

Internal insulation solutions for a historic building renovation: a probabilistic approach for the affordability assessment

Elisa Di Giuseppe*, Monica Iannaccone, Enrico Quagliarini,
Marco D’Orazio

Highlights

Data uncertainty is a well-recognized issue of LCC “deterministic” calculation methods that could limit their application. Probabilistic approaches to LCC assessment of building renovations provide more realistic information about results uncertainties. The paper presents the application of a probabilistic LCC to a historic building retrofitted through internal insulation. The probabilistic LCC is based on a Monte-Carlo approach and particularly focuses on the characterization of the stochastic inputs. Results are represented by probability distributions of the Global Cost during a calculation period of 30 years.

Abstract

This paper presents the application of a probabilistic LCC method for the assessment of the affordability of alternative internal insulation measures in a historic building. The work, based on a Monte-Carlo approach for uncertainty analysis, particularly focuses on the characterisation of the stochastic inputs of the assessment, related to the specific design options chosen, highlighting the main assumptions and data fitting procedures applied on available data. The probabilistic LCC application shows a great potential in providing realistic information about results uncertainties and enabling useful analysis of potential benefits of a design option.

Keywords

Building renovation, Life Cycle Costing, Energy Efficiency, Monte-Carlo method

1. INTRODUCTION

Life Cycle Costing (LCC) in the field of building construction and renovation is a useful assessment and decision method to choose the most profitable design option given a certain performance target [1, 2]. In particular, in building renovation interventions, customers and designers are interested in evaluating the economic performance of several possible Energy Efficiency Measures (EEMs), usually represented as their Global Cost (GC) during the building life-cycle or their Payback period, given the energy (and costs) saving they provide. In professional practice and in many researches, standardized LCC methods (EN 15459 [3], ISO 15686-5 [4]) are used to assess the economic impacts of energy efficiency measures for building design and renovation. Nevertheless, while several researches focus on the identification of proper

Elisa Di Giuseppe

DICEA – Dipartimento di
Ingegneria Civile, Edile e
Architettura, Università
Politecnica delle Marche, via
Brecce Bianche 12, Ancona,
60131, Italia

Monica Iannaccone

DICEA – Dipartimento di
Ingegneria Civile, Edile e
Architettura, Università
Politecnica delle Marche, via
Brecce Bianche 12, Ancona,
60131, Italia

Enrico Quagliarini

DICEA – Dipartimento di
Ingegneria Civile, Edile e
Architettura, Università
Politecnica delle Marche, via
Brecce Bianche 12, Ancona,
60131, Italia

Marco D’Orazio

DICEA – Dipartimento di
Ingegneria Civile, Edile e
Architettura, Università
Politecnica delle Marche, via
Brecce Bianche 12, Ancona,
60131, Italia

* Corresponding author
Tel.: +39-071-2204380;
fax: +39-071-2204582;
e-mail: e.digiuseppe@univpm.it

energy efficiency measures and the evaluation of their energy performance, the LCC calculation is often achieved with simplifications related to the needed data input definition [5–9]. Nevertheless, in economic analysis, results are heavily dependent on future trends for macro-economic data (i.e. inflation rate and energy prices) or on service life of building components [10, 11].

Data uncertainty is a well-recognized issue associated with LCC “deterministic” calculation methods that could limit their application. Gluch and Baumann underline that LCC’s practical application is constrained by its oversimplification to a monetary unit, the lack of data, the complexity of the building process and the conceptual confusions [12].

Sesana and Salvalai provide an overview on the main limitations of LCC approaches to design a Nearly Zero Energy Building, particularly identifying the difficulty in economic data forecasting and the variability of construction costs [13]. Ilg et al. underline how the variety of sources and types of uncertainties in LCC data inputs makes it difficult to provide a meaningful and simple categorization of them [14]. Ignoring data inputs uncertainties may lead to improper judgments, while LCC may still be a useful decision support method in building renovation processes if the user is aware of its inherent limits and weaknesses [12].

A “probabilistic” approach to LCC assessment of building renovation measures could provide more realistic information about results uncertainties and enable more useful analysis of potential benefits of a design option, as recently demonstrated by the authors, which developed a Monte-Carlo based methodology for uncertainty and sensitivity analysis in LCC [15]. Within this research field, the present paper focuses on the application of the methodology at building “component scale”, addressing the assessment of the economic performance of internal insulation measures, which represent retrofit design options widely used in historic buildings, where preservation of the façade architectural quality and energy savings are both important targets. The paper particularly focuses on the phase of characterisation of the LCC uncertain inputs through Probability Density Functions (PDFs), considering available data, and focusing on a micro-economic dimension, the typical perspective of a private investor, designer, householder.

After a brief description of the probabilistic LCC methodology (section 2), this is applied to a case study of internal insulation measures (section 3) and finally results obtained, expressed as global cost, are presented (section 4).

2. METHODOLOGY

The probabilistic LCC methodology described in this work combines the

1. INTRODUZIONE

Le analisi dei costi nel ciclo di vita (Life Cycle Costing, LCC), nell'ambito della costruzione o del recupero di edifici, sono utili strumenti decisionali per valutare le soluzioni progettuali più convenienti dal punto di vista economico, stabiliti determinati obiettivi prestazionali [1,2]. In particolare, negli interventi di ristrutturazione edilizia, i clienti e i progettisti possono essere interessati a valutare le prestazioni economiche di diverse possibili misure di efficientamento energetico (EEM), calcolandone il costo globale (GC) durante il ciclo di vita del fabbricato, o il possibile periodo di ritorno dell'investimento a fronte del risparmio energetico (ed economico) ottenuto. Nella pratica professionale, così come in numerosi studi, vengono utilizzati i metodi LCC riportati negli standard internazionali (EN 15459 [3], ISO 15686-5 [4]) per valutare gli impatti economici di tali misure di efficientamento energetico. Tuttavia, mentre molte ricerche si concentrano sull'individuazione di strategie progettuali efficaci e sulla valutazione delle loro prestazioni a livello energetico, il calcolo LCC viene spesso eseguito con consistenti semplificazioni legate alla definizione dei dati di ingresso necessari per il calcolo [5-9]. Tuttavia, in una analisi economica, i risultati sono fortemente dipendenti dagli andamenti futuri di grandezze macroeconomiche (quali il tasso di inflazione e i prezzi dell'energia) o dalla durata di vita dei componenti edilizi [10,11]. L'incertezza su tali dati è un noto problema dei metodi di calcolo LCC di tipo "deterministico", che potrebbe di fatto limitare la loro applicazione. Gluch e Baumann sottolineano come l'applicazione pratica dell'LCC possa essere notevolmente condizionata da eccessive semplificazioni, dalla mancanza di dati di ingresso, dalla complessità del processo di costruzione dell'edificio e da altre questioni concettuali [12]. Sesana e Salvalai forniscono una panoramica sulle principali limitazioni degli approcci LCC per la progettazione di edifici ad energia quasi zero (nZEB), in particolare identificando la difficoltà di previsione dei dati economici e la variabilità dei costi di costruzione [13]. Ilg et al. sottolineano come la varietà di fonti e tipi di incertezze nei dati di input di calcoli LCC renda difficile fornire una loro categorizzazione semplice e significativa [14]. Ignorare le incertezze su tali dati potrebbe addirittura comportare un risultato di analisi errato. Le valutazioni LCC possono essere utili metodi di supporto decisionale nei processi edilizi se l'utente è a conoscenza dei loro limiti e criticità intrinseci [12]. Un approccio di tipo "probabilistico" alla valutazione economica di ipotesi progettuali può fornire informazioni più realistiche sull'incertezza dei risultati e consentire una valutazione migliore dei potenziali vantaggi di una specifica soluzione, come recentemente dimostrato dagli autori in uno studio volto a sviluppare una metodologia LCC basata su metodi Monte-Carlo per l'analisi dell'incertezza e della sensibilità [15]. Nell'ambito di tale ricerca, il presente lavoro si focalizza

calculation of Global Cost to Monte-Carlo (MC) methods. Every input parameter of the LCC assessment is considered as a stochastic variable, characterised by a probability density function. MC method, coupled to a sampling strategy, allows to effectively select draws from the input distributions and inserting them into the Global Costs calculation equation a proper number of times (depending on the envisaged level of accuracy) to predict the corresponding output distributions. Uncertainty analysis (UA) is the study of the model output distribution as a function of the input parameters' distribution. An eventual Sensitivity analysis goes one step further by apportioning the output variations to the input variations [16].

This work limits the application of the probabilistic methodology defined in [15] to the following steps, further described in the next paragraphs: (1) Definition of the assumptions of the Global Cost calculation method; (2) Inputs uncertainty characterisation; (3) Uncertainty propagation and Analysis. Thus, for brevity, the paper does not address Sensitivity Analysis and focuses on the LCC input characterisation of internal insulation solutions.

2.1 GLOBAL COST CALCULATION METHOD

The evaluation of the design options Global Costs is based on the method described in the Standard EN 15459 [3]. The cost categories included in the assessment are the following:

- Initial investment costs (C_I). They represent the purchase, construction/ installation costs of the design options considered.
- Energy costs ($CE_{(i)}$). They represent annual costs referred to the (i) year, obtained multiplying the annual Primary Energy consumption by the tariff for the energy carrier considered. Since this work focuses on the heating savings, the Primary Energy concerned is the heating Primary Energy that depends on the energy need (Q_H), the energy conversion factor (f_H) and the building global efficiency for heating (η_H), as reported in the following eq.

$$PE_H = \frac{Q_H}{\eta_H} f_H \quad (1)$$

The energy conversion factors and the energy tariffs are related to the specific national contexts and depend on the building heating equipment and energy source typology.

- Maintenance costs ($CM_{(i)}$). They are also considered annual costs, consistently with standard EN 15459.
- Replacement costs ($CR_{(i)}$). They are recurrent costs considered equal to the investment costs necessary to replace the whole design option, with a

sull'applicazione della metodologia a scala dei componenti dell'edificio, affrontando la valutazione delle prestazioni economiche di due alternative misure di isolamento termico interno, che rappresentano delle strategie di retrofit ampiamente utilizzate in edifici storici laddove la necessità di efficientamento energetico coesiste con quella di salvaguardia della qualità architettonica delle facciate.

Il contributo, nello specifico, si focalizza sulla fase di caratterizzazione delle incertezze dei parametri di ingresso del calcolo LCC attraverso distribuzioni di probabilità (Probability Density Functions, PDF), utilizzando i dati disponibili e concentrando l'analisi alla dimensione micro-economica, che rappresenta la prospettiva tipica di un investitore privato, o di un progettista, o del proprietario dell'immobile. Dopo una breve descrizione della metodologia probabilistica LCC sviluppata (paragrafo 2), questa viene applicata ad un edificio caso-studio per cui sono progettate due alternative misure di isolamento dall'interno (paragrafo 3) per ottenere i risultati espressi come distribuzioni di probabilità dei costi globali (paragrafo 4).

2. METODOLOGIA

La metodologia probabilistica descritta in questo lavoro combina il calcolo dei Costi Globali a metodi Monte Carlo (MC). Ciascun parametro di input dell'analisi LCC è considerato come una variabile stocastica, caratterizzata da una propria distribuzione di probabilità. Il metodo MC, associato ad una strategia di campionamento, permette di estrarre efficacemente un campione di dati da tali distribuzioni e inserire ciascuno nell'equazione di calcolo dei Costi Globali un numero appropriato di volte (a seconda del livello di accuratezza desiderato) per ottenere le corrispondenti distribuzioni di probabilità del risultato. L'analisi dell'incertezza (uncertainty analysis, UA) consiste nella definizione della distribuzione del risultato in funzione delle distribuzioni dei parametri di ingresso. L'analisi di sensitività fornisce un risultato ulteriore, permettendo di imputare la varianza dell'output alle varianze specifiche degli input [16].

Questo lavoro limita l'applicazione della metodologia probabilistica LCC, ampiamente descritta in [15], ai seguenti passaggi, approfonditi nei paragrafi seguenti: (1) Definizione delle ipotesi di calcolo del Costo Globale; (2) Caratterizzazione dell'incertezza dei parametri di input; (3) Propagazione e analisi dell'incertezza. Per ragioni di brevità, l'articolo, quindi, non affronta in dettaglio l'ulteriore fase di analisi di sensitività ma si concentra in particolare modo sulla caratterizzazione dei parametri di ingresso.

2.1 METODO DI CALCOLO DEI COSTI GLOBALI

La valutazione LCC delle opzioni progettuali è condotta sulla base del metodo dei Costi Globali descritto nella norma EN 15459 [3]. Le categorie di costi incluse nell'analisi

frequency depending on its service life (SL).

The Global Costs $Cg(t)$ referred to the calculation period (t) are obtained by summing, for each insulation solution j, the initial investment costs CI, the annual costs, discounted by the rate $R_{disc(i)}$ and multiplied by the rate of development of the prices $Rp(i)$ for every year, as shown in the following eq.(2).

$$Cg_{(t)} = CI_{(j)} + \sum_{i=1}^{ep} [(CM_{(i)} + CE_{(i)}) * R_{disc(i)} * (1 + Rp_{(i)})^i] + CR_{(i)} - ValF_{(t)} \quad (2)$$

At the end of the calculation period, the residual value of the components $Val_{F(t)}$ is taken into account to determine the final costs. It is calculated based on a straight-line depreciation of the initial investment or replacement cost of the component until the end of the calculation, discounted at the beginning of the evaluation period.

The discount rate $R_{disc(i)}$ depends on the inflation rate $Ri_{(i)}$ and the interest $R_{(i)}$. Since a dynamic calculation according to EN 15459 is taken into account, we consider annual variations of the discount rate as well as annual variations of the rate of development of prices for any cost considered in the annual costs (i.e. energy costs, periodic or replacement costs, maintenance costs).

The discount rate $R_{disc(i)}$ is calculated as in Eq.(3).

$$R_{disc(i)} = \left(\frac{1}{1 + \frac{R_{(i)} - Ri_{(i)}}{1 + Ri_{(i)}}} \right)^i \quad (3)$$

2.2 UNCERTAINTY CHARACTERIZATION, PROPAGATION AND ANALYSIS

Uncertainty analysis requires quantifying the Probability Density Functions of the model's input parameters (the inputs of the GC calculation). This phase of uncertainty characterisation consists on developing a systematic approach in order to identify the uncertainty sources to be considered in the specific context of LCC analysis of different building EEMs and quantifying their PDFs, based on available data sets, literature, databases, time series, etc. When limited data are available, uncertainty characterization is based on authors' expertise and judgement. The PDF of the majority of input parameters (e.g. investment costs, energy tariffs, etc. ...) is obviously related to the national context and the specific case study where the LCC is performed.

sono le seguenti:

- I costi di investimento iniziali (CI). Questi rappresentano i costi di costruzione/installazione delle soluzioni progettuali scelte.
- I costi energetici (CE(i)). Questi rappresentano i costi annuali -riferiti all'anno (i)- ottenuti moltiplicando il consumo annuale di energia primaria per la tariffa del vettore energetico considerato. Poiché questo lavoro si concentra sul risparmio energetico ottenuto per il riscaldamento, il parametro di interesse è l'energia primaria per il riscaldamento, che è funzione dell'energia utile (Q_{it}), del fattore di conversione dell'energia (f_{it}) e dell'efficienza globale dell'edificio per il riscaldamento (η_{it}), come riportato nella seguente eq. (1).

I fattori di conversione e le tariffe energetiche sono relativi allo specifico contesto nazionale e dipendono dall'impianto di riscaldamento installato nell'edificio e dal vettore energetico usato.

- I costi di manutenzione ($CM_{(i)}$). Anche questi sono considerati costi annuali, coerentemente con la norma EN 15459.
- I costi di sostituzione ($CR_{(i)}$). Questi rappresentano costi ricorrenti, pari ai costi di investimento necessari per sostituire l'intera soluzione progettuale, con una frequenza dipendente dalla vita utile (SL) del sistema considerato.

I Costi Globali $Cg_{(t)}$ riferiti al periodo di calcolo (t) sono calcolati sommando, per ogni soluzione progettuale j, i costi di investimento iniziale CI, i costi annuali (energetici e di manutenzione) e quelli ricorrenti (di sostituzione), attualizzati tramite il fattore di sconto $R_{disc(i)}$ e moltiplicati ogni anno per un ulteriore tasso di crescita dei prezzi $Rp(i)$ come mostrato nella seguente eq. (2).

Alla fine del periodo di calcolo, viene preso in considerazione anche il valore residuo dei componenti $Val_{F(t)}$ in modo da determinare i costi effettivi. Questo valore residuo è calcolato sulla base di un deprezzamento lineare dei costi di investimento o sostituzione del componente fino alla fine del periodo di calcolo, attualizzato all'anno iniziale del calcolo.

Infine, il fattore di sconto $R_{disc(i)}$ dipende dal tasso di inflazione $Ri_{(i)}$ e dal tasso di interesse $R_{(i)}$. Poiché è stata condotta un'analisi di tipo "dinamico" in accordo con la EN 15459, abbiamo tenuto conto delle variazioni annuali sia del fattore di sconto che del tasso di crescita dei prezzi per tutte le voci di costo annuali e ricorrenti. Il fattore di sconto viene calcolato secondo la Eq. (3).

2.2 CARATTERIZZAZIONE, PROPAGAZIONE E ANALISI DELL'INCERTEZZA

L'analisi dell'incertezza richiede la quantificazione delle distribuzioni di probabilità di tutti i parametri incerti di input del modello (ossia i dati di ingresso del calcolo del costo globale). Questa fase di caratterizzazione dell'incertezza consiste nello sviluppo di un approccio sistematico per identificare le fonti di incertezza da considerare nel contesto specifico dell'analisi LCC di misure

The uncertainty propagation allows the quantification of the uncertainty of the outputs as a result of possible variance of the input parameters. Monte Carlo methods are effective techniques to propagate parameter uncertainties into the distribution of the output variable. However, the quality of the outcome is dependent on the number of simulations carried out and the calculation can be heavily time-consuming. In order to obtain accurate Global Cost results distributions in a short time (and effectively perform an eventual Sensitivity Analysis of inputs influence), Sobol's sequences are used as quasi-random sampling technique, to generate samples of the inputs PDFs as uniformly as possible [16]. The number of model evaluations (sample size) depends on the number of input variables. The smallest sample size for the Sobol indices calculation is $n(2k+2)$, where n is the minimum model evaluations for estimating one individual effect; n takes the value of 16, or 32, 64...; k is the number of variables [17].

The sampling efficiency can be assessed by comparing the PDFs of the output sample for some cases with a reference Basic Random sample simulation at high number of runs.

Data fitting for the uncertainty characterisation, sample generation, uncertainty propagation are performed through *R* [18], a free software environment for statistical computing and graphics.

3. APPLICATION TO A CASE STUDY

3.1 INTERNAL INSULATION SOLUTIONS FOR A HISTORIC BUILDING RENOVATION

The case study investigates the following two alternative internal insulation solutions as design options for a historic building retrofit intervention:

- Design option A: 11 cm XPS (Extruded Polystyrene) coupled with plasterboard, without vapour barrier, directly fixed to the wall through a specific mortar (table 1);
- Design option B: 12 cm Cork coupled with plasterboard, with vapour barrier, fixed to the wall through a metallic frame (table 2);

The solutions are considered as design options to insulate a plastered brick masonry (29 cm thickness, U-value 1.76 W/m²K) of a historic building case study, better described in [19]. The internal insulations allow to reach almost the same U-value for the wall based on the actual requirements ($U \leq 0.30$ imposed by Italian Ministerial Decree 26/06/2015 for "second level renovation" interventions, that consist on the only envelope insulation), in the Italian climatic zone "E" (the most widespread in Italy): 0.28 W/m²K for

di efficientamento energetico, e nella definizione delle relative PDF, sulla base della letteratura disponibile, di banche dati, serie storiche, ecc. Quando i dati disponibili sono pochi o nulli, la caratterizzazione dell'incertezza viene effettuata anche sulla base dell'esperienza degli autori. Le distribuzioni di probabilità per la maggior parte dei dati di ingresso (come i costi di investimento, le tariffe energetiche, ecc.), sono ovviamente legate al contesto nazionale e allo specifico caso di studio per il quale si applica l'analisi LCC.

*La propagazione dell'incertezza permette di quantificare la distribuzione di probabilità sulla base della varianza dei parametri di ingresso. I metodi di Monte Carlo sono tecniche efficaci per propagare le incertezze dei parametri di input ottenendo la distribuzione dell'output. Tuttavia la qualità del risultato dipende dal numero di simulazioni effettuate e il calcolo potrebbe richiedere molto tempo. Al fine di ottenere distribuzioni risultanti del Costo Globale accurate, pur in breve tempo, ed efficacemente eseguire un'eventuale analisi di sensitività per valutare l'influenza del singolo input sul risultato, sono state utilizzate le sequenze di Sobol -una tecnica di campionamento quasi-random- per generare dei campioni più uniformi possibile [16], partendo dalle distribuzioni dei dati di ingresso. Il numero di iterazioni di calcolo (pari alla dimensione del campione) dipende dal numero dei dati di input. La dimensione minima di tale campione per il calcolo degli indici di Sobol è $n(2k+2)$, dove n assume il valore di 16, 32, 64, ecc.; mentre k è il numero di variabili [17]. L'efficienza del campionamento può essere valutata confrontando le relative distribuzioni dell'output con una distribuzione di riferimento ottenuta con metodo Monte Carlo a campionamento casuale ed elevato numero di iterazioni (nel nostro caso 20000). Il fitting dei dati per la caratterizzazione delle PDF, la generazione del campione e la propagazione dell'incertezza sono stati eseguiti utilizzando *R* [18], un software di analisi statistica.*

3. APPLICAZIONE AD UN CASO STUDIO

3.1 SOLUZIONI DI ISOLAMENTO DALL'INTERNO PER IL RECUPERO DI UN EDIFICIO STORICO

La metodologia precedentemente descritta è stata applicata per il confronto di due soluzioni alternative di isolamento dall'interno, scelte come soluzioni progettuali per un intervento di recupero di un edificio storico:

- *Soluzione A: costituita da 11 cm di XPS, accoppiato a lastre in cartongesso, senza barriera al vapore e direttamente fissato al muro per mezzo di apposite malte adesive (tabella 1);*
- *Soluzione B: costituita da 12 cm di sughero, accoppiato a lastre in cartongesso, con barriera al vapore, fissato al muro per mezzo di una struttura metallica (tabella 2).*

Le soluzioni menzionate sono state scelte per isolare una muratura intonacata di mattoni (29 cm di

design option A and 0.29 W/m²K for design option B. The slight different values depend on the commercial insulation thicknesses available in the market.

spessore, trasmittanza termica U pari a 1.76 W/m²K) di un edificio storico, preso come caso studio e meglio descritto in precedenti lavori [19]. Queste soluzioni di

Layer	Thickness (m)	Density (kg/m ³)	Thermal conductivity (W/mK)
Plasterboard	0,0125	760	0,20
XPS insulating material	0,11	15	0,035
Mortar	0.015	1.8	0.9

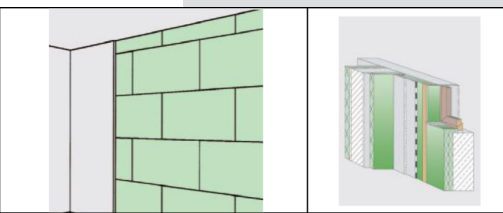


Table 1. Design option A.

Layer	Thickness (m)	Density (kg/m ³)	Thermal conductivity (W/mK)
Plasterboard	0,0125	760	0,20
Vapour barrier			
Cork insulating material	0,12	120	0,039

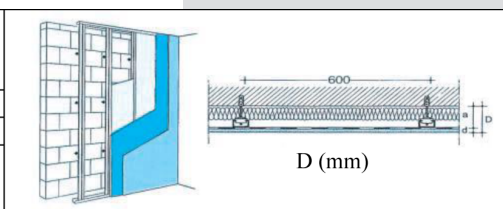


Table 2 Design option B.

The heat transmission losses through the insulated walls for the two design options, which represent the energy needed (Q_H), limiting the analysis “at component scale”, have been calculated according to national technical standard UNI TS 11300, that implemented at national level the European standard EN 13790. Natural gas was assumed as the building heating source. Consequently, natural gas tariffs were considered for the calculation of energy costs.

3.2 DEFINITION OF THE STOCHASTIC INPUTS AND IMPLEMENTATION OF THE LCC PROBABILISTIC METHODOLOGY

In order to lead the Global Costs calculation in probabilistic terms and perform the Monte Carlo simulation, a PDF has been assigned to the following input variables, based on available data and authors’ judgment: (1) Inflation rate, (2) Market interest rate, (3) Rate of development of prices, (4) Component investment costs, (5) Components lifespans, (6) Components maintenance costs, (7) Heat transmission losses, (8) Natural gas equipment efficiency, (9) Natural gas conversion factor and (10) Natural gas national tariff.

The stochastic character of the economic parameters (1-3) depends on the extreme uncertainty of the financial market, whose evolution in the future is difficult to be exactly predicted. For this assessment, we considered

isolamento dall’interno permettono di raggiungere quasi lo stesso valore di trasmittanza per la muratura, sulla base degli attuali limiti normativi ($U \leq 0,30$, come imposto dal D.M.26/06/2015 per interventi di “ristrutturazione di secondo livello”), per la zona climatica “E” (la più diffusa in Italia): 0,28 W/m²K per la soluzione A e 0,29 W/m²K per la soluzione B. La lieve differenza nei valori dipende dai diversi spessori di isolamento disponibili sul mercato, per le diverse tipologie di isolante. Le perdite per trasmissione di calore attraverso le pareti isolate con le due opzioni, che rappresentano l’energia utile per il riscaldamento (Q_H), limitando l’analisi a “scala del componente”, sono state calcolate secondo la norma tecnica nazionale UNI TS 11300, che ha implementato a livello nazionale la norma europea EN 13790. Il gas naturale è stato assunto come vettore energetico per il riscaldamento; di conseguenza, sono state prese in considerazione le tariffe del gas naturale per il calcolo dei costi energetici.

3.2 DEFINIZIONE DELLE PDF DEI PARAMETRI DI INGRESSO STOCHASTICI E IMPLEMENTAZIONE DELLA METODOLOGIA LCC

Per condurre il calcolo dei Costi Globali in termini probabilistici ed eseguire la simulazione Monte Carlo, è stata assegnata una distribuzione di probabilità a ciascuna delle seguenti variabili di input, sulla base dei dati disponibili e del giudizio degli autori: (1) tasso di inflazione, (2) tasso di interesse di mercato, (3) tasso di crescita dei prezzi dei prodotti, (4) costi di investimento dei componenti, (5) vita utile dei componenti, (6) costi di manutenzione dei componenti, (7)

a “baseline” scenario: the predictions up to 2050 of the growth rate of development of prices, of the market interest rate, and of the inflation rate have been generated with annual frequency using a VAR (Vector Autoregression) model based on OECD quarterly data. For sake of brevity, it is not possible to describe in detail the whole analysis performed. However, it was seen that the predictions, generated as result of the VAR, move mostly within an estimated confidence interval band (confidence level of 95%), better defined in Table 3. The investment costs of the two design options are obtained considering specific material prices and labour costs, VAT included. The material costs are the selling prices to the consumers (private investor) coming from the producers’ price lists. The labour costs depend on the installation procedure (which is different for design option A and B) and could depend on the enterprise organization facing the specific work. Based on national data on labour costs depending on the workers’ qualification and geographical variations (as reported in a study of the Italian Labour Ministry [20]), data-fitting and goodness-of-fit plots (density, cumulative density function (CDF), Q-Q plot and P-P plot) for labour costs data have been performed (reported as examples in Figure 1), in order to find the theoretical distribution that better represents the data distribution. The PDFs obtained are normal distributions, whose accuracy was checked through a Jarque–Bera test (p -values = 0.3006 for design option A and 0.307 for design option B).

perdite per trasmissione di calore, (8) efficienza dell'impianto termico, (9) fattore di conversione del gas naturale e (10) tariffa nazionale del gas naturale.

Il carattere stocastico dei parametri economici (1-3) dipende dall'estrema incertezza del mercato finanziario, la cui evoluzione in futuro è di difficile previsione. Per questo studio abbiamo preso in considerazione uno scenario “base”: le previsioni annuali al 2050 del tasso di crescita dei prezzi, del tasso di interesse e del tasso di inflazione sono state generate utilizzando un modello VAR (vettoriale autoregressivo) utilizzando serie storiche degli ultimi anni. Per ragioni di brevità, non è possibile descrivere in dettaglio l'intera analisi eseguita. Tuttavia, si è visto come le previsioni, risultanti dal modello VAR, si muovono per lo più entro un certo intervallo di confidenza, meglio definito in tabella 3.

I costi di investimento delle due soluzioni isolanti sono stati ottenuti considerando i prezzi degli specifici materiali e i costi della manodopera, IVA inclusa. I costi dei materiali rappresentano i prezzi di vendita agli acquirenti privati, provenienti dai listini prezzi dei produttori. I costi della manodopera, invece, dipendono dalla procedura di installazione (che è diversa per la soluzione A e B) e dall'organizzazione dell'impresa esecutrice. Sulla base di dati nazionali sul costo della manodopera, a seconda della qualifica professionale e della variabilità geografica (analisi del Ministero del Lavoro [20]), è stato eseguito il fitting e sono stati calcolati i parametri di affidabilità del modello (grafici QQ e PP, riportati in figura 1), al fine di trovare la distribuzione teorica che meglio approssima i dati.

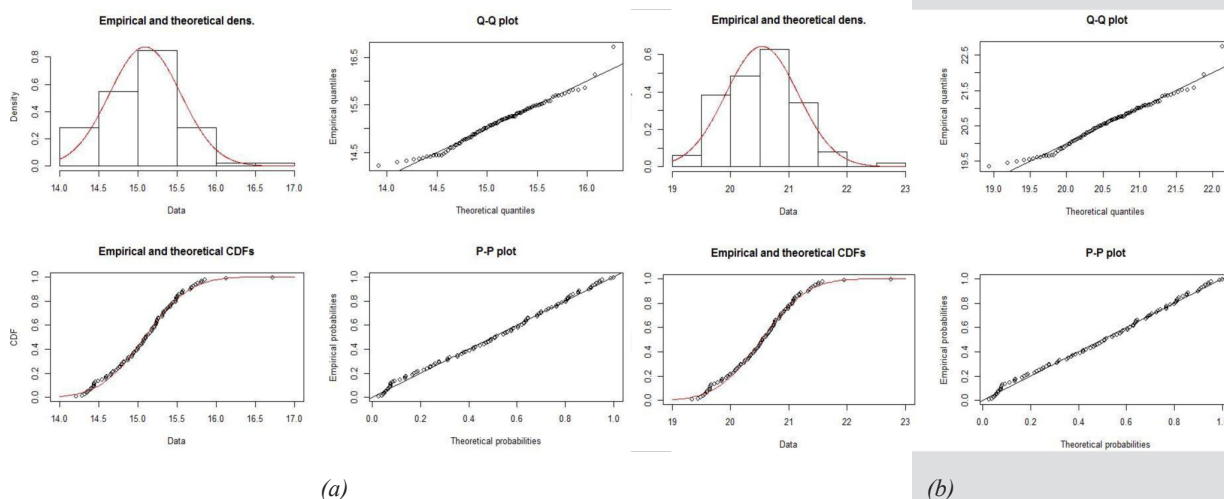


Figure 1. Goodness-of-fit plots (density, CDF, Q-Q plot and P-P plot) for the labour costs data. (a) Design option A (b) Design option B

With regard to the maintenance costs of the internal insulation solutions, the only maintenance of the interior finishing was taken into account, considering the cost of internal painting, obtaining PDFs similarly to what has been done for the investment costs. Consistently with standard EN 15459, maintenance

Le PDF ottenute sono distribuzioni normali, la cui accuratezza è stata validata tramite il test Jarque-Bera (valori $p = 0.3006$ per la soluzione A e 0.307 per la soluzione B).

Per quanto riguarda i costi di manutenzione, è stata presa in considerazione la manutenzione della

costs are then yearly distributed, based on an internal painting reference service life of 15 years (data obtained from INIES database [21]).

The design option replacement cost is considered as the cost for the replacement of the whole internal insulation solution. Since internal insulation solutions are composed by several materials with different service lives, the SL of the whole design option is considered equal to the shortest SL among all the materials SLs. So specifically, as internal insulation's solutions are composed by plasterboard and insulation, the only SL of the external layer (plasterboard) was considered as the reference SL. The deterministic value of the reference SL (30 years) is taken from INIES database. A probabilistic factorial method, as described in EN 15686-8 [22], is then applied to obtain the PDF of the estimated service life, using uniform distributions (0.9;1.1) for all factors (A-B-C-D-F-G) except for factor E, fixed at a deterministic value of 1 (considered uninfluential). The PDF of SL obtained is a normal distribution. Concerning the energy uncertainties, the LCC analysis was carried out at "component level", so the energy need (QH) corresponds to the heat transmission losses through the building wall during the heating season for design options A and B. To the deterministic results, standard deviations were attributed based on authors' judgment and previous studies. Furthermore, as already mentioned, the analysis was focused only on the natural gas scenario. In our judgment, a uniform distribution was assigned to the heating equipment efficiency. Considering that the internal insulation measures are usually coupled to a general renovation intervention on the whole building, including the heating equipment, the efficiency chosen is quite high (from 80% to 100%).

Finally, according to EU Energy Market legislation (Directive 2009/72/EC and Directive 2009/73/EC), the consumers are free to buy electricity and gas from the supplier of their choice (free market), but at the same time regulated prices are set and established (regulated market) by a specific independent body (in Italy the Italian Regulatory Authority for Electricity and Gas [23]). Thus, the PDFs for the energy tariffs were established as uniform distributions by considering as mean value, the energy tariff for the energy source concerned in the regulated market (natural gas for this case-study) and as variability source, the energy tariff variability for the energy source concerned in the free market. All prices are all taxes included.

In Table 3 the PDFs of the parameters included in the LCC assessment are summarized.

The uncertainty analysis was performed considering the PDFs of the LCC inputs reported in Table and the Global Costs calculation was carried out with

sola finitura interna (tinteggiatura) costruendo una PDF in modo simile a quanto fatto per i costi di investimento. In accordo con la norma EN 15459, i costi di manutenzione sono stati poi distribuiti annualmente, sulla base di una vita utile di riferimento di 15 anni per la tinteggiatura (banca dati INIES [21]).

Il costo di sostituzione è stato per l'intera soluzione di isolamento. Poiché tali sistemi sono composti da diversi materiali con diverse durate di vita utile (SL), la SL dell'intera soluzione è stata considerata pari alla SL del componente con durata più breve. Quindi, nello specifico, poiché le soluzioni di isolamento dall'interno considerate sono composte da cartongesso e isolante, la SL del cartongesso è stata presa come SL di riferimento. Il suo valore deterministico (30 anni) è stato reperito dal database INIES [21]. È stato poi applicato a tale valore il metodo probabilistico fattoriale descritto nella norma EN 15686-8 [22], per ottenere la PDF della vita utile stimata, utilizzando distribuzioni uniformi (0.9; 1.1) per tutti i fattori (A-B-C-D-F-G) eccetto per il fattore E, considerato non influente. La PDF della SL ottenuta è una distribuzione normale.

Per quanto riguarda le incertezze sulle grandezze di tipo "energetico", l'analisi LCC è stata effettuata a "livello del componente", ottenendo l'energia utile (QH) corrispondente alle perdite di trasmissione attraverso le pareti dell'edificio durante la stagione di riscaldamento sia per la soluzione A che B. Ai risultati deterministici sono state attribuite delle deviazioni standard sulla base di valutazione degli autori su studi precedenti. All'efficienza dell'impianto di riscaldamento è stata assegnata una distribuzione uniforme (80%-100%), considerando che le misure di efficientamento dell'involucro edilizio in edifici storici sono generalmente abbinate ad un intervento di ristrutturazione generale dell'impianto termico.

Infine, secondo la legislazione europea sul mercato dell'energia (direttiva 2009/72/CE e direttiva 2009/73/CE), i consumatori sono liberi di acquistare elettricità e gas dal fornitore che preferiscono (mercato libero), ma allo stesso tempo esistono dei prezzi per l'energia regolamentati e stabiliti (mercato regolamentato) da un organismo indipendente (in Italia l'Autorità Regionale per l'Energia Elettrica e il Gas [23]). Pertanto, le PDF per le tariffe energetiche sono state considerate uniformi, prendendo come valore medio la tariffa energetica del vettore energetico considerato all'interno del mercato regolamentato (gas naturale in questo caso studio) e come fonte di incertezza, le variazioni sulle tariffe del libero mercato.

Nella tabella 3 sono riepilogate le distribuzioni descritte sui parametri di ingresso del calcolo LCC.

Il calcolo probabilistico dei costi globali è stato effettuato considerando un periodo di 30 anni. La tecnica di campionamento con sequenze di Sobol è stata usata per generare dei campioni dalle distribuzioni degli input ed eseguire l'analisi probabilistica secondo la metodologia sviluppata e descritta nel paragrafo 2.2. Sono stati fatti diversi tentativi per valutare

a calculation period of 30 years.

Sobol's sequences technique was used to generate samples from these input PDFs and perform the probabilistic assessment according to the methodology developed and described in paragraph 2.2. Attempts with increasing sample sizes (288, 576, 1152, 2304, 4608, 9216) were generated. The same number of annualized predictions of the three endogenous macroeconomic variables for the baseline macro-economic scenario was also generated. Therefore, the Global Cost calculation is performed following different trajectories for the three macroeconomic variables, a number of time equal to the sample size, and each time the other LCC inputs are drawn from the Sobol samples generated. The efficiency of the sampling strategy (convergence assessment) was evaluated by comparing the PDFs of the output samples with a reference Basic Random sample (BRS) simulation at high number of runs (20000). The probability distributions of the resulting Global Costs in 30 years of the two design options were then assessed.

l'accuratezza del risultato ottenuto aumentando progressivamente le dimensioni del campione (288, 576, 1152, 2304, 4608, 9216). Sono state eseguite anche lo stesso numero di previsioni annualizzate delle tre variabili macroeconomiche endogene per lo scenario macroeconomico di base. In questo modo, il calcolo del costo globale viene eseguito in base a diverse traiettorie per le tre variabili macroeconomiche, un numero di volte pari alla dimensione del campione generato per gli altri input LCC. Sono state così stimate le distribuzioni di probabilità dei costi globali delle due soluzioni progettuali risultanti in 30 anni.

4. RISULTATI

Per verificare se il numero delle simulazioni condotte fosse sufficiente a garantire la qualità del risultato (la PDF del campione dell'output), è stata valutata, per la soluzione A, la convergenza della media e della deviazione standard di campioni di output di diverse dimensioni con un campione di riferimento ad elevato numero di iterazioni (20000). Il grafico in figura 2 rappresenta i valori normalizzati della media e

LCC Parameters		Standard value	Distribution	Reference for standard value	Reference for distribution
Duration of the calculation [years]	A - B	30	-		
Inflation rate [%]	A - B	0.0003	Nor (mean=0.0003, sd=0.0246)	Quarterly OECD financial statistics	confidence interval of the annual predictions generated as result of a VAR estimates
Market interest rate [%]	A - B	0.0334	Nor (mean=0.0334, sd=0.0033)	Quarterly OECD financial statistics	
Rate of development of prices [%]	A - B	0.005	Nor (mean=0.005, sd=0.009)	Quarterly OECD national accounts	
Component Investment cost [€]	A - XPS	€ 54.98	Nor (mean=54.98, sd=0.45)	Producers pricelists for materials	Geographic variability of the labour cost
	B - cork	€ 91.24	Nor (mean=91.24, sd=0.62)		
Component Lifespan [years]	A - B	30	Nor (mean= 30, sd=2.98)	INIES database	Probabilistic factor method (ISO 15686-8)
Component Maintenance cost [€/y]	A -B	1.8	Nor (mean= 1.81, sd= 0.03)	Regional pricelists for materials	Geographic variability of the labour cost
Heat transmission losses [kWh/y] [m ³ /y]	A - XPS	48.49 kWh/ Y	Nor (mean=5.00 , sd=0.38)	Energy calculation (EN13790)	sd from WP4 case study
		5.00 m ³ /y			
	B - cork	51.33 kWh/ Y	Nor (mean=5.29, sd=0.53)		
		5.29 m ³ /y			
Natural Gas Equipment efficiency [-]	A - B	0.9	Uni (min=0.8, max=1.0)	Authors' judgment	Authors' judgment
Natural Gas conversion factor [-]	A - B	1.05	deterministic	D.M. 26/06/2015	-
Natural Gas national tariff [€/m ³ /y]	A - B	0.7526	Uni (min= 0.6510,max= 0.8543)	Regulated market for domestic customers	Prices variability in the free market

Table 3. PDFs of the parameters included in the LCC assessment.

4. RESULTS

To assess whether the number of simulation runs was sufficient to guarantee the quality of the outcome (the PDF of the output sample), the convergence

della deviazione standard delle PDF ottenute. Si può osservare una buona convergenza per il campione ottenuto con 4608 iterazioni (differenza percentuale con il riferimento di 0,13% per la media e 1,07% per la deviazione standard). Il calcolo dei costi globali è stato quindi eseguito

of the mean and the standard deviation of the output samples at different sample sizes has been investigated for the solution A. A good convergence is obtained for the sample with 4608 draws (percentage difference with the BRS of 0.13% for the mean and 1.07% for standard deviation). The following graph represents the normalized values of mean and standard deviation of the PDFs obtained through the different sampling sizes and the BRS (Figure 2). Then the following GC calculation for all design options was performed with 4608 iteration.

per entrambe le opzioni progettuali considerando 4608 iterazioni Monte Carlo.

La figura 3 rappresenta le distribuzioni dei Costi Globali a 30 anni per le soluzioni A e B. Il valore mediano di tali costi varia da 206 €/m² per A (XPS) a 252€/m² per B (sughero). La differenza tra i valori medi del costo globale e i relativi intervalli di incertezza sono attribuibili essenzialmente ai valori significativamente diversi dei costi di investimento per i materiali isolanti, dato che in questo studio i costi di manutenzione, nonché i costi energetici, sono considerati gli stessi

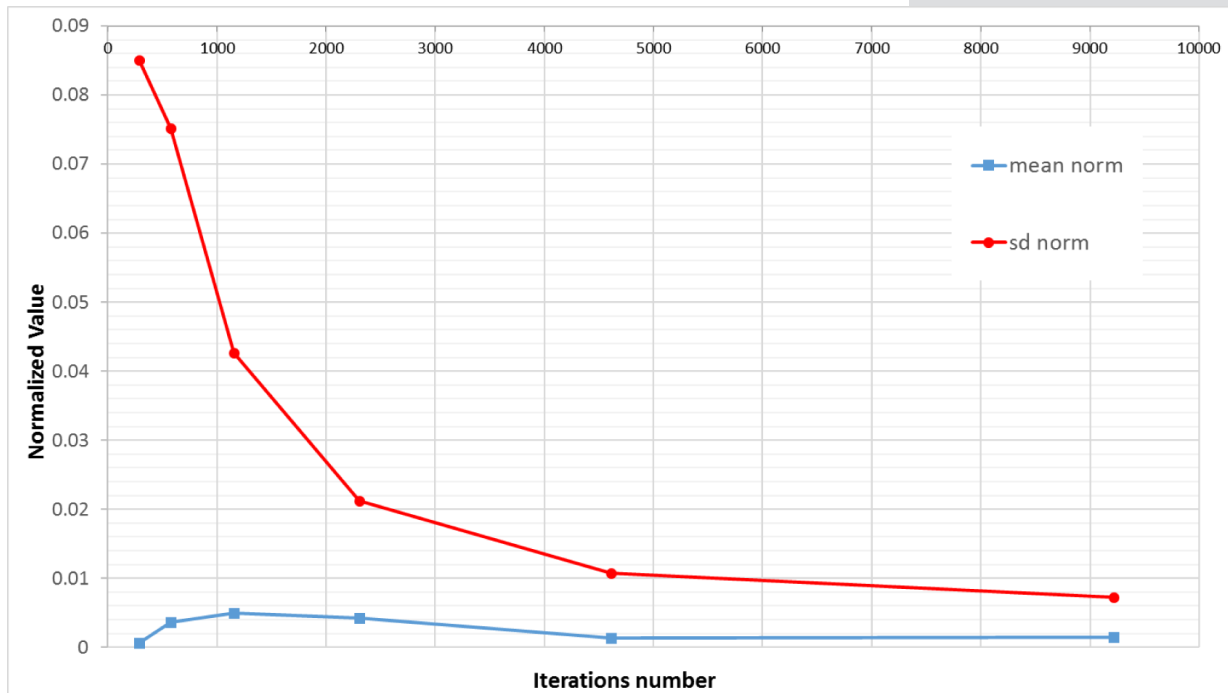


Figure 2. Normalized mean μ and standard deviation σ with different number of runs (ratio with the reference simulation).

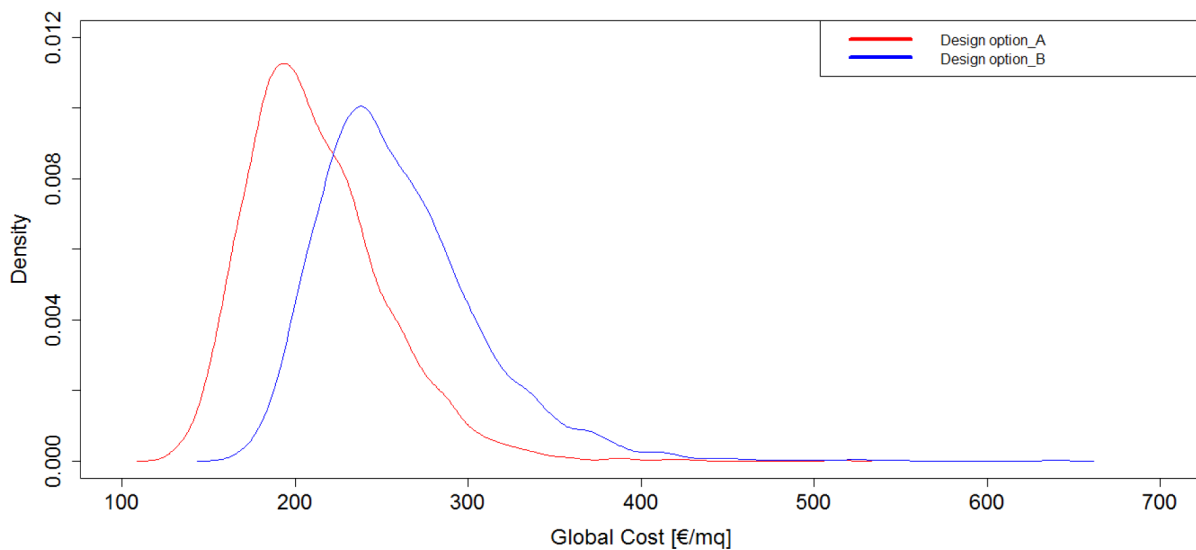


Figure 3. Probabilistic Global Costs for the design options A and B during a calculation period of 30 years.

The graphs in Figure 3 represent the PDFs of the Global Costs in 30 years for the design options A and B: the median values of the GC vary from 206 €/m² for design option A (XPS) to 252 €/m² for design option B (Cork). The difference among the Global Costs median values of the insulation measures and their uncertainty ranges is mainly due to the different values of the initial investment costs of insulation materials, given that maintenance costs as well as energy costs are almost the same in this study.

5. CONCLUSIONS

This work presents the application of a probabilistic LCC method to a case study of historic building retrofitting through internal insulation. Based on a wider Monte-Carlo based LCC methodology for uncertainty and sensitivity analysis already developed by the authors [15], this paper particularly focuses on the characterisation of the stochastic inputs for the assessments, which are mostly related to the specific design options chosen, highlighting the main assumptions, judgments and data fitting procedures on available data. The application to an illustrative case study shows the great potential of probabilistic assessment methodologies in providing more realistic information about results uncertainties and enabling more useful analysis of potential benefits of a design option. Nevertheless, the method developed should be further refined to include a deeper analysis of several alternative economic scenarios, to assess the results robustness in different conditions.

6. ACKNOWLEDGEMENTS



This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 637268.

7. REFERENCES

- [1] Ferreira M., Almeida M., Rodrigues A., Silva S.M., *Comparing cost-optimal and net-zero energy targets in building retrofit*, Building Research & Information 44, 2016, p. 188–201, doi: 10.1080/09613218.2014.975412
- [2] Filippi M., *Remarks on the green retrofitting of historic buildings in Italy*, Energy and Buildings 95, 2015, p. 15–22, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.11.001
- [3] EN 15459:2007 Energy performance of buildings - Economic evaluation procedure for energy systems in buildings.
- [4] ISO 15686-5:2008 Buildings and constructed assets - Service-life planning - Part 5: Life-cycle Costing.
- [5] Hamdy M., Hasan A., Siren K., *A multi-stage optimization method for cost-optimal and nearly-zero-energy building solutions in line with the EPBD-recast 2010*, Energy and Buildings 56, 2013, p.189–203, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.08.023
- [6] Ascione F., Bianco N., De Stasio C. [et al.], *A new methodology for cost-optimal analysis*

per le due soluzioni.

5. CONCLUSIONI

Il presente contributo descrive l'applicazione di un metodo probabilistico per la valutazione dei costi nel ciclo di vita di interventi per la riqualificazione energetica di un edificio storico attraverso l'applicazione di misure di isolamento termico interno. Sulla base di una più ampia metodologia LCC sviluppata dagli autori [15] e fondata su approcci Monte-Carlo per l'analisi di incertezza e sensibilità, questo articolo si concentra in particolare sulla caratterizzazione dei parametri di ingresso stocastici, legati alle specifiche scelte progettuali, evidenziando le principali ipotesi e procedure di data-fitting intraprese sui dati disponibili per ottenere le distribuzioni di probabilità. L'applicazione della metodologia LCC Monte-Carlo ad un caso studio dimostra il potenziale dell'approccio probabilistico nel fornire informazioni più realistiche sulle incertezze del risultato, consentendo analisi più utili sul beneficio e la convenienza di misure di efficientamento energetico di edifici. Tuttavia il metodo probabilistico presentato deve essere ulteriormente sviluppato, includendo una accurata analisi di scenari macro-economici alternativi, per valutare la robustezza dei risultati ottenuti in diverse condizioni.

7. RICONOSCIMENTI

Questo progetto ha ricevuto un finanziamento dal programma di ricerca e innovazione dell'Unione Europea Horizon 2020, con il contratto di sovvenzione No 637268.

- by means of the multi-objective optimization of building energy performance, *Energy and Buildings* 88, 2015, p.78–90.
- [7] Morrissey J., Horne R.E., *Life cycle cost implications of energy efficiency measures in new residential buildings*, *Energy and Buildings* 43, 2011, p.915–924, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.12.013
- [8] Mauro G.M., Hamdy M., Vanoli G.P. [et al.], *A new methodology for investigating the cost-optimality of energy retrofitting a building category*, *Energy and Buildings* 107, 2015, p.456–478, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.08.044
- [9] Han G., Srebric J., Enache-Pommer E., *Variability of optimal solutions for building components based on comprehensive life cycle cost analysis*, *Energy and Buildings* 79, 2014, p.223–231, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.10.036
- [10] Burhenne S., Tsvetkova O., Jacob D. [et al.], *Uncertainty quantification for combined building performance and cost-benefit analyses*, *Building and Environment* 62, 2013, p. 143–154, doi: 10.1016/j.buildenv.2013.01.013
- [11] Di Giuseppe E., Iannaccone M., Telloni M. [et al.], *Probabilistic life cycle costing of existing buildings retrofit interventions towards nZE target: Methodology and application example*, *Energy and Buildings* 144, 2017, p. 416–432, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.03.055
- [12] Gluch P., Baumann H., *The life cycle costing (LCC) approach: a conceptual discussion of its usefulness for environmental decision-making*, *Building and Environment* 39, 2004, p.571–580, doi: 10.1016/j.buildenv.2003.10.008
- [13] Sesana M.M., Salvalai G., *Overview on life cycle methodologies and economic feasibility for nZEBs*, *Building and Environment* 67, 2013, p.211–216, doi: 10.1016/j.buildenv.2013.05.022
- [14] Ilg P., Scope C., Muench S., Guenther E., *Uncertainty in life cycle costing for long-range infrastructure. Part I: leveling the playing field to address uncertainties*, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2016, p. 1–16, doi: 10.1007/s11367-016-1154-1
- [15] Di Giuseppe E., Massi A., D’Orazio M., *Impacts of Uncertainties in Life Cycle Cost Analysis of Buildings Energy Efficiency Measures: Application to a Case Study*, *Energy Procedia* 111, 2017, p. 442–451, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.206
- [16] Saltelli A., Ratto M., Andres T., *Global Sensitivity Analysis: The Primer*. Chichester: WILEY-VCH Verlag, 2008
- [17] Nguyen A-T., Reiter S., *A performance comparison of sensitivity analysis methods for building energy models*, *Building Simulation* 8, 2015, p.651–664, doi: 10.1007/s12273-015-0245-4
- [18] The R Project for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>. (Accessed: 5 Jul 2016)
- [19] Di Giuseppe E., Iannaccone M., Telloni M. [et al.], *Development of a probabilistic methodology for LCC assessments of building retrofit measures*, In: Guida A., Pagliuca A. (eds) *Colloqui.AT.e 2016. MATER(i)A Materials Architecture Technology Energy/ Environment Reuse (Interdisciplinary) Adaptability*. Gangemi Editore, 2016, p. 289–298
- [20] <http://www.lavoro.gov.it/temi-e-priorita/rapporti-di-lavoro-e-relazioni-industriali/focus-on/Analisi-economiche-costo-lavoro/Pagine/Elenco-dei-Decreti-emanati-Anno-2015.aspx>. (Accessed: 27 Oct 2016)
- [21] <http://www.inies.fr/produits-de-construction/>. (Accessed: 16 Jun 2016)
- [22] ISO 15686-8 Buildings and constructed assets - Service-life planning - Part 8: Reference service life and service-life estimation
- [23] <http://www.autorita.energia.it/it/index.htm>. (Accessed: 27 Oct 2016)