



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

CENTRO DI RICERCA
INTERDISCIPLINARE TERRITORIO
EDILIZIA RESTAURO AMBIENTE CITTA'



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

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

Dicembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2018

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

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: Domenico Iatauro

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 DPDTA (Sapienza): Prof. Francesco Mancini

Indice

1	SOMMARIO	4
2	INTRODUZIONE	5
3	CAMPAGNA DI MONITORAGGIO E SIMULAZIONE ENERGETICA.....	6
3.1	IL CASO STUDIO: L'AULA MAGNA DELLA SEDE DI VALLE GIULIA DELLA FACOLTÀ DI ARCHITETTURA.....	6
3.1.1	<i>Descrizione dell'edificio e della sua collocazione</i>	6
3.1.2	<i>Analisi dell'edificio allo stato attuale</i>	8
3.1.3	<i>Descrizione dell'Aula Magna e del suo impianto di climatizzazione</i>	10
3.1.4	<i>Il dimensionamento degli impianti di climatizzazione a tutt'aria</i>	13
3.1.5	<i>Considerazioni sul dimensionamento dell'UTA al servizio dell'Aula Magna</i>	15
3.2	SIMULAZIONE ENERGETICA	17
3.2.1	<i>Analisi energetica dello stato di fatto</i>	20
3.2.2	<i>Analisi scenari con variazione della portata</i>	25
3.2.3	<i>Confronto tra gli scenari simulati.....</i>	30
3.3	CAMPAGNA DI MISURA – FUNZIONAMENTO ESTIVO.....	30
3.3.1	<i>Misurazione delle grandezze termo-igrometriche</i>	32
3.3.2	<i>Misurazione delle concentrazioni degli inquinanti.....</i>	33
3.3.3	<i>Calcolo dell'indice IQAI.....</i>	39
3.4	CAMPAGNA DI MISURA – FUNZIONAMENTO INVERNALE	42
3.4.1	<i>Misurazione delle grandezze termo-igrometriche</i>	43
3.4.2	<i>Misurazione delle concentrazioni degli inquinanti.....</i>	44
3.4.3	<i>Calcolo dell'indice IQAI.....</i>	49
3.5	CONSIDERAZIONI DI RIEPILOGO	53
4	CONCLUSIONI.....	55
	APPENDICE: CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO IMPEGNATO NELL'ATTIVITÀ	57

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 delle attività svolta nelle due annualità precedenti, che hanno avuto come obiettivo la valutazione della qualità dell'aria in due diversi casi studio:

- nella prima annualità, il caso studio è stato rappresentato dal palazzo ex Banco Napoli della Camera dei Deputati, ritenuto rappresentativo di un edificio ad elevate prestazioni adibito ad uffici di proprietà della Pubblica Amministrazione;
- nella seconda annualità, il caso studio è stato rappresentato dall'Aula Magna della Facoltà di Architettura Valle Giulia, ritenuto rappresentativo di un edificio ad elevate prestazioni di proprietà della Pubblica Amministrazione adibito ad attività universitaria.

I risultati ottenuti per i due casi 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.

A conclusione di entrambi i lavori, è stata sempre rilevata la necessità di una estensione dei risultati ad altri casi studio e ad altre condizioni di funzionamento. In particolare si è osservato che in entrambe le annualità, in conseguenza dell'inquadramento temporale della ricerca, era stato analizzato solo il funzionamento estivo dell'impianto.

Per questo motivo si è deciso di estendere la campagna di misurazioni già in essere presso l'Aula Magna della Facoltà di Architettura anche al periodo invernale.

Nel leggere il presente report, si tenga presente che è stato sviluppato riformulando e ampliando la parte conclusiva (capitolo 7) del report¹ relativo all'Aula Magna della Facoltà di Architettura, al quale si rimanda e del quale condivide integralmente l'inquadramento (capitolo 3), l'analisi di letteratura (capitolo 5), il protocollo di misura (capitolo 6) e i riferimenti bibliografici.

¹ 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 - Ricerca di Sistema Elettrico – Settembre 2018

3 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.

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

3.1.1 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 3.1).

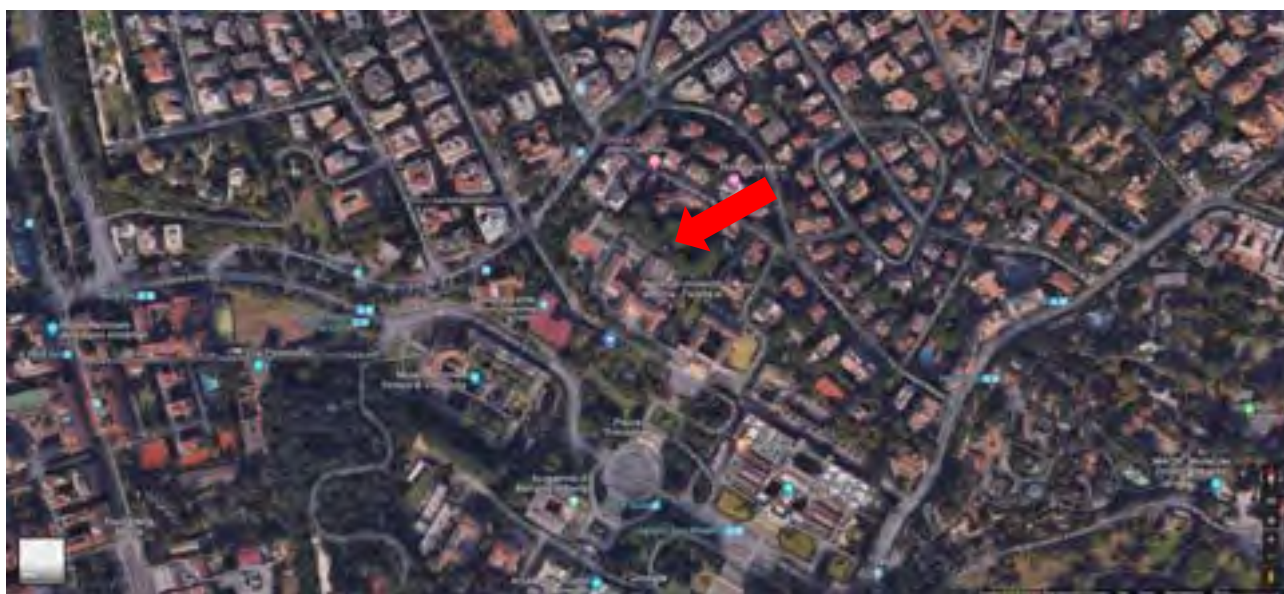


Figura 3.1 – Collocazione dell'edificio (Fonte Google Maps).

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 3.2).

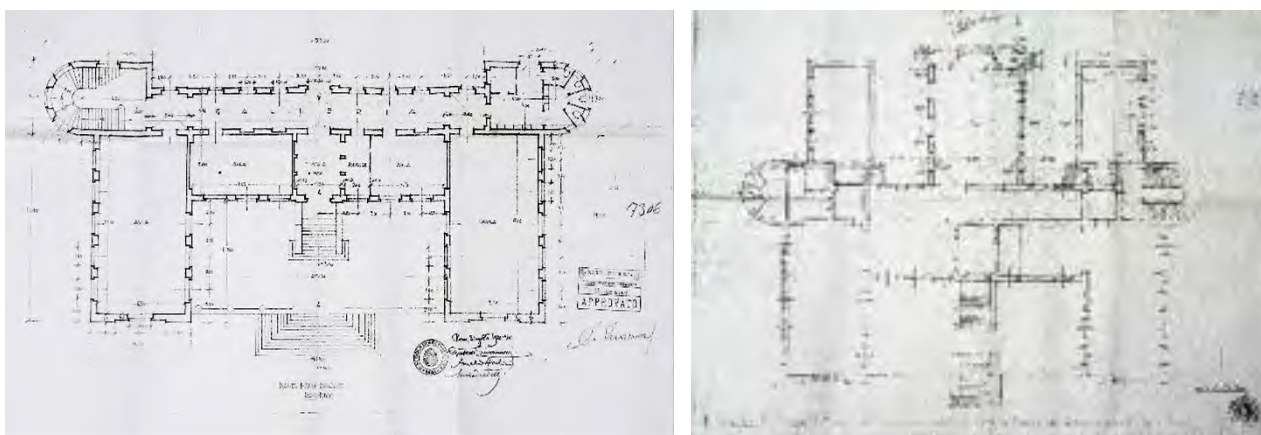


Figura 3.2 – Del Debbio E., 1930. Progetto originario della Facoltà di Architettura di Roma, pianta (a sinistra); Del Debbio E., 1931. Progetto di ampliamento della Facoltà di Architettura di Roma, pianta (a destra).

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, rinchiude 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 3.3, 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 3.3, 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.

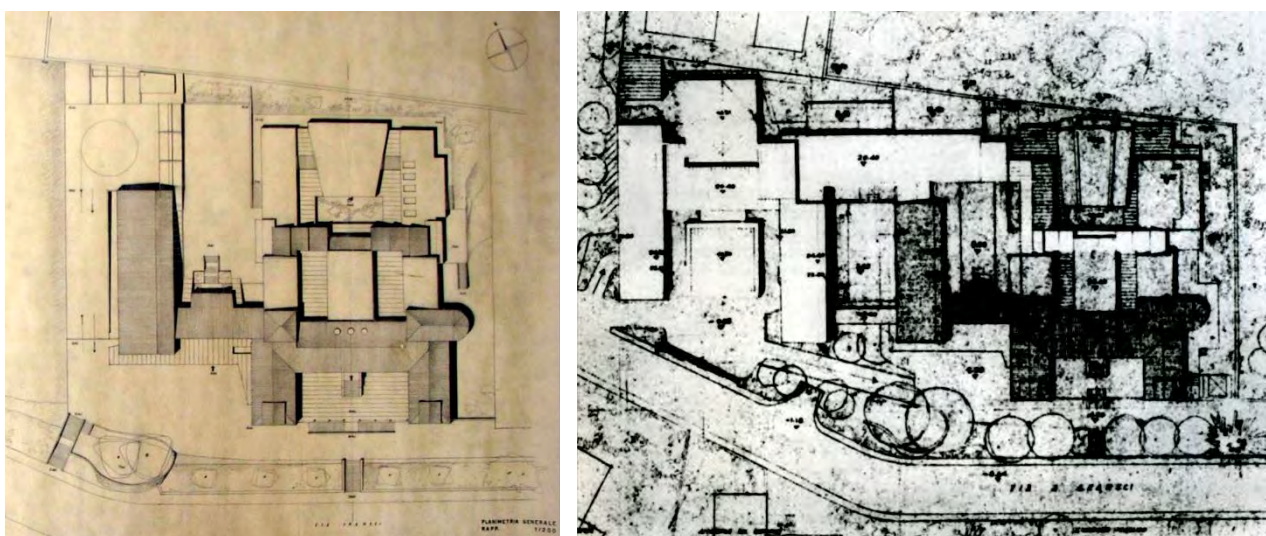


Figura 3.3 – Del Debbio E., 1951. "Ampliamento I" della Facoltà di Architettura di Roma, planivolumetrico (a sinistra); Del Debbio E., 1959. "Ampliamento II" della Facoltà di Architettura di Roma, planivolumetrico (a destra).



Figura 3.4 – Vista dall’alto dell’edificio con indicazione dell’Aula Magna (Fonte Google Maps).



Figura 3.5 – Vista dell’ingresso principale.

3.1.2 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.

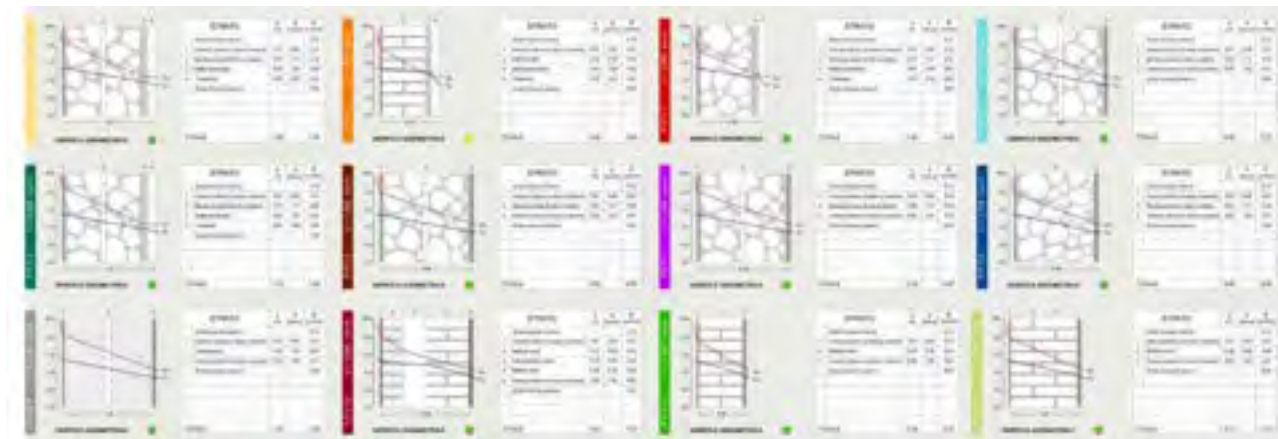


Figura 3.6 – Estratto dell'abaco delle pareti perimetrali.

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.

3.1.3 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 3.7 – 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 3.8 – Vista dal basso dell’Aula Magna.



Figura 3.9 – 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 3.10 – 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 3.11 – 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 3.12 – 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 3.8 e Figura 3.9) ; la ripresa avviene mediante serrande posizionate sui lati corti dell'aula e inglobate negli arredi.

3.1.4 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 3.13, Figura 3.14, Figura 3.15.

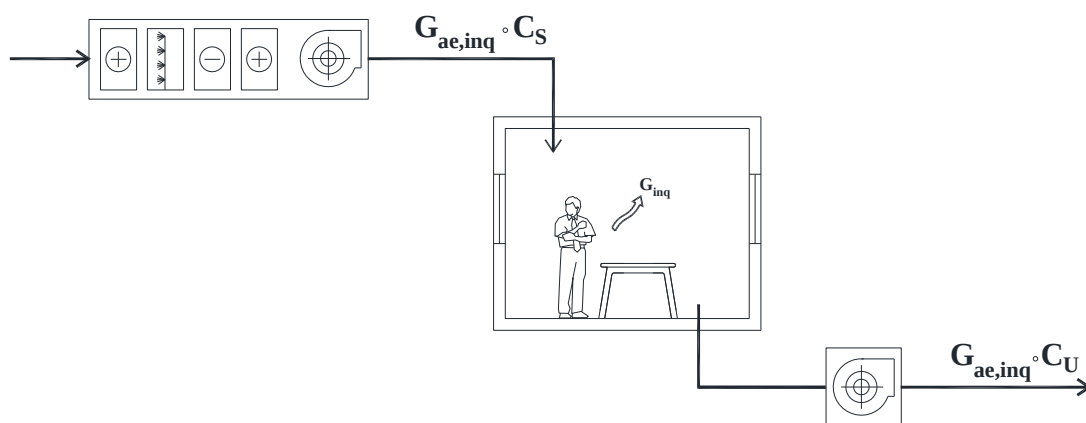


Figura 3.13 - Schematizzazione del bilancio della portata dell'inquinante.

$$G_{ae,inq} \cdot C_s + G_{inq} = G_{ae,inq} \cdot C_u \quad (3.1)$$

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 (3.1) 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.

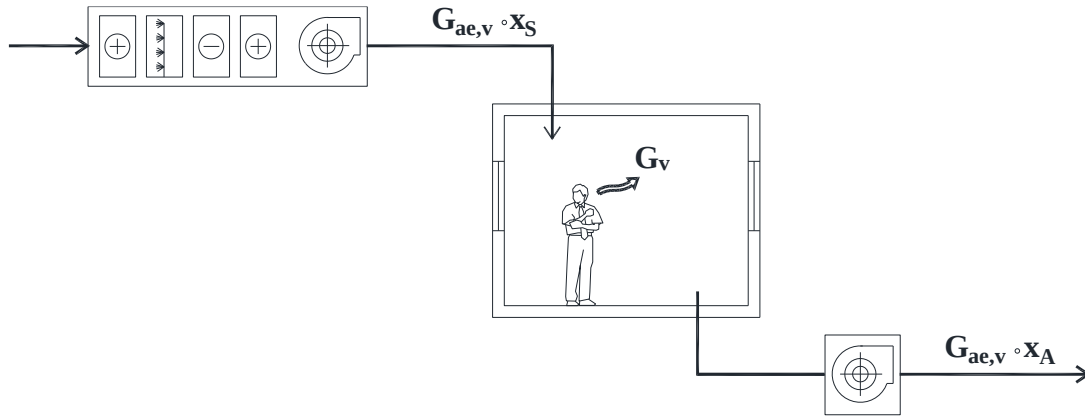


Figura 3.14 - Schematizzazione del bilancio della portata di vapore d'acqua.

$$G_{ae,v} \cdot x_S + G_v = G_{ae,v} \cdot x_A \quad (3.2)$$

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 (3.3) e (3.4).

$$G_{tot,inv} \cdot c_p \cdot T_{S,inv} = G_{tot,inv} \cdot c_p \cdot T_{A,inv} + \Phi_{H,nd} \quad (3.3)$$

$$G_{tot,est} \cdot c_p \cdot T_{S,est} + \Phi_{C,nd} = G_{tot,est} \cdot c_p \cdot T_{A,est} \quad (3.4)$$

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 $G_{tot,est}$).

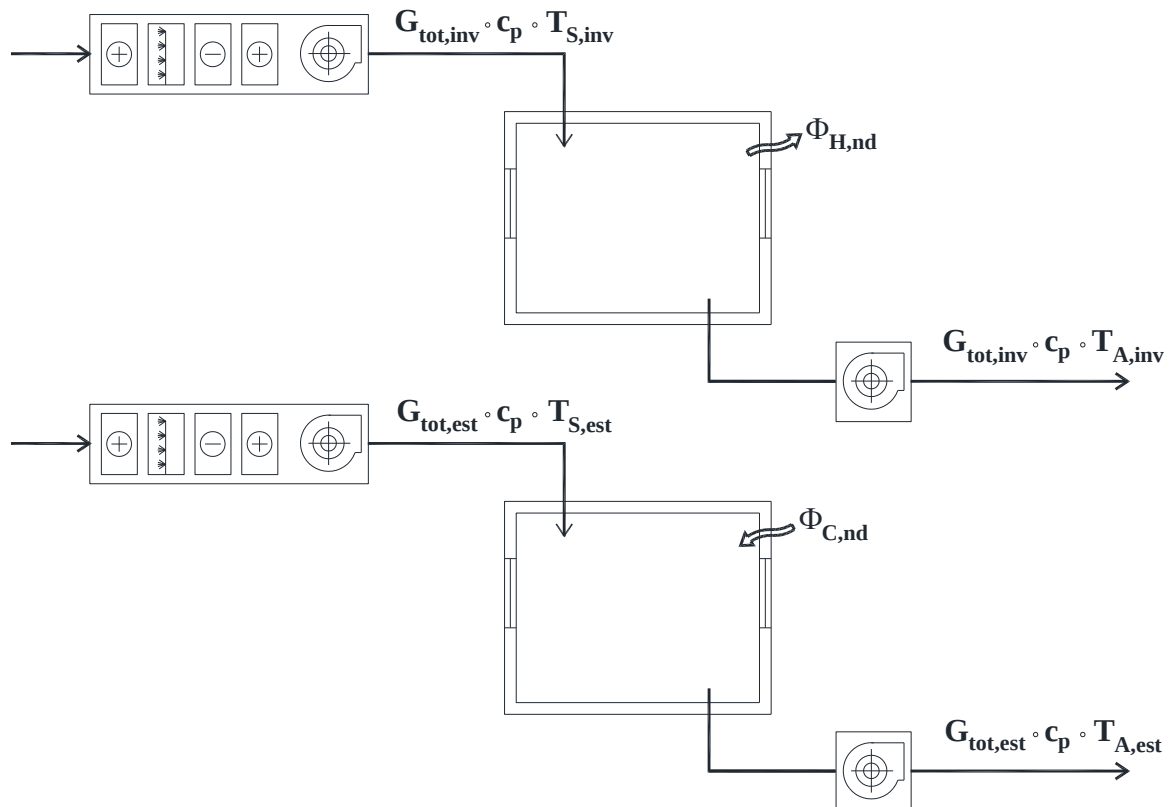


Figura 3.15 - Schematizzazione del bilancio della potenza termica per un impianto a tutt'aria, per la stagione invernale (in alto) ed estiva (in basso).

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.

3.1.5 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 3.1.4, 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 3.16 e in Figura 3.17 sono riportati rispettivamente uno schema delle due unità di trattamento aria e i trattamenti dell'aria sul diagramma psicrometrico.

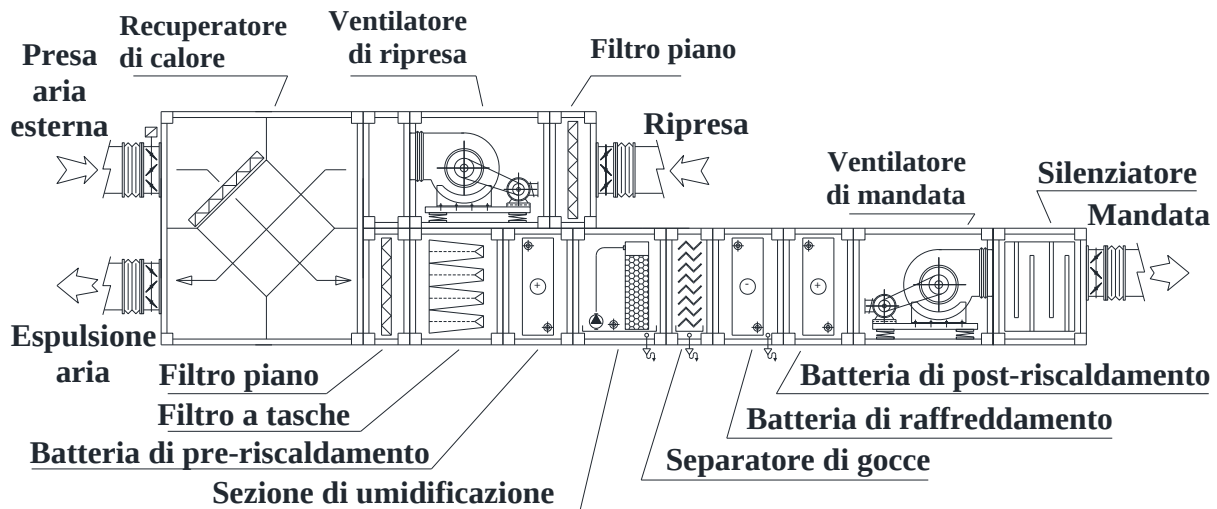


Figura 3.16 – Schema delle unità di trattamento aria.

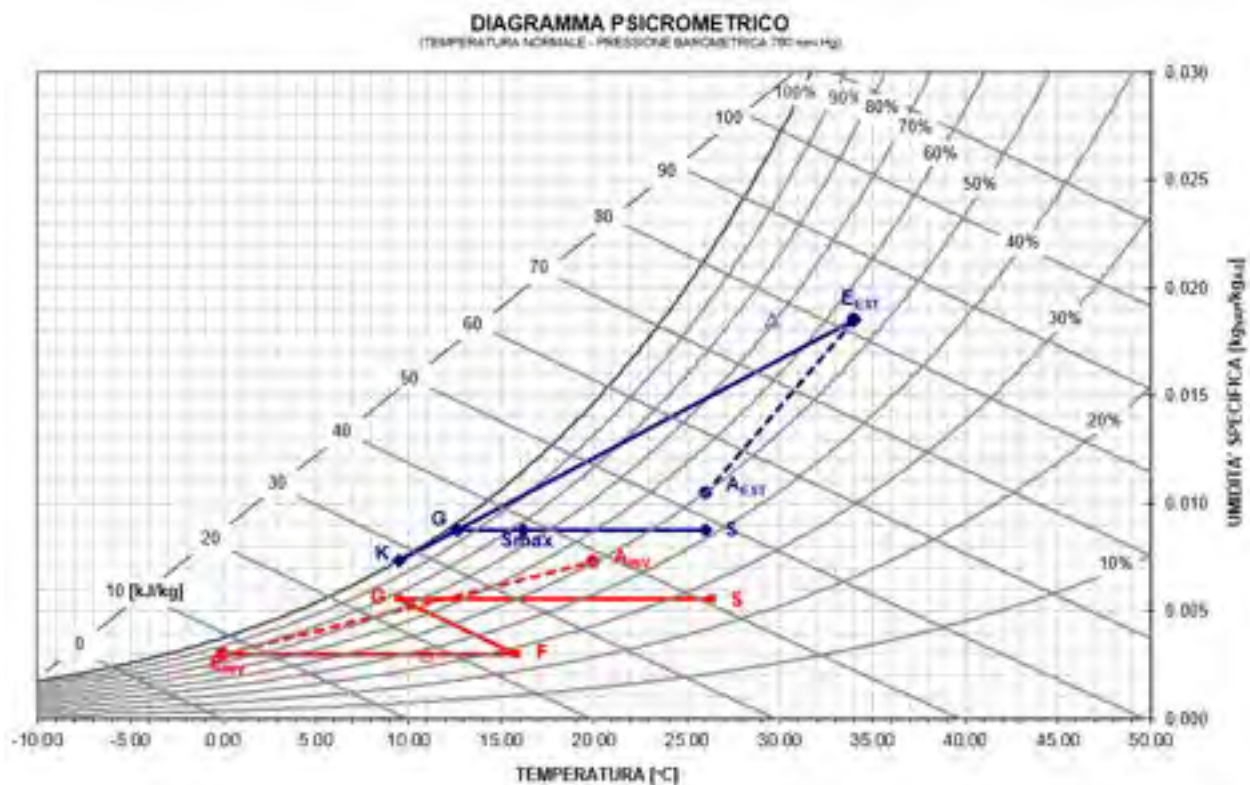


Figura 3.17 – Trattamenti dell'aria umida delle due unità di trattamento aria.

3.2 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'Aiguasol 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'edificio 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 3.18 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.

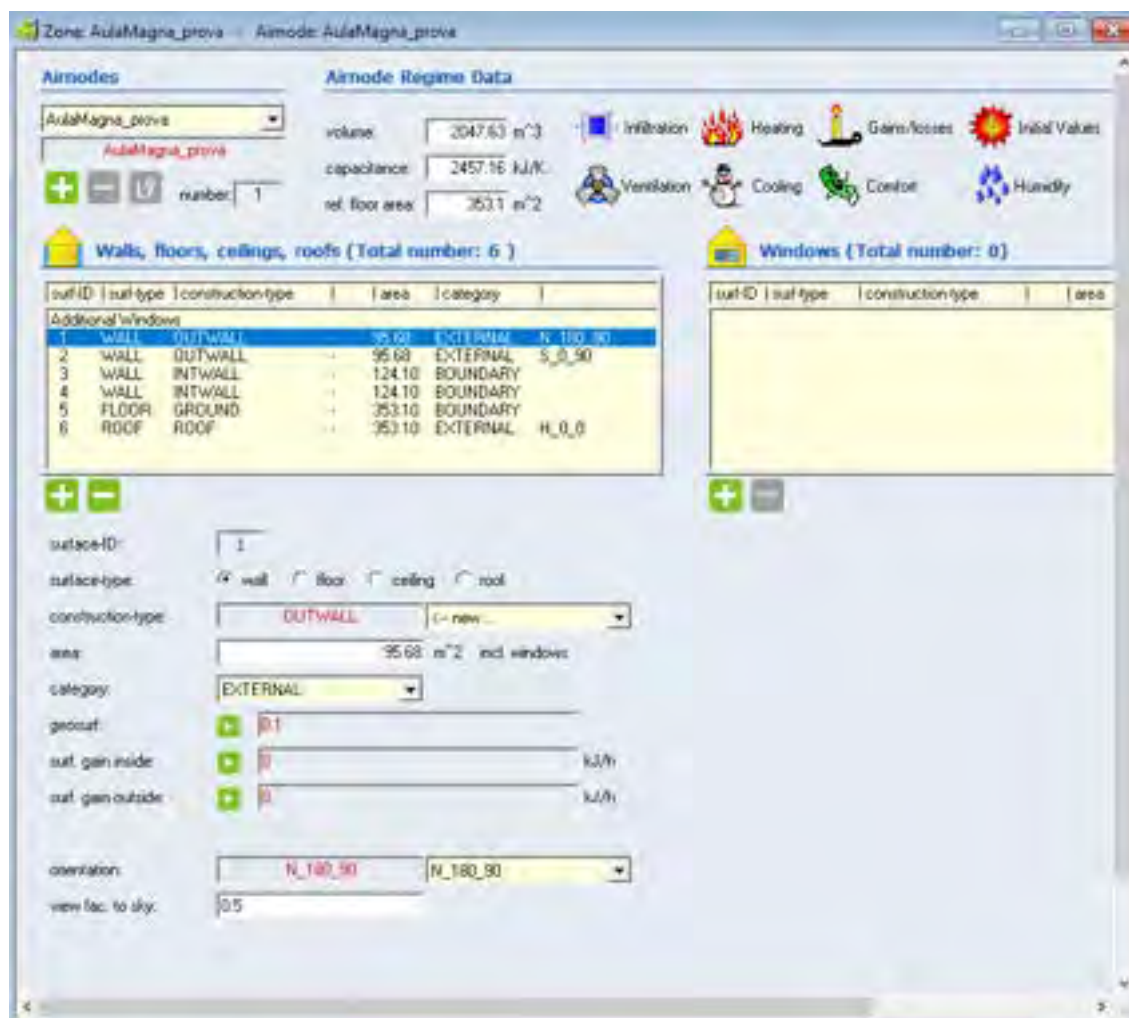


Figura 3.18 – Interfaccia TRNSYS per la definizione dei parametri di zona.

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 3.34 delle immagini 3D del modello dell'Aula Magna.

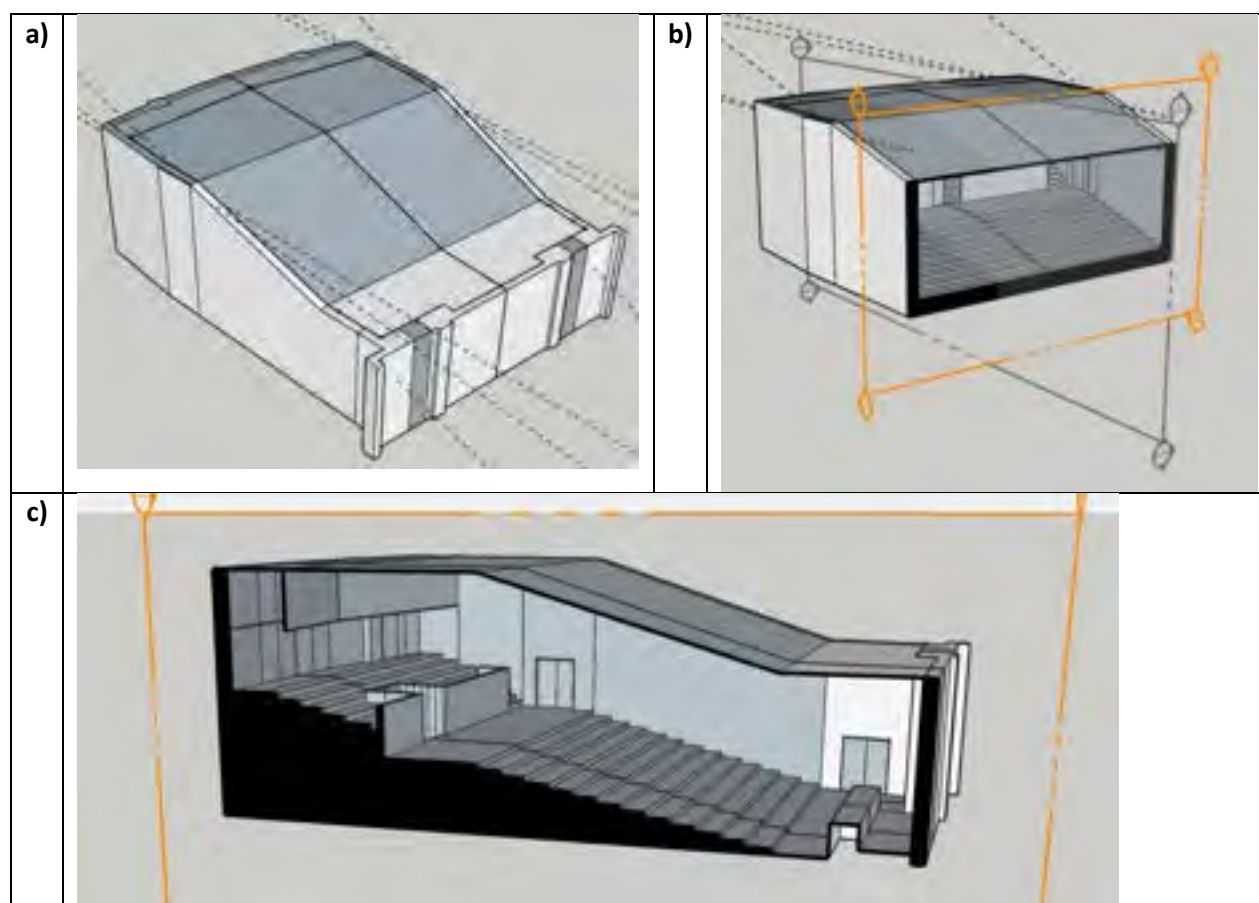


Figura 3.19 –3D dell'Aula Magna a) dall'esterno, b) sezione trasversale c) sezione longitudinale.

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 (3.5) e (3.6).

$$COP = f_{COP} \cdot \frac{1}{1 - \frac{T_i}{T_s}} \quad (3.5)$$

$$EER = f_{EER} \cdot \frac{1}{\frac{T_s}{T_i} - 1} \quad (3.6)$$

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 raffrescamento;
- T_s rappresenta la temperatura superiore all'interno del ciclo che corrisponde alla temperatura all'evaporatore ($T_{evap,cool}$) in fase di raffrescamento 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 raffrescamento 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 3.1 – 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

3.2.1 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 3.20). In Figura 3.21 invece sono visibili quelle di accensione dell'impianto di climatizzazione.

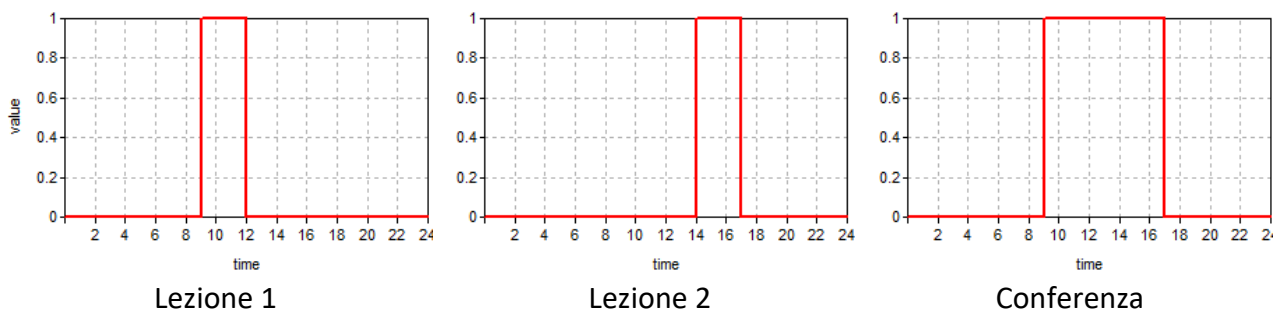


Figura 3.20 Schedule di presenza e di accensione dell'impianto di illuminazione.

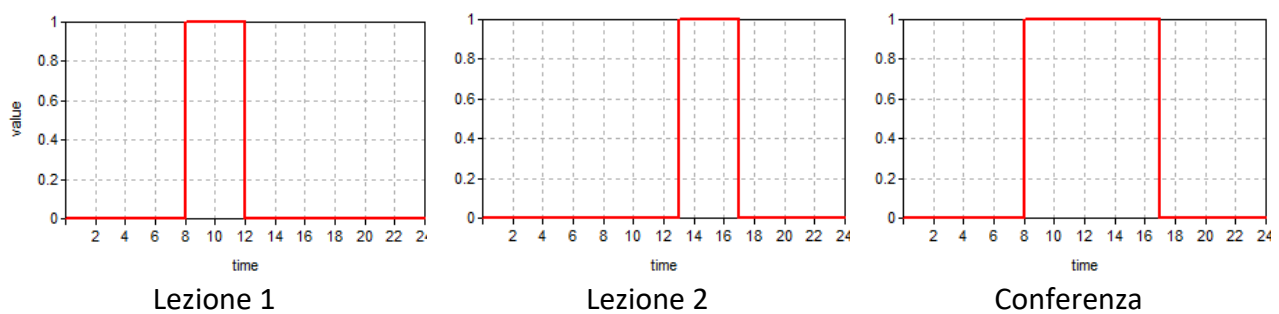


Figura 3.21 Schedule di accensione dell'impianto di climatizzazione

La Figura 3.22 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).

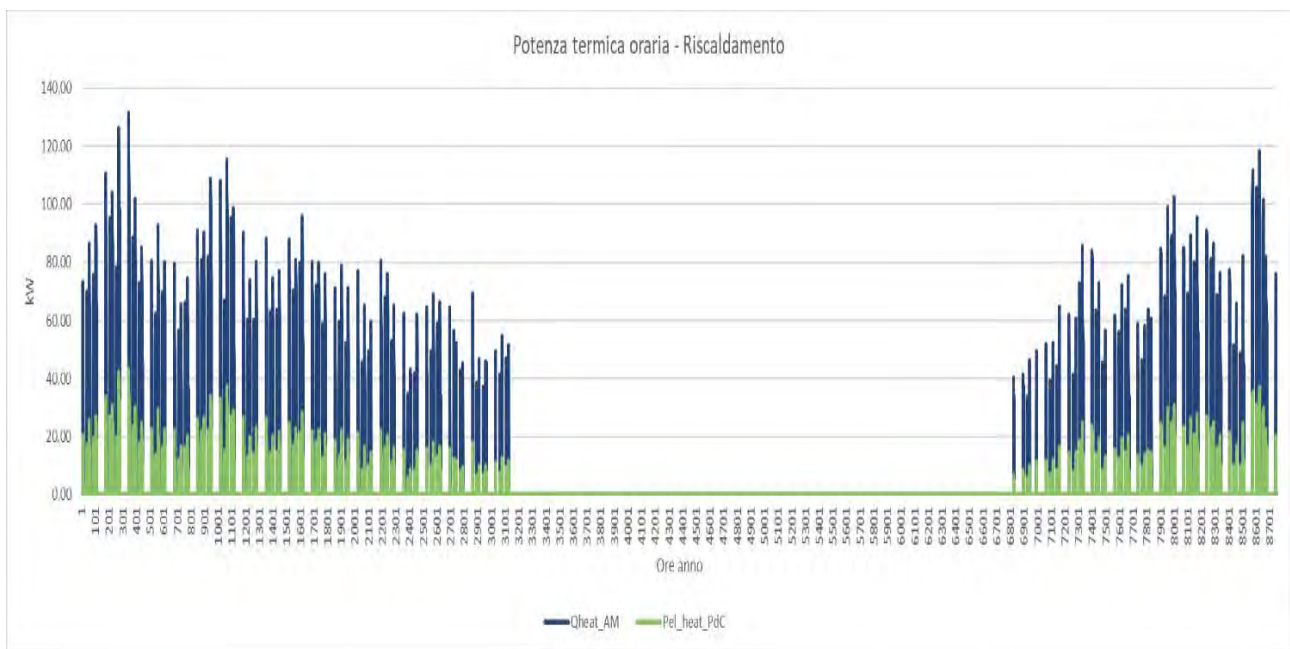


Figura 3.22 – Potenza termica ed elettrica per riscaldamento.

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 3.23 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.

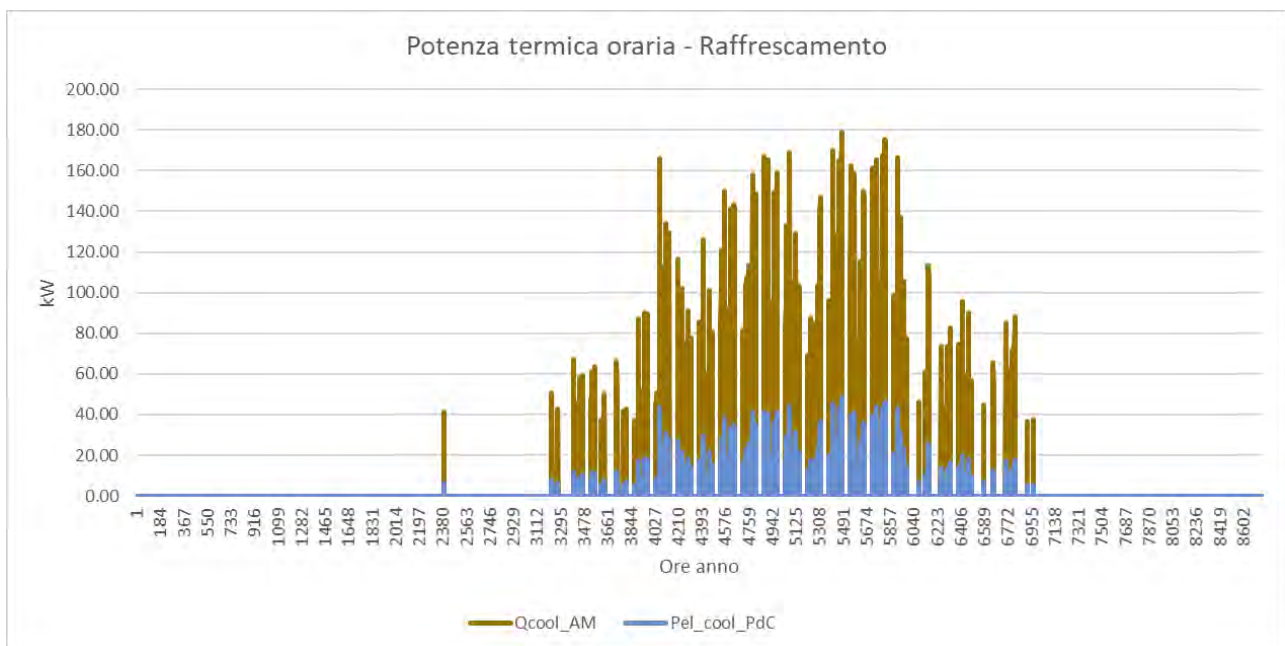


Figura 3.23 – Potenza termica ed elettrica per raffrescamento.

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 3.24 si può vedere l'andamento della temperatura dell'aria interna all'Aula Magna.

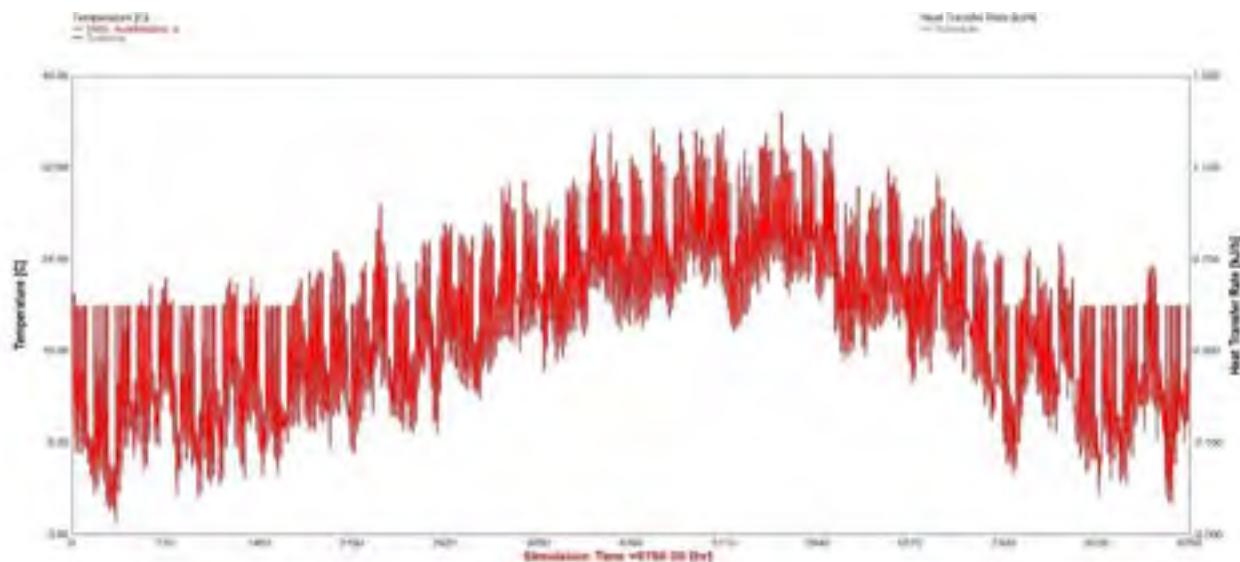


Figura 3.24 – Temperatura aria interna Aula Magna

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 3.25 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.

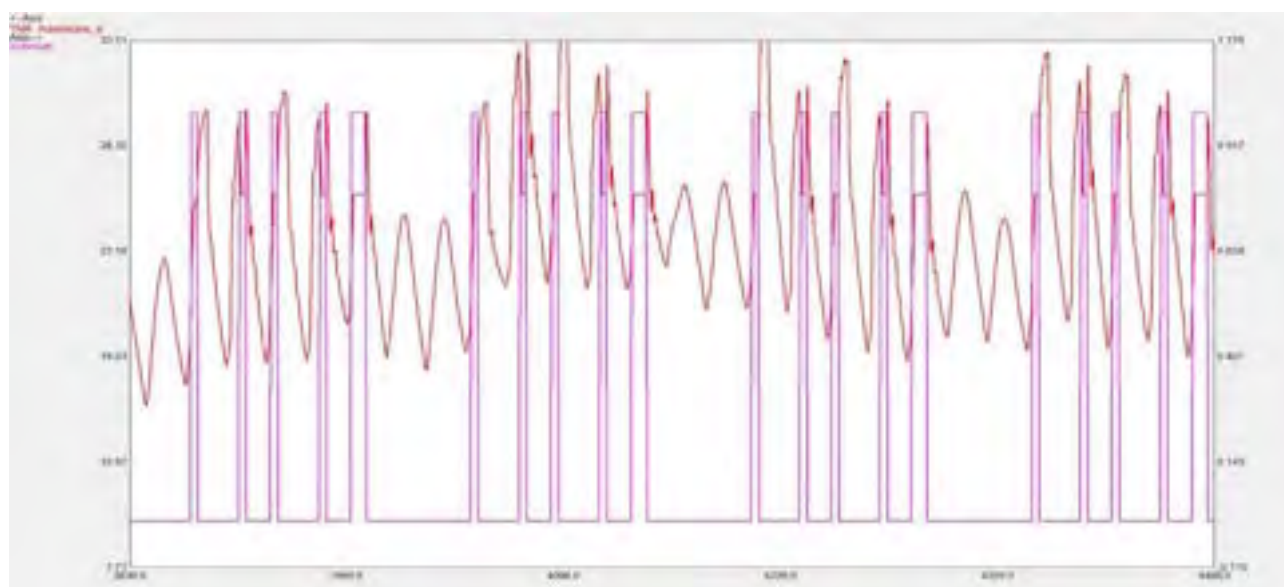


Figura 3.25 – Figura 8. Temperatura aria interna Aula Magna vs Schedule presenze Aula Magna

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 3.26.

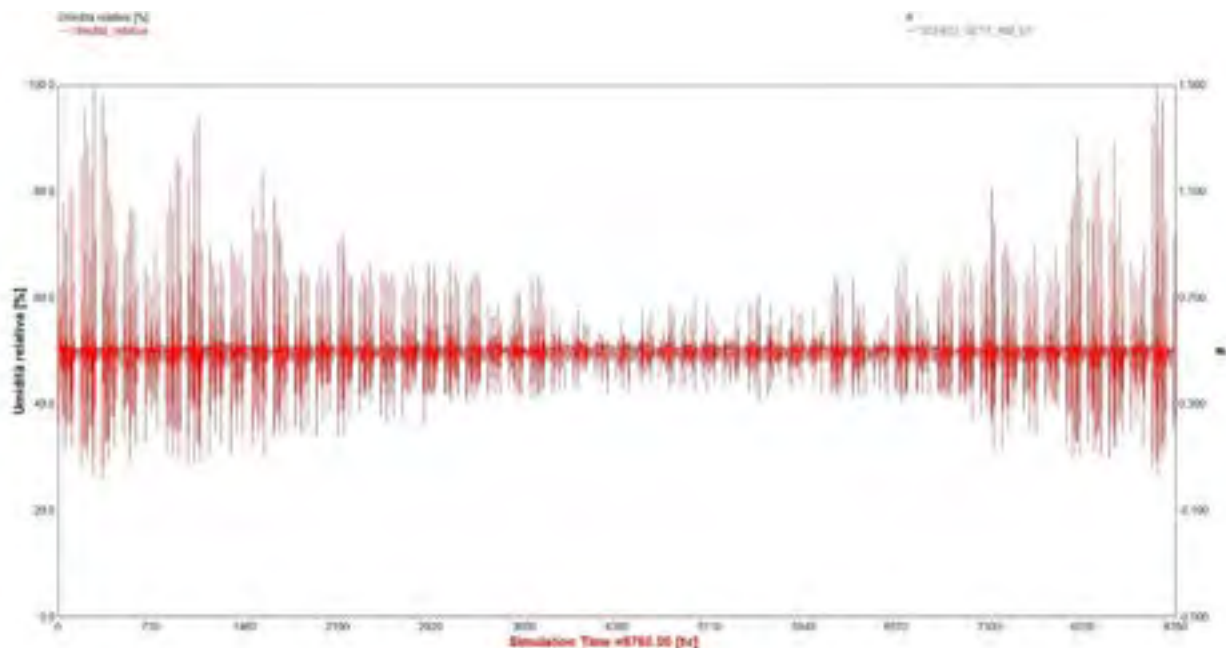


Figura 3.26 – Umidità relativa aria interna Aula Magna espressa in %.

In Figura 3.27, 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%.

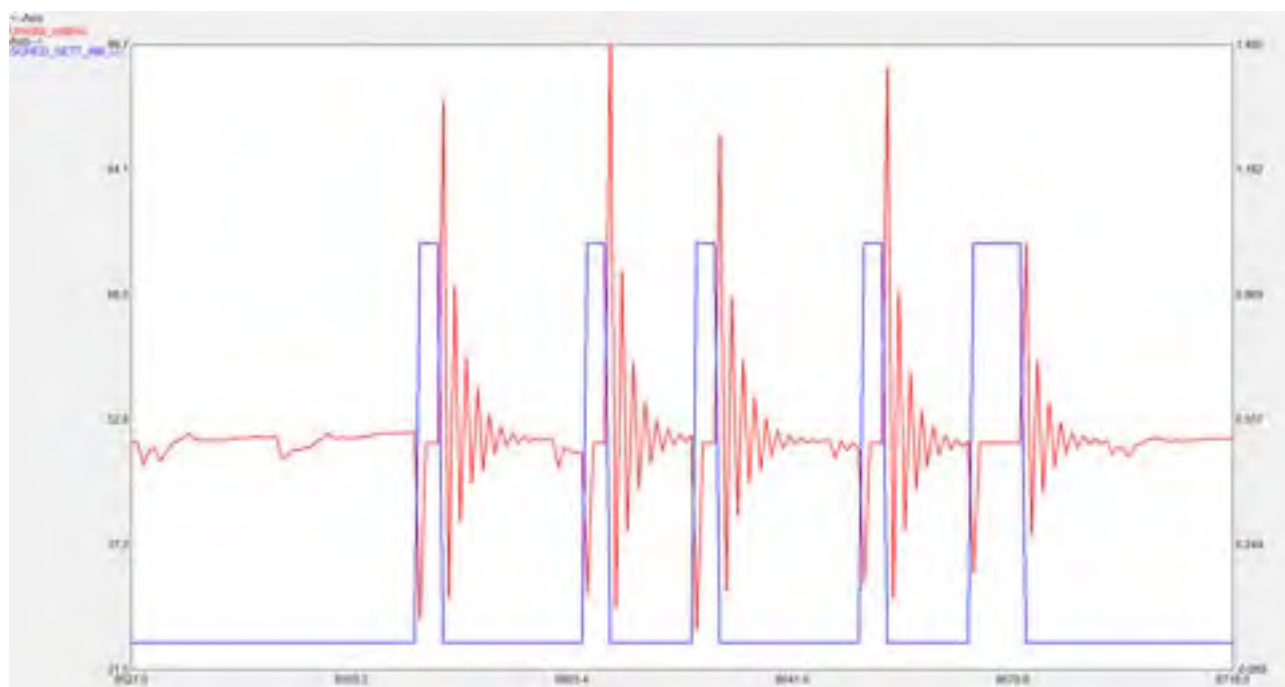


Figura 3.27 – Umidità relative aria interna Aula Magna espressa in % vs Schedule presenze Aula Magna

3.2.2 Analisi scenari con variazione della portata

In Figura 3.28 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.

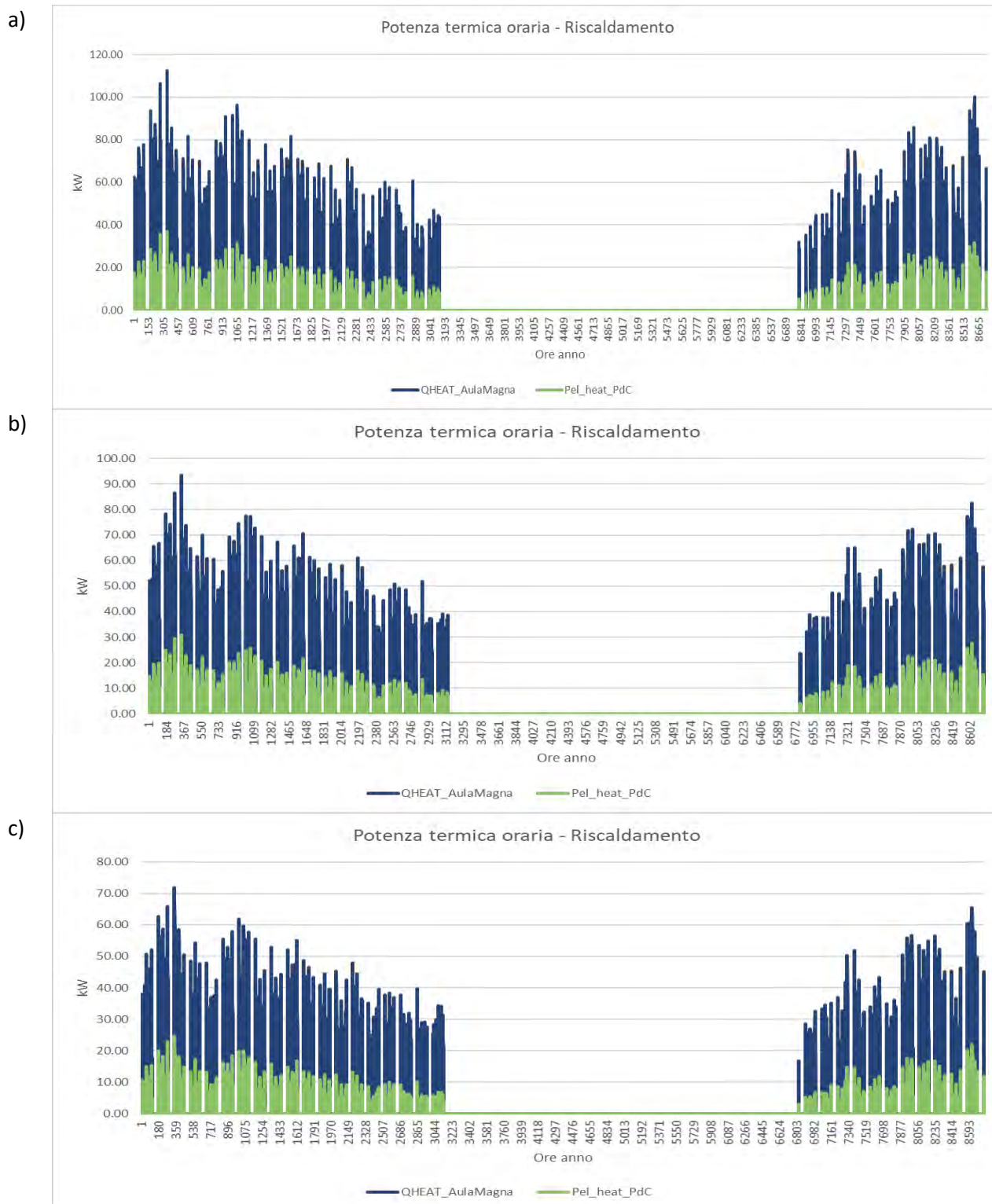


Figura 3.28 – Energia termica e elettrica per la climatizzazione invernale al variare della portata d'aria rispetto al valore nominale - a) 85%; b) 70% e c) 50%.

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 3.2.

Tabella 3.2 – 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 3.29 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 3.3.

Tabella 3.3 – 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).

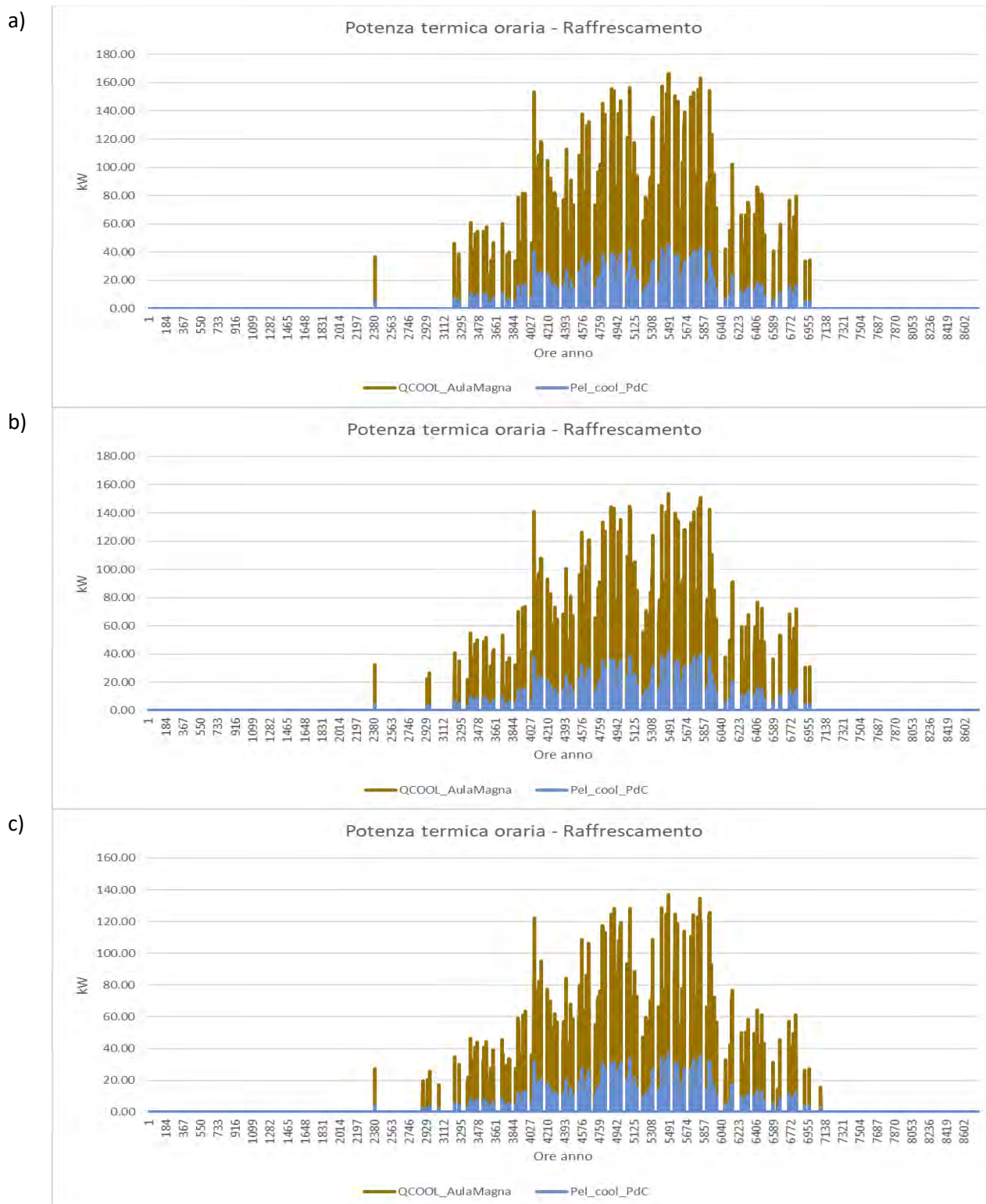


Figura 3.29 – Energia termica e elettrica per la climatizzazione estiva al variare della portata d'aria rispetto al valore nominale - a) 85%; b) 70% e c) 50%.

In Figura 3.30 e in Figura 3.31 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.

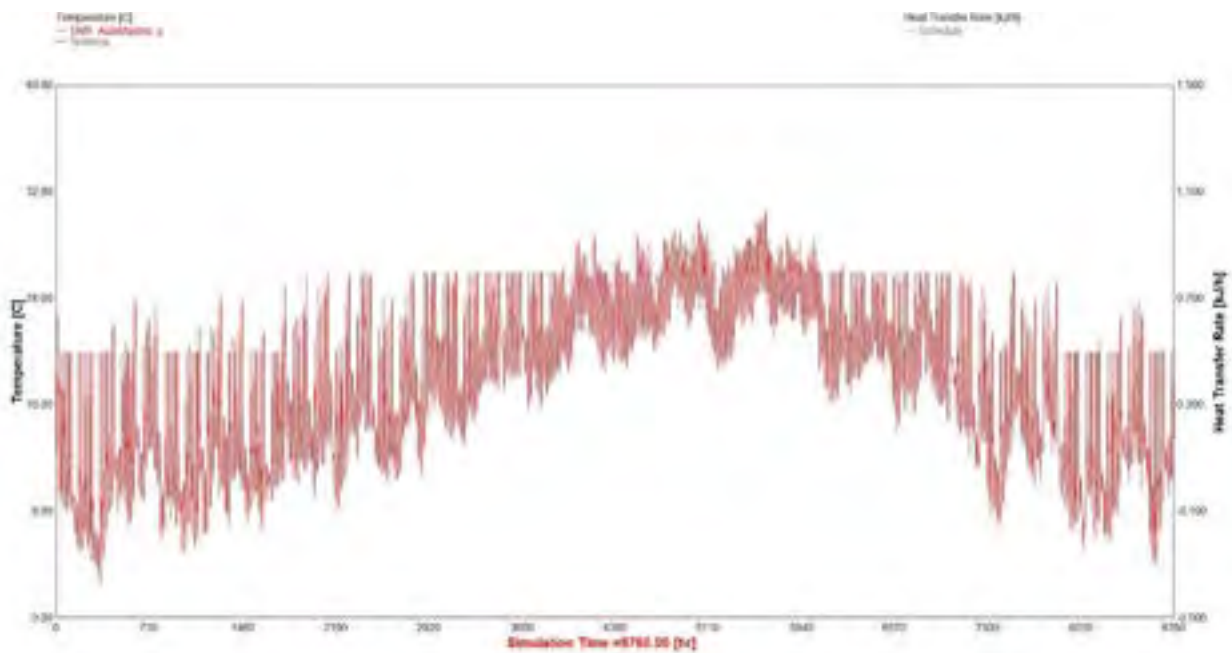


Figura 3.30 – Temperatura aria interna Aula Magna con portata dell'UTA ridotta al 50%.

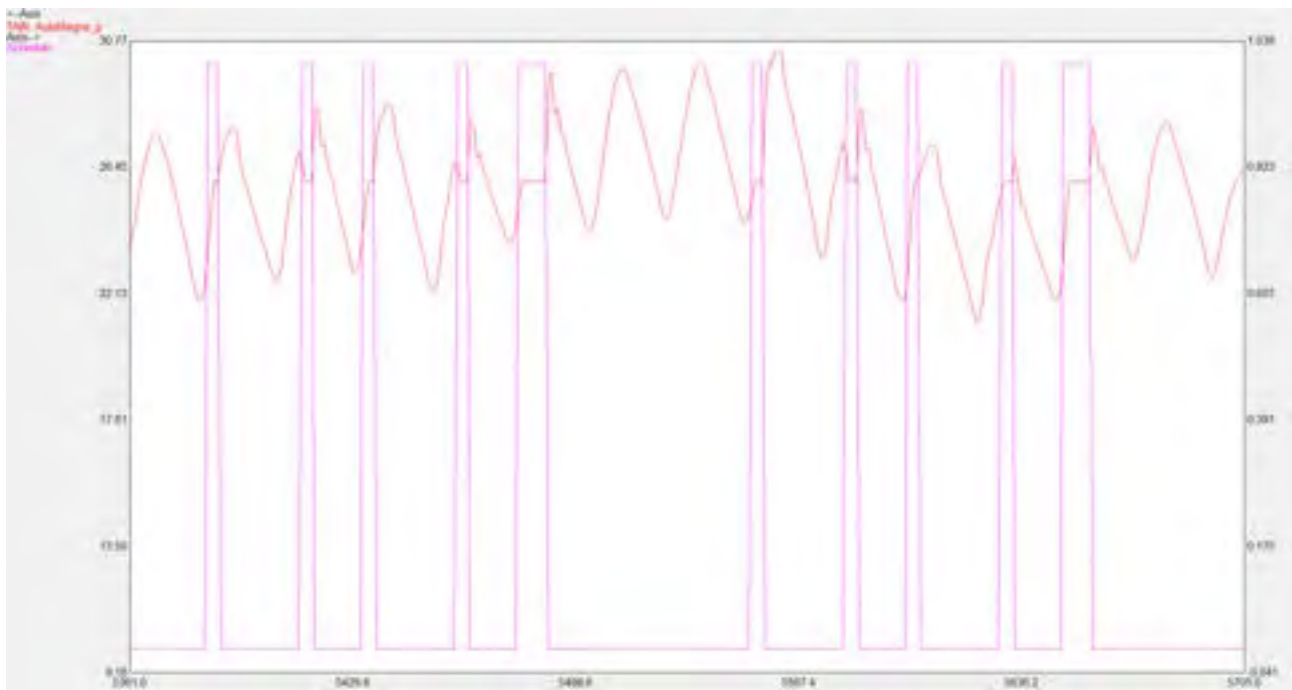


Figura 3.31 – Temperatura aria interna Aula Magna vs Schedule presenze Aula Magna con portata aria dell'UTA ridotta al 50%.

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

In Figura 3.32 e in Figura 3.33 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.

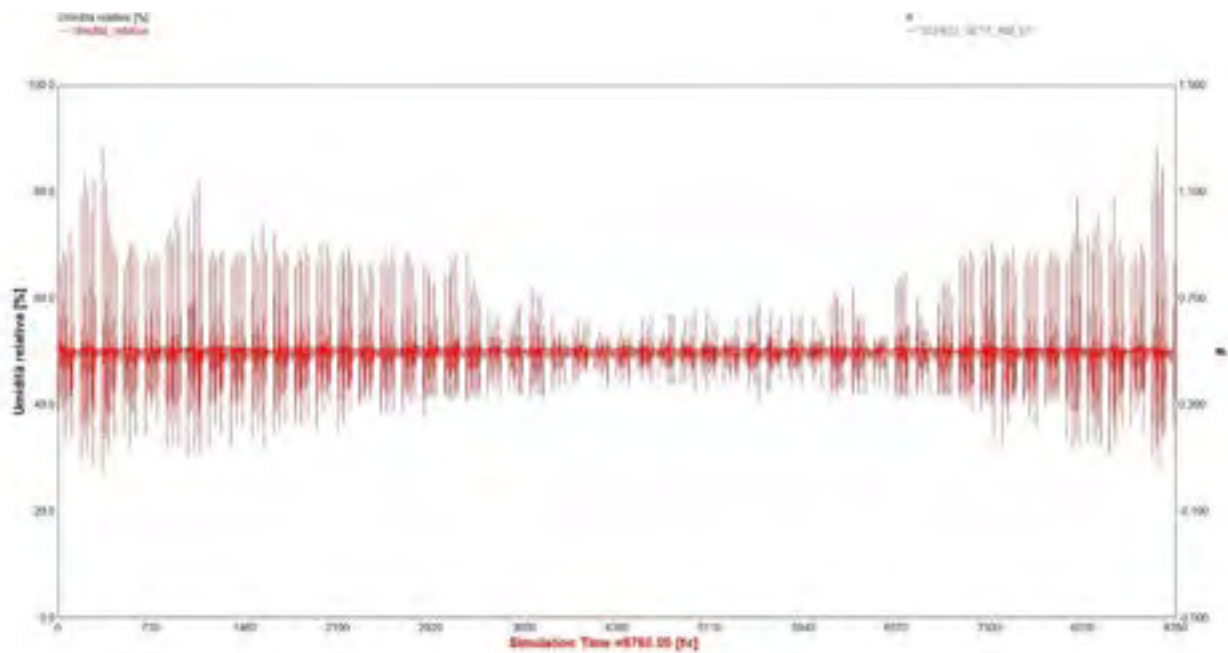


Figura 3.32 – Umidità relative aria interna Aula Magna espressa in % con portata d'aria ridotta al 50%.

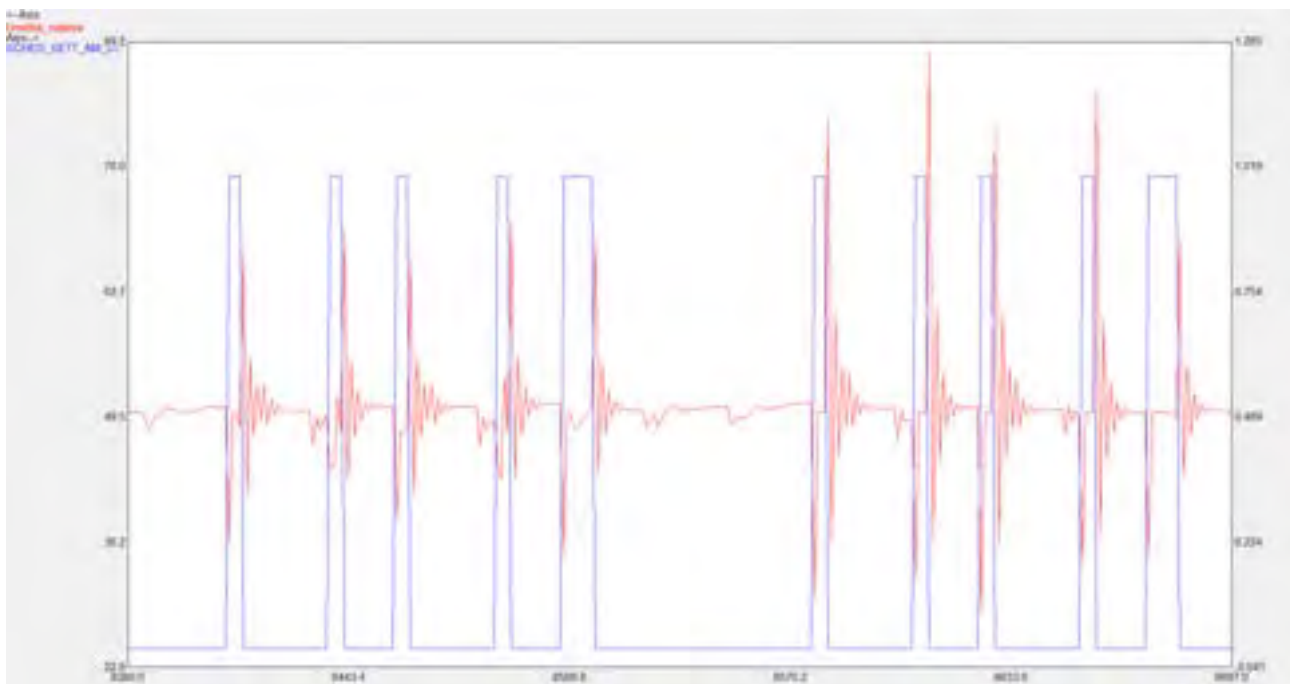


Figura 3.33 – Umidità relative aria interna Aula Magna espressa in % vs Schedule presenze Aula Magna con portata UTA ridotta al 50%

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

3.2.3 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, amcorchè funzionante a portata ridotta può ancora mantenere il comfort ambientale.

In Tabella 3.4 sono riportati i consumi elettrici annuali al variare della portata d'aria nell'UTA.

Tabella 3.4 – 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%.

3.3 Campagna di misura – funzionamento estivo

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

Tabella 3.5 – 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 stete 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 della giornate di misura si è avuta la piena occupazione dell'Aula, che ha una capienza di 400 posti.



Figura 3.34 – Viste dell'Aula Magna.

Il protocollo di misura di qualità dell'aria ha previsto rilevazioni e campionamenti delle variabili termigrometriche 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.

3.3.1 Misurazione delle grandezze termo-igrometriche

I risultati delle misure effettuate sono riportati in Tabella 3.6, in Figura 3.35 per la condizione ex-ante (portata nominale) e in Figura 3.36 per la condizione ex-post (portata dimezzata).

Tabella 3.6 – 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-post)	
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

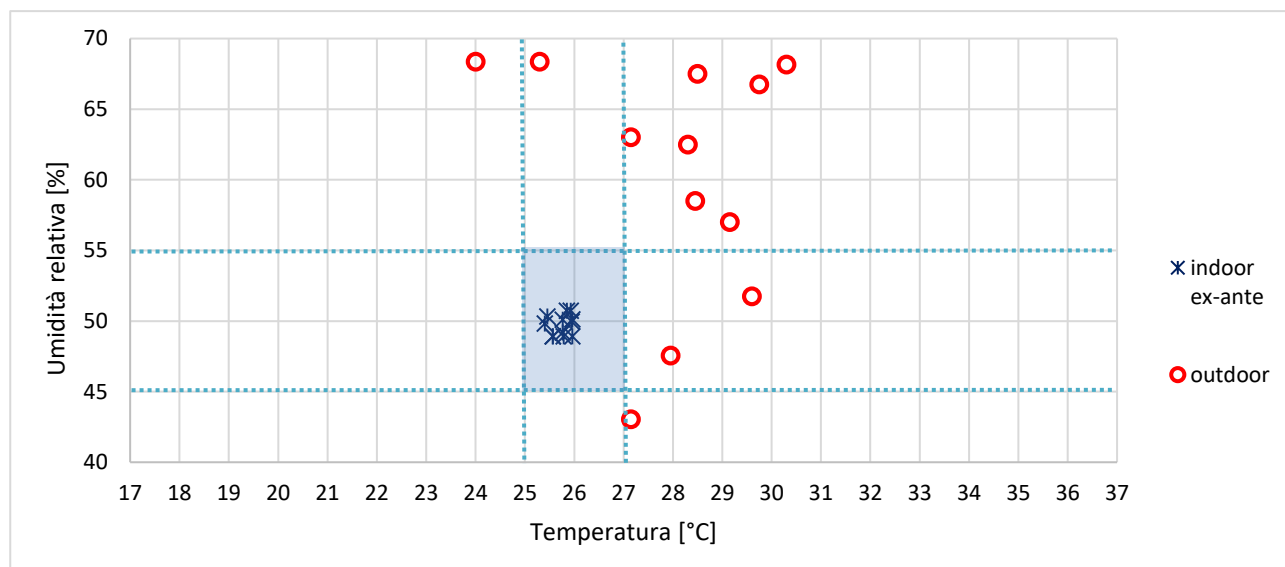


Figura 3.35 – Grandezze termoigrometriche (ex-ante).

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 = $26^{\circ}\text{C} \pm 1$; umidità relativa = $50\% \pm 5$).

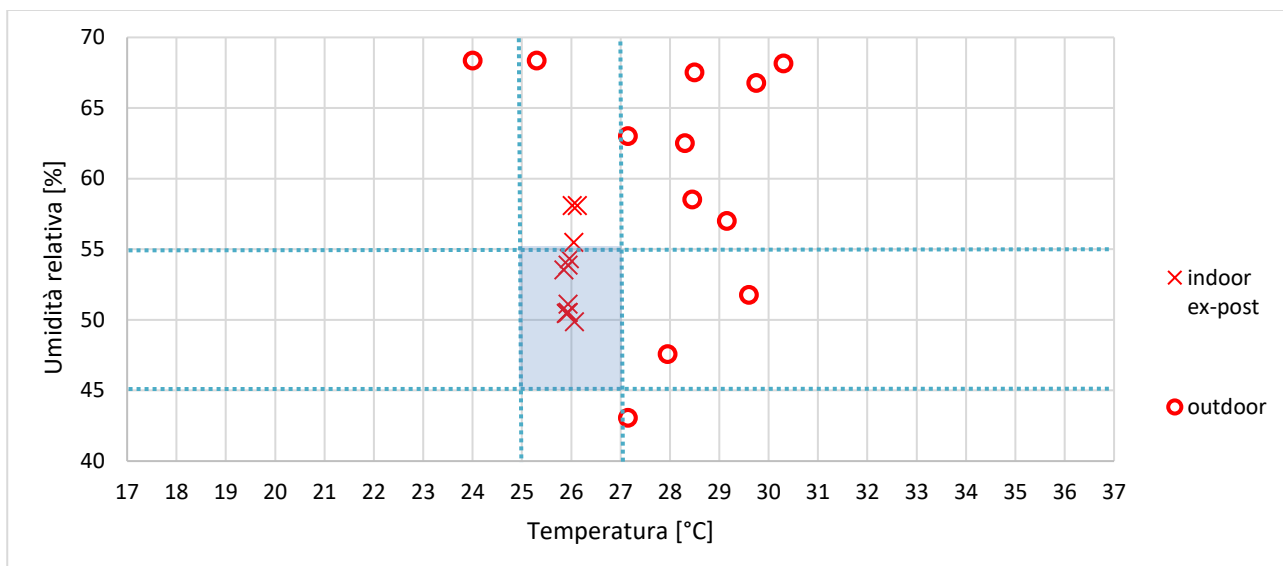


Figura 3.36 – Grandezze termoigrometriche (ex-post).

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 = $26^{\circ}\text{C} \pm 1$; umidità relativa = $50\% \pm 5$).

In particolare, si osserva come al diminuire della portata non si manifesti nessun problema nel controllo della temperatura, mentre insorgono 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 $14.000 \text{ m}^3/\text{h}$ a $7.000 \text{ m}^3/\text{h}$, l'impianto rimane in grado di garantire l'equilibrio di progetto della potenza termica vapore descritto dall'equazione (3.4), 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 $14.000 \text{ m}^3/\text{h}$ a $7.000 \text{ m}^3/\text{h}$, l'impianto non è risultato sempre in grado di garantire l'equilibrio di progetto della portata di vapore descritto dall'equazione (3.2); 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.

3.3.2 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, PM_{10} , VOC, ozono).

I risultati delle misure effettuate sono riportati in Tabella 3.7.

Tabella 3.7 – 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 dello 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 (verde, gialla, arancione, rossa) corrispondente agli intervalli di concentrazione degli inquinanti (buono, moderato, scadente, pessimo) utilizzati per la definizione dell'IQAI.

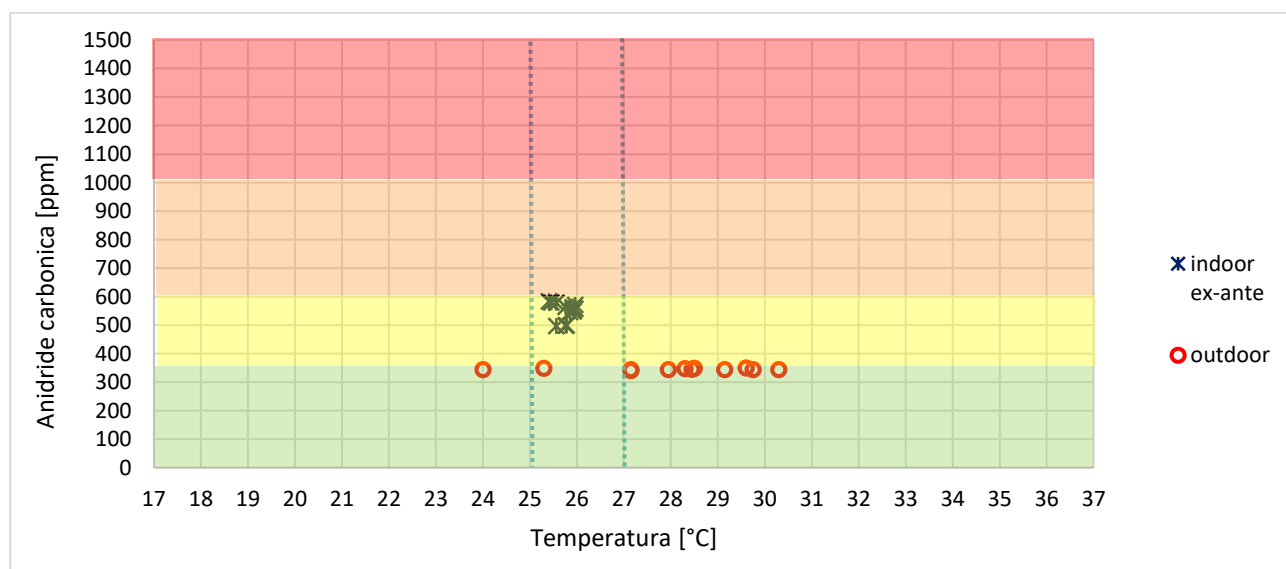


Figura 3.37 – Anidride carbonica (ex-ante).

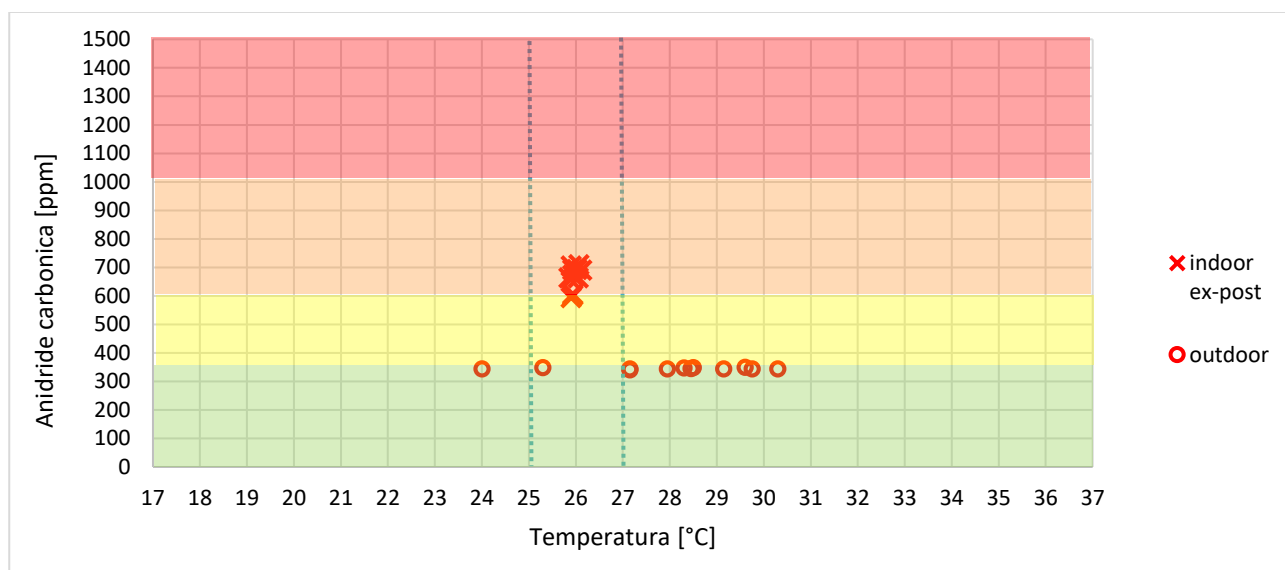


Figura 3.38 – Anidride carbonica (ex-post).

L'osservazione congiunta di Figura 3.37 e Figura 3.38 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 3.39 e Figura 3.40 riportano la classificazione per livelli così come riportata in nella UNI EN 15251².

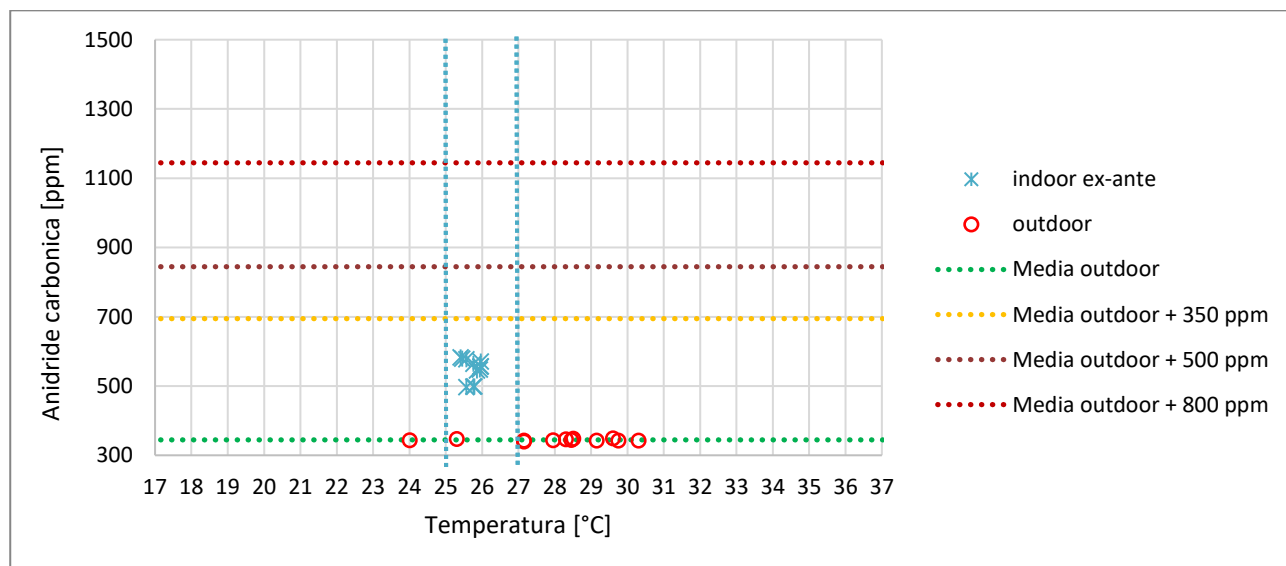


Figura 3.39 – Anidride carbonica (ex-ante).

² UNI EN 15251 Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics; 2007.

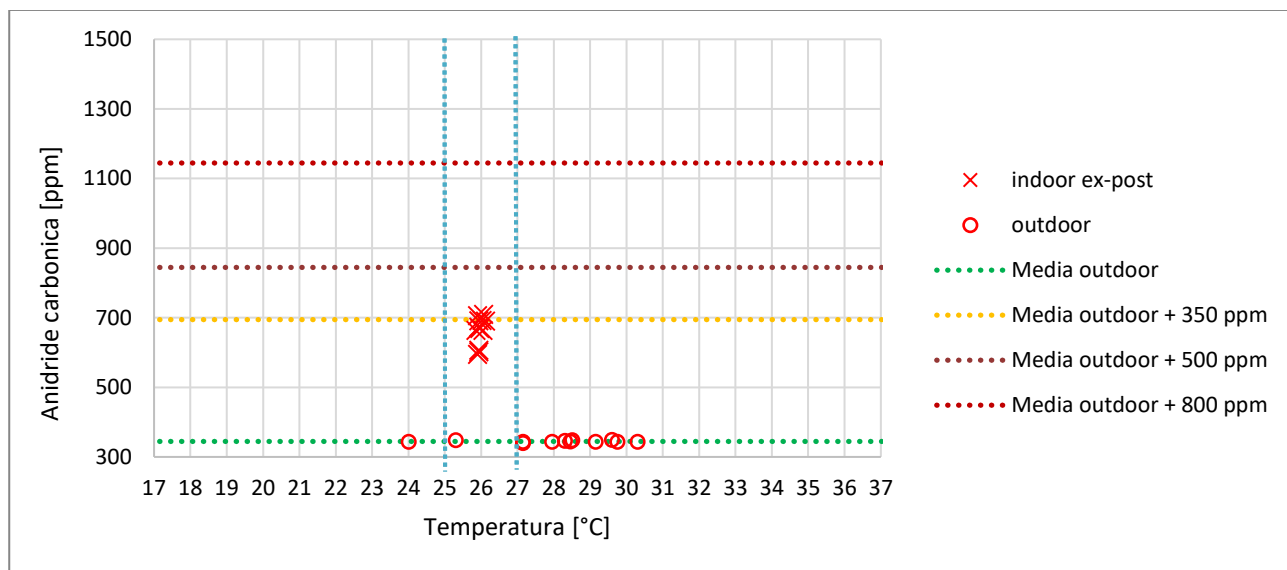


Figura 3.40 – Anidride carbonica (ex-post).

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”.

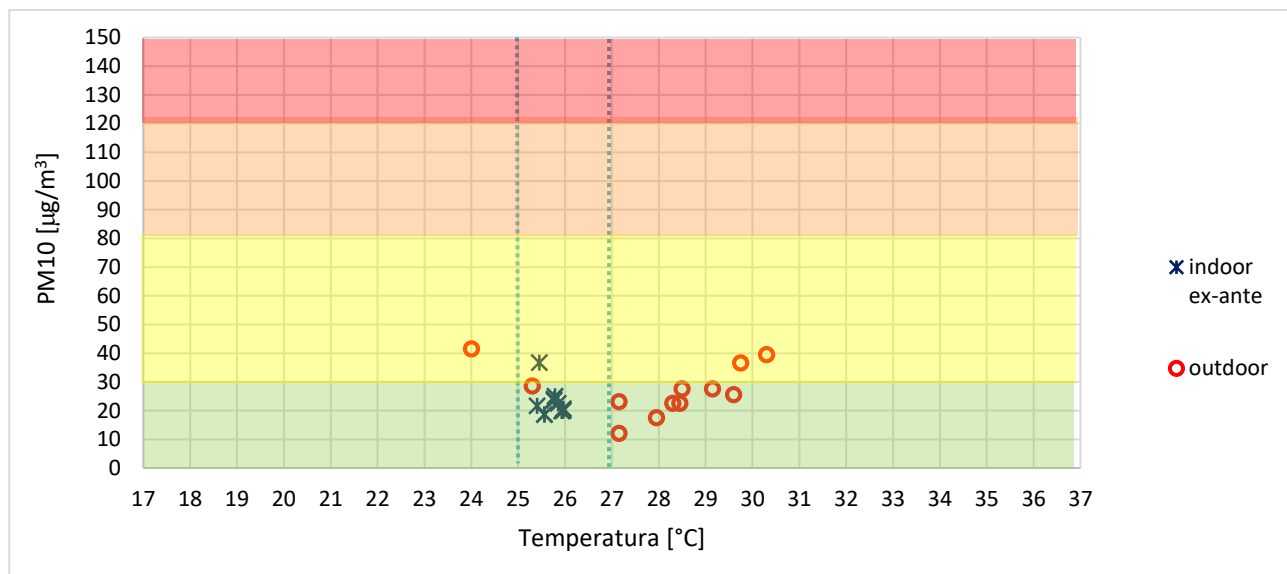


Figura 3.41 – PM10 (ex-ante).

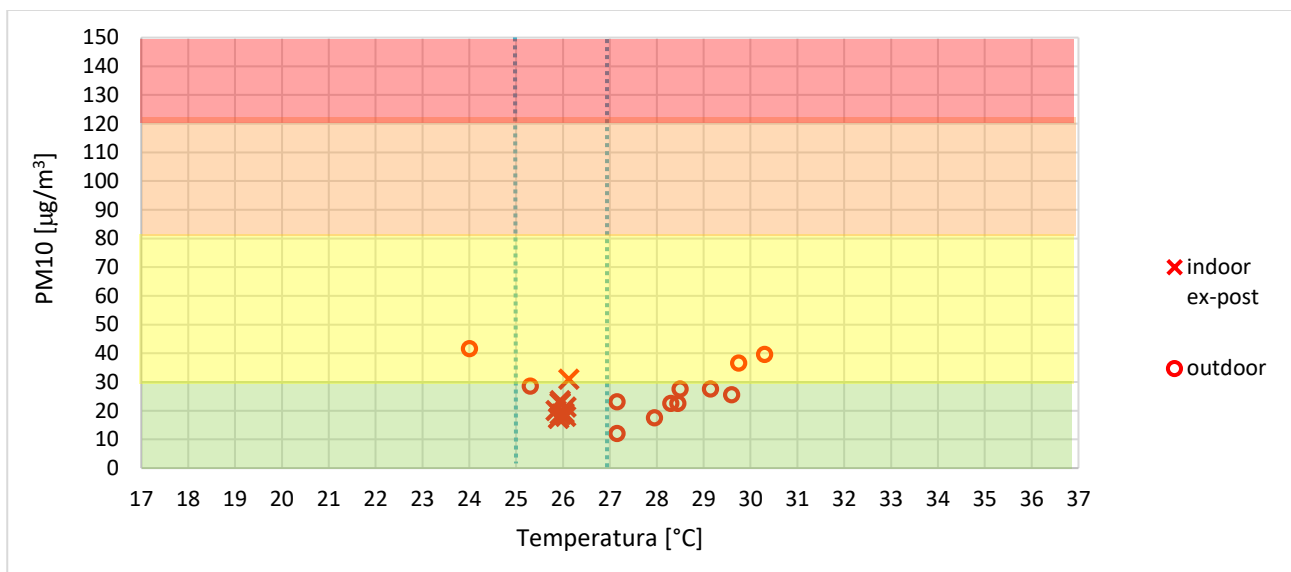


Figura 3.42 – PM10 (ex-post).

L'osservazione congiunta di Figura 3.41 e Figura 3.42 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 $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con un miglioramento che non incide in modo significativo sul livello dell'indice relativo al PM10, che rimane in entrambe le situazioni al valore "buono".

In termini relativi, prendendo come riferimento l'aria esterna, caratterizzata da una concentrazione di PM10 mediamente più alta ($27 \mu\text{g}/\text{m}^3$), la diminuzione dovuta all'azione dei filtri risulta leggermente più alta nella situazione ex-post, conseguenza diretta della diminuzione della portata.

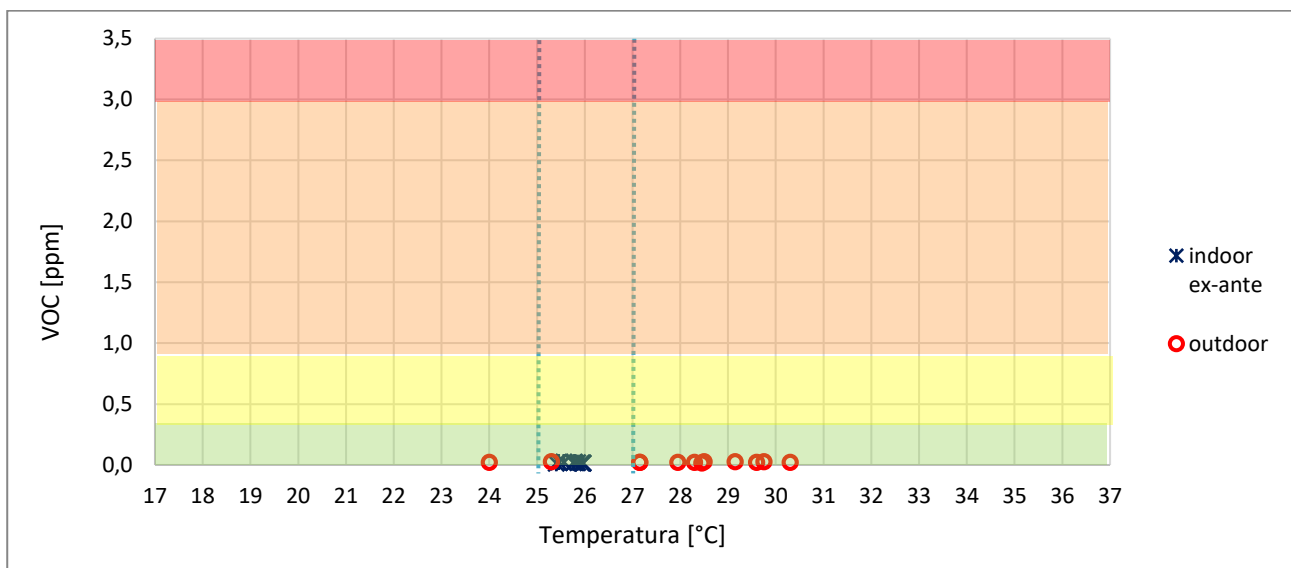


Figura 3.43 – VOC (ex-ante).

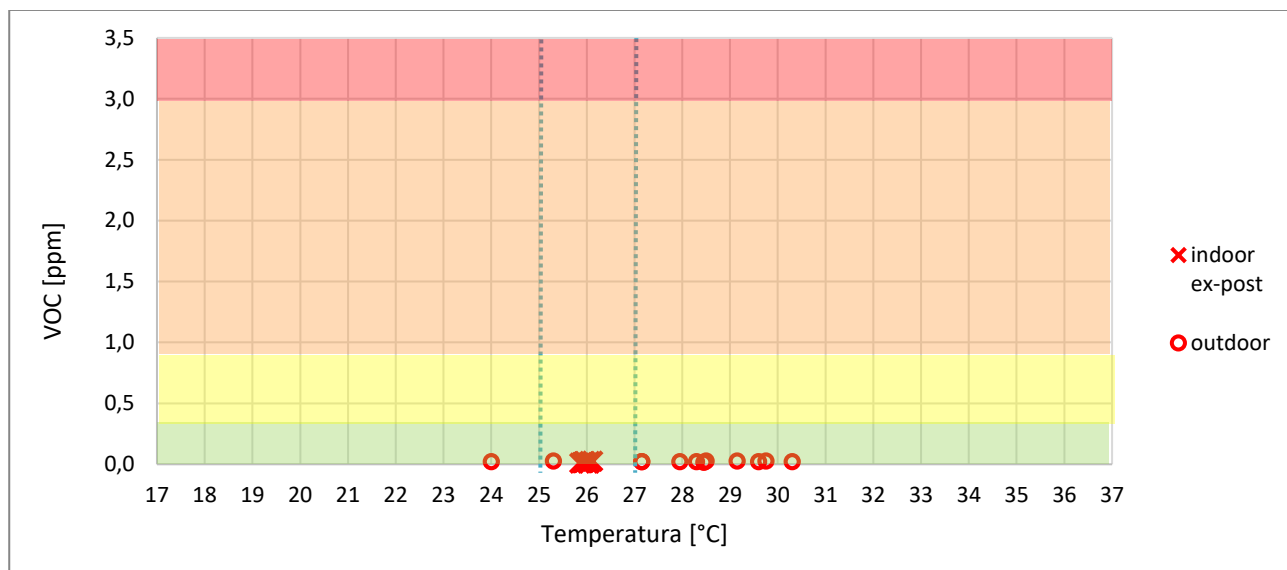


Figura 3.44 – VOC (ex-post).

L'osservazione congiunta di Figura 3.43 e Figura 3.44, nella modalità di rappresentazione conforme alle precedenti non consente di cogliere le differenze tra la situazione ex-ante e la situazione ex-post, che rimangono entrambe ben dentro al valore "buono".

Per una migliore lettura dei risultati conviene cambiare la scala di rappresentazione, focalizzando l'attenzione su un intervallo più stretto (Figura 3.45 e Figura 3.46).

In questa maniera si possono cogliere le leggerissime differenze tra la situazione ex-ante caratterizzata da una concentrazione media di 0,018 ppm e la situazione ex-post caratterizzata da una concentrazione media di 0,016 ppm, a fronte di una concentrazione media per l'aria esterna pari a 0,021 ppm.

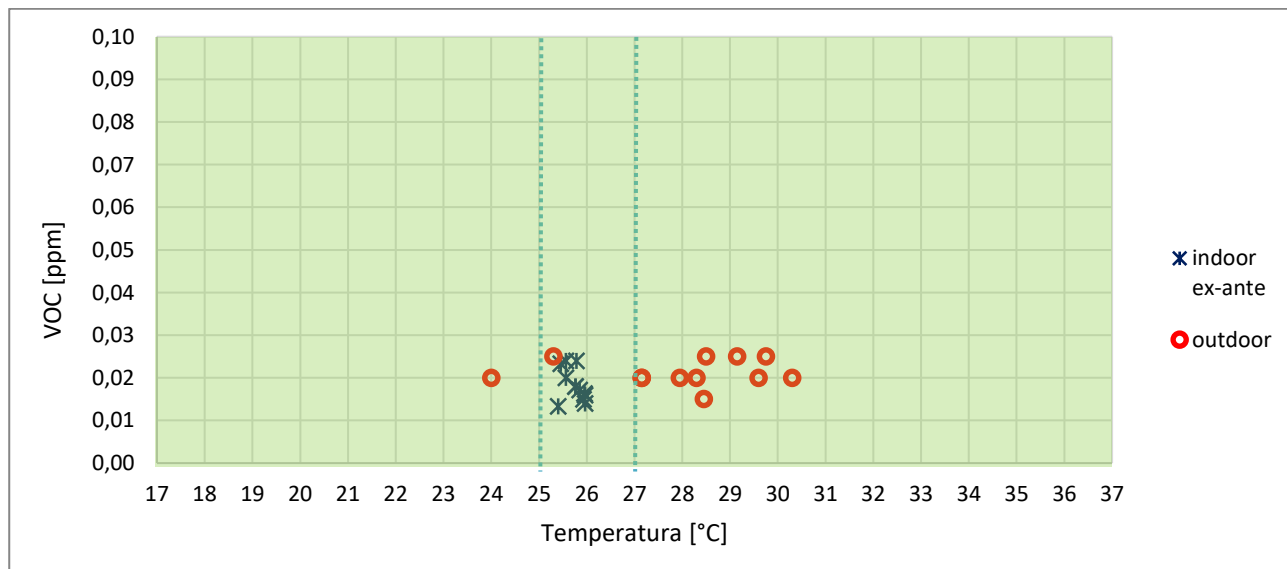


Figura 3.45 – VOC (ex-ante).

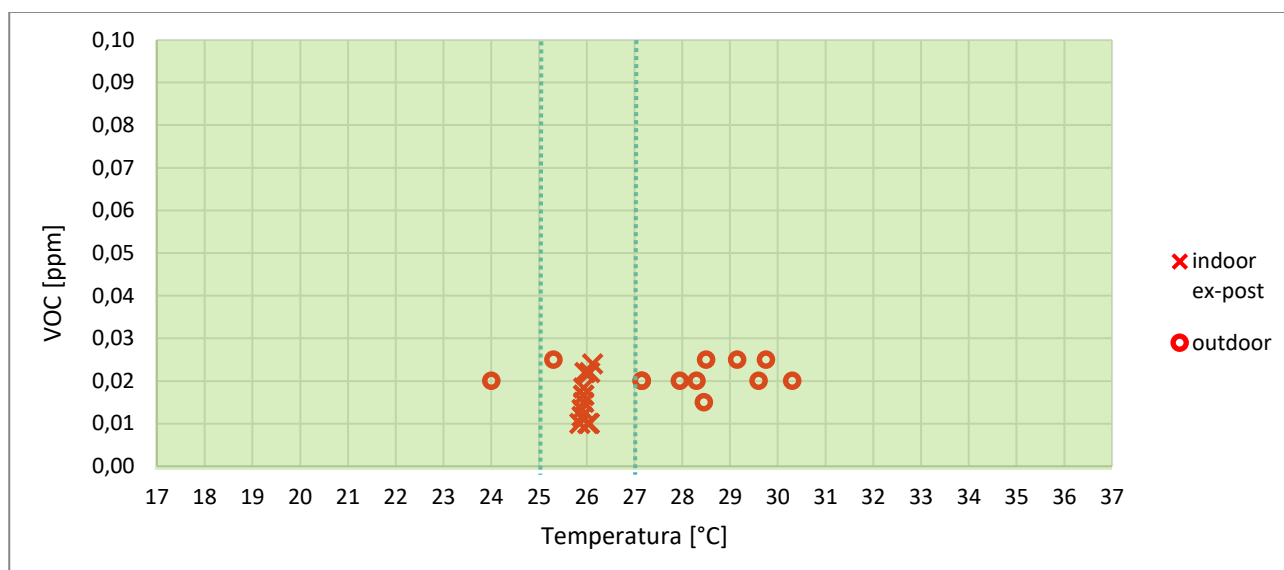


Figura 3.46 – VOC (ex-post).

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 pressoché 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.

3.3.3 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 3.8 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 ($P_{PM10}=0,25$; $P_{VOC}=0,25$; $P_{O_3}=0,25$; $P_{CO_2}=0,25$) e applicando, per estensione, l'indicatore IQAI anche all'aria esterna.

Tabella 3.8 – Concentrazioni degli inquinanti e IQAI.

		CO ₂ [ppm]			PM10 [µg/m ³]			VOC [ppm]			O ₃ [ppm]			IQAI		
Data	Occup.	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 3.47 e la Figura 3.48 riportano i risultati del calcolo dell'IQAI.

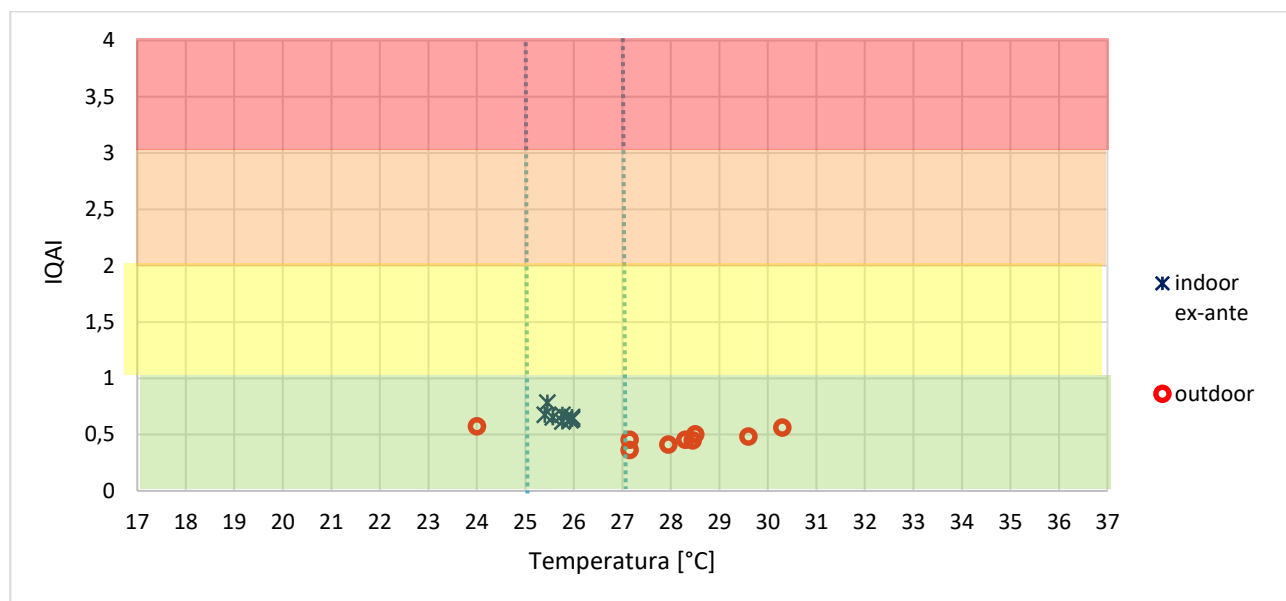


Figura 3.47 – IQAI (ex-ante).

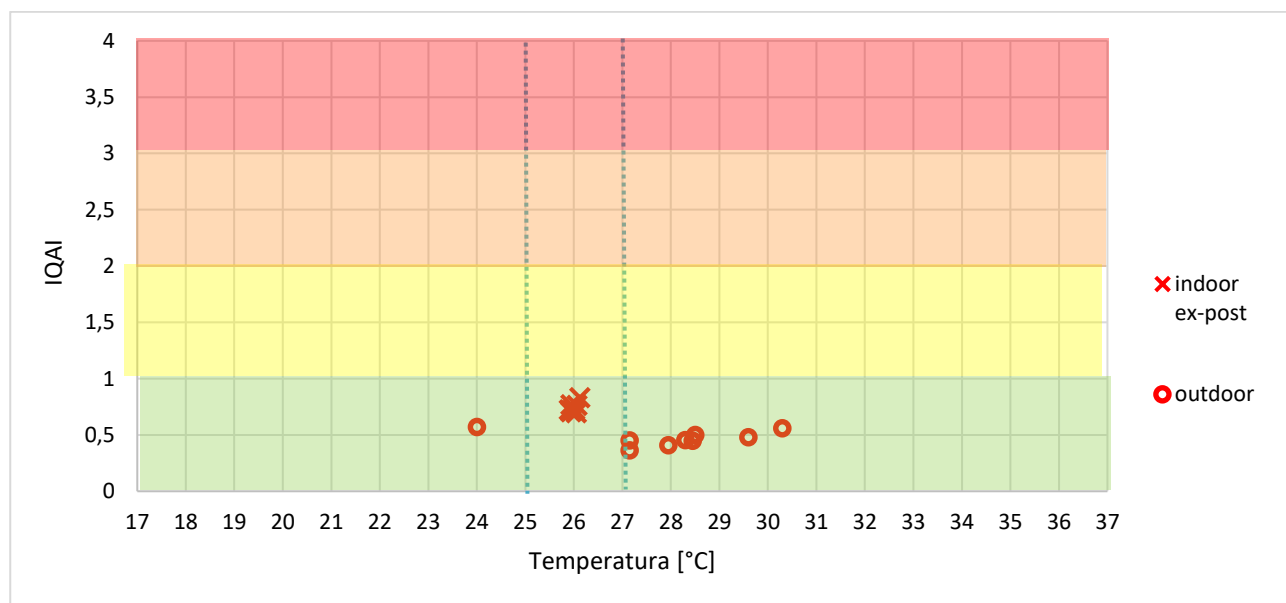


Figura 3.48 – IQAI (ex-post).

L'osservazione congiunta di Figura 3.47 e Figura 3.48 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 3.49 e in Figura 3.50 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 ($P_{PM10}=0,33$; $P_{VOC}=0,33$; $P_{O_3}=0,01$; $P_{CO_2}=0,33$) e applicando, per estensione, l'indicatore IQAI anche all'aria esterna.

Tabella 3.9 – 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

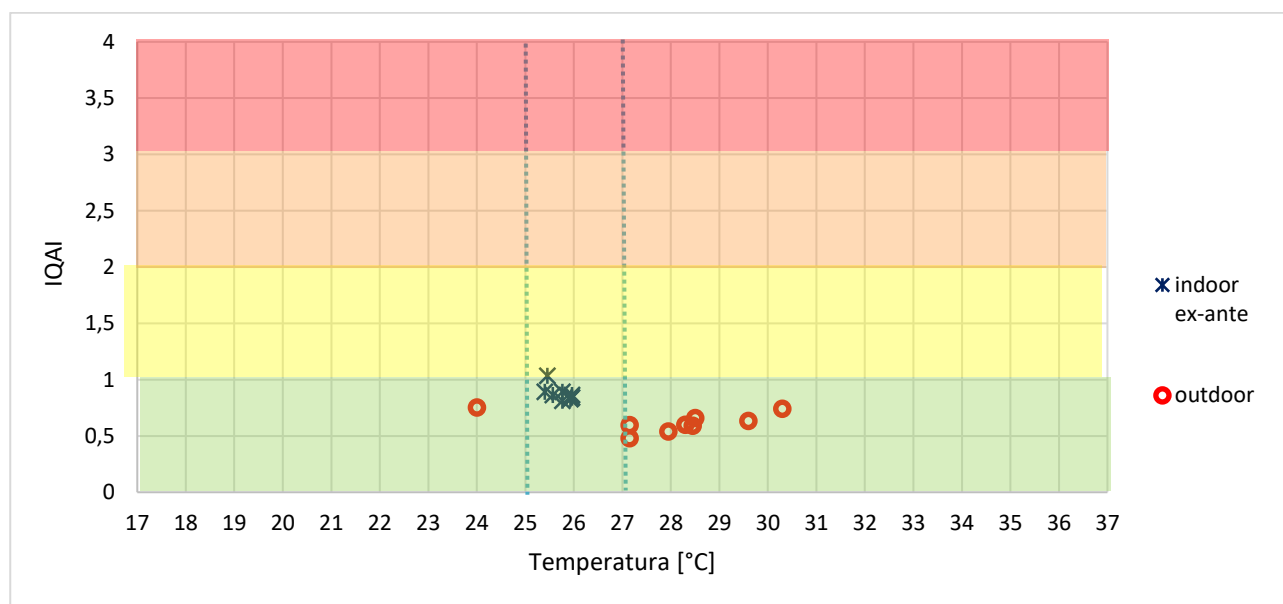


Figura 3.49 – IQAI (ex-ante).

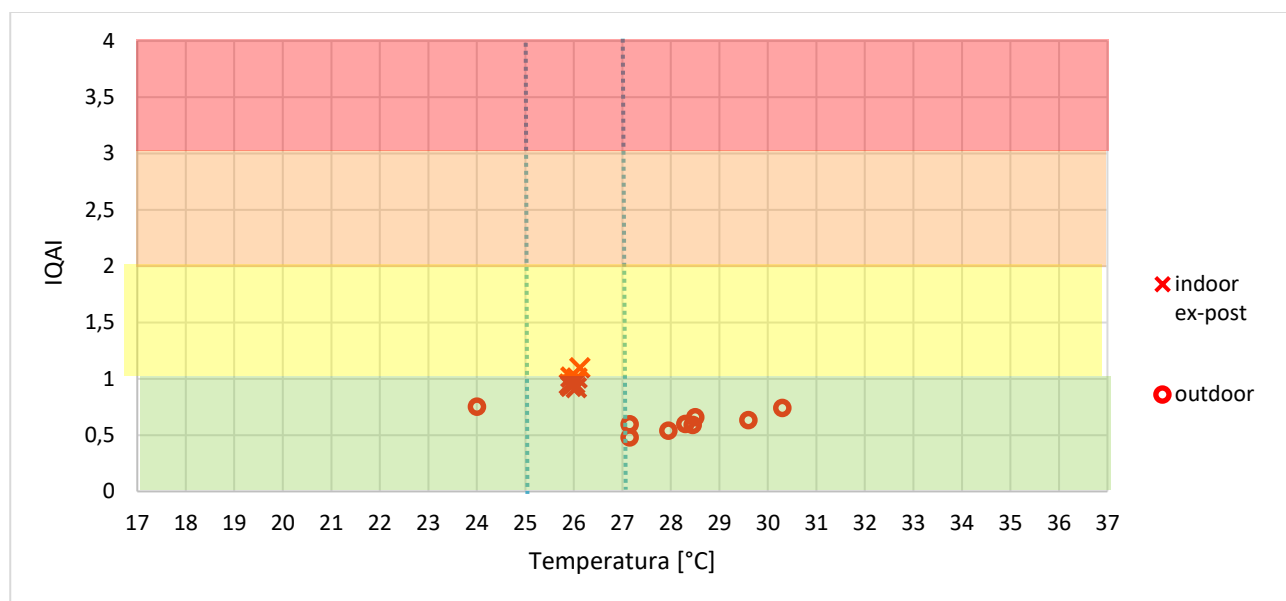


Figura 3.50 – IAQI (ex-post).

L'osservazione congiunta di Figura 3.49 e Figura 3.50 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 $IAQI = 0,62$, per l'aria interna si ha $IAQI = 0,87$;
- nella situazione ex-post a partire da aria esterna per la quale si ha $IAQI = 0,62$, per l'aria interna si ha $IAQI = 0,97$, con un lieve peggioramento rispetto alla situazione ex-ante.

3.4 Campagna di misura – funzionamento invernale

Le misure relative al funzionamento invernale sono state effettuate nei giorni indicati in Tabella 3.10, con le stesse modalità viste per il funzionamento estivo, relativamente alle condizioni di funzionamento (piena portata e portata dimezzata) e relativamente al posizionamento degli strumenti di misura.

Tabella 3.10 – Giornate di misura e occupazione.

07/11/2018	250 persone
09/11/2018	280 persone
14/11/2018	240 persone
16/11/2018	300 persone
21/11/2018	200 persone
23/11/2018	220 persone
28/11/2018	280 persone
05/12/2018	300 persone
07/12/2018	250 persone
12/12/2018	270 persone
14/12/2018	180 persone
19/12/2018	270 persone
21/12/2018	160 persone

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

3.4.1 Misurazione delle grandezze termo-igrometriche

I risultati delle misure effettuate sono riportati in Tabella 3.11, in Figura 3.51 per la condizione ex-ante (portata nominale) e in Figura 3.52 per la condizione ex-post (portata dimezzata).

Tabella 3.11 – 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-post)	
07/11/2018	250 persone	14,8	72,0	20,8	50,8	20,8	50,7
09/11/2018	280 persone	14,7	68,9	20,8	50,6	20,8	50,4
14/11/2018	240 persone	12,1	69,8	20,2	50,4	20,4	50,2
16/11/2018	300 persone	12,6	64,1	20,2	50,2	20,5	50,2
21/11/2018	200 persone	12,9	77,9	20,0	50,6	20,5	50,9
23/11/2018	220 persone	14,9	74,3	20,5	50,1	20,5	50,1
28/11/2018	280 persone	8,1	60,2	19,8	50,1	20,4	50,4
05/12/2018	300 persone	10,8	76,7	20,4	49,6	20,4	50,1
07/12/2018	250 persone	10,1	78,1	20,4	49,3	20,5	50,8
12/12/2018	270 persone	4,9	59,7	20,1	50,1	20,5	50,5
14/12/2018	180 persone	7,2	90,0	20,2	50,0	20,4	50,4
19/12/2018	270 persone	6,9	73,8	20,1	50,5	20,3	50,4
21/12/2018	160 persone	9,8	78,1	20,1	49,9	20,4	50,3

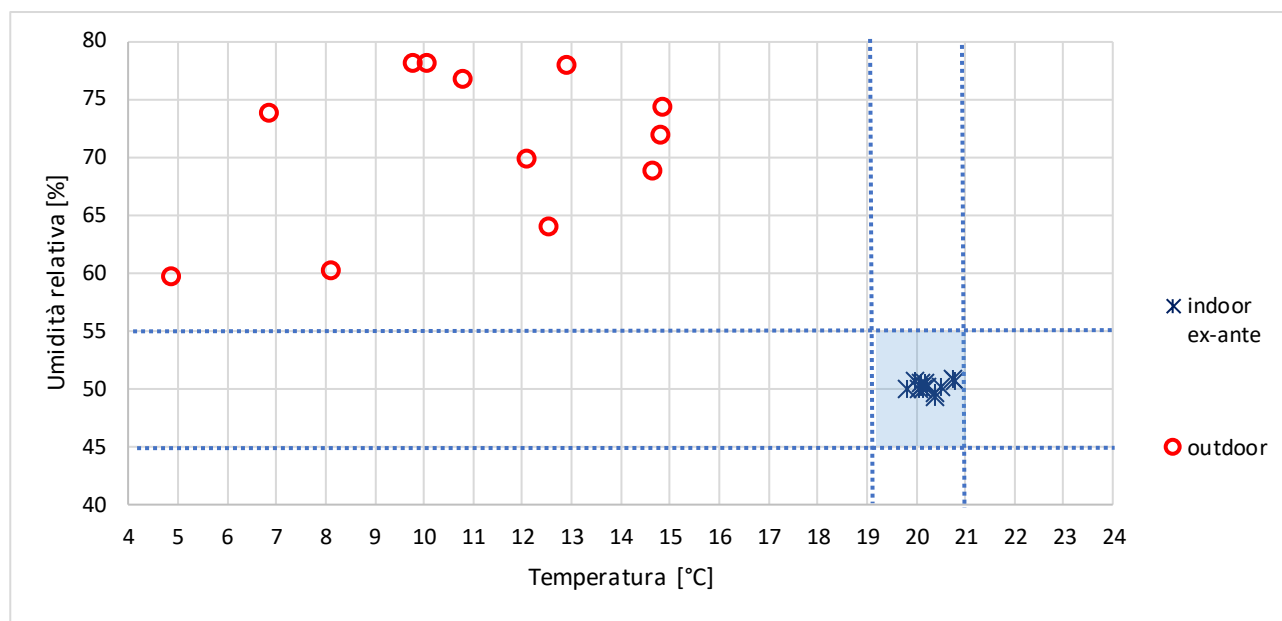


Figura 3.51 – Grandezze termoigrometriche (ex-ante).

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 = $20^{\circ}\text{C} \pm 1$; umidità relativa = $50\% \pm 5$), confermando quanto già visto per la stagione estiva.

Il grafico di Figura 3.52 mostra una interessante differenza rispetto a quanto osservato per la stagione estiva: l'impianto di climatizzazione è in grado di mantenere i parametri ambientali all'interno dell'intervallo di comfort (temperatura = $20^{\circ}\text{C} \pm 1$; umidità relativa = $50\% \pm 5$), anche nel funzionamento a portata dimezzata.

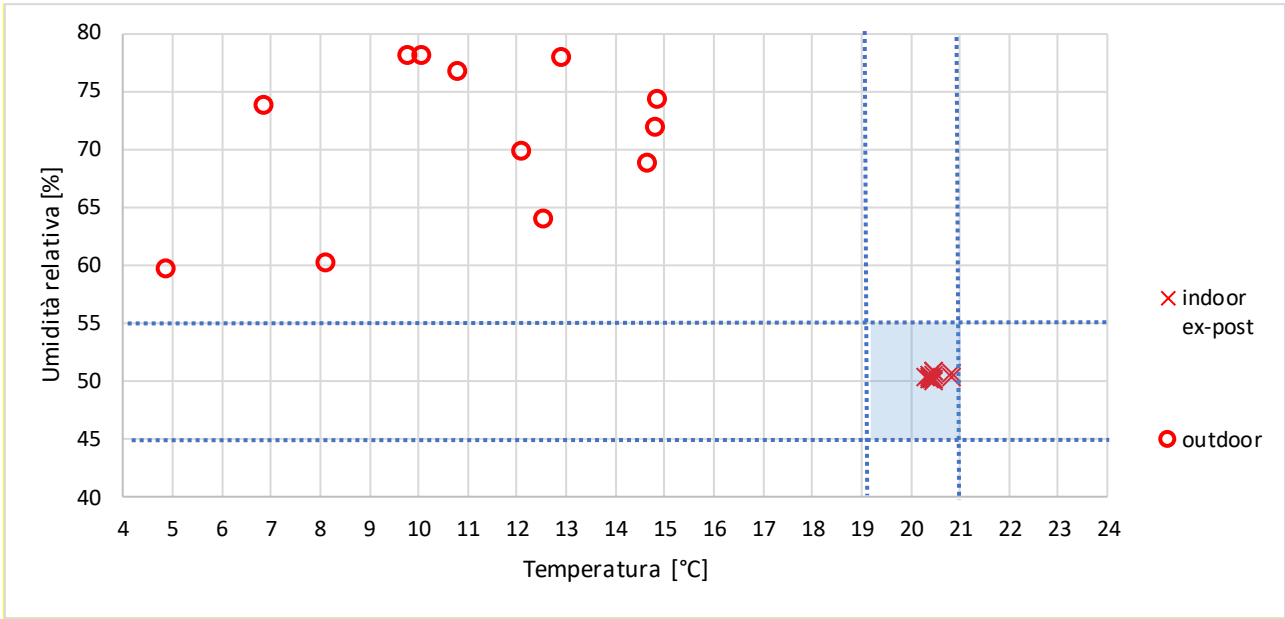


Figura 3.52 – Grandezze termoigrometriche (ex-post).

Quanto osservato è una conseguenza della diversa successione dei trattamenti effettuati dall’unità di trattamento aria (cfr. par. 3.1.4, eq.(3.2), Figura 3.17), che nel caso invernale includono l’umidificazione dell’aria.

Nel funzionamento invernale a portata ridotta, è sufficiente umidificare di meno l’aria, per mantenere il valore dell’umidità relativa nell’intervallo di comfort.

3.4.2 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 3.12.

Tabella 3.12 – 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)
07/11	250	342	573	675	19,5	18,7	20,6	0,020	0,020	0,022	0,00	0,00	0,00
09/11	280	340	569	696	29,5	24,8	19,5	0,020	0,016	0,010	0,00	0,00	0,00
14/11	240	342	549	653	34,5	27,4	24,2	0,015	0,016	0,018	0,00	0,00	0,00
16/11	300	343	554	688	25,5	20,9	17,8	0,020	0,017	0,013	0,00	0,00	0,00
21/11	200	348	545	638	15,5	17,8	15,3	0,025	0,018	0,018	0,00	0,00	0,00
23/11	220	341	559	658	31,5	20,6	18,7	0,020	0,014	0,017	0,00	0,00	0,00
28/11	280	340	582	705	16,0	15,5	13,2	0,020	0,013	0,014	0,00	0,00	0,00
05/12	300	340	567	702	34,5	26,0	22,8	0,015	0,018	0,012	0,00	0,00	0,00
07/12	250	341	502	604	35,5	24,2	22,2	0,015	0,020	0,015	0,00	0,00	0,00
12/12	270	347	493	599	55,0	35,8	27,3	0,025	0,022	0,017	0,00	0,00	0,00
14/12	180	339	501	583	10,0	14,8	11,8	0,015	0,024	0,015	0,00	0,00	0,00
19/12	270	346	534	657	32,5	25,9	23,5	0,025	0,024	0,010	0,00	0,00	0,00
21/12	160	341	480	555	37,5	33,4	31,0	0,025	0,024	0,015	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 dello 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 termoisometriche.

In aggiunta, per lo sfondo dei grafici è stata utilizzata una colorazione (verde, gialla, arancione, rossa) corrispondente agli intervalli di concentrazione degli inquinanti (buono, moderato, scadente, pessimo) utilizzati per la definizione dell'IQAI.

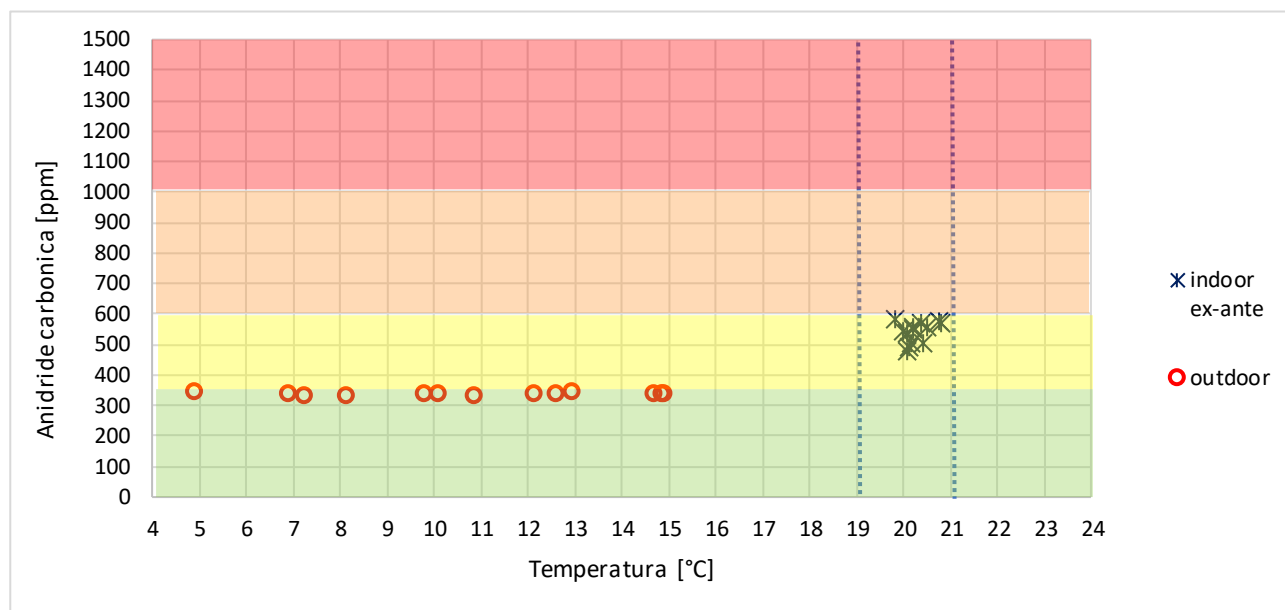


Figura 3.53 – Anidride carbonica (ex-ante).

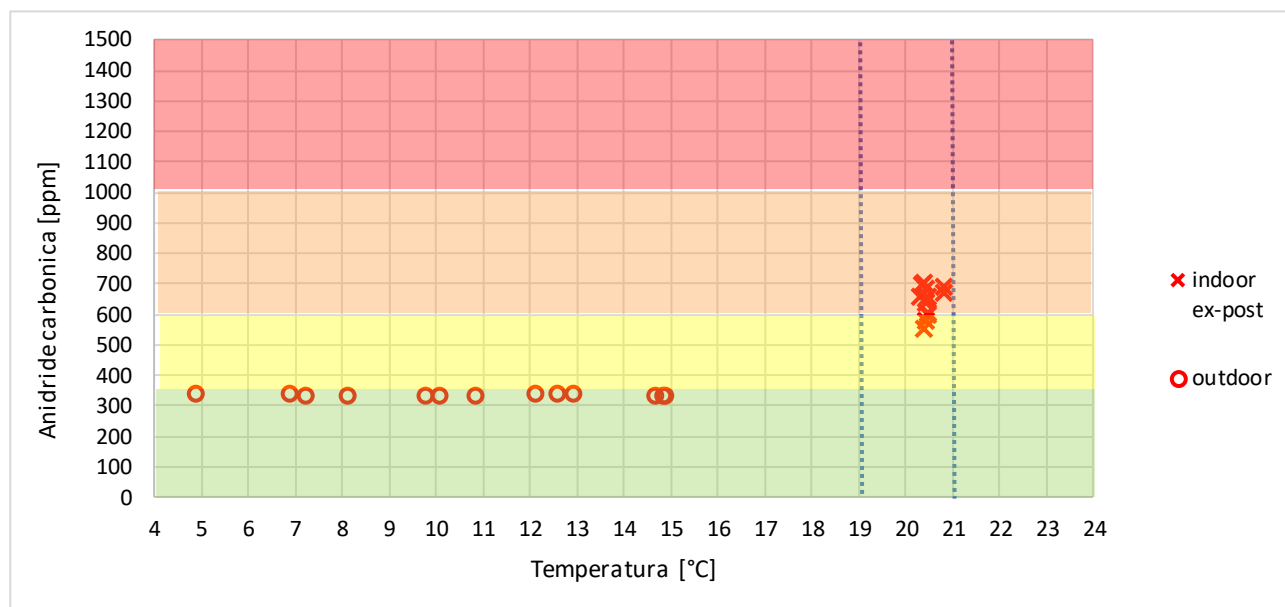


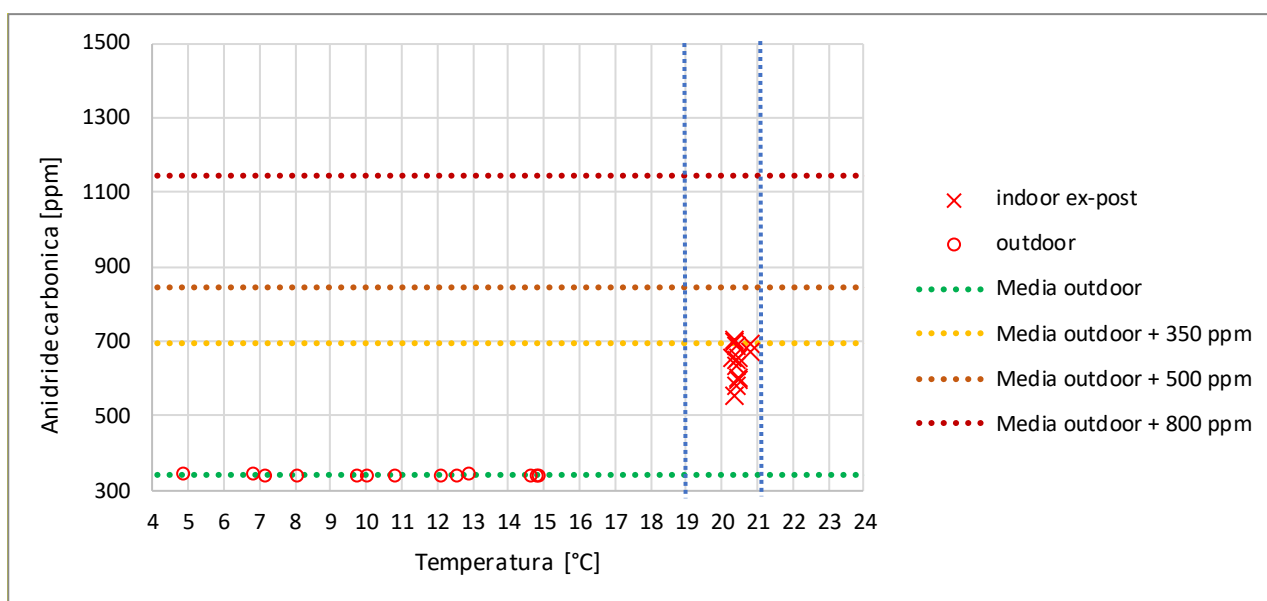
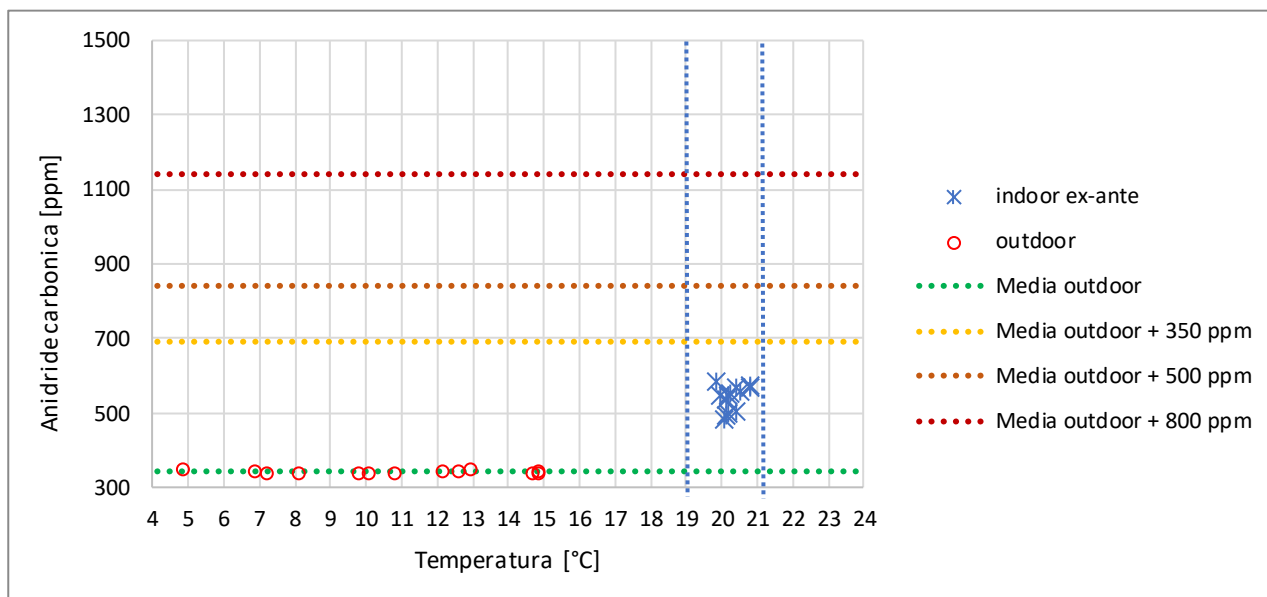
Figura 3.54 – Anidride carbonica (ex-post).

L'osservazione congiunta di Figura 3.53 e Figura 3.54 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 539 ppm a 647 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 (~342 ppm), l'incremento dovuto alle sorgenti interne risulta evidentemente influenzato dalla diminuzione della portata.

In particolare, i grafici di Figura 3.55

Figura 3.39 e Figura 3.56 riportano la classificazione per livelli così come riportata in UNI EN 15251³.



Anche utilizzando questo diverso approccio, si osservano le medesime differenze tra la situazione ex-ante e la situazione ex-post; in tre dei giorni di misurazione la qualità dell'aria valutata sulla base della sola anidride carbonica passa dalla "Categoria I" alla "Categoria II".

³ UNI EN 15251 Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics; 2007.

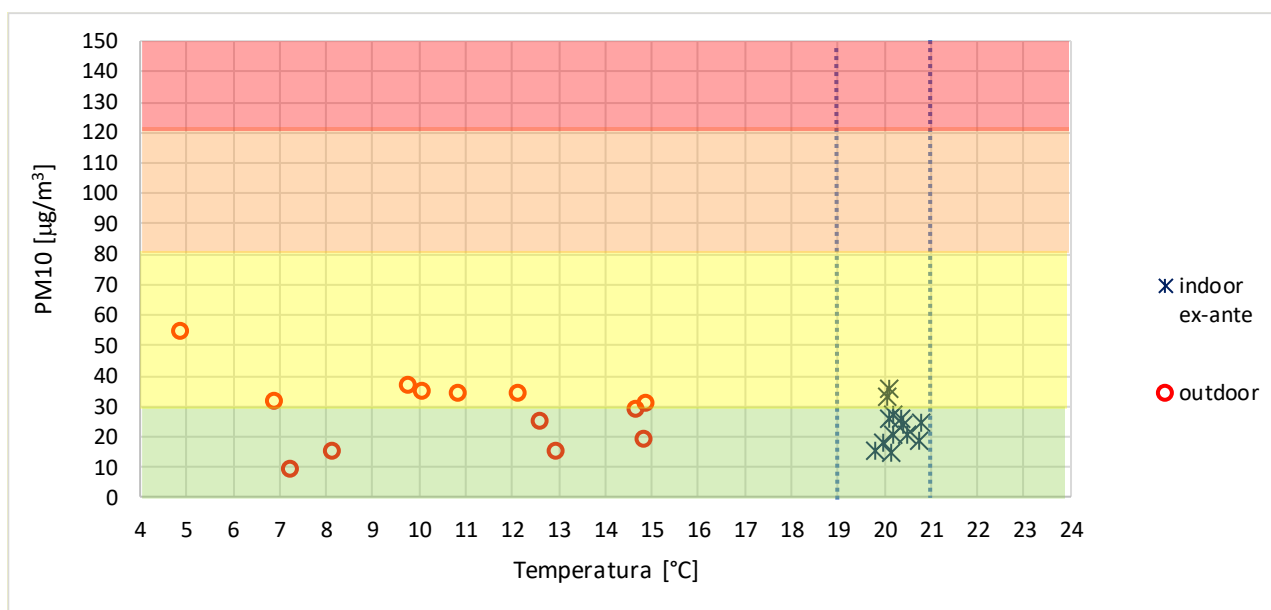


Figura 3.57 – PM10 (ex-ante).

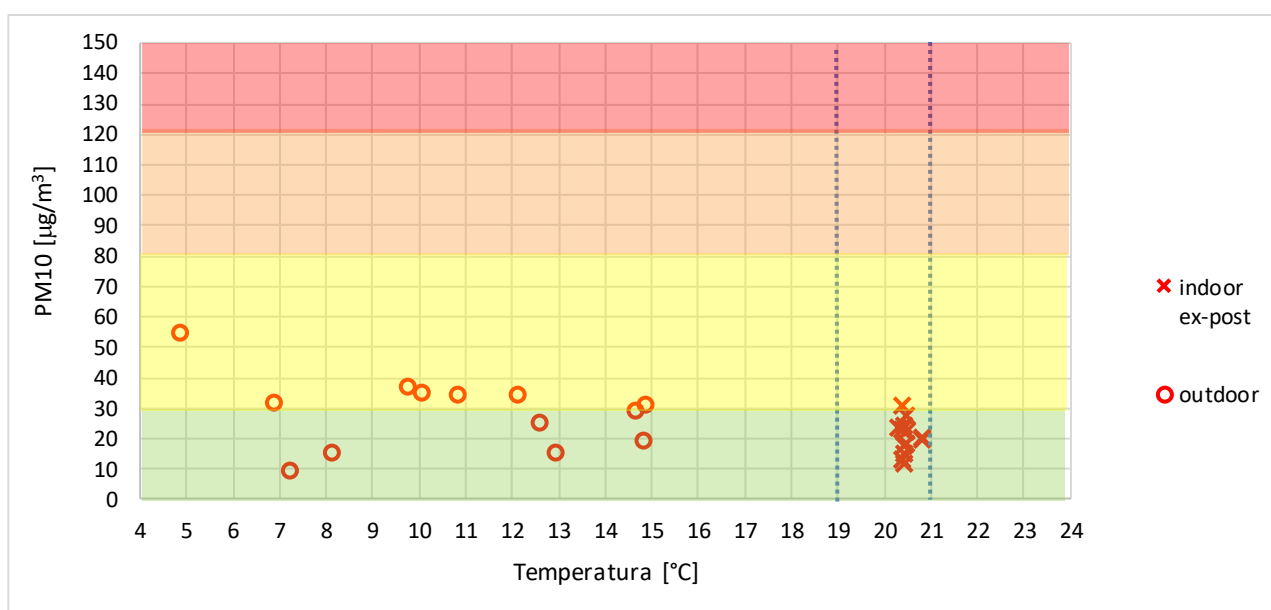


Figura 3.58 – PM10 (ex-post).

L'osservazione congiunta di Figura 3.57 e Figura 3.58 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 23,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 20,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con un lieve miglioramento sul livello dell'indice relativo al PM10, che rimane mediamente 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 (29,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), la diminuzione dovuta all'azione dei filtri risulta leggermente più alta nella situazione ex-post, conseguenza diretta della diminuzione della portata.

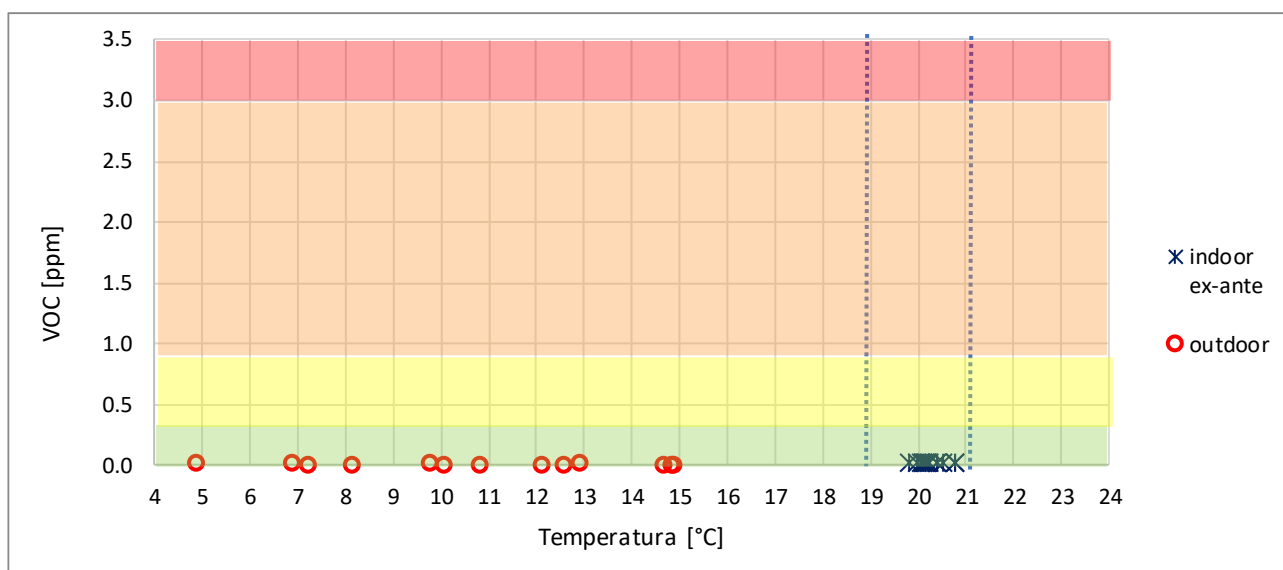


Figura 3.59 – VOC (ex-ante).

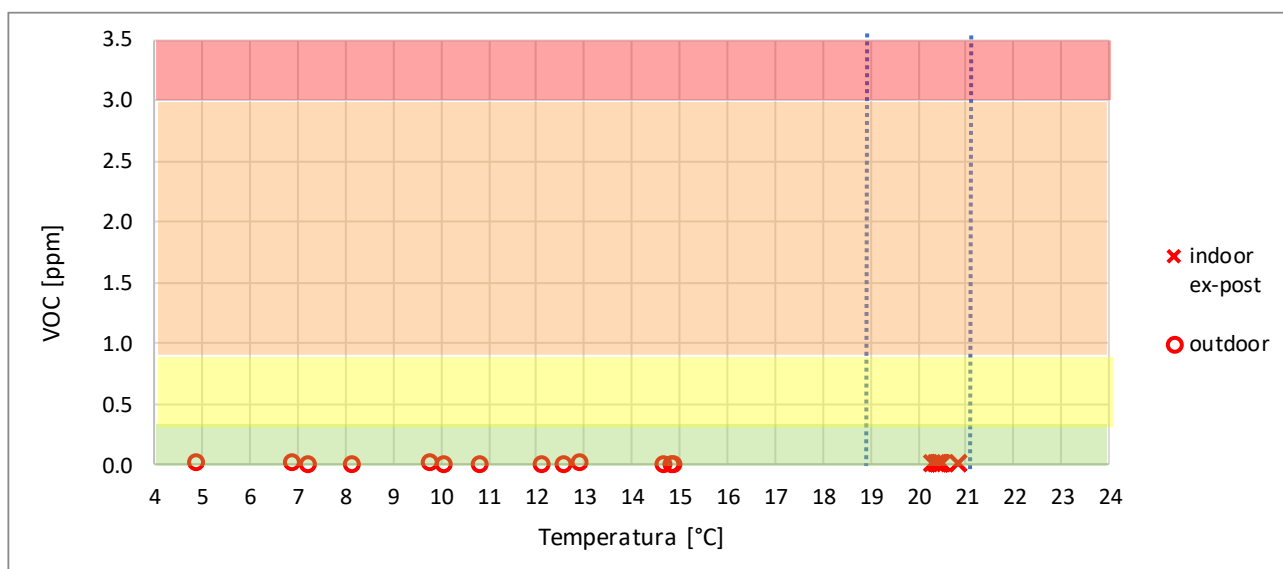


Figura 3.60 – VOC (ex-post).

L'osservazione congiunta di Figura 3.59 e Figura 3.60, nella modalità di rappresentazione conforme alle precedenti non consente di cogliere le differenze tra la situazione ex-ante e la situazione ex-post, che rimangono entrambe ben dentro al valore "buono".

Per una migliore lettura dei risultati conviene cambiare la scala di rappresentazione, focalizzando l'attenzione su un intervallo più stretto (Figura 3.61 e Figura 3.62).

In questa maniera si possono cogliere le leggerissime differenze tra la situazione ex-ante caratterizzata da una concentrazione media di 0,019 ppm e la situazione ex-post caratterizzata da una concentrazione media di 0,015 ppm, a fronte di una concentrazione media per l'aria esterna pari a 0,020 ppm.

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

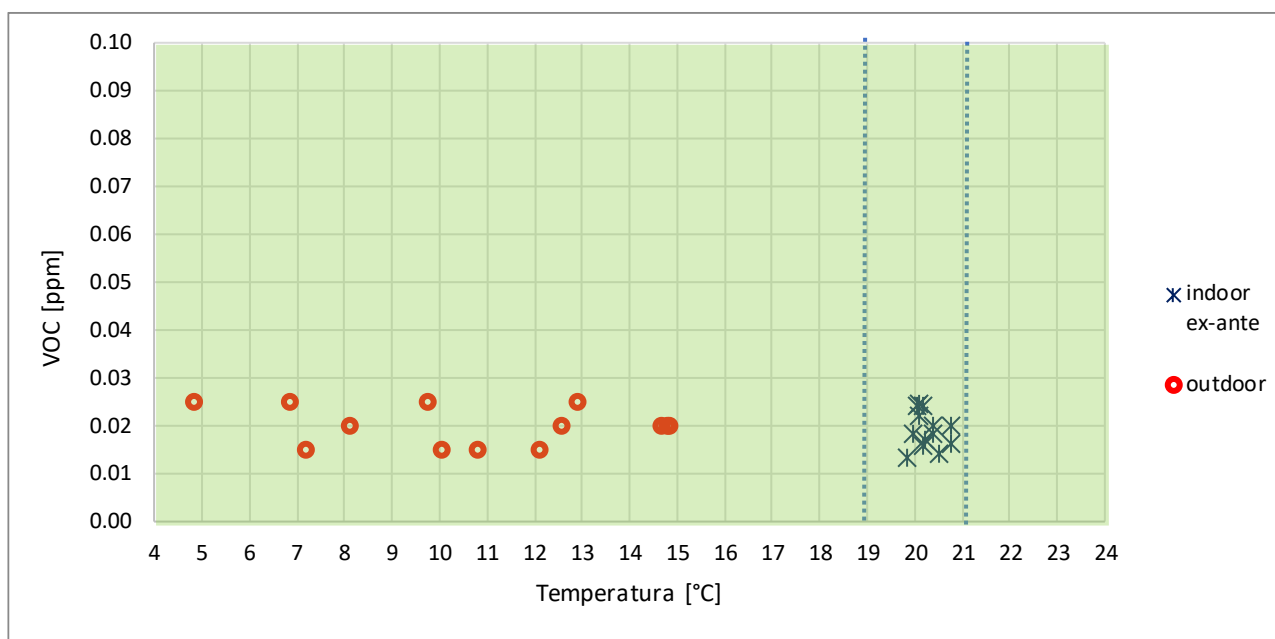


Figura 3.61 – VOC (ex-ante).

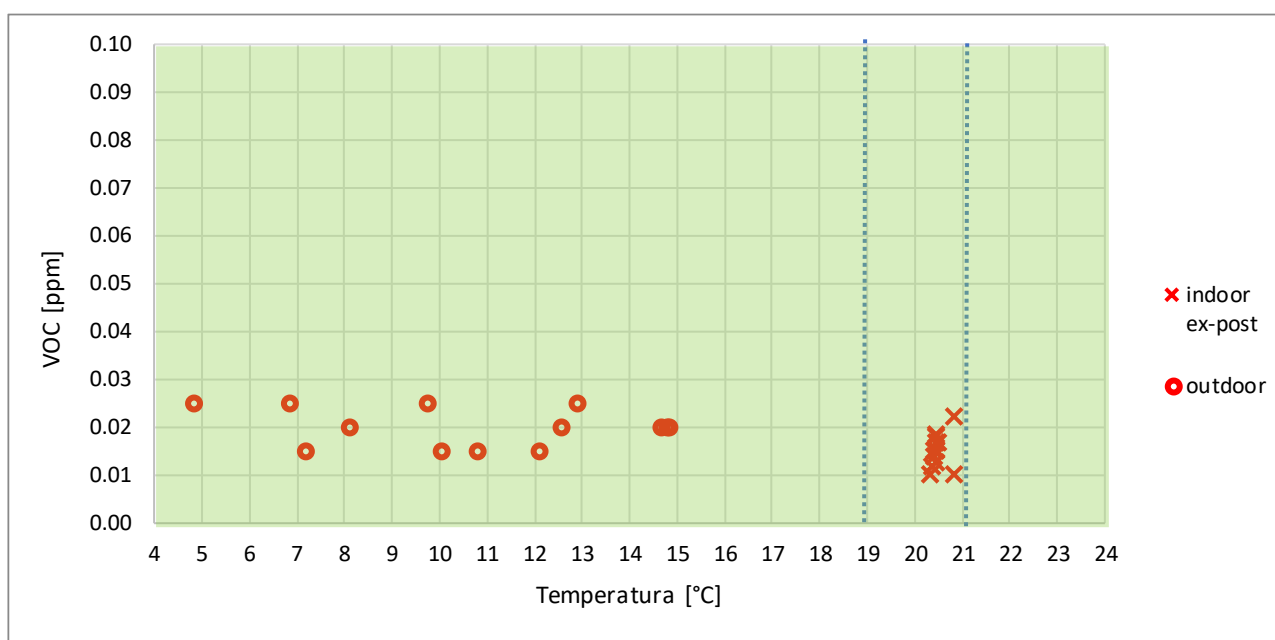


Figura 3.62 – VOC (ex-post).

3.4.3 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 3.13 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 ($P_{PM10}=0,25$; $P_{VOC}=0,25$; $P_{O_3}=0,25$; $P_{CO_2}=0,25$) e applicando, per estensione, l'indicatore IQAI anche all'aria esterna.

Tabella 3.13 – 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)
07/11	250	342	573	675	19,5	18,7	20,6	0,020	0,020	0,022	0,00	0,00	0,00	0,423	0,645	0,737
09/11	280	340	569	696	29,5	24,8	19,5	0,020	0,016	0,010	0,00	0,00	0,00	0,505	0,689	0,731
14/11	240	342	549	653	34,5	27,4	24,2	0,015	0,016	0,018	0,00	0,00	0,00	0,529	0,403	0,750
16/11	300	343	554	688	25,5	20,9	17,8	0,020	0,017	0,013	0,00	0,00	0,00	0,474	0,292	0,713
21/11	200	348	545	638	15,5	17,8	15,3	0,025	0,018	0,018	0,00	0,00	0,00	0,399	0,609	0,666
23/11	220	341	559	658	31,5	20,6	18,7	0,020	0,014	0,017	0,00	0,00	0,00	0,517	0,642	0,705
28/11	280	340	582	705	16,0	15,5	13,2	0,020	0,013	0,014	0,00	0,00	0,00	0,393	0,623	0,687
05/12	300	340	567	702	34,5	26,0	22,8	0,015	0,018	0,012	0,00	0,00	0,00	0,528	0,699	0,764
07/12	250	341	502	604	35,5	24,2	22,2	0,015	0,020	0,015	0,00	0,00	0,00	0,533	0,621	0,700
12/12	270	347	493	599	55,0	35,8	27,3	0,025	0,022	0,017	0,00	0,00	0,00	0,644	0,690	0,741
14/12	180	339	501	583	10,0	14,8	11,8	0,015	0,024	0,015	0,00	0,00	0,00	0,338	0,544	0,594
19/12	270	346	534	657	32,5	25,9	23,5	0,025	0,024	0,010	0,00	0,00	0,00	0,530	0,309	0,740
21/12	160	341	480	555	37,5	33,4	31,0	0,025	0,024	0,015	0,00	0,00	0,00	0,552	0,667	0,722

Con le stesse modalità di rappresentazione usate in precedenza, la Figura 3.63 e la Figura 3.64 riportano i risultati del calcolo dell'IQAI.

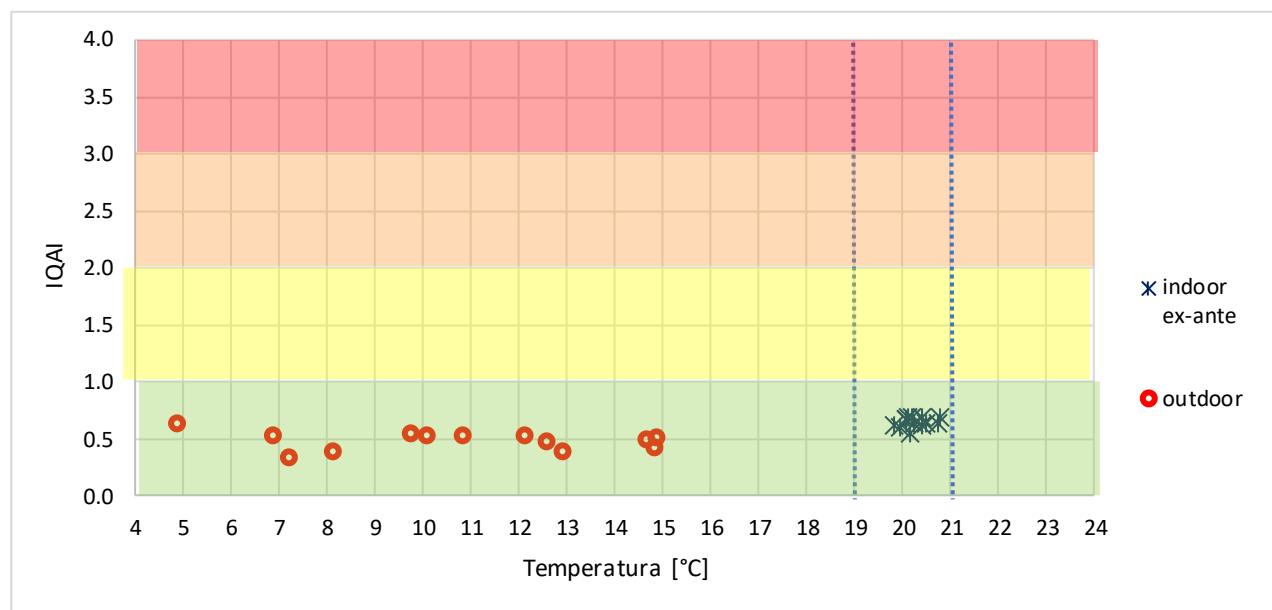


Figura 3.63 – IQAI (ex-ante).

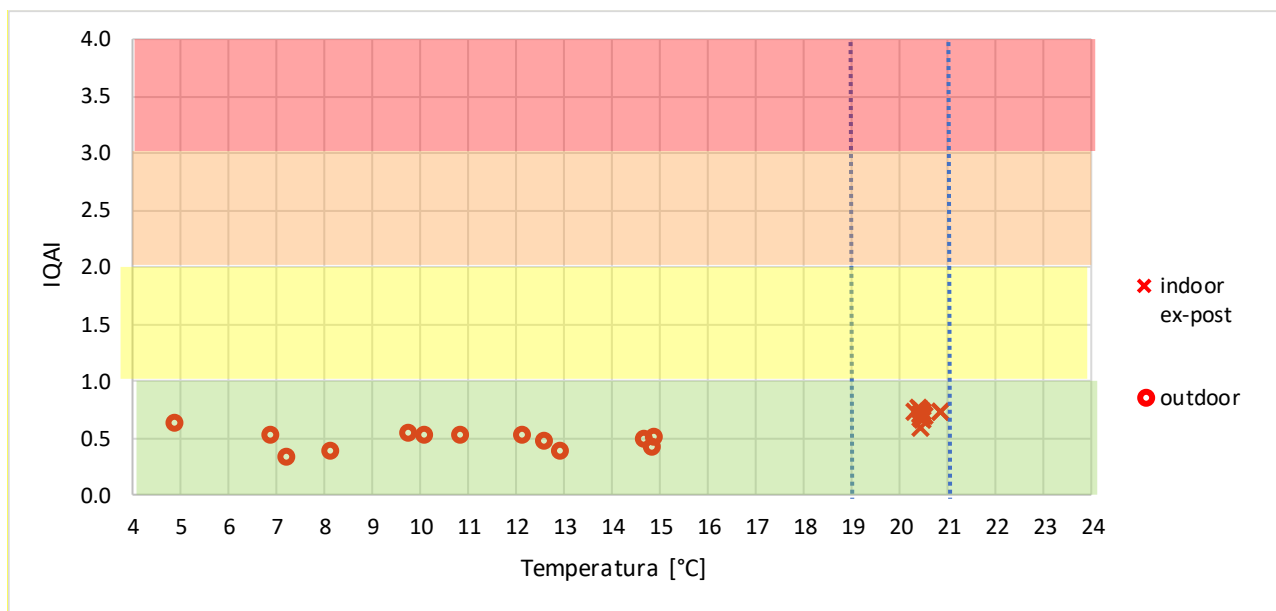


Figura 3.64 – IQAI (ex-post).

L'osservazione congiunta di Figura 3.63 e Figura 3.64 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 $IQAI = 0,49$, per l'aria interna si ha $IQAI = 0,57$;
- nella situazione ex-post a partire da aria esterna per la quale si ha $IQAI = 0,49$, per l'aria interna si ha $IQAI = 0,71$, 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 3.65 e in Figura 3.66 Figura 3.50 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 3.14 – Concentrazioni degli inquinanti e IQAI.

Data	Occup.	CO ₂ [ppm]			PM10 [µg/m³]			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)
07/11	250	342	573	675	19,5	18,7	20,6	0,020	0,020	0,022	0,00	0,00	0,00	0,558	0,852	0,972
09/11	280	340	569	696	29,5	24,8	19,5	0,020	0,016	0,010	0,00	0,00	0,00	0,667	0,909	0,965
14/11	240	342	549	653	34,5	27,4	24,2	0,015	0,016	0,018	0,00	0,00	0,00	0,699	0,532	0,990
16/11	300	343	554	688	25,5	20,9	17,8	0,020	0,017	0,013	0,00	0,00	0,00	0,626	0,385	0,941
21/11	200	348	545	638	15,5	17,8	15,3	0,025	0,018	0,018	0,00	0,00	0,00	0,526	0,804	0,880
23/11	220	341	559	658	31,5	20,6	18,7	0,020	0,014	0,017	0,00	0,00	0,00	0,683	0,847	0,931
28/11	280	340	582	705	16,0	15,5	13,2	0,020	0,013	0,014	0,00	0,00	0,00	0,518	0,822	0,907
05/12	300	340	567	702	34,5	26,0	22,8	0,015	0,018	0,012	0,00	0,00	0,00	0,696	0,923	1,008
07/12	250	341	502	604	35,5	24,2	22,2	0,015	0,020	0,015	0,00	0,00	0,00	0,704	0,819	0,924
12/12	270	347	493	599	55,0	35,8	27,3	0,025	0,022	0,017	0,00	0,00	0,00	0,850	0,911	0,978
14/12	180	339	501	583	10,0	14,8	11,8	0,015	0,024	0,015	0,00	0,00	0,00	0,446	0,719	0,784
19/12	270	346	534	657	32,5	25,9	23,5	0,025	0,024	0,010	0,00	0,00	0,00	0,700	0,407	0,977
21/12	160	341	480	555	37,5	33,4	31,0	0,025	0,024	0,015	0,00	0,00	0,00	0,728	0,881	0,953

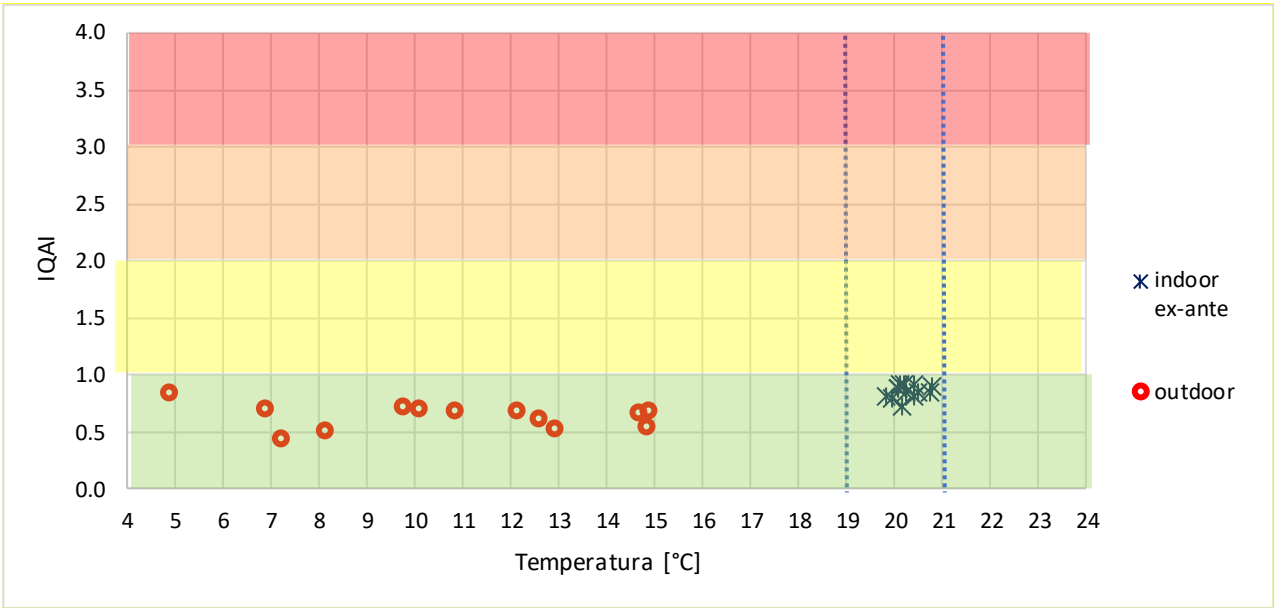


Figura 3.65 – IQAI (ex-ante).

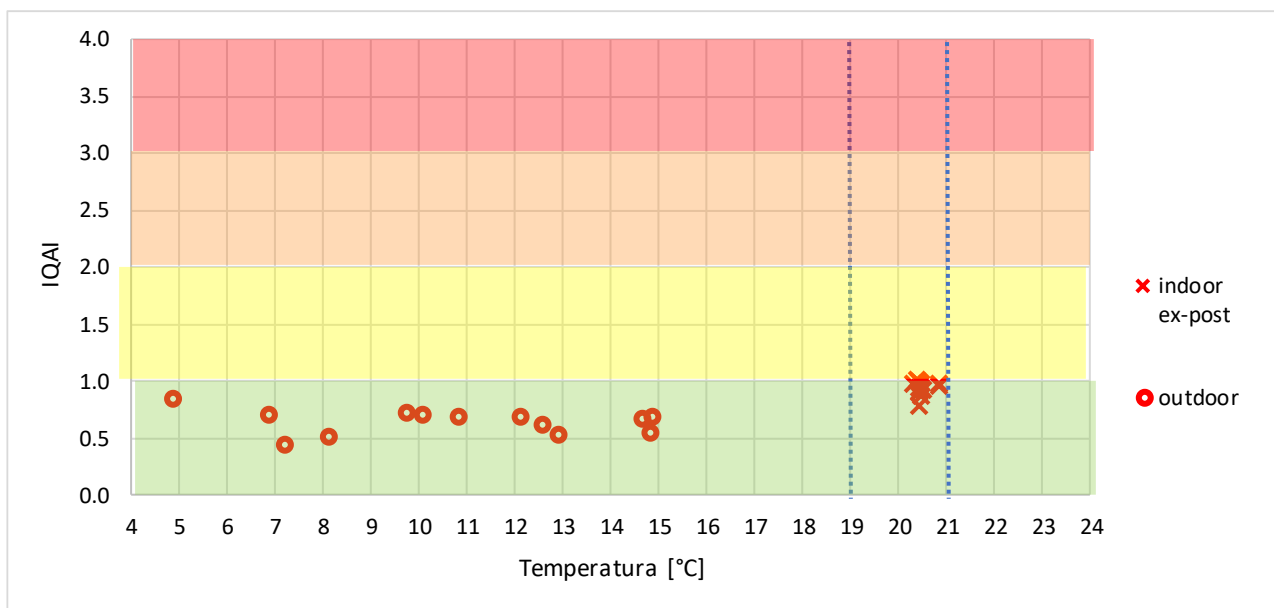


Figura 3.66 – IQAI (ex-post).

L'osservazione congiunta di Figura 3.65 e Figura 3.66Figura 3.50 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 $IQAI = 0,65$, per l'aria interna si ha $IQAI = 0,75$;
- nella situazione ex-post a partire da aria esterna per la quale si ha $IQAI = 0,65$, per l'aria interna si ha $IQAI = 0,94$, con un lieve peggioramento rispetto alla situazione ex-ante.

3.5 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, limitatamente alla stagione estiva, e un innalzamento della concentrazione di anidride carbonica, parametri nominalmente e generalmente controllati dalle unità di trattamento aria:

- nel funzionamento estivo, 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 risultato pari al 53%, superiore al valore di comfort del 50%, ma comunque all'interno dell'intervallo di tolleranza del $\pm 5\%$;
- nel funzionamento invernale, non si è osservata nessuna difficoltà dell'impianto a mantenere l'umidità relativa al valore di progetto; in questo caso l'impianto si è adeguato umidificando meno la portata d'aria esterna dimezzata;
- più evidente l'incremento di concentrazione di anidride carbonica, conseguente al dimezzamento della portata di aria esterna, che ha portato ad un "declassamento", nella scala di valori adoperata per la definizione dell'IQAI, e, in alcune giornate di misura invernali, anche nella scala 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.

4 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.

Nel corso dell'anno 2018, grazie al prolungamento dell'attività di ricerca, si è potuto estendere la campagna di misurazioni al periodo invernale.

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 in estate e 0,49 in inverno.

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.

Tuttavia la permenenza 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.

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.