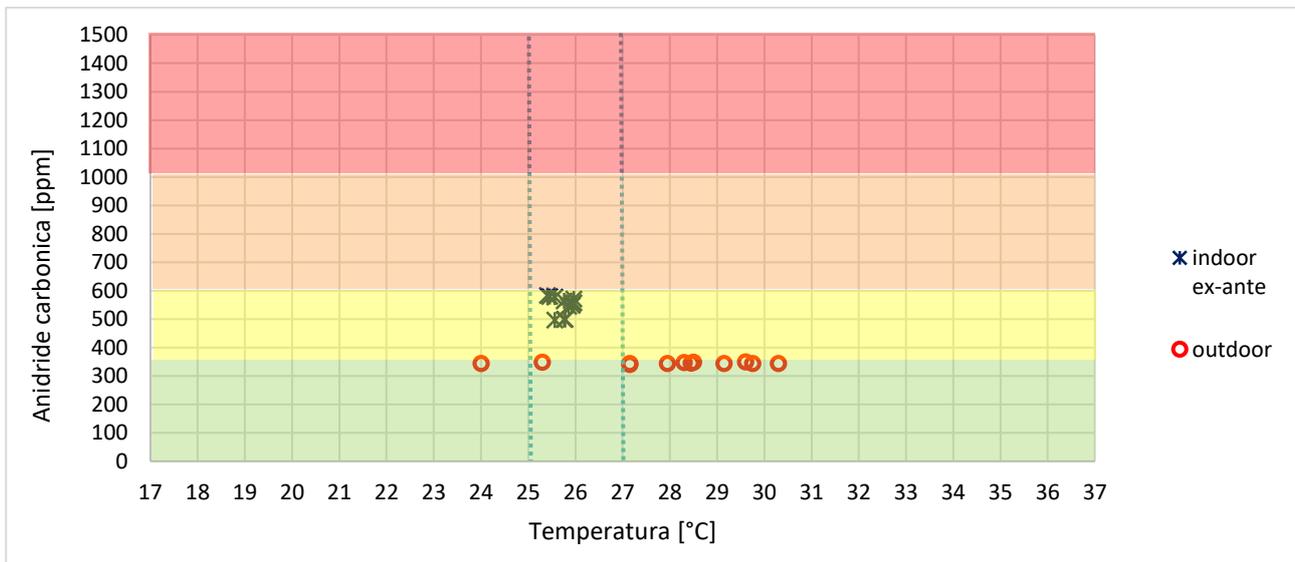


Figura 7.37 – Anidride carbonica (ex-ante).

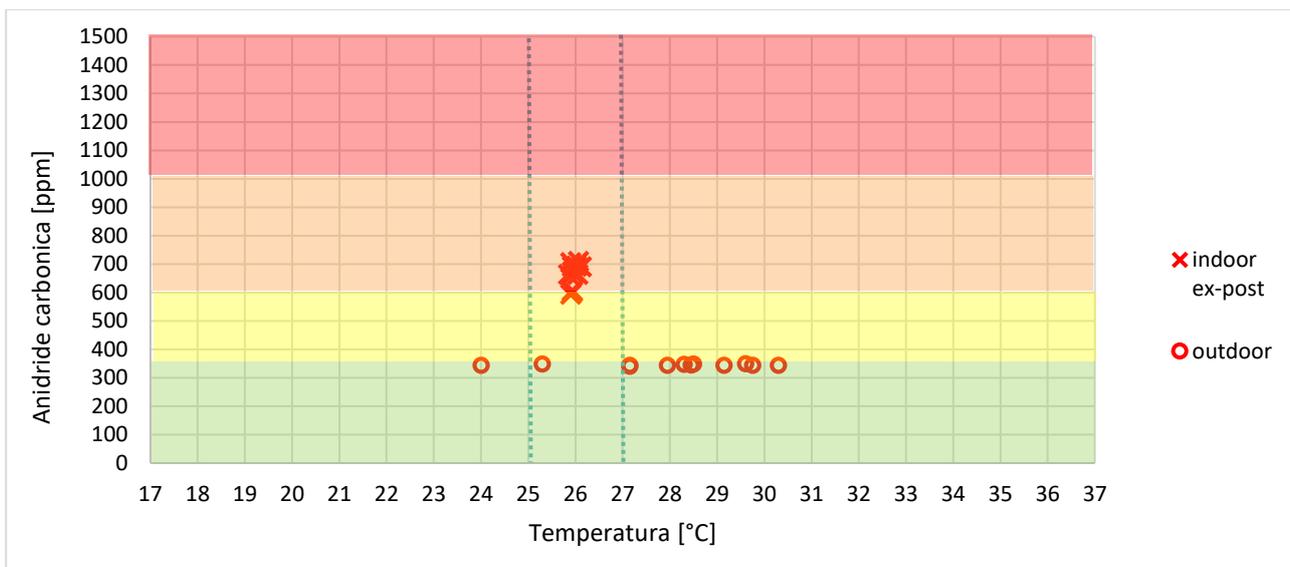


Figura 7.38 – Anidride carbonica (ex-post).

L’osservazione congiunta di Figura 7.37 e Figura 7.38 consente di affermare che, tra la situazione ex-ante e la situazione ex-post, si hanno differenze sostanziali, passando il valore della concentrazione media da 548 ppm a 663 ppm, con un peggioramento che incide sul livello dell’indice relativo all’anidride carbonica, che passa dal valore “moderato” al valore “scadente”.

In termini relativi, prendendo come riferimento l’aria esterna, caratterizzata da una concentrazione di anidride carbonica pressochè costante (~344 ppm), l’incremento dovuto alle sorgenti interne risulta evidentemente influenzato dalla diminuzione della portata.

In particolare, i grafici di Figura 7.39 e Figura 7.40 riportano la classificazione per livelli così come riportata in [39] (UNI EN 15251).

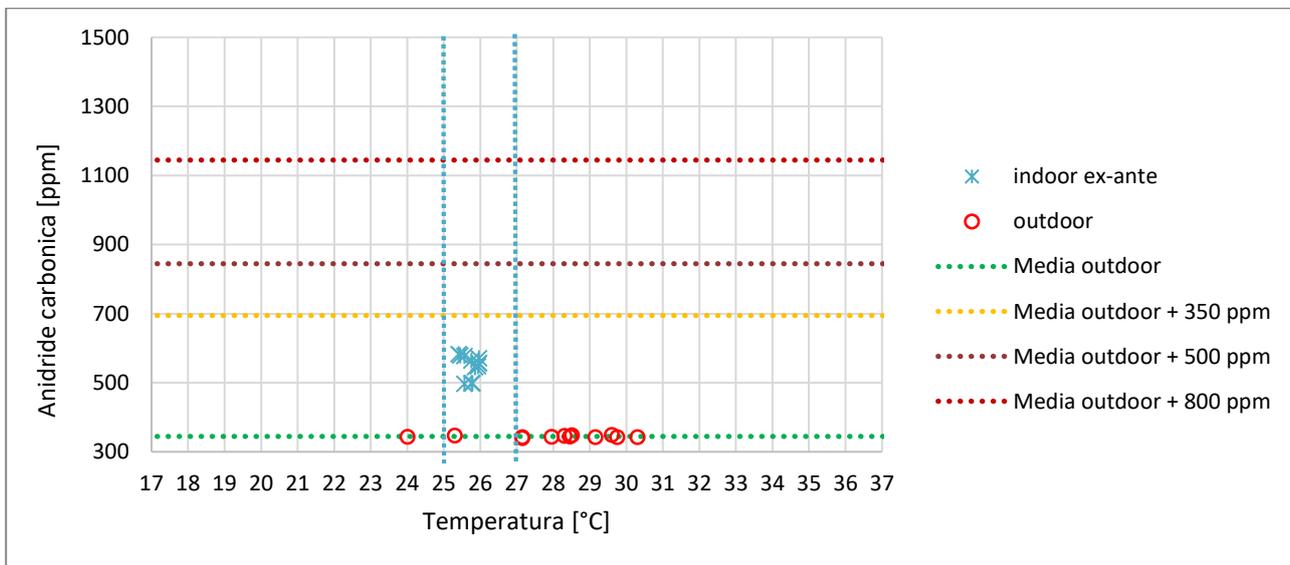


Figura 7.39 – Anidride carbonica (ex-ante).

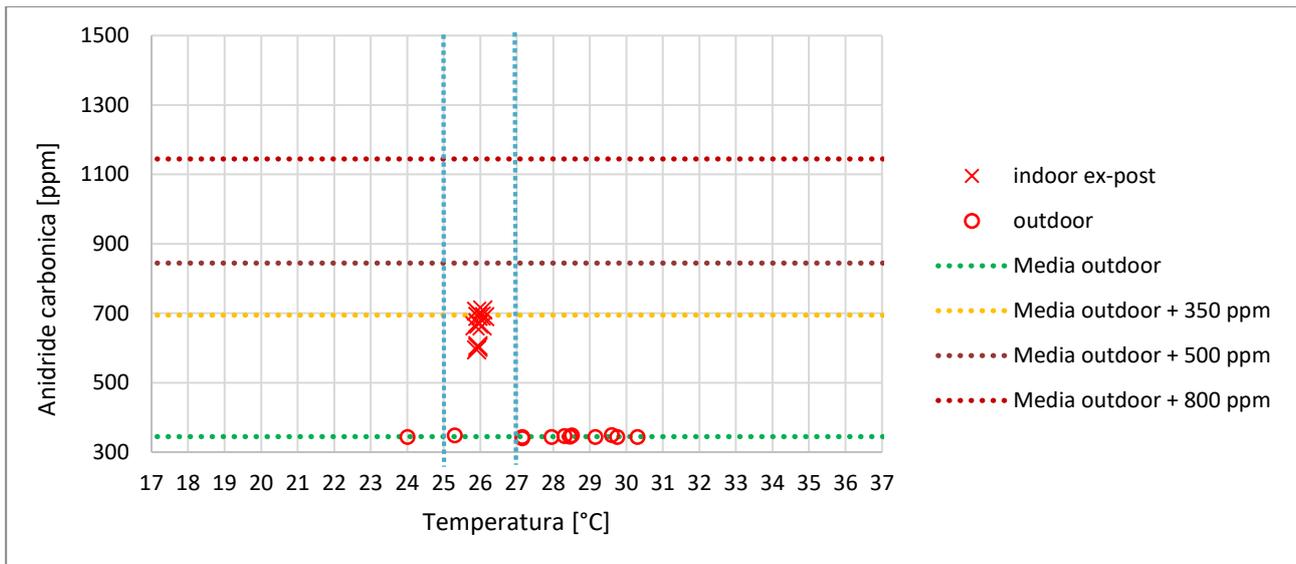


Figura 7.40 – Anidride carbonica (ex-post).

Anche utilizzando questo diverso approccio, si osservano le medesime differenze tra la situazione ex-ante e la situazione ex-post, con un avvicinamento per alcuni dei giorni di misura al limite di separazione tra la “Categoria I” e la “Categoria II”.

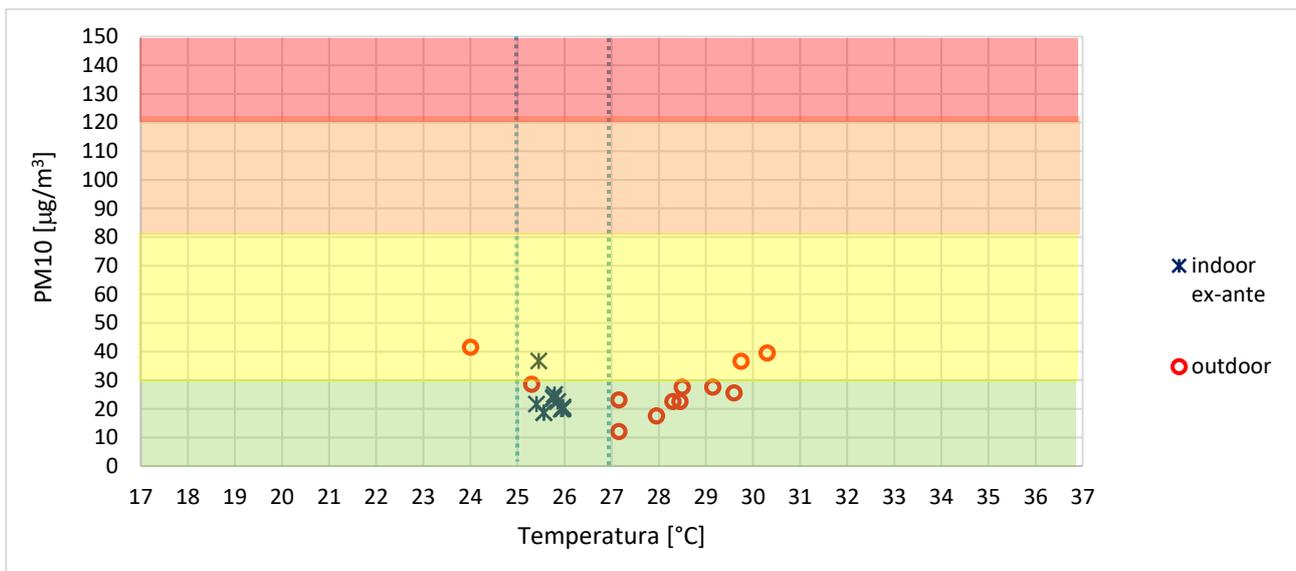


Figura 7.41 – PM10 (ex-ante).

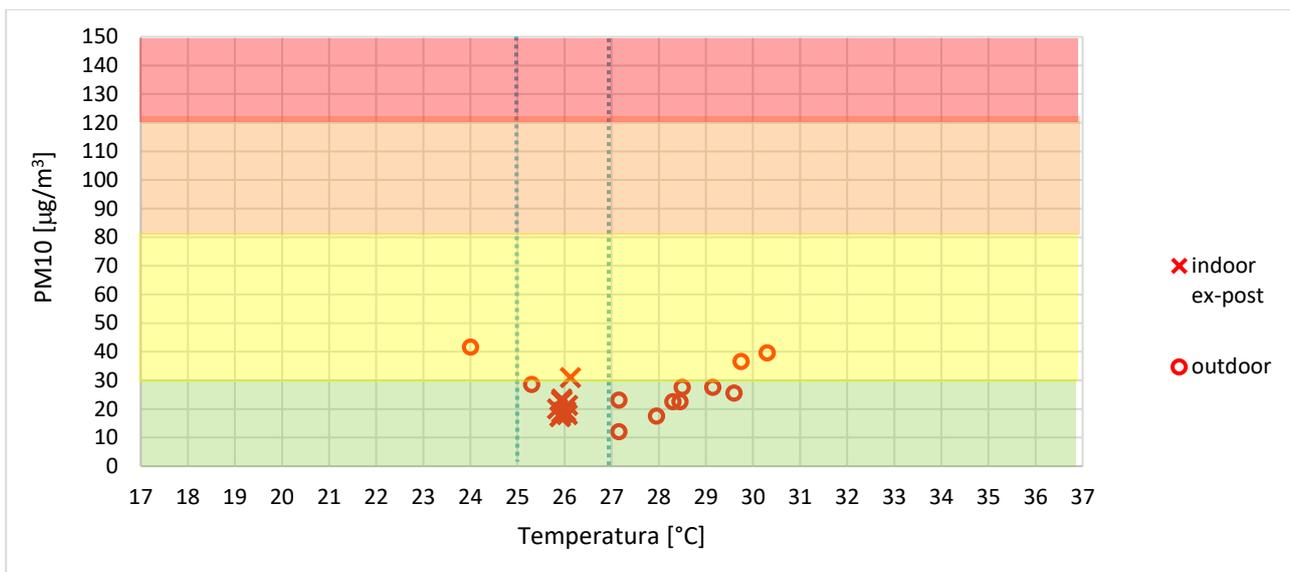


Figura 7.42 – PM10 (ex-post).

L’osservazione congiunta di Figura 7.41 e Figura 7.42 consente di affermare che, tra la situazione ex-ante e la situazione ex-post, si hanno differenze minime, passando il valore della concentrazione media da 23 µg/m³ a 21 µg/m³, con un miglioramento che non incide in modo significativo sul livello dell’indice relativo al PM10, che rimane in entrambe le situazioni al valore “buono”.

In termini relativi, prendendo come riferimento l’aria esterna, caratterizzata da una concentrazione di PM10 mediamente più alta (27 µg/m³), la diminuzione dovuta all’azione dei filtri risulta leggermente più alta nella situazione ex-post, conseguenza diretta della diminuzione della portata.

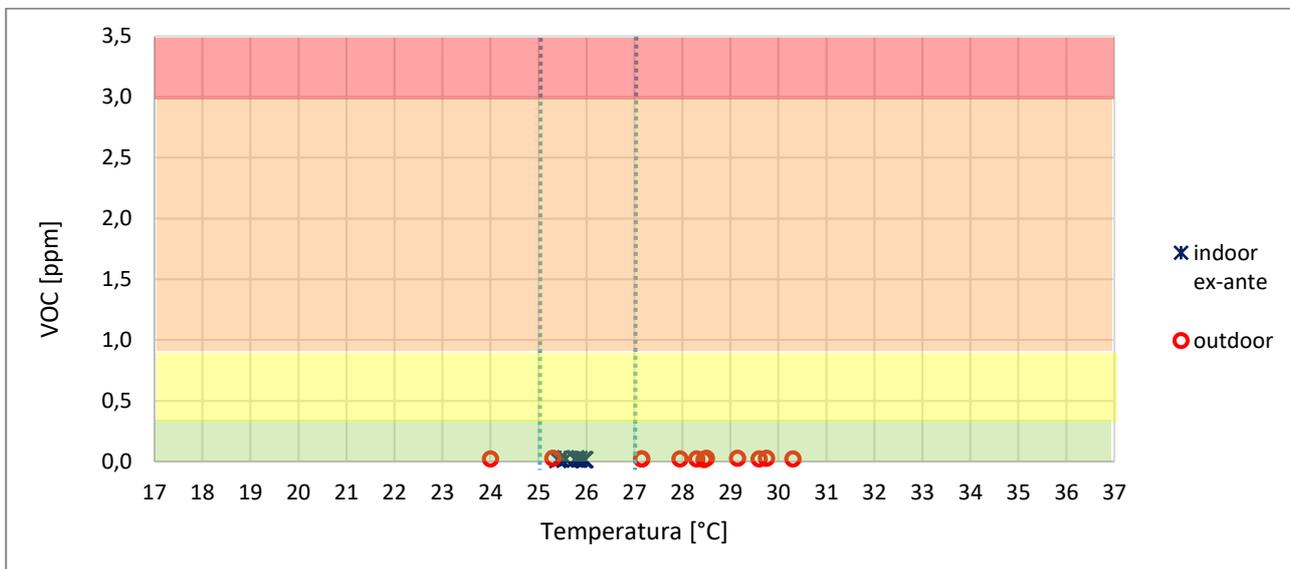


Figura 7.43 – VOC (ex-ante).

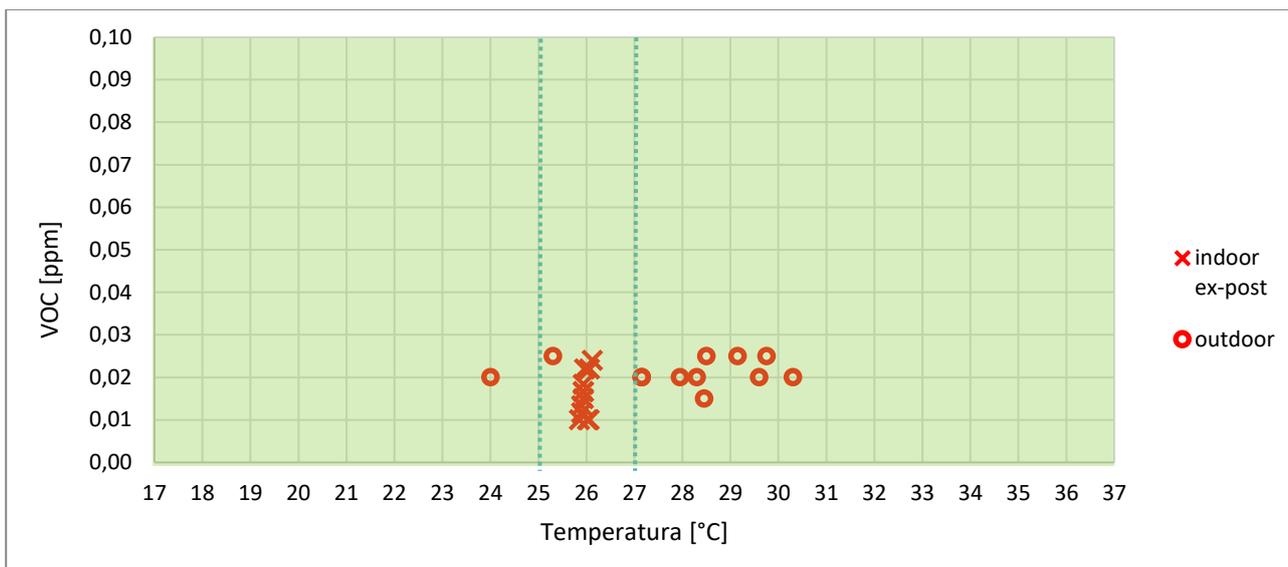


Figura 7.46 – VOC (ex-post).

Praticamente tra la situazione ex-ante e la situazione ex-post non si hanno differenze.

Si è tuttavia osservato che, in questa situazione particolare, la concentrazione di VOC rilevata nell’ambiente interno risente fortemente delle operazioni di pulizia svolte in orario mattutino, prima dell’occupazione della sala. Dal momento che l’Aula Magna non è occupata in modo continuo, può capitare che resti inattiva per alcuni giorni, durante i quali vengono comunque svolte le normali operazioni di pulizia e durante i quali la ventilazione naturale è pressochè nulla. In questa situazione, la concentrazione di VOC risulta sempre più alta all’avviamento dell’impianto, andando progressivamente a diminuire a partire da quel momento.

7.3.3 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 7.8 riporta 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 ($P_{PM10}=0,25$; $P_{VOC}=0,25$; $P_{O3}=0,25$; $P_{CO2}=0,25$) e applicando, per estensione, l’indicatore IQAI anche all’aria esterna.

Tabella 7.8 – Concentrazioni degli inquinanti e IQAI.

Data	Occup.	CO ₂ [ppm]		PM10 [µg/m ³]			VOC [ppm]			O ₃ [ppm]			IQAI			
		Out	In (ex-ante)	In (ex-post)	Out	In (ex-ante)	In (ex-post)	Out	In (ex-ante)	In (ex-post)	Out	In (ex-ante)	In (ex-post)	Out	In (ex-ante)	In (ex-post)
28/05	250	344	580	690	41,5	36,7	31,0	0,020	0,023	0,024	0,00	0,00	0,00	0,570	0,782	0,831
08/06	270	340	557	692	23,0	20,0	19,2	0,020	0,016	0,010	0,00	0,00	0,00	0,451	0,637	0,726
11/06	250	345	556	669	22,5	20,1	18,8	0,015	0,016	0,022	0,00	0,00	0,00	0,446	0,637	0,718
12/06	250	347	548	664	22,5	19,9	18,0	0,020	0,015	0,010	0,00	0,00	0,00	0,452	0,626	0,698
18/06	300	348	564	691	27,5	23,6	23,5	0,025	0,018	0,018	0,00	0,00	0,00	0,499	0,676	0,768
20/06	250	349	571	672	25,5	20,6	18,7	0,020	0,014	0,017	0,00	0,00	0,00	0,478	0,654	0,715
26/06	300	344	583	709	17,5	21,7	21,2	0,020	0,013	0,022	0,00	0,00	0,00	0,408	0,675	0,763
28/06	270	343	497	594	36,5	18,6	17,3	0,025	0,020	0,012	0,00	0,00	0,00	0,362	0,653	0,721
04/07	250	345	499	606	39,5	24,0	22,7	0,020	0,018	0,017	0,00	0,00	0,00	0,559	0,614	0,707
05/07	230	343	497	594	36,5	18,6	17,3	0,025	0,020	0,012	0,00	0,00	0,00	0,548	0,568	0,648
12/07	200	340	499	602	27,5	25,0	22,8	0,025	0,024	0,015	0,00	0,00	0,00	0,495	0,627	0,704
10/09	250	348	545	663	28,5	22,5	20,0	0,025	0,017	0,010	0,00	0,00	0,00	0,507	0,647	0,714

Con le stesse modalità di rappresentazione usate in precedenza, la Figura 7.47 e la Figura 7.48 riportano i risultati del calcolo dell'IQAI.

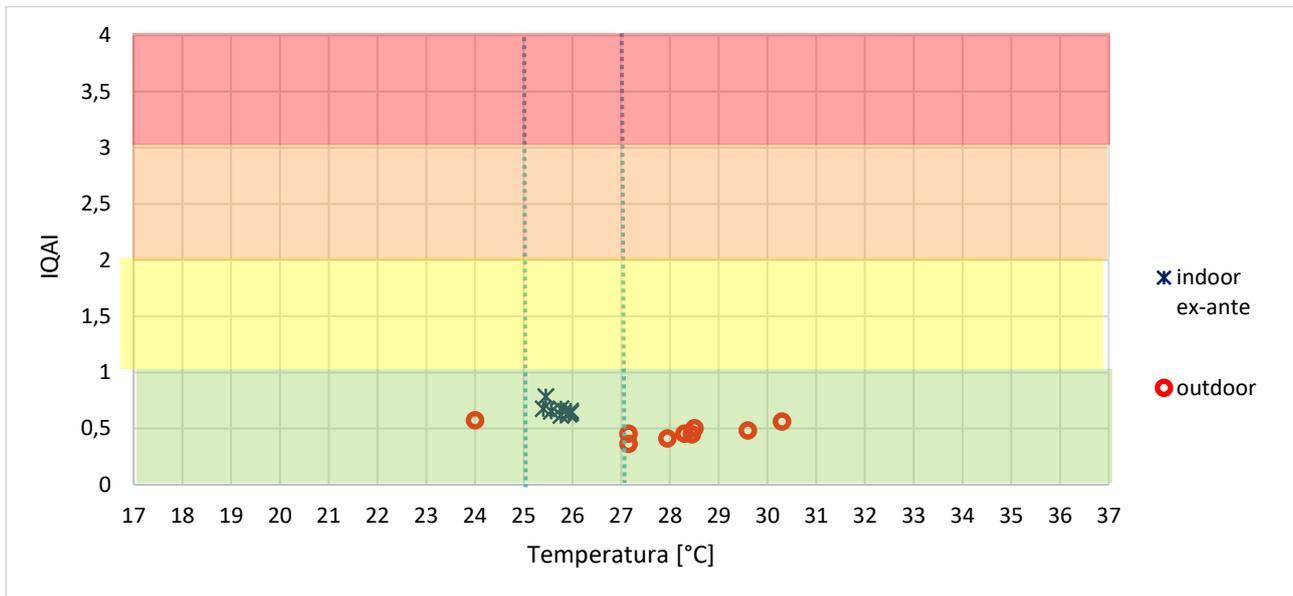


Figura 7.47 – IQAI (ex-ante).

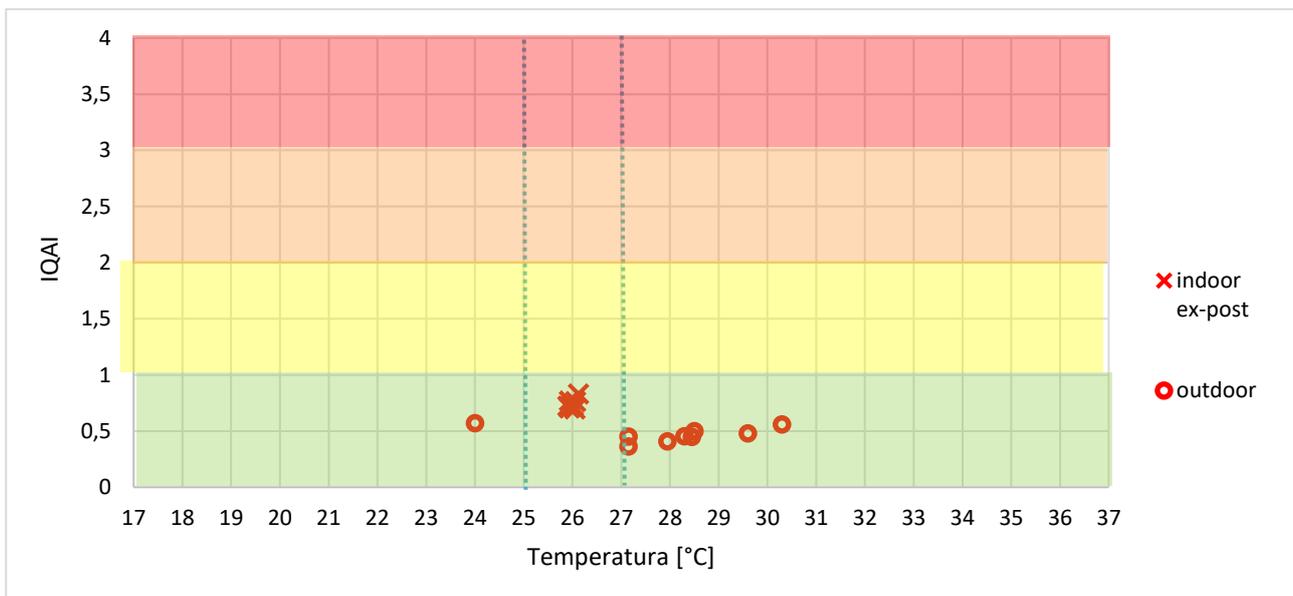


Figura 7.48 – IQAI (ex-post).

L'osservazione congiunta di Figura 7.47 e Figura 7.48 consente di valutare le differenze tra la situazione ex-ante e la situazione ex-post, che rimangono entrambe al livello "buono", sebbene con un incremento dell'IQAI nella situazione ex-post. In particolare, applicando l'indicatore anche all'aria esterna:

- nella situazione ex-ante a partire da aria esterna per la quale si ha $IQAI = 0,47$, per l'aria interna si ha $IQAI = 0,66$;
- nella situazione ex-post a partire da aria esterna per la quale si ha $IQAI = 0,47$, per l'aria interna si ha $IQAI = 0,74$, con un lieve peggioramento rispetto alla situazione ex-ante.

Larga parte del peggioramento è da attribuire alla maggiore concentrazione di anidride carbonica riscontrata nella situazione ex-post, con impianto funzionante a portata dimezzata.

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 7.49 e in Figura 7.50 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 ($P_{PM10}=0,33$; $P_{VOC}=0,33$; $P_{O3}=0,01$; $P_{CO2}=0,33$) e applicando, per estensione, l'indicatore IQAI anche all'aria esterna.

Tabella 7.9 – Concentrazioni degli inquinanti e IQAI.

Data	Occup.	CO ₂ [ppm]		PM10 [µg/m ³]			VOC [ppm]			O ₃ [ppm]			IQAI			
		Out	In (ex-ante)	In (ex-post)	Out	In (ex-ante)	In (ex-post)	Out	In (ex-ante)	In (ex-post)	Out	In (ex-ante)	In (ex-post)	Out	In (ex-ante)	In (ex-post)
28/05	250	344	580	690	41,5	36,7	31,0	0,020	0,023	0,024	0,00	0,00	0,00	0,752	1,033	1,097
08/06	270	340	557	692	23,0	20,0	19,2	0,020	0,016	0,010	0,00	0,00	0,00	0,596	0,841	0,958
11/06	250	345	556	669	22,5	20,1	18,8	0,015	0,016	0,022	0,00	0,00	0,00	0,589	0,841	0,948
12/06	250	347	548	664	22,5	19,9	18,0	0,020	0,015	0,010	0,00	0,00	0,00	0,596	0,826	0,922
18/06	300	348	564	691	27,5	23,6	23,5	0,025	0,018	0,018	0,00	0,00	0,00	0,658	0,892	1,014
20/06	250	349	571	672	25,5	20,6	18,7	0,020	0,014	0,017	0,00	0,00	0,00	0,632	0,863	0,943
26/06	300	344	583	709	17,5	21,7	21,2	0,020	0,013	0,022	0,00	0,00	0,00	0,538	0,891	1,007
28/06	270	343	497	594	36,5	18,6	17,3	0,025	0,020	0,012	0,00	0,00	0,00	0,477	0,862	0,952
04/07	250	345	499	606	39,5	24,0	22,7	0,020	0,018	0,017	0,00	0,00	0,00	0,738	0,810	0,933
05/07	230	343	497	594	36,5	18,6	17,3	0,025	0,020	0,012	0,00	0,00	0,00	0,724	0,750	0,856
12/07	200	340	499	602	27,5	25,0	22,8	0,025	0,024	0,015	0,00	0,00	0,00	0,653	0,828	0,929
10/09	250	348	545	663	28,5	22,5	20,0	0,025	0,017	0,010	0,00	0,00	0,00	0,669	0,854	0,943

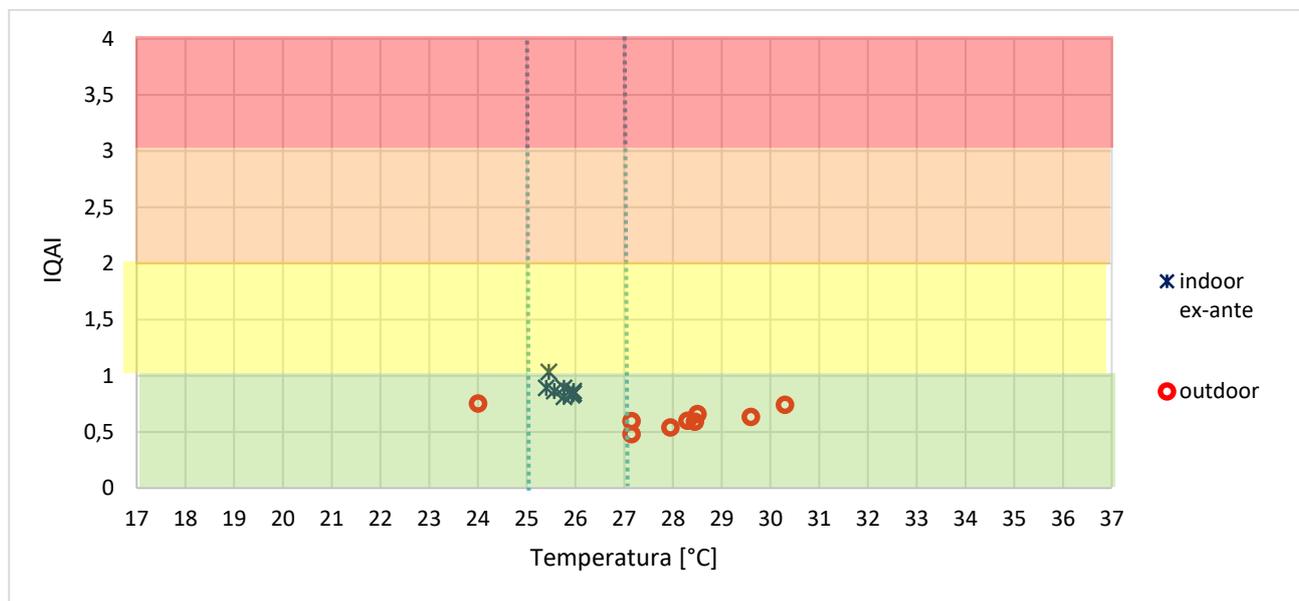


Figura 7.49 – IQAI (ex-ante).

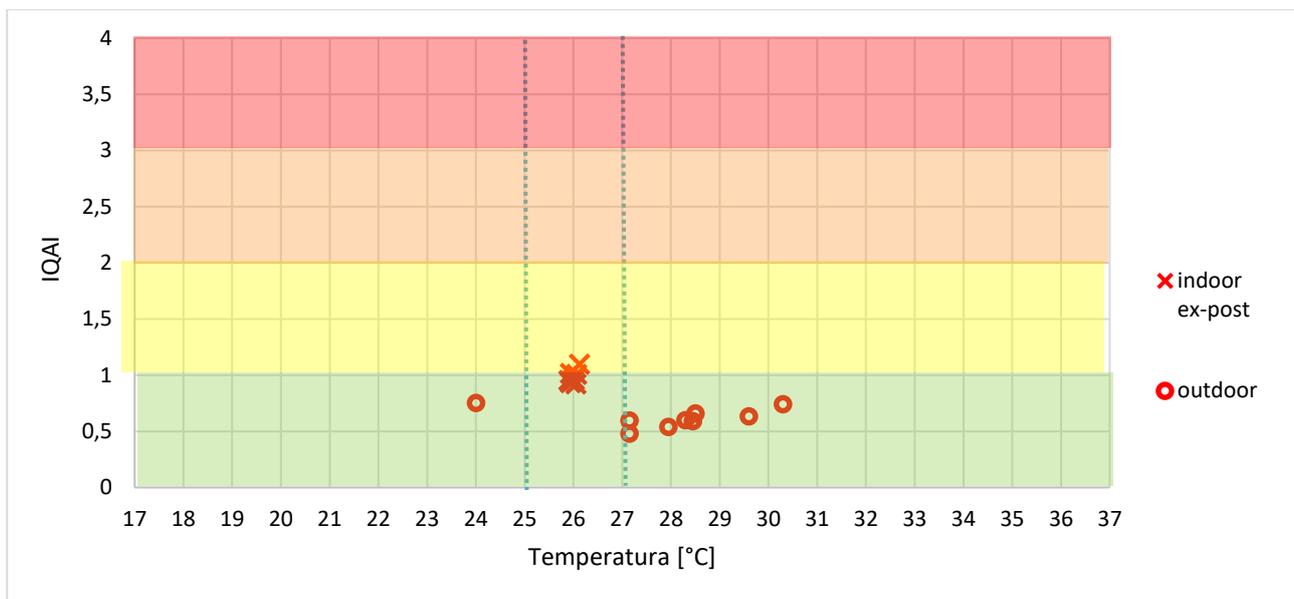


Figura 7.50 – IQAI (ex-post).

L’osservazione congiunta di Figura 7.49 e Figura 7.50 consente di rafforzare quanto detto in precedenza ovvero la situazione ex-post è peggiore rispetto alla situazione ex-ante, con un passaggio dal livello “buono” 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= 0,62, per l’aria interna si ha IQAI=0,87;
- nella situazione ex-post a partire da aria esterna per la quale si ha IQAI= 0,62, per l’aria interna si ha IQAI=0,97, con un lieve peggioramento rispetto alla situazione ex-ante.

7.4 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 si ha un lieve peggioramento della prestazione complessiva dell’impianto, intesa come minore capacità di controllo dei parametri ambientali.

In particolare, si è osservato un lieve peggioramento nel controllo di umidità relativa e un innalzamento della concentrazione di anidride carbonica, parametri nominalmente e generalmente controllati dalle unità di trattamento aria.

Relativamente all’umidità relativa si è misurata una maggiore umidità relativa in ambiente, in conseguenza della minore capacità di diluizione delle produzioni locali di vapore correlata alla diminuzione della portata. In ogni caso il valore medio rilevato tra le varie giornate è pari al 53%, risultando superiore al valore di comfort pari al 50% ma comunque all’interno dell’intervallo di tolleranza del $\pm 5\%$.

Più evidente l’incremento di concentrazione di anidride carbonica, conseguente al dimezzamento della portata di aria esterna, che comunque non ha portato ad un “declassamento” dell’IAQ generale, né nella scala di valori adoperata per la definizione dell’IQAI, né secondo la procedura della UNI EN 15251.

Non sono state rilevate difficoltà dell’impianto a controllare la temperatura ambiente anche in condizioni di portata dimezzata; tale circostanza appare anche correlata alle particolari condizioni di prova, non avendo mai l’impianto dovuto affrontare la condizione di carico massimo, per via di un affollamento dell’Aula

inferiore all'affollamento massimo e per via di condizioni ambientali più miti rispetto alle condizioni di progetto della città di Roma.

Dalle simulazioni effettuate, in ogni caso, viene confermata la possibilità di mantenere la temperatura di comfort anche in presenza delle condizioni nominali di progetto dell'Aula Magna, con carichi termici più alti di quelli riscontrati nelle giornate di misura.

A seguito del dimezzamento della portata, si è osservato soltanto un lieve peggioramento dell'indicatore scelto (IQAI), senza una variazione della classe, in dipendenza principalmente dell'incremento della concentrazione di anidride carbonica, dal momento che relativamente a VOC e PM₁₀ sono state registrate variazioni di segno opposto, con VOC e PM₁₀ in calo.

Tale 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 occupanti.

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, potendo arrivare con portata ridotta del 50% ad una riduzione del 45,2% dei consumi elettrici della pompa di calore.

8 Conclusioni

Lo studio effettuato nel corso dell'anno 2017 e dell'anno 2018 ha avuto come obiettivo l'ottimizzazione delle portate di aria esterna, ricambio finalizzata all'efficienza energetica. Per questo motivo sono state effettuate misurazioni e simulazioni energetiche su due casi studio, caratterizzati da alcuni tratti comuni e importanti differenze.

Nel corso dell'anno 2017 si è valutato l'edificio ex-Banco di Napoli della Camera dei Deputati; tale edificio è collocato nel centro storico della città di Roma e rientra tra gli edifici di pregio sottoposti a vincolo storico-architettonico. L'edificio è destinato ad uffici e nel corso degli anni ha subito ristrutturazioni e riqualificazioni volte ad adattarlo alle mutate esigenze e volte ad incrementarne la prestazione energetica, compatibilmente con i vincoli presenti.

Nel corso dell'anno 2018 si è valutata l'Aula Magna della sede di Valle Giulia della Facoltà di Architettura della Sapienza; tale edificio è collocato a ridosso del centro storico della città di Roma e rientra anch'esso tra gli edifici di pregio sottoposti a vincolo storico-architettonico. L'edificio è destinato ad attività universitaria e nel corso degli anni ha subito ristrutturazioni e riqualificazioni volte ad adattarlo alle mutate esigenze e volte ad incrementarne la prestazione energetica, compatibilmente con i vincoli presenti.

Diversa è la destinazione d'uso degli ambienti valutati e diversi sono i sistemi impiantistici preposti al controllo dei parametri ambientali; nel primo caso si era in presenza di un impianto ad aria primaria e ventilconvettori; nel secondo caso si era in presenza di un impianto a tutt'aria esterna con recuperatore di calore.

Molto diversa tra le due situazioni è la modalità di occupazione dell'edificio, continua nel caso dell'ex-Banco di Napoli, molto discontinua nel caso dell'Aula Magna della Facoltà di Architettura. Tale circostanza ha delle implicazioni importanti sulla qualità dell'aria interna, dal momento che alla discontinua occupazione dell'Aula Magna si accompagna una discontinua accensione degli impianti di climatizzazione. In particolare, nei periodi di non utilizzo dell'Aula Magna, durante i quali vengono comunque svolte le normali operazioni di pulizia, si sono registrate concentrazioni di VOC più alte, soprattutto nelle fasi iniziali dell'utilizzo, dal momento che la particolare configurazione architettonica dell'Aula Magna che è priva di finestre, rende praticamente nulle le infiltrazioni naturali di aria esterna.

Diverso è anche il contesto urbano; tuttavia, con le limitazioni di un'applicazione dell'IQAI anche all'aria esterna, per l'ex-Banco di Napoli, nel pieno del centro storico, si è calcolato un IQAI pari mediamente a 0,54, mentre per la Facoltà di Architettura, collocata in un contesto migliore, con ampie zone verdi nell'intorno, si è calcolato un IQAI pari mediamente a 0,47.

Anche le sorgenti inquinanti interne sono diverse; per il Banco di Napoli, oltre alle persone si avevano computer, stampanti e le classiche dotazioni da ufficio; per l'Aula Magna la principale fonte di inquinamento sono le persone, essendo molto limitata l'influenza su tutta l'aula delle poche dotazioni tecnologiche presenti; l'effetto dell'elevato affollamento, per l'Aula Magna, comporta anche un forte legame tra la presenza di persone e i carichi termici, sensibili e latenti.

Importanti differenze si hanno relativamente alla portata d'aria esterna di ricambio; per l'edificio ex-Banco di Napoli il dimensionamento degli impianti è stato effettuato sulla base di una portata di rinnovo pari a circa 2 Vol/h: ciò comporta, in ragione di una bassa densità di occupazione e dell'altezza dei vari ambienti superiore a 3,5 metri, una portata di ricambio unitaria ben superiore (più del doppio) rispetto al valore minimo prescritto dalla normativa vigente (40 m³/h, secondo la UNI 10339); per l'Aula magna della Facoltà di Architettura il dimensionamento effettuato comporta una portata unitaria di 35 m³/h, risultando ancora

superiore al valore minimo prescritto (25 m³/h, secondo la UNI 10339), ma con margini inferiori rispetto a quanto riscontrato per l'ex- Banco di Napoli.

Le misurazioni volte a valutare la qualità dell'aria, nel caso dell'ex-Banco di Napoli hanno consentito di osservare un lieve miglioramento dell'IQAI, mentre nel caso dell'Aula Magna hanno mostrato un lieve peggioramento dell'IQAI.

In entrambi i casi, a seguito del dimezzamento della portata, la lieve variazione dell'indicatore IQAI non ha portato ad un cambiamento di classe, in un senso o nell'altro.

Per l'Aula Magna il lieve peggioramento trova una giustificazione nell'effetto congiunto di una minore portata di aria esterna unitaria rispetto all'ex-Banco di Napoli e nel fatto che le sorgenti di inquinamento interne sono prevalentemente rappresentate dalle persone, responsabili dell'emissione di anidride carbonica, inquinante che deve essere necessariamente diluito con aria esterna.

I risultati ottenuti, per le simulazioni energetiche, in entrambi i casi hanno mostrato come ad una riduzione della portata di aria esterna corrisponda una riduzione del consumo energetico, con un legame di proporzionalità diretta nel caso dell'impianto ad aria primaria e ventilconvettori (-50% portata; -50% consumi) e un diverso legame nel caso dell'impianto a tutt'aria (-50% portata; -45% consumi).

Rimane, anche a valle di questa annualità, 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.

In particolare rimane da investigare il funzionamento invernale per altri casi studio, a partire dal caso studio in oggetto, dal momento che finora è stato esaminato solo il funzionamento estivo

Tuttavia la permanenza tra i due casi di un importante risparmio energetico e la piccola variazione della IAQ misurata consentono di affermare che esiste la possibilità di ottenere una riduzione significativa dei consumi energetici associati al ricambio dell'aria, soprattutto in tutte quelle situazioni caratterizzate da una qualità dell'aria esterna non buona.

9 Riferimenti bibliografici

- [1]. N. Soares, J. Bastos, L. Dias Pereira, A. Soares, A.R. Amaral, E. Asadi, E. Rodrigues, F.B. Lamas, H. Monteiro, M.A.R. Lopes, A.R. Gaspar, A review on current advances in the energy and environmental performance of buildings towards a more sustainable built environment, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77 (2017),845-860.
- [2]. Jantunen M, Oliveira Fernandes E, Carrer P, Kephelopoulos S. Promoting actions for healthy indoor air (IAIAQ). Luxembourg: European Commission Directorate General for Health and Consumers; 2011.
- [3]. Janda KB. Buildings don't use energy: people do. *Archit Sci Rev* 2011;54(1):15–22.
- [4]. Scientific committee on health and environmental risks. SCHER – Opinion on risk assessment on indoor air quality; 2007.
- [5]. Kundel S, Kontonasiou E, Arcipowska A, Mariottini F, Atanasiu B. Indoor air quality, thermal comfort and daylight – analysis of residential building regulations in eight EU member states; 2015.
- [6]. d'Ambrosio Alfano FR, Bellia L, Boerstra A, van Dijken F, Lanniello E, Lopardo G, et al. REHVA – indoor environment and energy efficiency in schools - Part 1 principles. REHVA 2010.
- [7]. Schneider M. Do school facilities affect academic outcomes?. *Natl Clgh Educ Facil* 2002;1–24.
- [8]. Wargocki P, Wyon DP. The Effects of outdoor air supply rate and supply air filter condition in classrooms on the performance of schoolwork by children (RP-1257). *HVACR Res* 2007;13(2):165–91.
- [9]. Bakó-biró Z, Clements-Croome DJ, Kochhar N, Awbi HB, Williams MJ. Ventilation rates in schools and pupils' performance. *Build Environ* 2012;48:215–23.
- [10]. Corgnati SP, Gameiro da Silva M, Ansaldi R, Asadi E, Costa JJ, Filippi M, et al. REHVA – indoor climate quality assessment. REHVA 2011.
- [11]. Frontczak M, Wargocki P. Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments. *Build Environ* 2011;46(4):922–37.
- [12]. Tanabe S-I, Haned M, Nishipana N. Indoor environmental quality and productivity. *REHVA J* 2007.
- [13]. Clements-Croome DJ. Influence of social organization and environmental factors and well-being in the office workplace. In: *Proceedings of the International Conference CLIMA 2000 world congress*; 2001.
- [14]. ASHRAE. ANSI/ASHRAE standard 55 – Thermal environmental conditions for human occupancy; 2010.
- [15]. Healy JD. Excess winter mortality in Europe: a cross country analysis identifying key risk factors. *J Epidemiol Community Health* 2003;57:784–9.
- [16]. CEC, California energy commission. Summary of daylighting in schools: reanalysis report; 2003.
- [17]. P. Wargocki, D.P. Wyon, J. Sundell, G. Clausen, P.O. Fanger, The effects of outdoor air supply rate in an office on perceived air quality, sick building syndrome (SBS) symptoms and productivity, *Indoor Air* 10 (2000) 222–236.
- [18]. S.R. Jurado, A.D.P. Bankoff, A. Sanchez, Indoor air quality in Brazilian universities, *Int. J. Environ. Res. Publ. Health* 11 (2014) 7081–7093.
- [19]. M. Di Giulio, R. Grande, E. Di Campi, S. Di Bartolomeo, L. Cellini, Indoor air quality in university environments, *Environ. Monit. Assess.* 170 (2010) 509–517.
- [20]. T. Godish, J.D. Spengler, Relationships between ventilation and indoor air quality: a review, *Indoor Air* 6 (1996) 135–145.
- [21]. WHO, WHO Guidelines for Indoor Air Quality: Selected Pollutants, (2010).
- [22]. J.M. Daisey, W.J. Angell, M.G. Apte, Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools: an analysis of existing information, *Indoor Air* 13 (2003) 53–64.
- [23]. A.P. Jones, Indoor air quality and health, *Atmos. Environ.* 33 (1999) 4535–4564.
- [24]. N. Michelot, M. Carrega, Monitoring indoor air quality in French schools and day-care centres. Results from the first phase of a pilot survey, *Healthy Buildings 2012*, 10th International Conference, 2014, pp. 1–6 Brisbane.
- [25]. O. a Seppänen, W.J. Fisk, M.J. Mendell, Association of ventilation rates and CO2 concentrations with health and other responses in commercial and institutional buildings, *Indoor Air* 9 (1999) 226–252.

- [26].S. Kunkel, E. Kontonasiou, A. Arcipowska, F. Mariottini, B. Atanasiu, Indoor Air Quality, Thermal Comfort and Daylight - Analysis of Residential Building Regulations, (2015) Brussels.
- [27].Becker R, Goldberger I, Paciuk M. Improving energy performance of school buildings while ensuring indoor air quality ventilation. *Build Environ* 2007;42(9):3261–76.
- [28].Bernardo H, Dias Pereira L. An integrated approach for energy performance and indoor environmental quality assessment in school buildings. Green brain of the year contest - IPC 2014; 2014.
- [29].Howieson S. Are our homes making us ill? The impact of energy efficiency on indoor air quality. *Perspect Public Health* 2014;134(6):318–9.
- [30].Howieson S. *Housing and asthma*, Taylor & Francis; 2005.
- [31].Bakó-biró Z, Kochhar N, Clements-Croome DJ, Awbi HB, Williams M. Ventilation rates in schools and learning performance. in: *Proceedings of clima 2007 WellBeing indoors*; 2007.
- [32].de Carvalho PM, Gameiro da Silva M, Ramos JE. Influence of weather and indoor climate on clothing of occupants in naturally ventilated school buildings. *Build Environ* 2013;59:38–46.
- [33].Havenith G, Holmér I, Parsons K. Personal factors in thermal comfort assessment: clothing properties and metabolic heat production. *Energy Build* 2002;34(6):581–91.
- [34].Heidari S, Sharples S. A comparative analysis of short-term and long-term thermal comfort surveys in Iran. *Energy Build* 2002;34(6):607–14.
- [35].Dias Pereira L, Raimondo D, Corgnati SP, Gameiro da Silva M. Assessment of indoor air quality and thermal comfort in Portuguese secondary classrooms: methodology and results. *Build Environ* 2014;81:69–80.
- [36].Dias Pereira L, Neto L, Bernardo H, Gameiro da Silva M. An integrated approach on energy consumption and indoor environmental quality performance in six Portuguese secondary schools. *Energy Res Soc Sci* 2017.
- [37].Dias Pereira L. *Modernized Portuguese schools – from IAQ and thermal comfort towards energy efficiency plans [PhD Dissertation in Sustainable Energy Systems]*. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Sciences and Technology of the University of Coimbra; 2016.
- [38].EN ISO 7730: 2005. Ergonomics of the thermal environment. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria; 2005.
- [39].CEN. EN 15251:2007 Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics; 2007.
- [40].Lucarelli MT, Pennestrì D. Gli edifici scolastici e l'indoor air quality: procedure diagnostiche e criteri di intervento. *J Technol Archit Environ* 2015;9:299–306.
- [41].Way M, Bordass B. Making feedback and post-occupancy evaluation routine 2: soft landings - involving design and building teams in improving performance. *Build Res Inf* 2005;33(4):353–60.
- [42].Chenari B, Carrilho JD, Gameiro da Silva M. Towards sustainable, energy-efficient and healthy ventilation strategies in buildings: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;59:1426–47.
- [43].Aste N, Manfren M, Marenzi G. Building automation and control systems and performance optimization: a framework for analysis. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;75:313–30.
- [44].T. Ben-David, M.S. Waring, Impact of natural versus mechanical ventilation on simulated indoor air quality and energy consumption in offices in fourteen U.S. cities, *Building and Environment* 104 (2016) 320-336
- [45].A.L. Pisello, V.L. Castaldo, J.E. Taylor, F. Cotana, The impact of natural ventilation on building energy requirement at inter-building scale, *Energy and Buildings* 127 (2016) 870-883
- [46].A. Rackes, M.S. Waring, Using multiobjective optimizations to discover dynamic building ventilation strategies that can improve indoor air quality and reduce energy use, *Energy and Buildings* 75 (2014) 272-280,
- [47].T. Ngoc Quang, C. He, L. Morawska, L.D. Knibbs, Influence of ventilation and filtration on indoor particle concentrations in urban office buildings, *Atmospheric Environment* 79 (2013) 41-52

- [48].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.
- [49].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
- [50].K.H. Han, J.S. Zhang, B. Guo, A novel approach of integrating ventilation and air cleaning for sustainable and healthy office environments, *Energy and Buildings* 76 (2014) 32-42
- [51].F. Noris, W.W. Delp, K. Vermeer, G. Adamkiewicz, B.C. Singer, W.J. Fisk, Protocol for maximizing energy savings and indoor environmental quality improvements when retrofitting apartments, *Energy and Buildings* 61 (2013) 378-386
- [52].William J.N. Turner, Jennifer M. Logue, Craig P. Wray, A combined energy and IAQ assessment of the potential value of commissioning residential mechanical ventilation systems, *Building and Environment* 60 (2013) 194-201
- [53].V. Leivo, M. Turunen, A. Aaltonen, M. Kiviste, L. Du, U Haverinen-Shaughnessy, Impacts of Energy Retrofits on Ventilation Rates, CO₂-levels and Occupants' Satisfaction with Indoor Air Quality, *Energy Procedia* 96 (2016) 260-265
- [54].I. Sarbu, C. Sebarchievici, Aspects of indoor environmental quality assessment in buildings, *Energy and Buildings* 60 (2013) 410-419.
- [55].L. Cony Renaud Salis, M. Abadie, P. Wargocki, C. Rode, Towards the definition of indicators for assessment of indoor air quality and energy performance in low-energy residential buildings, *Energy and Buildings* 152 (2017) 492-502
- [56].L. Wong, K. Mui, T. Tsang, Evaluation of Indoor Air Quality Screening Strategies: A Step-Wise Approach for IAQ Screening. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13 (2016), 1240.
- [57].P. Hui, L. Wong, K. Mui, Indoor Air Quality Benchmarking for Air Conditioned Offices. *Clean Soil Air Water*, 37 (2009) 481-486.
- [58].G. Rojas, R. Pfluger, W. Feist, Ventilation concepts for energy efficient housing in Central European climate – a simulation study comparing IAQ, mold risk and ventilation losses, in: *Proceedings of the 14th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Indoor Air 2016, Ghent, Belgium, July, 2016*, pp. 3–8
- [59].C.M. Chiang, C.M. Lai, A study on the comprehensive indicator of indoor environment assessment for occupants' health in Taiwan, *Build. Environ.* 37(4) (2002) 387–392
- [60].S.C. Sofuoglu, D.J. Moschandreas, The link between symptoms of office building occupants and in-office air pollution: the Indoor Air Pollution Index, *Indoor Air* 13 (2003) 332–343
- [61].J.M. Logue, P.N. Price, M.H. Sherman, B.C. Singer, A method to estimate the chronic health impact of air pollutants in U.S. residences, *Environ. Health Perspect* 120 (2) (2011) 216–222
- [62].INDEX, The INDEX project: Critical Appraisal of the Setting and Implementation of Indoor exposure Limits in the EU. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Health and Consumer Protection, Physical and Chemical Exposure Unit, Ispra, Italy (JRC/IHCP/PCE), Report, 2005338
- [63].US Environmental Protection Agency. Guidelines for carcinogen risk assessment. *Fed. Regist.* 1986;51:33992–5003 September 24
- [64].OEHHA (Office of Environmental Health Hazard Assessment). Toxicity criteria database. <http://www.oehha.ca.gov/risk/ChemicalDB/index.asp> 2009.
- [65].Wenjuan Wei, Olivier Ramalho, Corinne Mandin, Indoor air quality requirements in green building certifications, *Building and Environment*, 92 (2015), 10-19
- [66].Cincinelli A, Martellini T. Indoor Air Quality and Health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2017;14(11):1286..
- [67].Orecchio, S.; Fiore, M.; Barreca, S.; Vara, G. Volatile Profiles of Emissions from Different Activities Analyzed Using Canister Samplers and Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC/MS) Analysis: A Case Study. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2017, 14, 195.]
- [68].Vilceková, S.; Apostoloski, I.Z.; Meciarova, L.; Burdová, E.K.; Kiselák, J. Investigation of Indoor Air Quality in Houses of Macedonia. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2017, 14, 37.

- [69].Chen, Y.; Sung, F.; Chen, M.; Mao, I. Indoor Air Quality in the Metro System in North Taiwan. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2016, 13, 1200.
- [70].Scheepers, P.T.J.; van Wel, L.; Beckmann, G.; Anzion, R.B.M. Chemical Characterization of the Indoor Air Quality of a University Hospital: Penetration of Outdoor Air Pollutants. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2017, 14, 497.
- [71].Zhong, L.; Su, F.; Batterman, S. Volatile Organic Compounds (VOCs) in Conventional and High Performance School Buildings in the US. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2017, 14, 100.
- [72].Veronika Földváry, Gabriel Bekö, Sarka Langer, Karine Arrhenius, Dušan Petráš, Effect of energy renovation on indoor air quality in multifamily residential buildings in Slovakia, *Building and Environment*, Volume 122, 2017, Pages 363-372, ISSN 0360-1323
- [73].Majid Karami, Gabrielle Viola McMorro, Liping Wang, Continuous monitoring of indoor environmental quality using an Arduino-based data acquisition system, *Journal of Building Engineering*, Volume 19, 2018, Pages 412-419, ISSN 2352-7102.
- [74].Torkan Fazli, Brent Stephens, Development of a nationally representative set of combined building energy and indoor air quality models for U.S. residences, *Building and Environment*, Volume 136, 2018, Pages 198-212, ISSN 0360-1323.
- [75].Vornanen-Winqvist, C.; Salonen, H.; Järvi, K.; Andersson, M.A.; Mikkola, R.; Marik, T.; Kredics, L.; Kurnitski, J. Effects of Ventilation Improvement on Measured and Perceived Indoor Air Quality in a School Building with a Hybrid Ventilation System. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2018, 15, 1414.
- [76].Vilčeková S, Apostoloski IZ, Mečiarová L, Krídlová Burdová E, Kiseľák J. Investigation of Indoor Air Quality in Houses of Macedonia. Cincinelli A, Martellini T, eds. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2017;14(1):37.
- [77].Sheikh Zuhair, Richard Manton, Corey Griffin, Magdalena Hajdukiewicz, Marcus M. Keane, Jamie Goggins, An Indoor Environmental Quality (IEQ) assessment of a partially-retrofitted university building, *Building and Environment*, Volume 139, 2018, Pages 69-85.
- [78].K.P. Amber, M.W. Aslam, A. Mahmood, A. Kousar, M.Y. Younis, B. Akbar, G.Q. Chaudhary, S.K. Hussain, Energy consumption forecasting for university sector buildings, *Energies* 10 (2017) 1579.
- [79].M.H. Chung, E.K. Rhee, Potential opportunities for energy conservation in existing buildings on university campus: a field survey in Korea, *Energy Build.* 78 (2014) 176–182.
- [80].J.A. Davis, D.W. Nutter, Occupancy diversity factors for common university building types, *Energy Build.* 42 (2010) 1543–1551.
- [81].J.M. Daisey, W.J. Angell, M.G. Apte, Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools: an analysis of existing information, *Indoor Air* 13 (2003) 53–64.
- [82].T. Mihai, V. Iordache, Determining the indoor environment quality for an educational building, *Energy Procedia* 85 (2016) 566–574.
- [83].R.M.S.F. Almeida, V.P. De Freitas, Indoor environmental quality of classrooms in Southern European climate, *Energy Build.* 81 (2014) 127–140.
- [84].Bart Merema, Muhannad Delwati, Maarten Sourbron, Hilde Breesch, Demand controlled ventilation (DCV) in school and office buildings: Lessons learnt from case studies, *Energy and Buildings*, Volume 172, 2018, Pages 349-360.
- [85].Manuale critico di sanità pubblica a cura di Francesco Calamo Specchia.
- [86].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.