



The green system: solutions for environmental protection and CO₂ emissions reduction. The example of an existing school building

Il sistema verde, soluzioni per la tutela dell'ambiente e la riduzione delle emissioni di CO₂: il caso di studio di una scuola primaria

Carla Balocco ^{(a)(*)} - Lorenzo Leoncini ^(b)

^(a) Sez. Fisica Tecnica Ambientale, Dipartimento di Architettura (DiDA), Università degli Studi di Firenze.

^(b) Ingegnere libero professionista, collabora con la Sezione di Fisica Tecnica Ambientale di Architettura, Università degli Studi di Firenze.

^(*) Corresponding author; carla.balocco@unifi.it

Abstract: The public school building sector offers great opportunities for energy efficiency and CO₂ emissions reduction. In this research a method for the energy evaluation of school buildings is proposed. It implements simple input information connected to dynamic simulations. The main objective is to evaluate the energy, environmental and economic impact of different regeneration proposals, combining a green system integration. The building chosen as a case study, which presents serial and widespread constructive and thermo-physical characteristics, allows to extend the validity of obtained results to similar cases and conditions. Findings highlighted the importance of developing site-specific strategies and green energy solutions, to optimally adapt any intervention to the architectural, typological and plant characteristics of the school. The proposed example is a prototype case so that the Municipalities and Public Administrations, owned by most of the schools in Italy, can use it as basic knowledge for future projects oriented towards the energy transition, but also for specific tailored training.

Key words: energy transition; school building refurbishment; green system.

Citation: Balocco C., Leoncini L., 2023 - *Il sistema verde, soluzioni per la tutela dell'ambiente e la riduzione delle emissioni di CO₂: il caso di studio di una scuola primaria*. L'Italia Forestale e Montana, 78 (3): 99-114; <https://dx.doi.org/10.36253/ifm-1102>

1. INTRODUZIONE

La complessa situazione energetica, l'impatto ambientale antropico e il *Global Warming* (GW), nonché la necessità di ridurre fortemente i consumi, per spingere l'intera progettazione di edifici e impianti a rispettare i requisiti *Zero Energy Building* (ZEB) ed orientarsi per la transizione energetica, inte-

ressa tutto il settore edilizio ed in particolare l'edilizia scolastica pubblica.

La riduzione delle emissioni di gas serra dell'80% per il 2050 è l'obiettivo dell'Accordo di Parigi. Il quadro normativo attuale è molto chiaro: prestazione energetica degli edifici (come da EPBD, Direttiva 2018/844/UE; Direttiva 2010/31/UE) ed efficienza energetica (come da Direttiva 2012/27/UE). In Italia

l'adeguamento alle direttive europee, richiede soluzioni di *refurbishment* degli edifici esistenti e di *retrofitting* impiantistico molto importanti e diffuse. La necessità di efficientamento energetico e di qualità ambientale dell'edilizia scolastica esistente, si unisce alla necessità di ambienti di apprendimento dinamici e polivalenti, connessi alle attività ed alle dinamiche della comunità locale e al territorio, in grado di supportare le attività di ricerca, la collaborazione e l'apprendimento personalizzato degli studenti, coniugando i requisiti *ZEB*, con il benessere ambientale e la riduzione degli impatti (Mørcka e Paulsen, 2014; Demanuele *et al.*, 2010; Österreicher e Geissler, 2016). Questi obiettivi necessitano una visione sistemica e che qualsiasi ragionamento venga esteso all'ambiente ed alle sue risorse. *La Commissione Europea in uno studio del 2015 per la prima volta introduce il concetto di Nature Based Solutions (NBS) nella propria politica. Le NBS identificano l'insieme di azioni e strategie, basate sulla natura in grado di fornire benefici ambientali e sociali capaci di aumentare il dinamismo e la resilienza delle città, di mitigare i cambiamenti climatici, di rendere più confortevoli gli spazi urbani, financo promuovere una progettazione che renda gli spazi confinati anche "luoghi naturali"* (Cohen-Shacham *et al.*, 2016).

L'efficienza energetica ed un elevato livello di comfort interno ed esterno per gli edifici scolastici è una priorità dell'UE. Questi possono dunque costituire casi esemplari per la realizzazione di *smart city*, comunità energetiche con aspetti di formazione ed integrazione sociale non trascurabili, quando sottoposti ad interventi di efficientamento energetico integrati a *NBS* (Zinzi *et al.*, 2021; Zinzi *et al.*, 2015; Moazzen *et al.*, 2021; Shao *et al.*, 2017; Gerber *et al.*, 2019; Balocco e Leoncini, 2020; Balocco e Leoncini, 2022).

Sono numerosi i progetti di ricerca finanziati dall'UE che si sono concentrati su obietti-

vi di risparmio energetico nella ristrutturazione delle scuole, spesso con la partecipazione di progetti di ricerca italiani. Gli obiettivi principali sono la riqualificazione energetica degli edifici scolastici, attraverso estese e continue campagne di monitoraggio, sia prima che dopo interventi di retrofit, finalizzati alla sostenibilità, al comfort degli occupanti, alla riduzione dei costi e degli impatti ambientali. In questi ultimi anni, anche l'ambiente fisico della scuola ed il suo contorno, hanno ricevuto una rinnovata attenzione a livello di politiche internazionali e locali, in linea con i nuovi principi pedagogici e gli standard ambientali più aggiornati (Zinzi *et al.*, 2015; Zinzi *et al.*, 2021). Da qui l'importanza di spazi scolastici dinamici e strettamente connessi al luogo, all'ambiente, alla natura limitrofi. Altri studi hanno anche evidenziato il potenziale di risparmio energetico che presentano gli edifici scolastici esistenti ed i loro sistemi impiantistici con conseguenti importanti effetti positivi per la protezione dell'ambiente, la riduzione del *GW* e dell'inquinamento, valutando l'efficienza energetica ed economica dell'applicazione di nuove tecnologie di controllo e regolazione connesse ad *IoT* e *Digital Twin* (Shao *et al.*, 2017; Gerber *et al.*, 2019; Tsikra e Andreou, 2017; Bakmohammadi e Noorzai, 2020; Cantón *et al.*, 2014).

Alcuni autori, mediante un'ampia campagna di misurazioni sperimentali e di simulazioni dinamiche, hanno evidenziato come il progetto del verde e degli spazi esterni ad una scuola esistente possano migliorare le condizioni di comfort interno e ridurre i consumi energetici, (Cantón *et al.*, 2014; Yunyang Ye *et al.*, 2021).

Fattori cruciali come la qualità dell'aria, la corretta ventilazione delle aule, la combinazione ottimale tra illuminazione naturale e artificiale (prevalentemente a *LED* per luce dinamica), il comfort termico e le prestazioni acustiche hanno un impatto importante su benessere, salute,

attenzione, comportamento ed apprendimento degli studenti (Wachenfeldt *et al.*, 2007; Barret *et al.*, 2019; Habibi *et al.*, 2020).

Recenti studi che utilizzano modelli impostati su algoritmi genetici, hanno proposto alcuni layout innovativi per la progettazione di aule della scuola primaria, che contribuiscono a garantire efficienza energetica del sistema edificio-impianto, al variare delle condizioni climatiche interne ed esterne (Bakmohammadi e Noorzai, 2020).

Le applicazioni del ciclo di vita degli edifici scolastici permettono di trovare soluzioni efficaci per ridurre le emissioni di carbonio (Moazzen *et al.*, 2021; Gerber *et al.*, 2019). Dall'ultimo aggiornamento dell'Anagrafe Scolastica 2018 si evince che in Italia esiste un patrimonio edilizio scolastico costituito da 40151 edifici attivi, di proprietà degli enti locali; 35730 di questi edifici sono stati costruiti prima del 1991. La maggior parte di queste scuole presenta degrado fisico/strutturale, inadeguatezza delle condizioni termoigrometriche ed illuminotecniche degli ambienti interni, ed obsolescenza funzionale ed impiantistica.

Nella legge di bilancio dello Stato del 2020 sono previste molte misure per aumentare l'efficienza energetica delle scuole, la creazione di un piano nazionale di interventi di efficientamento energetico con risorse del Fondo per il finanziamento degli investimenti e dello sviluppo infrastrutturale.

Le più recenti linee guida progettuali fornite dalla normativa italiana in materia di scuole (D.L. 11 aprile 2013) perseguono obiettivi di innovazione degli ambienti di apprendimento e delle prestazioni energetiche.

In Italia il patrimonio edilizio scolastico è molto lontano dai requisiti imposti dalle norme europee, ma anche internazionali. Questo settore presenta una grande varietà di edifici realizzati in anni differenti, e spesso all'interno di edifici storici con destinazioni d'uso origina-

rie molto diverse, se non addirittura opposte, e conseguenti problematiche connesse ai necessari interventi di adeguamento e ristrutturazione impiantistica. La vera sfida è perseguire tutti questi obiettivi attraverso un approccio sistemico ambientalmente sostenibile basato su *NBS* che non si riducano a *green-washing* in termini di integrazione minimalista-clinica del verde, con non pochi problemi legati ai costi di realizzazione e manutenzione. Progettare il verde significa progettare un sistema biologico complesso rispettandone il valore, gli equilibri ed i suoi tempi, agendo con interventi capillari, continui e cauti (Ciancio e Nocentini, 1996; Ciancio, 1994) per la qualità della vita, biodiversità, salute e sostenibilità. Ciò implica che il sistema verde (bosco, prati, giardini, parchi) debba integrarsi naturalmente e con i suoi tempi, nel contesto urbano anche attraverso interventi capillari con *NBS*, ma in armonia, sincronia e resilienza con il sistema stesso. Il sistema verde va pensato come contorno dinamico, in trasformazione continua, dei sistemi urbani edificati voluti dall'uomo e quindi un *damping* naturale, un *buffer* all'isola di calore urbano e ai cambiamenti climatici, un sistema biologico, che come tutti i sistemi naturali si porta all'equilibrio con l'ambiente offrendo possibilità di sviluppo e crescita, nonché salute e benessere. Il sistema verde, in quest'ottica, è un sistema integrato con quello edilizio-impiantistico e costituisce il *canopy-layer* rispetto al quale, per ogni intervento di *retrofitting* e *refurbishment* energetico, va basata l'analisi termodinamica.

Questo lavoro valuta il peso energetico ed ambientale degli edifici scolastici esistenti, e le potenzialità di strategie di efficientamento energetico, che combinate con la progettazione integrata del verde nello spazio circostante, ma anche più ampio, consentono una importante riduzione delle emissioni di CO₂ e degli effetti dell'isola di calore urbano. A questo scopo è stato messo a punto un metodo che

necessita di semplici informazioni di input, usate direttamente o elaborate nelle simulazioni dinamiche.

2. L'APPROCCIO METODOLOGICO

È stato messo a punto un metodo utile per identificare le possibili ed efficaci soluzioni di intervento di efficientamento energetico e di riduzione degli impatti ambientali nell'ottica della *green energy sustainability*, collegando il sistema edificio-impianto al contesto in condizioni di regime transiente. Il contesto ambientale e climatico è il confine dinamico, con cui deve fare i conti il bilancio termodinamico-energetico ed economico di qualsiasi intervento di *retrofitting* e *refurbishment*. Gli elementi fondamentali del metodo possono essere così sintetizzati:

- 1) Analisi energetica e valutazione delle criticità per lo stato esistente:
 - realizzazione di un modello solido architettonico tridimensionale dell'edificio scolastico;
 - definizione delle condizioni al contorno, ovvero tipologia di dati climatici utilizzati, considerazione del costruito e del verde circostante;
 - attribuzione delle caratteristiche termofisiche sulla base della normativa vigente e del censimento dell'Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT);
 - validazione del modello di simulazione.
- 2) Individuazione di soluzioni *green energy* per il *revamping* degli impianti (climatizzazione e illuminazione) e miglioramento delle prestazioni termofisiche ed energetiche dell'edificio:
 - analisi multiscenario;
 - valutazione delle prestazioni energetiche dai risultati ottenuti con le simulazioni dinamiche;

- costi energetici e analisi di impatto ambientale;
- confronti tra lo stato esistente e gli scenari di efficienza energetica proposti;
- potenzialità ed effetti di soluzioni *NBS* in relazione col sistema verde.

3. IL CASO STUDIO

La scuola primaria Don Milani è il caso di studio. Si trova nel quartiere di S. Lorenzo in Greve, una delle zone di espansione dell'area metropolitana di Firenze. La scuola (Figura 1) ha una struttura interamente prefabbricata del 1971. Presenta un ampio ingresso vetrato con quattro porte di accesso e sul retro un ampio giardino collegato ad una zona asfaltata e ad una particolare zona con prato e alberi di media altezza, che non producono alcuna ombra sulle facciate dell'edificio. Attualmente l'edificio ha 13 aule, distribuite tra piano terra e primo piano. L'ingresso ha un ampio salone con caffetteria. L'edificio ha un volume di 14345 m³ e una superficie totale calpestabile di 8775 m².

I dati e le informazioni che ci sono stati forniti dagli uffici tecnici del Comune sono di larga massima. Pertanto, è stato necessario fare riferimento all'età di costruzione dell'edificio, che fornisce indicazioni sulla tipologia costruttiva e sui materiali impiegati e sviluppare serie di confronti incrociati per identificare le caratteristiche termofisiche dei materiali presenti nelle stratigrafie delle pareti, facendo riferimento a (ISTAT, 2011; UNI 10351, 2021; UNI EN ISO 10456, 2008).

Per la tipologia impiantistica installata nel periodo corrispondente, si è tenuto conto delle normative tecniche, energetiche ed impiantistiche e degli adeguamenti realizzati nel corso degli anni, utilizzando i valori limite imposti dalle più recenti normative.



Figura 1 - Alcune immagini della scuola Don Milani.

Nella scuola è presente il solo impianto di riscaldamento alimentato da una caldaia a gas, con regime di conduzione intermittente. La produzione di acqua calda sanitaria avviene a livello dei singoli blocchi con caldaie elettriche. Le caratteristiche termofisiche dei componenti edilizi, che sono state identificate ed utilizzate per le simulazioni dinamiche, sono le seguenti: $0,58 \text{ W/m}^2\text{K}$ trasmittanza termica dei pannelli prefabbricati costituenti tutte le pareti verticali e le partizioni; $1,56 \text{ W/m}^2\text{K}$ coperture/tetti; $3,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ tutte le finestre (a vetro singolo con telaio metallico prive di taglio termico). L'impianto di illuminazione artificiale è del tipo a scarica con lampade fluorescenti compatte e senza sistemi di regolazione o sensori di presenza. Per valutare i carichi termici sensibili dovuti all'illuminazione si è assunto un valore medio della potenza installata di 10 W/m^2 per i corridoi, gli accessi ed i servizi igienici, e di $25\text{-}30 \text{ W/m}^2$ per le aule, studi ed uffici e la biblioteca.

4. ANALISI ENERGETICA ALLO STATO DI FATTO

È stato implementato un modello numerico in riferimento a (UNI EN ISO 52016, 2018) che necessita la conoscenza delle condizioni climatiche interne ed esterne, assunte come condizioni convenzionali di progetto, e dei profili temporali di utilizzo degli ambienti.

Per tutte le soluzioni proposte, è stato sempre previsto un sistema di ventilazione meccanica controllata, tenendo conto delle modifiche imposte dalla normativa "post-Covid" (UNI 10339, 1995; UNI EN 16798-3:2018; ASHRAE, 2020) e partendo da un indice di affollamento massimo di $0,90 \text{ m}^2/\text{persona}$, anziché di $0,45 \text{ m}^2/\text{persona}$.

Le condizioni di qualità dell'aria interna, utilizzate come condizioni al contorno per la simulazione, sono state ottenute dalla combinazione di norme tecniche (UNI/TS11300-1:2014; UNI EN 16798-1:2019) e normative nazionali specifiche per il settore scolastico (DM 18 dicembre 1975).

La temperatura invernale di progetto è stata fissata a 20 °C, con 50% U.R., quella estiva a 26 °C, e 50% U.R. Per la palestra questi valori sono rispettivamente pari a 18 °C e 24 °C. L'edificio ad oggi è provvisto di sola ventilazione naturale, tramite movimentazione manuale degli infissi. Pertanto, allo stato attuale, non è possibile garantire il livello di qualità dell'aria richiesto dalla normativa vigente (DM 18 dicembre 1975; ASHRAE, 2020).

È stato necessario adeguare i parametri al regime di prevenzione e protezione sanitaria post-Covid, per indici di affollamento e portate d'aria per persona.

Si è scelto un passo di calcolo mensile in condizioni di regime semistazionario, con differenti fattori di utilizzazione, per gli apporti termici e le dispersioni, che sono stati dedotti dal calcolo della costante di tempo dell'edificio e della sua inerzia termica. Utilizzando i parametri termici dinamici ottenuti dall'implementazione di (UNI EN ISO 13786:2018), è stata ottenuta una capacità termica superficiale dell'involucro edilizio pari a 115 kJ/(m²K).

Il modello di simulazione è stato validato tramite due processi. Il primo fa uso dei dati climatici del periodo 2000-2010, mediante il confronto tra i valori climatici medi mensili forniti da (UNI 10349-1:2016) e i valori medi desunti dai dati climatici orari, rilevati dalla stazione fissa di Sesto Fiorentino, e forniti dal "Consorzio LAMMA-Laboratorio di Meteorologia e Modellistica Ambientale". Il post-processing delle misurazioni orarie è stato condotto impiegando i metodi statistici suggeriti in (UNI EN ISO 15927-4:2005) al fine di ottenere un *Test Reference Year (TRY)*. Si sono ottenuti scostamenti di pochi punti percentuali, con un'incidenza inferiore al margine di errore dell'algoritmo di calcolo, certificato in ±5% dal Comitato Termotecnico Italiano (CTI).

Il secondo processo di validazione si è riferito ai consumi di gas, mediante il confronto tra la quantità di gas rilevata al punto di consegna (contatore) dal gestore di rete e contabilizzata in fattura, e quella calcolata tramite simulazione. Le due procedure hanno consentito di calibrare il modello e di adattare il regime di conduzione dell'impianto di riscaldamento da continuo ad intermittente. Il Comune di Firenze ha fornito i consumi mensili e cumulativi stagionali di gas registrati negli anni 2017-2018-2019, corrispondenti rispettivamente a 28972 stm³, 34977 stm³, 33559 stm³. Dall'analisi dei consumi si evince un profilo di utenza stabile nel tempo. Le variazioni presenti nel triennio non sembrano essere causate direttamente da concomitanti variazioni climatiche, ma molto probabilmente da variazioni nell'uso degli ambienti e del comportamento degli utenti. Non è stato possibile invece impostare un'analogia climatica e, costruendo i gradi giorno reali, procedere alla destagionalizzazione dei consumi di gas. Pertanto il valore medio del triennio, di consumo cumulato stagionale di gas, pari a 32503 stm³, è stato utilizzato come target per la calibrazione.

Applicando un potere calorifico inferiore del metano di 8,95 kWh/stm³, si è ottenuto un consumo energetico di 290 MWh. Quest'ultimo, confrontato con quello calcolato/simulato pari a 315 MWh, presenta uno scostamento dell'8%, ritenuto più che accettabile tenendo anche conto della complessità del sistema.

Dai risultati delle simulazioni dello stato di fatto, il coefficiente globale medio di scambio termico dell'edificio è 1,0 W/(m²K), il fabbisogno di energia termica per il riscaldamento a valle dell'impianto è 110 kWh/(m² anno) ed il fabbisogno di energia primaria non rinnovabile a monte dell'impianto è 160 kWh/(m² anno).

La Classe Energetica dell'edificio, secondo l'attuale scala di valori italiana, è risultata F. L'edificio è dunque energivoro con onerosi costi

di gestione se si considerano i mutamenti del mercato energetico attuale. I suddetti valori di fabbisogno di energia termica, passando dal regime continuo al regime stazionario, diventano rispettivamente 65 kWh/(m² anno) e 95 kWh/(m² anno). I fattori di conversione e di emissione, sia del gas che dell'energia elettrica, che sono stati utilizzati facendo riferimento a (UNI/TS 11300-5:2016), sono riportati in Tabella 1. Oggi in Italia, in linea con il trend medio europeo, si stima che il 20% del mix di energia elettrica sia costituito da fonti rinnovabili e il restante da fonti fossili. Pertanto, la sola installazione di un impianto fotovoltaico (FV) su tutta la copertura dell'edificio, permetterebbe di avere energia elettrica interamente da fonti rinnovabili.

Tabella 1 - Fattori di conversione e di emissione.

	$f_{p,ren}$ [-]	$f_{p,ren}$ [-]	$f_{p,tot}$ [-]	$f_{CO_2,eq}$ [kg/kWh]
Gas	1,05	0	1,05	0,21
Elettricità	1,95	0,47	2,42	0,46

5. EFFICIENTAMENTO ENERGETICO PER UN SISTEMA INTEGRATO DEL VERDE

Sono stati proposti alcuni interventi energeticamente sostenibili con bassa interferenza sulla regolare attività scolastica, tenendo conto dei costi ambientali e sociali della cantierizzazione e di un eventuale spostamento delle persone. Per l'edificio sono state identificate le seguenti proposte di intervento, realizzabili prevalentemente in ambiente esterno in termini di cantierizzazione:

1) isolamento di tutte le pareti esterne mediante applicazione di pannellatura SEP (Polistirene Espanso Sinterizzato) additivato con grafite e finitura con rasante cementizio colorato in pasta. La trasmittanza termica della parete è stata ridotta da 0,75 W/(m²K) a 0,20 W/(m²K). Intervento che garantisce assenza di condensa e attenuazione dei ponti termici;

2) sostituzione integrale degli infissi esistenti con nuovi a taglio termico, costituiti da telaio in alluminio con profili disaccoppiati e vetrocamera con argon da 6-16-6 mm. La trasmittanza termica delle finestre è stata ridotta passando da un valore di 3,60 W/(m²K) a 1,30 W/(m²K);

3) coibentazione del solaio, mediante applicazione di materassini in lana minerale per uno spessore totale di 15 cm, protetti da una barriera al vapore sull'intradosso e da una guaina impermeabile sull'estradosso. La trasmittanza termica media del solaio si riduce da 1,45 W/(m²K) a 0,20 W/(m²K) garantendo assenza di condensa.

Il risultato ottenuto sull'edificio è stato il suo passaggio di Classe Energetica alla classe D, corrispondente a 120 kWh/(m² anno). La riduzione dell'utilizzo delle risorse primarie è stata del 25% pari alla riduzione delle emissioni di CO₂ equivalente. Sicuramente ne segue un miglioramento dell'ambiente interno, dovuto al campo termico più omogeneo in ambiente e ad una temperatura media radiante prossima alla temperatura di *set-point*, ma anche all'attenuazione dei gradienti di temperatura, soprattutto in prossimità delle finestre.

Attraverso gli indici *PMV* e *PPD* (rispettivamente *Predicted Mean Vote*, e *Predictable Percentage of Dissatisfied*, UNI EN ISO 7730-2006), a titolo esemplificativo è stata calcolata la temperatura operante (che rappresenta in prima approssimazione la media tra la temperatura dell'aria e la temperatura media radiante dell'ambiente) all'interno di una tipica aula esposta sfavorevolmente all'irraggiamento solare. Il risultato ottenuto mostra che uno studente posto al centro dell'aula allo stato attuale, cioè priva di interventi di coibentazione, percepisce una temperatura di 17,6 °C, mentre nelle condizioni di rigenerazione energetica dovute all'estremo isolamento dell'involucro,

percepirebbe 19,7 °C. A livello di comfort termigrometrico già due gradi di differenza di temperatura sono assolutamente percepibili.

Il costo per la realizzazione delle soluzioni proposte, attenendosi all'approccio *BAU* (*Building As Usual*) e senza beneficiare di alcuna forma incentivante, è stato stimato superiore ad 1M€.

Gli importi unitari applicati alla base di calcolo sono stati 170 €/m² per l'isolamento esterno, 600 €/m² per la sostituzione degli infissi e 120 €/m² per l'isolamento del sottotetto. Risulta evidente come un intervento di queste dimensioni non possa avere margini di recupero oltre la vita utile attesa, stimata in 20 anni ai sensi del Regolamento Delegato UE 244/2012. L'edificio ha più di 50 anni, durante i quali sono stati eseguiti solo lavori di manutenzione per consentirne un regolare utilizzo. Questo intervento di riqualificazione energetica e retrofit è stato ritenuto necessario per la qualità energetica ed ambientale, la salute e benessere degli occupanti.

Dopo le misure di efficientamento passivo (involucro edilizio) sono stati progettati più scenari di misure attive efficaci (impianto termico), abbinati all'integrazione di strategie sostenibili (impianto FV) e del verde. Sono stati proposti e simulati i seguenti scenari, da A) a F):

A) Scenario di riferimento: mantenimento dell'attuale centrale termica monofunzionale a gas, ma sostituzione del generatore di calore (caldaia a condensazione, 480 kW). Il dispositivo opera con un rendimento del 95% alla potenza nominale e del 105% a carico ridotto, riferito al potere calorifico inferiore del combustibile. È stata implementata una regolazione di tipo proporzionale modulante, con sonda climatica esterna per la regolazione della temperatura di mandata del fluido termovettore al circuito, attraverso una curva di compensazione.

- B) Scenario alternativo n. 1: sistema ibrido, costituito da una caldaia a condensazione a gas 480 kW e da una pompa di calore elettrica aerotermica aria-acqua 160 kW. I due generatori vengono attivati alternativamente, in funzione della temperatura bivalente, fissata a 7 °C che tiene conto del clima esterno. Durante i periodi miti della stagione invernale viene attivata la pompa di calore, mentre durante i periodi più freddi, la caldaia. Il rapporto di potenza installata tra caldaia e pompa di calore è di 3 a 1. La caldaia è la stessa dello scenario A), mentre la pompa di calore ha un COP (*Coefficient Of Performance*) medio stagionale di 3,5.
- C) Scenario alternativo n. 2: "tutto elettrico", con pompa di calore aria-acqua dimensionata per coprire il carico termico totale (480 kW). Il funzionamento del dispositivo è sottoposto a cicli di sbrinamento, tali da operare con un COP medio stagionale di 3,00.
- D) Scenario alternativo n. 3: simile a B), ma con impianto FV sul tetto, con moduli in silicio monocristallino e potenza totale di picco installata 90 kWp.
- E) scenario alternativo n. 4: prevede C) combinato con impianto FV sul tetto; come in D) con moduli in silicio monocristallino e potenza totale di picco installata 90 kWp).
- F) Soluzione tetto verde: integrazione del verde come copertura estensiva (in Figura 2 viene mostrata la combinazione dell'impianto FV con la copertura a verde estensivo).

I tetti verdi sono classificati in estensivi ed intensivi: il tipo estensivo ha un sottofondo di ridotto spessore (< 20 cm di profondità) e richiede poca manutenzione. Il tipo intensivo ha un substrato con profondità superiori a 20 cm e può supportare la crescita di piante legnose ad alto fusto. Ma il tipo intensivo, come è facilmente intuibile, impone vincoli architettonici a causa del peso e richiede molta manutenzio-

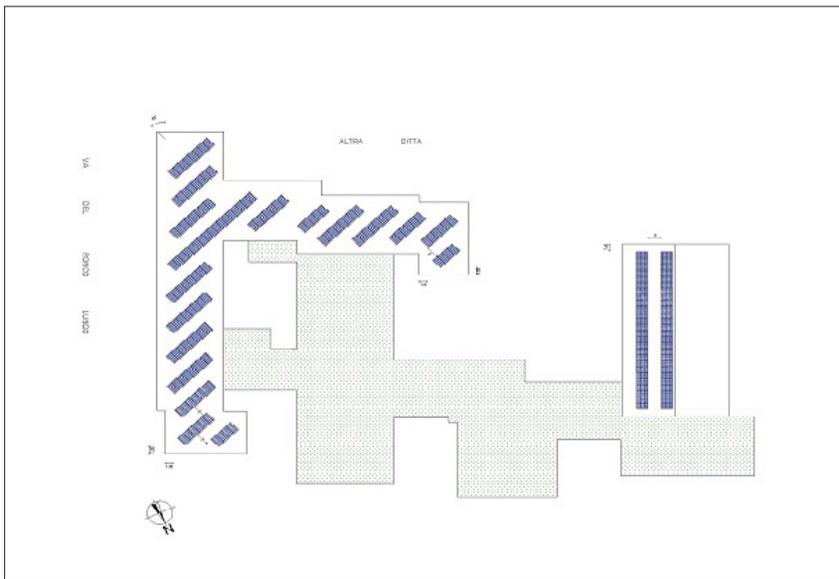


Figura 2 - Copertura con impianto PV e verde estensivo.

ne. In generale i tetti verdi sono sistemi costituiti da componenti interagenti che incidono su meccanismi meccanici, idraulici e fisiologici nel tempo. Se le loro prestazioni dal punto di vista termofisico e biologico sono misurabili, dal punto di vista della simulazione termodinamica sono molto complessi. Si è utilizzato un modello semplificato che impone l'omogeneità orizzontale della soletta e che i flussi di calore e di massa siano principalmente verticali, potendo così adottare equazioni monodimensionali per descrivere il comportamento termico di ogni strato in regime semi-stazionario. La soluzione estensiva che è stata modellata tenendo conto di una struttura tradizionale, ovvero: spessore totale 16 cm, spessore substrato 12 cm, coefficiente di deflusso $< 0,36$, volume di acqua disponibile per le piante $\geq 55 \text{ l/m}^2$, rapporto di utilizzabilità $\geq 0,84\%$, rapporto di efficienza $\geq 0,56$, massima acqua trattenuta $\geq 65 \text{ l/m}^2$, resistenza termica del sistema $\geq 0,47 \text{ (m}^2 \text{ K) /W}$, permeabilità del substrato $\geq 15 \text{ mm/min}$, capacità di scambio cationico del substrato $\geq 15 \text{ meq/100 g}$.

Per tutte le proposte sugli impianti è stato implementato il *Building Automation and*

Control System (BACS) che prevede una regolazione centralizzata, operante sulla temperatura di mandata del fluido termovettore, ed una regolazione periferica per ogni apparecchiatura terminale.

6. RISULTATI OTTENUTI E RIFLESSIONI

L'analisi comparativa energetico-ambientale ed economica degli interventi proposti è stata effettuata prendendo come valori di riferimento il fabbisogno unitario di energia primaria non rinnovabile, in kWh, le emissioni unitarie di CO_2 equivalente, in kg CO_2 , e il valore netto attuale della somma dei costi di investimento e dei costi operativi, in euro (€).

L'analisi economica è stata effettuata con il *Life Cycle Cost (LCC)* come suggerito in (UNI EN 15459-1:2018). Il periodo di calcolo è stato fissato a 20 anni. Nel quindicesimo anno è stata prevista la sostituzione periodica dei dispositivi di riscaldamento centralizzato giunti a fine vita utile. La vita utile attesa dell'impianto FV è stata stimata pari al periodo di

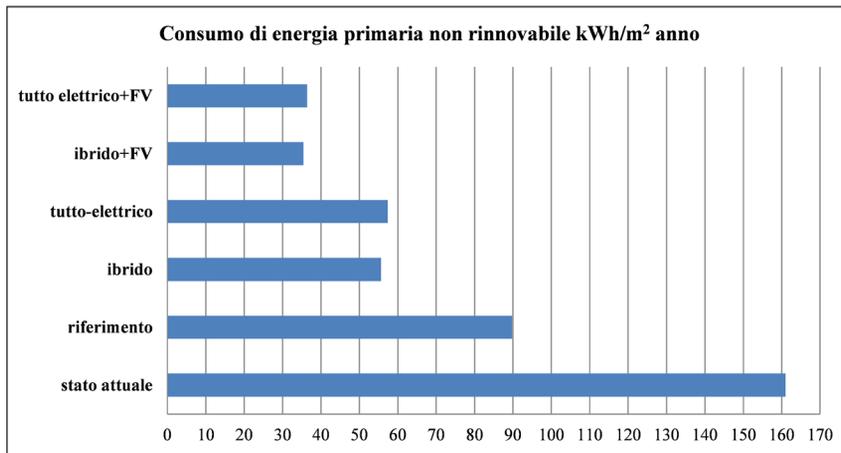


Figura 3 - Efficienza energetica delle soluzioni proposte.

calcolo. Per il sistema a gas è stato assunto un costo di 250 €/kW installati, per la pompa di calore il costo stimato varia da 1200 €/kW a 1600 €/kW a seconda della taglia dell'impianto. La tariffa del gas è stata fissata 1,00 €/m³, mentre quella dell'energia elettrica da rete 0,40 €/kWh. L'installazione di un impianto FV come quello proposto, prevede un costo di 2000 €/kWp installati. I risultati riportati in Figura 3, mostrano che il passaggio dai combustibili fossili (gas) all'elettricità ha consentito una riduzione importante del consumo di energia primaria non rinnovabile. Questo effetto è maggiore con l'installazione dell'impianto fotovoltaico.

Va notato che tutti gli scenari sono orientati all'efficienza e transizione energetica. Da questo punto di vista l'alternativa tra impianto termico ibrido e impianto "tutto elettrico" è equivalente.

Analisi economica, interpretazione e confronto dei risultati applicando il *LCC* sono stati condotti separando i costi di investimento e i costi operativi per tutti gli interventi. I rispettivi valori specifici sono stati trasformati in un unico Valore Attuale Netto (VAN), applicando un tasso di attualizzazione del 2% annuo. Con il metodo di calcolo del VAN le soluzioni progettuali vengono valutate in termini di va-

lore ottenuto nel tempo necessario al loro ritorno economico. Questi risultati, riportati in Figura 4, mostrano la diretta proporzionalità tra consumo di combustibili fossili ed emissioni di CO₂. Considerando che attualmente la quota preponderante del mix elettrico nazionale proviene da centrali termoelettriche alimentate da combustibili fossili (principalmente carbone, risorsa ad elevate emissioni specifiche), il passaggio dal gas all'energia elettrica, non comporterebbe una sostanziale riduzione delle emissioni di CO₂. Nella prospettiva di *green energy transition*, l'elettricità interamente prodotta da risorse rinnovabili permetterebbe una totale inversione di tendenza.

Lo scenario più competitivo dal punto di vista economico è lo scenario di riferimento, ma dal punto di vista energetico e ambientale è quello meno prestazionale. Per gli impianti di grandi dimensioni, la disponibilità di energia termica a basso costo consente di contenere notevolmente l'investimento per un impianto monovalente a gas. Allo stesso tempo un impianto fotovoltaico, anche se prevalentemente destinato all'autoconsumo, comporta un ulteriore aumento di spesa ad anno zero. Lo scenario di riferimento non permette alcuna forma di rispetto della Politica Energetica dell'Unione Europea, che molto probabilmente porterà

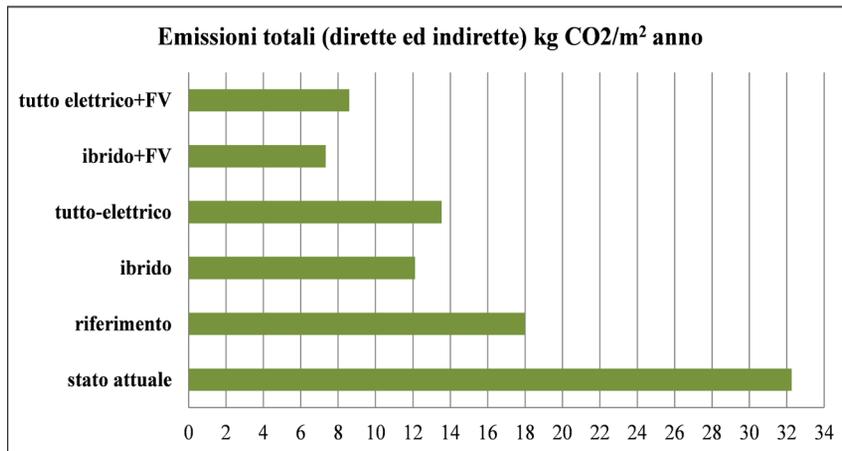


Figura 4 - Impatto ambientale delle soluzioni di efficientamento proposte.

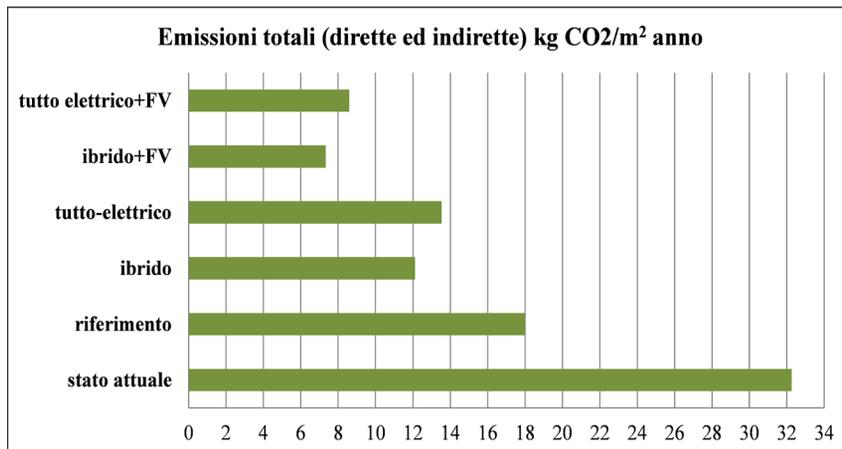


Figura 5 - Costi di investimento per le soluzioni di efficientamento proposte.

al divieto di costruzione di nuovi impianti termoelettrici monovalenti alimentati a combustibili fossili tra il 2030 e il 2040.

L'analisi *LCC* ha permesso di risolvere la questione della scelta tra sistema ibrido e sistema "tutto elettrico", e tra prelievo dalla rete o autoproduzione dell'energia elettrica necessaria. Infatti, il valore di *Discounted Cash Flow (DCF)* risultante, indica che la soluzione di sistema ibrido alimentato da fonte solare fotovoltaica è preferibile, perché rappresenta il miglior compromesso tra costi di investimento e costi di esercizio (Figura 5). D'altra parte, questa soluzione orientata al massimo impiego

delle fonti rinnovabili, fornisce una grande autonomia energetica alla scuola.

L'attuale mix energetico nazionale non è ancora maturo per una scelta "tutto elettrico", che risente del costo di acquisto dell'energia elettrica dalla rete, pur essendo la configurazione tra quelle proposte, più efficiente dal punto di vista termodinamico.

La copertura verde estensiva risultando poco rilevante rispetto agli interventi di efficientamento energetico, come la coibentazione spinta, non è stata considerata per l'analisi *LCC* ed in combinazione con le soluzioni proposte. È ben noto come i tetti verdi e le

soluzioni *cool-roof* permettano di ridurre i valori della temperatura superficiale dei tetti, e possano mitigare il microclima solo se superfici molto estese. In particolare, mentre i *cool-roof* sono più efficaci in termini di mitigazione della *UHI*, i tetti verdi specie di tipo estensivo, possono incidere sulla riduzione del fabbisogno di energia primaria annuale dell'edificio, quando la copertura è apprezzabile rispetto alla superficie involucrate disperdente totale. Dal punto di vista termico il verde agisce sulla riduzione degli apporti solari. È stato per questo considerato un fattore di assorbimento solare medio di 0,3. I risultati delle simulazioni hanno mostrato una riduzione degli apporti solari di 0,7 kWh/m² anno in grado di contenere il surriscaldamento del primo piano, insieme ad una riduzione delle emissioni annuali di CO₂ dovute al solo tetto verde, del 5% rispetto allo stato attuale. È chiaro come la copertura a verde estensivo non incida in maniera apprezzabile sul fabbisogno energetico dell'edificio, quanto invece sull'aumento della massa ed inerzia del solaio riducendo gli apporti solari gratuiti.

Da qui l'importanza di sviluppare strategie *site-specific*, in particolare per la scuola/edificio e per i luoghi, gli ambienti urbani e sociali in cui si trova, come ad esempio la vicinanza a vie di trasporto e sistemi di produzione energetica decentrati, la vicinanza a parchi, aree rurali e periurbane verdi, per adattare in modo ottimale ogni intervento alle caratteristiche architettoniche, tipologiche e impiantistiche delle scuole, morfologiche e climatiche del luogo.

Se si pensa agli obiettivi di efficienza energetica e rigenerazione del sistema edificio-impianto, secondo una visione sistemica e di tutela dell'ambiente, della biodiversità e salute (degli ecosistemi e persone), risulterebbe necessario associare alle soluzioni di efficientamento proposte la realizzazione di un sistema verde integrato, usando l'area circostante la scuola e quelle limitrofe. Questo comporterebbe una

significativa riduzione degli impatti antropici e dell'isola di calore urbana. L'aumento della quantità di verde nelle aree circostanti, deve tener conto di molti fattori, tra i cui: contesto urbano o naturale, presenza di piani di gestione attiva (manutenzione periodica o ceduo), eventuale presenza di grave stress ambientale (mancanza d'acqua, attacchi parassitari, ecc.), variabilità del clima locale, tipo di suolo, presenza e tipologia di corsi di acqua, tipo ed età della pianta, altezza, diametro del fusto (*DBH*), area di proiezione della chioma (*DLA*), indice di superficie fogliare (*LAI*), area della superficie fogliare per unità di superficie del suolo, *Normalized Difference Green-Gray Volume index (NDGG*; Giannico *et al.*, 2022). Sono importanti gli studi in letteratura che si occupano della valutazione della capacità di cattura degli inquinanti nelle aree urbane da parte di sistemi integrati di verde, con misure dirette e modellizzazione numerica (Nocentini *et al.*, 2021; Grattani *et al.*, 2018; Bottalico *et al.*, 2022).

Ad oggi è ancora aperto il dibattito su quale sia la migliore tipologia di piano ambientale per la sostenibilità, destinato ai contesti urbani.

Tuttavia, se si realizzasse una messa a dimora anche solo nello spazio intorno la scuola con alberi ad alto fusto e densità fogliare importante, in riferimento alla letteratura in materia, si può calcolare un assorbimento di CO₂ pari a 10-20 kg/anno, di O₃ pari a 17,50-9,5 kg/anno, di NO₂ pari a 8,89-16,12 kg/anno, all'interno di un ciclo di crescita che raggiunge il suo massimo in un intervallo temporale compreso tra 20 e 40 anni. I platani e i tigli sono tra gli alberi ad alto fusto più diffusi nell'area urbana fiorentina (<https://www.politec-srl.com/files/>; <https://maps2.ldpgis.it/reggello/sites/reggello/files>).

Nelle zone suburbane sono presenti soprattutto gli olmi, fatto che denota una traccia storica dell'epoca preurbanistica perché servivano a tracciare i confini dei campi coltivati.

La letteratura sull'argomento (Nocentini *et al.*, 2021; Gratani *et al.*, 2018) indica che un taglio sviluppato, è in grado di assorbire 140 kg (CO₂)/anno, così come un olmo. Il quartiere dove ha sede la scuola Don Milani, si trova nella zona sud-ovest di Firenze, vicino ad aree agricole, con un tessuto urbano poco denso e ampi spazi non edificati. La sola scuola dispone di un'area vuota trattata a prato di 3500 m² (oltre gli ingressi).

In quest'area potrebbero essere piantati 70 alberi ad alto fusto a fitta maglia, garantendo un totale di 9800 kg (CO₂)/anno assorbiti. Attualmente l'attività della scuola, come sistema edificio-impianto, genera emissioni dirette e indirette pari a 115000 kg(CO₂)/anno. Ricordando che le emissioni dirette sono dovute alla combustione locale del gas in caldaia e quelle indirette sono dovute alla produzione remota di energia elettrica tramite centrali a carbone (molto diffuse in Italia), risulta evidente l'efficacia della realizzazione di un sistema verde. Esso farebbe da *buffer* alle forzanti esterne e *damping* ai cambiamenti climatici. Tutti gli scenari di rigenerazione energetica proposti comportano una riduzione delle emissioni, arrivando fino a 25000 kg (CO₂)/anno per lo scenario di sistema ibrido abbinato al fotovoltaico. Per realizzare una scuola ad impatto zero (zero missioni climalteranti), sarebbe sufficiente meno di un ettaro di coltivazione intensiva di alberi. Tutto ciò avrebbe anche importanti conseguenze sociali, culturali, economiche, nonché sulla salute. Ma andrebbe pensato nell'ottica di una programmazione dello sviluppo della tutela ambientale, perché i tempi necessari al verde e al sistema edificio-impianto non sono sincroni.

7. CONCLUSIONI

L'efficientamento energetico della scuola primaria Don Milani si è basato su un approc-

cio sistemico e di compromesso tra obiettivi energetici, impegno economico (costi monetari ed energetici) e fattibilità di ogni intervento in relazione alle funzioni scolastiche svolte, ovvero ai profili temporali di fruizione della scuola e riorganizzazione funzionale e distributiva dovuta alle diverse fasi di cantierizzazione, nonché della tempistica dei lavori.

Le soluzioni di rigenerazione energetica proposte possono essere implementate senza interferire con la normale funzionalità e fruizione della scuola: l'isolamento spinto viene applicato all'involucro edilizio esterno, il *revamping* impiantistico interessa principalmente l'impianto termico, ed il sistema verde è pensato nell'area circostante la scuola, con interventi mirati, sequenziali, capillari e programmati nel tempo per tener conto del naturale sviluppo del bosco, anche in aree adiacenti e più distanti (Ciancio e Nocentini, 1996).

Nonostante il mancato raggiungimento della classe A dell'edificio, l'insieme delle soluzioni rispetta la politica energetica dell'UE, spostando l'approvvigionamento energetico da fonti fossili ad energia elettrica, e fornendo energia elettrica autoprodotta in misura consistente con fonte solare fotovoltaica.

Puntare alla classe A, o *ZEB* avrebbe comportato la ristrutturazione di gran parte dell'edificio, con costi paragonabili alla demolizione e successiva ricostruzione, e forte impatto sociale e logistico per le necessarie fasi di cantierizzazione.

Avrebbe anche comportato un aggravio economico per l'Ente Gestore (Comune di Firenze), con una ricaduta sociale ed ambientale negativa sullo svolgimento delle attività e degli spostamenti nel circondario, comprese le piccole imprese e il sistema dei trasporti.

Questo nostro studio offre un esempio prototipale, ma anche un approccio metodologico ripetibile e adattabile a numerosi contesti simili, perché basato su una procedura di analisi

affidabile e sull'implementazione di soluzioni con tecnologie e materiali ampiamente disponibili sul mercato.

L'importante riduzione delle emissioni di CO₂ dallo stato esistente allo scenario con le migliori prestazioni energetiche è del 75%. Questo risultato permette di raggiungere la condizione *fit for fit 55*, ovvero il rispetto della legge europea sul clima (EU-Council FIT-FOR-FIT55). In quest'ottica, i paesi dell'UE stanno lavorando per una nuova legislazione finalizzata al raggiungimento di questo obiettivo e per rendere l'UE neutrale dal punto di vista climatico entro il 2050.

Il progetto di un sistema verde per la scuola si rivela il potenziale di qualsiasi intervento di efficientamento energetico. Il sistema verde al contorno della scuola, è una soluzione efficace per la realizzazione di un'ulteriore riduzione delle emissioni, purchè si tenga conto dei tempi necessari alla crescita delle piante che non coincidono con quelli edilizi-impiantistici.

D'altra parte, come per la massima integrazione ed efficacia delle rinnovabili, nonché il loro decollo, serve il cambiamento radicale dello stile di vita e l'abbattimento dei consumi, così per la massima estensione/applicazione ed efficacia di *NBS* integrate in un ampio progetto di un sistema verde, serve un contesto urbano e di edifici-impianti a "zero" consumi/fabbisogni energetici, ma serve anche il cambiamento del modo di ragionare e dello stile di vita.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano: Dott. Luca Fibbi del Centro LAMMA CNR IBIMET di Firenze, ed il Dott. Michele Mazzoni, Direttore della Direzione Lavori Pubblici della Regione Toscana (già Direttore dei Servizi Tecnici del Comune di Firenze).

RIASSUNTO

Il settore dell'edilizia scolastica pubblica offre grandi opportunità di efficientamento energetico e di riduzione delle emissioni di CO₂. In questa ricerca viene proposto un metodo per la valutazione energetica degli edifici scolastici. Il metodo implementa semplici informazioni di input collegate a simulazioni dinamiche. L'obiettivo principale è quello di valutare l'impatto energetico, ambientale ed economico delle diverse proposte di rigenerazione ed efficientamento, combinando l'integrazione del sistema verde. L'edificio scelto come caso studio, che presenta caratteristiche costruttive e termofisiche seriali e molto diffuse, consente di estendere la validità dei risultati ottenuti a casi e condizioni ambientali e contestuali simili. I risultati hanno evidenziato l'importanza di sviluppare strategie *site-specific* e soluzioni *green energy*, per adattare in modo ottimale qualsiasi intervento alle caratteristiche architettoniche, tipologiche e impiantistiche della scuola. L'esempio proposto è un caso prototipale affinché i Comuni e le Pubbliche Amministrazioni, che posseggono la maggior parte delle scuole in Italia, possano utilizzarlo come strumento di conoscenza base per progetti futuri orientati alla transizione energetica, ma anche per una formazione specifica dedicata.

BIBLIOGRAFIA

- ASHRAE, April 2020 - *Issues and Statements on Relationship Between COVID-19 and HVAC in Buildings*. Available online: <https://www.ashrae.org/about/news/2020/ashrae-issues-statements-on-relationship-between-covid-19-and-hvac-in-buildings>
- Bakmohammadi P., Noorzai E., 2020 - *Optimization of the design of the primary school classrooms in terms of energy and daylight performance considering occupants' thermal and visual comfort*. Energy Reports 6, 1590-1607; <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.06.008>
- Balocco C., Leoncini L., 2020 - *Energy Cost for Effective Ventilation and Air Quality for Healthy Buildings: Plant Proposals for a Historic Building School Reopening in the Covid-19 Era*. Sustainability Int. Journal, 12; <https://doi.org/doi:10.3390/su12208737>
- Balocco C., Leoncini L., 2022 - *A Study on Retrofitting Proposals for an Historic School Building in the Energy Transition Perspective*. Int. Journal of Heat and Technology; <https://doi.org/10.18280/ijht.400406>
- Barrett P., Treves A., Shmis T., Ambasz D., Ustinova M., 2019 - *The Impact of School Infrastructure on Learn-*

- ing: *A Synthesis of the Evidence*. International Development in Focus, World Bank, Washington/PRIN.
- Bottalico F., Travaglini D., Chirici G., Garfi V., Giannetti F., De Marco A., Fares S., Marchetti M., Nocentini S., Paoletti E., Salbitano F., Sanesi G., 2017 - *A spatially-explicit method to assess the dry deposition of air pollution by urban forests in the city of Florence, Italy*. Urban Forestry and Urban Greening, 27, 221-234; <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.08.013>
- Cantón M.A., Ganem C., Barea G., Llano J.F., 2014 - *Courtyards as a passive strategy in semi dry areas. Assessment of summer energy and thermal conditions in a refurbished school building*. Renewable Energy 69, 437-446. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.03.065>
- Ciancio O., 1994 - *I diritti del bosco*. L'Italia Forestale e Montana, 49 (5): 445.
- Ciancio O., Nocentini S., 1996 - *Il bosco e l'uomo: l'evoluzione del pensiero forestale dall'umanesimo moderno alla cultura della complessità. La selvicoltura sistemica e la gestione su basi naturali*. Firenze, Accademia Italiana di Scienze Forestali.
- Cohen-Shacham E., Walters G., Janzen C., Maginnis S. (eds.), 2016 - *Nature-based Solutions to address global societal challenges*. Gland, Switzerland: IUCN.
- Demaneue C., Tweddell T., Davies M., 2010 - *Bridging the gap between predicted and actual energy performance in schools*. World Renewable Energy Congress XI, 25-30 September 2010, Abu Dhabi, UAE.
- EU Council - *FIT-FOR-FIT55*; <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>
- Gerber S., Rix A.J., Booyen M.J., 2019 - *Combining grid-tied PV and intelligent water heater control to reduce the energy costs at schools in South Africa*. Energy for Sustainable Development, 50: 117-125. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.03.004>
- Giannico V., Stafoggia M., Spano G., Elia M., Davvand P., Sanesi G., 2022 - *Characterizing green and gray space exposure g. 1 for epidemiological studies: Moving from 2D to 3D indicators*. Urban Forestry and Urban Greening, 72; <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127567>
- Gratani L., Di Martino L., Frattaroli A.R., Bonito A., 2018 - *Carbon sequestration capability of Fagus sylvatica forests developing in the Majella National Park (Central Apennines, Italy)*. Journal of Forestry Research, 29 (5); <https://doi.org/10.1007/s11676-017-0575-4>
- Habibi S., Valladares O.P., Peña D., 2020 - *New sustainability assessment model for Intelligent Façade Layers when applied to refurbish school buildings skins*. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 42, 100839; <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100839>
- ISTAT National Institute of Statistics, 2011 - *15th General Census of Population and Housing*.
- Moazzen N., Karagüler M.E., Ashrafian T., 2021 - *Comprehensive parameters for the definition of nearly zero energy and cost optimal levels considering the life cycle energy and thermal comfort of school buildings*. Energy and Buildings, 253, 111487. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111487>
- Mørcka O.C., Paulsen A.J., 2014 - *Energy saving technology screening within the EU-project "School of the Future"*, Energy Procedia 48, 148-1492; <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.168>
- Nocentini S., Salbitano F., Travaglini D., 2021 - *The environmental role of trees and the urban forest in Florence*. Italian Academy of Forest Sciences.
- Österreicher D., Geissler S., 2016 - *Refurbishment in educational buildings - methodological approach for high performance integrated school refurbishment actions*. Energy Procedia, 96: 375-385; <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.163>
- Shao L., Yang Z., Zhang W., 2017 - *The Application of Intelligent Device and Method for Detecting Dynamic and Static Human Body in Energy-Saving Control of Schools*. Procedia Engineering, 205: 4017-4021; <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.871>
- Tsikra P., Andreou E., 2017 - *Investigation of the Energy Saving Potential in Existing School Buildings in Greece. The role of Shading and Daylight Strategies in Visual Comfort and Energy Saving*. Procedia Environmental Sciences, 38: 204-211; <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.107>
- UNI 10339:1995 - *Aeracoustic systems for well-being. General information, classification and requirements. Rules for the request for quotation, the offer, the order and the delivery*.
- UNI 10349-1:2016 - *Heating and cooling of buildings - Climatic data - Part 1: Monthly averages for the evaluation of the thermal energy performance of the building and methods for distributing solar irradiance into direct and diffuse fraction and for calculating solar irradiance on an inclined surface*.
- UNI 10351-2021 - *Building materials - Thermo-hygrometric properties - Procedure for choosing design values*.
- UNI EN 15459-1:2018 - *Energy performance of build-*

- ings - Hydronic heating and cooling systems in buildings - Part 1: Economic evaluation procedure for energy systems in buildings. Module M1-14.*
- UNI EN 16798-1:2019 - *Energy performance of buildings - Ventilation for buildings - Part 1: Indoor input parameters for the design and assessment of the energy performance of buildings with respect to indoor air quality, thermal environment, lighting and Acoustics. Module M1-6.*
- UNI EN 16798-3:2018 - *Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 3: Per gli edifici non residenziali - Requisiti prestazionali per i sistemi di ventilazione e di condizionamento degli ambienti. (Moduli M5-1, M5-4)*
- UNI EN ISO 10456:2008 - *Building materials and products - Hygrometric properties - Tabulated design values and procedures for determining the declared and design thermal values.*
- UNI EN ISO 13786:2018 - *Thermal performance of building components - Dynamic thermal characteristics - Calculation methods.*
- UNI EN ISO 15927-4:2005 - *Thermo-hygrometric performance of buildings - Calculation and presentation of climate data - Part 4: Hourly data for the evaluation of the annual energy demand for heating and cooling.*
- UNI EN ISO 52016-1:2018 - *Energy performance of buildings - Energy demands for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads - Part 1: Calculation procedures.*
- UNI EN ISO 7730-2006 - *Ergonomics of thermal environments - Analytical determination and interpretation of thermal comfort by calculating the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.*
- UNI/TS 11300-1:2014 - *Energy performance of buildings - Part 1: Determination of the building's thermal energy demand for summer and winter air conditioning.*
- UNI/TS 11300-5:2016 - *Energy performance of buildings - Part 5: Calculation of primary energy and the share of energy from renewable sources.*
- Wachenfeldt B.J., Mysen M., Schild P.G., 2007 - *Air flow rates and energy saving potential in schools with demand-controlled ventilation. Energy and Buildings, 39: 1073-1079; <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.10.018>*
- Yunyang Ye, Yan Chen, Jian Zhang, Zhihong Pang, Zheng O'Neill, Bing Dong, Hwakong Cheng, 2021 - *Energy-saving potential evaluation for primary schools with occupant-centric controls. Applied Energy, 293, 11685; <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116854>*
- Zinzi M., Battistini G., Ragazzini V., 2015 - *Energy and environmental monitoring of a school building deep energy renovation in Italy. Energy Procedia, 78: 3318-3323; <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.744>*
- Zinzi M., Pagliaro F., Agnoli S., Bisegna F., Iatauro, D., 2021 - *On the Built-Environment Quality in Nearly Zero-Energy Renovated Schools: Assessment and Impact of Passive Strategies. Energies, 14, 2799; <https://doi.org/10.3390/en14102799>.*