

Edifici scolastici sostenibili, progetto-gestione-monitoraggio: risultati e criticità. Il caso studio della Scuola Media "L. Orsini", Imola

RICERCA E
SPERIMENTAZIONE/
RESEARCH AND
EXPERIMENTATION

Giacomo Chiesa, Mario Grosso,
Dipartimento di Architettura e Design DAD, Politecnico di Torino, Italia

giacomo.chiesa@polito.it
mario.grosso@polito.it

Abstract. Il contributo analizza, a sette anni dalla fine lavori, il caso studio della Scuola Media «L.Orsini» di Imola. Questo edificio scolastico sostenibile è stato interessato sin dal progetto preliminare da un approccio innovativo, nato dall'integrazione di saperi differenti anche grazie al ricorso della figura del consulente energetico-ambientale. Il paper descrive e analizza i risultati e le criticità che si sono affrontati anche nelle fasi successive di gestione e monitoraggio dei sistemi impiantistici integrati con l'edificio, resi di particolare interesse dall'elevata complessità energetico-ambientale.

Parole chiave: Edificio scolastico sostenibile, Lezioni apprese, Integrazione tecnologica, Raffrescamento passivo, Monitoraggio

Introduzione

Nel corso degli anni si è progressivamente rafforzata la necessità di integrare l'iter progettuale delle opere pubbliche con criteri di sostenibilità ambientale e risparmio energetico, come peraltro stabilito dalla Direttiva EPBD/2010/31/UE, che fissa un target di *Near Zero Energy Buildings* (NZEB) per la costruzione di nuovi edifici pubblici dal 2018. Questa necessità è particolarmente sentita nell'ambito della progettazione e della gestione in esercizio degli edifici scolastici: i luoghi dove si formano i cittadini del futuro e che assumono, per loro stessa natura, una forte valenza educativa in quanto modello per la cittadinanza. L'applicazione sul campo di questo obiettivo ha dovuto affrontare, tuttavia, numerose problematiche, sia teoriche sia applicative, che necessitano di continui rimandi a buone pratiche. Infatti, per poter ottenere un elevato grado di sostenibilità, è necessario riuscire a integrare, sin dalle fasi metaprogettuali, i diversi saperi e le diverse modalità operative che caratterizzano l'iter progettuale. Questo comporta una diversa concezione del progetto e del ruolo dell'architetto, in un'ottica che conduce all'espletamento delle competenze professionali da modalità implicite a esplicite (Oxman, 2006). Al contempo, i diversi casi emble-

matici costruiti in questi anni, portano la ricerca ad interessarsi non soltanto delle strategie progettuali, ma anche allo studio del funzionamento degli edifici scolastici sostenibili in *operational rating*. Campo di indagine che si rivela di fondamentale importanza per poter migliorare, da un lato, le performance di esercizio, dall'altro, le modalità di progettazione di futuri edifici, in particolare rispetto alle modalità di integrazione di tecnologie e sistemi edificio-impianto, tenendo conto di dell'analisi critica di esperienze pregresse, che evidenzia errori e opportunità.

L'articolo cerca di affrontare questa tematica, attraverso il caso studio rappresentato dall'edificio della Scuola Media «L. Orsini» di Imola, esempio emblematico di un processo di progettazione e costruzione sostenibile, avvenuto tra il 2003, anno del progetto preliminare, e il 2008, anno di fine lavori (Grosso, 2011; Dal Fiume et al., 2009).



Sustainable school buildings: design-management-monitoring, results and weaknesses.
The case study of the High School "L. Orsini", Imola

Abstract. The paper analyses, seven years after the completion of construction works, the case study of the High School "L.Orsini" in Imola (BO). This sustainable school building was characterised since the design program phase by an innovative approach, based on integration of the various disciplines involved in building design as well as the contribution of a new professional figure, the energy and environmental consultant. This paper describes and analyses results and critical issues from the management and monitoring phases, with focus on the integration between technical systems and building. The high complexity of the applied technical building systems makes this case study of particular interest.

Keywords: Sustainable school building, Lessons learned, Technology integration, Passive cooling, Energy and environmental monitoring



01 | Pianta del piano terra della scuola media "L. Orsini" di Imola. Estratto dalla tavola As Built
Ground floor plan of the school building "L. Orsini" in Imola (As Built)

Obiettivi, tecnologie e progettazione energetica

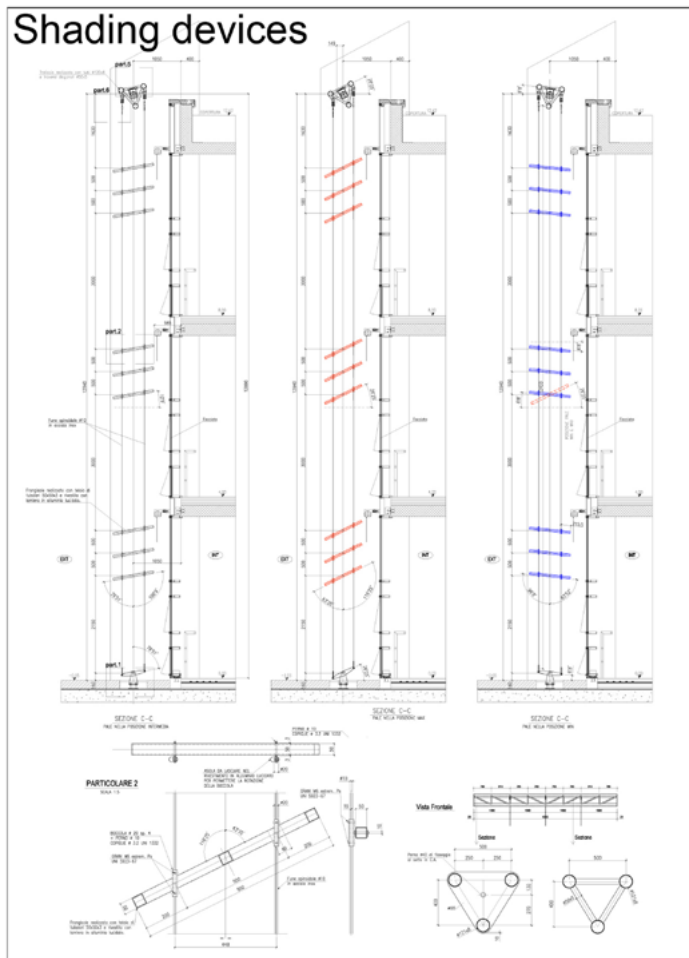
La Scuola Media «L. Orsini», sita nel quartiere Pedagna a Imola, è stata oggetto di un'attenta e innovativa progettazione, capace di integrare le diverse anime e i diversi saperi tecnici dell'architettura e dell'ingegneria, al fine di dare origine a un edificio che fosse, da un lato, perfettamente funzionale, dall'altro, modello di sostenibilità per la cittadinanza. Per poter raggiungere questo obiettivo, fortemente voluto dall'amministrazione comunale, le diverse figure professionali si sono interfacciate sin dal meta progetto, riuscendo a costituire un organismo edilizio-impiantistico innovativo sotto numerosi aspetti, così come ricorda il Responsabile del Settore Opere Pubbliche del Comune di Imola (Dal Fiume et al., 2009). Le diverse scelte progettuali e realizzative sono state, infatti, verificate dal punto di vista prestazionale e ambientale nel corso di tutto il processo. In particolare le innovazioni hanno riguardato le tecnologie costruttive, i materiali, la distribuzione delle funzioni, l'utilizzo di fonti rinnovabili, l'integrazione combinata di sistemi meccanici e passivi, l'integrazione di diverse tecnologie volte al contenimento dei consumi energetici e all'aumento dell'efficienza, l'attenzione alla manutenzione, al riciclaggio e allo smaltimento dei rifiuti, il processo di cantiere e la predisposizione di sonde per un successivo monitoraggio della struttura. L'intervento, sviluppato all'interno di un lotto adibito a parco urbano, si sviluppa su tre piani fuori terra e uno interrato, al fine di contenere il consumo di suolo verde, ed è dimensionato per accogliere 425 alunni. L'articolazione formale dell'edificio è stata sviluppata al fine di ottimizzare la captazione della radiazione solare, utilizzata sia per massimizzare gli apporti gratuiti invernali negli ambienti adibiti ad aula, sia per aumentare le prestazioni

Introduction

Over the years, a need to integrate the design process of public works with criteria of environmental sustainability and energy saving has been gradually strengthened worldwide and, particularly, in Europe, where the EPBD/2010/31/EU set a target of Near Zero Energy Buildings (NZEB) for the construction of new public buildings by 2018. This challenge is particularly important to school buildings for both design and operation phases. In fact, school buildings are places wherein citizens of the future are formed, and which have, by their very nature, a strong educational value acting as a model for citizenship. Application of this objective has faced, however, numerous problems, both theoretical and practical, needing constant references to good practices. In order to achieve a high level of sustainability, it is es-

sential to integrate, since the design program stage, all different knowledge and operating modes characterising the design process. This involves a different conception of a project and the role of architects, with a fulfillment of professional skills from implicit to explicit mode (Oxman, 2006). At the same time, several case studies built in recent years have led researchers to focus not only on design strategies, but also on the study of sustainable school buildings in *operational performance rating*. This field of study is particularly important in order to improve the performance of both building operation and design phases with focus on integration of technical building systems and architecture, taking critical analyses of past experiences into account by highlighting their opportunities and weaknesses. The article addresses this issue through

Shading devices



an analysis of a case study represented by the High School "L. Orsini" in Imola, an emblematic example of sustainable design and construction, which occurred between 2003, year of the preliminary draft, and 2008, year of completion of construction works (Grosso, 2011; Dal Fiume et al., 2009).

Objectives, technologies and energy design

The High School "L. Orsini", located in the Pedagna district in Imola, was characterised by an accurate and innovative design process integrating different architectural and engineering figures and technical knowledge, in order to design a building that was fully functional as well as a model of sustainability for citizenship. In order to achieve this goal, strongly required by the Municipality, different professionals were engaged since the design pro-

gram in a collaborative process aimed at conceiving an innovative building-equipment system as mentioned by the Head of the Public Works' Office of the City of Imola (Dal Fiume et al., 2009). Various design options were assessed from the performance and environmental point of views during the entire process. In particular, innovation involved construction technologies, materials, functions' distribution, use of renewable sources, integration between mechanical and passive systems aimed at increasing energy efficiency, attention to maintenance and to waste disposal and recycling, design and installation of the monitoring sensors' system.

"Orsini" school building is located in a lot used as a city park and has three stories plus a basement; it was designed to accommodate 425 students. The shape of the building was

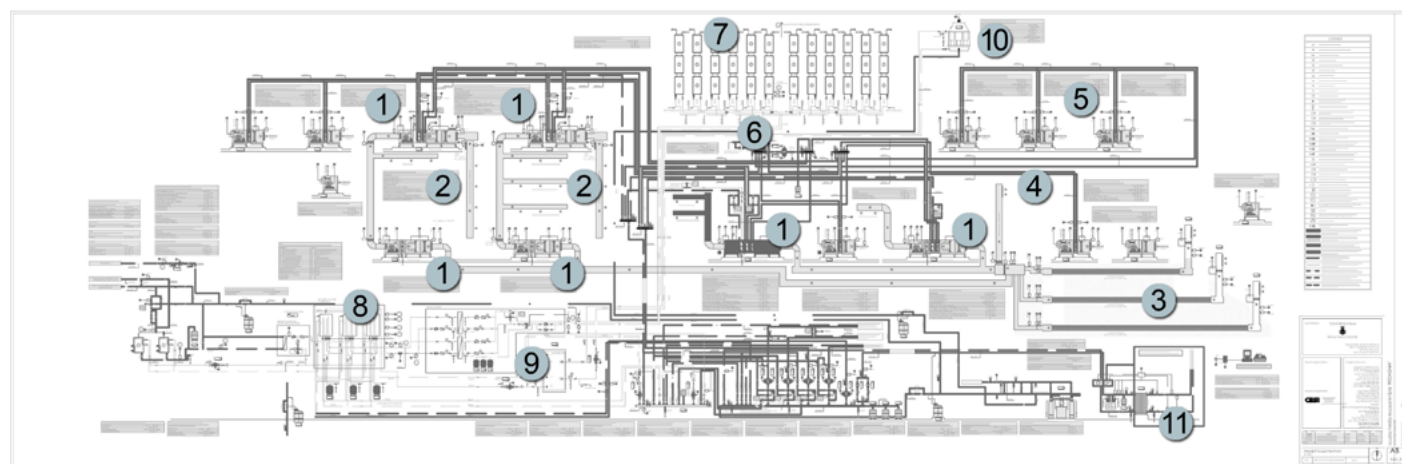
delle componenti solari attive del complesso sistema impiantistico integrato. I due corpi di fabbrica, uniti da un atrio vetrato che ricopre diverse funzioni architettonico-ambientali, seguono l'asse E-O, per quanto il corpo sito più a Nord si apra a ventaglio verso Est. La facciata Sud ospita le aule, mentre a Nord sono dislocati i laboratori, gli uffici e i diversi servizi complementari. L'involucro è prevalentemente opaco sulla facciata Nord, mentre verso Sud grandi finestre a tutta altezza sono frammentate da corpi aggettanti opachi che ospitano i collegamenti verticali degli impianti, unendo la copertura con il piano tecnico interrato, e reggono il sistema di *Solarwall*® integrato in facciata. Tra detti corpi è inserito un sistema meccanico, operabile stagionalmente, che supporta grandi lamelle orientabili con funzione schermante, integrato da tende a rullo (Fig. 2). L'isolamento naturale impiegato, costituito da sughero e fibra di legno, permette all'edificio di superare di misura la normativa vigente, soprattutto considerando l'anno di realizzazione/progettazione, e raggiungendo nella parete Nord una trasmittanza di $0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$. La copertura è ventilata al fine di disperdere il calore accumulato nel corso delle giornate estive. Si è posta particolare attenzione al rispetto della normativa vigente sull'isolamento acustico, adottando otto diverse tipologie di parete per massimizzare le performance nei diversi accostamenti funzionali e prediligendo modalità di posa a secco. I corpi illuminanti installati nelle aule sono stati oggetto di attenta progettazione, completata da un'analisi CFD dei flussi d'aria nel sistema aula-atrio volta a verificarne la compatibilità con il sistema di raffrescamento notturno della massa edilizia. Le lampade sospese assolvono, infatti, a diverse funzionalità: illuminazione artificiale a compensazione di quella naturale tramite appositi fotosensori, distribuzione dell'aria trattata meccanicamente e miglioramento della fonoassorbenza. Il sistema illuminotecnico è inoltre dotato di sensori di presenza per evitare sprechi. Grande attenzione è stata posta sulla progettazione dei sistemi di climatizzazione, in un'ottica volta all'integrazione tecnologica e bioclimatica del sistema edificio-impianto. In particolare si è adottato un approccio diretto a massimizzare il grado di integrazione tra i diversi sistemi di riscaldamento, raffrescamento e ventilazione dei locali. La Fig. 3 mostra l'articolato sistema impiantistico progettato per la scuola.

Gli impianti trovano localizzazione in copertura e nel piano interrato. In particolare, in copertura sono localizzati l'impianto fotovoltaico da 20kWp, il sistema a collettori solari sottovuoto, i torrini di estrazione dell'aria dall'atrio, la presa d'aria esterna delle UTA e due unità di trattamento aria dedicate al sistema a *Solarwall*®. Al piano interrato sono localizzate le ulteriori quattro UTA collegate al sistema a condotti geotermici. Inoltre, la scuola è dotata di un impianto di riscaldamento connesso al teleriscaldamento, a cui si aggiunge l'uso dell'impianto meccanico di ventilazione che permette di trattare la componente latente. Nel periodo di riscaldamento le UTA utilizzano, a seconda delle condizioni al contorno, l'aria pre-trattata dai condotti geotermici, miscelata con aria esterna, o quella riscaldata nel collettore ad aria in facciata (circa 268 m^2). Al sistema si aggiungono 70 m^2 di collettori solari termici per la produzione di ACS, che, in aggiunta, integrano, in inverno, il sistema a pannelli radianti a pavimento e, in estate, la produzione di acqua refrigerata tramite sistema ad assorbimento per il raffrescamento dei locali amministrativi.

I solai, in calcestruzzo armato pre-teso, sono lasciati a vista al fine di fungere da massa termica per massimizzare il funzionamento

mentre e miglioramento della fonoassorbenza. Il sistema illuminotecnico è inoltre dotato di sensori di presenza per evitare sprechi. Grande attenzione è stata posta sulla progettazione dei sistemi di climatizzazione, in un'ottica volta all'integrazione tecnologica e bioclimatica del sistema edificio-impianto. In particolare si è adottato un approccio diretto a massimizzare il grado di integrazione tra i diversi sistemi di riscaldamento, raffrescamento e ventilazione dei locali. La Fig. 3 mostra l'articolato sistema impiantistico progettato per la scuola.

03 |



03 | Schema generale del sistema impiantistico della scuola media "L. Orsini" di Imola. Elaborazione dalla tavola degli As Built
HVAC system overview plan of the school building "L. Orsini" in Imola (As Built)

- | | | | |
|--------------|-----------------------|------------------------|--|
| 1. AHU | 4. External air inlet | 7. Solar panels | 10. Indirect evaporative cooling tower |
| 2. Solarwall | 5. Exhausted air fan | 8. Solar storage tank | 11. District heating |
| 3. EAHX | 6. Heat recovery | 9. Backup water heater | |

del sistema di raffrescamento naturale notturno, previsto nel periodo estivo. L'aria, entrando da specifiche aperture motorizzate, lambisce i solai delle aule, mossa dal gradiente di temperatura tra interno ed esterno e dall'effetto camino indotto dalla stratificazione delle temperature nell'atrio vetrato centrale. Specifiche griglie coibentate acusticamente permettono il passaggio dell'aria tra le aule e l'atrio, mentre alcuni torrini, posti in copertura, ne facilitano la fuoriuscita all'esterno. Il sistema è stato ottimizzato tramite simulazioni CFD dei flussi in condizioni tipo.

Monitoraggi e analisi di funzionamento

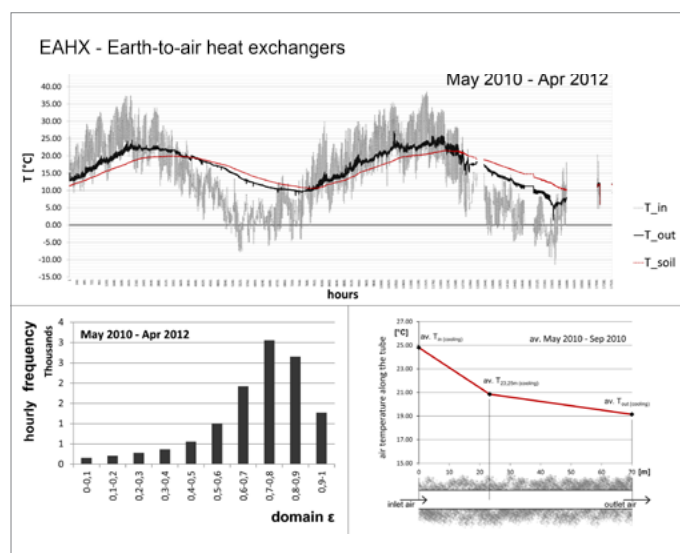
La scuola è stata oggetto di un monitoraggio energetico-ambientale volto a verificare il funzionamento e le modalità di ottimizzazione dei diversi sistemi impiantistici installati. Attualmente, si è studiato il funzionamento dei sistemi a condotti geotermici orizzontali ad aria e si è verificato il funzionamento del sistema di ventilazione naturale controllata notturno della massa.

Sistema EAHX (Earth-to-Air Heat Exchanger)

Il sistema a tubi interrati è composto da tre campi distinti, che contano 12-12-8 tubi paralleli della lunghezza di circa 70 m, che distano, rispettivamente, 6, 30 e 6 metri dall'edificio. Ogni campo è organizzato in: testa di captazione, camera di presa, tubo collettore di distribuzione, condotti paralleli dal diametro di 0.25 m e distanti 1.1 m, tubo di raccolta collegato ad una camera di condensazione, canale di raccordo. In aggiunta, è presente una camera di miscelazione dell'aria proveniente dai diversi campi prima dell'immissione nelle UTA. La progettazione del sistema è avvenuta tramite

conceived to optimise uptake of solar radiation as a source of direct heat gain in winter for classrooms as well as of energy collection for thermal water solar systems on roof and Solarwall® elements on the south façade. The school building is composed by two bodies linked by a glazed atrium placed along the E-W axis, even if the body facing north opens like a fan towards the east. The atrium exerts various architectural-environmental functions, i.e., horizontal and vertical distribution, buffer space, stack-driven ventilation. The Southern body houses classrooms, while in the North side are located laboratories, offices and other complementary services. The building envelope is mostly opaque in the façade facing north, while, to the south, large floor-to-ceiling windows are fragmented by opaque vertical wall supporting the

Solarwall® system and embedding vertical air ducts which connect batteries of Air Handling Units (AHU) from the technical basement to the roof. A shading system made of large metal blades movable mechanically in two position according to seasons (winter and summer) is located between the opaque elements in front of the windows and integrated by rolling blinds (Fig. 2). Coat insulation layers are made of natural material, i.e., cork and wood fibres, and dimensioned to exceed standard transmittance requirements: 0.14 W/m²K on the North wall, a considerable performance considering the year of construction/design of this building. The roof is ventilated in order to disperse heat accumulated during summer. Designers paid particular attention to compliance with regulations on sound insulation, using eight different types of wall to maxi-



il software GAEA. Si ricorda come sia possibile progettare sistemi EAHX anche tramite modalità di calcolo dinamiche, eseguibili con programmi di simulazione energetica quali *Energy+* e *TRNSYS*.

Successivamente, è stata condotta una campagna di monitoraggio (Chiesa et al., 2014), basata su un'elaborazione della metodologia proposta in altre ricerche scientifiche (Pfaffert, 2003). La Fig. 4 mostra i valori delle temperature dell'aria esterna, dell'aria in uscita dai condotti e del terreno nel corso del periodo Maggio 2011-Aprile 2012.

L'analisi dei dati ha permesso di evidenziare alcune differenze nel funzionamento dei tre campi rispetto a quanto previsto in fase di progettazione. Infatti, le velocità effettivamente misurate nei canali sono risultate minori rispetto a quelle previste in fase di progetto. Questa diversità è stata parzialmente ridotta tramite un intervento sui ventilatori di tiraggio delle UTA. Le performance del sistema si sono rivelate decisamente elevate. L'aria pre-trattata dai condotti interrati subisce una differenza di temperatura che arriva anche a superare i 15°C. L'efficacia dello scambio, calcolata utilizzando la formula di Scott, Parson and Koehler's (eq. 1), mo-

04 | Sintesi dei risultati del monitoraggio del sistema condotti interrati installato nella scuola media. In alto sono riportate le temperature dell'aria in ingresso e uscita dal primo campo di tubi, comparate con la temperatura del terreno (medie orarie). I dati visualizzati si rifanno al periodo Maggio 2011-Aprile 2012; il diagramma in basso a sinistra classifica i valori orari dell'efficacia del primo campo interrato nel periodo Maggio 2010-Aprile 2012; in basso a destra è analizzato il profilo medio della temperatura dell'aria all'interno di un singolo tubo. Si noti come la maggior parte dello scambio termico avvenga nel primo terzo del tubo. Le linee derivano dall'interpolazione tra i tre valori monitorati

Monitoring results of the earth-to-air heat exchangers installed in the school. The upper image shows the inlet and outlet air temperatures from the first field of buried tubes, compared with the temperature of soil (hourly averages). The displayed data refer to the period May 2011-April 2012; the bottom-left diagram classifies the effectiveness of the first field in the period May 2010-April 2012 on a hourly base; the bottom-right diagram analyses the average profile of air temperature inside a single tube. Note that most of the heat exchange takes place in the first third of the tube. The represented lines are drawn by interpolating the three monitored values

stra come i dati di ε si distribuiscano prevalentemente intorno ai valori alti. Questo significa che l'aria in uscita dai condotti tende a coprire quasi interamente la depressione tra la temperatura dell'aria esterna e quella del terreno (Fig. 4, basso a sinistra).

$$\varepsilon = \frac{(\theta_{in} - \theta_{out})}{(\theta_{in} - \theta_{soil})} \quad (\text{eq. 1})$$

In aggiunta all'ottima efficacia di funzionamento, il sistema mostra valori di COP decisamente elevati, anche superiori a 50 calcolati utilizzando l'eq. 2, in linea con quanto descritto per sistemi analoghi in altri casi studi europei (Chiesa et al., 2014; Pfafferott, 2003).

$$\text{COP} = \frac{(Q_{\text{heating}} - Q_{\text{cooling}})}{E_{el}} \quad (\text{eq. 2})$$

Il consumo elettrico dei ventilatori (E_{el}) è stato calcolato teoricamente mentre il bilancio di scambio energetico sensibile è stato desunto dai dati monitorati applicando l'eq. 3.

$$Q_{\text{sens}} = A_{\text{pipe}} \rho_{\text{air}} v_{\text{air}} c_{\text{air}} (\theta_{out} - \theta_{in}) \quad (\text{eq. 3})$$

La Fig. 4 (basso a destra) mostra la distribuzione dello scambio termico tra aria e terreno in funzione della lunghezza del tubo. Come evidenziato dal grafico, la maggior parte dello scambio avviene nel primo terzo del condotto, dato che non subisce variazioni con il procedere della stagione di raffrescamento o di

riscaldamento (Chiesa et al., 2014), suggerendo che sia possibile, in linea con altri studi (Givoni 1994), ridurre la lunghezza dei sistemi EAHX per queste tipologie di impianto. La possibilità di raggiungere la maggior parte dello scambio termico necessario a pre-trattare l'aria in soli 25 m rende questa tecnologia maggiormente appetibile per il mercato, riducendo i costi già bassi di installazione, facilitando la manutenzione del sistema e riducendo i consumi dei ventilatori. Infine, è stata condotta un'analisi psicrometrica dell'aria in uscita e in ingresso nel sistema interato evidenziando una parziale necessità di deumidificazione in regime estivo.

L'impiego di sistemi EAHX, per quanto abbia un precedente storico in Italia nel sistema dei "covoli", applicato a ville del periodo palladiano (Grosso, 2011), non è una tecnologia diffusa. Inoltre, dati di monitoraggio su tale tecnologia sono scarsi, sia per sistemi a funzionamento naturale, sia per sistemi con ventilazione meccanica (Givoni, 1994). Recentemente, tuttavia, sono stati condotti nuovi studi scientifici su tali sistemi e ne sono aumentate le installazioni. In particolare sono stati monitorati sistemi EAHX installati in edifici di diversa tipologia (Grosso & Raimondo, 2008; Musskopf & Sattler, 2006; Hollmuller & Lachal, 2005; Pfafferott 2003) e in dimostratori di laboratorio (Li et al. 2014; Niu et al. 2015).

Per quanto riguarda la progettazione di sistemi EAHX esistono software dedicati quali GAEA, sviluppato dal Dipartimento di Fisica dell'Università di Siegen (Benkert et al., 2011; Benkert & Heidt, 2000). Tale *software* è stato utilizzato nel caso della scuola media «L. Orsini» di Imola. I confronti tra i dati monitorati e i risultati delle simulazioni sono stati riportati in letteratura (Chiesa et al. 2014). Analisi più approfondite sono state condotte

mize acoustical performance in different combinations and functional modes. In particular, dry-assembled types were preferred for internal partitions. The lighting appliances installed in classrooms were subjected to a careful design, optimised by CFD analysis in the atrium-classroom system to assess the compatibility between lighting equipment and night cooling airflows. The suspended lamps perform, in fact, several functions: artificial lighting to compensate daylighting through photo-sensors, distribution of mechanically treated air inside classrooms, and improvement of sound absorption. The lighting system is also equipped with sensors of occupants' presence to avoid waste of electricity. A great attention was paid to the design of the air conditioning system, in order to integrate it to the passive indoor climate-control techniques. In

particular, it was adopted an approach able to maximise integration between the different systems of space heating, cooling and ventilation. Fig. 3 shows the articulated HVAC system designed for this school building. Equipment for the technical building systems are localised on the roof and in the basement. In particular, a 20 kWp photovoltaic array, vacuum solar collectors, exhaust-air towers from the atrium, an outside air intake grid for AHUs, and two AHUs dedicated to the Solarwall® system, are located on roof. Other four AHUs connected to the Earth-to-Air Heat Exchangers (EAHX) are placed in the basement. Furthermore, the school building is equipped with a space heating distribution system through radiant floor panels, connected to Imola's district heating, coupled with the mechanical ventilation system that allows for

treating the latent heat component. In the heating period, the AHUs use, depending on the boundary conditions, air pre-treated by the EAHX system, mixed with outside air, or air heated by the Solarwall® elements (about 268 m² of collection surface). Moreover, a 70 m² solar thermal collector system for hot water production was installed to integrate, in winter, the radiant floor system and, in summer, the production of chilled water through an absorption system for cooling the administrative spaces.

The floor slabs, in pre-tensioned reinforced concrete, are left in view at ceiling in order to act as an exposed thermal mass to maximise the performance of the natural night cooling system, provided in the summer period. Cooler outside air enters the Southern classrooms through motorised openings embedded in the win-

dows and flushes both concrete ceiling and floor slabs hence lowering their surface temperature and the relevant heat exchange toward indoor spaces the day after. Air is naturally moved by the temperature gradient between inside and outside and by the effect induced by the temperature stratification inside the glazed central atrium. Acoustically insulated grids designed on-purpose and placed above doors allow for the passage of air between classrooms and the atrium, while glazed clerestories on atrium's roof facilitate air exhaustion through motorised openings. This system was optimised through CFD simulations of airflows in typical boundary conditions.

Monitoring and operational analysis

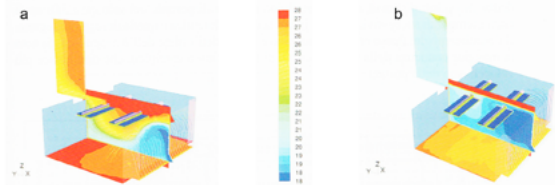
The school building was interested by an energy and environmental moni-

tra gli altri in TRNSYS (Mihalakakou et al. 1995; Mihalakakou et al. 1994) e Energy+ (Darkwa et al. 2011; Lee & Strand 2008; Lee & Strand 2006). Uno studio (Ascione et al. 2011) ha analizzato l'applicabilità dei sistemi EAHX in contesti climatici italiani. Approfondimenti sul tema sono stati, altresì, condotti a titolo di review in letteratura (Peretti et al. 2013; Pfafferott with alii 2007).

Sistema di night cooling

Il monitoraggio del sistema di ventilazione notturna della massa ha evidenziato alcune problematiche di funzionamento non previste in fase progettuale. Da un lato si è reso necessario introdurre ulteriori variabili di monitoraggio per verificare puntualmente l'apertura delle finestre delle aule, dall'altro si sono riscontrati valori nella temperatura dei solai superiori a quelli attesi. Grazie a queste considerazioni è stato possibile stilare una lista di suggerimenti per migliorare il funzionamento dei sistemi di night cooling alle nostre latitudini, dove la differenza tra massime e minime giornaliere non è pari a quelle riscontrabili in climi semi-desertici. Innanzitutto, è necessario prevedere un sistema di controllo delle aperture motorizzate, che agisca in base a programmazione temporale oltre che alla temperatura di set point, al fine di evitare movimenti continui di apertura-chiusura delle stesse, con un conseguente aumento dei consumi elettrici e riduzione del periodo di funzionamento del sistema. Inoltre, è consigliabile, per climi come quello di Imola, impostare il sistema di apertura su base oraria, considerando, tuttavia, l'effettiva presenza di una differenza di temperatura positiva tra interno e esterno. Infine, si suggerisce di prestare particolare attenzione alla progettazione dei torrini di estrazione, dotandoli di un sistema di controllo più efficace, capace di tenere in considerazione le

precipitazioni effettive ed evitando la chiusura manuale per lunghi periodi di tempo. Ulteriori studi verranno condotti su questo sistema per verificarne le modalità di ottimizzazione nel tempo.



CFD simulation of temperature profile in one classroom and atrium after above 1 minute (a) and 1 hour (b) from window opening.
Calculation by Ing. M. Simonetti; Image source: Grosso, 2011.

toring campaign aimed at assessing operation performance with relevant control optimisation of the installed systems. In particular, the EAHX and controlled natural ventilation for night cooling systems were analysed.

EAHX system

The system made of buried pipes is composed of three distinct fields that count respectively 12-12-8 parallel tubes of about 70 m in length. The three fields are located, respectively, 6, 30 and 6 meters from the building. Each field is organised in: air catchment head, air inlet chamber, a distribution duct, parallel tubes of rigid polyethylene with a diameter 0.25 m at a 1.1 m distance between each other, a collector duct connected to a condensation drain chamber, a connecting channel. Furthermore, before the AHUs on basement, there is a mixing

chamber collecting the pre-treated air coming from the three different fields. The system was dimensioned based on the airflow rate required for classrooms and its thermal performance simulated using the software GAFA. It is possible to simulate the dynamic performance of EAHX systems using energy simulation programs such as Energy+ and TRNSYS. Subsequently, a monitoring campaign was conducted on the EAHX system (Chiesa et al., 2014), whose results were assessed based on an elaboration of a method proposed in other scientific studies (Pfafferott, 2003). Fig. 4 shows monitored temperature values of outside air (inlet), outlet air from pipes, and ground temperature, during the period May 2011-April 2012. The data analysis has highlighted some differences in the operation of the three fields compared to the de-

signed parameters. In fact, the measured air speed in the channels were lower than the velocities estimated in the design phase. This divergence was partially reduced by an intervention on the AHUs fan setting. The temperature of air pre-treated by buried pipes decreases in some cases more than 15°C, in summer, with respect to ambient inlet air. The effectiveness of exchange, calculated by using Scott, Parson and Koehler's formula (Eq. 1), proved to be very high. This means that air outgoing from buried pipes tends to almost entirely cover the depression between the outside air temperature and that of the ground (Fig. 4, bottom left).

$$\varepsilon = \frac{(\vartheta_{in} - \vartheta_{out})}{(\vartheta_{in} - \vartheta_{soil})} \quad (\text{eq. 1})$$

In addition to an excellent operating efficiency, the EAHX system shows considerably high values of COP, which could also exceed 50, according to what is described for similar systems in other European case studies (Chiesa et al., 2014; Pfafferott, 2003). COP was calculated using Eq. 2.

$$\text{COP} = \frac{(Q_{\text{heating}} - Q_{\text{cooling}})}{E_{el}} \quad (\text{eq. 2})$$

The power consumption of fans (E_{el}) was theoretically calculated while the balance of sensible energy exchange was obtained from monitored data by applying Eq. 3.

$$Q_{\text{sens}} = A_{\text{pipe}} \rho_{\text{air}} v_{\text{air}} c_{\text{air}} (\vartheta_{out} - \vartheta_{in}) \quad (\text{eq. 3})$$

La ventilazione notturna per il raffrescamento 'strutturale' (della massa) di un edificio (*night cooling*) è una tecnologia di *passive cooling* diffusa in diversi contesti climatici. In letteratura sono riportate alcune applicazioni (Wang et al. 2014; Zhai et al. 2011) e diversi modelli volti allo studio e alla progettazione di sistemi di *night cooling* basati su software CFD, generalmente accoppiati a programmi di simulazione energetica dinamica, quali, ad esempio, EnergyPlus e TRNSYS (Zhang et al. 2013; Goethals et al. 2012; Goethals et al. 2011; Artmann et al. 2008).

Criticità e lezioni apprese Dall'esperienza condotta – caratterizzata, come sopra evidenziato, da un'interazione esemplare tra progettisti specialisti (architettonici, strutturali, impiantistici), grazie all'innescio innovativo del *consulente energetico-ambientale*, e da una fase costruttiva razionale e ottimizzata – si può rilevare come le maggiori criticità si sono riscontrate del processo di gestione dell'edificio.

Queste sono riassumibili come segue.

- La complessità del sistema di controllo ambientale, che deve interagire con diverse condizioni di zona – differenziate per conseguire un'elevata efficienza energetica – e diverse tecnologie, meccaniche e passive, ha comportato costi elevati di gestione (svolta con appalto a ditta privata specializzata) e difficoltà da parte dell'Amministrazione Comunale di verificarne l'efficacia.
- L'interazione tra Amministrazione Comunale – proprietaria e conduttrice dell'immobile – e gli organi di gestione delle attività scolastiche è stata caratterizzata da incomprensioni e conflitti, determinati da difficoltà di comunicazione su tematiche complesse come quelle connesse alla gestione degli impianti tecnologici.

Fig. 4 (bottom right) shows the distribution of heat exchange between air and ground according to temperature values and the length of a tube. As shown by the graph, the majority of exchange takes place in the first third of the duct. This effect lasts during the entire cooling and heating seasons (Chiesa et al., 2014), suggesting that it is possible, in line with other studies (Givoni 1994), to reduce the length of EAHX systems without losing efficiency. The ability to reach most of the heat exchange necessary to pre-treat the air in just 25 m makes this technology more attractive to the market, reducing the already low cost of installation, improving the easy maintenance of the system and reducing the electricity consumption of fan. Finally, a psychrometric analysis was conducted on inlet and outlet air showing a partial need of dehumidification in summer conditions.

The EAHX system, although it has a historical precedent in a Venetian technique based on wind-ducts called "covoli", applied to Palladian villas (Grosso, 2011), is not a widespread technology. In addition, monitoring data on such technology are limited, both for natural driven systems and for systems with mechanical ventilation (Givoni, 1994). Recently, however, new scientific studies have been conducted on these systems and the number of installations has increased. In particular, EAHX systems installed in buildings of different typologies were monitored (Grosso & Raimondo, 2008; Musskopf & Sattler, 2006; Hollmüller & Lachal, 2005; Pfafferoth 2003), and demonstrators in laboratory tested (Li et al. 2014; Niu et al. 2015).

Different dedicated software could be used for dimensioning EAHX systems, such as GAEA, developed by

- Tali difficoltà hanno portato a interruzioni e inefficienze nello sviluppo del piano di monitoraggio, non tanto per il sistema EAHX – che non interferisce con le attività scolastiche – quanto per quello della Ventilazione Naturale Controllata con *Night Cooling*, le cui modalità operative comportano una gestione 'automatica' delle aperture, che è entrata talvolta in conflitto con la gestione degli spazi da parte del personale scolastico.

Conclusioni

Il caso della Scuola Media «L. Orsini» di Imola costituisce un esempio di integrazione, tra parti progettuali specialistiche e tra edificio e impianto, volto alla sostenibilità e alla qualità ambientale. Inoltre, l'edificio si configura come un esempio di elevata complessità, per la caratterizzazione dei sistemi di climatizzazione, capaci di integrare secondo un approccio ibrido, forzanti meccaniche e naturali. L'interazione tra numerose componenti, generalmente progettate separatamente negli interventi edilizi, ha permesso di analizzarne il funzionamento accoppiato, di evidenziare alcune criticità e alcuni suggerimenti progettuali, che possono risultare utile al progettista e alle pubbliche amministrazioni che si interfacciano con la necessità di integrare i criteri connessi alla sostenibilità con la progettazione di un edificio pubblico e, in particolare, scolastico.

the Department of Physics, University of Siegen (Benkert et al., 2011; Benkert & Heidt, 2000). This software was used in the case of the school "L. Orsini" in Imola. Comparisons between monitored data and simulation results were reported in literature (Chiesa et al. 2014). Further analyses were conducted using TRNSYS (Mihalakakou et al. 1995; Mihalakakou et al. 1994) and EnergyPlus (Darkwa et al. 2011; Lee & Strand 2008; Lee & Strand 2006). One study (Ascione et al. 2011) analysed the applicability of these systems in the Italian climatic context. Furthermore, review analyses were reported in literature (Peretti et al. 2013; Pfafferoth with alii 2007).

Night cooling system

The monitoring campaign on the system based on controlled natural ventilation for night cooling of thermal

mass showed some operational problems not foreseen in the design phase. On one hand, it was necessary to introduce additional monitoring variables to regularly check the opening of devoted windows in classrooms; on the other hand, several values of the surface temperature of ceiling slabs were found higher than expected. As a consequence, it was possible to make a list of suggestions for improving the performance of the night cooling technique at our latitudes, where the climate conditions are not optimal for this technique since the average difference between maximum and minimum daily ambient temperature is much lower than the one found in semi-desert climates. Firstly, it is necessary to provide a control system of the motorised openings, which could act based on schedule in addition to a temperature set point operation, in

SCHEDA DI PROGETTO | PROJECT SHEET

Progetto: Scuola media Orsini di Imola
fonte (Grosso, 2011)

Project: School building L. Orsini di Imola
Source (Grosso, 2011)

Committente | Client
Comune di Imola | City of Imola

Luogo | Venue
Imola, Italia | Imola, Italy

Responsabile del progetto | Project leader
arch. Andrea Dal Fiume

Responsabile del procedimento | Responsible for the procedure
arch. Alessandro Contavalli

Collaboratori al progetto | Collaborators on the project
arch. Franco Gaddoni, ing. Flavio Cappelli, arch. Michele Pasotti, ing. Mirka Rivola

Consulenza ambientale | Environmental consulting
prof. arch. Mario Grosso, arch. Luca Raimondo, ing. Marco Simonetti

Progettazione impiantistica | Technical building systems design
Metec & Saggese Engineering s.r.l.

Progettazione strutturale | Structural design
ing. Odine Manfroni

Indagini geologiche | Geological surveys
dr. Stefano Cappai

Consulenza acustica | Acoustics consulting
ing. Alessandro Placci

Consulenza bioedile | Green Building consulting
geom. Loris Fantini

Imprese assegnatarie | Companies
CESI, CEFLA impianti

order to avoid continuous opening-closing movements with a consequent increase of electricity consumption and reduction of operation period of the system. Secondly, it is advisable, for climate types as the one of Imola, to set the opening system on a hourly base, considering, however, the presence of a positive difference in temperature between inside and outside. Finally, it is suggested that particular attention be paid to the design of exhaust openings, providing them with a more effective control system, able to take into account the effective rainfall and avoiding manual closure for long periods of time. Further studies will be conducted on this system to verify the optimisation of such control system. The natural night ventilation for "structural" (mass) cooling of a building (night cooling) is a technology of passive cooling widespread in differ-

ent climatic regions. In literature, various applications are reported (Wang at al. 2014; Zhai at al. 2011) and several models analysed, aimed at studying night cooling systems based on CFD software, usually coupled with dynamic energy simulation programs, such as, for example, EnergyPlus and TRNSYS (Zhang at al. 2013; Goethals at al. 2012; Goethals at al. 2011; Artmann at al. 2008).

Critical issues and lessons learned

The presented case study - characterised, as mentioned above, by an exemplary interaction between design specialists (architectural, structural, equipment), including an innovative energy and environmental consultant figure, and a rational and optimised construction phase - shows that the most critical aspects were found in the operational and building management phase.

REFERENCES

- Artmann, N., Manz, H. and Heiselberg, P. (2008), "Parameter study on performance of building cooling by night-time ventilation", *Renewable Energy*, vol. 33, pp. 2589-2598.
- Ascione, F., Bellia, L. and Minichhiello, F. (2011), "Earth-to-air heat exchangers for Italian climates", *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 2177-2188.
- Benkert, S., Heidt, F.D. and Schöler, D. (2011), *Calculation tool for earth heat exchangers GAEA*, Department of Physics, University of Siegen, Germany.
- Benkert, S. and Heidt, F.D. (2000), "Validation of the Software GAEA", *The Energy for the 21st Century, World Renewable Energy Congress VI*, Elsevier, Brighton, UK, pp. 1818-1821.
- Chiesa, G., Simonetti, M. and Grosso, M. (2014), "A 3field earth-heat-exchange system for a school building in Imola, Italy: Monitoring results", *Renewable Energy*, vol. 62, pp. 563-570.
- Dal Fiume, A., Grosso, M. and Raimondo, L. (2009), "Una scuola sostenibile a Imola", *Il progetto sostenibile_dossier*, vol. 7, No. 21, pp. I-VIII.
- Darkwa, J., Kokogiannakis, G., Magadzire, C.L. and Yuan, K. (2011), "Theoretical and practical evaluation of an earth-tube (E-tube) ventilation system", *Energy and Buildings*, vol. 43, pp. 728-736.
- Givoni, B. (1994), *Passive and Low Energy Cooling of Buildings*, Van Nostrand Reinhold, New York.
- Goethals, K., Couckuyt, I., Dhaene, T. and Janssens, A. (2012), "Sensitivity of night cooling performance to room/system design: Surrogate models based on CFD", *Building and Environment*, vol. 58, pp. 23-36.
- Goethals, K., Breesch, H., Janssens, A. (2011), "Sensitivity analysis of predicted night cooling performance to internal convective heat transfer modelling", *Energy and Buildings*, vol. 43, pp. 2429-2441.
- Grosso, M. (2011), *Il raffrescamento passivo degli edifici*, 3rd ed., Maggioli, Rimini.

These aspects can be summarised as follows.

- The complexity of the environmental control system, which must interact with different zone conditions - differentiated in order to achieve a high-energy efficiency - and different technologies, both mechanical and passive, resulted in high costs of management (carried out by contract to a private specialised firm) and difficulty to verify its effectiveness by the Municipality.
- The interaction of Municipal Administration - owner and host of the property - and the management bodies of school activities was characterised by misunderstandings and conflicts, caused by difficulties in communication on complex issues such as those related to the management of technological systems.
- These difficulties led to disruptions

and inefficiencies in the development of the monitoring plan, not because of the system EAHX - that does not interfere with school activities - but for that of the Controlled Natural Ventilation with Night Cooling, whose operating procedures involve the management of 'automatic' openings, which came sometimes in conflict with the management of spaces by the school staff.

Conclusions

The case of the High School "L. Orsini" in Imola is a paradigmatic example of integration between design specialists and between architecture and technical building systems, aimed to sustainability and environmental quality. Moreover, this school building represents an example of high complexity, for the characterisation of its air-conditioning system, able

- Grosso, M. and Raimondo, L. (2008), "Horizontal air-to-earth heat exchangers in Northern Italy: testing, design, and monitoring", *International Journal of Ventilation*, vol. 7, No. 1, pp.1-10.
- Hollmuller, P. and Lachal, B. (2005), "Buried Pipe Systems with Sensible and Latent Heat Exchange: Validation of Numerical Simulation against Analytical Solutions and Long-Term Monitoring", *Proceeding of the 9th Conference of International Building Performance Simulation Association*, École Polytechnique de Montréal, Montréal, pp. 411-418.
- Lee, K.H. and Strand, R.K. (2008), "The cooling and heating potential of an earth tube system in buildings", *Energy and Buildings*, vol. 40, pp. 486-404.
- Lee, K.H. and Strand, R.K. (2006), "Implementation of an Earth Tube System into EnergyPlus Program", *Proceedings of SimBulid 2006*, MIT, Cambridge, MA, USA.
- Liu, H., Yu, Y., Niu, F., Shafik, M. and Chen, B. (2014), "Performance of a coupled cooling system with earth-to-air heat exchanger and solar chimney", *Renewable Energy*, vol. 62, pp. 468-477.
- Mihalakakou, G., Santamouris, M., Asimakopoulos, D. and Tzelepidaki, I. (1995), "Parametric prediction of the buried pipes cooling potential for passive cooling applications", *Solar Energy*, vol. 55 (3), pp. 163-173.
- Mihalakakou, G., Santamouris, M. and Asimakopoulos, D. (1994), "Modelling the thermal performance of earth-to-air heat exchangers", *Solar Energy*, vol. 53(3), pp. 301-305.
- Musskopf, D. and Seattler, M. (2006), "Natural Ventilation through Buried Pipes in a small school in Viamão (Brazil)", *Proceeding of the 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture*, PLEA, Geneva, Switzerland.
- Niu, F., Yu, Y., Yu, D. and Li, H. (2015), "Investigation on soil thermal saturation and recovery of an earth to air heat exchanger under different operation strategies", *Applied Thermal Engineering*, vol. 77, pp. 90-100.
- Oxman, R. (2006), "Theory and design in the first digital age", *Design Studies*, Vol. 27, No. 3, p. 229-265.
- Peretti, C., Zarrella, A., De Carli, M. and Zecchin, R. (2013), "The design and environmental evaluation of earth-to-air heat exchangers (EAHE). A literature review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 28, pp. 107-116.
- Pfafferoth, J. with Walker-Hertkorn, S. & Sanner, B. (2007), "Ground Cooling: Recent Progress", in Santamouris, M. (ed.), *Advances in Passive Cooling*, Earthscan, London, pp. 190-227.
- Pfafferoth, J. (2003), "Evaluation of earth-to-air heat exchangers with a standardized method to calculate energy efficiency", *Energy and Buildings*, vol. 35, pp. 971-983.
- Wang, Y., Zhao, F.Y., Kuckelkorn, J., Li, X.H. and Wang, H.Q. (2014), "Indoor air environment and night cooling energy efficiency of a southern German passive public school building operated by the heat recovery air conditioning unit", *Energy and Buildings*, vol. 81, pp. 9-17.
- Zhai, Z., Johnson, M.H. and Krarti, M. (2011), "Assessment of natural and hybrid ventilation models in whole-building energy simulations", *Energy and Buildings*, vol. 43, pp. 2251-2261.
- Zhang, R., Lam, K.P., Yao, S.C. and Zhang, Y. (), "Coupled EnergyPlus and computational fluid dynamics simulation for natural ventilation", *Building and Environment*, vol. 68, pp. 100-113.

to integrate in a hybrid approach, mechanical and natural forces. The interaction of many components, generally designed in separate phases and equipment, but integrated in Imola's case study, allowed for analysing their combined operation. Results of monitoring could highlight some weaknesses as well leading to some design suggestions for future projects, useful to designers and public administrators facing the need to integrate sustainability criteria within the design of a public building and, in particular, a school one.