

# Building automation system to control natural ventilation in school buildings. The case study of “Michelangelo School” in Bari

Francesco Iannone\*, Giuseppe Carbonara, Alessandro Rinaldi,  
Marco D’Elia, Guido R. Dell’Osso

---

## Highlights

This work focuses on natural ventilation controlled by a Building Automation System (BAS) with the aim of guarantee adequate levels of Indoor Air Quality (IAQ) in an existing building. The case study is a three-story school building, morphologically complex, located in the suburbs area of Bari, characterized by a Mediterranean climate. The simulations showed how the designed natural ventilation system allow to obtain adequate levels of thermal comfort and IAQ as the climatic conditions and internal energy supply vary, optimizing the ventilation flow rates in relation to the need to limit the energy consumption.

---

## Abstract

In school buildings high levels of Indoor Air Quality are required for the specific susceptibility to airborne pollution of occupants, but most of the data published in the scientific literature indicate that classroom ventilation in many schools is still inadequate. The low investment costs and the easy implementation of the Building Automation Systems allow a widely application in the existing buildings. This work studies the natural ventilation mechanisms based mainly on the stack effect of the central atrium and of the stairwells in order to design the building automation control systems.

---

## Keywords

Building and design techniques, Natural ventilation, Building Automation, Indoor Air Quality, Multizone airflow models

---

## 1. INTRODUCTION

In school buildings high levels of performance in terms of Indoor Air Quality (IAQ) are required for the specific susceptibility to airborne pollution of occupants and for the significant time they spend in classrooms [1-9]. In spite of this growing body of evidence, most of the data published in the scientific literature indicate that classroom ventilation in many schools is still inadequate and that the outdoor air supply rates in schools are insufficient, especially during the heating season and in cold climates [1-9, 25-33]. The low investment costs and the easy implementation of the Building Automation Systems (BAS) can allow a widely application in the existing school buildings, usually characterized by the absence of mechanical ventilation systems. BAS

### Francesco Iannone

Politecnico di Bari, via Edoardo  
Orabona 4, Bari, 70125, Italia

### Giuseppe Carbonara

Politecnico di Bari, via Edoardo  
Orabona 4, Bari, 70125, Italia

### Alessandro Rinaldi

Politecnico di Bari, via Edoardo  
Orabona 4, Bari, 70125, Italia

### Marco D’Elia

Politecnico di Bari, via Edoardo  
Orabona 4, Bari, 70125, Italia

### Guido R. Dell’Osso

Politecnico di Bari, via Edoardo  
Orabona 4, Bari, 70125, Italia

\* Corresponding author

Tel.: +39-080-5963344;

fax: +39-080-5963414;

e-mail:

francesco.iannone@poliba.it

are generally devoted to the control of active systems, such as the Heating Ventilation Air Conditioning (HVAC) systems. For instance, in [10] an intelligent controller was designed to determine the optimal ventilation rate in active systems, by maintaining the indoor CO<sub>2</sub> concentration in the comfort zone and by reducing energy consumption. Castilla et al. [11] propose a multivariable nonlinear model predictive control system to maintain thermal comfort and IAQ by means of HVAC systems and natural ventilation. Sun et al. [12] present an integrated control of active and passive heating, cooling, lighting, shading and ventilating system with the aim of minimizing total energy costs.

Differently from previous studies, in this study BAS are studied with the goal to reduce thermal discomfort conditions and guarantee IAQ conditions. From this point of view, some studies [13-15] show that it is possible to achieve a significant reduction of energy consumption through the adoption of natural ventilation strategies as an alternative to Air Conditioning (AC) systems.

In [16] an interesting application of BAS in school buildings for controlling windows opening/closing based on thermal comfort and IAQ demonstrated good performances in terms of thermal comfort and users' satisfaction. The case study was located in the city of Ancona in central Italy (latitude: 43°58'49"30 N; longitude: 13°52'57"01 E; altitude: 67 m a.s.l.), characterized by a hot-summer Mediterranean climate (Köppenclimatic classification) and by 1688 heating degree days. The findings were limited to the non-heating period when natural ventilation is not restricted by low outdoor temperature or strong wind. Furthermore, this system was applied to a test classroom, but further insights should take into account the ventilation mechanism of the whole building.

In the last few years, the diffusion of low cost BAS can allow the reduction of the mechanical system usage by means of natural ventilation strategies controlled by a sensor network and control units with programmable logic. These systems can be easily implemented in existing buildings [13, 15].

This work focuses on the definition of natural ventilation control system by BAS with the aim of guaranteeing adequate levels of IAQ. The case study is a school building of 1990, located in the suburbs area of Bari (latitude: 41°06'03.1"N; longitude: 16°52'45.1"E; altitude: 23 m a.s.l.). Due to the morphological complexity of the building, this work focuses on the study of the ventilation mechanisms based mainly on the stack effect of the central atrium where several classrooms overlook and on two stairwells serving all floors. Several simulations are conducted by TRNSYS/TRNFLOW [17, 18] software by combining dynamic energy simulations and ventilation flow

## 1. INTRODUZIONE

*Negli edifici scolastici sono richiesti alti livelli di prestazione in termini di qualità dell'aria interna (IAQ) per la specificità suscettibilità all'inquinamento atmosferico degli occupanti e per il tempo significativo che questi trascorrono in classe [1-9]. Nonostante questa crescente evidenza scientifica, la maggior parte dei dati pubblicati nella letteratura di settore indica che la ventilazione delle aule in molte scuole è ancora inadeguata e che i ricambi d'aria nelle scuole sono insufficienti, specialmente durante la stagione di riscaldamento e nei climi freddi [1-9, 25-33]. I bassi costi di investimento e la facile implementabilità dei sistemi di Building Automation (B.A.) possono consentire un'ampia applicazione negli edifici scolastici esistenti, solitamente caratterizzati dall'assenza di sistemi di ventilazione meccanica. I sistemi di automazione degli edifici sono generalmente dedicati al controllo di sistemi attivi, come i sistemi HVAC. Ad esempio, in [10] è stato progettato un controller intelligente per determinare la portata di ventilazione ottimale nei sistemi attivi, mantenendo la concentrazione di CO<sub>2</sub> indoor nei limiti di comfort e riducendo il consumo di energia. Castilla et al. [11] propongono un sistema di controllo predittivo con modello non lineare multivariabile per mantenere il comfort termico e la IAQ mediante sistemi HVAC e ventilazione naturale. Sun et al. [12] presentano un controllo integrato dei sistemi attivi e passivi di riscaldamento, raffreddamento, illuminazione, ombreggiamento e di ventilazione con l'obiettivo di ridurre al minimo i costi energetici totali. Diversamente da [10-12] dove viene proposto un controllo integrato di sistemi attivi e passivi al fine di minimizzare i costi energetici totali, in questo studio, il B.A.S. è studiato con l'obiettivo di ridurre le condizioni di disagio termico e garantire condizioni di IAQ. Da questo punto di vista, alcuni studi [13-15] mostrano che è possibile ottenere una significativa riduzione del consumo di energia mediante strategie di ventilazione naturale come alternativa ai sistemi di climatizzazione (AC).*

*Un'interessante applicazione di B.A. nelle aule scolastiche per il controllo dell'apertura e della chiusura delle finestre basata sul comfort termico e sulla qualità dell'aria indoor ha dimostrato buone prestazioni in termini di IAQ, comfort termico e soddisfazione degli utenti [16]. La scuola è ubicata nella città di Ancona, nel centro Italia (latitudine: 43° 58' 49.30" N; longitudine: 13° 52' 57.01" E; altitudine: 67 m s.l.m.), caratterizzata da un clima mediterraneo caldo-estivo (Classificazione Köppenclimatic) e da 1688 gradi giorno in riscaldamento. I risultati sono limitati al periodo di spegnimento dell'impianto di riscaldamento, quando la ventilazione naturale non è limitata dalla bassa temperatura esterna o dal forte vento. Inoltre,*

rates by means of air flow network model. The simulations showed how the design of the natural ventilation system, based on the air quality and a wider performance of thermo-hygrometric comfort, allow to obtain adequate levels of thermal comfort and IAQ, optimizing the ventilation flow rates in relation to the need to reduce the energy consumption.

## 2. IAQ IN SCHOOL BUILDINGS

The IAQ plays an important role in the design and management of school buildings due to the high required hygienic conditions to be satisfied in the workplace. Students can be considered a susceptible population due to their age: in fact, compared to adults, children are more vulnerable to environmental pollutants as they breathe more, relative to their body weight, and they are also less well able to deal with toxic chemicals. In addition, considering the age of the users between 8 and 14 years old, children spend almost one third of their life in schools and about 70% of their time inside a classroom during school days [3]. The classrooms are the second most important indoor environment for children, after their homes, where they are exposed to various airborne pollutants to a much greater extent than outdoors [4]. Insufficient air exchange conditions increase the students' exposure to pathogens coming from healthy or asymptomatic carriers, but also less concentration performance during the lesson hours [5-9].

Some European studies, such as the "Health Effects of the School Environment" (HESE) [2] and the "School Environment and Respiratory Health of Children" (SEARCH) [1] highlighted the close relationship between the indoor pollutants and the respiratory and allergic symptoms. Such symptomatology can significantly compromise the life quality of the students and their academic performance. HESE studies highlighted the relationship between CO<sub>2</sub> levels and the greater risk of nocturnal dry cough and rhinitis. The risk of these diseases is 2-3 times higher for children exposed to a CO<sub>2</sub> concentration higher than 1000 ppm (standard for a good IAQ proposed by the American Society of Heating Refrigeration and Air-Conditioning Engineers – ASHRAE) [19].

It is well documented that IAQ affects the cognitive performance [20-24]. Several experimental studies highlighted that IAQ affects schoolwork. Cross-sectional surveys in 100 classrooms in 100 schools in the USA, based on measured CO<sub>2</sub> levels, showed that poor ventilation reduced the number of pupils managing to pass language and mathematics tests. A linear relationship was found suggesting 3% more pupils passed the tests for every 1 L/s per person increase in ventilation up to 7 L/s per person [21]. Using a multilevel

*questo sistema è stato applicato ad una classe di prova, ma ulteriori approfondimenti dovrebbero tenere conto del meccanismo di ventilazione dell'intero edificio.*

*Negli ultimi anni la diffusione dei sistemi di B.A. a basso costo consente di ridurre l'utilizzo dei sistemi meccanici di ricambio d'aria mediante strategie di ventilazione naturale controllate da una rete di sensori e unità di controllo con logica programmabile. Questi sistemi risultano facili da implementare negli edifici esistenti [13,15].*

*Questo lavoro si concentra sulla definizione del sistema di controllo della ventilazione naturale con un sistema di Building Automation (B.A.) allo scopo di garantire livelli adeguati di IAQ. Il caso studio è un edificio scolastico del 1990, situato nella periferia di Bari (latitudine: 41° 06' 03.1 "N; longitudine: 16° 52' 45.1" E; altitudine: 23 m s.l.m.). A causa della complessità morfologica dell'edificio, questo lavoro si concentra sullo studio dei meccanismi di ventilazione basati principalmente sull'effetto camino dell'atrio centrale dove si affacciano diverse aule e su due vani scala che servono tutti i piani. Diverse simulazioni sono state condotte mediante il software TRNSYS/TRNFLOW [17, 18] combinando simulazioni energetiche dinamiche e flussi di ventilazione tramite un modello di rete del flusso d'aria a parametri concentrati. Le simulazioni hanno mostrato come il progetto del sistema di ventilazione naturale, basato sulla qualità dell'aria e una prestazione più ampia di comfort termo-igrometrico, controllato dai sistemi di B.A., permetta di ottenere adeguati livelli di comfort e IAQ, ottimizzando le portate di ventilazione in relazione alla necessità di ridurre il consumo energetico.*

### 2. IAQ NEGLI EDIFICI SCOLASTICI

*La qualità dell'aria interna (IAQ) svolge un ruolo importante nella progettazione e nella gestione degli edifici scolastici a causa delle elevate condizioni igieniche richieste nei luoghi di lavoro.*

*Gli studenti possono essere considerati una popolazione suscettibile a causa della loro età: infatti, rispetto agli adulti, i bambini sono più vulnerabili agli inquinanti ambientali perché respirano di più, rispetto al loro peso corporeo, e sono anche meno in grado di metabolizzare sostanze chimiche tossiche. Inoltre, considerando una fascia d'età tra 8 e 14 anni, i ragazzi trascorrono quasi un terzo della loro vita a scuola e circa il 70% del loro tempo a scuola all'interno di un'aula [3]. In quanto tali, le aule sono il secondo ambiente interno più importante per i bambini, dopo le loro abitazioni, dove sono esposti a vari inquinanti atmosferici in misura molto maggiore rispetto agli spazi esterni. [4]. Condizioni insufficienti di ricambio d'aria aumentano l'esposizione degli studenti ad*

approach, the effects of classroom ventilation rate and temperature on academic achievement has been estimated in [22]: students' mean mathematics scores were increased by up to eleven points (0.5%) per each 1 L/s per person increase in ventilation rate within the range of 0.9–7.1 l/s per person.

In Italy, the SIDRIA4 and SIDRIA-2 (Studi Italiani sui Disturbi Respiratori nell'Infanzia e l'Ambiente) [25] projects carried out as part of the international project International Study of Asthma and Allergies in Childhood (ISAAC). Within this last survey, the presence of asthma in 9.5% of children and 10.4% of adolescents has been observed during the school hours. The standard value of maximum CO<sub>2</sub> concentration in school, suggested by ASHRAE, was exceeded in 80% of cases and the average of CO<sub>2</sub> measured concentration was equal to 1900 ppm. Monitoring studies carried out in three schools in Turin recorded CO<sub>2</sub> concentrations systematically higher than 1800 ppm, with peaks close to 3000 ppm after about three hours of the students' permanence [26]. Several health and hygiene problems of IAQ can be attributed to the indoor conditions of the buildings. Such problems are added to the low level of energy efficiency of most of the school heritage, but also the energy requalification interventions could cause the aggravation of indoor air quality conditions due to the increased air tightness of the newly installed building components.

The Italian school building heritage in the 97% of the cases is equipped with traditional heating systems that do not provide control of the IAQ; in the 22% of cases it is equipped with cooling systems without mechanical ventilation systems [27, 28]. As consequence, the natural ventilation is generally managed by the users causing in most cases poor air quality conditions in the classrooms. This picture is common worldwide, especially in warmest climate. Almost all studies related to school buildings in the Mediterranean area analysed naturally ventilated schools [29-33] and in few cases the mechanical ventilation systems are installed.

In mechanically ventilated schools, IAQ is not influenced by the outdoor conditions, including location of the school (urban or rural) and climatic conditions (wind speed and direction, outdoor temperatures), as well as on window opening behaviour of pupils and teachers [24]. Demand controlled ventilation and heat recovery significantly improve the energy efficiency of a mechanical ventilation system, however the benefits that can be obtained should be subject of specific technical-economic assessments taking into account not only the efficiency of heat recovery (which depends on the climatic context and the exchange rates of air), but also the global costs of replacement costs (influenced by reduced life cycles of mechanical components), the

*agenti patogeni provenienti da portatori sani o asintomatici, ma anche minore capacità di attenzione e concentrazione durante le ore di lezione [5-9].*

*Alcuni studi europei, come "Health Effects of the School Environment" (HESE) [2] e "School Environment and Respiratory Health of Children" (SEARCH), [1] hanno evidenziato la stretta relazione tra gli inquinanti interni e i sintomi respiratori e allergici. Tale sintomatologia può compromettere in modo significativo la qualità della vita degli studenti e il loro rendimento scolastico. Gli studi HESE3 hanno evidenziato la relazione tra i livelli di CO<sub>2</sub> e il maggior rischio di tosse secca notturna e rinite. Il rischio di queste malattie è 2-3 volte superiore per i bambini esposti ad una concentrazione di CO<sub>2</sub> > 1000 ppm (standard per una buona IAQ proposto dall'American Society of Heating Refrigeration and Air-Conditioning Engineers - ASHRAE) [19].*

*È ben documentato che la qualità dell'aria interna influisce sulle prestazioni cognitive [20-24]. Diversi studi sperimentali evidenziano che la qualità dell'aria negli ambienti interni influenza i compiti scolastici. Studi trasversali in 100 aule della quinta elementare in 100 scuole negli Stati Uniti, basate su livelli misurati di CO<sub>2</sub>, hanno dimostrato che una scarsa ventilazione riduce il numero di alunni che riescono a superare test di lingua e matematica. È stata trovata una relazione lineare in base alla quale il 3% in più di alunni supera i test ogni 1 L/s per persona di aumento della ventilazione fino a 7 L/s per persona [21]. Utilizzando un approccio multilivello, in [22] sono stati stimati gli effetti del tasso di ventilazione dell'aula e della temperatura sul rendimento scolastico: i punteggi medi degli studenti in matematica sono aumentati fino a undici punti (0,5%) per ogni aumento di 1 L/s per persona del tasso di ventilazione nell'intervallo 0,9-7,1 L/s per persona.*

*In Italia, i progetti SIDRIA4 e SIDRIA-2 (Studi Italiani sui Disturbi Respiratori nell'Infanzia e l'Ambiente) [25] sono stati realizzati nell'ambito del progetto internazionale International Study of Asthma and Allergies in Childhood (ISAAC). All'interno di quest'ultimo studio, è stata osservata la presenza di asma nel 9,5% dei bambini e nel 10,4% degli adolescenti durante l'orario scolastico. Il valore standard della concentrazione massima di CO<sub>2</sub> nella scuola, suggerito da ASHRAE, è stato superato nell'80% dei casi e la media della concentrazione misurata di CO<sub>2</sub> era pari a 1900 ppm. I monitoraggi effettuati in tre scuole di Torino hanno registrato concentrazioni di CO<sub>2</sub> sistematicamente superiori a 1800 ppm, con picchi prossimi a 3000 ppm dopo circa tre ore di permanenza degli studenti in aula [26]. Diversi problemi di salute e igiene indotti da scarsa qualità dell'aria interna possono essere attribuiti alle*



operational costs (electricity for fans) and the maintenance costs (filters and ducts cleaning).

### 3. OBJECTIVES AND METHODOLOGY

The objective of this work is the study of a natural ventilation system controlled by BAS within a complex school building with the aim of guarantee adequate IAQ levels in classrooms and energy consumption reduction. The natural ventilation system and the BA logic control are evaluated by dynamic regime with a flow network with concentrated parameters by TRNSYS/TRNFLOW software [17, 18]. The air flow network, for computational simplicity and analysis results, is built by merging into macro areas classrooms with homogeneous orientation characteristics, wind exposure and occupation. The CO<sub>2</sub> is assumed as the key performance indicator of air quality, generally considered an appropriate IAQ indicator for environments characterized by a high crowding [19, 34, 35]. For a correct evaluation of thermo-hygrometric and air quality aspects, the management modality, the occupancy profile, the activities and the consequent metabolic level, as well as the plant and technological equipment are taken into account as elements that strongly influence the performance level.

### 4. THE CASE STUDY

#### 4.1. THE BUILDING DESCRIPTION

The analyzed case study is the “Michelangelo School”, a middle school built in the early 90s. The school building is located in a semi-peripheral area in the south-east of the city of Bari (south of Italy, 1185 heating degree days). The climate is typical of a coastal city of the mediterranean area. The outdoor pollution and noise can be considered low because low-traffic roads are at the boundary. So, it can be argued that IAQ depends mainly on indoor-generated pollutant and that it's possible to operate natural ventilation for the whole school period if the draught risk is avoided and if the heating power is adequate.

The building is morphologically constituted by two slats configured in L and it consists of three levels above ground for a total surface of about 7000 m<sup>2</sup> for about 700 students and 28 classrooms. On the first and the second floors there are classrooms and laboratories, on the raised floor there are administrative offices and spaces for the school community, such as the auditorium and the gym, while in the ground floor there are rooms for specialized teaching,

*condizioni interne degli edifici. Tali problemi si aggiungono al basso livello di efficienza energetica della maggior parte del patrimonio scolastico, ma anche gli interventi di riqualificazione energetica potrebbero causare l'aggravamento delle condizioni di qualità dell'aria interna a causa della maggiore tenuta all'aria dei componenti dell'edificio di nuova installazione. Il patrimonio scolastico italiano nel 97% dei casi è dotato di impianti di riscaldamento tradizionali che non forniscono il controllo della IAQ; nel 22% dei casi è dotato di sistemi di raffreddamento senza sistemi di ventilazione meccanica [27, 28]. Di conseguenza, la IAQ è affidata alla ventilazione naturale generalmente gestita dagli utenti, causando nella maggior parte dei casi cattive condizioni igieniche nelle aule. Questa situazione è comune nel contesto internazionale, specialmente nei climi più caldi. Quasi tutte le pubblicazioni relative agli edifici scolastici dell'area mediterranea analizzano scuole ventilate in modo naturale [29-33] e solo in pochi casi sono installati sistemi di ventilazione meccanica. Nelle scuole con ventilazione meccanica, la IAQ non è influenzata dalle condizioni esterne, incluso l'ubicazione della scuola (urbana o rurale) e le condizioni climatiche (velocità e direzione del vento, temperature esterne), nonché le modalità di apertura delle finestre di alunni e insegnanti [24]. La ventilazione controllata dalle necessità di controllo della qualità dell'aria interna e il recupero del calore migliorano significativamente l'efficienza energetica di un sistema di ventilazione meccanica, tuttavia i benefici conseguibili dovrebbero essere oggetto di specifiche valutazioni tecnico-economiche che tengano conto non solo dell'efficienza del recupero di calore (che dipende dal contesto climatico e dai tassi di ricambio dell'aria), ma anche dei costi globali che tengono conto dei costi di sostituzione (influenzati da cicli di vita ridotti dei componenti meccanici), dei costi operativi (energia elettrica per i ventilatori) e di quelli di manutenzione (pulizia di filtri e canali).*

#### 3. OBIETTIVI E METODOLOGIA

*L'obiettivo di questo lavoro è lo studio di un sistema di ventilazione naturale controllato da un sistema di B.A. all'interno di un complesso scolastico con l'obiettivo di garantire adeguati livelli di IAQ nelle aule e riduzione del consumo energetico. La ventilazione naturale e la logica di controllo con B.A. sono valutati in regime dinamico con una rete di flusso a parametri concentrati mediante il software TRNSYS/TRNFLOW [17,18]. La rete di flusso, per semplificare la sua computazione e l'analisi dei risultati finali, è stata realizzata fondendo in macroaree ambienti con la stessa orientazione, esposizione al vento e profilo di occupazione. La concentrazione di CO<sub>2</sub> è stata assunta come indicatore*

musical laboratories, environments for school-family communication, storage rooms and the guardian's home (Figure 1).

*chiave di prestazione della qualità dell'aria, generalmente considerato appropriato per ambienti caratterizzati da un*

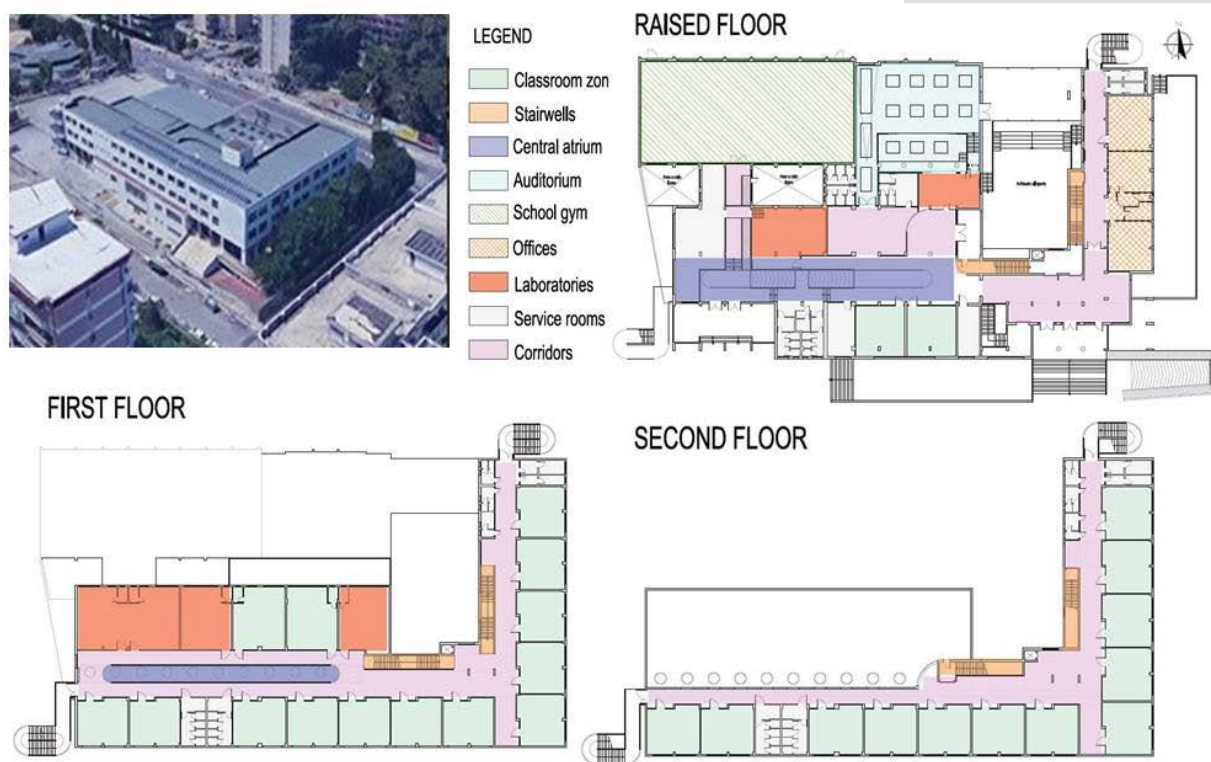


Figure 1. Aerial view of the school and plans.

From a technological point of view, the solutions adopted are typical of the construction period: walls in lightweight clay hollow brick, aluminum window frames with insulating glass (double glazing). In the first and second floor's classrooms, the windows have recently been replaced in aluminum with thermal break and low-e double glazing, in accordance with italian current energy and safety limits, with fixed frames at the bottom, while casement and hopper windows are only in the upper part. The daily inspections in the school building showed that the IAQ control is generally occasional, on the basis of students or teachers' olfactory perception. The heating system is centralized with a combustion heat generator powered by methane gas and cast iron terminals equipped with thermostatic valves in all the classrooms except the gym and auditorium.

The school building is made up of 35 thermal zones and the classrooms conditions have been examined to simplify the airflow network (Figure 2). The main morphological elements of the natural ventilation system are the central atrium (highlighted in blue in the figure 2), on which stand out part of the raised floor classrooms and first floor classrooms (in cyan) and the two service stairwells of all levels (orange).

*elevato affollamento [19, 34, 35]. Per una corretta valutazione degli aspetti termigrometrici e di qualità dell'aria nelle aule, si è definito il profilo di occupazione, le attività e il metabolismo dell'utenza, nonché dotazioni impiantistiche e tecnologiche, elementi che influenzano fortemente il livello di prestazione.*

#### 4. IL CASO DI STUDIO

##### 4.1 DESCRIZIONE DELL'EDIFICIO

*Il caso studio analizzato è la "Scuola Michelangelo", scuola media costruita nei primi anni '90. L'edificio scolastico è situato in un'area semi-periferica a sud-est della città di Bari (sud Italia, 1185 gradi giorno di riscaldamento). Il clima è tipico di una città costiera dell'area mediterranea. L'inquinamento e i rumori esterni possono essere considerati bassi perché le strade circostanti al lotto sono poco trafficate. Quindi, si può sostenere che l'IAQ dipende principalmente da sostanze inquinanti generate all'interno e che è possibile utilizzare la ventilazione naturale per l'intero periodo scolastico se si evita il rischio di correnti d'aria e se la potenza dei terminali di riscaldamento è adeguata.*

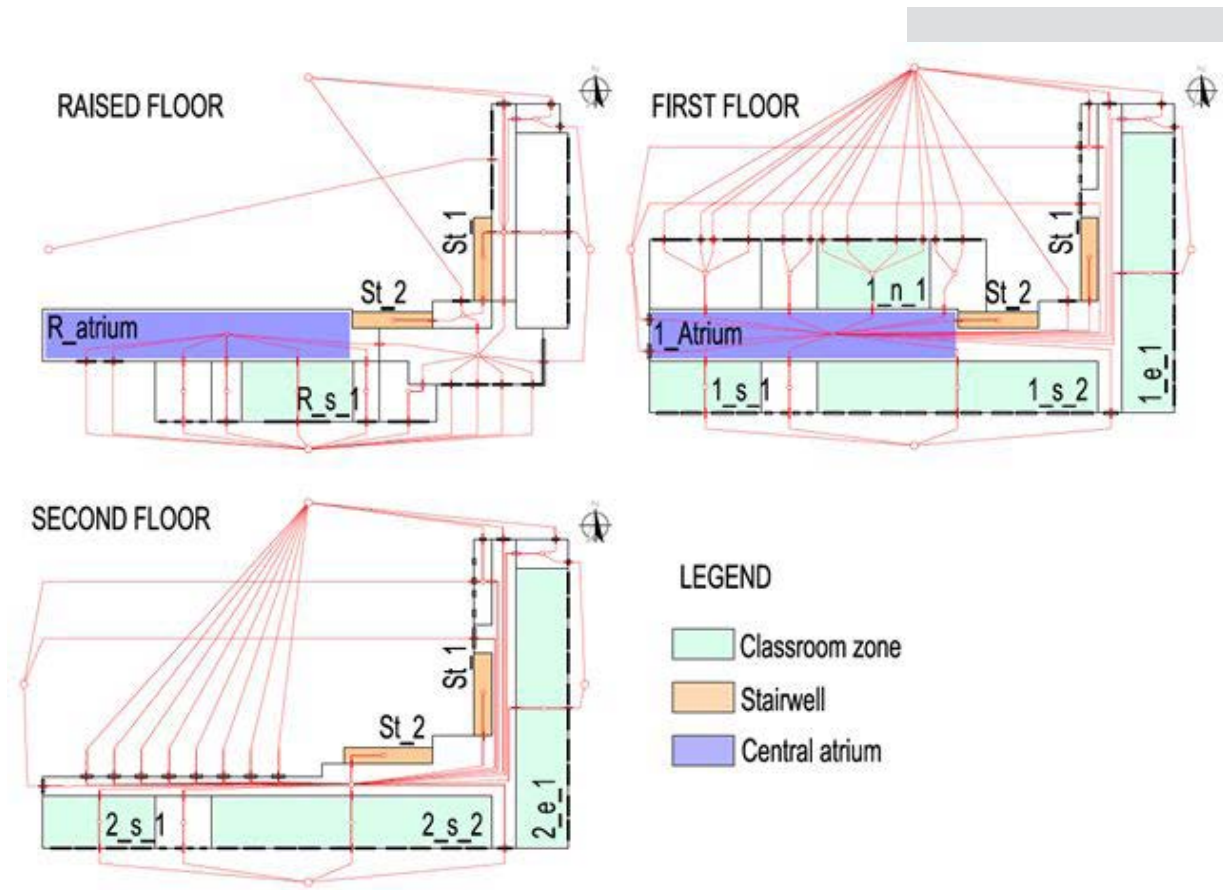


Figure 2. Airflow network and thermal zones for thermofluid dynamics simulations.

## 4.2. SIMULATED CASES

Different scenarios have been analyzed with different modes of natural ventilation. The first scenario is the «as built» case (“Scenario 0”), while the other following analysis have been aimed at finding more effective ways of ventilation and control logics related to the CO<sub>2</sub> maximum concentration threshold (assumed equal to 1000 ppm higher than the external one, constant imposition and equal to 350 ppm). To this aim, various configurations of windows opening in the classrooms and the common spaces have been simulated with the aim of guaranteeing a CO<sub>2</sub> concentration lower than the set limit and a number of air change close to the current legal limit in Italy (3.5 ach for middle schools) [36]. When the heating system is off (that is March 31 - June 15 and September 17 - November 15) the discomfort hours for overheating and undercooling in the classrooms have been calculated according to adaptive thermal comfort theory [34, 37, 39]. Due to the variability of the IAQ parameters of interest, the chosen analysis time step is 15 minutes.

In detail, Scenario 2 involves the application of BAS which regulates the windows opening based on two parameters, such as the CO<sub>2</sub> concentration

L'edificio è morfologicamente costituito da due stecche configurate ad L e si compone di tre livelli fuori terra per una superficie totale di circa 7000 m<sup>2</sup> per circa 700 studenti e 28 aule. Al piano primo e secondo sono ubicate le aule didattiche e i laboratori, al piano rialzato sono ubicati gli uffici dell'amministrazione e gli spazi comuni, come l'auditorium e la palestra, mentre al piano interrato sono ubicati ambienti per insegnamenti specializzati, laboratori musicali, ambienti per i colloqui famiglie-insegnanti, depositi e la casa del custode (Figura 1).

Dal punto di vista tecnologico, le soluzioni adottate sono tipiche del periodo di costruzione: murature in blocchi di mattoni forati in argilla porizzata, infissi in alluminio con vetrocamera. Nelle aule poste al primo e secondo piano, le finestre sono state recentemente sostituite con infissi in alluminio a taglio termico e vetrocamera basso emissivo, in conformità a quanto prescritto con i limiti prestazionali in materia di energia e sicurezza vigenti in Italia, con superfici finestrate fisse nella parte inferiore dell'infisso, mentre aperture a battente e a vasistas sono poste solo nella parte superiore. Dai sopralluoghi giornalieri effettuati si è constatato che il controllo della ventilazione è generalmente occasionale, basato sulla percezione olfattiva degli studenti e degli insegnanti.



and the temperature of the classroom. The window will be open if these two conditions are satisfied:

- CO<sub>2</sub> concentration > 1000 ppm;
- room temperature > 19.9 °C.

This choice is adopted to prevent the opening of the windows in the colder rooms and the increasing of undercooling discomfort, guaranteeing comfort from the IAQ point of view. The four scenarios are summarized in the following Table 1.

SCENARIO	Hopper windows (classroom, external)	Transom windows (classroom, above doorways)	Windows (corridors, 1 <sup>st</sup> and 2 <sup>nd</sup> floor)
Scenario 0	Manual opening at breaks	Always open	Closed
Scenario 0 + B.A.	Maximum automated opening based on CO <sub>2</sub> concentration	Always open	Closed
Scenario 1 + B.A.	Modulated automated opening according on CO <sub>2</sub> concentration	Always open	Opened from 8 am to 3 pm
Scenario 2 + B.A.	Modulated automated opening according on CO <sub>2</sub> concentration and internal temperature	Always open	Opened from 8 am to 3 pm

Table 1. Summary table of ventilation strategy.

## 5. RESULTS

For each scenario, the average CO<sub>2</sub> concentrations of the 8 classrooms and the number of discomfort hours (limited to the actual classrooms' occupation hours) have been analyzed and compared to the effective occupation of the school building (1113 hours).

Tables 2 and 3 show the main results of the simulations, divided into the classrooms zones shown in figure 2. Table 2 shows the average CO<sub>2</sub> concentration and the value of hourly air changes, Figure 3 shows the comparison between the thermal comfort conditions in Classroom 1\_S\_2 in "Scenario 0" and "Scenario 1 + B.A.", while Table 3 adaptive comfort data divided by the overheating and under-cooling risk.

The modelings showed that natural ventilation is mainly due to the stack effect and that the atrium and the two stairwells are essential for the IAQ performance purpose in the classrooms. The outside air, entering from the classrooms on the raised floor and from the classrooms on the first floor, mixes with the unpolluted air present in the distribution spaces, allowing a sufficient dilution of the pollutants for the air exchange in the classrooms on the second floor, to then be expelled to the outside. In particular:

L'impianto di riscaldamento è di tipo centralizzato con un generatore di calore a combustione alimentato da gas metano e terminali in ghisa dotati di valvole termostatiche in tutte le aule ad eccezione della palestra e dell'auditorium. L'edificio scolastico è composto da 35 ambienti riscaldati e le condizioni al contorno delle aule sono state esaminate per semplificare la rete di flusso (Figura 2). I principali elementi morfologici del sistema di ventilazione naturale sono l'atrio centrale (evidenziato in blu nella figura 2), su cui si affacciano le aule

del piano rialzato e del primo piano (in ciano) e le due scale di servizio di collegamento tra i livelli (in arancione).

### 4.2 CASI SIMULATI

Diversi scenari sono stati analizzati con diverse modalità di ventilazione naturale. Il primo scenario è il caso "as built" ("scenario 0"), mentre le analisi successive sono finalizzate alla ricerca di modalità più efficaci di ventilazione e logiche di controllo con riferimento al set point di concentrazione di CO<sub>2</sub> (assunto pari a 1000 ppm superiore a quello esterno, imposto costante e pari a 350 ppm). A tale scopo, sono stati simulati diversi scenari variando la configurazione e la modulazione degli angoli di apertura degli infissi delle aule e degli spazi di connettivo in modo tale da garantire una concentrazione di CO<sub>2</sub> inferiore al limite impostato e un numero di ricambio d'aria in linea con quanto prescritto dalla normativa vigente in Italia (3,5 ach per le scuole medie) [36]. Quando l'impianto di riscaldamento è spento (nel periodo 31 marzo-15 giugno e 17 settembre-15 novembre), le ore di discomfort per surriscaldamento e sottoraffreddamento sono state calcolate secondo la teoria del comfort termico adattativo [34, 37, 39]. A causa della rapida variabilità dei parametri di interesse IAQ, il time-step di calcolo scelto



- the analysis of “Scenario 0” shows that the manual ventilation cause pollution levels above acceptability set limits, for a significant percentage around of 60% of the building’s actual occupation (Table 2). These results are confirmed by the low number average air change per hour during the occupation, lower than the minimum values prescribed by the regulations in force [36, 38]. This performance is generalized on the whole building, but the classrooms on the second floor are more penalized. This result highlights that natural ventilation performed during breaks is not adequate;
- the analysis of the “Scenario 0 + B.A.” shows that the classrooms’ windows opening managed by the BAS leads to an adequate level of CO<sub>2</sub> average concentration, reducing at the same time the low IAQ number of hours (dropped to about 40%). The ventilation surfaces’ balancing absence determines significant performance differences among the different classrooms penalizing those at the first level;
- the analysis of “Scenario 1 + B.A.” shows the improvements due to an adequate modulation of the opening angles of the classroom’s windows, together with the corridor windows opening on the first and second floor, aimed at the balancing of the incoming and outgoing air flow rates. In detail, pollutants average concentrations are around 700 ppm (for a percentage of discomfort hours equal to 28% of actual occupation hours) and the hourly air changes are in line with the prescribed italian regulations [36,38]. The management of natural ventilation flow rates improves the thermal comfort during the non-heating season, achieving lower risks of overheating. However, the renewal air simultaneously increases the risks of undercooling in the coldest days or in the early hours of the morning (Table 2). The classrooms zone located north on the first floor (1\_N\_1) is the zone where this system is less effective,

è pari a 15 minuti. In dettaglio, lo Scenario 2 il sistema di Building Automation modula l’apertura della finestra in base a due parametri, la concentrazione di CO<sub>2</sub> e la temperatura della zona termica. La finestra sarà aperta se queste due condizioni sono contemporaneamente soddisfatte:

- Concentrazione di CO<sub>2</sub> > 1000 ppm;
- Temperatura dell’aula > 19.9 °C.

Questa scelta è stata adottata per impedire l’apertura delle finestre nelle aule più fredde e prevenire l’aumento del discomfort per sottoraffreddamento, garantendo il più possibile la IAQ.

## 5. ANALISI DEI RISULTATI

Per ogni caso simulato, sono state analizzate le concentrazioni medie di CO<sub>2</sub> delle 8 zone termiche e il numero di ore di discomfort (limitate alle effettive ore di occupazione delle aule) e confrontate con l’effettiva occupazione dell’edificio scolastico (1113 ore). I quattro scenari sono riassunti nella seguente Tabella 1.

Le tabelle 2 e 3 mostrano i principali risultati delle simulazioni, suddivise per le zone termiche indicate in Figura 2. La Tabella 2 mostra la concentrazione media di CO<sub>2</sub> e il numero dei ricambi orari, la Figura 3 mostra il confronto tra le condizioni di comfort adattivo nella zona 1\_S\_2 nello scenario “0” e “1 + BA”, mentre la Tabella 3 i dati di comfort adattivo divisi per rischio di surriscaldamento e di sottoraffreddamento.

Le modellazioni hanno dimostrato come la ventilazione naturale sia principalmente dovuta all’effetto camino e che l’atrio centrale e i due vani scala siano essenziali per le prestazioni di IAQ nelle aule.

L’aria esterna, entrante dalle aule al piano rialzato e dalle aule del primo piano, si mescola con l’aria non inquinata presente negli spazi di distribuzione, consentendo una diluizione sufficiente degli inquinanti per il ricambio d’aria nelle aule al secondo piano, per poi essere

SCENARIO 0	Zone R_S_1	Zone 1_S_1	Zone 1_S_2	Zone 1_E_1	Zone 1_N_1	Zone 2_S_1	Zone 2_S_2	Zone 2_E_1
CO2 mean concentration [ppm]	856	1246	1342	1337	1087	1449	1510	1522
Airflow rate [1/h]	-3,13	-2,52	-1,97	-2,06	-1,62	+5,33	+4,23	+4,26
SCENARIO 0 + B.A.								
CO2 mean concentration [ppm]	773	964	914	905	867	847	935	939
Airflow rate [1/h]	-2,71	-1,02	-2,71	-2,73	-0,05	+7,05	+5,36	+5,41
SCENARIO 1 + B.A.								
CO2 mean concentration [ppm]	448	718	718	705	618	771	861	851
Airflow rate [1/h]	-4,94	-3,73	-3,23	-3,46	-3,25	+3,45	+3,04	+3,14
SCENARIO 2 + B.A.								
CO2 mean concentration [ppm]	475	754	662	703	727	771	853	844
Airflow rate [1/h]	-4,79	-3,47	-3,99	-3,40	-2,75	3,13	2,94	3,43

Table 2. Summary results of thermo-fluid dynamics simulations: analysis of the IAQ (“+” flow air entering from inside, “-” entering from outside).

- the “Scenario 2”, hypothesized to reduce the risk of undercooling, leads to a CO<sub>2</sub> concentration in zone 1\_N\_1 equal to 727 ppm, compared to 618 ppm recorded in scenario 1, and the number of air changes also decreases, from 3.25 1/h to 2.75 1/h. The IAQ performance is lower due to the undersizing of the heating terminal in the zone 1\_N\_1, as

espulsa all'esterno. In particolare:  
 • l'analisi dello “Scenario 0” mostra come la ventilazione manuale causa livelli di inquinamento superiori ai limiti di accettabilità, per una percentuale significativa, circa il 60%, dell'effettiva occupazione dell'edificio (Tabella 2). Questi risultati sono confermati dal

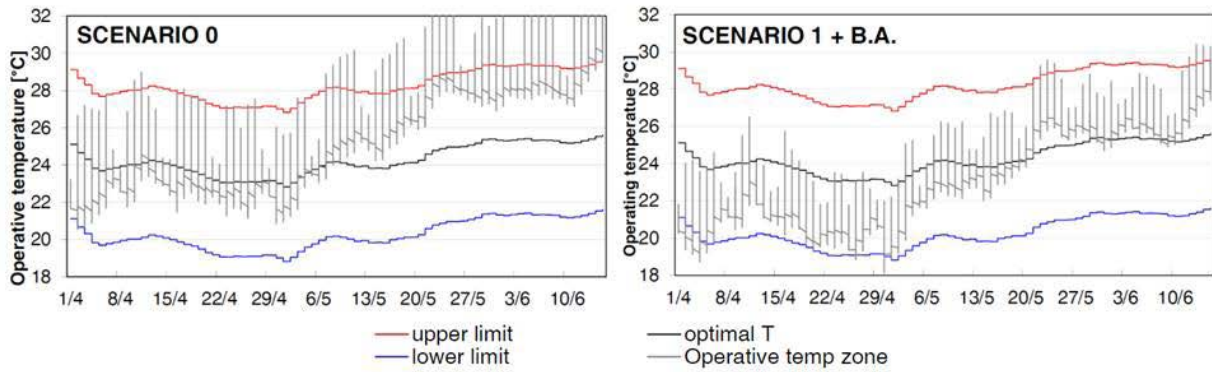


Figure 3. Adaptive thermal comfort in the Zone 1\_S\_2 in the period 01/04-15/06: comparison of “Scenario 0” and “Scenario 1+B.A.”. Upper and lower limits based on II category [34].

SCENARIO 0	Zone R_S_1	Zone 1_S_1	Zone 1_S_2	Zone 1_E_1	Zone 1_N_1	Zone 2_S_1	Zone 2_S_2	Zone 2_E_1	Average	%
01/04 - 15/06	82	7	108	206	20	59	94	192		
17/09 - 15/11	155	52	159	137	19	103	137	121		
over-heating hours	237	59	267	343	39	162	231	313	206	38%
01/04 - 15/06	0	2	0	0	19	1	1	0		
17/09 - 15/11	0	12	0	2	32	3	2	6		
under-cooling hours	0	14	0	2	51	4	3	6	10	2%

SCENARIO 0 + B.A.	Zone R_S_1	Zone 1_S_1	Zone 1_S_2	Zone 1_E_1	Zone 1_N_1	Zone 2_S_1	Zone 2_S_2	Zone 2_E_1	Average	%
01/04 - 15/06	1	1	51	157	3	16	37	136		
17/09 - 15/11	69	26	26	100	2	60	89	77		
over-heating hours	70	27	77	257	5	76	126	213	106	19%
01/04 - 15/06	1	11	0	0	30	3	1	1		
17/09 - 15/11	1	19	19	3	40	8	3	9		
under-cooling hours	2	30	19	3	70	11	4	10	19	3%

SCENARIO 1 + B.A.	Zone R_S_1	Zone 1_S_1	Zone 1_S_2	Zone 1_E_1	Zone 1_N_1	Zone 2_S_1	Zone 2_S_2	Zone 2_E_1	Average	%
01/04 - 15/06	0	0	7	95	0	5	17	98		
17/09 - 15/11	41	4	71	63	0	49	64	56		
over-heating hours	41	4	78	158	0	54	81	154	71	13%
01/04 - 15/06	9	44	3	1	68	12	7	2		
17/09 - 15/11	4	28	3	9	61	16	9	17		
under-cooling hours	13	72	6	10	129	28	16	19	37	7%

SCENARIO 2 + B.A.	Zone R_S_1	Zone 1_S_1	Zone 1_S_2	Zone 1_E_1	Zone 1_N_1	Zone 2_S_1	Zone 2_S_2	Zone 2_E_1	Average	%
01/04 - 15/06	0	0	2	95	0	5	10	98		
17/09 - 15/11	40	4	57	61	0	49	64	56		
over-heating hours	40	4	59	156	0	54	74	154	68	12%
01/04 - 15/06	3	37	3	1	54	11	7	2		
17/09 - 15/11	3	24	4	9	61	16	9	17		
under-cooling hours	6	61	7	10	115	27	16	19	33	6%

Table 3. Summary results of thermofluid dynamics simulations: adaptive thermal comfort analysis in non-heating season (periods 17/09-15/11 and 01/04-15/06).

a consequence the temperature is sometimes lower than 19.9 °C, then the B.A. system closes the window without taking into account the IAQ leading to an increase in CO<sub>2</sub> concentration. By carrying out a study of adaptive comfort in the non-heating season the double logic set leads to a slight decrease both in the hours of overheating and of the hours of undercooling. Furthermore, there is a reduction of the undercooling conditions, from 129 hours of scenario 1 to 115 hours of scenario 2.

## 6. CONCLUSIONS

The designed natural ventilation control logics guarantee adequate IAQ conditions in complex buildings, such as the school buildings. This work shows that the management of windows opening by the users can be not effective, both because the smell is susceptible to adaptation in a short time to conditions of poor IAQ, and both because the user is generally unaware and he cannot manage the overall ventilation mechanism of the building. The great increasingly usage of low-cost BAS and the possibility to customize the control logic can give a lot of development of this type of application, implementing controls that take into account a complex set of indoor and outdoor parameters, such as climatic conditions and air pollution. Future developments of this research will focus on refining the control logic in order to differentiate the intervention priority (for IAQ or thermal comfort) depending on the heating system activation and the climatic conditions.

## 7. REFERENCES

- [1] AA.VV., School Environment and Respiratory Health of Children. International research project report within the programme “Indoor air quality in European schools: Preventing and reducing respiratory diseases”. Szentendre, Hungary: The Regional Environmental Center for Central and Eastern Europe, 2010.
- [2] AA.VV., Health Effects of School Environment - Final Scientific Report. 2006.
- [3] Coley D. A., Beisteiner A., Carbon Dioxide Levels and Ventilation Rates in Schools, “International Journal of Ventilation”, 1:1 2002, 45-52, DOI: 10.1080/14733315.2002.11683621
- [4] Bakó-Biró Z. [et al.], Ventilation rates in schools and pupils’ performance, “Build. Environ.” 48 (2012) 215–223, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.018>.
- [5] S.Marini; L.Morawska; F.C.Fuoco, Individual dose and exposure of Italian children to ultrafine particles, “Science of The Total Environment”, 438 (2012) 271-277, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.074>.
- [6] Peled R., Air pollution exposure: who is at high risk?, “Atmos. Environ.” 45 (2011), 1781–1785.
- [7] Selgrade M.K [et al.], Assessing the health effects and risks associated with children’s inhalation exposures—asthma and allergy. “J. Toxicol. Environ. Health A” 71 (2008), 196–207.
- [8] Faustman E.M. [et al.], Mechanisms underlying children’s susceptibility to environmental toxicants, “Environ. Health Perspect.” 2000;108 (Suppl. 1):13-21.
- [9] Suk W. [et al.], Environmental hazards to children’s health in the modern world, “Mutation Research” 2003;544:235-42.
- [10] Wang Z.; Wang L., Intelligent control of ventilation system for energy-efficient buildings

basso numero di ricambi d’aria medi orari durante l’occupazione, inferiori ai valori minimi prescritti dalle normative vigenti [36,38]. Queste prestazioni sono generalizzate sull’intero edificio, più accentuate nelle aule al secondo piano. Questo risultato evidenzia che la ventilazione naturale effettuata durante le pause non risulta adeguata;

- l’analisi dello “Scenario 0 + B.A.” mostra come l’apertura degli infissi nelle aule gestita dal sistema di B.A. potrebbe portare ad un adeguato livello di concentrazione media di CO<sub>2</sub>, riducendo allo stesso tempo il numero di ore di scarsa IAQ (sceso a circa il 40%). L’assenza di bilanciamento delle superfici di ventilazione determina notevoli differenze di portata tra le diverse aule penalizzando quelle al primo piano;
- l’analisi dello “Scenario 1 + B.A.” mostra come un’adeguata modulazione degli angoli di apertura degli infissi delle aule, unitamente all’apertura di alcuni infissi negli spazi di connettivo al primo e secondo piano, consenta il bilanciamento delle portate d’aria in entrata e in uscita. In dettaglio, la concentrazione media di inquinante è pari a 700 ppm (per una percentuale di ore di discomfort pari al 28% delle ore di occupazione effettive) e i ricambi orari sono in linea con le normative italiane [36,38]. La gestione delle portate di ventilazione naturale ha portato a miglioramenti nel comfort termico durante la stagione di non riscaldamento, ottenendo minori rischi di surriscaldamento. Tuttavia, l’aria di rinnovo può contemporaneamente aumentare i rischi di sottoraffreddamento nei giorni più freddi o nelle prime ore del mattino (Tabella 2). Nel caso di studio, la zona situata a nord del primo piano (1\_N\_1) e quindi quella più fredda, è la zona in cui questo sistema risulta meno efficace;
- lo “Scenario 2+B.A.”, ipotizzato per ridurre il rischio di sottoraffreddamento, ha portato ad una concentrazione di CO<sub>2</sub> nella zona 1\_N\_1 pari a circa 727 ppm, rispetto a 618 ppm registrati nello scenario 1, e anche il numero di ricambi d’aria è diminuito, da 3,25 1/h a 2,75 1/h. Le prestazioni di IAQ risultano inferiori a causa del sottodimensionamento del terminale di riscaldamento nella zona 1\_N\_1, di conseguenza la temperatura talvolta tende a scendere sotto i 19,9 °C, il sistema di B.A. chiude l’infisso indipendente dalla IAQ portando ad un aumento della concentrazione di CO<sub>2</sub>. Effettuando uno studio sul comfort adattativo nella stagione di non riscaldamento la logica del doppio set comporta una leggera diminuzione sia nelle ore di surriscaldamento che nelle ore di



- with CO<sub>2</sub> predictive model,”IEEE Transactions on Smart Grid”, vol. 4, no. 2, pp. 686–693, 2013.
- [11] Castilla M. D. M. [et al.], A multivariable nonlinear mpc control strategy for thermal comfort and indoor-air quality, in IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IEEE, 2013, pp. 7908–7913.
- [12] Sun B. [et al.], Building energy management: Integrated control of active and passive heating, cooling, lighting, shading, and ventilation systems, IEEE Transactions on automation science and engineering, vol. 10 (2013), no. 3, pp. 588–602.
- [13] Dell’Osso G. R. [et al.], Control strategies of the Natural Ventilation for Passive Cooling for an Existing Residential Building in Mediterranean Climate. In proceedings of: 36th AIVC Conference “Effective ventilation in high performance buildings”, Madrid, Spain, 23-24 September 2015. pp 406-415.
- [14] Lopez-Gonzalez L. M. [et al.], Update of energy performance certificates in the residential sector and scenarios that consider the impact of automation, control and management systems: A case study of la rioja, “Applied Energy”, vol. 178 (2016), pp. 308–322.
- [15] Donulgeropoulos T., Impact of Building Automation and Energy Efficiency Measures on K-12 School ROI. Schneider Electric White Paper, 2015.
- [16] Stazi F.[et al.], Indoor air quality and thermal comfort optimization in classrooms developing an automatic system for windows opening and closing. “Energy and Buildings” 139 (2017) 732–746.
- [17] Klein S. [et al.], “Trnsys manual,” University of Wisconsin, 1998.
- [18] TRNFLOW Manual, A module on an air flow network for coupled simulation with TYPE 56 (multi-zone building of TRNSYS).
- [19] ASHRAE, Standard 62-99: Ventilation for acceptable indoor air quality. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Atlanta, USA, 1999.
- [20] Wargoeki P.; Wyon D.P., Ten questions concerning thermal and indoor air quality effects on the performance of office work and schoolwork. “Building and Environment” 112 (2017); 359-366.
- [21] U. Haverinen-Shaughnessy, D. Moschandreas, R. Shaughnessy, Association between substandard classroom ventilation rates and students’ academic achievement, “Indoor Air” 212 (2011) 121-131.
- [22] Shaughnessy U. H.; Shaughnessy R., Effects of classroom ventilation rate and temperature on students’ test scores, PloS One 10 (8) (2015) e0136165, <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0136165>.
- [23] Mendell M.J.; Heath G. A., Do Indoor Pollutants and Thermal Conditions in Schools Influence Student Performance? A Critical Review of the Literature. “Indoor Air Journal”, vol. 15 (2005), pp. 27-32.
- [24] Jie Gao [et al.], Ventilation system type, classroom environmental quality and pupils’ perceptions and symptoms, “Building and Environment” 75 (2014) 46-57.
- [25] Ministero della Salute - Global Alliance Against Chronic Respiratory Diseases-Italy (GARD-I). La qualità dell’aria nelle scuole e i rischi per malattie respiratorie e allergiche. Quadro conoscitivo sulla situazione italiana e strategie di prevenzione. In: [www.salute.gov.it/imgs/C\\_17\\_pubblicazioni\\_1892\\_allegato.pdf](http://www.salute.gov.it/imgs/C_17_pubblicazioni_1892_allegato.pdf). 2013.
- [26] Fontanone R.; Starnini F., Qualità dell’aria indoor negli edifici scolastici. Caso studio di due Scuole elementari di Torino. Tesi di laurea in Architettura, Politecnico di Torino, Facoltà di Architettura I, Relatore Prof.: G. Peretti, 2002.
- [27] CRESME Ricerche. Il mercato italiano dell’installazione impianti in edilizia 2018-2021. 2018.
- [28] CRESME Ricerche Rapporto RIUSO03 Ristrutturazione edilizia, riqualificazione energetica, rigenerazione urbana. (2014)
- [29] Almeida R.M.S.F.; Peixoto de Freitas V., Indoor environmental quality of classrooms in SouthernEuropean climate. “Energy and Buildings” 81 (2014) 127–140.
- [30] Dorizas P.V. [et al.], An integrated evaluation study of the ventilation rate, the exposure and the indoor air quality in naturally ventilated classrooms in the Mediterranean region during spring. “Science of the Total Environment” 502 (2015) 557–570.
- [31] Stabile L. [et al.], Effect of natural ventilation and manual airing on indoor air quality in naturally ventilated Italian classrooms, “Building and Environment” 98 (2016) 180-189.
- [32] Santamouris M. [et al.], Experimental investigation of the air flow and indoor carbon dioxide concentration in classrooms with intermittent natural ventilation, “Energy Build.” 40 (2008) 1833-1843.
- [33] Duarte R. [et al.], Classroom ventilation with manual opening of windows: Findings from a two-year-long experimental study of a Portuguese secondary school, “Building and Environment” 124 (2017) 118-129.
- [34] EN15251:2007, European standard on indoor environmental input parameters for design

sottoraffreddamento. Inoltre, vi è una riduzione delle condizioni di sottoraffreddamento, da 129 ore dello “Scenario 1+B.A.” a 115 ore dello “Scenario 2+B.A.”.

## 6. CONCLUSIONI

*Le logiche di controllo della ventilazione naturale progettate garantiscono condizioni di IAQ adeguate in edifici complessi, come gli edifici scolastici. Questo lavoro mostra come la gestione dell’apertura degli infissi da parte degli utenti risulta non essere efficace, sia perché la percezione olfattiva risulta suscettibile di adattamento in breve tempo a condizioni di scarsa IAQ, sia perché l’utente è generalmente inconsapevole e non può gestire l’intero meccanismo di ventilazione dell’edificio. L’utilizzo sempre più diffuso di sistemi di B.A. a basso costo e la possibilità di modulare la logica di controllo possono dare sviluppo a queste tipologie di applicazioni, implementando controlli che tengano conto di una serie complessa di parametri sia indoor che outdoor, come condizioni climatiche ed inquinamento atmosferico. I futuri sviluppi di questa ricerca si concentreranno sul perfezionamento della logica di controllo al fine di differenziare la priorità di intervento (IAQ o comfort termico) a seconda dell’attivazione del sistema di riscaldamento e delle condizioni climatiche.*



and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics.

- [35] EN 13779:2007, Ventilation for non-residential buildings - Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems.
- [36] Decreto Ministeriale 18 dicembre 1975 Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica, ivi compresi gli indici di funzionalità didattica, edilizia ed urbanistica, da osservarsi nella esecuzione di opere di edilizia scolastica. In: SO alla GU 2 febbraio 1976 n. 29.
- [37] Nicol J.F.; Humphreys M.A., Thermal comfort as part of a self-regulatory system. In Proceedings of: CIB Symposium on Thermal Comfort, Building Research Establishments. Watford, UK, 1972.
- [38] UNI 10339:1995, Impianti aeraulici a fini di benessere.
- [39] Fergus Nicol; Michael Humphreys, Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN15251, "Building and Environment" 45 (2010) 11–17.