



Ricerca di Sistema elettrico

Sistema informativo basato su *benchmark* di casi per la
valutazione di soluzioni progettuali e tecnologiche per
l'efficienza energetica del patrimonio costruito: il caso degli
edifici scolastici della Regione Lazio

Laura Calcagnini, Paola Marrone

SISTEMA INFORMATIVO BASATO SU BENCHMARK DI CASI PER LA VALUTAZIONE DI SOLUZIONI PROGETTUALI E TECNOLOGICHE PER L'EFFICIENZA ENERGETICA DEL PATRIMONIO COSTRUITO: IL CASO DEGLI EDIFICI SCOLASTICI DELLA REGIONE LAZIO.

Laura Calcagnini, Paola Marrone (Dipartimento di Architettura, Università degli Studi Roma Tre)

Settembre 2017

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

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

Progetto: D.6 Sviluppo di un modello integrato di *smart district* urbano

Obiettivo: c. Controllo e valutazione delle infrastrutture pubbliche energivore

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *"Analisi di benchmark ed indicatori prestazionali di edifici scolastici esistenti sottoposti ad interventi di riqualificazione energetica nella Regione Lazio"*

Responsabile scientifico ENEA: dott. ing. Michele Zinzi

Responsabile scientifico Università degli Studi Roma Tre: prof. arch. Paola Marrone

Si ringraziano:

Per il supporto alla ricerca il Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Roma Tre, in particolare il prof. ing. Francesco Asdrubali, la prof. Paola Gori, l'ing. Maria Claudia Guattari, e l'Università Unicusano, in particolare l'ing. Luca Evangelisti e l'ing. Gianluca Grazieschi.

La Regione Lazio per aver messo a disposizione i dati e aver agevolato il dialogo con gli enti scolastici, in particolare: l'Assessore Infrastrutture, Politiche Abitative, Enti Locali Fabio Refrigeri; il Capo Segreteria Pino Candido; il Direttore Regionale alle Infrastrutture e Politiche Abitative ing. Wanda d'Ercole; il Direttore Regionale Risorse Idriche, Difesa del Suolo e Rifiuti ing. Mauro Lasagna. Un particolare ringraziamento a: arch. Luca Colosimo, Dirigente dell'Area Programmazione Sostenibile e Infrastrutture Energetiche; dott. Giovanni Di Meo, Segreteria Direzione Generale Infrastrutture e Politiche Abitative; dott. Pierluigi Iacono, Area Programmazione Sostenibile e Infrastrutture Energetiche.

Tutte le scuole e gli uffici tecnici delle Amministrazioni comunali competenti che hanno reso disponibili i dati e permesso i sopralluoghi.

Indice

Sommario	4
Abstract	5
1 Introduzione	6
2 Metodologia	8
3 FASE 1: Il patrimonio scolastico della Regione Lazio e gli interventi di riqualificazione in atto: dati e indicatori per valutazioni ex post	9
3.1 INCIDENZA DEL PATRIMONIO SCOLASTICO SUI CONSUMI ENERGETICI A LIVELLO NAZIONALE CON PARTICOLARE RIFERIMENTO ALLA REGIONE LAZIO	9
3.2 I CONSUMI DELLE SCUOLE: ANALISI E INDAGINI PER LA COSTRUZIONE DI UN DATA BASE PER LA VALUTAZIONE EX ANTE DEI CONSUMI	11
3.2.1 Studi basati su stime	11
3.2.2 Studi basati su monitoraggi	12
3.3 INDICATORI DI EFFICACIA PER LA VALUTAZIONI EX POST DEGLI INTERVENTI DI RIQUALIFICAZIONE	13
3.3.1 Studi basati su Post Occupancy Evaluation	13
3.3.2 Studi basati sull'Evidence Based Design	14
3.3.3 Studi basati su benchmarking	14
3.3.4 Prime evidenze	17
4 FASE 2: Caratteristiche tipo-tecnologiche di un campione di edifici del patrimonio scolastico regionale e dei relativi interventi di riqualificazione realizzati: descrizione e distribuzione attraverso un sistema informativo	18
4.1 CARATTERISTICHE DEGLI EDIFICI DI EDILIZIA SCOLASTICA DEL PROGRAMMA	18
4.1.1 Distribuzione delle scuole sul territorio	20
4.1.2 Descrizione per tipologia scolastica	21
4.1.3 Descrizione per tipologia d'intervento	21
4.1.4 Descrizione per costi sostenuti	23
5 FASE 3: Valutazioni costi/benefici ex post e criteri di <i>benchmarking</i> per valutazioni ex ante ...	24
5.1 VALUTAZIONI SU 77 EDIFICI SCOLASTICI E SULLA BASE DEI DATI DICHIARATI	25
1.1.1 Indicatori di consumo	25
1.1.2 Indicatori di risparmio	25
1.1.3 Indicatori di costo	26
1.1.4 Indicatori di costo e risparmio per numero d'interventi	27
5.2 VALUTAZIONI SU 57 EDIFICI SCOLASTICI E 2 EDIFICI DI RIFERIMENTO SULLA BASE DI SIMULAZIONI	30
5.3 VALUTAZIONI SU 10 EDIFICI SCOLASTICI DEL COMUNE DI ROMA CON MONITORAGGIO DEI CONSUMI	31
5.4 VALUTAZIONI SU 7 EDIFICI SCOLASTICI SULLA BASE DI INDAGINI SUL CAMPO	33
5.5 DEFINIZIONE DI INDICATORI DI RIFERIMENTO PER LA VALUTAZIONE IN TERMINI DI COSTI/BENEFICI	35
6 Conclusioni	37
7 Riferimenti bibliografici	39

Sommario

La ricerca affronta lo studio e la valutazione degli interventi di riqualificazione energetica realizzati nel 2015 dalla Regione Lazio su settantasette scuole nell'ambito del POR-FESR 2007-2013.

La ricerca è stata mirata a individuare, in primo luogo, alcuni indicatori economici e tecnici per la valutazione *ex post* degli interventi realizzati e, in secondo luogo, parametri di riferimento o *benchmark* per valutazioni *ex ante* basati sulle prestazioni energetiche raggiunte nel campione degli edifici scolastici riqualificati.

Con i dati dei progetti di riqualificazione energetica, infatti, è stata costruita una banca dati per studiare l'efficacia delle pratiche più recenti nell'ambito del *retrofitting* energetico del territorio regionale e impostare una metodologia di valutazione per i nuovi interventi di riqualificazione del patrimonio scolastico.

Nello specifico, l'attività di studio si è sviluppata all'interno delle ricerche sui consumi energetici delle scuole che si occupano del reale successo degli interventi di riqualificazione, non solo in termini di prestazioni energetico-ambientali, ma anche del sistema edificio-impianto-utente come, ad esempio gli studi sulla *Post Occupancy Evaluation*.

I risultati qui riportati rappresentano potenziali 'prove di efficacia', utili allo sviluppo di attività di progettazione tecnologica e, conseguentemente, di allocazione di finanziamenti, basate sull'evidenza di esperienze (*Evidence Based Design*), ossia su un confronto tra prestazioni energetiche attese e realmente ottenute.

Attraverso tre fasi la ricerca ha approfondito lo stato del patrimonio scolastico della Regione Lazio; ha analizzato le caratteristiche tipo-tecnologiche di un campione di edifici scolastici regionali e gli interventi di riqualificazione compiuti; ha elaborato valutazioni costi/benefici *ex post* e i possibili indicatori e criteri di *benchmarking* per valutazioni *ex ante*.

Gli esiti principali sono due:

- un percorso metodologico per la valutazione di un elevato numero di casi studi, dai quali trarre indicatori relativi ai caratteri del risparmio energetico, sino agli aspetti più prettamente materici, costruttivi e ambientali, attraverso una *cluster analysis* dei dati per individuare i casi più rappresentativi, fino alle modellizzazioni energetiche e alle indagini su campo;
- una valutazione *ex-post* complessiva sugli interventi di *retrofitting* in termini di efficacia rispetto alle prestazioni energetiche attese, di qualità tecnica delle realizzazioni, di qualità ambientale, non solo come esito della riduzione delle emissioni di CO₂, ma anche come scelte materiche in ragione dei requisiti ambientali.

Il quadro prestazionale emerso ha consentito di terminare la ricerca con indicazioni a sostegno del miglioramento della qualità tecnica, ambientale ed energetica degli interventi di *retrofitting*, soprattutto in vista degli obblighi recentemente stabiliti dai Criteri Ambientali Minimi (CAM) **[1]** e ribaditi nella recente Strategia Energetica Nazionale **[2]** e nella Strategia Nazionale per lo Sviluppo Sostenibile **[3]**.

In futuro, la possibilità di completare i dati riguardanti le prestazioni energetiche del 2017 consentirà di affinare la metodologia e definire nuovi *benchmark* sull'edilizia scolastica.

Abstract

The research addresses the assessment of the energy retrofitting projects of the case study of seventy-seven school buildings carried out in 2015 by the Lazio Region on within the POR-FESR 2007- 2013.

The aim of the research was to identify economic and technical indicators for the *ex post* evaluation of the interventions carried out and, furthermore, benchmarks for the *ex ante* evaluations based on the energy performance achieved in the sample of the renovated school buildings.

We built a database based on data of the energy retrofitting projects in order to evaluate the effectiveness of the common practices in the area of energy retrofitting of the regional territory and to set up a methodology for evaluating the new school retrofitting interventions.

The research activity has been developed from literature review on energy consumption of school buildings, considering more deeply the effectiveness of retrofitting interventions, not only in terms of energy and environmental performance, but also in the building-plant-user approach (Post Occupancy Evaluation studies).

The results of this research represent potential 'efficacy trials' useful for the technological design development and, consequently, for the resources allocation; these results rely on the principles of the Evidence Based Design and, specifically on a comparison between expected energy performances and really obtained ones.

Through three steps, the research has analyzed: the energy consumptions statistics of the school's stock of the Lazio Region; the type-technological features of a sample of regional school buildings and the retrofitting interventions in order to single out *ex-post* cost / benefit assessments and possible indicators and benchmarking criteria for *ex ante* evaluations.

The main outcomes are:

- a methodological path for evaluating a large number of case studies from which to draw indicators of features from the energy saving to the most merely material, constructive and environmental aspects, through the cluster analysis of data to identify the most representative cases, the energy modeling and the field surveys;
- a comprehensive *ex-post* evaluation of retrofitting interventions in terms of effectiveness compared to the expected energy performances, of the technical quality of realized interventions and of the environmental quality, not only as a result of the reduction of CO₂ emissions but also as a matter of choice for the environmental requirements.

The emerging performance framework has led to some indicators as support for the evaluation of technical and energy performances of the retrofitting interventions, especially in view of the recently established obligations by the Minimum Environmental Criteria (CAM) [1] and of the recent National Energy Strategy [2] and National Strategy for Sustainable Development [3].

Furthermore we aim to complete the 2017 energy performance data to sharpen the methodology and set more benchmarks for school building.

1 Introduzione

In questi ultimi anni, in attuazione delle Direttive Europee e degli obiettivi fissati dai Piani d'Azione Europei per l'Efficienza Energetica (PAN)¹, l'Italia ha introdotto numerose misure per ridurre i consumi energetici e le emissioni di carbonio, incrementando l'efficienza energetica del patrimonio edilizio, riducendo i costi dell'energia e promuovendo filiere tecnologiche innovative per sostenere un nuovo sviluppo del settore edilizio. Tuttavia, accanto all'aggiornamento del quadro legislativo e all'adeguamento delle relative norme tecniche, che hanno introdotto standard e metodologie di calcolo per le nuove edificazioni e riqualificazioni soprattutto degli edifici pubblici, non è stato ancora avviato un processo di valutazione dell'efficacia dei progetti di riqualificazione energetica per garantire, non solo la qualità dei materiali e delle soluzioni tecnologiche da adottare, ma anche per verificare i risultati attesi rispetto a quelli realmente raggiunti [4]. A differenza di altri Paesi, in Italia mancano adeguate procedure di *Monitoring&Evaluation* (M&E) o di *benchmarking*, per un controllo comparato delle prestazioni energetiche.

In questa direzione si stanno sviluppando ricerche sul comportamento energetico degli edifici [5,6,7,8,9,10,11,12,13] per raggiungere un livello di conoscenza² utile ai progettisti e alla stessa industria delle costruzioni nella valutazione delle soluzioni progettuali e tecnologiche.

Nell'ambito dell'Accordo di collaborazione tra ENEA e Università degli Studi Roma Tre, Dipartimento di Architettura (Progetto D6. Sviluppo di un modello integrato di *smart district* urbano), questo studio analizza 77 interventi di riqualificazione energetico-ambientale di edifici ad uso scolastico della Regione Lazio selezionati all'interno di un programma di riqualificazione del patrimonio pubblico che includeva 155 edifici con diverse funzioni.

Questa scelta ha diverse motivazioni:

- le strutture socio-educative rappresentano il 50% degli edifici oggetto di intervento;
- gli interventi eseguiti sulle altre tipologie funzionali, come per esempio, gli impianti sportivi che rappresentano il 17%, sono in prevalenza di natura impiantistica e, pertanto, poco rappresentativi del complesso degli interventi edificio-impianto;
- le altre tipologie funzionali, presenti in quantità meno significative (e.g. le strutture per i servizi sociali), sono estremamente eterogenee dal punto di vista costruttivo (e.g. le strutture all'interno delle aree naturali protette variano da piccoli presidi a palazzi storici), o poco significative sotto il profilo dell'utenza (consorzi di bonifica), o senza una utenza omogenea (i 9 complessi residenziali ATER);
- la letteratura scientifica internazionale e le recenti normative in materia di riqualificazione edilizia dimostrano l'importanza del *retrofitting* energetico del patrimonio edilizio scolastico [8];
- il 48% del patrimonio ad uso scolastico - edificato in prevalenza tra gli anni Sessanta e Ottanta - è ancora da riqualificare e, presumibilmente, corrisponde a circa 10.000 edifici [14];
- il 3% degli edifici scolastici è stato costruito prima del 1900, la maggior parte, circa il 45%, tra il 1961 al 1980, ossia circa 20.000 edifici scolastici sono stati realizzati prima dell'entrata in vigore delle prime leggi sull'energia e quindi, presumibilmente, sono molto energivori [14];
- secondo il Programma per la Riqualificazione Energetica degli Edifici e della Pubblica Amministrazione Centrale (PREPAC), si dovrà riqualificare il 3% degli edifici pubblici ogni anno.

Tra le priorità di ricerca della *roadmap "Energy-Efficient buildings PPP. Multi-annual roadmap and longer term strategy"* che l'Unione Europea [14] ha stilato con gli interlocutori del settore (E2BA- *Energy-efficient Building Association*), questo studio risponde, in particolare, agli obiettivi di:

- monitorare la domanda di energia per poter individuare soluzioni efficienti;

¹ Direttive europee 2002/91/CE (EPBD), 2009/28/CE e 2010/31/CE (nZEB).

² In ambito anglosassone, e sul modello dei protocolli decisionali dell'*Evidence-Based Medicine*, si sta sviluppando, anche nel campo della progettazione edilizia, l'*Evidence-Based Design* (EBD) basato su decisioni responsabili, motivate da informazioni rilevanti, tratte dalla letteratura scientifica e dalla buona pratica delle realizzazioni.

- sviluppare metodi di stima, simulazione e visualizzazione per supportare le decisioni, accorciando sempre più la distanza tra predizione e realtà;
- definire un *data repository* sugli interventi tecnici ottimali (inclusi i dati sugli occupanti) per migliorare la qualità e i costi del *retrofitting* degli edifici;
- considerare l'uso dell'energia che può comportare diversi livelli di consumo nello stesso edificio con sproporzioni pari sino a quattro volte tra gli stessi livelli;
- sviluppare le informazioni relative alle valutazioni ambientali dei materiali (LCA, Etichettature EPD), alle etichettature ecologiche e di prestazione energetica degli edifici, per valutare le prestazioni finali del comportamento integrato dei materiali e meno relativamente del singolo materiale;
- trasferire le buone pratiche, le tecnologie e le metodologie, inclusa la cooperazione dei diversi settori.

Nel quadro di queste priorità, lo studio ha sviluppato un percorso di analisi e valutazione sugli interventi realizzati per:

- monitorare, nel confronto tra situazione *ex ante* ed *ex post*, la domanda di energia e le soluzioni realizzate;
- sviluppare modelli di simulazione per confrontare le prestazioni attese rispetto a quelle reali;
- valutare le prestazioni delle soluzioni tecnologiche, incluse quelle ambientali dei materiali impiegati;
- trasferire le buone pratiche alle imprese favorendo il loro riposizionamento tecnologico.

2 Metodologia

In questo studio sono stati analizzati 77 interventi di riqualificazione energetica del patrimonio scolastico della Regione Lazio per valutare sia i risultati attesi in termini di riduzione dei consumi energetici rispetto a quelli effettivamente raggiunti, sia la qualità tecnologica e ambientale delle soluzioni di *retrofitting* energetico proposte negli interventi.

La ricerca si è sviluppata in tre fasi, ciascuna caratterizzata da specifici obiettivi e strumenti, per ottenere: una base dati e una valutazione quantitativa complessiva sulle caratteristiche degli interventi (Fase 1 e 2); una valutazione qualitativa *ex post* sui risultati di riduzione dei consumi energetici raggiunti dagli interventi per individuare alcuni indicatori di valutazione *ex ante* (Fase 3) (Fig. 1).

Nella Fase 1 sono stati ricercati in letteratura dati e indicatori che si riferissero, soprattutto, a valutazioni *ex post* di interventi di efficientamento energetico del patrimonio scolastico e che potessero costituire *benchmark* di riferimento per gli edifici considerati.

Con i dati a disposizione³, nella Fase 2, è stata costruita la base dati relativa ai progetti esecutivi dei 77 edifici scolastici e degli interventi di riqualificazione energetica (dati climatici, caratteristiche dimensionali e costruttive, tipologie d'intervento e loro costi, etc.). I dati sono stati selezionati e schedati per poter elaborare valutazioni numeriche sulle tipologie d'intervento, sui costi sostenuti e sui risultati attesi.

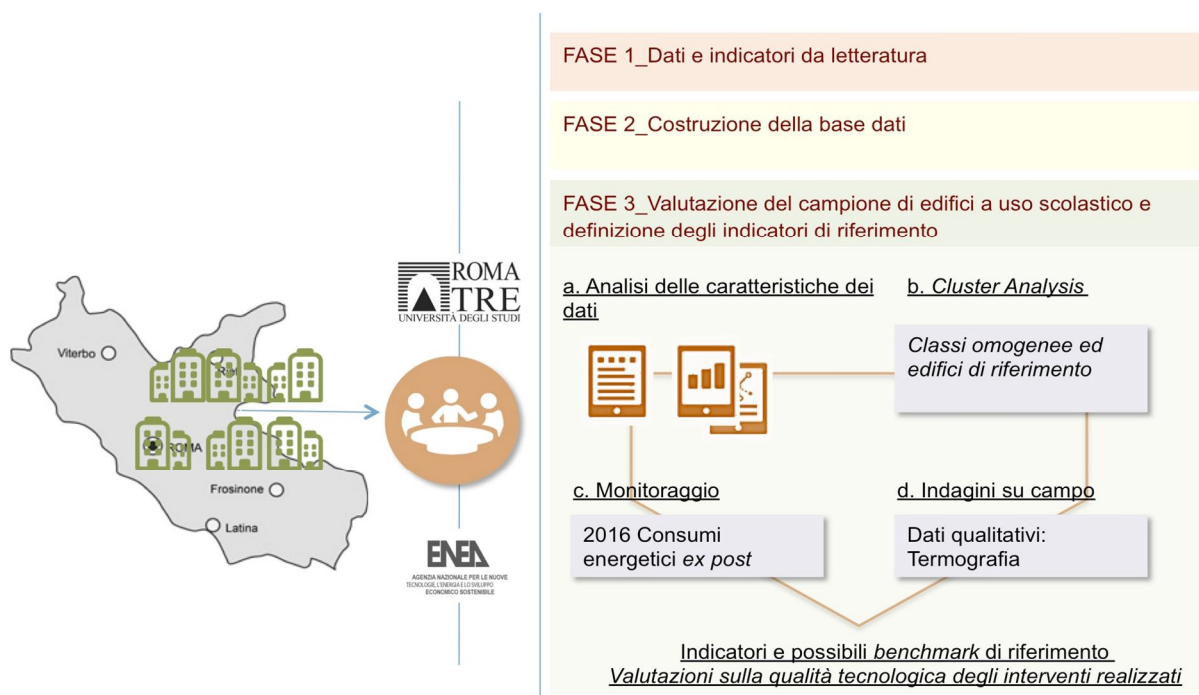


Figura 1. Metodologia generale della ricerca

L'obiettivo della Fase 3 è stato quello di valutare qualitativamente gli interventi attraverso modellazioni e indagini sul campo e, conseguentemente, elaborare alcuni indicatori e possibili *benchmark* di riferimento per la programmazione degli interventi di riqualificazione. Per gestire l'elevato numero di dati si è applicata la *cluster analysis* sul campione di edifici, individuando classi omogenee per caratteristiche degli interventi (Fase 3a), i cui consumi sono stati monitorati (Fase 3b) e, per alcuni di essi, sono stati elaborati modelli per la valutazione della prestazione energetica in regime dinamico (Fase 3c) e sono state effettuate indagini sul campo (Fase 3d) per monitorare la qualità tecnologica degli interventi.

³ I dati sono stati desunti dalla documentazione della fase iniziale (dossier di finanziamento che non includeva le diagnosi energetiche) e del progetto esecutivo, non dalle fasi intermedie e finali del processo, fino alle attività di cantiere. I dati sono stati elaborati per creare un sistema di informazioni sulle caratteristiche ambientali, tipologiche, costruttive e funzionali.

3 FASE 1: Il patrimonio scolastico della Regione Lazio e gli interventi di riqualificazione in atto: dati e indicatori per valutazioni ex post

Nella Fase 1 è stato affrontato il tema della riqualificazione energetica del patrimonio scolastico a livello nazionale con particolare attenzione alla Regione Lazio. Dallo studio della letteratura scientifica sono stati tratti dati sui consumi energetici delle scuole, soprattutto per le scuole localizzate nelle zone climatiche del campione oggetto di questo studio (zone climatiche C, D, E) e indicatori di efficacia per la valutazioni *ex post* degli interventi di riqualificazione.

3.1 Incidenza del patrimonio scolastico sui consumi energetici a livello nazionale con particolare riferimento alla Regione Lazio

Le prestazioni energetiche delle scuole è un tema ampio, trattato sia nella letteratura scientifica internazionale sia in quella nazionale, da enti di ricerca e dallo stesso Ministero dell’Istruzione, dell’Università e della Ricerca. In quest’ottica è interessante capire quanto sia rilevante il tema dei consumi energetici del patrimonio edilizio scolastico rispetto al patrimonio degli edifici pubblici, quali siano le differenze del patrimonio scolastico riguardo al contesto internazionale e quali gli strumenti di indagine che sono utilizzati a monte delle statistiche di riferimento per la valutazione *ex ante* dei consumi.

Prima di definire in dettaglio il quadro dei consumi energetici del patrimonio scolastico, è utile presentare una sintesi sullo stato anagrafico delle scuole italiane, primo indicatore degli elementi di maggiore criticità che possono emergere. Le statistiche su circa 42.000 edifici⁴ riportano, infatti, un primo dato sulla vetustà del patrimonio, inquadrando come periodo di costruzione prevalente degli edifici scolastici nazionali quello che va dagli anni Sessanta agli anni Ottanta [14].

Le statistiche della Regione Lazio corrispondono a quelle nazionali: il 3% degli edifici è stato costruito prima del 1900, la maggior parte, circa il 45 % delle scuole, in un periodo che va dal 1961 al 1980 (Fig. 2)⁵.

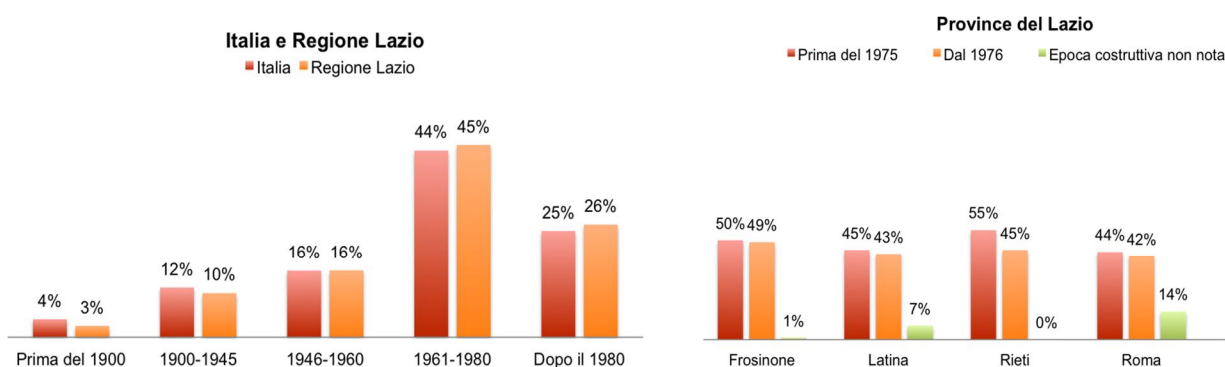


Figura 2. Periodi di costruzione degli edifici scolastici. Regione Lazio e Italia (Elaborazioni dell'autore da [14] e province del Lazio [14])

Questo dato si correla, in forma diretta e al netto degli interventi di riqualificazione operati, a consumi energetici elevati poiché la maggior parte degli edifici del patrimonio scolastico è stata costruita in epoche nelle quali le tecniche costruttive e le normative tenevano poco in considerazione gli aspetti energetici del fabbricato.

⁴ Su 42.000 edifici, 33.000 sono attivi: questo il numero ad oggi censito dall’Anagrafe dell’Edilizia Scolastica istituita dal MIUR con Legge n. 23 del 1996, ma resa disponibile solo in tempi recenti.

⁵ Si esclude la provincia di Viterbo perché il dato risulta anomalo.

Un primo dato generale sugli interventi di riqualificazione del patrimonio scolastico racconta che sono state attuate diverse misure di efficientamento negli edifici a uso scolastico **[16]** e che tali accorgimenti per la riduzione dei consumi energetici riguarda il 58% degli edifici, come riporta l'Anagrafe dell'Edilizia Scolastica **[14]**. Da questo primo quadro si evince l'importanza di quanto fatto e quanto potrebbe essere ancora fatto in termini di efficientamento energetico delle scuole, ma soprattutto, vista l'importanza del patrimonio già riqualificato, la possibilità di migliorare il rapporto costi-benefici. A supporto di questa considerazione si può rilevare, inoltre, un altro importante dato sugli edifici scolastici nella Regione Lazio: rispetto alla totalità degli edifici, nelle quattro province di Frosinone, Latina, Rieti e Roma, dal 26% al 36% degli edifici non è presente alcun tipo di accorgimento per il contenimento dei consumi energetici **[14]**. In media un edificio su tre è sprovvisto di qualunque sistema di risparmio, accorgimento sull'edificio o sugli impianti, comprese le fonti rinnovabili.

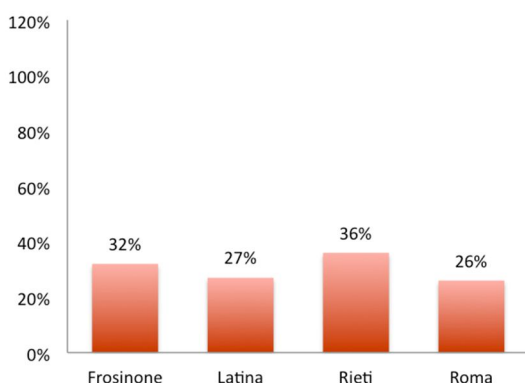


Figura 3. Percentuale di edifici privi di accorgimenti per il contenimento dei consumi energetici (Fonte: rielaborazione dell'autore da [14])

Inoltre, negli edifici a uso scolastico gli interventi per il contenimento dei consumi riguardano, in prevalenza, gli impianti termici e la sostituzione dei serramenti e, per percentuali minori, la riqualificazione delle chiusure opache **[14]**. Quest'ultimo dato non corrisponde, invece, alle scelte compiute negli interventi oggetto di questa ricerca. La superficie d'intervento sulle chiusure trasparenti è, infatti, inferiore rispetto a quella sulle chiusure opache, invertendo la tendenza presentata dai dati Miur dai quali si desume una maggiore potenziale efficacia degli interventi sull'involucro opaco.

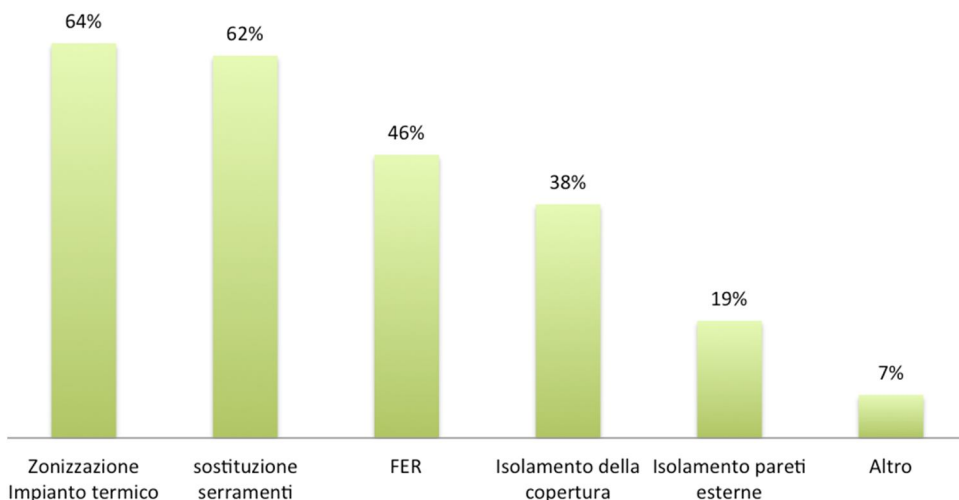


Figura 4. Distribuzione dei tipi di intervento sugli edifici scolastici del patrimonio nazionale con accorgimenti per il contenimento energetico (Fonte: rielaborazione dell'autore [14])

3.2 I consumi delle scuole: analisi e indagini per la costruzione di un data base per la valutazione ex ante dei consumi

Gli studi sui consumi energetici del patrimonio scolastico nazionale seguono diversi approcci per considerare le prestazioni del sistema edificio-impianti-utente. Sono studi basati su *monitoraggi*, *stime* e *modelli di simulazione*, oltre a studi orientati all'utilizzo combinato delle precedenti strategie. Questi studi includono le "Scuole" (divise tra materne e elementari, medie, superiori) come sotto settore, escludendo gli edifici universitari.

3.2.1 Studi basati su stime

Costruire una base dati sui consumi energetici delle scuole pubbliche è sicuramente un obiettivo ambizioso che dovrebbe essere affidato a un vero e proprio Osservatorio degli edifici pubblici. Nel contesto nazionale molto è stato fatto attraverso le indagini campionarie. Una prima base dati sui consumi delle scuole è stata costruita considerando circa il 5% (oltre 2.300 scuole) del patrimonio, selezionato mediante un campionamento *a network*⁶ sulla base dei dati MIUR di un anno scolastico campione (2011-2012). I risultati in termini di consumo riportano un valore medio per zone d'Italia e per dimensione dell'edificio scolastico, definita in base al numero di utenti [17]. In Tabella 1 si riportano i dati riferiti all'Italia centrale e a classi dimensionali che corrispondono alle scuole oggetto della nostra indagine.

	Consumi Elettrici			Consumi Termici		
	kWh/a per scuola	kWh/a per alunno	kWh/a per m ²	kWh/a per scuola	kWh/a per alunno	kWh/a per m ²
Italia centrale	26.300	155,1	16,1	162.925	961	86,2
Alunni <50	7.455	199,7	14,8	76.487	2.049	89
Alunni da 50 a 100	15.109	219,3	17,1	105.928	1.537	113,3
Alunni da 100 a 200	25.078	178,9	15,6	155.402	1.109	98,1
Alunni da 200 a 400	50.437	180,3	15,8	271.102	969	91,0
Alunni da 400 a 1000	99.839	167,6	17,3	443.581	745	75,6

Tabella 1. Dati di consumo medi in Italia degli Edifici scolastici (Rielaborazione da [17])

Sebbene il contesto internazionale possa essere ritenuto di difficile riferimento, per la diversità sia climatica sia d'uso degli edifici scolastici, un importante contributo in letteratura è rappresentato da una *review* dei consumi medi per il riscaldamento degli edifici scolastici nei paesi del mondo [8]. Si riportano in Figura 5 le medie europee semplificate⁷.

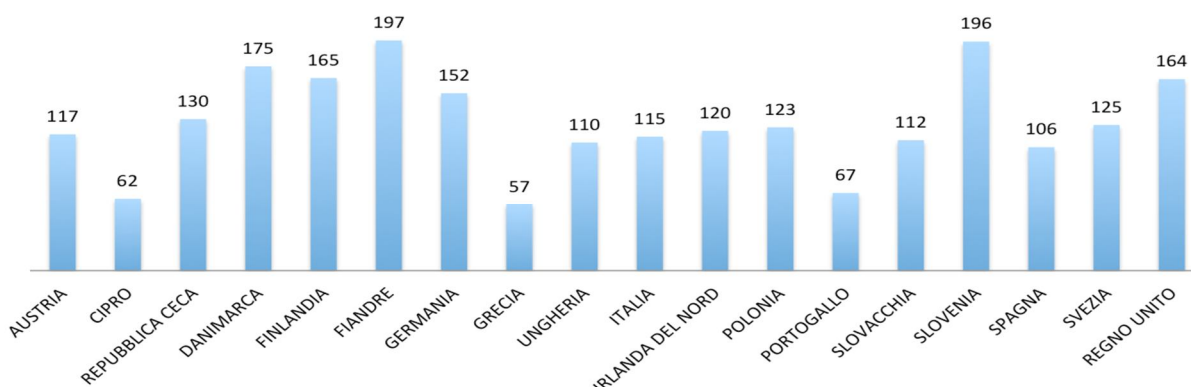


Figura 5. Consumi termici medi in kWh/m² (rielaborazione da [8])

⁶ Il campionamento *a network* prevede due fasi: nella prima è stato estratto un campione casuale semplice stratificato, senza ripetizione di dimensione, pari a circa 800 scuole; nella seconda, è stato inviato un questionario all'ente di gestione di riferimento, per ogni unità selezionata, e sono state raccolte le informazioni d'interesse.

⁷ Rispetto al contributo pubblicato da Pereira et al. [9], qui non sono riportati i campi di valori dei consumi dai minimi ai massimi dei singoli Paesi, ma solo il dato di maggior consumo.

I dati mostrano che i consumi degli edifici a uso scolastico dei Paesi dell'Unione Europea variano da circa 57 a 197 kWh/m² anno. Tenendo conto che nell'elaborazione sono state riportate le medie con i valori più alti di consumo tra le diverse tipologie scolastiche, questi parametri indicano l'intervallo europeo atteso di 'energivorità' degli edifici scolastici. Con una media dei consumi pari a 115 kWh/m² anno, l'Italia si attesta nella fascia alta dei consumi.

La situazione della stima dei consumi energetici sul territorio italiano è ulteriormente approfondita dalla letteratura internazionale, tra cui alcuni studi che indicano i seguenti valori:

- Italia Centrale (studio basato su 29 scuole): tra 15,7 e 21,7 kWh/m³ a [18];
- Italia Settentrionale (studio basato su 49 scuole): 47,1 7 kWh/m³ a [19];
- Italia Nord Occidentale (studio basato su 100 scuole): 37-28 kWh/m³ a [20].

In conclusione, lo stato dell'arte degli studi basati sulle stime fornisce dati riferiti in prevalenza a edifici dell'Italia Nord Occidentale e a un patrimonio di casi studio generalmente non selezionati secondo criteri tipologici. Tuttavia, il numero delle stime compensa l'eterogeneità delle fonti e contribuisce a delineare un quadro di massima sui consumi degli edifici scolastici.

3.2.2 Studi basati su monitoraggi

Nel panorama della letteratura scientifica nazionale il tema del monitoraggio è stato affrontato nella sua applicazione sia su edifici oggetto d'interventi di riqualificazione [21] sia sul patrimonio esistente [22, 23], a monte di eventuali interventi. Tra gli studi più rappresentativi applicati agli edifici a uso scolastico e a livello regionale, si colloca il sistema di monitoraggio dei consumi elettrici e della qualità del clima effettuato su un istituto comprensivo in Valle d'Aosta⁸.

L'obiettivo del progetto di ricerca, che acquisisce i dati in tempo reale e attraverso software di gestione, è stato quello di determinare con precisione quali fossero i termini di risparmio energetico della struttura determinando le fonti di maggior consumo.

In linea generale, i limiti degli studi basati sul monitoraggio, così specifici, sono la quantità dei dati monitorabili e il numero di edifici effettivamente indagabili. Gli esiti di questi studi incidono poco sull'acquisizione dei dati di confronto, mentre sono indicativi per le metodologie e le strumentazioni applicate. Il monitoraggio, oltre ad essere un sistema che consente l'acquisizione diretta di dati sui consumi degli immobili, è uno strumento che può validare gli studi basati su modelli di simulazione. In questo senso sono stati impostati alcuni studi che hanno sviluppato due indagini complementari basate sia su campagne di monitoraggio (su base annuale) dei consumi energetici (termici ed elettrici) - eseguite su un campione di edifici scolastici rappresentativo (circa 100 edifici) della provincia di Torino (zona climatica prevalente E) - sia su una campagna di simulazione dinamica su edifici tipo (circa 15 identificati nel corso delle campagne di monitoraggio), ma selezionati tra gli edifici con maggiori informazioni a disposizione per poter costruire il modello di calcolo.

Nello studio citato i dati di consumo rilevati erano inerenti tre stagioni termiche e riguardavano una media di 37 edifici, con consumi medi che nelle diverse stagioni oscillavano tra 20 e 26 kWh/m³anno (pari a 27 kWh/m³anno normalizzati rispetto ai gradi giorno) [20]. I valori di *benchmark* presentati all'esito della ricerca sono riportati in Tabella 2.

	kWh/m ²
Energia per la climatizzazione invernale	114
Energia elettrica	15

Tabella 2. Indicatori di consumo su 37 edifici nel Nord Italia

⁸ Il progetto è presentato sul sito web <http://www.applus-energie.org/applus/index.php/it/>.

Nel rapporto di Bianchi, Altomonte, Cannata e Fasano [24], che si configura come un piccolo censimento sullo stato energetico delle scuole italiane, sono monitorati i consumi degli edifici scolastici di 92 scuole sparse sul territorio nazionale (zone climatiche prevalenti D ed E). È stato riscontrato che le scuole d'infanzia e le primarie hanno consumi termici maggiori delle secondarie, con un consumo medio per le scuole d'infanzia che oscilla tra 80 e 100 kWh/m² anno. Nelle scuole primarie il consumo medio specifico scende a 65 kWh/m² anno, mentre nelle scuole superiori è pari a 20 kWh/m². Il consumo medio elettrico su tutte le scuole è pari a 20 kWh/m².

In conclusione, lo stato dell'arte degli studi basati sui monitoraggi fornisce dati che si riferiscono, in prevalenza, a edifici nelle zone climatiche D ed E e a diverse tipologie dell'ordinamento scolastico e delle dimensioni degli edifici in funzione degli utenti. In questo senso, la definizione di indicatori organizzati per numero di utenti o per zone climatiche può essere utile per ottenere un quadro di massima sui consumi degli edifici scolastici piuttosto specifico sebbene basato su pochi casi studio.

3.3 Indicatori di efficacia per la valutazioni ex post degli interventi di riqualificazione

3.3.1 Studi basati su Post Occupancy Evaluation

La *Post Occupancy Evaluation* (POE) o Valutazione post abitativa è un processo di valutazione delle prestazioni degli edifici durante il loro uso. È basata sull'idea che, per raggiungere la qualità degli edifici e degli ambienti interni, debbano essere capiti i bisogni degli utenti valutando le loro reazioni nei confronti dell'edificio e degli spazi che abitano. La POE nasce per verificare l'efficacia delle soluzioni e delle scelte progettuali adottate in edifici sia di nuova costruzione sia oggetto di interventi di riqualificazione, ed è spesso mirata a implementare uno o più aspetti qualitativi degli ambienti. Per la POE [25]:

- il comportamento degli utenti è un fattore chiave del *gap* tra i consumi previsti ed effettivi e l'efficienza degli edifici;
- numerosi edifici non raggiungono gli obiettivi di efficienza energetica una volta occupati, nonostante un alto livello di progettazione e di innovazioni materiche;
- capire e coordinare le diverse motivazioni per guidare gli utenti sono azioni importanti per monitorare gli impatti dei diversi profili d'uso sulla prestazione energetica.

Nata negli anni Ottanta, la POE è tornata in auge per capire quanto il comportamento degli utenti incida nella prestazione energetica degli edifici [26]. Il tema dell'incidenza dell'ambiente interno sul comfort degli occupanti è cresciuto con la considerazione degli aspetti legati alla soddisfazione ambientale nei protocolli per gli edifici *green* [27].

Nell'ultima decade la POE ha avuto numerosi adattamenti e miglioramenti, ma il cuore centrale della missione è rimasto lo stesso: chiudere il cerchio tra progetto e prestazioni per i proprietari degli edifici, per i progettisti e per gli operatori del settore basandosi su *feedback* qualitativi degli occupanti.

La più recente letteratura scientifica ha presentato applicazioni della POE su grandi numeri in termini sia di interviste sia di edifici. Le pubblicazioni dell'anno in corso sono sintetizzate in Tabella 3, che compara numeri e metodologie delle diverse applicazioni:

Autori	Localizzazione degli edifici	Edifici	Metodologia
Hewitt et Al. 2016 [25]	USA	45 green building	Nessuna misura, metodi di sola indagine del comportamento (VBN Values Beliefs Norms)
Leder et Al. 2016 [27]	USA e CANADA	12 green building e 24 edifici	COPE (con misure sulle postazioni) e GREEN POE (con misure negli ambienti)
Cole 2010 [26]	USA	30 green building	BUS
Candido et Al. 2016 [28]	AUSTRALIA	50 uffici	BOSSA
Hewitt et Al. 2016 [25]	USA /Nord-Est	2893 appartamenti	Questionario via mail

Tabella 3. Sintesi dei casi studio di letteratura in riferimento alla POE

Da questi studi più recenti, si può osservare che la POE, applicata alla valutazione del miglioramento energetico e ambientale degli edifici, può fornire attraverso il *feedback* degli occupanti una ulteriore informazione sulla stima del comportamento termico, igrometrico e dell'illuminazione degli edifici. È tuttavia chiaro che il *feedback* degli occupanti non può essere l'unico metodo di stima sulle prestazioni degli edifici, proprio in ragione della sua soggettività [25].

Inoltre, non sempre il livello di soddisfazione degli utenti in edifici *green* è molto più ampio di quello degli utenti in edifici non *green* [27].

Lo stato dell'arte degli studi basati sulla *Post Occupancy Evaluation* fa poi riferimento a contesti climatici molto diversi tra loro e a edifici con prevalente destinazione a ufficio. Inoltre, in questi studi, l'interesse per il comfort dell'utente spesso mette in secondo piano la relazione con dati quantitativi utili ad associare il grado di soddisfacimento dell'utente con il grado di miglioramento delle strutture in termini di efficientamento energetico.

3.3.2 Studi basati sull'*Evidence Based Design*

L'*Evidence Based Design* (EBD), definito da Kirk Hamilton nel 2003, è un processo che conduce all'uso giudizioso, esplicito e cosciente delle migliori e correnti evidenze che provengono dalla ricerca e dalla professione [29]. In altre parole l'*Evidence Based Design* richiama a un maggior rigore nelle conoscenze pratiche per il progetto del costruito e alla collaborazione e condivisione di conoscenze tra il cliente e il progettista. Un buon livello di rigore suggerisce che gli architetti basino le decisioni progettuali su un'esplicita catena logica relazionata con i fatti, i risultati delle ricerche, l'osservazione sul campo, e che questa catena logica sia condivisa con il cliente.

Come architetti - in armonia con l'intera industria delle costruzioni - ambiamo a realizzare edifici a zero emissioni entro il 2030, e per fare questo abbiamo bisogno di sostenere le scelte progettuali con i miglior dati disponibili e reperiti in fase di ricerca.

È fondamentale rilevare che l'EBD non è un prodotto, ma un processo che si basa su ricerche credibili ed esperienze derivanti da progetti conclusi, che possono offrire un percorso di risposte alle domande, e non consente di estrarre dati che siano un'immediata risposta a requisiti specifici da soddisfare. Gli stessi dati possono condurre a differenti idee di progetto per funzioni simili. Inoltre, le informazioni e i dati sono in costante aggiornamento, e questo comporta un potenziale cambiamento dei dati di riferimento che influenza progetti simili in tempo diversi [29].

Questo interessante approccio, tuttavia, non è stato ancora sufficientemente sviluppato per gli edifici scolastici. In futuro, un'applicazione dell'EBD potrebbe essere sicuramente avviato con i casi analizzati.

3.3.3 Studi basati su *benchmarking*

Gli studi basati su attività di *benchmarking* confrontano, in modo sistematico e attraverso indicatori, i diversi interventi di riqualificazione degli edifici e ne misurano gli esiti in termini di efficacia. Nella letteratura di settore sono numerosi i contributi sugli indicatori come misura del grado di successo o, meglio ancora, dell'adeguatezza delle attività di efficientamento energetico. Questi indicatori descrivono l'efficacia degli interventi, in genere, in forma quantitativa:

- il risparmio ottenuto per unità di superficie o di volume;
- il costo sia in rapporto al risparmio ottenuto sia alla superficie di intervento.

In questo studio sono stati individuati gli indicatori che, partendo dai riferimenti esistenti e in coerenza con l'obiettivo della ricerca, fossero:

- pertinenti rispetto alle indicazioni e agli obiettivi dei documenti nazionali per l'efficientamento energetico;
- confrontabili con le fonti di letteratura nazionale e internazionale;
- allineati a *benchmark* normativi/amministrativi esistenti.

In letteratura sono riportati alcuni dati sui risparmi dovuti agli interventi di riqualificazione su edifici scolastici:

- Cipro: circa 32% [10];
- Grecia: circa 43% [12];
- Slovenia: tra il 17% e il 35% [30];
- Italia (Centrale) circa 38% [18].

Diversi approcci teorici per la definizione di *benchmark* di consumo sono stati seguiti cercando di analizzare il fabbisogno energetico per il riscaldamento e il raffrescamento, costruendo un edificio campione del settore edilizio scolastico rappresentativo della tipologia edilizia prevalente (scuole secondarie superiori). Nello studio di Calabresi [31], per esempio, l'edificio campione è stato utilizzato per costruire un modello per simulazioni dinamiche, nelle prevalenti fasce climatiche del contesto italiano, di alcuni interventi di riqualificazione sull'involucro e sull'impianto (Tabella 4)⁹.

	Consumi termici		Riqualificazione Chiusure opache ¹⁰		Risp.	Riqualificazione Chiusure trasparenti		Risp.
	modello Base kWh/m ² a	kWh/m ³ a	kWh/m ² a	kWh/m ³ a	%	kWh/m ² a	kWh/m ³ a	%
Zona climatica E (Milano)	81,6	22,5	62,8	17,2	19%	75,7	20,9	7,2
Zona climatica D (Roma)	41,6	11,4	33,3	8,7	16%	39,2	10,8	20%
Zona climatica B (Palermo)	19,8	5,3	16,5	4,2	23%	19,0	5,1	4%

Tabella 4. Consumi termici (Riscaldamento e Raffrescamento) per tipologia d'intervento su modello di benchmark (elaborazione dell'autore da [31])

Alcune organizzazioni scientifiche e di ricerca hanno studiato il potenziale di riduzione dei consumi energetici nelle scuole italiane stimandolo in circa il 20% dei consumi energetici complessivi, attraverso interventi a basso e bassissimo costo (comportamentali) [32]. Tuttavia, spesso queste stime si basano su casi e dati non evidenti [31].

A livello nazionale il contributo di Citterio e Fasano [33] ha definito indicatori descrittivi basati su percentuali di risparmio per tipo di intervento o costi relativi, o in ragione del rapporto costi/benefici, presentando per tipo di intervento percentuali stimate di incidenza economica sul risparmio energetico. Si riportano in Tabella 4 alcune stime e, in particolare, quelle relative alle stesse tipologie di intervento degli edifici oggetto di questa ricerca.

Involucro	Isolamento termico chiusure orizzontali opache	10%
	Isolamento termico chiusure verticali opache	12%
	Sostituzione dei serramenti	46%
Impianto di Riscaldamento	Sostituzione generatore o regolazione climatica	1-3%
Impianto di Raffrescamento		-
Installazione Fonti Rinnovabili	Solare Termico	2%
	Solare Fotovoltaico	

Tabella 5. Incidenza del costo per i diversi interventi di riqualificazione (Rielaborazione dell'autore da [33])

Sempre nel medesimo studio è stato stimato il risparmio annuale in termini di sola energia termica pari all'ordine del 18% e di energia elettrica pari al 23% [33].

⁹ Nel contributo non sono documentati i criteri che hanno portato alla scelta dei termini di rappresentatività dell'edificio.

¹⁰ Sono stati inseriti i valori riguardanti l'azione di intervento con minori benefici.

Borgarello e Carrara [34] valutano pari al 35% il risparmio energetico potenziale degli edifici scolastici, ottenibile attraverso interventi tradizionali e un risparmio economico equivalente del 50% dei costi da bolletta pari a circa 13.000 euro annui per edificio scolastico, sostenendo costi per le ristrutturazioni tra i 400 e i 700 €/m². Lo studio parte dalla definizione di quattro edifici tipo di edilizia scolastica, rappresentativi di due diverse epoche costruttive, e sui quali sono stati ipotizzati diversi scenari d'intervento: da quello meno invasivo fino al raggiungimento di un edificio a consumo quasi zero.

Nella guida redatta dal Ministero dell'Ambiente [35] sull'efficienza energetica negli edifici scolastici, un quadro di sintesi indica i risparmi ottenibili per tipo di intervento sull'involucro. La guida classifica ogni intervento per carattere dimensionale (e.g., diversi spessori di isolamento termico delle chiusure verticali opache) e risparmi conseguibili. In Tabella 6 si mostrano i dati riguardanti i risparmi energetici minimi e massimi per le zone climatiche degli edifici riqualificati dalla Regione Lazio (zone climatiche C, D, E).

Involucro		Zona C e D		Zona E		
		Isolamento termico chiusure verticali opache dall'esterno (cappotto)		6 cm di spessore di isolamento termico		8 cm di spessore di isolamento termico
		Tipo: Muratura	Risparmio: 20-25%	Tipo: Muratura	Risparmio: 20-25%	
		Tipo: Pareti con intercapedine	Risparmio: 10-15%	Tipo: Pareti con intercapedine	Risparmio: 10-15%	
	Isolamento termico chiusure orizzontali opache		6-8 cm di spessore di isolamento termico		8-10 cm di spessore di isolamento termico	
		Solaio di Copertura	15-20%	Solaio di Copertura	15-20%	
		Solaio del Sottotetto	10-15%	Solaio del Sottotetto	10-15%	

Tabella 6. Risparmi potenziali per interventi di riqualificazione dell'involucro. (elaborazione dell'autore da [35])

Nella guida redatta dalla FIRE e dall'ENEA [36] per il contenimento della spesa energetica delle scuole, invece, le stime del risparmio energetico per interventi convenzionali sembrano meno ottimiste, non sono sotto articolate per zona climatica ma possono essere così riassunte:

	Tipo di intervento	Risparmio energetico
Involucro	Isolamento termico chiusure orizzontali opache	5-15%
	Isolamento termico chiusure verticali opache (isolamento nell'intercapedine)	5-10%
	Sostituzione dei serramenti	10-20%
Impianto di riscaldamento	Sostituzione generatore o regolazione climatica	5-10%

Tabella 7. Dati estratti dai risparmi energetici proposti dalla guida della FIRE-ENEA (rielaborazione dell'autore da [36])

In sintesi, alcuni *benchmark* possono essere desunti dagli studi analizzati che indicano, nel contesto climatico nazionale, come possibili risparmi:

- dal 18 al 35% per gli interventi di riqualificazione energetica in generale [22,31,34];
- dal 5-25% per gli interventi sull'involucro opaco [31, 33, 35,36];
- dal 4-46% per gli interventi sull'involucro trasparente [31, 33, 35,36];
- dal 1-10% per gli interventi sugli impianti [33, 35,36].

3.3.4 Prime evidenze

- Il tema dei consumi energetici del patrimonio edilizio scolastico, rispetto al patrimonio degli edifici pubblici, occupa uno spazio rilevante sia a livello nazionale sia regionale per la vetustà del patrimonio, per le opportunità legate ai caratteri di omogeneità tipologica e costruttiva che lo contraddistinguono e per le possibilità di azioni di riqualificazione energetica su un numero importante di immobili.
- Sono stati indagati gli strumenti d'indagine utilizzati per affrontare il tema dei caratteri costruttivi ed energetici del patrimonio e degli interventi di *retrofitting*, ritenendo maggiormente utili ai fini del presente studio gli strumenti che si basano sull'analisi di casi di studio e sulla simulazione attraverso modelli per l'ottenimento di dati di consumo.
- Gli indicatori sui dati di consumo, dalla letteratura citata (incluso sia i dati provenienti da casi di studio reali sia da casi di studio simulati) e per le zone climatiche prevalenti D ed E di edifici di edilizia scolastica, possono essere così sintetizzati:

	Consumi termici annuali		Consumi elettrici annuali
Baldazzi et al., 2014 [17]	86,2 kWh/m ²		16,1 kWh/m ²
Desideri et al., 2002 [18]		15,7 e 21,7 kWh/m ³	
Pagliano et al., 2010 [32]	41,6-81,6 kWh/m ²	11,4-22,5 kWh/m ³	
Bianchi et al., 2009 [26]	65-100 kWh/m ²		

Tabella 8. Sintesi dei dati di letteratura per i consumi di edifici scolastici in zone climatiche D ed E

Il quadro di sintesi della Tabella 8 mostra che i valori di consumo attesi *ante* interventi, per la tipologia scolastica nel contesto climatico D e E - che corrisponde al contesto climatico del maggior numero degli edifici oggetto della ricerca - variano tra circa 40 e 100 kWh/m² anno, definendo un utile indicatore per individuare eventuali dati anomali per i casi di studio di questa ricerca.

Gli indicatori sui dati di risparmio a seguito di interventi di riqualificazione energetica in Italia su edifici scolastici variano tra il 18 e il 35% come riportato in Tabella 9.

	Risparmio energetico potenziale
Calabresi, 2014 [31]	20%
Citterio e Fasano, 2009 [33]	18% (termico) 23% (elettrico)
Borgarello e Carrara, 2013 [34]	35%

Tabella 9. Sintesi dei dati di letteratura sui risparmi potenziali da interventi su edifici scolastici in Italia

Altre conclusioni riguardano:

- la maggiore soddisfazione dell'utente nell'abitare un edificio a basso consumo energetico e come questo grado di soddisfazione sia in alcuni casi proporzionato al livello culturale dell'utente [27];
- l'uso di un edificio a basso consumo energetico non migliora il comportamento degli utenti rispetto a un edificio non riqualificato [25];
- una non significativa relazione tra i *feedback* delle indagini basate sulla soddisfazione degli utenti e quantificazione delle prestazioni energetiche [28].

4 FASE 2: Caratteristiche tipo-tecnologiche di un campione di edifici del patrimonio scolastico regionale e dei relativi interventi di riqualificazione realizzati: descrizione e distribuzione attraverso un sistema informativo

Nella Fase 2 è stata costruita la base dei dati relativi ai 77 edifici scolastici. Gli edifici sono stati descritti e classificati dapprincipio per ottenere una descrizione quantitativa relativa alla distribuzione sul territorio, alle tipologie funzionali, agli interventi prevalenti e ai costi sostenuti. In seguito, allo scopo di estrarre indicatori descrittivi del campione di edifici e valutare le prestazioni energetiche raggiunte con gli interventi e in rapporto agli indicatori individuati in letteratura, nella base dati sono stati introdotti descrittori di diverse caratteristiche: da quelle più direttamente architettoniche, alle prestazioni tecnologiche (e.g. perfetto isolamento termico delle coperture) ed economiche.

4.1 Caratteristiche degli edifici di edilizia scolastica del programma

È necessario premettere che i dati provengono dalla documentazione di diverse fonti: dossier di candidatura, progetto esecutivo, allegato B alla richiesta di finanziamento, etc.¹¹ Il bando intendeva individuare immobili pubblici sui quali realizzare interventi di efficientamento energetico e produzione di energia da fonti rinnovabili sostenendo “la realizzazione d’interventi mirati al raggiungimento degli obiettivi di sviluppo e diffusione delle fonti energetiche rinnovabili, di risparmio energetico e di contenimento delle emissioni inquinanti in atmosfera attraverso una serie di azioni volte al miglioramento dell’efficienza energetica degli edifici pubblici ricadenti all’interno del territorio regionale” [BUR Lazio n.69/2013]. I criteri di valutazione attribuivano oltre il 50% dei punti alla “presenza e livello di completezza di un audit energetico relativo alla struttura oggetto d’intervento” (10/100 punti), e “all’impatto dell’intervento” (45/100 punti) esplicitato in quattro voci: risultati attesi in termini di miglioramento dell’efficienza energetica; classe energetica raggiungibile attraverso la realizzazione dell’intervento; integrazione di tecnologie per l’utilizzo dell’energia elettrica e termica, ivi comprese le modalità di utilizzo dell’energia prodotta, il fabbisogno energetico della struttura che si prevede di soddisfare con energia da FER e/o da interventi di efficientamento, l’integrazione tra tipologie di intervento. Questa documentazione è stata inviata alla Regione Lazio tramite il Dossier di Candidatura (allegato B) con le indicazioni della prestazione energetica *ante operam* e quella attesa dopo gli interventi.

I dati sulla stima del risparmio energetico conseguito, quindi, sono stati acquisiti da tali fonti, nei limiti del fatto che laddove ogni singolo proponente ha fornito dati non coerenti rispetto sia ai dati di consumo originari, sia macroscopicamente in riferimento ai dati della letteratura scientifica, non è stato preso in considerazione, ma escluso dall’elaborazione degli indicatori elaborati. Per questa ragione il campione originario considera una selezione finale di 64 edifici invece dei 77 inizialmente previsti.

I dati sono stati raccolti con schede che si riferiscono ai singoli edifici e contengono le informazioni sui caratteri costruttivi ed energetici (Fig. 6):

- riferimento nominale e codice del progetto, livello scolastico e indirizzo;
- localizzazione e dati climatici;
- principali caratteristiche dimensionali dell’edificio;
- principali caratteristiche tecnologiche dell’edificio;
- principali caratteristiche energetiche dell’edificio;
- classe energetica *ante* e *post*;
- interventi proposti per la riqualificazione energetica.

¹¹ Nello specifico si veda nota in calce alla bibliografia.

Scheda dell'Edificio - Ante Operam				Scheda dell'Edificio - Ante Operam				
Codice	Progressivo	Regione Lazio		Indirizzo	Città	Provincia	Zona Climatica	Gradi Giorno
	1	LSE3	1344					
Nome				Nome				
Scuola Materna di Aquino				Istituto Comprensivo "Giovanni Paolo II il Grande"				
Via N. Mazzaroppi				Via Guglielmo Marconi Snc				
Localizzazione e Dati Climatici				Localizzazione e Dati Climatici				
AQUINO	FR	C	1286	ARCE	FR	D	1602	
Principali caratteristiche dimensionali dell'edificio				Principali caratteristiche dimensionali dell'edificio				
Anno di Costruzione [Anno]	Alunni [Numero]	Superficie utile [m ²]	Volume [m ³]	Anno di Costruzione [Anno]	Alunni [Numero]	Superficie utile [m ²]	Volume [m ³]	
fine 1970	0	289,94	1370	1930	0	1280	5990	
Principali caratteristiche tecnologiche dell'edificio				Principali caratteristiche tecnologiche dell'edificio				
Struttura	Serramenti esterni	Chiusure Orizzontali Superiori	Chiusure Verticali Opache	Struttura	Serramenti esterni	Chiusure Orizzontali Superiori	Chiusure Verticali Opache	
Telaio in c.a.	Telaio: - Vetri: singoli (sp. 2mm)	Solaio piano: laterocemento	Parete Monostrato: Blocchi da 30 cm intonacati	Telaio: ferro Vetri: singoli				
Principali caratteristiche energetiche dell'edificio				Principali caratteristiche energetiche dell'edificio				
Consumi [Anno 2012]				Consumi [Anno 2012]				
Elettrici [kWh/anno]		Termici [kWh/anno]		Elettrici [kWh/anno]		Termici [kWh/anno]		
52.169		3.643		14.760		7.877		
Classe Energetica				Classe Energetica				
Stato di Fatto		Attesa		Stato di Fatto		Attesa		
G		A		G		D		
Interventi proposti per la riqualificazione energetica				Interventi proposti per la riqualificazione energetica				
Installazione FER	Solare Fotovoltaico	No	Solare Termico	Si	Condizionamento	No	Riscaldamento	
Sostituzione Impianti	Riscaldamento	Si	Serramenti esterni	Si	Chiusure Orizzontali	Si	Chiusure Verticali	
Isolamento Involucro	Chiusure Orizzontali	Si	Chiusure Verticali	Si				

Figura 6. Estratto delle schede informative sugli interventi e sui caratteri costruttivi delle scuole

Ogni scheda è stata referenziata rispetto alla localizzazione dell'edificio ai fini della costruzione del sistema informativo (Fig. 7).



Figura 7. Sistema informativo, provincia di Frosinone, Scuola di Arce

Il sistema informativo, così predisposto, consente di accedere alle informazioni sugli edifici riqualificati direttamente dalle mappe condivise sul campo e associate alle schede del *data base*, e offre la possibilità di essere implementato sia nei termini delle informazioni sia delle immagini (dati sullo stato manutentivo, eventuali esiti di monitoraggi che potranno essere predisposti in seguito). Allo stato attuale sono rilevabili informazioni riguardanti l'anagrafica, le caratteristiche dimensionali (superfici, volumi), tipologiche (ordinamento scolastico), energetiche (consumi termici ed elettrici dell'anno di riferimento) e i caratteri tecnologici degli edifici (strutture, chiusure opache e trasparenti) e agli interventi di progetto.

4.1.1 Distribuzione delle scuole sul territorio

La distribuzione sul territorio dei settantasette edifici a uso scolastico, oggetto degli interventi di riqualificazione energetica, è piuttosto omogenea nelle cinque province del Lazio, soprattutto in rapporto al numero di edifici per provincia effettivamente esistenti. Infatti, nella sola provincia di Roma si trova circa il 70% degli edifici, che corrispondono a 504 istituti scolastici (Fig. 8) [37].

Se si considera la distribuzione sul territorio in ragione delle differenti zone climatiche (DPR 412/1993) del Lazio, gli edifici analizzati ricadono in tre differenti zone climatiche (C, D, E) e, in prevalenza, nella zona climatica D (48%), intermedia tra le altre due (Fig. 9).

La zona climatica D corrisponde pressoché integralmente alla provincia di Roma, mentre la zona climatica C, con la presenza del 30% delle scuole oggetto d'intervento, corrisponde complessivamente alla provincia di Latina.

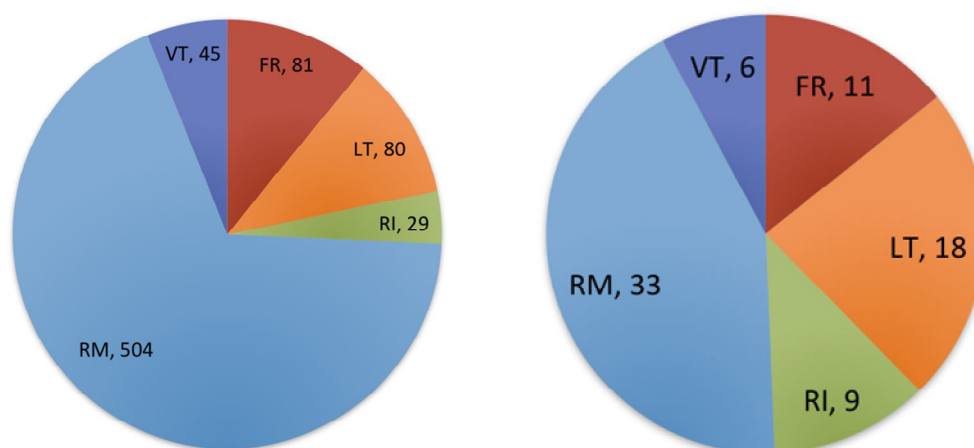


Figura 8. Istituzioni scolastiche per provincia (Dati 2014-2015 USR Lazio) e, a destra, distribuzione degli edifici scolastici riqualificati per provincia

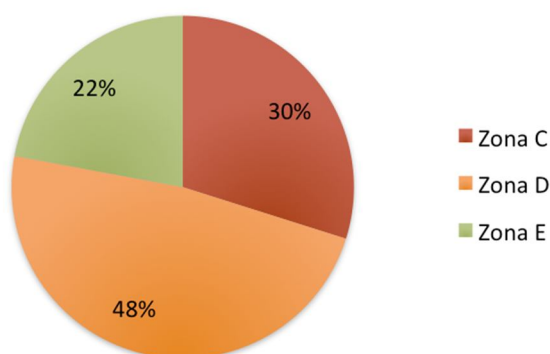


Figura 9. Distribuzione degli edifici oggetto d'intervento per zona climatica

4.1.2 Descrizione per tipologia scolastica

Gli istituti scolastici presentano diverse configurazioni tipologiche dovute prevalentemente alla compresenza di numerosi livelli scolastici che rendono difficile articolare il campione. Si è, pertanto, ritenuto in questa fase di mantenere il campione ampio (77 edifici) al fine di valutare i consumi in relazione alla fascia di età o al livello scolastico relativo. Sulla base dei dati raccolti si può rilevare che:

- nel campione prevalgono le scuole o gli istituti comprensivi con alunni di età inferiore ai 10 anni (scuole d'infanzia, asili nido e primarie) rispetto alle scuole secondarie;
- ad eccezione della scuola d'infanzia e primaria, che trova numerosi edifici comprensivi di entrambi i livelli, il campione esaminato è caratterizzato da edifici che contengono un solo livello rispetto all'ordinamento scolastico (ossia o scuola d'infanzia, o primaria, o secondaria);
- gli edifici sono per la maggior parte collocati in zona climatica D (ca. 45%) e C (ca. 32%).

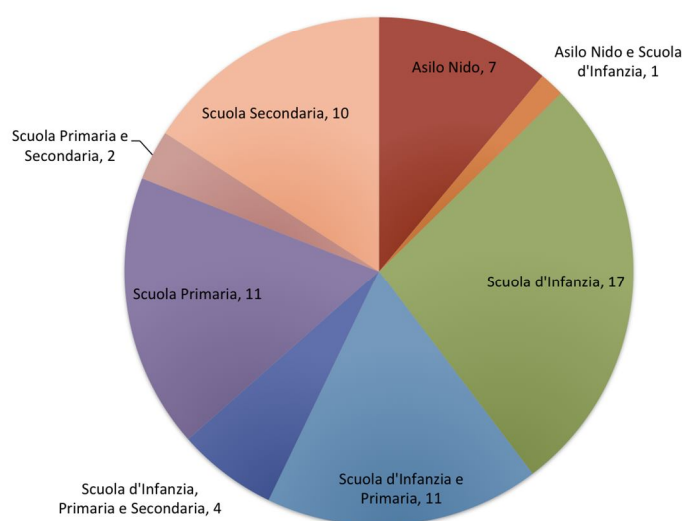


Figura 10. Distribuzione delle scuole secondo i criteri dell'ordinamento scolastico

	Tot	Zona C	Zona D	Zona E
Asilo Nido	7	1	5	1
Asilo Nido e Scuola d'Infanzia	1	0	1	0
Scuola d'Infanzia	17	5	8	4
Scuola d'Infanzia e Primaria	11	2	8	1
Scuola d'Infanzia, Primaria e Secondaria	4	0	1	3
Scuola Primaria	12	8	0	4
Scuola Primaria e Secondaria	2	1	1	0
Scuola Secondaria	10	4	5	1
	64	21	29	14

Tabella 10. Distribuzione delle scuole per livello d'istruzione e zona climatica

4.1.3 Descrizione per tipologia d'intervento

E' utile premettere che si interviene su un patrimonio la cui epoca costruttiva ricade prevalentemente nel trentennio compreso tra il 1961 e il 1991 (Fig. 11).

Gli interventi di riqualificazione energetica realizzati sono classificabili secondo 7 tipologie (Fig. 12):

- interventi sull'involucro edilizio (sostituzione dei serramenti, isolamento termico delle chiusure opache verticali, isolamento termico delle chiusure opache orizzontali) che interessano 74 edifici su 77;

- interventi sugli impianti (riqualificazione dell'impianto di riscaldamento, riqualificazione dell'impianto di raffrescamento) che interessano 64 edifici su 77;
- installazione di fonti rinnovabili (solare termico, solare fotovoltaico) che interessano 66 edifici su 77;
- gli interventi sull'involucro edilizio rappresentano circa il 50% degli interventi complessivi.

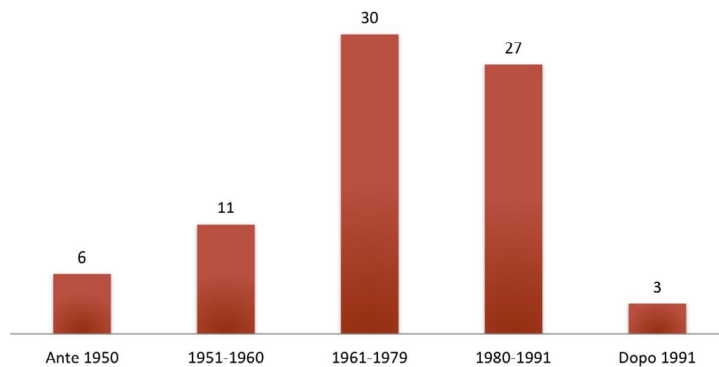


Figura 11. Epoca costruttiva degli edifici scolastici oggetto degli interventi di riqualificazione energetica

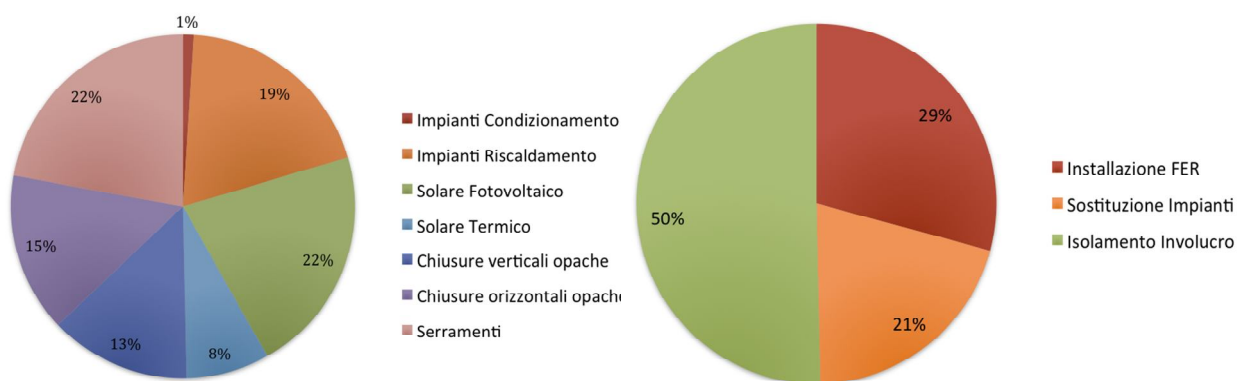


Figura 12. Distribuzioni per tipo d'intervento

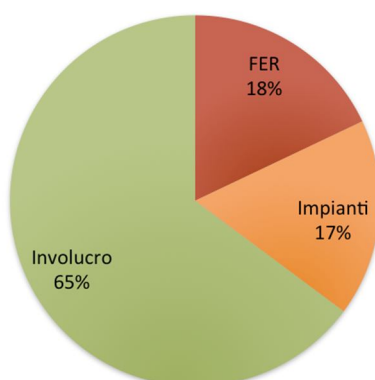


Figura 13. Distribuzione percentuale dei costi finanziati per tipologia d'intervento

4.1.4 Descrizione per costi sostenuti

Rispetto al costo totale degli interventi sull'edilizia scolastica, pari a circa 19,3 milioni di euro, circa 13,2 milioni di euro sono stati impiegati per la riqualificazione energetica dell'involucro edilizio e poco più di 6 milioni di euro per gli interventi sugli impianti e sulle fonti rinnovabili.

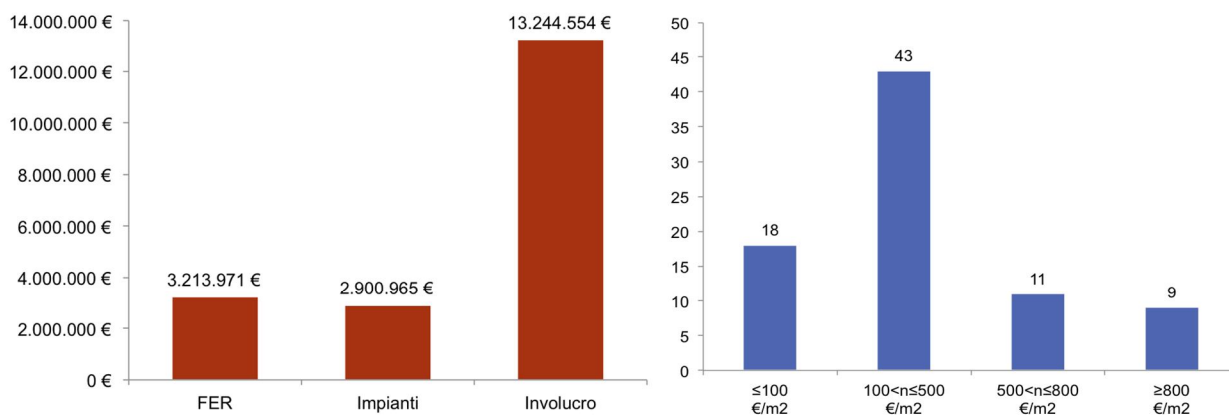


Figura 14. A sinistra: costi per tipo d'intervento; a destra: costi per superficie calpestabile

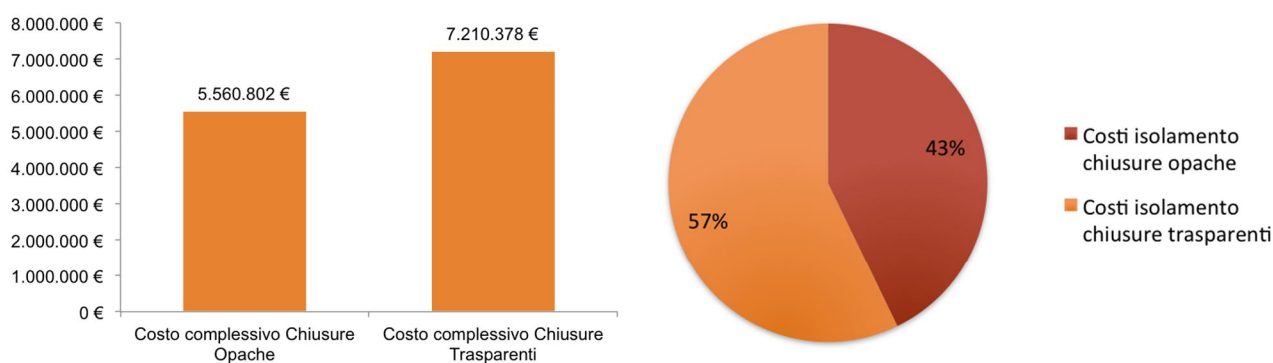


Figura 15. A sinistra: costi per la riqualificazione dell'involucro edilizio; a destra: distribuzione percentuale

Dall'analisi dei 64 progetti, che confermano le distribuzioni dei costi e degli interventi sopra descritti, emergono le seguenti evidenze:

- la distribuzione dei costi mostra che l'involucro edilizio incide per il 65% dei costi finanziati, gli interventi su involucro e impianti comportano un costo complessivo che incide nella misura del 82% rispetto ai costi totali;
- i costi per l'isolamento dell'involucro edilizio sono pressoché equamente distribuiti tra i costi dovuti all'isolamento delle chiusure opache e di quelle trasparenti; tuttavia, le superfici opache rappresentano oltre l'80% delle superfici riqualificate con un importante impatto in termini di quantità di materiali impiegato;
- il costo della riqualificazione per superficie calpestabile, nella maggior parte degli interventi (incluse le opere impiantistiche e l'installazione delle fonti rinnovabili), è inferiore ai 500 €/m².

5 FASE 3: Valutazioni costi/benefici ex post e criteri di *benchmarking* per valutazioni ex ante

I dati raccolti, relativi alle caratteristiche tipo-tecnologiche degli edifici e agli interventi, costituiscono l'insieme delle informazioni sui caratteri *ex ante* ed *ex post* del campione di casi analizzato, come elaborato nella Fase 2.

Il *data base* e il sistema informativo si prestano a definire numerosi indicatori e potenziali *benchmark*, ad esempio, sulle tipologie edilizie e dimensionali, sulle caratteristiche costruttive, etc. In questo paragrafo sono presentati gli indicatori utili a descrivere gli esiti dell'efficientamento energetico degli edifici con particolare attenzione alle azioni quantitativamente più significative, ossia quelle relative all'involucro edilizio.

Le informazioni sono state elaborate per valutazioni sull'efficienza, in termini economici e di qualità costruttiva, delle misure di risparmio energetico sugli edifici scolastici e sono stati elaborati alcuni *benchmark* di riferimento per futuri casi da riqualificare.

Mentre la valutazione economica è stata compiuta sull'intero numero degli interventi realizzati (77 edifici), per la valutazione della qualità tecnologica e per l'individuazione di *benchmark* - dato l'elevato numero di casi e dati - sono stati individuati alcuni edifici più rappresentativi tramite la *cluster analysis*.

Tale metodologia ha già trovato applicazione negli studi di settore [38,39,40] con il medesimo obiettivo di definire edifici di riferimento, in particolare per interventi di efficientamento nelle scuole [38].

Valutati i caratteri costruttivi ed energetici dell'intero complesso degli edifici, sono stati individuate due *cluster*/classi, rispettivamente di 39 e 18 edifici con caratteristiche costruttive ed energetiche omogenee. Per i centroidi dei *cluster*, corrispondenti a due edifici rappresentativi delle classi, sono stati simulati, attraverso un modello dinamico¹², i consumi *post* intervento per controllare l'attendibilità dei dati di progetto e dei risparmi attesi.

L'acquisizione dei consumi reali di 10 scuole del Comune di Roma per l'anno 2016, avvenuta nel corso della ricerca, ha consentito poi di mettere in relazione i dati di progetto sui consumi energetici con quelli monitorati dopo gli interventi.

Su un campione corrispondente al 10% di tutti edifici, poi, sono state eseguite le indagini sul campo per valutare la qualità tecnica e materica degli interventi realizzati in diverse province.

In questo paragrafo si riportano gli esiti delle elaborazioni compiute per estrarre indicatori utili a misurare le prestazioni energetiche degli edifici, attese ed effettivamente realizzate. Il numero ampio di casi e le difficoltà nel reperire dati omogenei e congruenti, come dichiarato nell'Introduzione, hanno portato all'impostazione di un approccio metodologico basato su una progressiva riduzione del numero degli edifici analizzati, simulati o monitorati:

1. 77 edifici¹³ per studiare le prestazioni energetiche reali *ante* interventi e quelle *post* solo sulla base dei dati simulati e dichiarati dai progettisti e trarre i seguenti:
 - indicatori di consumo;
 - indicatori di risparmio;
 - indicatori di costo;
 - indicatori di costo e risparmio per numero d'interventi.
2. 57 edifici e 2 di riferimento, che rappresentano il campione degli edifici raggruppato in due *cluster*, per verificare le prestazioni *ante* e *post*, dichiarate ed effettivamente ottenute, degli interventi attraverso modelli di simulazione dinamica;

¹² Il software impiegato è Desing Builder, interfaccia grafica del motore di calcolo Energy Plus.

¹³ Il campione esclude gli edifici con dati non congruenti nel caso di alcuni indicatori.

3. su 10 edifici del comune di Roma per confrontare i dati attesi da progetto con quelli realmente ottenuti e documentati dai consumi 2016 riportati in bolletta;
4. su 7 edifici per monitorare la qualità tecnologica attraverso indagini sul campo.

5.1 Valutazioni su 77 edifici scolastici e sulla base dei dati dichiarati

Le tabelle che seguono esprimono i dati più rilevanti sulle prestazioni energetiche degli edifici analizzati e sono finalizzati a individuare possibili indicatori sui consumi, sui risparmi e sui costi.

1.1.1 Indicatori di consumo

Nella Tabella 11 sono riportati gli indicatori calcolati sulla base dei consumi medi delle scuole¹⁴ in funzione dell'unità di superficie e di volume.

Nella Tabella 12 sono suddivisi tali valori per zona climatica mostrando - come atteso - che l'indicatore di consumo varia sensibilmente dalla zona C (più calda e con consumi termici inferiore) alla zona E (più fredda e con consumi termici superiori). Questo dato è in linea con alcuni riferimenti di letteratura [17] che hanno proposto la medesima articolazione dei consumi in rapporto alla zona climatica.

	Edifici Zone climatiche C, D, E	
Consumi termici normalizzati sui GG	kWh/m ²	78,51
	kWh/m ³	21,26
Consumi elettrici	kWh/m ²	19,28
	kWh/m ³	5,37

Tabella 11. Indicatori di consumo delle scuole

		ZONA C (22 Edifici)	ZONA D (28 Edifici)	ZONA E (14 Edifici)
Consumi termici normalizzati sui GG	kWh/m ²	51	84	109
	kWh/m ³	15	22	29
Consumi elettrici	kWh/m ²	20	21	14
	kWh/m ³	6	6	4

Tabella 12. Indicatori di consumo ex ante articolati per zona climatica

1.1.2 Indicatori di risparmio

La Tabella 13 mostra, in termini di costi, che il risparmio medio dichiarato è pari al 18,64%¹⁵.

Risparmio energetico (escluse FER) [kWh]	Consumi nel 2012 [kWh]	Risparmio energetico medio [%]
2.290.234,70	12.285.956,50	18,64

Tabella 13. Risparmi energetici e costi relativi

¹⁴ I dati sono riferiti a 64 scuole su 77 per importanti incongruità, o in alcuni casi direttamente di assenze, relative ai dati dei consumi ex ante intervento riferiti all'anno 2012.

¹⁵ Il complesso dei dati oggetto di questi indicatori è di 57 su 64 edifici già selezionati perché presenti tutte le informazioni necessarie per rappresentare i dati in tabella.

In sintesi, il risparmio medio atteso da progetto a seguito degli interventi previsti, e a oggi realizzati, è di poco inferiore al 20% per gli edifici del campione analizzato.

1.1.3 Indicatori di costo

La distribuzione dei costi per tipo d'intervento ha fornito successive informazioni che hanno poi diretto le valutazioni di efficacia verso l'approfondimento della qualità tecnologica dell'involucro edilizio e dei materiali impiegati. Infatti, l'83% delle superfici riqualificate (ca. 85.000 metri quadri) corrisponde a interventi sulle chiusure opache (orizzontali e verticali). Tuttavia, nonostante la percentuale esigua di superfici vetrate 'efficientate', il costo complessivo di queste ultime è maggiore rispetto a quello delle superfici opache. In termini economici, le opere realizzate rappresentano una prassi realizzativa comune lontana dal poter essere una *best practice*.

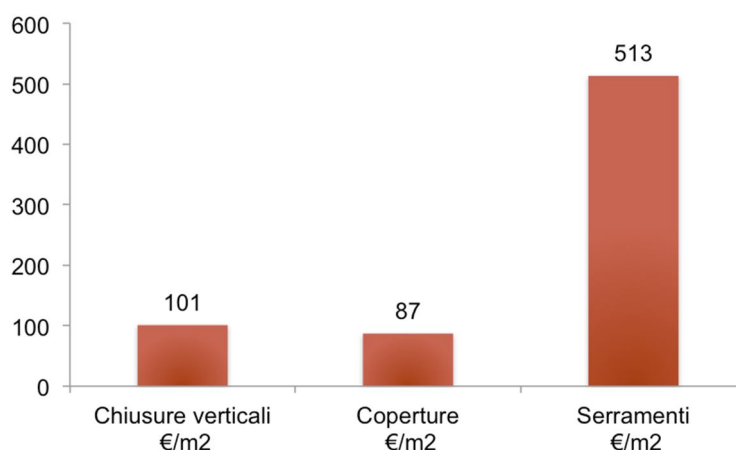


Figura 16. Costo al metro quadro per superficie d'intervento per le diverse tipologie e costo per metro quadro di superficie calpestabile

Costo degli interventi [€]	Costo per kWh risparmiato ¹⁶ [€/kWh]	Energia risparmiata per unità di superficie [kWh/m ² a]
16.854.018	7,47	25,56

Tabella 14. Indicatori di costo

Il costo della riqualificazione per superficie calpestabile rientra, nella maggior parte degli interventi e come evidenziato nella descrizione per costi sostenuti (incluse le opere impiantistiche e l'installazione delle fonti rinnovabili), in un valore inferiore ai 500 €/m².

I risparmi dichiarati sono stati ottenuti attraverso un complesso di centoquarantotto (148) interventi sull'involucro edilizio (isolamento termico delle chiusure opache e sostituzione dei serramenti), sessanta (60) interventi di sostituzione degli impianti (nuovi generatori in prevalenza, sistemi di regolazione delle emissioni, passaggio da sistemi tradizionali a sistemi idronici e a pompa di calore e ottantasei (86) interventi di installazione di fonti pannelli solari (fotovoltaici in prevalenza e termici).

Inoltre (Tabella 15):

¹⁶ Il costo per kWh risparmiato è uno dei criteri di valutazione per il finanziamento della riqualificazione energetica degli edifici della Pubblica Amministrazione.

- Il costo per kWh risparmiato, attraverso gli interventi di sostituzione e rinnovamento impiantistico e isolamento termico dell'involucro edilizio, comporta un costo per kWh risparmiato (come stimato nei progetti) pari a 12,45 €/kWh;
- il costo per kWh prodotto da fonti di energia rinnovabile attraverso interventi di installazione di pannelli solari termici e solari fotovoltaici è pari a 2,46 €/kWh;

Costo per kWh prodotto da FER	Costo per kWh risparmiato (da progetto escluse le FER)
2,46 €/kWh	12,45 €/kWh

Tabella 15. Costo per kWh risparmiato e prodotto attraverso gli interventi

1.1.4 Indicatori di costo e risparmio per numero d'interventi

Alla luce delle considerazioni emerse dalle valutazioni sui costi e sugli interventi sull'involucro edilizio, si è deciso di estrarre come possibile indicatore di efficacia anche quello relativo ai costi medi sostenuti per kWh risparmiato in funzione del numero d'interventi realizzati.

La Tabella 16¹⁷ riporta il costo medio per unità di superficie calpestabile relativo a diverse classi dimensionali di intervento.

Numero di scuole	Numero di interventi	Costo totale da Quadro economico (IVA inclusa) [€]	Costo FER [€]	Costo Impianti [€]	Costo Serramenti [€]	Costo per unità di superficie calpestabile [€/m ²]
2	1	1.119.124 €	62.180 €	0 €	809.144 €	165
7	2	1.532.676 €	172.710 €	192.240 €	812.087 €	110 €/m ²
9	1-2 interv	2.651.800 €	234.890 €	192.240 €	1.621.230 €	122 €/m²
17	3	7.505.020 €	1.600.911 €	2.249.806 €	1.446.727 €	199 €/m ²
18	4	9.415.705 €	805.352 €	3.020.761 €	2.695.601 €	349 €/m ²
35	3-4 interv	16.920.725 €	2.406.262 €	5.270.567 €	4.142.329 €	274 €/m²
16	5	11.319.755 €	1.984.813 €	3.588.490 €	2.634.043 €	418 €/m ²
3	3	4.155.144 €	711.190 €	1.323.964 €	912.743 €	617 €/m ²
19	5-6 interv	15.474.899 €	2.696.003 €	4.912.454 €	3.546.786 €	450 €/m²

Tabella 16. Costo per numero di interventi

Inoltre, per definire un altro indicatore di risparmio si è proceduto ad analizzare tutti gli edifici che hanno subito una riqualificazione mediamente importante, ossia:

- la riqualificazione dell'impianto di riscaldamento;
- la sostituzione dei serramenti;
- almeno un intervento di coibentazione dell'involucro edilizio (o isolamento termico delle chiusure verticali opache o isolamento termico delle chiusure orizzontali opache – coperture).

¹⁷ Si fa riferimento a 63 edifici.

Ne è risultato un campione di 35 edifici, con 3 o 4 interventi su 5 possibili tra edificio-impianto escluse le fonti rinnovabili:

Codice	Zona Clima	Livello scolastico	Epoca costruttiva	Interventi				Num Interv.
				Impianto di Riscaldamento	Chiusure verticali opache	Chiusure orizzontali opache	Serramenti	
1	C	Scuola d'Infanzia	1975	<	X	X	X	4
7	E	Scuola Primaria	1965	X	X	X	X	4
8	E	Scuola d'Infanzia e Primaria	1945	X		X	X	3
12	C	Scuola Secondaria	1985	X	X		X	3
15	C	Scuola Primaria	1960	X	X	X	X	4
17	C	Asilo Nido	1960	X		X	X	3
18	C	Scuola d'Infanzia	1984	X	X	X	X	4
19	C	Scuola Primaria	1980	X	X	X	X	4
20	D	Scuola d'Infanzia	1975	X	X	X	X	4
21	C	Scuola Secondaria	1960	X		X	X	3
22	C	Scuola d'Infanzia e Primaria	1980	X	X	X	X	4
26	C	Scuola d'Infanzia	1960	X	X	X	X	4
27	C	Scuola Primaria	1960	X	X	X	X	4
29	C	Scuola Primaria e Secondaria	1970	X	X	X	X	4
33	E	Scuola d'Infanzia, Primaria e Secondaria	1975	X		X	X	3
37	E	Scuola Primaria	1985	X	X	X	X	4
38	E	Scuola Primaria	1975	X		X	X	3
45	C	Scuola d'Infanzia	1945	X	X		X	3
46	D	Scuola d'Infanzia e Primaria	1965	X		X	X	3
50	D	Scuola Secondaria	1970	X		X	X	3
51	D	Asilo Nido	1992	X	X		X	3
52	D	Scuola d'Infanzia	1960	X	X	X	X	4
53	D	Scuola d'Infanzia, Primaria e Secondaria	1970	X	X	X	X	4
57	C	Scuola d'Infanzia e Primaria	1978	X		X	X	3
58	C	Scuola d'Infanzia	1978	X	X	X	X	4
60	D	Scuola d'Infanzia	1980	X		X	X	3
61	D	Asilo Nido	1976	X		X	X	3
62	D	Asilo Nido	1976	X		X	X	3
69	D	Scuola Secondaria	1970	X		X	X	3
71	D	Scuola d'Infanzia	1978	X		X	X	3
73	D	Scuola d'Infanzia e Primaria	1967	X	X		X	3
74	D	Asilo Nido	1970	X		X	X	3
76	D	Scuola d'Infanzia	1970		X		X	2
77	D	Scuola Primaria	1960	X	X		X	3
78	D	Scuola d'Infanzia	1980	X	X	X	X	4
80	E	Scuola d'Infanzia	1980	X	X	X	X	4
				35	22	30	35	

Tabella 17. Elenco degli edifici che hanno subito 3 o 4 interventi tra cui la sostituzione degli impianti termici, dei serramenti e la coibentazione di un elemento di chiusura opaco

Codice	Zona Clima	Costo complessivo per unità di superficie calpestabile (iva inclusa) [€/m ²]	Costo Chiusure Verticali opache per unità di superficie di intervento [€/m ²]	Costo Chiusure Orizzontali opache per unità di superficie di intervento [€/m ²]	Costo Serramenti per unità di superficie di intervento [€/m ²]
1	C	552	111	82	651
7	E	236	101	100	572
8	E	56	-	124	506
12	C	55	64	-	460
15	C	140	63	249	377
17	C	197	-	68	545
18	C	573	65	-	445
19	C	289	92	-	376
20	D	48	39	-	6
21	C	47	-	60	69
22	C	227	-	73	437
26	C	547	178	45	393
27	C	455	83	81	447
29	C	518	52	40	451
33	E	185	-	42	1.305
37	E	801	84	46	614
38	E	214	-	51	512
45	C	805	373	-	613
46	D	194	-	-	443
50	D	101	-	80	446
51	D	423	-	44	314
52	D	445	78	64	722
53	D	600	-	32	378
57	C	119	58	30	412
58	C	414	-	67	763
60	D	719	-	229	1.456
61	D	787	-	484	1.416
62	D	1.015	-	96	574
69	D	464	46	-	485
71	D	321	149	-	140
73	D	194	-	140	439
74	D	335	90	-	483
76	D	219	76	-	589
77	D	256	462	31	285
78	D	251	77	-	755
80	E	538	117	98	539
VALORI MEDI		371	68	68	539

Tabella 18. Costi unitari per superfici

Nel complesso degli edifici sono stati effettuati, esclusi gli interventi d'installazione delle fonti rinnovabili, da 1 intervento a 5 interventi che corrispondono a:

- due interventi di natura impiantistica (rifacimento impianto di riscaldamento, rifacimento impianto di raffrescamento);
- tre interventi sull'involucro edilizio (isolamento delle chiusure verticali opache, orizzontali opache e sostituzione dei serramenti).

Come mostra la Tabella 19 in 35 edifici con 3 o 4 interventi su 5 totali, il risparmio energetico atteso è pari a circa 30%.

Risparmio energetico (senza FER) kWh	Consumi totali nel 2012 kWh anno	Risparmio energetico %
894.847,36	2.992.961,86	30%

Tabella 19. Sintesi dei risparmi energetici degli edifici oggetto di 3-4 interventi

5.2 Valutazioni su 57 edifici scolastici e 2 edifici di riferimento sulla base di simulazioni

Dato l'elevato numero di edifici da sottoporre a monitoraggio, per valutare la riduzione dichiarata dei consumi e, pertanto, la reale efficacia della riqualificazione energetica, in questa fase dello studio è stato sperimentato un processo metodologico basato sull'individuazione di classi omogenee e di edifici rappresentativi delle singole classi.

Sono state definite due classi di edifici¹⁸ con caratteristiche omogenee rispetto ai loro caratteri costruttivi ed energetici, nonché all'esito degli interventi di riqualificazione effettuati. Le due classi (o *cluster*) raggruppano rispettivamente 39 e 18 edifici con caratteristiche variabili secondo quanto riportato nella Tabella 20.

Variabili per determinare i cluster	Cluster 1 (39 edifici)		Cluster 2 (18 edifici)	
	Valori di appartenenza	Valori del centroide	Valori di appartenenza	Valori del centroide
Fattore di forma S/V [1/m]	0.29-0.74	0.46	0.51-0.91	0.75
Volume Riscaldato [m ³]	2682-41633	8535.77	685-4156	1906.00
Salto di classe energetica [num]	0-7	3.43	1-7	4.72
Costo a kWh risparmiato [€/kWh]	1.33-34.97	12.57	5.76-69.89	25.61
Consumi normalizzati [kWh/m ³ N]	7.82-49.79	25.26	6.97-58.56	24.59
Risparmi energetici attesi [kWh]	0.24-15.48	6.12	1.85-27.60	10.09

Tabella 20. Esiti della cluster analysis e variabili che hanno determinato le classi di edifici

¹⁸ Le classi di edifici sono state determinate sulla base dei seguenti parametri: volume lordo riscaldato, il rapporto di forma (rapporto tra la superficie disperdente e il volume netto riscaldato dell'edificio), i consumi di energia primaria *ex-ante* interventi di riqualificazione, i risparmi energetici dichiarati e il salto di classe energetica previsto in fase di progetto.

All'interno di ciascuna classe, sono stati poi individuati alcuni edifici rappresentativi del patrimonio considerato e degli interventi di riqualificazione. Sui due edifici di riferimento (n.2 e n.58) sono stati verificati i risparmi ottenuti attraverso la modellizzazione in regime dinamico¹⁹. I due edifici hanno caratteristiche costruttive diverse che ben rappresentano due tipologie edilizie e costruttive ricorrenti: l'edificio con struttura muraria e intelaiata in c.a. L'edificio n.2, infatti, è stato costruito nel 1930, ha un volume piuttosto compatto e una struttura massiva in muratura portante con poche superfici vetrate; l'edificio n. 58 è stato realizzato nel 1978, ha un volume più articolato e una struttura intelaiata in calcestruzzo armato, con una maggiore percentuale di superfici vetrate. Entrambi sono in buono stato.

La Tabella 21 riporta i dati di risparmio effettivamente ottenuti, confrontando i consumi termici *ex-ante*, dichiarati²⁰ ed *ex-post* reali, nonché gli esiti della modellizzazione sugli edifici di riferimento (*ante* e *post* interventi).

	Edifici di riferimento	(A) Consumi del 2012 [kWh anno] (<i>ex ante</i>)	(B) Consumi del 2016 ²¹ [kWh anno] (<i>ex post</i>)	(C) Consumi attesi da progetto [kWh anno] (<i>ex post</i>)	(D) Consumi secondo modellazione ²² [kWh anno]	(E) % Risparmio energetico effettivo
Cluster 1	Edificio n.2	75146,58	67530,65	52540,78	56933,00	10%
Cluster 2	Edificio n.58	96604,8	72.996,11	57491,6	61884,80	24%

Tabella 21. Verifica delle corrispondenze tra dati di risparmio di progetto, di simulazione e di realizzazione

La corrispondenza tra valori attesi (C) e calcolati (D), con uno scarto inferiore al 10%, conferma la sostanziale correttezza delle valutazioni in fase di progetto. Il modello è stato elaborato sulla base dei gradi giorno di legge. Se lo si dovesse aggiornare ai gradi giorno reali dell'anno 2016, i valori di consumo del modello per i due edifici rappresentativi dei cluster 1 e 2, si avvicinerebbero a quelli reali.

Per contro e sulla base del solo confronto tra i due anni 2012 (*ante*) e 2016 (*post*), il maggior scarto tra consumi attesi (C) e reali (B) mostra una previsione di progetto potenzialmente non corretta, quindi un risparmio effettivo pari al 10% (Edificio n. 2-Cluster 1) e 24% (Edificio n.58-Cluster 2) contro un risparmio atteso pari a circa il 30% (Cluster 1) e 40% (Cluster 2).

L'approfondimento della *cluster analysis* su un numero maggiore di dati consentirebbe, in futuro, di disporre di uno strumento utile a valutazioni *ex ante* più accurate.

5.3 Valutazioni su 10 edifici scolastici del comune di Roma con monitoraggio dei consumi

Con l'obiettivo di determinare uno stato dell'arte completo e validare anche il percorso metodologico e in particolare l'applicazione di metodi per la selezione di edifici di riferimento, sono stati raccolti i consumi post intervento dell'anno 2016 per il maggior numero possibile di edifici, tenendo presente che su tutti gli edifici gli interventi si sono conclusi a Dicembre 2015 e che l'anno di riferimento per i consumi *ex ante* è il 2012.

È stato possibile raccogliere dati relativi a 25 edifici sul territorio regionale. Tuttavia, poiché i dati comunicati dalle Amministrazioni locali erano talvolta incoerenti, si è scelto di approfondire un numero di

¹⁹ La simulazione è stata effettuata con *Design Builder*, motore di calcolo Energy Plus.

²⁰ Per consumi dichiarati s'intendono quelli presentati nella documentazione per il finanziamento del progetto senza che sia stato comunicato il metodo di calcolo e gli strumenti; mentre per consumi attesi quelli ottenuti dal calcolo della prestazione in regime dinamico.

²¹ Il dato di consumo è corretto in riferimento ai gradi giorno reali, tenuto conto che nella località dell'edificio n. 2 (Arce) con gradi giorno del 2012 pari a 2008, nel 2016 pari a 1780 e dell'edificio n. 58 (Ladispoli) con i gradi giorno del 2012 pari a 1866, nel 2016 pari a 1646.

²² Sulla base dei gradi giorni di riferimento come da DPR 412/93 e succ. mod. e int.

edifici più contenuto, pari a 10, corrispondente a edifici di edilizia scolastica che insistono tutti sul medesimo territorio: il comune di Roma.

L'elenco e il livello scolastico degli edifici presi in considerazione sono rappresentati dalla Tabella 22:

Anagrafica				
Comune	Localizzazione	Epoca costruttiva	Livello Scolastico	Numero di alunni
ROMA_1	Via. I. Artom, 41	1980	Scuola d'Infanzia	96
ROMA_2	Via dei Colli Portuensi, 473	1976	Asilo Nido	46
ROMA_3	Via Pescaglia	1969	Asilo Nido e Scuola d'Infanzia	93
ROMA_4	Via Camastra, 155	1980	Scuola Primaria	599
ROMA_5	Via Cutignano, 82	1969	Scuola Primaria	407
ROMA_6	Via Appiano, 15	1950-1970	Scuola Primaria e Secondaria	717
ROMA_7	Via Giuseppe Messina, 31	1980-1990*	Scuola Secondaria	123
ROMA_8	Via S. Gherardi	1979	Scuola Secondaria	268
ROMA_9	Via Niobe, 52	1970	Scuola Secondaria	271
ROMA_10	Via Lusitania, 16	1931-1932	Scuola d'Infanzia e Primaria	730

Tabella 22 . Edifici scolastici del comune di Roma riqualificati

Sulla base di quanto monitorato il risparmio medio effettivamente realizzato nel 2016 sul campione delle scuole romane è pari al 5,81% rispetto ai consumi del 2012 e dopo degli interventi di riqualificazione energetica (Tabella 23). I dati di consumi sono stati corretti in riferimento ai gradi giorno (pari a 1248 per l'anno 2016 e 1568 per l'anno 2012) ma non in riferimento ai profili di occupazione.

Comune	Elettrico 2012		Termico 2012		Elettrico 2016		Termico 2016		Totale kWh/Alunno 2016	% Resp. (termico)
	kWh/m²	kWh/m³	kWh/m²	kWh/m³	kWh/m²	kWh/m³	kWh/m²	kWh/m³		
ROMA_1	36,77	5,25	103,68	14,81	46,06	6,58	89,71	12,82	707,18	-
ROMA_2	35,45	11,00	60,20	18,68	31,01	9,62	35,23	10,93	864,08	26,5%
ROMA_3	20,36	5,67	24,10	6,71	11,74	3,27	18,21	5,07	329,81	5%
ROMA_4	n.d.	n.d.	27,10	8,47	24,71	7,72	18,18	5,68	395,99	15,7%
ROMA_5	14,61	4,25	29,39	8,55	14,01	4,08	22,49	6,54	375,78	3,8%
ROMA_6	20,39	5,66	36,68	10,17	16,63	4,61	27,15	7,53	301,68	7%
ROMA_7	18,59	5,42	26,86	7,83	18,47	5,38	21,39	6,24	1408,29	-
ROMA_8	5,56	1,65	32,80	9,76	9,15	2,72	27,38	8,14	838,70	-
ROMA_9	13,46	3,74	23,29	6,47	5,96	1,66	19,63	5,45	235,61	-
ROMA_10	2,54	0,73	36,55	10,44	7,48	2,14	29,39	8,40	505,04	-
	19 kWh/m² (Elettrico 2012)	5 kWh/m³ (Elettrico 2012)	40 kWh/m² (Termico 2012)	10 kWh/m³ (Termico 2012)	19 kWh/m² (Elettrico 2016)	5 kWh/m³ (Elettrico 2016)	31 kWh/m² (Termico 2016)	8 kWh/m³ (Termico 2016)	596	5,8%

Tabella 23. Indicatori ex ante ed ex post scuole romane

Confrontando 6 scuole, di cui si dispongono i dati dichiarati di risparmio energetico negli allegati progettuali, con i dati reali si ottiene che il risparmio medio dichiarato è pari al 24,31%, mentre quello reale è 12,56% (Tabella 24). La tabella mette in evidenza inoltre che, per alcune scuole, i dati di consumo *ex post*, tenuto conto del diverso profilo climatico dell'anno 2016 (320 gradi giorno in meno rispetto all'anno 2012), non hanno mostrato nessun risparmio energetico, ossia i dati di consumo termico dell'anno 2016 sono pari, se non addirittura superiori ai dati dell'anno 2012.

Comune	Risparmio Elettrico e Termico da progetto [kWh/a]	% risparmio dichiarato	Risparmio Elettrico e Termico realmente ottenuto [kWh/a]	% risparmio reale
ROMA_1	14.278	20,33%	nessun risparmio	nessun risparmio
ROMA_2	21.267	37,06%	12.217	21,29%
ROMA_3	7.824	17,18%	10.077	22,13%
ROMA_4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
ROMA_5	25.783	13,98%	7.277	3,95%
ROMA_6	n.d.	n.d.	31.236	11,08%
ROMA_7	n.d.	n.d.	474	0,24%
ROMA_8	34.852	14,77%	nessun risparmio	nessun risparmio
ROMA_9	39.000	42,53%	15.289	16,67%
ROMA_10	n.d.	n.d.	nessun risparmio	nessun risparmio
VALORI MEDI		24,3%		12,6%

Tabella 24. Risparmi di progetto (dichiarati) e ottenuti (reali) sulla base del monitoraggio dei consumi

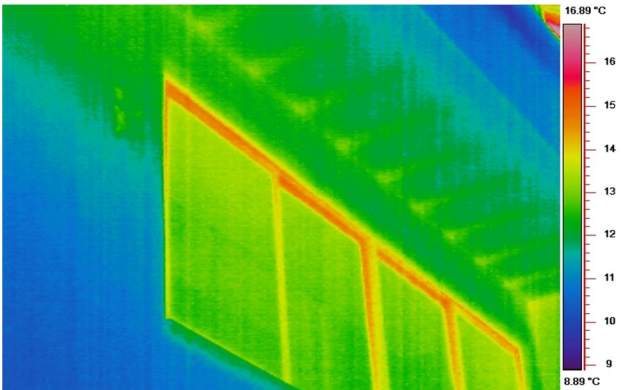
5.4 Valutazioni su 7 edifici scolastici sulla base di indagini sul campo

Per controllare la qualità tecnologica e materica degli interventi si è fatto ricorso a indagini termografiche su sette edifici scelti come rappresentativi. Gli interventi consistono, per la maggior parte, in opere realizzate secondo le pratiche comuni, certamente non le migliori e con materiali con scarse qualità ambientali. In particolare, sono stati realizzati interventi di:

- isolamento a cappotto delle chiusure verticali con spessori di isolamento da 6-10 cm e isolante in poliuretano o polistirene;
- isolamento all'estradosso delle coperture con spessori di isolamento da 6-10 cm e isolante in poliuretano o polistirene;
- sostituzione dei serramenti esistenti con nuovi serramenti in vetrocamera con vetro basso-emissivo e di sicurezza, telaio in alluminio a taglio termico.

La valutazione dei difetti è stata ricondotta alle categorie di danno che rappresentano in forma quasi esaustiva i possibili difetti di un involucro edilizio su un edificio esistente [41]. La Figura 19 illustra il caso di un edificio scolastico a Canale Monterano (edificio n. 43), oggetto di tre interventi sull'involucro (isolamento delle chiusure orizzontali e verticali e sostituzione dei serramenti). Sono indicativi i gradienti termici tra i nodi di connessione degli elementi costruttivi, tra serramenti e tamponatura che dimostrano, in linea generale, un'attitudine, sia progettuale sia realizzativa, a non concertare gli interventi sull'involucro edilizio. La mancata considerazione delle connessioni tra le componenti costruite determina, per la maggior parte, difetti dovuti a un isolamento non uniforme. Questo tipo di difetti è stato riscontrato in tutti i sette edifici indagati che rappresentano il 10% della totalità degli interventi.

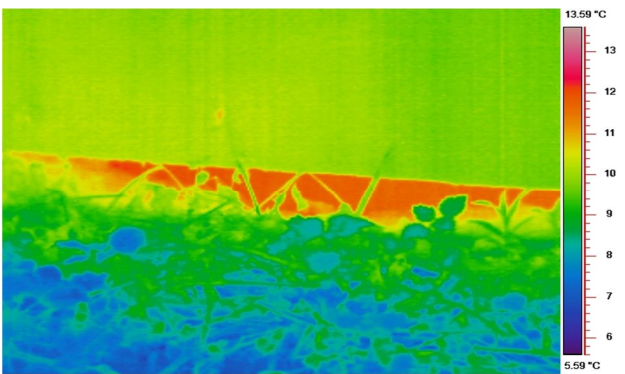
Si riporta un estratto delle indagini e delle criticità rilevate in questa fase su 3 casi studio: edifici n. 72 (Santa Marinella), 61 (Roma) e 43 (Canale Monterano).



Edificio n. 72. Interventi sull'involucro: Sostituzione dei Serramenti.

Criticità rilevate: gradienti termici rilevanti in corrispondenza delle strutture portanti orizzontali; disuniformità termica delle chiusure verticali opache; vetrate fredde. Evidenza del gradiente termico in corrispondenza dell'attacco a terra e nei volumi aggettanti in calcestruzzo armato.

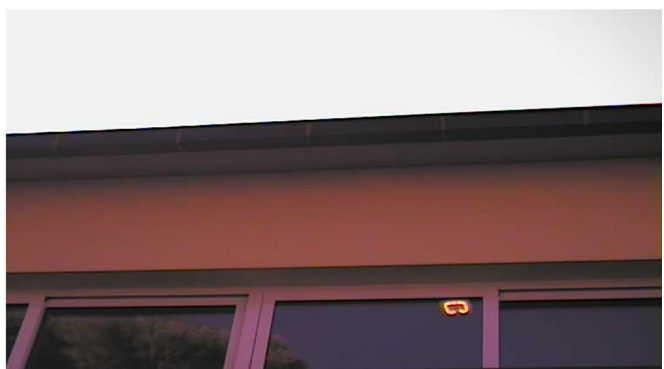
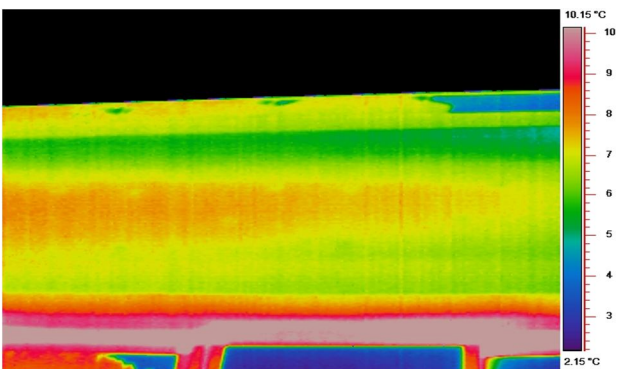
Figura 17. Analisi termografica - Edificio 72



Edificio n. 61. Interventi sull'involucro: Isolamento termico chiusure opache verticali, Sostituzione dei Serramenti.

Gradienti termici tra chiusure verticali opache e trasparenti molto ridotte, evidenza di gradiente termico rilevante nell'attacco a terra. Gradiente termico nel nodo di attacco tra le chiusure orizzontali e le chiusure verticali opache.

Figura 18. Analisi Termografica - Edificio 61



Edificio n. 43 Interventi sull'involucro: Isolamento termico chiusure opache verticali, Isolamento termico chiusure opache orizzontali, Sostituzione dei Serramenti.

Gradienti termici rilevanti dei telai dei serramenti esterni e nell'attacco a terra. Gradienti termici rilevanti nei nodi di attacco tra serramenti esterni e chiusure verticali opache.

Figura 19. Analisi Termografica - Edificio 43

5.5 Definizione di indicatori di riferimento per la valutazione in termini di costi/benefici

Come illustrato nei paragrafi precedenti, il processo metodologico ha portato a elaborare molteplici indicatori, basati sui dati analizzati e validati attraverso simulazioni e monitoraggi dei consumi di edifici rappresentativi, individuati tramite la *cluster analysis*. Per rendere omogenee le valutazioni compiute, stante i dati corrispondenti a un numero variabile di casi di studio, si è ritenuto di articolare gli indicatori facendo riferimento a più classi di intervento e di edifici:

- edifici con riqualificazione energetica da 'leggera' a 'pesante' (numero di interventi da 1 a 6)²³;
- edifici con riqualificazione energetica 'leggera' (numero di interventi da 1 a 2)²⁴;
- edifici con riqualificazione energetica 'medio-pesante' (numero di interventi da 3 a 4)²⁵;
- edifici con riqualificazione energetica 'medio-pesante' qualitativa (numero di interventi da 3 a 4 che includono il rinnovamento dell'impianto termico, la coibentazione delle chiusure opache e la sostituzione dei serramenti)²⁶;
- edifici con riqualificazione energetica 'pesante' (numero di interventi da 5 a 6)²⁷;
- edifici con riqualificazione energetica in zona climatica D, territorio della città di Roma²⁸.

Per ciascuna classe si propongono i seguenti indicatori:

- Risparmio energetico medio [%]
- Costo per kWh risparmiato [€/kWh]
- Energia risparmiata per unità di superficie [kWh/m²a].

Questi indicatori possono costituire un possibile insieme di *benchmark* per definire un quadro di riferimento per prestazioni energetiche e di costo, minime e massime, attese in interventi assimilabili a quelli analizzati.

Edifici con riqualificazione energetica da 'leggera' a 'pesante' (numero di interventi da 1 a 6)

In termini di costi il risparmio medio **dichiarato**, è pari al 18,64%, per un costo di efficientamento medio pari a 7,47 euro a kWh risparmiato.

Risparmio energetico medio [%]	Costo per kWh risparmiato [€/kWh]	Energia risparmiata per unità di superficie [kWh/m ² a]
18,64	7,47	25,56

Tabella 25. Indicatori di risparmio e costo - riqualificazione da 'leggera a pesante'

Edifici con riqualificazione energetica 'leggera' (numero di interventi da 1 a 2)

In termini di costi il risparmio medio **dichiarato**, è pari al 21,26%, per un costo di efficientamento medio pari a 5,19 euro a kWh risparmiato.

Risparmio energetico medio [%]	Costo per kWh risparmiato [€/kWh]	Energia risparmiata per unità di superficie [kWh/m ² a]

²³ Il campione è di 64 scuole.

²⁴ Il campione è di 3 scuole.

²⁵ Il campione è di 42 scuole.

²⁶ Il campione è di 35 scuole.

²⁷ Il campione è di 19 scuole.

²⁸ Il campione è di 10 scuole.

17,98 | 5,19 | 21,26

Tabella 26. Indicatori di risparmio e costo - riqualificazione 'leggera'

Edifici con riqualificazione energetica 'medio-pesante' (numero di interventi da 3 a 4)

In termini di costi il risparmio medio **dichiarato**, è pari al 31,2%, per un costo di efficientamento medio pari a 13,53 euro a kWh risparmiato.

Risparmio energetico medio [%]	Costo per kWh risparmiato [€/kWh]	Energia risparmiata per unità di superficie [kWh/m ² a]
31,2	13,53	23,17

Tabella 27. Indicatori di risparmio e costo riqualificazione 'medio-pesante'

Edifici con riqualificazione energetica 'medio-pesante' qualitativa (numero di interventi da 3 a 4 che includono il rinnovamento dell'impianto termico, la coibentazione delle chiusure opache e la sostituzione dei serramenti)

In termini di costi il risparmio medio **dichiarato**, è pari al 29,9%, per un costo di efficientamento medio pari a 10,5 euro a kWh risparmiato.

Risparmio energetico medio [%]	Costo per kWh risparmiato [€/kWh]	Energia risparmiata per unità di superficie [kWh/m ² a]
29,90	10,50	23,57

Tabella 28. Indicatori di risparmio e costo riqualificazione 'medio-pesante' qualitativa

Edifici con riqualificazione energetica 'pesante' (numero di interventi da 5 a 6)

In termini di costi il risparmio medio **dichiarato**, è pari al 27,52%, per un costo di efficientamento medio pari a 6,14 euro a kWh risparmiato.

Risparmio energetico medio [%]	Costo per kWh risparmiato [€/kWh]	Energia risparmiata per unità di superficie [kWh/m ² a]
37,52	10,98	30,5

Tabella 29. Indicatori di risparmio e costo riqualificazione 'pesante'

Edifici con riqualificazione energetica in zona climatica D, territorio della città di Roma

In termini di costi il risparmio medio **realmente ottenuto**, è pari al 12,6%, per un costo di efficientamento medio pari a 32,05 euro a kWh risparmiato.

Risparmio energetico medio [%]	Costo per kWh risparmiato [€/kWh]	Energia risparmiata per unità di superficie [kWh/m ² a]
12,6	32,05	8,88

Tabella 30. Indicatori di risparmio e costo riqualificazione zona climatica D, territorio della città di Roma

6 Conclusioni

In questo rapporto è illustrato un percorso metodologico di analisi e valutazione di un campione di 77 edifici scolastici, oggetto d'interventi di riqualificazione energetica, finanziati dalla Regione Lazio nell'ambito del bando "Energia Sostenibile" (POR-FESR 2007-2013) e tutti realizzati nel 2015. Gli obiettivi perseguiti dalla ricerca corrispondono all'esigenza sempre più frequente di stabilire prassi di *Commissioning*, ossia di un insieme di procedure e metodi per monitorare le scelte progettuali - dalla fase di *pre-design* fino all'occupazione dell'edificio - affinché il funzionamento finale del sistema edificio-impianto corrisponda alla qualità attesa dai progettisti, dai committenti e dagli utenti.

La disponibilità della documentazione iniziale, riguardante la richiesta del finanziamento e i progetti esecutivi, ha permesso di costruire un'articolata base dati e un sistema d'informazioni basato su valutazioni e indicatori delle prestazioni energetiche *ante* e *post* interventi, desunti anche dal confronto con la letteratura scientifica (Fase 1). Le attività di monitoraggio e simulazione hanno portato a valutazioni puntuali su un campione iniziale di 77 edifici, che è stato descritto nelle sue caratteristiche ambientali, tipologico-funzionali, d'intervento e costi sostenuti per la loro riqualificazione in un sistema informativo georeferenziato (Fase 2). Con la base dati degli edifici scolastici sono state compiute elaborazioni, sia per valutare la reale efficacia degli interventi finanziati, sia per individuare indicatori utili a definire *benchmark* sui consumi e risparmi energetici conseguibili (Fase 3).

A seguito delle attività di analisi e monitoraggio degli interventi realizzati, si riportano alcune osservazioni conclusive:

- il campione è composto da edifici costruiti prevalentemente tra il 1961 e il 1991, collocati nelle zone climatiche C, D ed E;
- gli interventi realizzati sono classificabili in tre (3) classi e sette (7) tipologie così distribuiti:
 - il 49% sull'involucro edilizio (sostituzione dei serramenti, isolamento termico delle chiusure opache verticali, isolamento termico delle chiusure opache orizzontali);
 - il 21% sugli impianti (riqualificazione dell'impianto di riscaldamento e di raffrescamento);
 - il 30% sulle fonti rinnovabili (installazione solare termico, installazione solare fotovoltaico).
- la riqualificazione dell'involucro ha inciso per il 65% dei costi, mentre il 17% è stato destinato agli impianti e il 18% alle fonti energetiche rinnovabili;
- le superfici dell'involucro opaco rappresentano oltre l'80% delle superfici riqualificate con un importante impatto in termini di quantità di materiali impiegati;
- il costo medio della riqualificazione per superficie calpestabile (incluse le opere impiantistiche e l'installazione delle fonti rinnovabili) è inferiore ai 500 €/m²;
- sulla base del monitoraggio dei consumi 2016 riferiti a un campione ristretto, il risparmio medio effettivamente realizzato è pari al 12,6% rispetto ai consumi del 2012 e dopo gli interventi di riqualificazione energetica;
- in termini di risparmio medio possibile, la simulazione con modellazione dinamica sugli edifici rappresentativi dei *cluster* individuati si discosta poco dalle prestazioni energetiche attese; mentre il monitoraggio con i dati rilevati mostra uno scostamento maggiore tra il risparmio effettivo, calcolato rispetto ai consumi del 2016, e il risparmio previsto dal progetto. Quest'ultimo dato, anche se riferito a un campione ristretto di edifici, conferma un possibile divario tra prestazioni energetiche attese e reali che, tuttavia, dovrà essere verificato ampliando il campione degli edifici;
- in termini di qualità delle realizzazioni, con le indagini sul campo, sono stati riscontrati difetti ricorrenti e corrispondenti, in particolare, alla mancata realizzazione delle connessioni tra gli elementi isolati termicamente e gli altri elementi costruttivi degli edifici, con evidenti gradienti termici tra gli elementi stessi;

- 74 edifici su 77 sono stati oggetto di almeno un intervento sull'involucro, ma solamente per due sono stati utilizzati materiali a basso impatto ambientale e/o con etichettature di prodotto ISO 14000. Poiché il ricorso a materiali con valenza ambientale è pressoché nulla, la riduzione delle emissioni di CO₂ è stata affidata solo al risparmio energetico ottenuto e a nessuna scelta materica, come prescrivono oggi gli attuali Criteri Ambientali Minimi (CAM)²⁹.

Analizzati gli interventi finanziati, la ricerca ha individuato alcuni possibili indicatori per definire *benchmark* su consumi e risparmi energetici conseguibili in future riqualificazioni energetiche. Il 'cruscotto' degli indicatori per il *benchmarking* dei progetti potrebbe essere costituito da:

- Risparmio energetico medio [%];
- Costo per kWh risparmiato [€/kWh];
- Energia risparmiata per unità di superficie [kWh/m²a].

Per ciascun indicatore del 'cruscotto' sono stati individuati valori riferibili a più classi di intervento (da riqualificazione leggera a pesante) e in funzione del loro numero (da 1 a 6).

Accanto agli indicatori per il *benchmarking* degli interventi, il processo di *commissioning* dovrebbe poi essere sviluppato considerando:

- l'uso preferenziale di materiali dalla riconosciuta qualità ambientale e, se possibile, con etichettature di prodotto dei materiali impiegati;
- l'adempimento delle prescrizioni minime contenute nei Criteri Ambientali Minimi;
- le verifiche e monitoraggio delle opere eseguite.

In conclusione, sebbene le elaborazioni siano state compiute su diversi campioni di edifici e per un arco temporale limitato, il processo di monitoraggio e valutazione sperimentato sui casi di studio ha permesso di organizzare un sistema informativo articolato e un quadro organico di prestazioni ambientali ed energetiche che possono costituire un riferimento per il patrimonio scolastico della Regione Lazio.

²⁹ DM 11 gennaio 2017 (G.U. Serie Generale n. 23 del 28 gennaio 2017).

7 Riferimenti bibliografici

- [1] CAM. Criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici per la gestione dei cantieri della pubblica amministrazione. Adottati con Decreto Ministeriale 11 gennaio 2017 (G.U. Serie Generale n. 23 del 28 gennaio 2017) e Criteri ambientali minimi serramenti esterni. Adottati con DM 25 luglio 2011 (G.U. n. 220 del 21 settembre 2011).
- [2] MISE. Ministero per lo Sviluppo Economico. http://dgsaie.mise.gov.it/sen/Strategia_Energetica_Nazionale_2017_-_documento_di_consultazione.pdf [ultima consultazione il 10.09.2017].
- [3] MATTM. Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare. <http://www.minambiente.it/pagina/la-strategia-nazionale-lo-sviluppo-sostenibile> [ultima consultazione il 10.09.2017].
- [4] Fasano, G. (a cura di) *L'efficienza energetica nel settore civile*, Quaderno Enea, 2011.
- [5] Sekki, T.; Airaksinen, M.; Saari A. "Effect of energy measures on the values of energy efficiency indicators in Finnish daycare and school buildings", *Energy and Buildings*, Volume 139, 2017, pp. 124–132.
- [6] Najib, M.; Salleh, M.; Zin Kandar, M.; Siti Rasidah, S.; "Benchmarking for Energy Efficiency on School Buildings Design: A Review Procedia", *Social and Behavioral Sciences*, Volume 222, 23 June 2016, pp. 211-218.
- [7] Raatikainen, M.; Skön, J.P.; Leiviskä, k.; Kolehmainen, M. "Intelligent analysis of energy consumption in school buildings", *Applied Energy*, Volume 165, 1 March 2016, pp. 416-429.
- [8] Pereira, L.D.; Raimondo, D.; Corgnati, S.P.; Gameiro da Silva, M. "Energy consumption in schools - A review paper", in *Renewable and Sustainable Energy Review* n.40, pp. 911-922.
- [9] CRESME Ricerche, RIUSO03: *Ristrutturazione edilizia riqualificazione energetica rigenerazione urbana – estratto della ricerca CRESME*, CRESME, 2014, 1–55. (Italian text). [http://www.awn.it/component/attachments/download/65\[3\]](http://www.awn.it/component/attachments/download/65[3]) European Union.
- [10] Katafygiotou, M.C.; Serghides, D.K.; "Analysis of structural elements and energy consumption of schoolbuilding stock in Cyprus: Energy simulations and upgrade scenarios of a typical school." *Energy and Buildings* 72, 2014, pp. 8–16.
- [11] Beusker, E.; Stoy, C.; Pollalis, S.N.; "Estimation model and benchmarks for heating energy consumption of schools and sport facilities in Germany", *Building and Environment* 49, 2012, pp. 324-335.
- [12] Dascalaki, E.G.; Sermpetzoglou, V.G. "Energy performance and indoor environmental quality in Hellenic schools", *Energy and Buildings* 43, 2011, pp. 718–727.
- [13] Hernandez, P.; Burk, K.; Lewis, J. O.; "Development of energy performance benchmarks and building energy ratings for non-domestic buildings: An example for Irish primary schools", *Energy and Buildings* 40, 2008, pp. 249–254.
- [14] MIUR. Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca. "Presentazione dell'Anagrafe edilizia scolastica" del 7 Agosto 2015. <http://www.istruzione.it/ediliziascolastica/anagrafe.shtml> [ultima consultazione in data 12 Aprile 2017].
- [15] European Commission. Directorate-General for Research, Industrial Technologies Unit G2, *Energy Efficient Building PPP. Multi-annual roadmap and longer term strategy*, 2010, Prepared by the Ad-hoc Industrial Advisory Group, Publications Office of the European Union, Belgio.
- [16] Moneta, R.; Terrinoni, L.; "Il potenziale di risparmio nel settore edifici" in *Rapporto Annuale Efficienza Energetica*, 2016 pp. 103.
- [17] Baldazzi, S.; Beltrone, E.; D'Alessandris, P.; Mostacci, A.; Mura, A.; Napoleoni, D.; Pasquino, F.;

Santangelo, A.; Stemperini, A.; Toso, F. *Rapporto sulla raccolta dati per la determinazione e caratterizzazione delle tipologie di impianto per il condizionamento invernale ed estivo negli edifici destinati a scuole ed uffici*, Report RdS/2013/141.

[18] Desideri, U.; Proietti, S. "Analysis of energy consumption in the high schools of a province in central Italy", *Energy Build.* 34, 2002, pp. 1003–1016.

[19] Dall'O, G. e Sarto, L. "Potential and limits to improve energy efficiency in space heating in existing school buildings in northern Italy", *Energy Build.* 67, 2013, pp. 298–308.

[20] Corgnati, S.P.; Corrado, V.; Filippi, M. "A method for heating consumption assessment in existing buildings: A field survey concerning 120 Italian schools", *Energy Build.* 40, 2008, pp. 801–809.

[21] Pocero, L.; Amaxilatis, D.; Mylonas, G.; Chatziannakis, I. "Open Source IoT Meter Devices for Smart and Energy-Efficient School Buildings" *Hardware X*, In Volume 1, April 2017, pp. 54-67.

[22] Zinzi, M.; Battistini, G.; Ragazzini, V. "Energy and Environmental Monitoring of a School Building Deep Energy Renovation in Italy", *Energy Procedia*, Volume 78, November 2015, pp. 3318-3323.

[23] Demanuele, C.; Tweddell, T.; Davies, M.; "Bridging the gap between predicted and actual energy performance in schools", *World Renewable Energy Congress XI*, 2010.

[24] Bianchi, F.; Altomonte, M.; Cannata, M.E.; Fasano, G. *Definizione degli indici e livelli di fabbisogno dei vari centri di consumo energetico degli edifici adibiti a scuole – consumi energetici delle scuole primarie e secondarie*. Report RSE/2009/119.

[25] Hewitt E.L.; Clinton, J.A.; Senick, J.A.; Wener, R.E.; Krogmann, U.; Sorensen Allacci, M. "Distinguishing between green building occupants' reasoned and unplanned behaviours", *Building Research & Information*, 44:2, 2016, pp. 119-134.

[26] Cole, R. J. "Green buildings and their occupants: a measure of success, *Building Research & Information*", *Building Research & Information*, n. 38:5, 2010, pp. 589-592.

[27] Leder, S.; Newsham, G.R.; Veitch, J.A.; Mancini, S. & Charles K.E. "Effects of office environment on employee satisfaction: a new analysis" *Building Research & Information* 44:1, 2016, 34-50

[28] Candido, C.; Kim, J.; de Dear, R.; Thomas, L. "BOSSA: a multidimensional post-occupancy evaluation tool" in *Building Research & Information* n.44:2, 2016, pp. 214-228.

[29] Kirk Hamilton, D.; Watkins, D.G. *Evidence Based Design for Multiple building types*, John Wiley & Sons, Inc, New Jersey, 2009.

[30] Thewes, A.; Maas, S.; Scholzen, F.; Waldmann, D.; Zürbes, "A. Field study on the energy consumption of school buildings in Luxembourg", *Energy Build.* 68, 2014, pp. 460–470.

[31] Calabresi, R.; *Le buone pratiche di efficienza energetica nelle scuole*, 2014 su www.kyotoclub.org/progetti/pratiche-di-sostenibilita [ultima consultazione il 20 settembre 2017].

[32] Pagliano, L.; Pietrobon, M.; Zangheri P.; *Indici di benchmark di consumo per tipologie di edificio ad uso scolastico. Applicabilità di tecnologie innovative nei diversi climi italiani*. Report RdS/2010/192.

[33] Citterio, M.; Fasano, G. *Indagine sui consumi degli edifici pubblici (direzionale e scuole) e potenzialità degli interventi di efficienza energetica*. Report RSE/2009/165.

[34] Borgarello, M.; Carrara, F. *L'efficienza energetica nei consumi elettrici delle abitazioni*, 2013 http://energia.Regione.emilia-romagna.it/entra-in-Regione/documenti-e-pubblicazioni/eventi/2014/13-novembre/BorgarelloRSEAnalisi.pdf/at_download/file/Borgarello%20-%20RSE%20-%20Analisi.pdf [ultima consultazione il 15 settembre 2017].

[35] MATTM, MIUR ed Enea. *Guida all'efficienza energetica negli edifici scolastici*. <http://www.agenziaefficienzaenergetica.it/scuolesostenibili> [ultima consultazione il 16 settembre 2017].

[36] Enea e FIRE. *Guida per il contenimento della spesa energetica nelle scuole* [ultima consultazione il 16 settembre 2017].

[37] USR 2014 Ufficio Scolastico Regionale, *I dati del sistema scolastico nel Lazio. Anno Scolastico 2014-2015*, Ottobre 2014.

[38] Arambula Lara, R.; Pernigotto, G.; Cappelletti, F.; Romagnoni, P.; Gasparella, A.; "Energy audit of schools by means of cluster analysis. *Energy Build* 2015, 95, pp. 160-171.

[39] Gaitani, N.; Lehmann, C.; Santamouris, M.; Mihalakakou, G.; Patargias, P.; "Using principal component and cluster analysis in the heating evaluation of the school building sector" *Appl Energy* 2010; 87, pp. 2079-2086.

[40] Santamouris M, Mihalakakou G, Patargias P, Gaitani N, Sfakianaki K, Papaglastra M, et al. Using intelligent clustering techniques to classify the energy performance of school buildings. *Energy Build* 2007; 39, pp. 45- 51.

[41] Lanzoni, D. "Il quadro normativo nel settore della termografia" in *neo-Eubios* n.36, Giugno 2011.

Nota bibliografica.

Nell'ambito del POR FESR 2007-2013 sono stati acquisiti i dati relativi a 155 interventi di efficientamento energetico, di cui 77 riguardanti le scuole della Regione Lazio. Il *data base* e gli indicatori forniti provengono dall'elaborazione di dati provenienti dai dati disponibili in riferimento alla Call for Proposal "Energia Sostenibile" del Programma Operativo Regionale FESR 2007-2013 Asse II Attività 1 – Efficienza energetica ed energia da fonti rinnovabili, in particolare da:

- a. *Dati elaborati dall' Ufficio Tecnico* della Direzione Regionale Infrastrutture e Politiche Abitative, Regione Lazio, RUP Ing. Wanda d'Ercole;
- b. elaborati tecnici dei *Progetti Esecutivi*, messi a disposizione dall' Ufficio Tecnico, Direzione Regionale Infrastrutture e Politiche Abitative, Regione Lazio, RUP Ing. Wanda d'Ercole;
- c. *allegati B*, messi a disposizione dall' Ufficio Tecnico, Direzione Regionale Infrastrutture e Politiche Abitative, Regione Lazio, RUP Ing. Wanda d'Ercole;
- d. dati resi disponibili dalla Direzione del Dipartimento Servizi Educativi e Scolastici Politiche della Famiglia, dell'Infanzia e Giovanili, Promozione dello Sporte e Qualità della Vita del Comune di Roma con prot. QM 46067 del 30 Settembre 2016;
- e. dagli Audit Energetici facenti parte della Documentazione allegata all'Autorizzazione a contrarre e approvazione degli allegati nn. 1, 2 e 3 messa a disposizione da Lazio Innova;
- f. dalle Visure Catastali facenti parte della Documentazione allegata all'Autorizzazione a contrarre e approvazione degli allegati nn. 1, 2 e 3 messa a disposizione da Lazio Innova.

Paola Marrone

Dopo la laurea in Architettura e alcune borse di studio (Ministero della Ricerca e della Pubblica Istruzione, Consiglio Nazionale delle Ricerche e Università Roma La Sapienza), ha conseguito il titolo di dottore di ricerca in Tecnologie dell'Architettura nel 1993.

Dal 1995 svolge attività didattica e di ricerca presso il Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi Roma Tre, dove attualmente riveste il ruolo di Professore Ordinario. È titolare del Laboratorio di Costruzione dell'Architettura nella Laurea Triennale in Scienze dell'Architettura e del Modulo di Tecnologia dell'Architettura nella Laurea Magistrale in Progettazione Architettonica.

È stato Direttore vicario del Dipartimento di Progettazione e studio dell'architettura (2009-12); Membro della Commissione Didattica della Facoltà di Architettura (2010-16), del Consiglio scientifico del Sistema Bibliotecario d'Ateneo-Commissione periodici e risorse elettroniche dell'Università Roma Tre (2010-15). Dal 2010 è membro del Consiglio Scientifico della Biblioteca delle Arti dell'Università Roma Tre.

Ha diretto e coordinato Master e corsi di perfezionamento (2006-10).

Dal 2014 al 2017 è stato Delegato del Rettore per la Sostenibilità ambientale.

Nel campo della Tecnologia dell'architettura si occupa di sostenibilità ambientale e riqualificazione energetica degli edifici; innovazione tecnologica; informazione e conoscenza per il sistema della costruzione.

La riqualificazione energetica degli edifici e la sostenibilità ambientale, in particolare, sono state oggetto di ricerche e pubblicazioni. Nell'ambito della ricerca "Smart Environments. Valorizzazione della ricerca e crescita del territorio negli ambienti intelligenti"(Fin. Regione Lazio- Assessorato Formazione, Ricerca, Scuola e Università, coord. prof. Stefano Panzieri), ha coordinato il Task Energia affrontando i temi della rigenerazione urbana e della riqualificazione edilizia come fattori strategici di sviluppo per le imprese del territorio regionale.

Le ricerche e gli studi sono documentati da pubblicazioni e partecipazioni a convegni internazionali, (oltre 80 pubblicazioni di cui 7 libri e numerosi contributi in volume, capitoli o atti di convegno).

Laura Calcagnini

Laureata in Architettura presso la Sapienza Università di Roma nel 2003, consegue il Master in "Progettazione Ambientale" (2005) e il Dottorato in "Energetica" (2008) nello stesso Ateneo. Assegnista di Ricerca presso Sapienza Università di Roma (2009-2014) e dal 2016 presso l'Università degli Studi Roma Tre. Fin dall'inizio si dedica allo studio nell'ambito della Tecnologia dell'Architettura delle tematiche dell'Energia e dell'Ambiente.

Ha partecipato a ricerche promosse da enti privati, pubblici nazionali (Ministero dell'Istruzione dell'Università e della Ricerca) e internazionali (Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement). È stata visiting scholar presso il Rensselaer Polytechnic Institute di Troy, Albany (USA).

Dal 2017 è docente a contratto (ICAR/12) presso l'Università degli Studi Roma Tre.

Pubblica contributi scientifici con ambiti di interessi volti alla riduzione dell'impatto ambientale materiali da costruzione e agli strumenti metodologici per la progettazione energeticamente consapevole. Nell'attività di ricerca (da assegnista e da incaricata), nell'attività didattica (individuale e di supporto) e nelle conseguenti pubblicazioni, il tema dell'ambiente e dell'energia è portato avanti con costanza e applicato all'interno della disciplina della tecnologia dell'architettura e della progettazione ambientale.

Abilitata alla professione di Architetto e iscritta all'Ordine degli Architetti P.P.C. di Roma e Provincia (2004), svolge attività professionale principalmente per consulenze e redazione di auditing e diagnosi energetiche sul patrimonio edilizio esistente, occupandosi in prevalenza della valutazione degli interventi di *retrofitting*.