

## ARTICLE INFO

Received	18 March 2024
Revised	15 April 2024
Accepted	23 April 2024
Published	30 June 2024

## RIQUALIFICAZIONE E DECARBONIZZAZIONE DI EDIFICI SCOLASTICI

Il CIS Roma Scuole Verdi

## DEEP RENOVATION AND DECARBONISATION OF SCHOOL BUILDINGS

The CIS Roma Scuole Verdi

Carola Clemente, Francesco Mancini, Anna Mangiatordi, Mariangela Zagaria

### ABSTRACT

Il contributo illustra l'esperienza del CIS Roma Scuole Verdi, in cui il Gruppo di Ricerca DiAP dell'Università 'Sapienza' di Roma ha supportato il Dipartimento CSIMU di Roma Capitale nell'avvio di un percorso di riqualificazione energetico-ambientale e decarbonizzazione di 111 edifici scolastici distribuiti nei 15 Municipi del Comune di Roma. Attraverso un approccio sistemico e multi-scalare sono stati individuati e monitorati alcuni indicatori target di miglioramento prestazionale (KPIs), significativi per classe energetica, abbassamento delle emissioni climalteranti, riduzione dei fabbisogni energetici e approvvigionamento da fonti rinnovabili. L'apporto positivo delle soluzioni tecnologico-impianistiche implementate presenta un potenziale di replicabilità, contribuendo all'intensificazione delle azioni per il clima, con impatti sulla rigenerazione urbana e sui bilanci pubblici della città.

The contribution illustrates the experience of CIS Roma Scuole Verdi, where the DiAP Research Group of the 'Sapienza' University of Rome supported the CSIMU Department of Roma Capitale in launching a process of energy-environmental upgrading and decarbonisation of 111 school buildings distributed across the 15 Municipalities of the City of Rome. Through a systemic and multi-scalar approach, some Key Performance Indicators (KPIs) were identified and monitored, which were significant for energy class, reduction of climate-altering emissions, reduction of energy needs, and supply from renewable sources. The positive contribution of the implemented technological-plant solutions presents a replicability potential, contributing to the intensification of climate actions, with impacts on urban regeneration and the city's public budgets.

### KEYWORDS

edilizia scolastica, efficienza energetica, fonti energetiche rinnovabili, neutralità carbonica, riqualificazione profonda

school buildings, energy efficiency, renewable energy sources, carbon neutrality, deep renovation

**Carola Clemente**, Architect and PhD, is an Associate Professor of Architecture Technology at 'Sapienza' University of Rome (Italy); her research focuses on the management and feasibility control of complex programmes, technological and energy requalification of buildings, and Smart Cities and Communities (SCC). E-mail: carola.clemente@uniroma1.it

**Francesco Mancini**, Engineer and PhD, is an Associate Professor of Technical Systems at the PDTA Department, 'Sapienza' University of Rome (Italy); his research themes include procedures and methodologies for controlling and improving the energy-environmental quality in construction. E-mail: francesco.mancini@uniroma1.it

**Anna Mangiatordi**, Architect and PhD, is a Research Fellow and Adjunct Professor at the DiAP Department, 'Sapienza' University of Rome (Italy); her research focuses on smart typological and technological innovation of buildings for vulnerable users, green technologies and nature-based materials. E-mail: anna.mangiatordi@uniroma1.it

**Mariangela Zagaria**, PhD, at the DiAP Department, 'Sapienza' University of Rome (Italy), conducts research on energy efficiency and sustainable building management, particularly focusing on building monitoring and indoor air quality control to ensure environmental well-being. E-mail: mariangela.zagaria@uniroma1.it



Il raggiungimento della neutralità climatica nelle nostre città<sup>1</sup> (IEA, 2021) rappresenta un tema prioritario per l'Unione Europea in linea con i SDGs (Sustainable Development Goals)<sup>2</sup> dell'Agenda 2030 (UN, 2015) e con l'Accordo di Parigi<sup>3</sup>, che sostengono la transizione verso un'economia a basse emissioni di carbonio ed energeticamente sostenibile del settore delle costruzioni, con il duplice obiettivo di triplicare la capacità di energia rinnovabile e raddoppiare i tassi di miglioramento dell'efficienza energetica entro il 2030 (European Commission, 2023).

In Europa il settore edilizio appare ampiamente energivoro, con una produzione elevata di gas climalteranti, responsabile di circa il 40% dei consumi di energia totale e del 36% delle emissioni di GHG – GreenHouse Gases (European Parliament and Council of the European Union, 2023a), con un tasso medio annuo di rinnovamento pari a solo l'1% (European Commission, 2020a). L'incremento dell'efficienza energetica degli edifici e dei sistemi impiantistici rappresenta un passaggio fondamentale per il perseguimento dei target stabiliti dall'European Green Deal (European Commission, 2019), che impongono una riduzione del 55% delle emissioni nette di gas serra rispetto ai livelli del 1990 entro il 2030, rendendo vincolante il perseguimento della neutralità carbonica al 2050 (European Commission, 2020e).

Per raggiungere tali obiettivi, l'Unione Europea dovrebbe aumentare la quota di energie rinnovabili nel consumo finale di energia del 42,5% (European Parliament and Council of the European Union, 2023b), migliorando l'efficienza energetica degli edifici di almeno il 32,5% (European Parliament and Council of the European Union, 2018): ciò si traduce nella necessità di abbassamento delle emissioni di GHG del 60%, del consumo energetico finale del 14% e del consumo per il riscaldamento e per il raffreddamento del 18% (European Commission, 2020d), garantendo un tasso di rinnovamento profondo annuale pari ad almeno il 3% (BPIE, 2021).

Particolare attenzione è rivolta alla ristrutturazione del patrimonio esistente, dando priorità al miglioramento degli immobili della PA (Pubblica Amministrazione) con le peggiori performance energetico-ambientali<sup>4</sup>, tra cui le Scuole (European Commission, 2020c) che assumono un ruolo esemplare su cui far leva per massimizzare il contributo in termini di decarbonizzazione, mediante il rafforzamento dell'uso di FER (Fonti Energetiche Rinnovabili), per ridurre la dipendenza da combustibili fossili, anche puntando alla diffusione su larga scala degli interventi, e per potenziarne gli effetti (European Parliament and Council of the European Union, 2023c).<sup>5</sup>

A scala nazionale il PNIEC (Piano Nazionale Integrato Energia e Clima; MASE, 2023)<sup>6</sup> incentiva la realizzazione di interventi di riqualificazione profonda e di efficientamento energetico degli edifici scolastici per limitare le emissioni di CO<sub>2</sub> e contrastare il riscaldamento globale. L'edilizia scolastica in Italia rappresenta un patrimonio altamente disperdente, con problematiche di accessibilità, benessere indoor e sicurezza: su un parco di 40.321 edifici scolastici oltre il 74,8% rientra nelle ultime tre classi energetiche E, F e G, con una corposa produzione di emissioni climalteranti, e solo il 10,8% nelle prime tre classi A, B, C; tra questi ultimi il 4,2% è in classe A (Legambiente, 2023).

Nell'ambito di una generale politica di efficientamento energetico e di riqualificazione del patrimonio edilizio pubblico in direzione 'carbon-neutral', l'intervento su un rilevante numero di edifici strategici come le Scuole, spesso in condizioni manutentive obsolete, non del tutto adeguate alle funzioni svolte e solo in esigua parte rispondenti ai requisiti minimi di prestazione energetica, assume quindi un ruolo decisivo.

Il Comune di Roma ha intrapreso un robusto Programma per la riqualificazione del proprio patrimonio edilizio scolastico, con la finalità di accelerare i processi di decarbonizzazione dell'ambiente costruito e di contribuire alle sfide climatiche attraverso interventi di ristrutturazione profonda applicabili su larga scala (Roma Capitale, 2023). Le misure messe in atto dal Gruppo di Ricerca del DiAP dell'Università 'Sapienza' di Roma, congiuntamente con il Dipartimento CSIMU di Roma Capitale nell'ambito del CIS (Contratto Istituzionale di Sviluppo) Roma Scuole Verdi – Efficientamento Energetico e Riqualificazione di Edifici Scolastici<sup>7</sup>, hanno rappresentato un'opportunità eccezionale di trasformazione di una porzione consistente del comparto di edilizia scolastica del Comune di Roma, significativa per caratterizzazione tecnologico-impiantistica, dimensione degli interventi, metodologia operativa adottata e apporto positivo in qualità di ricadute sul bilancio energetico comunale.

L'esperienza di ricerca sperimentale ha avuto come finalità l'avvio di un percorso di riqualificazione profonda e decarbonizzazione su 111 edifici scolastici distribuiti nei 15 Municipi del Comune di Roma. A partire dall'inquadramento del tema trattato nel contesto scientifico – internazionale e nazionale – di riferimento, il presente contributo evidenzia gli aspetti di originalità e di interesse della ricerca sviluppata, anche alla luce delle specificità che caratterizzano la Città di Roma. Segue la descrizione del programma CIS Roma Scuole Verdi e delle fasi di lavoro, illustrando l'approccio sistemico e ad ampia scala adottato in materia di sostenibilità energetico-ambientale, attraverso l'identificazione dei principali indicatori target di miglioramento e controllo prestazionale (KPIs – Key Performance Indicators) monitorati.

Rispetto alle caratteristiche storico / architettoniche e tecnologico-costruttive / impiantistiche peculiari del campione di edifici scolastici considerato è stata specificata la metodologia adottata in termini di criteri di selezione e di comparazione di interventi sul sistema involucro-impianti. L'esplicitazione dei risultati raggiunti con gli interventi di riqualificazione energetico-ambientale proposti mette in luce l'apporto positivo delle soluzioni tecnologico-impiantistiche implementate per efficienza energetica e decarbonizzazione rispetto ai KPIs individuati e in qualità di incidenza sull'ambiente costruito, anche nell'ottica futura della creazione di comunità energetiche che potranno avere come fulcro le Scuole.

La ricerca sperimentale, nel suo carattere di replicabilità, contribuisce al dibattito scientifico sulla rigenerazione urbana, sul raggiungimento della neutralità carbonica e all'intensificazione delle azioni per il clima, introducendo un approccio multi-scalare per la riqualificazione energetico-ambientale che interessa un numero consistente di immobili pubblici, come le Scuole, valutandone le evidenze a scala locale e globale.

L'indotto della ricerca è rivolto sia ai ricercatori che si occupano di tematiche di gestione del processo edilizio e del progetto in chiave energetico-ambientale sia alle strutture di committenza della PA e ai professionisti del settore impegnati nelle attività di progettazione o di controllo tecnico del progetto, anche a supporto della PA, i quali possono trarre vantaggio dalle metodologie sviluppate nella proposta di modelli di processo eco-efficienti e di progetto sostenibili dal punto di vista ambientale su comparti immobiliari simili, nel rispetto della normativa attualmente in vigore in materia di Contratti Pubblici (Decreto Legislativo 31 marzo 2023 n. 36) e GPP (Green Public Procurement; European Commission, 2008).

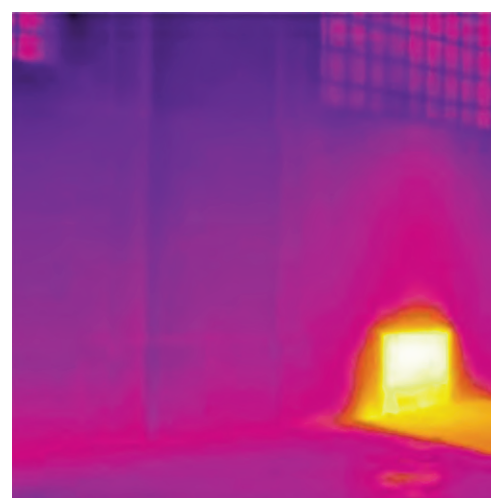
**Contesto di riferimento** | Negli ultimi decenni la Città di Roma ha visto cambiamenti importanti negli andamenti delle temperature e un aumento delle ondate di calore, quale conseguenza dell'eccessiva produzione di emissioni di GHG e del riscaldamento globale (Spano et alii, 2021). L'implementazione di una Proposta di Strategia di Adattamento Climatico (Roma Capitale, 2024) che contempra la riqualificazione 'pesante' e a larga scala di edifici scolastici può essere utile a ridurre gli impatti e a promuovere nuovi scenari di trasformazione energetico-ambientale.

Nonostante la rispondenza ai CAM edilizia (MITE, 2022b) negli appalti pubblici sia ormai vincolante (Baiani and Altamura, 2019), attraverso approcci eco-orientati nei processi (Clemente, Altamura and Cellurale, 2019) e nei progetti di riqualificazione, la domanda di miglioramento della qualità ambientale degli edifici scolastici risulta ancora in larga parte disattesa (Antonini et alii, 2015).

Spesso le PA non dispongono di dati o studi sufficienti sugli attuali profili energetici degli edifici scolastici o su potenziali scenari di miglioramento ottenibili (Clemente, 2012) riguardo al risparmio energetico e alla riduzione delle emissioni inquinanti. Il più delle volte, la stessa misura di ristrutturazione viene attuata su tutte le tipologie di edifici, senza valutarne la suscettività architettonica o impiantistica (Romano et alii, 2023) rispetto alla necessità di riduzione del fabbisogno energetico mediante l'efficientamento dell'involucro o alle esigenze di rinnovo degli impianti di riscaldamento e di raffrescamento (Liébana-Durán, Serrano-Lanzarote and Ortega-Madrugal, 2021). All'installazione degli impianti da FER non sempre corrispondono interventi di riqualificazione integrale degli edifici, vanificandone in larga misura i benefici potenziali anche nell'ottica di ammortizzare i costi di investimento (Romano, Lalloa and Mancini, 2021).

Rispetto alle numerose ricerche volte a sistematizzare le misure da adottare per la riqualificazione energetico-ambientale negli edifici scolastici – si citano a titolo esemplificativo i progetti europei TABULA (2012) e Sherpa Interreg-MED (Interreg Mediterranean, 2018) – il presente studio propone una metodologia operativa sistemica e multi-scalare che consente di affrontare in modo integrato gli aspetti di riduzione della domanda energetica unitamente alla necessità di abbassamento delle emissioni di CO<sub>2</sub>, valutandone gli impatti sul singolo edificio e a scala urbana.

Nel caso di Roma l'edilizia scolastica rappresenta la tipologia edilizia pubblica più densa e capillarmente distribuita all'interno della città (Figg. 1, 2), con scarse prestazioni energetico-ambientali



(Figg. 3-6). Migliorare l'efficienza energetica degli edifici scolastici significa, pertanto, non solo tagliare la spesa pubblica comunale, ma anche aumentare di gran lunga la qualità ambientale, riducendo al contempo la quantità di emissioni di carbonio prodotte (Legambiente, 2021). Sebbene le strategie implementabili per la riqualificazione possano essere applicate a immobili singoli, affrontare le questioni energetico-ambientali a scala municipale o urbana consentirebbe di ottenere risultati più efficaci e di garantire un decisivo incremento dei tassi di rinnovamento, accelerando i processi di decarbonizzazione dell'ambiente costruito.

Questo approccio transcalare richiede una consapevolezza culturale, prima che tecnica o economica, necessaria a supportare lo sviluppo di progetti complessi secondo una visione olistica, che incontra spesso la resistenza delle strutture di committenza delle PA, dei progettisti e dei tecnici ad affrontare programmi e progetti in modo integrato, attraverso proposte di intervento sugli edifici che consentano una valutazione tangibile delle incidenze sui casi singoli e, in modo sistemico, sulla più ampia rete infrastrutturale e patrimoniale della città. La scarsità di dati tecnici disponibili da parte delle PA sugli edifici pubblici può, inoltre, limitare l'implementazione e la diffusione di questi approcci, con ricadute pesantemente negative sui consumi energetici, sull'impronta ambientale e sul peso effettivo in termini di bilancio finanziario delle città.

**Il CIS Roma Scuole Verdi** | Oltre a rappresentare un grande investimento economico<sup>8</sup>, il CIS Roma

Scuole Verdi costituisce una tappa importante nel percorso di decarbonizzazione intrapreso da Roma Capitale con il PAESC (Piano di Azione per l'Energia Sostenibile e il Clima)<sup>9</sup>, in aderenza alle linee guida definite dal network mondiale C40 Cities (Climate Leadership Group)<sup>10</sup> e dal programma 100 Carbon-Neutral and Smart Cities by 2030 con cui l'Unione Europea intende agevolare lo sviluppo di progetti intersettoriali tesi alla realizzazione di città intelligenti, sostenibili e a basse emissioni di carbonio (European Commission, 2020b).

L'obiettivo del CIS è la promozione di progetti e di interventi di riqualificazione energetico-ambientale su 212 edifici scolastici – tra Scuole dell'infanzia, primarie e secondarie di primo grado – distribuiti tra i 15 Municipi dell'intero territorio comunale (Fig. 7). Il programma è suddiviso in due fasi, in base alle priorità degli edifici scolastici, alle esigenze di intervento e alle risorse finanziarie disponibili (Fig. 8).

Il Gruppo di Ricerca DiAP è stato coinvolto nella prima fase che ha interessato 111 edifici scolastici e ha supportato l'ufficio CSIMU: a) nella redazione dei DIP (Documenti di Indirizzo alla Progettazione), elaborando le informazioni tecniche di base sugli edifici e individuando le linee di indirizzo e le categorie di intervento necessarie, entro importi economici definiti; b) nella verifica e controllo tecnico-prestazionale della qualità energetico-ambientale delle soluzioni tecnologico-impiantistiche proposte nei PFTE (Progetti di Fattibilità Tecnico-Economica) elaborati dai team di progettisti, uno per ciascun Municipio, selezionati

attraverso una procedura di affidamento pubblico.

L'adesione ai principi del GPP ha costituito un campo di prova ambizioso per la verifica e la validazione di modelli operativi in grado di orientare l'attuazione di progetti coerenti e congruenti non solo dal punto di vista tecnico-economico, ma anche della sostenibilità ambientale, dando conto della gestione eco-efficiente delle risorse, attraverso l'istituzione e il monitoraggio di KPIs controllabili e misurabili (Tabella 1).

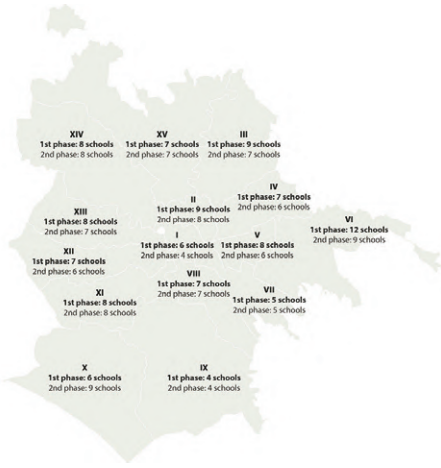
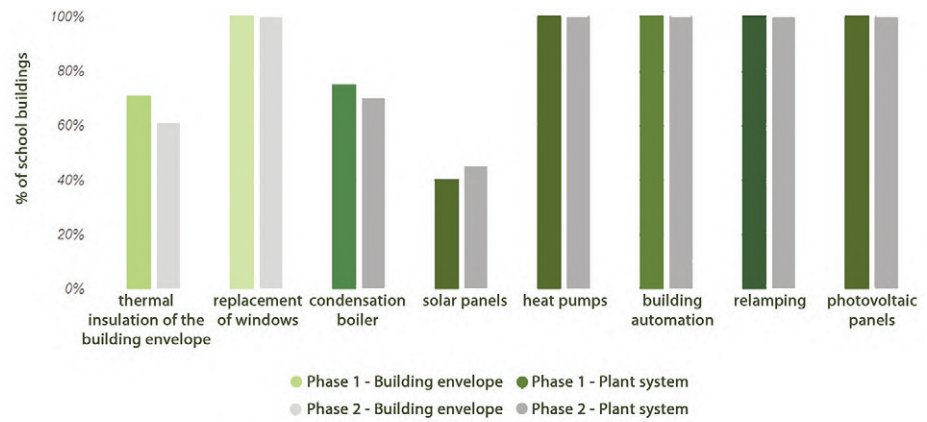
Tale operazione di valutazione energetico-ambientale, avvenuta con un approccio sistemico e multi-scalare, ha avuto come finalità l'individuazione delle migliori azioni da intraprendere per la diminuzione del fabbisogno energetico e delle emissioni di CO<sub>2</sub>, conformemente alla normativa tecnica vigente, entro il perimetro finanziario definito dal CIS, in riferimento ai singoli edifici scolastici e all'insieme degli immobili all'interno dello specifico Municipio e nel rispetto dei seguenti KPIs: a) il miglioramento della prestazione energetica globale del sistema edificio / impianto di almeno una classe energetica rispetto a quella di partenza; b) la riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> pari all'abbattimento di almeno il 20% del valore precedente la riqualificazione.

In fase di definizione del CIS e di elaborazione dei DIP, gli indicatori a) e b) sono stati fissati, in modo prudente, al minimo della soglia perseguibile, in considerazione della discontinua conoscenza dello stato attuale di efficienza e del profilo prestazionale energetico-ambientale del patrimonio scolastico, quale condizione diffusa in alcuni dei Municipi di

Previous page

**Fig. 1, 2** | Istituto Comprensivo Claudio Abbado – Primary School ‘Ermenegildo Pistelli’ in Rome (credits: A. Mangiatordi, 2024).

**Fig. 3-6** | Example of thermography and energy-environmental performance related to the ‘Ermenegildo Pistelli’ school building (source: Legambiente, 2021).



**Fig. 7** | Distribution of school buildings in the Municipalities of the Roma Capitale territory (credit: CIS Roma Scuole Verdi – First and Second Phase, adapted by the Authors, 2024).

**Fig. 8** | CIS planned interventions on the envelope/ plumbing system and available financial resources (credit: CIS Roma Scuole Verdi – First and Second Phase, adapted by the Authors, 2024).

**Tab. 1** | Synoptic overview of KPIs, units of measurement and calculation methods (credits: CIS Roma Scuole Verdi – First phase, adapted by the Authors, 2024).

Roma Capitale. La valutazione delle prestazioni raggiunte con gli interventi proposti nei PFTE è avvenuta verificando, inoltre, l’apporto aggiuntivo delle FER, a fronte di una riduzione del fabbisogno energetico globale, mediante il controllo di ulteriori KPIs: c) il fabbisogno di energia primaria totale; d) il fabbisogno di energia primaria non rinnovabile; e) il fabbisogno di energia primaria rinnovabile; f) la quota di produzione di energia rinnovabile.<sup>11</sup>

Gli indicatori a) e b) sono risultati di immediata significatività rispetto al livello di efficienza energetica raggiunta e all’incidenza in termini di decarbonizzazione sull’ambiente costruito. A valle dei PFTE le soglie minime di miglioramento della classe energetica e di abbattimento delle emissioni di CO<sub>2</sub> sono state soddisfatte e ampiamente superate in tutti gli immobili oggetto di riqualificazione. Riguardo agli indicatori c), d), e) ed f) il fabbisogno energetico complessivo degli edifici è stato di gran lunga ridotto, a fronte di un consumo di risorse energetiche ampiamente coperto da FER. Il controllo sistemico di tutti i KPIs ha, quindi, consentito di effettuare una valutazione esaustiva sulle ricadute complessive degli interventi sugli immobili singoli e in termini di bilancio energetico-ambientale globale della città.

**Materiali e metodi** | Nel territorio del Comune di Roma ricadono 1.394 edifici destinati a uso scolastico, di cui 1.296 di proprietà comunale e 104 di proprietà provinciale; il CIS Roma Scuole Verdi ha individuato 212 edifici da riqualificare, pari al 16,4% del patrimonio scolastico comunale; di



KPI	Definition	Unit of measurement	Calculation method
a)	Improvement of the energy performance of the building/plant system by at least one energy rating by the value prior to the requalification	_____	Italian DM 26 Giugno 2015
b)	Reduction of produced CO <sub>2</sub> equal to 20% of the value prior to the requalification	[kg/m <sup>2</sup> year]	UNI TS 11300:1-4
c)	Reduction of global primary energy demand	[kWh/m <sup>2</sup> year]	Italian DM 26 Giugno 2015
d)	Reduction of non-renewable primary energy demand	[kWh/m <sup>2</sup> year]	UNI TS 11300:1-4
e)	Increase of renewable primary energy demand	[kWh/m <sup>2</sup> year]	Italian DM 26 Giugno 2015
f)	Increase of production of renewable primary energy demand	[kWh/m <sup>2</sup> year]	UNI TS 11300:1-4



questi, 111 immobili sono stati oggetto della prima fase del CIS, costituendo quindi un campione rilevante per epoca di costruzione, consistenza tipologico-architettonica e caratterizzazione tecnologico-impiantistica. Le Figure da 9 a 11 mostrano la distribuzione degli edifici scolastici in base al periodo di costruzione e al volume lordo riscaldato, affiancando a una analisi di carattere storico-culturale, tecnologico-costruttiva<sup>12</sup> e dimensionale la lettura dell'evoluzione legislativa in materia di efficienza energetica.<sup>13</sup>

Dai dati emerge che il 35,1% degli edifici a uso scolastico è antecedente al 1976, anno di introduzione della prima legge italiana sul risparmio energetico (Legge 30 Marzo 1976 n. 373 – Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici), mentre il 61,3% è stato realizzato tra il 1976 e il 1991, anno in cui, attraverso la Legge 9 Gennaio 1991 n. 10 (Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia), vengono regolate le modalità progettuali, di installazione e di esercizio dei sistemi di impianto e aggiornate le modalità di calcolo per il fabbisogno energetico. Tali dati mettono in risalto come larga parte del parco immobiliare scolastico romano analizzato sia ampiamente inefficiente dal punto di vista energetico-ambientale, salvo interventi di manutenzione successivi.

La suddivisione degli edifici scolastici per fasi storiche e cicli temporali ha consentito una tipizzazione degli immobili oggetto di riqualificazione per gruppi omogenei e con problematiche analoghe, sia in rapporto al contesto urbano e all'organizzazione tipologica sia per caratterizzazione tecnologico-impiantistica ed energetico-ambientale, rispetto ai quali è stato possibile ipotizzare tipologie di intervento comuni, entro una checklist di strategie di intervento definita dalla governance di processo e di progetto sin dalla fase di programmazione del CIS.

L'involucro opaco di questi edifici è caratterizzato, in linea generale, da pareti fortemente dispendenti – in muratura, isolata nell'intercapedine o a cortina – e da coperture che presentano gravi problemi di infiltrazioni, o necessitano di zavorramento per essere adeguati all'integrazione con le dotazioni impiantistiche occorrenti (pannelli fotovoltaici, UTA, ecc.), mentre i sistemi di infisso e di oscuramento non rispondono alle prestazioni termo-acustiche richieste dalla normativa attualmente in vigore<sup>14</sup>. Il fabbisogno energetico termico è principalmente soddisfatto da caldaie a metano o a gasolio. La condizione dei terminali di impianto elettrico e termico dipende dalla frequenza degli interventi di manutenzione effettuati nel tempo. Laddove sono presenti impianti fotovoltaici o pannelli solari, questi sistemi risultano spesso non funzionanti e necessitano di essere compensati o sostituiti integralmente.

Allo stato attuale, solo l'1,8% degli edifici si colloca nella classe energetica C, mentre tutti gli altri appartengono a livelli di prestazione inferiori, nello specifico alle classi D (13,5%), E (38,8%), F (34,2%) e G (11,7%), con una produzione attuale di emissioni di CO<sub>2</sub> globale pari a 5.287,3 kg/mc annui.

Una fase fondamentale della ricerca sperimentale ha riguardato la valutazione dello stato di fatto e la calibratura degli interventi in relazione alla suscettività architettonica e impiantistica degli immobili interessati. Il rilievo da parte dei progettisti e la Diagnosi Energetica hanno consentito di verificarne la consistenza tecnologico-impiantistica effettiva, rispetto ai dati energetico-ambientali inizialmente forniti dalla PA contestualmente alla redazione dei DIP.

L'aggiornamento degli APE (Attestati di Prestazione Energetica) ha migliorato la trasparenza in qualità di efficienza dell'intero parco immobiliare: gli attestati hanno fornito informazioni sulle ca-

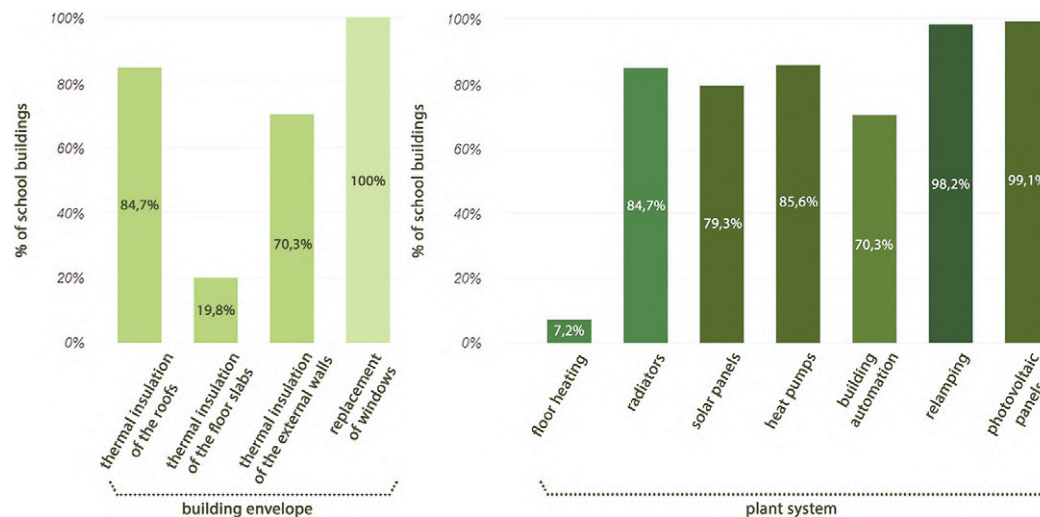
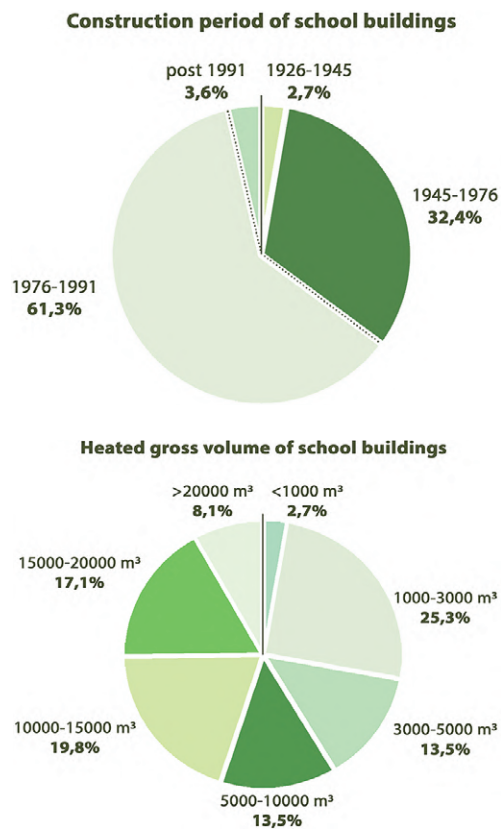
ratteristiche tecniche degli edifici e dei sistemi impiantistici, sulle prestazioni energetiche residue e sugli interventi previsti sul sistema involucro / impianti per garantire il miglioramento, restituendo dati di input / output in merito alla classe energetica e alle emissioni inquinanti, ai consumi e ai fabbisogni di energia primaria (totale, rinnovabile e non rinnovabile) e alla quota di produzione da FER risultante.

In una logica di efficientamento energetico ad ampia scala questi dati (resi disponibili e simulati) sono risultati essenziali per individuare gli immobili con le prestazioni peggiori che hanno urgente bisogno di riqualificazione e per valutare i miglioramenti ottenibili in funzione degli investimenti (confrontando la situazione ante e post), contribuendo a definire le priorità di intervento e a garantire un elevato livello di qualità energetico-ambientale dei singoli edifici, rispetto all'intero patrimonio immobiliare pubblico della città.

Contestualmente alla fase di redazione dei PFTE sono stati valutati, da parte del Gruppo di Ricerca, i benefici potenziali determinati dagli interventi di riqualificazione proposti sui singoli immobili e sui Municipi, indirizzando eventualmente i progettisti verso opportune ottimizzazioni.

**Risultati** | Il grafico in Figura 12 mostra come gli interventi di isolamento termico dell'involucro opaco siano stati applicati nell'84,7% dei casi sulle coperture anche al fine di mitigarne il surriscaldamento in condizione estiva, nel 19,8% sui solai controterra e nel 70,3% sulle pareti perimetrali verticali. In tutte le Scuole è stata prevista la sostituzione degli infissi esterni verticali comprensivi dei relativi sistemi di oscuramento, per consentire l'adeguamento alle norme termo-acustiche vigenti.

La limitazione dell'estensione generalizzata delle misure di retrofit sull'involucro opaco è dovuta a volte alla presenza di superfici poco disper-



**Fig. 9** | Characterisation of the school building stock by era of construction and prevailing building system (credit: CIS Roma Scuole Verdi – First Phase, adapted by the Authors, 2024).

**Fig. 10** | Distribution of school buildings in relation to the construction period and legislative evolution in energy conservation (credit: CIS Roma Scuole Verdi – First Phase, adapted by the Authors, 2024).

**Fig. 11** | Distribution of school buildings by gross heated volume (credit: CIS Roma Scuole Verdi – First phase, adapted by the Authors, 2024).

**Fig. 12** | Interventions on the opaque and transparent envelope proposed in the Technical-Economic Feasibility Projects (credit: CIS Roma Scuole Verdi – First phase, adapted by the Authors, 2024).

**Fig. 13** | Interventions on the proposed facilities in the Technical-Economic Feasibility Projects (credit: CIS Roma Scuole Verdi – First phase, adapted by the Authors, 2024).

denti e con valori di trasmittanza termica accettabili, altre volte a caratteristiche architettoniche di pregio di immobili soggetti a vincoli di carattere storico-culturale, ovvero a difficoltà tecniche di esecuzione (come nel caso di isolamento dall'interno per lo più nelle pareti in muratura portante o per insufflaggio delle pareti a cortina) nonché al recente svolgimento di lavori di manutenzione.

Le azioni previste per gli impianti (Fig. 13) hanno interessato nel 91,9% dei casi il rifacimento dei sistemi di riscaldamento con la sostituzione del generatore di calore e dei terminali; in particolare la tipologia a radiatori è stata adottata per l'84,7%, mentre per il restante 7,2% delle Scuole, tra Asili nido e Scuole dell'infanzia, sono stati previsti sistemi di riscaldamento radiante a pavimento, intervenendo parallelamente sulla coibentazione dei solai contro-terra. Risulta noto infatti che i bambini più piccoli trascorrono molto tempo giocando a contatto con il pavimento e i pannelli radianti possono rappresentare la migliore soluzione per garantire la mancanza di ingombri potenzialmente pericolosi, la silenziosità e, soprattutto, una temperatura superficiale confortevole data l'assenza di correnti d'aria.

L'inserimento di un sistema di produzione di energia termica da impianto solare o la messa in funzione di collettori, già installati ma inattivi, è stato previsto per il 79,3% degli edifici, salvo la presenza di incompatibilità di carattere paesaggistico-ambientale; nell'85,6% degli immobili è stata proposta l'installazione di pompe di calore.

Per quanto riguarda la produzione di energia elettrica, nella quasi totalità degli edifici (99,1%) è stata prevista la predisposizione di un impianto fotovoltaico. L'energia elettrica implementata con i sistemi di autoproduzione sarà utilizzata per la messa in funzione delle apparecchiature tecnologiche, per il sistema di illuminazione (che nel 98,2% dei casi sarà efficientato con la sostituzione dei

corpi illuminanti a tecnologia LED) e per l'alimentazione dei sistemi di Building Automation, ipotizzati nel 70,3% delle Scuole.

In tutti gli edifici scolastici oggetto di riqualificazione si verifica una riduzione dei consumi di energia termica ed elettrica. La Figura 14 mostra il risparmio di energia primaria rispetto alla situazione attuale, evidenziando una significativa diminuzione del fabbisogno di energia totale del 46,2% (KPI c). I grafici successivi considerano la variazione del fabbisogno energetico globale in fase ante e post-operam, distinta nelle due componenti di fabbisogno di energia primaria non rinnovabile (Fig. 15) e rinnovabile (Fig. 16): nel primo diagramma risulta evidente una importante riduzione della richiesta di energia non rinnovabile, pari al 56,0% (KPI d), coincidente con una minore domanda di alimentazione di energia termica ed elettrica da rete; al contrario, nella seconda figura, si rileva un incremento del 117,4% della richiesta di energia primaria rinnovabile (KPI e), corrispondente all'uso di impianti e apparecchiature alimentati da FER, rispetto alla situazione attuale.

La Figura 17 pone in relazione la richiesta di fabbisogno globale di energia primaria con l'epoca di costruzione, mettendo in luce l'incidenza della suscettività tecnologico-impiantistica degli edifici sulle prestazioni energetiche globali. Nella condizione ante-operam si evidenzia un lieve aumento del fabbisogno di energia nel corso degli anni, ossia nel passaggio dagli edifici realizzati in muratura portante a quelli con strutture a telaio. Nella condizione post-operam invece il fabbisogno diminuisce nella fase successiva agli interventi di efficientamento energetico: tale riduzione risulta maggiore negli edifici più antichi, evidenziando come gli interventi di efficientamento proposti abbiano una maggiore efficacia sugli edifici storici. La Figura 18 mette in relazione il fabbisogno globale di energia primaria con il volume lordo

riscaldato: si osserva, sia nella condizione ante che post-operam, una diminuzione del fabbisogno di energia all'aumentare del volume lordo riscaldato, con un valore medio pari al 44,0%; in particolare, per gli edifici di maggiori dimensioni, si rileva una riduzione importante della richiesta di energia.

Complessivamente si ottiene un aumento della quota di produzione di energia rinnovabile nella fase post-operam del 20,5% (KPI f; Fig. 19); l'impiego di sistemi di impianto alimentati da FER consente, pertanto, un progresso significativo verso la elettrificazione e la decarbonizzazione degli edifici scolastici.

In conclusione, nella fase post-intervento, si ha un incremento medio di classe energetica di 4,2 posizioni (Fig. 20), ben al di sopra del salto di una sola classe richiesta dal CIS (KPI a) con una frequenza di edifici in classe A4 (19,8%), A3 (4,5%), A2 (11,7%), A1 (9,9%), B (21,6%), C (18,0%), D (7,2%), E (4,6%) e F (2,7%). Analogamente la riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> risulta molto maggiore rispetto alla soglia minima del 20%, passando infatti a un valore di produzione totale di emissioni di CO<sub>2</sub> pari a 2.506,7 kg/mc annui, con un abbassamento medio del 52,6% (KPI b; Fig. 21).

Il valore finale globale dei risultati ottenuti, sintetizzato nei KPIs a), b) e c), d), e) ed f) per singoli edifici, Municipi e intero territorio comunale, risulta rilevante nell'ambito di una programmazione e pianificazione complessiva di azioni da attuare su larga scala, mediante l'utilizzo o la combinazione di tecnologie e la sperimentazione di soluzioni impiantistiche, che presentano un potenziale di replicabilità.

**Conclusioni e sviluppi futuri** | Gli interventi proposti con il CIS Roma Scuole Verdi garantiscono il raggiungimento di un elevato livello di qualità energetico-ambientale, con potenziali ricadute sulle

condizioni d'uso e gestione degli edifici attraverso una notevole riduzione dei fabbisogni energetici (in larga parte assorbita da FER) e con contributi importanti in termini di decarbonizzazione dell'ambiente costruito. Tale risultato assume una connotazione significativa laddove si considera l'impatto che le strategie e le soluzioni progettuali ipotizzate hanno non tanto sul singolo edificio, quanto sugli immobili nel loro complesso, risultando strategici nell'ottica di una programmazione e pianificazione a larga scala degli interventi.

L'avvio di un generale processo di riqualificazione energetica che interessa una quantità consistente di edifici scolastici di proprietà comunale costituisce una opportunità per conseguire obiettivi primari, quali l'aumento della classe energetica e la riduzione delle emissioni climalteranti, ma anche per garantire l'efficiamento dell'involucro e la completa messa a norma degli impianti termici ed elettrici, nonché l'istituzione di procedure di manutenzione e di adeguamento impiantistico da attuare in modo programmato e preventivo che consentano di ridurre lo stato di obsolescenza attuale e di abbassare i consumi, sfruttando l'apporto positivo delle FER.

Il quadro relativo alle tipologie e all'intensità di intervento e ai KPIs predisposto fornisce, in questa direzione, parametri utili per le PA che si occupano di guidare il processo decisionale e di controllare la progettazione e realizzazione di programmi di riqualificazione energetica su edifici scolastici simili.

La metodologia implementata rappresenta la base per la costruzione di una roadmap di misure per la riqualificazione profonda di edifici scolastici in direzione 'carbon-neutral' da adottare a scala urbana, rispetto ad aspetti di maggiore significatività, quale l'epoca di costruzione, la consistenza edilizia, la tecnologia costruttiva e le dotazioni impiantistiche presenti, restituendo un quadro di sintesi dei dati di input / output rilevanti in termini di fabbisogno di energia primaria totale, rinnovabile e non rinnovabile, quota dei consumi associati all'uso di fonti rinnovabili, livello di classe energetica raggiunto e riduzione di emissioni di CO<sub>2</sub>, ottenuti attraverso interventi specifici.

Le sinergie tra le diverse strategie progettuali e gli interventi ipotizzati risultano evidenti quando si passa dalla scala edilizia a quella urbana, determinando efficienze di sistema che puntano il più possibile alla sostituzione dei combustibili fossili, all'elettrificazione e al decisivo incremento nell'utilizzo di FER, consentendo di intraprendere un percorso di decarbonizzazione che abbia importanti ricadute sull'intero parco immobiliare pubblico della città. Sulla base dell'esperienza maturata e dei dati ottenuti la stessa PA di Roma Capitale potrà procedere in modo spedito alla realizzazione di un cospicuo piano di rinnovamento energetico che riguarda altri edifici scolastici, in coerenza con il CIS, con i progetti PNRR in corso di attuazione e con le linee guida del PAESC, che già prevede, in prima istanza, l'installazione di impianti fotovoltaici sulle coperture di 15 Scuole (una per ciascun Municipio) per attivare le prime comunità energetiche in grado di sostenere il fabbisogno energetico di interi comparti urbani.

the Sustainable Development Goals (SDGs)<sup>2</sup> of the 2030 Agenda (UN, 2015) and the Paris Agreement<sup>3</sup>, which support the transition to a low-carbon, energy-sustainable economy for the construction sector, with the twin goals of tripling renewable energy capacity and doubling energy efficiency improvement rates by 2030 (European Commission, 2023).

In Europe, the building sector appears to be largely energy-intensive, producing high levels of climate-changing gases, responsible for about 40% of total energy consumption and 36% of GHG – Green House Gases emissions (European Parliament and Council of the European Union, 2023a), with an average annual renovation rate of only 1% (European Commission, 2020a). Increasing the energy efficiency of buildings and plant systems is a key step in the pursuit of the targets set by the European Green Deal (European Commission, 2019), which impose a 55% reduction in net GHG emissions compared to 1990 levels by 2030, making the pursuit of carbon neutrality to 2050 binding (European Commission, 2020e).

To achieve these goals, the European Union should increase the share of renewable energy in final energy consumption by 42.5% (European Parliament and Council of the European Union, 2023b), improving the energy efficiency of buildings by at least 32.5% (European Parliament and Council of the European Union, 2018): this translates into the need to lower GHG emissions by 60%, final energy consumption by 14%, and heating and cooling consumption by 18% (European Commission, 2020d), ensuring an annual deep renovation rate of at least 3% (BPIE, 2021).

Particular attention is paid to the renovation of existing assets, prioritising the improvement of PA (Public Administration) buildings with the worst energy-environmental performance<sup>4</sup>, including Schools (European Commission, 2020c), which take on an exemplary role to leverage to maximise their contribution in terms of decarbonisation, through strengthening the use of RES (Renewable Energy Sources), to reduce dependence on fossil fuels, including by targeting large-scale deployment of interventions, and to enhance their effects (European Parliament and Council of the European Union, 2023c).<sup>5</sup>

On a national scale, the PNIEC (National Integrated Energy and Climate Plan; MASE, 2023)<sup>6</sup> incentivises the implementation of deep retrofit and energy efficiency interventions in school buildings to help limit CO<sub>2</sub> emissions and combat global warming. School buildings in Italy represent a highly dispersive heritage, with problems of accessibility, indoor well-being and safety: out of a stock of 40,321 school buildings, more than 74.8% fall into the last three energy classes E, F, and G, with a substantial production of greenhouse gas emissions; only 10.8% fall into the first three classes A, B, and C, of which 4.2% are class A buildings (Legambiente, 2023).

As part of a general policy of energy efficiency and redevelopment of the public building stock in a 'carbon-neutral' direction, intervention in a significant number of strategic buildings, such as Schools, which are often in an obsolete maintenance condition, not fully adequate for the functions performed and only in a small part meeting minimum energy performance requirement, therefore assumes a decisive role.

The Municipality of Rome has embarked on a robust Programme for redeveloping its school building stock, aiming to accelerate the decarbonisation of the built environment and contribute to climate challenges through deep renovation interventions applicable on a large scale (Roma Capitale, 2023). The measures put in place by the DiAP Research Group of the 'Sapienza' University of Rome, jointly with the CSIMU Department of Roma Capitale within the framework of the CIS (Institutional Development Contract) 'Roma Scuole Verdi – Efficiamento Energetico e Riqualificazione di Edifici Scolastici'<sup>7</sup>, have represented an exceptional opportunity for the transformation of a substantial portion of the school building sector of the Municipality of Rome, significant in terms of technological-plant characterisation, the size of the interventions, the operational methodology adopted and the positive contribution in terms of impact on the municipal energy balance.

The experimental research experience aimed to start a deep redevelopment and decarbonisation path on 111 school buildings distributed in the 15 Municipalities of Rome. Starting from the framing of the topic treated in the scientific context – international and national – of reference, this contribution highlights the originality and interest of the research developed, also in light of the specificities that characterise the City of Rome. This is followed by a description of the CIS Roma Scuole Verdi programme and the phases of work, illustrating the systemic and large-scale approach adopted in the field of energy-environmental sustainability through the identification of the Key Performance Indicators (KPIs) monitored for improvement and performance control.

Concerning the historical / architectural and technological-constructive/plant characteristics peculiar to the sample of school buildings considered, the methodology adopted was specified in terms of selection criteria and comparison of interventions on the envelope-plant system. The explication of the results achieved with the proposed energy-environmental upgrading interventions highlights the positive contribution of the technological plant solutions implemented for energy efficiency and decarbonisation with respect to the identified KPIs and in terms of their impact on the built environment, also with a view to the future creation of energy communities that may have Schools as their focus.

The experimental research, in its replicable nature, contributes to the scientific debate on urban regeneration, the achievement of carbon neutrality, and the intensification of climate action by introducing a multi-scalar approach to energy-environmental redevelopment that affects a substantial number of public buildings, such as Schools, evaluating the evidence at local and global scales.

The research inductee is aimed both at researchers dealing with building process and project management issues from an energy-environmental perspective and at PA commissioning structures and professionals in the sector engaged in design or technical project control activities, including in support of the PA, who can benefit from the methodologies developed in proposing eco-efficient process and environmentally sustainable project models on similar real estate compartments, in compliance with the regulations currently in force on Public Procurement Code (Decreto Legislativo

---

Achieving climate neutrality in our cities<sup>1</sup> (IEA, 2021) is a priority issue for the European Union in line with

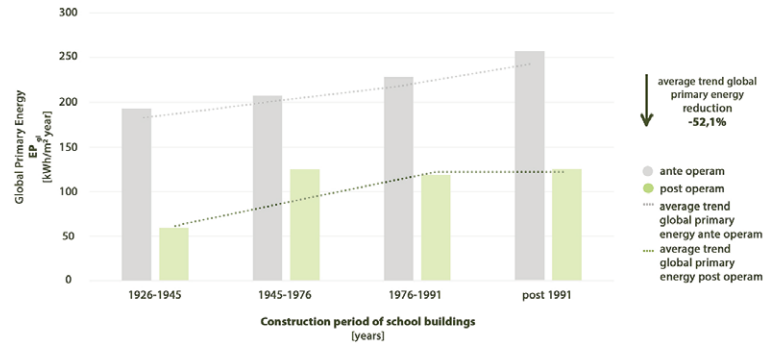
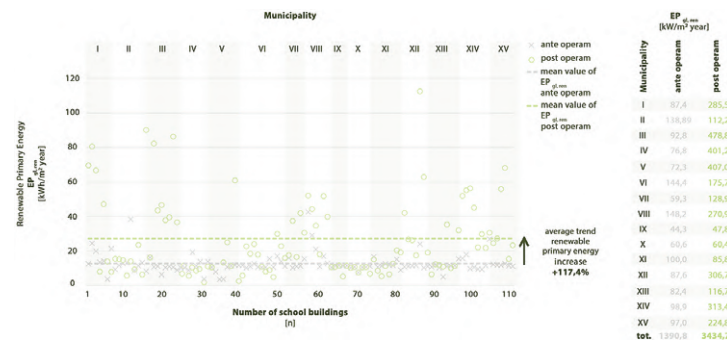
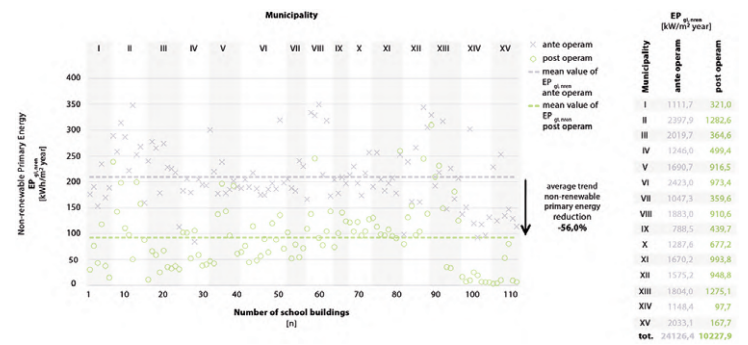
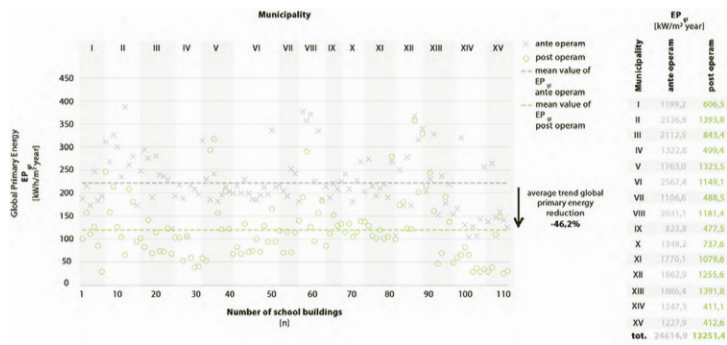


Fig. 14 | KPI c): Reduction in total primary energy requirements of the school building sector (credit: CIS Roma Scuole Verdi – First phase, adapted by the Authors, 2024).

Fig. 15 | KPI d): Reduction of non-renewable primary energy requirements of school buildings (credit: CIS Roma Scuole Verdi – First phase, adapted by the Authors, 2024).

Fig. 16 | KPI e): Increased renewable primary energy requirements of school buildings (credit: CIS Roma Scuole Verdi – First phase, adapted by the Authors, 2024).

Fig. 17 | Global unit primary energy requirements by era of school building construction (credit: CIS Roma Scuole Verdi – First phase, adapted by the Authors, 2024).

31 marzo 2023 n. 36) and GPP (Green Public Procurement; European Commission, 2008).

**Reference context** | In recent decades, the Municipality of Rome has seen significant changes in temperature trends and increased heat waves due to excessive GHG emissions and global warming (Spano et alii, 2021). Implementing a Proposed Climate Adaptation Strategy (Roma Capitale, 2024) that contemplates ‘heavy’ and large-scale redevelopment of school buildings can help reduce their impacts and promote new energy-environmental transformation scenarios.

Even though compliance with building CAM (MITE, 2022b) in Public Procurement is now mandatory (Baiani and Altamura, 2019), through eco-oriented approaches in processes (Clemente, Altamura and Cellurale, 2019) and refurbishment projects, the demand for improving the environmental quality of school buildings is still largely unmet (Antonini et alii, 2015).

PAs often need more data or studies on the current energy profiles of school buildings or potential achievable improvement scenarios (Clemente, 2012) regarding energy savings and pollutant emission reduction. More often than not, the same renovation measure is implemented on all types of buildings without assessing their architectural or plant susceptibility (Romano et alii, 2023) with respect to the need to reduce energy demand through envelope efficiency or the renovation needs of heating and cooling systems (Liébana-Durán, Serrano-Lanzarote and Ortega-Madrugal, 2021). The installation of systems from RES is not always matched by full building upgrades, largely nullifying their potential benefits even to amortise investment costs (Romano, Lalloa and Mancini, 2021).

Compared to the numerous researches aimed

at systematising the measures to be taken for energy-environmental upgrading in school buildings – the European projects TABULA (2012) and Sherpa Interreg-MED (Interreg Mediterranean, 2018) are mentioned as examples – the present study proposes a systemic and multi-scalar operational methodology that allows to address in an integrated way the aspects of energy demand reduction together with the need to lower CO<sub>2</sub> emissions, assessing their impacts on the individual building and at the urban scale.

In the case of Rome, school buildings represent the densest and most widely distributed public building type within the city (Fig. 1, 2), with poor energy-environmental performance (Fig. 3-6). Improving the energy efficiency of school buildings means not only cutting municipal public spending, but also significantly increasing environmental quality while confining the amount of carbon emissions produced (Legambiente, 2021). Although implementable strategies for redevelopment can be applied to individual properties, addressing energy-environmental issues at the municipal or urban scale would achieve more effective results and ensure a decisive increase in renewal rates, accelerating the processes of decarbonisation of the built environment.

However, this transcalar approach requires a cultural awareness before a technical or economic one, necessary to support the development of complex projects according to a holistic view, which is often met with resistance from PA commissioning structures, planners and engineers to approach programmes and projects in an integrated way, through proposals for interventions on buildings that allow a tangible assessment of the impacts on individual cases and, in a systemic way, on the city’s broader infrastructure and heritage

network. The need for more technical data available from PAs on public buildings may limit the implementation and dissemination of these approaches, with heavy negative impacts on energy consumption, environmental footprint, and actual weight in terms of cities’ financial budgets.

**The CIS Roma Scuole Verdi** | In addition to representing a significant economic investment<sup>8</sup>, the CIS Roma Scuole Verdi constitutes an essential step in the decarbonisation path undertaken by Roma Capitale with the PAESC (Sustainable Energy and Climate Action Plan)<sup>9</sup>, in adherence to the guidelines set out by the global network C40 Cities (Climate Leadership Group)<sup>10</sup> and the 100 Carbon-Neutral and Smart Cities by 2030 programme with which the European Union intends to facilitate the development of cross-sectoral projects aimed at achieving smart, sustainable and low-carbon cities (European Commission, 2020b).

The CIS’ objective is to promote energy-environmental upgrading projects and interventions on 212 school buildings – including Preschools, and primary and secondary schools – distributed among the 15 municipalities throughout the City of Rome (Fig. 7). The programme is divided into two phases, based on school building priorities, intervention needs and available financial resources (Fig. 8).

The DiAP Research Group was involved in the first phase involving 111 school buildings and supported the CSIMU office: a) in the drafting of the Technical Project Briefs, processing the essential technical information on the buildings and identifying the necessary guidelines and categories of intervention, within defined economic amounts; b) in the technical-performance verification and control of the energy-environmental quality of the techno-



logical-plant solutions proposed in the Technical-Economic Feasibility Projects prepared by the design teams, one for each municipality, selected through a public contracting procedure.

Adherence to the principles of GPP has been an ambitious testing ground for the verification and validation of operational models capable of guiding the implementation of coherent and congruent projects not only from a techno-economic point of view but also in terms of environmental sustainability, accounting for eco-efficient resource management through the establishment and monitoring of controllable and measurable KPIs (Table 1).

This energy-environmental assessment operation, which took place with a systemic and multi-scalar approach, was aimed at identifying the best actions to be taken to decrease energy needs and CO<sub>2</sub> emissions in accordance with the technical regulations in force, within the financial perimeter defined by the CIS, with reference to individual school buildings and the set of buildings within the specific Municipality and in compliance with the following KPIs: a) the improvement of the overall energy performance of the building/installation system by at least one energy class compared to the baseline; b) the reduction of CO<sub>2</sub> emissions equal to the decrease of at least 20% of the value before upgrading.

When defining the CIS and elaborating the Technical Project Briefs, indicators a) and b) were prudently set at the minimum feasible threshold, in consideration of the discontinuous knowledge of the current state of efficiency and energy-environmental performance profile of the school heritage, as a widespread condition in some of the Municipalities of Roma Capitale. The evaluation of the performance achieved with the interventions proposed in the Technical-Economic Feasibility Projects was done by verifying, in addition, the further contribution of RES in the face of a reduction in overall energy demand by monitoring additional KPIs: c) the total primary energy demand; d) the non-renewable primary energy demand; e) the renewable primary energy demand; and f) the share of renewable energy production.<sup>11</sup>

Indicators a) and b) were found to be of immediate significance with respect to the level of energy efficiency achieved and the impact of decarbonisation on the built environment. Downstream of the Technical-Economic Feasibility Projects, the minimum thresholds for energy class improvement and CO<sub>2</sub> emissions reduction were met and largely exceeded in all properties undergoing redevelopment. Regarding indicators c), d), e), and f), the overall energy requirements of the buildings have been reduced by far, with energy resource consumption largely covered by RES. The systemic monitoring of all KPIs has, therefore, made it possible to make a comprehensive assessment of the overall impacts of the interventions on individual buildings and in terms of the city's overall energy-environmental balance.

**Materials and methods** | In the territory of the Municipality of Rome, there are 1,394 buildings intended for school use, of which 1,296 are owned by the Roma Capitale and 104 owned by the province; the CIS Roma Scuole Verdi identified 212 buildings in need of upgrading, accounting for 16.4% of the municipal school stock; of these, 111 buildings were the subject of the first phase of the CIS, thus con-

stituting a relevant sample in terms of construction period, typological-architectural consistency and technological-plant characterisation. Figures 9 through 11 show the distribution of school buildings by period of construction and gross heated volume, flanking a historical-cultural, technological-constructive<sup>12</sup> and dimensional analysis with a reading of legislative developments in energy efficiency.<sup>13</sup>

The data show that 35.1% of the buildings for school use predate 1976, the year in which the first Italian law on energy conservation was introduced (Legge 30 Marzo 1976 n. 373 on regulations for the containment of energy consumption for thermal uses in buildings), while 61.3% were built between 1976 and 1991, the year in which, through Legge 9 Gennaio 1991 n. 10 (Regulations for the implementation of the National Energy Plan on the rational use of energy), the design, installation and operation of plant systems were regulated, and the calculation methods for energy requirements were updated. These data highlight how a large part of the Roman school building stock analysed could be more efficient from an energy-environmental point of view, unless subsequent maintenance work is carried out.

The subdivision of school buildings by historical phases and time cycles allowed for a typification of the buildings undergoing redevelopment by homogeneous groups with similar problems, both in relation to the urban context and typological organisation and by technological plant and energy-environmental characterisation, with respect to which it was possible to hypothesise common types of intervention, within a checklist of intervention strategies defined by process and project governance since the CIS planning phase.

The opaque envelope of these buildings is generally characterised by highly leaky walls (masonry, cavity insulated or curtain wall) and by roofs that have serious infiltration problems or require ballasting to be adequate for integration with the necessary plant equipment (photovoltaic panels, AHUs, etc.). At the same time, the window and shuttering systems do not meet the thermal-acoustic performance required by the regulations currently in force<sup>14</sup>. Thermal energy needs are mainly met by natural gas or oil-fired boilers. The condition of electrical and thermal system terminals depends on the frequency of maintenance work carried out over time. Where photovoltaic systems or solar panels are present, these systems are often found to be inoperable and need to be compensated or replaced in full.

Currently, only 1.8% of the buildings are in energy class C. In contrast, all others belong to lower performance levels, specifically classes D (13.5%), E (38.8%), F (34.2%), and G (11.7%), with a current production of global CO<sub>2</sub> emissions of 5,287.3 kg/mc per year.

A key phase of the experimental research involved the assessment of the state of affairs and the calibration of interventions in relation to the architectural and plant engineering susceptibility of the affected properties. The survey by the designers and the Energy Diagnosis enabled verification of the actual technological-plant consistency, compared to the energy-environmental data initially provided by the PA at the same time as the Technical Project Briefs were drafted.

The updating of the APEs (Energy Performance

Certificates) has improved transparency in the efficiency quality of the entire building stock: the certificates have provided information on the technical characteristics of buildings and plant systems, residual energy performance and planned interventions on the envelope / plant system to ensure their improvement, returning input/output data regarding energy class and pollutant emissions, consumption and primary energy requirements (total, renewable and non-renewable) and the resulting share of production from RES.

In a large-scale energy efficiency rationale, these data (made available and simulated) were essential for identifying the worst-performing properties in urgent need of upgrading and for assessing the achievable improvements as a function of investment (comparing the ante and post situation), helping to prioritise interventions and to ensure a high level of energy-environmental quality of individual buildings, compared with the city's entire public real estate stock.

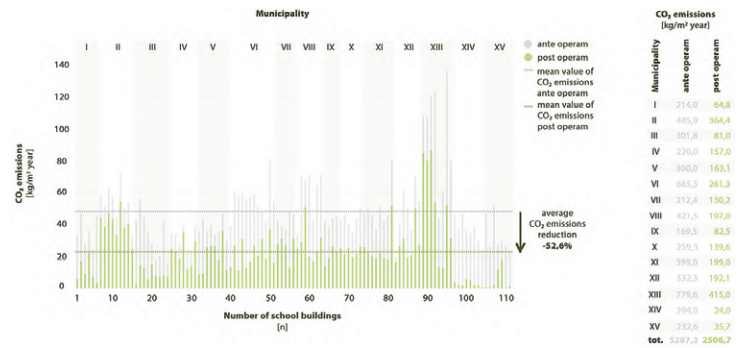
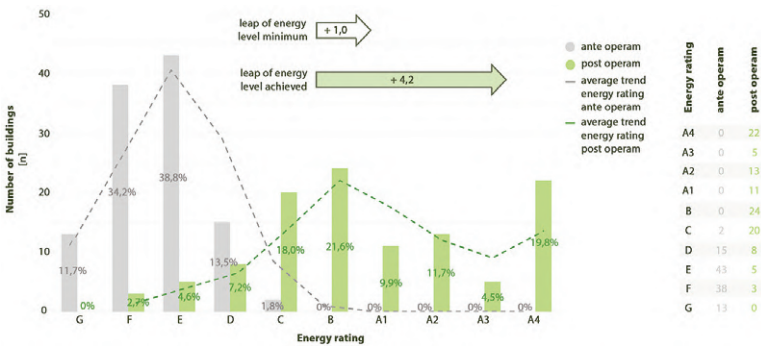
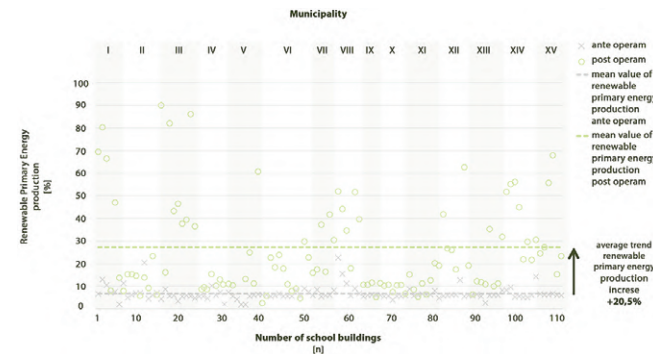
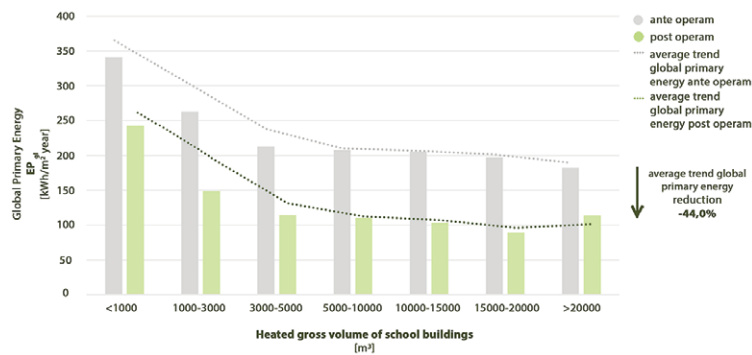
Concurrently with the drafting phase of the Technical-Economic Feasibility Projects, the Research Group assessed the potential benefits of the proposed redevelopment interventions on individual properties and municipalities, possibly directing the designers toward appropriate optimisations.

**Results** | The graph in Figure 12 shows that thermal insulation interventions of the opaque envelope were applied in 84.7% of cases on the roofs also in order to mitigate overheating in summer conditions, in 19.8% on the counter-ground floors and 70.3% on the vertical perimeter walls. In all Schools, the replacement of external vertical window frames, including their shading systems, has been planned to enable compliance with current thermal-acoustic standards.

The limitation of the generalised extension of retrofit measures on the opaque envelope is sometimes due to the presence of low-dispersing surfaces with acceptable thermal transmittance values, at other times to architectural features of valuable properties subject to historical-cultural constraints or technical difficulties of execution (as in the case of insulation from the inside mostly in load-bearing masonry walls or by insufflation of curtain walls) as well as to the recent performance of maintenance work.

The actions planned for the systems (Fig. 13) involved, in 91.9% of the cases, the renovation of the heating systems with the replacement of the heat generator and terminals; in particular, the radiator type was adopted for 84.7%, while for the remaining 7.2% of the schools, including Kindergartens and Preschools, radiant floor heating systems were planned, intervening in parallel on the insulation of the counter-ground floors. It turns out, in fact, that younger children spend a lot of time playing in contact with the floor, and radiant panels may be the best solution to ensure the lack of potentially dangerous encumbrances, quietness and, above all, a comfortable surface temperature given the absence of drafts.

The insertion of a thermal energy production system from a solar system or the commissioning of collectors, already installed but inactive, was planned for 79.3% of the buildings unless there are landscape-environmental incompatibilities; the installation of heat pumps was proposed in 85.6% of the buildings.



**Fig. 18** | Global unit primary energy requirements per gross heated volume of school buildings (credit: CIS Roma Scuole Verdi – First phase, adapted by the Authors, 2024).

**Fig. 19** | KPI f): Increasing the share of renewable energy production in the school building sector (credit: CIS Roma Scuole Verdi – First phase, adapted by the Authors, 2024).

**Fig. 20** | KPI a): Improving the energy class level of the school building compartment (credit: CIS Roma Scuole Verdi – First phase, adapted by the Authors, 2024).

**Fig. 21** | KPI b): Lowering CO<sub>2</sub> emissions of the school building sector (credit: CIS Roma Scuole Verdi – First phase, adapted by the Authors, 2024).

Regarding electricity production, a photovoltaic system has been planned in almost all buildings (99.1%). The electricity implemented with the self-generation systems will be used for the commissioning of technological equipment, for the lighting system (which in 98.2% of cases will be upgraded by replacing lighting fixtures with LED technology), and for the powering of Building Automation systems, assumed in 70.3% of the schools.

There is a reduction in thermal and electrical energy consumption in all renovated school buildings. Figure 14 shows the primary energy savings compared to the current situation, showing a significant decrease in total energy demand of 46.2% (KPI c). The next diagrams consider the change in overall energy demand in the ante- and post-operam phases, separated into the two components of non-renewable (Fig. 15) and renewable (Fig. 16): in the first diagram, a significant reduction in the non-renewable energy demand of 56.0% (KPI d) is evident, coinciding with a lower demand for thermal and electrical energy supply from the grid; on the contrary, in the second figure, an increase of 117.4% in the renewable primary energy demand (KPI e), corresponding to the use of RES-powered plants and equipment, is noted, compared to the current situation.

Figure 17 relates the overall primary energy demand to the era of construction, highlighting the impact of technological-plant susceptibility of buildings on overall energy performance. In the ante-operam condition, there is evidence of a slight increase in energy demand over the years, i.e., transitioning from buildings made of load-bearing masonry to those with frame structures. In the post-operam condition, on the other hand, the requirement decreases in the phase following the energy efficiency interventions: this reduction is more sig-

nificant in older buildings, highlighting how the proposed efficiency interventions have greater effectiveness on historic buildings.

Figure 18 relates the overall primary energy demand to the gross heated volume: a decrease in energy demand is observed in both the ante- and post-operam condition as the gross heated volume increases, with an average value of 44.0%; in particular, for more significant buildings, a substantial reduction in energy demand is noted. Overall, a 20.5% increase in the share of renewable energy production in the post-operam phase is achieved (KPI f; Fig. 19); thus, the use of RES-powered plant systems enables significant progress toward electrification and decarbonisation of school buildings.

In conclusion, in the post-intervention phase, there is an average increase in energy class of 4.2 positions (Fig. 20), well above the one-class jump required by the CIS (KPI a) with a frequency of buildings in class A4 (19.8%), A3 (4.5%), A2 (11.7%), A1 (9.9%), B (21.6%), C (18.0%), D (7.2%), E (4.6%), and F (2.7%). Similarly, the reduction in CO<sub>2</sub> emissions is much more significant than the minimum threshold of 20%, moving to a total production value of CO<sub>2</sub> of 2,506.7 kg/mc per year, with an average lowering of 52.6% (KPI b; Fig. 21).

The final overall value of the results obtained, summarised in KPIs a), b), c), d), e), and f) for individual buildings, municipalities, and the entire territory of Rome, is relevant in the context of the overall programming and planning of actions to be implemented on a large scale, through the use or combination of technologies and experimentation with plant solutions, which have the potential for replicability.

**Conclusions and future developments** | The interventions proposed with the CIS Roma Scuole

Verdi guarantee the achievement of a high level of energy-environmental quality, with potential impacts on the conditions of use and management of buildings through a significant reduction in energy needs (largely absorbed by RES) and with significant contributions in terms of decarbonisation of the built environment. This result takes on a considerable connotation when one considers the impact that the hypothesised design strategies and solutions have not so much on the individual building, but on the set of buildings as a whole, being strategic in the perspective of large-scale programming and planning of interventions.

The initiation of a general process of energy upgrading affecting a substantial amount of municipally owned school buildings is an opportunity to achieve primary objectives, such as increasing energy class and reducing climate-changing emissions, but also to ensure the efficiency of the envelope and the complete retrofitting of thermal and electrical systems, as well as the establishment of maintenance and plant upgrading procedures to be implemented in a planned and preventive manner that will reduce the current state of obsolescence and lower consumption, taking advantage of the positive contribution of RES.

The framework on intervention types and intensity and KPIs prepared provides, in this direction, useful parameters for PAs involved in guiding decision-making and monitoring the design and implementation of energy upgrading programmes on similar school buildings.

The implemented methodology represents the basis for the construction of a roadmap of measures for the deep renovation of school buildings in a 'carbon-neutral' direction to be adopted at the urban scale, concerning aspects of greater significance, such as the age of construction, building

texture, construction technology and plant equipment present, returning a summary picture of relevant input / output data in terms of total, renewable and non-renewable primary energy requirements, share of consumption associated with the use of renewable sources, level of energy class and reduction of CO<sub>2</sub> emissions, achieved through specific interventions.

The synergies between the different design strategies and the hypothesised interventions are evident when moving from the building scale to the urban scale, determining system efficiencies that

point as much as possible to the replacement of fossil fuels, electrification and the decisive increase in the use of RES, allowing to embark on a path of decarbonisation that has significant spin-offs on the entire public building stock of the city.

Based on the experience shown and the data obtained, the PA of Roma Capitale itself will be able to proceed expeditiously with the implementation of a dense energy renovation plan involving other school buildings, in coherence with the CIS, with the PNRR projects being implemented and with the guidelines of the PAESC, which already envis-

ages, in the first instance, the installation of photovoltaic systems on the roofs of 15 Schools (one for each Municipality) to activate the first energy communities capable of sustaining the energy needs of entire urban compartments.

## Notes

1) Cities are responsible for about two-thirds of the world's energy consumption and more than 70% of annual global carbon emissions. For more information, see IEA (2021).

2) The Reference is to SDGs no. 7 – Affordable and Clean Energy, no. 11 – Sustainable Cities and Communities, and no. 13 – Climate Action.

3) With COP28, there is increased awareness of drastically reducing GHG emissions to achieve carbon neutrality, lowering the global temperature level below 1.5 °C (European Commission, 2023).

4) With the new Directive (EU) 2024/EPBD IV, minimum energy performance standards are proposed for upgrading within a 15% consumption threshold for non-residential public buildings, mandating a move from APEs grade G to grade F by 2027, subject to historical and cultural constraints. For more information, see the webpage: [documenti.camera.it/leg19/documentiAcquisiti/COM06/Audizioni/leg19.com06.Audizioni.Allegato.PUBBLICO.id eGes.27274.16-01-2024-11-22-26.198.pdf](https://documenti.camera.it/leg19/documentiAcquisiti/COM06/Audizioni/leg19.com06.Audizioni.Allegato.PUBBLICO.id eGes.27274.16-01-2024-11-22-26.198.pdf) [Accessed 18 March 2024].

5) Energy Efficiency Directive (EU) 2023/1791, as an integral part of the 'Fit for 55' package, requires the public sector to reduce total final energy consumption by at least 1.9% per year and to ensure the minimum annual renovation of 3% of the total covered area of heated and/or cooled buildings.

6) The PNIEC indicates a consumption reduction target for buildings to 2030 of 43% primary energy and 39.7% final energy (MASE, 2023).

7) The experimental research is the result of the scientific collaboration agreement 'Technical Support to the RUP in the Management of the Functions and Tasks referred to in Art. 31 of Legislative Decree 50/2016 and referred to ANAC Guidelines nr. 3, in the Scope of the Institutional Activities of the CIS Roma Scuole Verdi (First Phase – Technical-Economic Feasibility Projects Service)' between Roma Capitale, CSIMU Department (Coordination of Infrastructure Development and Urban Maintenance), Head Ing. E. Dello Vicario (RUP), and the DiAP (Department of Architecture and Design) of the 'Sapienza' University of Rome; Scientific Head: Prof. C. Clemente; Working Group: Prof. E. Arbizzani, PhD A. Mangiatordi and Dr. M. Zagaria (O.U. ICAR/12), Prof. F. Mancini (Eng-Ind/11), and Prof. F. Tajani (ICAR/22).

8) The CIS – signed in July 2022 by Roma Capitale together with the Presidency of the Council of Ministers (Minister for the South and Territorial Cohesion), MEF, MITE (now MASE), MIUR (now MIM), the Lazio Region, and Invitalia – was financed with an investment of about 400 million euros, within the FSC 2021-2027, the PON Metro 2021-2027, and through the activation of an EIB (European Investment Bank) loan. For more information, see the webpage: [eib.org/en/press/all/2023-159-investeu-la-bei-and-roma-capital-sign-an-agreement-of-technical-consult-](https://eib.org/en/press/all/2023-159-investeu-la-bei-and-roma-capital-sign-an-agreement-of-technical-consult-)

[ing-for-energy-efficiency-of-over-200-schools](#) [Accessed 18 March 2024].

9) With the PAESC, Rome defines an emissions reduction curve consistent with the goals of the Paris Agreement. It envisions lowering 4,346 million tons of CO<sub>2</sub> by 2030, including (through large-scale) deep renovation of school buildings and creating energy communities centred around schools.

10) The application for the installation of a photovoltaic system fulfils the indications of the CAM and the current regulations on the supply from renewable sources, which requires, through the use of RES-powered systems, the simultaneous compliance with the coverage of 65% of the expected consumption for the production of domestic hot water (DHW) and 65% of the sum of the expected consumption for the production of DHW, winter air conditioning and summer air conditioning, as provided in Annex III of the Italian Decreto Legislativo 8 Novembre 2021 n. 199, on the promotion of the use of energy from renewable sources.

11) The C40 has developed a climate commitment scenario by which Rome aims to reduce emissions by 66.3% by 2030. The CCC (Climate City Contract) includes in the planning the upgrades of the school building stock to be implemented by 2030, with the aim of achieving the maximum reduction in energy consumption and emissions through self-generation from solar photovoltaics and the elimination of fossil gas plants where technically possible in the direction of the new EPBD.

12) The buildings analysed were built after the Unification of Italy and more prominently in the Second Postwar period, mainly using the technique of cast-in-place reinforced concrete and industrialised prefabricated systems. The sample also includes a smaller proportion of buildings constructed before 1950, mainly in load-bearing masonry or mixed systems of reinforced concrete and load-bearing masonry, with valuable architectural features subject to constraints, as defined by Legislative Decree 42/2004. For more information, see the webpage: [normattiva.it/urn:nir:state:decreto.legislativo:2004-01-22:42](https://normattiva.it/urn:nir:state:decreto.legislativo:2004-01-22:42) [Accessed 18 March 2024].

13) For more information, see: Legge 30 Marzo 1976 n. 373 and Legge 9 Gennaio 1991 n. 10.

14) In Italy, UNI 11367:2010 provides reference values for acoustic requirements for school buildings, a standard also taken up in Section 2.4.11 – Acoustic Performance and Comfort' of CAM (MITE, 2022b).

## References

Antonini, E., Boeri, A., Gaspari, J., Gianfrate, V. and Longo, D. (2015), "La qualità dell'edilizia scolastica – Un'emergenza nazionale, un ambito di ricerca | The quality of school buildings – A national emergency, a research field", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 9, pp. 114-122. [Online] Available at: [doi.org/10.13128/Techne-16112](https://doi.org/10.13128/Techne-16112) [Accessed 18 March 2024].

Baiani, S. and Altamura, P. (2019), "Il Processo del Progetto per la Resource Productivity – Un Caso Studio | The Design Process towards Resource Productivity – A Case Study", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 5, pp. 83-92. [Online] Available at: [doi.org/10.19229/2464-9309/592019](https://doi.org/10.19229/2464-9309/592019) [Accessed 18 March 2024].

BPIE – Buildings Performance Institute Europe (2021), *Deep renovation – Shifting from exception to standard practice in EU policy*. [Online] Available at: [bpie.eu/wp-content/uploads/2021/11/BPIE\\_Deep-Renovation-Briefing\\_Final.pdf](https://bpie.eu/wp-content/uploads/2021/11/BPIE_Deep-Renovation-Briefing_Final.pdf) [Accessed 18 March 2024].

Clemente, C. (2012), "Sostenibilità, sicurezza ed efficienza energetica nel recupero edilizio – Strumenti e strategie per la riqualificazione integrata e la valorizzazione del patrimonio scolastico nell'area metropolitana romana | Sustainability, safety and energy efficiency in the building recovery – Strategies for the integrated retrofit of the existing school building stock in the Roman metropolitan area", in *Ponte | Architettura, Tecnica e Legislazione per Costruire*, vol. 4, pp. 49-67. [Online] Available at: [researchgate.net/publication/236617548\\_Sostenibilita\\_sicurezza\\_ed\\_efficienza\\_energetica\\_nel\\_recupero\\_edilizio\\_Sustainability\\_safety\\_and\\_energy\\_efficiency\\_in\\_the\\_building\\_recovery](https://researchgate.net/publication/236617548_Sostenibilita_sicurezza_ed_efficienza_energetica_nel_recupero_edilizio_Sustainability_safety_and_energy_efficiency_in_the_building_recovery) [Accessed 18 March 2024].

Clemente, C., Altamura, P. and Cellurale, M. (2019), "Green Public Procurement – Innovation and environmental qualification of the production process built environment", in De Giovanni, G. and Scalisi, F. (eds), *Pro-Innovation – Process, Production, Product*, Palermo University Press, Palermo, pp. 155-170. [Online] Available at: [doi.org/10.19229/978-88-5509-055-1/2112019](https://doi.org/10.19229/978-88-5509-055-1/2112019) [Accessed 18 March 2024].

Decreto Legislativo 31 Marzo 2023 n. 36, "Ripubblicazione del testo del decreto legislativo 31 marzo 2023, n. 36, recante: Codice dei contratti pubblici in attuazione dell'articolo 1 della legge 21 giugno 2022, n. 78, recante delega al Governo in materia di contratti pubblici", in *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, n. 77 del 31/03/2023, suppl. ordinario n. 10. [Online] Available at: [gazzettaufficiale.it/eli/id/2023/04/13/23A02179/sg](https://gazzettaufficiale.it/eli/id/2023/04/13/23A02179/sg) [Accessed 18 March 2024].

Decreto Legislativo 8 Novembre 2021 n. 199, "Attuazione della direttiva (UE) 2018/2001 del Parlamento europeo e del Consiglio, dell'11 dicembre 2018, sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili (21G00214)", in *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, n. 285 del 30/11/2021, suppl. ordinario n. 42. [Online] Available at: [gazzettaufficiale.it/eli/id/2021/11/30/21G00214/sg](https://gazzettaufficiale.it/eli/id/2021/11/30/21G00214/sg) [Accessed 18 March 2024].

European Commission (2023), *COP28UAE – Global Renewables and Energy Efficiency Pledge*. [Online] Available at: [energy.ec.europa.eu/system/files/2023-12/Global\\_Renewables\\_and\\_Energy\\_Efficiency\\_Pledge.pdf](https://energy.ec.europa.eu/system/files/2023-12/Global_Renewables_and_Energy_Efficiency_Pledge.pdf) [Accessed 18 March 2024].

European Commission (2020a), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Com-*

mittee of the Regions – A Renovation Wave for Europe – Greening our buildings, creating jobs, improving lives, document 52020DC0662, 662 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1603122220757&uri=CELEX:52020DC0662 [Accessed 18 March 2024].

European Commission (2020b), *Proposed mission – 100 Climate-neutral Cities by 2030 – By and for the Citizens – Report of the mission board for climate-neutral and smart cities*. [Online] Available at: op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/bc7e46c2-fed6-11ea-b44f-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-160480388 [Accessed 18 March 2024].

European Commission (2020c), *Stakeholder consultation on the Renovation Wave initiative – Synthesis Report*. [Online] Available at: energy.ec.europa.eu/document/download/a1869a12-cd74-43d2-82e7-92a846166646\_en?filename=stakeholder\_consultation\_on\_the\_renovation\_wave\_initiative.pdf. [Accessed 18 March 2024].

European Commission (2020d), *Commission Staff Working Document Impact Assessment accompanying the document Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – Stepping up Europe's 2030 climate ambition – Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people*, document 52020SC0176, 176 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=SWD:2020:176:FIN [Accessed 18 March 2024].

European Commission (2020e), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – Stepping up Europe's 2030 climate ambition – Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people*, document 52020SC0562, 562 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0562 [Accessed 18 March 2024].

European Commission (2019), *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – The European Green Deal*, document 52019DC0640, 640 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN [Accessed 18 March 2024].

European Commission (2008), *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – Public procurement for a better environment*, document 52008DC 0400, 400 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A52008DC0400 [Accessed 17 April 2024].

European Parliament and Council of the European Union (2023a), *Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament and Council of the European Union of 13 September 2023 on energy efficiency and amending Regulation (EU) 2023/955 (recast)*, document 32023L179, PE/15/2023/INIT. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ%3AJOL\_2023\_231\_R\_0001 [Accessed 18 March 2024].

European Parliament and Council of the European Union (2023b), *(EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of the European Union of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652*, document 32023L2413, PE/36/REV/2. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj [Accessed 18 March 2024].

European Parliament and Council of the European Union (2023c), *Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on energy efficiency and amending Regulation (EU) 2023/955 (recast)*, document 32023L1791, PE/15/2023/INIT. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ

%3AJOL\_2023\_231\_R\_0001 [Accessed 18 March 2024].

European Parliament and Council of the European Union (2018), *Directive (EU) 2018/2002 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 amending Directive 2012/27/EU on energy efficiency*, document 32018L2002, PE/54/2018/REV/1. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/2002/oj [Accessed 18 March 2024].

IEA – International Energy Agency (2021), *Empowering Cities for a Net Zero Future – Unlocking resilient, smart, sustainable urban energy systems*. [Online] Available at: iea.org/reports/empowering-cities-for-a-net-zero-future [Accessed 18 March 2024].

Interreg Mediterranean (2018), *Explore the Interreg MED projects*. [Online] Available at: interreg.eu/wp-content/uploads/2019/07/projects\_catalogue\_en-BD.pdf [Accessed 18 March 2024].

Legambiente (2023), *Ecosistema Scuola – XXII Rapporto nazionale sulla qualità degli edifici e dei servizi scolastici*. [Online] Available at: legambiente.it/wp-content/uploads/2023/01/Ecosistema-Scuola\_2023.pdf [Accessed 18 March 2024].

Legambiente (2021), *L'inefficienza energetica del patrimonio edilizio scolastico – Il diritto allo studio passa per edifici sicuri, salubri e confortevoli – La fotografia di Roma*. [Online] Available at: legambiente.it/wp-content/uploads/2021/11/inefficienza-energetica-del-patrimonio-edilizio-scolastico.pdf [Accessed 18 March 2024].

Legge 9 Gennaio 1991 n. 10, “Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso nazionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia”, in *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, n. 13 del 16/01/1991, suppl. ordinario n. 6. [Online] Available at: gazzettaufficiale.it/eli/id/1991/01/16/091G0015/sg [Accessed 18 March 2024].

Legge 30 Marzo 1976 n. 373, “Norme per il Contenimento del Consumo Energetico per Usi Termici negli Edifici”, in *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, n. 148 del 07/06/1976. [Online] Available at: gazzettaufficiale.it/eli/id/1976/06/07/076U0373/sg [Accessed 18 March 2024].

Liébana-Durán, M. E., Serrano-Lanzarote, B. and Ortega-Madrigal, L. (2021), “Identification of Cost-Optimal Measures for Energy Renovation of Thermal Envelopes in Different Types of Public School Buildings in the City of Valencia”, in *Applied Sciences*, vol. 11, issue 11, article 5108, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.3390/app11115108 [Accessed 18 March 2024].

MASE – Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (2023), *Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima*. [Online] Available at: mase.gov.it/sites/default/files/PNIEC\_2023.pdf [Accessed 18 March 2024].

MITE – Ministero della Transizione Ecologica (2022a), “Piano d'azione per la sostenibilità ambientale dei consumi nel settore della Pubblica Amministrazione, ovvero Piano d'Azione Nazionale sul Green Public Procurement (PANGPP) – Criteri Ambientali Minimi per l'affidamento del servizio di progettazione ed esecuzione dei lavori in interventi edilizi”, in *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, n. 183 del 06/08/2022. [Online] Available at: gpp.mite.gov.it/sites/default/files/2022-08/GURI\_183\_06\_08\_22\_Allegato\_Edilia.pdf [Accessed 18 March 2024].

MITE – Ministero della Transizione Ecologica (2022b), “Decreto 23 giugno 2022 – Criteri Ambientali Minimi per l'affidamento del servizio di progettazione di interventi edilizi, per l'affidamento dei lavori per interventi edilizi e per l'affidamento congiunto di progettazione e lavori per interventi edilizi (22A04307)”, in *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, n. 183 del 06/08/2022. [Online] Available at: gazzettaufficiale.it/eli/id/2022/06/06/22A04307/sg [Accessed 18 March 2024].

Romano, G., Lalloa, F. C. and Mancini, F. (2021), “Halving of consumption and energy efficiency of the Mario Pagano National boarding school in Campobasso”, in ATI Italian Termotecnics Association (eds), *E3S Web of Conferences / Proceedings of the 76th Italian National Congress ATI (ATI 2021) – Transizione ecologica e digitale – Il ruolo dell'Energia*, September 15-17, 2021, Roma, pp. 1-8. [On-

line] Available at: doi.org/10.1051/e3sconf/20213120210 [Accessed 18 March 2024].

Romano, G., Rosso, M., Mancini, F. and Salvo, S. (2023), “Improving energy efficiency and Indoor Environmental Quality in the School of Mathematics at the Sapienza University campus in Rome”, in *Journal of Physics – Conference Series*, vol. 2648, issue 1, article 012038, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1742-6596/2648/1/012038 [Accessed 18 March 2024].

Roma Capitale (2024), *Proposta di Strategia di Adattamento Climatico*. [Online] Available at: cittaclima.it/wp-content/uploads/2024/01/Strategia-Roma-DEF.pdf [Accessed 18 March 2024].

Roma Capitale (2023), *Piano Clima Roma – Aggiornamento del Piano di azione per l'energia sostenibile e il clima – Obiettivo 1,5 gradi*. [Online] Available at: comune.roma.it/web-resources/cms/documents/Piano\_Clima\_2023\_light\_230914\_095428.pdf [Accessed 18 March 2024].

Spano, D., Mereu, V., Bacciu, V., Barbato, G., Buonocore, M., Casartelli, V., Ellena, M., Lamesso, E., Ledda, A., Marras, S., Mercogliano, P., Monteleone, L., Mysiak, J., Padulano, R., Raffa, M., Ruiu, M. G. G., Serra, V. and Villani, V. (2021), *Analisi del rischio – I cambiamenti climatici in sei città italiane – Roma, Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici*. [Online] Available at: files.cmcc.it/rischio\_clima\_2021/CLIMA\_Roma\_Completo.pdf [Accessed 18 March 2024].

TABULA (2012), *Typology Approach for Building Stock Energy Assessment – Main Results of the TABULA project – Final Project Report – Appendix Volume*. [Online] Available at: episcopo.eu/downloads/public/docs/report/TABULA\_FinalReport\_AppendixVolume.pdf [Accessed 18 March 2024].

UN – United Nations (2015), *Transforming Our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development*, A/RES/70/1. [Online] Available at: sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf [Accessed 18 March 2024].

UNI 11367:2010, *Acustica in edilizia – Classificazione acustica delle unità immobiliari – Procedura di valutazione e verifica in opera / Building acoustics – Acoustic classification of building units – Evaluation procedure and in situ measurements*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-11367-2010 [Accessed 18 March 2024].