

Improving energy efficiency in existing school building: the case study of Lecco

Laura Elisabetta Malighetti*, Graziano Salvalai

Highlights

The paper analyse a school buildings stock of Lecco Municipality defining a methodology for cost-benefit analysis for different renovation scenarios. The method represent replicable guidelines useful to the Public Administration in terms of financial planning and intervention priority. The analysis estimated an overall cost for the building stock renovation equal to € 62.971.530,0 with an investment per student equal to € 5.060,0.

Abstract

Existing school buildings energy retrofit is one of the most sensitive current issues concerning the Italian public property. The presented research analyse 38 school buildings of Lecco Municipality with different educational level, age of construction and typological design. The methodology developed allows dividing the sampled schools in homogeneous clusters, each one represented by a reference building, used as base case for cost/benefit analysis. The present work investigates optimal energy retrofit strategies to be implemented from both an economic and an energy efficiency point of view.

Keywords

School building stock analysis, Energy efficiency, Retrofitting planning

1. INTRODUCTION

The EU and national energy efficiency strategies recognize the built environment sector as one of the most promising sector in order to reach the CO₂ emission reduction target. This issue is particularly current in Italy where the largest portion of the building stock was built between 1950 and 1980, with technology that did not take into account energy efficient measures. In this scenario the 48.275 educational building, holding about 8 million students (15% of the Italian population) [1] do not represent an exception with more than 65% of schools built before the 1973, so before the entry into force of the Laws 373/1976 [2] and 64/1974 [3]. The energy efficiency of the Italian school buildings is low with an estimated energy use for heating between 110 and 130 kWh/m²a with a mean electricity use equal to 50 kWh/m²a. More than 90% of

Laura Elisabetta Malighetti

DABC - Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito, Politecnico di Milano, Piazza Leonardo da Vinci 32, Milano, 20131, Italia

Graziano Salvalai

DABC - Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito, Politecnico di Milano, Piazza Leonardo da Vinci 32, Milano, 20131, Italia

* Corresponding author
e-mail: laura.malighetti@polimi.it

the building has been erected, in fact, before the Law 10/91 [4]. Moreover, the international standard, in terms of energy efficiency in buildings [5], state the need to define strategies able to reach the Zero Energy Building target [6,7] for new construction and deep renovated. In this respect, the school building would represent an instance of successful sustainable architecture and would stand as a prime example of how the dual goal of preserving our cultural heritage, while promoting sustainable architecture, can be achieved [8]. The presented work deal with an actual issue analysed in several international studies as a following demonstrate. Last year, in Austria the work of Stocker et al. [9] proposed a study about heating energy performance focusing on 8 different primary schools affected by particular climate conditions. The aim of their work regards cost-optimal building performance: they show that the best scenario is between a heating energy demand of 50 to 60 kWh/m² reach with different renovation strategies depending on building age and technology construction. Similarly, Santamouris et al. [10] carried out energy audits on 238 Greek schools, characterized by an annual average total energy consumption amounting to 93 kWh/m² anno. They prove that it is possible easily reduce the energy consumption by 20% with various energy-conservation strategies. The study of Trachte and De Herde [11], starting from the consideration that a lack of comfort has negative consequences on pupils' concentration and learning, shows different energy efficient strategies for non-residential building. In addition, Dimoudi and Kosterala [12] focused on potential energy saving of school buildings in the climatic zone of Greece. They demonstrated, through simulation studies, that it is possible to reduce the heating consumption of about 30% improving the insulation level. Sesana et al. developed and test a Methodology for Energy Efficient Building Refurbishment (MEEBR) on two case studies [13] proposing different technological solution for historical buildings. Another study was carried out by Desideri and Proietti [14] in order to calculate the energy consumption and the possible intervention to save energy in a school building stock located in Perugia, central Italy. The theme of improvement of energy performance in school building is assessed also by Dall' O' and Sarto [15]; starting from a study on 49 schools building located in the Lombardy region of Italy, they analysed cost-effectiveness building performance based on different energy retrofit scenarios. Their studies show that the excessive improvement of heating energy performance is not always the best economically advantageous solution. The energy renovation measure for existing building has been investigate also by Masera et al. [16] showing a set of innovative technologies for inner and outer envelope renovation. Arambula et al. [17], with the aim of exploring a clustering method applied

1. INTRODUZIONE

Le strategie europee e nazionali, in termini di efficienza energetica, riconoscono il settore delle costruzioni come strategico per il raggiungimento dell'obiettivo programmato di riduzione delle emissioni di CO₂. Questo problema è particolarmente attuale in Italia dove la maggior parte degli edifici è stata costruito tra il 1950 e il 1980, con tecnologie oramai obsolete. In questo scenario, i 48.275 edifici scolastici italiani, che fanno da collettore per 8 milioni di studenti (15% della popolazione italiana) [1], non rappresentano l'eccezione, con circa il 65% degli edifici costruiti prima del 1973, precedentemente all'entrata in vigore della Legge 373/1976 [2] e 64/1974 [3]. L'efficienza energetica degli edifici scolastici italiani è scarsa, con un utilizzo stimato di energia per il riscaldamento compreso tra 110 e 130 kWh/m²a di cui 50 kWh/m²a relativi ad usi elettrici. Più del 90% degli edifici sono stati costruiti, infatti, prima della Legge 10/91 [4]. Gli standard internazionali, in termini di efficienza energetica degli edifici [5], ribadiscono la necessità di costruire edifici a zero energia [6,7] sia per le nuove costruzioni che per le ristrutturazioni. A questo proposito, gli edifici scolastici non fanno eccezione e possono rappresentare casi studio replicabili con il duplice obiettivo di preservare il patrimonio culturale e promuovere l'architettura sostenibile [8]. Il presente lavoro affronta una problematica attuale, analizzata anche in diversi studi internazionali, così come dimostrato dalla seguente letteratura. Stocker e altri [9] ha pubblicato uno studio sulle prestazioni energetiche per il riscaldamento analizzando 8 scuole primarie interessate da particolari condizioni climatiche. Il lavoro, attraverso lo studio delle migliori strategie costo-beneficio, ha mostrato come raggiungere valori di fabbisogno massimi compresi tra 50 e 60 kWh/m² per il riscaldamento invernale con diverse strategie di intervento a seconda dell'età dell'edificio e della tecnologia costruttiva. Allo stesso modo, Santamouris e altri [10] ha effettuato una serie di audit energetici in 238 scuole greche caratterizzate da un consumo medio annuo totale di energia pari a 93 kWh/m² anno. Lo studio ribadisce che è possibile ridurre facilmente il consumo energetico di almeno il 20% con l'applicazione di diverse strategie di riqualificazione. Lo studio di Trachte e De Herde [11], partendo dalla considerazione che una mancanza di comfort ha conseguenze negative sulla concentrazione e l'apprendimento degli alunni, ha evidenziato le diverse strategie di riqualificazione dell'involucro da adottare per l'edilizia non residenziale. Anche Dimoudi e Kosterala [12] hanno analizzato il potenziale risparmio energetico degli edifici scolastici sul territorio Greco. Essi hanno dimostrato, attraverso studi di simulazione, che è possibile ridurre il consumo per il riscaldamento di circa il 30% migliorando il solo livello di isolamento. Sesana e altri [13] ha sviluppato, testato e applicato una metodologia per la riqualificazione energetica (MEEBR)

to a sample of 60 school buildings in the province of Treviso, Italy. Similarly, Santamouris et al. [18], developing a clustering technique, selected 10 school buildings, which were representative of a sample of 320 schools in Greece. They analyse in detail the energy efficiency and the performance of the reference buildings proposing several scenarios in order to improve the building energy efficiency. Through the achievement of a building categorization, the presented work aims to define an analysis method speditive and repeatable for different group of buildings. The research sample consists of 38 school buildings belonging to Lecco municipality, in the Northern Italy. The final goal pursued is therefore to achieve a complete knowledge on the renovation strategies to be undertaken, on their costs and benefits obtainable on each building, in order to carry out the most effective urban resources renovation planning. In detail the paper deals with the followings topics:

- Classification of the study sample through a mapping tool;
- Definition of the energy retrofit strategies, from both economy and performance point of view;
- Development of a clustering analysis method, speditive and repeatable;
- Determination of references buildings for each cluster;
- Assessment of the most economically advantageous strategy for each cluster.

2. METHODOLOGY

2.1. SCHOOL BUILDING STATUS ANALYSIS

The building survey results allow to divided the school building typology with different geometrical typology [19]: merged block (47%), linear block (40%), which are the most recurrent, a stepped block (8%) and internal court block (5%). In relation to the buildings age, the analysis shows that the 69% was completed before 1974, which is the year when the anti-seismic regulations came into force, while no new school buildings were erected from 1990 to this day. It should also be noted that there is a percentage of older buildings (16%), built between the second half of the nineteenth century and the first decades of the twentieth century, often bound by restrictions from the local Superintendence authority. The results relating to the maintenance carried out to improve the school building energy performance (windows replacement, new plant installation and presence or absence of insulation in vertical or horizontal closures) show that 26% of the sample has not undergone any type of interventions since its construction, while 50% has only had one major intervention, which in most cases consisted of windows replacement. However,

su due edifici universitari proponendo diverse soluzioni tecnologiche per la riqualificazione di edifici storici. Un altro studio condotto da Desideri e Proietti [14] ha analizzato il consumo energetico di diversi edifici scolastici a Perugia, in centro Italia, evidenziando le possibili strategie di intervento. Il miglioramento delle prestazioni energetiche dell'edilizia scolastica è stata valutata anche da Dall'O e Sarto [15]; a partire da studi condotti su 49 scuole localizzate in Lombardia, hanno analizzato i costi-benefici per diversi scenari di retrofit. Essi hanno dimostrato che un eccessivo miglioramento delle prestazioni energetiche per il riscaldamento non è sempre la soluzione economica più vantaggiosa. Le diverse possibili misure per l'efficienza energetica degli edifici sono state studiate anche da Maserà e altri [16] mostrando soluzioni innovative, sia per interventi interni che esterni alla muratura. Arambula e altri [17], ha esplorato i vantaggi dell'applicazione di metodi di raggruppamento, in cluster omogenei, applicato ad un campione di 60 scuole nella provincia di Treviso. Similmente, Santamouris e altri [18], ha sviluppato una tecnica di suddivisione in cluster selezionando 10 edifici scolastici come campione rappresentativo di 320 scuole in Grecia. Il lavoro è stato condotto attraverso l'uso di edifici di riferimento sui quali analizzare i diversi scenari di riqualificazione energetica. Attraverso l'utilizzo di cluster rappresentativi di diversi campioni di edifici, il presente lavoro mira a definire un metodo di analisi speditivo e replicabile per diversi contesti. Nello specifico il campione di analisi è costituito da un gruppo di 38 edifici scolastici di proprietà del Comune Lecco. L'obiettivo generale consiste nell'acquisizione di una conoscenza completa dello stato degli edifici scolastici e nell'analisi, attraverso il parametro costo-beneficio, della potenzialità di miglioramento ottenibile per ogni edificio al fine di una efficace pianificazione di risorse economiche. Nel dettaglio il presente paper affronta i temi seguenti:

- *Classificazione del campione di studio attraverso uno strumento di mappatura;*
- *Definizione delle strategie di retrofit energetico, sia dal punto di vista delle prestazioni che della spesa;*
- *Sviluppo di un metodo di analisi per clusters speditivo e ripetibile;*
- *Definizione di edifici di riferimento rappresentativi per diversi raggruppamenti;*
- *Valutazione della strategia economicamente più vantaggiosa per ogni cluster.*

2. METODOLOGIA

2.1. ANALISI DEL PATRIMONIO SCOLASTICO

Dal censimento e catalogazione del patrimonio scolastico pubblico della provincia di Lecco (escluse le università e le scuole materne) si evince la seguente articolazione per tipologie edilizie [19]: la tipologia a blocco accorpato (47%) e quella a blocco lineare (40%) rappresentano le più diffuse sul territorio preso in considerazione, seguite dal tipo a

8% of the buildings underwent such maintenance as to gain, at least on paper, a good energy performance. Regarding the sample energy performances reference was made to data provided by the CEER (Energy Land Registry of Regional Buildings) [20], in order to overcome the lacking knowledge on the subject. Upon consultation made available the low energy performances of the schools buildings in Lecco is apparent: the primary energy demand (EPH) for heating stands at 59,94 kWh/m³year. It was also possible to obtain the U-value averages of the building constituent elements, which are as follows: basement 0,86 W/m²K, coverage 1,04 W/m²K, windows 3,36 W/m²K. The mean U value of the building envelope is equal to 1,13 W/m²K.

blocco a gradoni (8%) e a blocco a corte interna (5%). Prendendo in esame il dato relativo al periodo di costruzione l'analisi evidenzia che il 69% del patrimonio scolastico esistente risale a prima del 1974, anno di entrata in vigore della normativa antisismica, e che l'ultima edificazione risale al 1990. È importante notare l'esistenza di una discreta percentuale di edifici storici (16%), per lo più costruiti tra la seconda metà dell'Ottocento e primi decenni del Novecento, in molti casi soggetti a vincolo diretto della Soprintendenza. Analizzando gli interventi di recupero (sostituzione serramenti, installazione di nuovi impianti, coibentazione delle partizioni verticali e orizzontali) che hanno riguardato il campione preso in esame emerge che il 26% del patrimonio non è mai stato oggetto

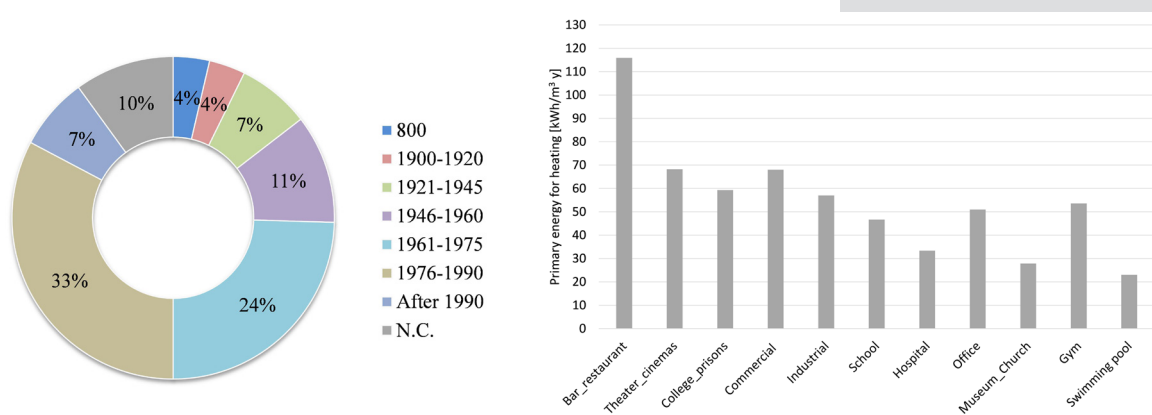


Figure 1. Left side: Constructional ages of the school building in Lecco. Right side: Primary energy consumption of the existing buildings in Lecco (the primary energy is represented in kWh/m³ y according to the CEER Database).

2.2. ENERGY RENOVATION STRATEGIES DEFINITION

Different renovation measure has been analysed among the major suitable interventions for the building envelope's performance improvement, such as windows replacement and wall insulation improvement, besides plant system interventions, such as air conditioning replacement or photovoltaic plants installation for on-site renewable energy production.

To establish a unit price for each strategy, firstly it was necessary to identify and quantify the materials involved in each intervention, starting from an essential assumption: the insulation material quantities were assessed based on those needed to achieve the U-value limits as imposed by the Lombardy Region with the 6480 Decree of 30 July 2016, starting from medium energy performance for building element (CEER data). According to the quantities calculated as shown in Table 1, an economic strategies quantification was carried out establishing a unit price parameter per m² or m³. The values were obtained by consulting the "Regione Lombardia, 2011" and "Camera di Commercio di Milano, 2013" price lists, within sections of the completed works.

di intervento dalla sua costruzione. Il 50% ha subito negli anni un solo intervento significativo: la sostituzione dei serramenti. Solo l'8% del patrimonio ha subito interventi di manutenzione significativi tali da garantire, almeno sulla carta, buone prestazioni energetiche. Queste ultime per quanto riguarda l'intero campione sono state desunte dai dati forniti dal CEER (Catasto Energetico Edifici Regionale) [20] non essendo possibile accedere a informazioni più dirette. I dati CEER evidenziano le scarse prestazioni energetiche dell'edilizia scolastica lecchese: la media del fabbisogno di energia primaria EPH per la climatizzazione si attesta a 59,94 kWh/m³anno. Le trasmittanze medie degli elementi che compongono l'involucro sono così definite: basement 0,86 W/m²K, copertura 1,04 W/m²K, serramenti 3,36 W/m²K. La trasmittanza media dell'involucro è pari a 1,13 W/m²K.

2.2. DEFINIZIONE DELLE STRATEGIE DI RECUPERO ENERGETICO

Come si evince dalla tabella 1 le principali strategie di intervento per il miglioramento delle prestazioni energetiche dell'edificio sono state analizzate anche attraverso una quantificazione economica degli interventi. Tra gli interventi presi in









Energy strategies	Materials: quantities and characteristics	Price
 External insulation	11 cm of XPS ($\lambda=0,035$ W/mK)	66,88 €/m ²
 Internal insulation	11 cm of glass wool ($\lambda=0,035$ W/mK)	45,58 €/m ²
 Flat roof insulation	11 cm of XPS ($\lambda=0,035$ W/mK)	28,59 €/m ²
 Sloped roof insulation	11 cm of XPS ($\lambda=0,036$ W/mK)	57,18 €/m ²
 Basement insulation	9 cm of XPS ($\lambda=0,035$ W/mK)	24,38 €/m ²
 Windows replacement	Windows in PVC low-e_4/15/4	271,2 €/m ²
 New plant installation	Heat pump, UTA, fan coil unit	59,2 €/m ³
 PV installation	Photovoltaic panels in mc-Si (0,125 kWp to m ²)	275 €/m ²

Table 1. List of the energy conservation measures.

2.3. BUILDING TYPOLOGY CLASSIFICATION

In order to simplify the sample analysis a typological classification based on objective parameters was considered necessary. Through the adoption of a data mining technique the sample was divided into homogeneous clusters, which share typological and technological characteristics, as well as fuel consumption and similar energy behaviour. With a view to significantly reduce the number of schools having to specifically submit to energy analysis, it was firstly necessary to define which variables were the most suitable to characterize the sample in the classification construction. Based on the available data, the authors analysed the school buildings characteristics that come into play in energy performance, dividing them between fixed and variable benchmarks in function of the homogeneity within the sample. A benchmark was considered “fixed” if it was homogeneous in at least 80% of the sample (for example opaque and transparent vertical closures types, internal ventilation type); whilst it was considered “variable” if it turned out to be uneven within the reference (Table 2). The following benchmarks were identified:

- Building types, which for the study sample of school buildings were found to be: linear block (40%), merged block (47%), a stepped block (8%) and internal court block (5%).
- Number of floors above ground, distinguishing the school buildings of the sample in two categories: low buildings with 1-2 floors (50%) and medium-high buildings with 3-4 floors (50%).
- Ratio between transparent vertical surfaces and the total vertical surfaces, distinguishing two categories: 18%, average between 13-23%, of glass

considerazione: la sostituzione degli infissi, la coibentazione dei diversi sottosistemi dell'involucro, ma anche gli interventi sugli impianti per la climatizzazione e la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili. Il prezzo unitario di ogni strategia di intervento in rapporto alla tipologia di isolante o di impianto prescelti (i più diffusi sul mercato) è stato quantificato al m² o m³ considerando i valori indicati nei prezziari della Regione Lombardia 2011 e della Camera di Commercio di Milano 2013. Le quantità di materiale isolante sono quelle necessarie a raggiungere, partendo dalle prestazioni energetiche medie per elemento edilizio (dati CEER) i limiti di trasmittanza imposti dalla normativa, vale a dire quelli definiti da Regione Lombardia con il decreto 6480 del 30 luglio 2015.

2.3. CLASSIFICAZIONE TIPOLOGICA DEGLI EDIFICI

Per semplificare il processo di analisi del campione, caratterizzato da un elevato numero di dati, si è ritenuto necessario procedere a una classificazione tipologica in funzione di parametri oggettivi. Mediante l'adozione di una tecnica di data mining il campione di studio è stato diviso in clusters omogenei, permettendo di passare da una grande quantità di edifici ad un ristretto numero di gruppi di scuole accumulate dalle medesime caratteristiche tipologiche e tecnologiche, oltre che da consumi e comportamento energetico simili. Con l'obiettivo di ridurre sensibilmente il numero di scuole da dover sottoporre in dettaglio alle analisi energetiche successive, sono state pertanto individuate le variabili più adeguate a caratterizzare il campione nella costruzione della classificazione. Basandosi sui dati a disposizione, è stata condotta un'analisi delle caratteristiche degli edifici scolastici che entrano in gioco nella valutazione delle prestazioni energetiche, dividendole in parametri fissi e variabili in funzione dell'omogeneità all'interno del campione. Un parametro è stato considerato “fisso”

surface (58%), which includes most of the buildings with traditional fixtures; 29%, average between 24-34%, of glass surface (42%), including most of the buildings with large ribbon windows.

The building type benchmark can thus be referred to the S/V parameter (the ratio between envelope surface and volume defining the primary energy demand - EPH) used primarily in energy study fields and in accordance with prescribed regulations. Between the buildings within the clusters, a correlation is then obtained which does not depend directly on their geometric dimensions, but on the relationships among them. Different cluster types were generated by their interpolation, which in the study sample case were found to be 9, as stated in Table 2.





Clusters (N°)	Building types				N° floors		% glass surface	
	Linear block 	Merged block at C or L 	Internal court block 	Stepped block 	1/2	3/4	Average 18% (13-23%)	Average 29% (24-34%)
C.1 (10)	X				X		X	
C.2 (4)	X					X	X	
C.3 (2)	X				X			X
C.4 (3)		X			X		X	
C.5 (8)		X				X		X
C.6 (1)		X			X			X
C.7 (5)		X				X	X	
C.8 (2)			X		X			X
C.9 (3)				X		X		X

Table 2. The reference buildings definition and classification.

2.4. THE REFERENCE BUILDING AND ITS VALIDATION

In order to quantify the benefit in terms of primary energy demand reduction (EPH), obtained through the application of every single energy strategy, the authors proposed an approach based on using a new analytical tool: the reference building [21]. It is a fictitious building set up using elements from each cluster. To prove the reference building the cluster 5 is used to verify the method. Subsequently their energy demand was calculated and the same was done for the other buildings belonging to them: our assumptions are true when EPH and S/V values obtained prove comparable. Several dynamic building energy simulation by means of the Green Building Studio® software plug-in for Autodesk® Revit® BIM platform were carried out in order to evaluate the energy consumption of each building. We simulated the building energy behaviour according to the design benchmarks, which were considered the

se è risultato omogeneo in almeno l'80% del campione (per esempio le tipologie di chiusure verticali opache e trasparenti, la tipologia di ventilazione interna, la tipologia di climatizzazione invernale, la climatizzazione estiva), mentre è considerato "variabile" il parametro risultato non costante all'interno delle scuole mappate (Tabella 2). Le diverse tipologie di Clusters sono state individuate dall'interpolazione dei tre parametri di seguito elencati:

- Tipologia edilizia, che per il parco scolastico oggetto di studio risulta la seguente: a blocco lineare (40%), a blocco accorpato a C o a L (47%), a corte interna (5%), a blocco a gradoni (8%).
- Numero di piani fuori terra, distinguendo gli edifici scolastici del campione in due: edifici bassi con 1-2 piani (50%) e edifici medio alti con 3-4 piani (50%).

- Percentuale di superficie verticale trasparente sul totale della superficie verticale, distinguendo due categorie: 18%, media tra 13-23%, di superficie vetrata (58%), in cui rientrano la maggior parte degli edifici con infissi tradizionali; 29%, media tra 24-34%, di superficie vetrata (42%), in cui rientrano la maggior parte degli edifici con grandi superfici finestrate a nastro.

Il parametro della tipologia edilizia, che definisce la forma geometrica dell'edificio, ed il numero di piani si riconduce al rapporto S/V (superficie disperdente/ volume, parametro che incide sul valore di energia primaria - EPH). Ciò permette di ricavare una correlazione tra gli edifici all'interno dei Clusters che non dipenda direttamente dalle loro dimensioni geometriche, ma dai rapporti tra di esse.

Dalla loro interpolazione si sono generate le varie tipologie che, nel caso del campione di studio, sono risultate essere 9, come riportato in Tabella 2.

same for the all samples. The obtained data verified the assumption: the EPH values are comparable with each other, the error range ranging between 1 to 13% (Table 3). The research method identified nine representative building named “Cluster”.

2.4. L'EDIFICIO PROTOTIPO E LA SUA VALIDAZIONE

Al fine di quantificare il beneficio in termini di riduzione di fabbisogno di energia primaria EPH, ottenuto attraverso l'applicazione di ogni singola strategia energetica, è



















Cluster 5	School name	Envelope S. S [m ²]	Gross V. V [m ³]	% glass surface	S/V	E _{PH} [kWh/m ² /year]	% from R.B.	Cluster name	Gross area [m ²]	Envelope surface S [m ²]	Gross volume V [m ³]	% glass surface	Aver. S/V	
	Middle school A. Stoppani	6594	26823	31%	0,25	203	12		C.1	2114	2190	10530	18%	0,21
	High school A. Fioecchi	8776	71379	31%	0,12	180	1		C.2	2005	1944	13382	18%	0,15
	Elementary school E. Toti	3785	16726	25%	0,23	199	10		C.3	1511	1685	6362	29%	0,26
	High school G. Bovara	7196	37974	29%	0,19	174	4		C.4	2510	3456	8941	18%	0,39
	High school G. Bertacchi	8674	43548	29%	0,20	200	10		C.5	9045	7240	41424	29%	0,17
	High school G. B. Grassi	8343	48233	28%	0,17	204	13		C.6	4296	4669	16779	29%	0,28
	High school G. Parini	11273	71888	32%	0,16	182	1		C.7	4529	3892	17063	18%	0,23
	Middle school L.B. Vassena	3904	14826	31%	0,26	205	13		C.8	10915	9332	38699	29%	0,24
	Reference building	7240	41424	29%	0,17	181	/		C.9	5980	7974	26209	29%	0,30

Table 3. Left side: example of the cluster validation. Variance of the real buildings respect to the reference geometry. Right side: The clusters in detail.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. GENERAL RESULTS

Energy consumption simulations were carried out for each reference buildings, relating both to the current state and to each energy strategy applied individually. The values of primary energy demand (EPH) determined for each energy strategy were compared with the value obtained for the current state, in order to quantify the energy savings generated by every intervention and their value expressed as a percentage. The cost/benefit parameter was then defined, expressed in €/kWh year, as the ratio between the amount of savings on the total annual energy consumption and the overall intervention cost, determined by multiplying its extension by the unit costs. As regards the quantification of the cost/benefit parameter, in the case of the internal insulation strategy applied to the vertical surfaces for buildings subject to architectural restrictions, a correction had to be made, in order to take into account the thermal bridge incidence generated by the use of this intervention. In accordance with the provisions specified in Decree 6480 of 30 July and applying the analytical method to a case study (primary school E. De Amicis), this incidence was found to be 20% of the envelope thermal performance. This value was thus used to increase the cost/benefit consequent result. The simulations results point out, for all clusters, the cost/benefit values achieved for each energy strategy. By their comparison, it was possible to identify the

stato proposto un metodo basato sull'utilizzo di un nuovo strumento di analisi: l'edificio prototipo, un elemento fittizio "costruito" sui dati costitutivi di ogni tipologia [21]. La validità del metodo è stata testata sull'edificio prototipo del Cluster 5: si è calcolato il fabbisogno energetico dell'edificio prototipo e di ognuno degli otto edifici scolastici censiti appartenente al Cluster ritenendo l'ipotesi verificata nel caso in cui i valori di EPH e S/V ottenuti risultassero confrontabili.

Per la valutazione del consumo energetico degli edifici si è proceduto effettuando numerose analisi in regime dinamico simulando il comportamento energetico dell'edificio in funzione dei parametri di progetto, considerati uguali per tutti gli edifici del campione. Le analisi sono state svolte mediante il software Green Building Studio®, plug-in della piattaforma BIM Revit® di Autodesk®. I dati ottenuti dimostrano la veridicità dell'ipotesi iniziale: i valori di EPH sono risultati confrontabili con scarti massimi variabili tra 1 e il 13% (Tabella 3). Il metodo di ricerca ha permesso di identificare nove edifici prototipo denominati "Cluster".

3. DISCUSSIONE DEI RISULTATI

3.1. RISULTATI GENERALI

Per ogni edificio prototipo sono state eseguite simulazioni del comportamento energetico relative sia allo stato di fatto che all'applicazione di ogni singola strategia energetica. I valori di fabbisogno primario EPH conseguenti a ogni strategia energetica sono stati confrontati con il valore relativo allo stato di fatto, quantificando così il risparmio energetico indotto da ogni intervento in termini percentuali. Successivamente è stato definito il parametro costo/beneficio, espresso

most promising strategy between those proposed. Firstly it can be noted how, in all cluster typologies, the strategy that involves the best benefit in terms of reduction of EPH, variable between 30 - 40%, appears to be the new plant installation – S4 (Figure 2).

in €/kWh anno, come rapporto tra il costo complessivo dell'intervento, determinato moltiplicando i costi unitari di ogni intervento/strategia per la sua estensione, e la quantità di risparmio sul consumo totale annuale di energia. Nella valutazione della strategia di coibentazione interna

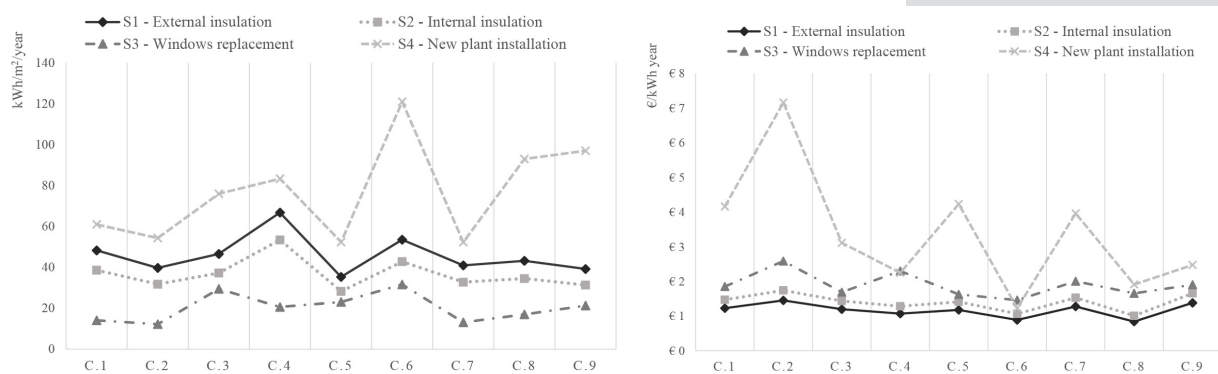


Figure 2. Left side: Renovation measures with related energy reduction. Right side: cost-benefit analysis for the analysed scenarios.

That is due to the type of intervention that plays a key role in school buildings, especially as regards the primary ventilation; indeed the high air changes values imposed by the UNI 103399 legislation result in ventilation losses preponderance within the energy balance. Still in terms of benefit on primary energy demand, if the external insulation strategy – S1 is characterized by a constant value of reduction of EPH in all clusters amounting to approximately 20%, conversely the benefit generated by the strategy of windows replacement – S3 varies according to the percentage of glass surface. In fact, this value swings between 7% in the clusters characterized by classic frames and 15% in those with ribbon windows. Secondly, as regards the analysis of the cost/benefit benchmarks, we can deduct that the results previously identified may not be equally reflected in terms of best strategy. Actually, if as for primary energy reduction the new plant installation strategy was found to be the most advantageous, in terms of economic investment, it was found to be the least profitable, due to the high cost. The obtained cost/benefit comparison (Figure 2) showed that the best strategy in terms of investment return proved to be the external insulation – S1 for all clusters, particularly for the schools with a low glass surface. In conclusion, for clusters characterized by a high percentage of glass surface the windows replacement intervention – S3 has a performance comparable with that of insulation strategy, especially in the case of restricted buildings with internal insulation applications. The analysis result is corroborated by the fact that for the majority of schools in the study sample, the windows are one of the few elements subject to a requalification

delle superfici verticali di edifici vincolati architettonicamente, si è tenuto conto dell'incidenza dei ponti termici generati dall'uso di tale intervento apportando una correzione nella quantificazione del parametro costo/beneficio. Seguendo quanto proposto dal Decreto 6480 del 30 Luglio 2015, applicando il metodo analitico ad un caso studio (scuola primaria E. De Amicis), tale incidenza è risultata essere del 20% delle prestazioni termiche dell'involucro. Tale valore è stato quindi utilizzato per incrementare il conseguente risultato del costo/beneficio. Le simulazioni effettuate hanno permesso di definire, per tutte le tipologie, i valori di costo/beneficio in rapporto a ogni strategia energetica. Dal loro confronto si è potuta infine identificare la migliore strategia tra quelle proposte. In prima analisi si nota come, nella totalità dei clusters, l'intervento che comporta il miglior beneficio in termini di riduzione di EPH, che oscilla tra il 30-40%, risulta essere la sostituzione dell'impianto - S4 (Figura 2). Negli edifici a destinazione scolastica esso gioca un ruolo fondamentale, soprattutto per quanto riguarda la ventilazione primaria a causa degli elevati valori di ricambi d'aria imposti dalla norma UNI 10339 che comportano come preponderanti le dispersioni per ventilazione all'interno del bilancio energetico. Sempre in termini di beneficio sul fabbisogno primario, l'intervento di coibentazione esterna – S1 ha un valore di riduzione di EPH costante in tutte le tipologie, pari a circa il 20%, mentre il beneficio prodotto dall'applicazione della strategia di sostituzione dei serramenti – S3 varia in funzione della percentuale di superficie vetrata, passando dal 7% nelle tipologie caratterizzate da serramenti classici, al 15% in quelle con finestre a nastro. Analizzando i parametri di costo/beneficio, si nota come i valori identificati in

in time. Indeed, for this reason the benefit produced by their replacement is lower. It is to be noted that the cost/benefit scenario, which has allowed identifying the most economically profitable strategy, is directly related to the nature and cost of materials used in the interventions. An example may be given by the use of innovative materials such as thermo-reflective insulations, which would increase the investment per m² between 30-35% higher respect the use of traditional insulation materials. In this case, there would be a different scenario (Figure 3) where, for clusters characterized by a high glass surface percentage, the windows replacement – S3 would emerge as the most profitable.

precedenza non trovino riscontro in termini di migliore strategia; infatti, se per quanto concerne la riduzione di fabbisogno primario l'installazione di un nuovo impianto è risultata essere la strategia più vantaggiosa, in termini economici e quindi di rendimento dell'investimento è risultata essere la meno redditizia a causa dell'elevato costo dell'intervento. Dalla comparazione (Figura 2) dei costi/benefici è emerso come la miglior strategia in termini di rendimento dell'investimento è la coibentazione esterna – S1 per tutte le tipologie, in particolare per gli edifici con una percentuale di superficie vetrata ridotta. Infine, si sottolinea come nelle tipologie caratterizzate da percentuali elevate di superficie vetrata, la strategia di sostituzione dei serramenti – S3 ha un

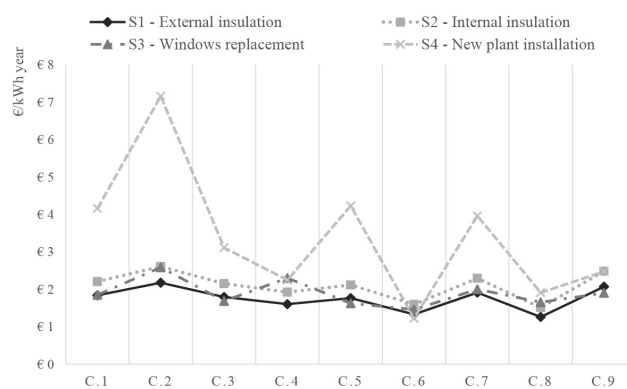


Figure 3. Best strategy for cost-benefit_scenario 2.

3.2. THE CASE STUDY

After the scheduling and the analysis phase, a detailed case study has been analysed in order to show the application of the method and the impact of the renovation techniques on cost and energy saving. The case study, selected from the set of the 38 analysed building, is represented by the primary school “A. De Amicis”, located in the south area of the Lecco Municipality, the buildings host 9 class with more than 180 pupils.

rendimento confrontabile con quello della coibentazione, soprattutto nei casi di edifici vincolati dove questo è ridotto a causa dalla presenza dei ponti termici. La motivazione di questo dato è riconducibile al fatto che nella maggior parte delle scuole appartenenti al campione di studio, i serramenti sono stati nel tempo uno dei pochi elementi oggetto di intervento di riqualificazione. Il beneficio prodotto dalla loro sostituzione risulta pertanto essere inferiore. Si fa presente come lo scenario di costo-beneficio ricavato, che ha permesso di identificare le strategie economicamente più redditizie, risulta

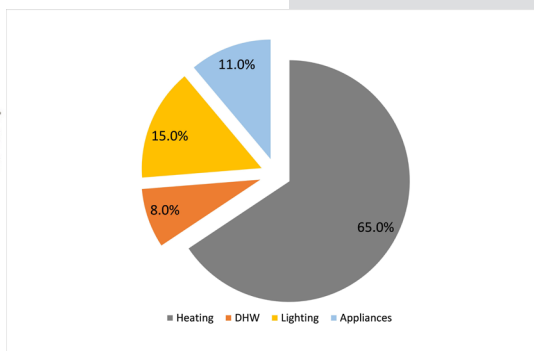
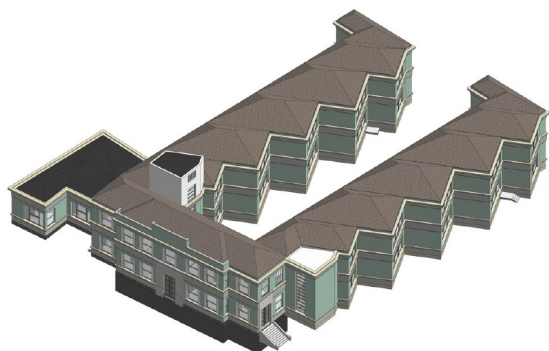


Figure 4. Left side: 3-D view of the A. De Amicis school building. Right side: breakdown of the current state of then building energy demand.

The building has been designed in 1932 by the Arch. Giorgio Ezio Lavene and Ing. Gabrio Brandoni. The construction phase started in 1933 and took 3 years. The building is characterized by a merged block at C: the central building hosts the administrative and professor offices, whereas the two parallel block accommodate the teaching rooms. From the technological point of view, the building is characterized by brick walls (thickness of 40 cm), concrete-brick ceiling and wooden frame with single glass for the windows. Considering the age of construction any energy efficiency measures was implemented in the building, which is why the actual primary energy consumption is high and equal to 240,6 kWh/m²y (in detail: 513.605,0 kWh of thermal energy, 73% of the total, and 19.564,0 kWh of electrical energy, 26% of the total) (Figure 4). Following the process discussed in the previous sections different energy conservation measures has been considered to improve the energy efficiency of the building.

As shown by the Figure 5 the different scenarios has been analysed comparing the energy saving potential: considering the electrical energy consumption of the schools building the local electricity production can play an important role in terms of energy saving compared to the opaque envelope renovation strategy.

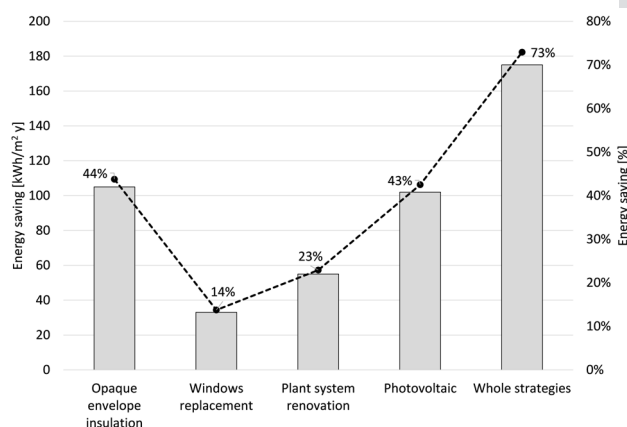


Figure 5. Primary energy saving related to the different renovation scenarios.

Renovation strategies	Energy saving - Primary energy [kWh/m ² y]	Cost [€]	Cost-Benefit [€/kWh/m ² /y]
Opache envelope insulation	105.44	€ 263,196.60	€ 2,496.00
Windows replacement	33.54	€ 2,694,991.71	€ 7,901.00
Plant sistem renovation	55.47	€ 290,675.00	€ 5,240.00
Photovoltaic	102.76	€ 693,824.00	€ 6,752.00
Whole strategies	175.69	€ 1,512,687.31	€ 8,610.00

Table 4: Energy saving, Cost and cost-benefit of the renovation strategies.

direttamente collegato alla natura e ai costi dei materiali utilizzati negli interventi. L'utilizzo di materiali innovativi come gli isolanti termoriflettenti comporterebbe per esempio un aumento del costo al m² fino al 30-35% superiore rispetto a quello delineato dall'utilizzo di materiali isolanti tradizionali, originando uno scenario diverso (Figura 3) nel quale, per le tipologie caratterizzate da una percentuale di superficie vetrata elevata, la strategia di sostituzione dei serramenti - S3 emergerebbe come la più redditizia.

3.2. IL CASO STUDIO

Al fine di valutare l'impatto delle tecniche di ristrutturazione previste rispetto al risparmio energetico-economico complessivo, la seguente sezione descrive i risultati dell'applicazione del metodo ad un caso di studio specifico. L'edificio preso in esame fa parte del campione costituito dalle 38 scuole censite ed è rappresentato dalla scuola primaria "A. De Amicis", situata nella zona sud del Comune di Lecco. L'edificio ospita attualmente 9 Classi con più di 180 alunni iscritti sui vari anni di corso. L'edificio è stato progettato nel 1932 dall'Arch. Giorgio Ezio Lavene e dall'Ing. Gabrio Brandoni. La fase di costruzione iniziò nel 1933 e durò per 3 anni. L'edificio si caratterizza per uno sviluppo volumetrico a "C": la porzione centrale del fabbricato ospita gli uffici amministrativi e

Looking at the cost benefit-scenario index, the most suitable strategies still represented by the opaque envelope renovation with a cost-benefit index close to 2.500,0 €/kWh/m²y, three times the cost benefit linked to the windows replacement and less than half respect to the cost of the photovoltaic power plant installation.

4. CONCLUSIONS

As argued in the previous section the developed methodology represents an important state school buildings renovation tool, since it provides guidelines applicable and replicable to different contexts from those of the study sample, in view of the method replicability. Through the method developed and applied to Lecco schools, it was possible to define the best energy strategy for each building, setting an extremely useful parameter in planning short-term investments to be allocated to the school buildings. Since the Public Administration does not have the budget to allow the application of all the strategies to each school building, it becomes of paramount importance to know which strategy is the most advantageous from an investment return perspective, in order to plan the interventions priorities over time. Applying firstly a more advantageous renovation strategy in terms of cost/benefit will result in savings leading to the availability, in a shorter time, of more money to be allocated to other strategies, in order to achieve a total retrofit of the building stock in the shortest time. Finally, the breakthrough treatment allowed establishing the overall cost of the investment needed for the building stock renovation that is equal to € 62.971.530,0. The different renovation strategies has been compared using different indicators including the cost/student in order to define the priority of interventions themselves.

5. AKNOWLEDGMENTS

Authors would like to thank gratefully Sara Girola and Leopoldo Luchini for their contribution.

6. REFERENCES

- [1] Boarin P., *Edilizia scolastica. Riqualificazione energetica e ambientale*. Monfalcone: EdicomEdizioni, 2010, pp. 336.
- [2] Legge 30 Aprile 1976, n. 373, Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici, 1976.
- [3] Legge 2 Febbraio 1974, n. 64, Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche, 1974.
- [4] Legge 9 Gennaio 1991, n. 10, Norme per l'attuazione del piano energetico nazionale in materia di uso nazionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia, 1991.

dei docenti, mentre i due blocchi paralleli ospitano le aule didattiche e la palestra. Dal punto di vista tecnologico l'edificio è caratterizzato da pareti in muratura (spessore pari a 40 cm), soffitti in latero cemento e finestre in legno con anta mobile e vetro singolo. Considerando il periodo di edificazione, nessuna misura di efficienza energetica è stata implementata nella costruzione originale, motivo per cui il consumo di energia primaria supera i 240 kWh/m² anno (in dettaglio: 513.605,0 kWh di energia termica, 73% del totale, 19.564,0 kWh di energia elettrica, 27% del totale) (Figura 4). In accordo con il procedimento descritto nelle sezioni precedenti e per diverse strategie di riqualificazione (involucro e impianti) sono stati valutati gli impatti in termini di costo-beneficio. La Figura 5 paragona il potenziale di risparmio energetico conseguito attraverso l'applicazione dei singoli interventi: considerando l'alto fabbisogno di energia elettrica, tipico degli edifici scolastici, la produzione elettrica locale da fotovoltaico è una strategia sicuramente interessante che comporta fabbisogni di energia simili rispetto a quelli conseguiti attraverso interventi di miglioramento dell'isolamento termico dell'involucro opaco. Guardando l'indice costo-beneficio, la strategia più vantaggiosa risulta essere la ristrutturazione dell'involucro opaco con un valore pari a 2.500,0 €/kWh/m² anno, tre volte meno rispetto allo scenario di sostituzione delle finestre e meno della metà rispetto al costo dei sistemi fotovoltaici.

4. CONCLUSIONI

Come dimostrato nelle precedenti sezioni la metodologia sviluppata rappresenta un approccio facilmente applicabile e replicabile per l'analisi delle diverse misure di riqualificazione energetica degli edifici scolastici. Attraverso la metodologia descritta e applicata agli edifici scolastici presenti nella Città di Lecco, è stato possibile definire la migliore strategia in termini di costo-beneficio per ogni singolo edificio, parametro questo estremamente utile nella pianificazione degli investimenti futuri e nella definizione delle priorità degli stessi. L'applicazione delle strategie più vantaggiose in termini di costo/beneficio consente una migliore gestione delle risorse economiche disponibili, al fine di ottenere una completa riqualificazione del patrimonio edilizio nel più breve tempo possibile. Il lavoro presentato ha permesso di stimare gli importi totali degli interventi di riqualificazione edilizia, la cui stima ammonta a € 62.971.530,0. I diversi interventi proposti sono stati comparati utilizzando diversi parametri di valutazione tra cui anche il costo/studente parametro utile per la classificazione della priorità degli interventi stessi.

5. RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano Sara Girola e Leopoldo Luchini per il loro contributo.

- [5] Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). Official Journal of the European Union (2010) 18/06/2010
- [6] Sesana M.M.; Salvalai G., *Overview on life cycle methodologies and economic feasibility for nZEBs*, «Building and Environment», 67 (2013), pp. 211-216.
- [7] Sartori I.; Napolitano A.; Voss K., *Net zero energy buildings: A consistent definition framework*, «Energy Build», 48 (2012), pp. 220-232.
- [8] Legambiente, 2015. Ecosistema Scuola, XVI Rapporto di Legambiente sulla qualità dell'edilizia scolastica, delle strutture e dei servizi. Disponibile da: <http://www.legambiente.it/contenuti/dossier/ecosistema-scuola-XVI-rapporto-legambiente>.
- [9] Stocker E.; Tschurtschenthaler M.; Schrott L., *Cost-optimal renovation and energy performance: Evidence from existing school buildings in the Alps*, «Energy and Buildings», 100 (2015), pp. 20-26.
- [10] Santamouris M.; Balaras C.A.; Dascalaki E.; Argiriou A.; Gaglia A., *Energy consumption and the potential for energy conservation in school buildings in Hellas*, «Energy», 19 (June 6) (1994), pp. 653-660.
- [11] Trachte S.; De Herde A., *Sustainable refurbishment of school buildings*, «IEA SHC publication», N (2015), p. 320.
- [12] Dimoudi A.; Kostarela P., *Energy monitoring and conservation potential in school buildings in the C_ climatic zone of Greece*, «Renewable Energy», 34 (1) (2009), pp. 289-296.
- [13] Sesana M.M.; Grecchi M.; Salvalai G.; Rasica C., *Methodology of energy efficient building refurbishment: Application on two university campus-building case studies in Italy with engineering students*, «Journal of Building Engineering», 6 (2016), pp. 54-64.
- [14] 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.
- [15] Dall'O G, Sarto L., *Potential and limits to improve energy efficiency in space heating in existing school buildings in northern Italy*, «Energy and Buildings», 67 (2013), pp. 298-308.
- [16] Masera G., Iannaccone G., Salvalai G., *Retrofitting the existing envelope of residential buildings: innovative technologies, performance assessment and design methods*, In: Advanced Building Skins-Conference Proceedings of the 9th Energy Forum, Bressanone, Italy, pp 987-994.
- [17] Arambula Lara R.; Pernigotto G.; Cappelletti F.; Romagnoni P.; Gasparella A., *Energy audit of schools by mean of cluster analysis*, «Energy Build», 95 (2015), pp. 160-171.
- [18] Santamouris M.; Mihalakakou G.; Patargias P.; Gaitani N.; Sfakianaki K.; Papaglastra M.; Pavlou C.; Doukas P.; Primikiri E.; Geros V.; Assi-makopoulos M.N.; Mitoula R.; Zerefos S., *Using intelligent clustering techniques to classify the energy performance of school buildings*, «Energy Build», 39 (2007), pp. 45-51.
- [19] Maurizio S., *Manuale di edilizia scolastica*. Roma: NIS, 1995, pp. 350.
- [20] CEER: real estate registry of the Lombardy Region; www.cened.it.
- [21] Malighetti L.E.; Iannaccone G.; Ruta M.; Bonacina C.; Villa N.; Bertani B.; Turchini G.; Pizzi E.; Grecchi M. *Evaluation of options for building refurbishment: an innovative design tool supporting decision-makers in Italy*. In: Changing Needs, Adaptive Buildings, Smart Cities, Proceedings Book of the 39th International Association for Housing Science (IAHS) World Congress, Politecnico di Milano, Milan, Italy, edited by Ural O.; Pizzi E.; Croce S. Milan: PoliScript, 2013, Vol 1, pp. 971-976.