

Approcci valutativi alla riqualificazione energetica degli edifici: stato dell'arte e futuri sviluppi

Chiara D'Alpaos*, Paolo Bragolusi**

parole chiave: riqualificazione energetica degli edifici, approcci valutativi, analisi economica, review sistematica

Abstract

La Direttiva Europea 2010/31/UE e la Direttiva 2012/27/UE riconosce alla riqualificazione energetica del settore edilizio un ruolo fondamentale per il raggiungimento degli obiettivi 20-20-20 (e successivi target fissati per il 2030 e il 2050) e individua gli interventi di efficientamento energetico sugli edifici esistenti come leva di sviluppo e di occupazione nel settore edilizio in crisi.

Il recupero energetico del patrimonio immobiliare esistente è tuttavia un processo complesso che coinvolge molteplici fattori e solleva rilevanti problematiche non solo di natura tecnica e tecnologica, ma anche ambientale, sociale e culturale. Il tema è cruciale ed è ampiamente dibattuto in letteratura. Sono numerosi gli studi che propongono modelli per la stima dei consumi energetici e analizzano l'impatto di misure di incremento dell'efficienza energetica degli edifici sulla riduzione delle emissioni climalteranti, così come esiste un nutrito filone di letteratura sulle metodologie di

valutazione delle diverse strategie di intervento in termini di impatto economico, ambientale e sociale (es. analisi multicriteriali, life cycle costing e assessment, modelli economici, ecc.). Ciononostante si avverte la mancanza contributi che affrontino una revisione sistematica della letteratura e propongano una classificazione degli studi più rilevanti relativi agli approcci valutativi innovativi e multidisciplinari.

Il presente lavoro propone una review sistematica della letteratura, al fine di delineare lo stato dell'arte sulle metodologie di valutazione delle strategie di retrofit energetico degli edifici. Attraverso un protocollo dinamico di revisione sistematica della letteratura, vengono individuati i paper più rilevanti e viene proposto un quadro sinottico che sintetizzi gli aspetti metodologici e descrittivi, consenta di individuare gli eventuali gap e di delineare possibili ambiti di ricerca futuri.

1. INTRODUZIONE

Nel marzo 2007 il Consiglio Europeo ha identificato l'efficienza energetica come uno degli elementi essenziali della strategia globale sul cambiamento climatico e l'energia, sottolineando la necessità di conseguire l'obiettivo di una riduzione entro il 2020 del 20% del consumo energetico dell'Unione Europea previsto per il 2020 (COM, 2008). Successivamente, nel 2014 la Commissione Europea ha fissato

i nuovi obiettivi 2030 ("Quadro per il Clima e l'Energia 2030) per la riduzione delle emissioni inquinanti: miglioramento dell'efficienza energetica nella misura del 27% rispetto allo scenario corrente; riduzione pari almeno al 40% delle emissioni di gas serra rispetto ai livelli del 1990; raggiungimento del 27% della produzione energetica tramite energie rinnovabili. Il settore edilizio in Europa è responsabile del 40% del consumo totale di energia e del 36% di produzione delle emissioni di CO₂ (BPIE, 2015). È quindi considerato un

fattore chiave per il raggiungimento di tali obiettivi. Secondo il Building Stock Observatory della Commissione Europea, il patrimonio immobiliare europeo è costituito da 250 milioni di abitazioni (il 65% delle quali sono case unifamiliari e il restante 35% è costituito da appartamenti): più del 40% degli *asset* è stato costruito prima del 1960, mentre il 90% è di costruzione antecedente al 1990, antecedente cioè alla promulgazione della Direttiva europea sul rendimento energetico in edilizia (Direttiva 2002/91/UE). In particolare, il patrimonio immobiliare Italiano è il più vecchio d'Europa ed è responsabile di un fabbisogno energetico pari al 36% di quello nazionale (circa 133 Mtep). Il 70% degli edifici è stato, infatti, costruito precedentemente al 1976 (quando non erano ancora entrate in vigore le attuali norme sull'efficienza energetica) e il 25% dello *stock* totale non è mai stato oggetto di interventi di manutenzione. Secondo il rapporto annuale sull'efficienza energetica dell'ENEA (2017), la domanda di energia primaria registrata nel 2015 in Italia è risultata essere pari a 156,2 Mtep e nel settore residenziale il consumo è stato pari a 32,5 Mtep, facendo così registrare un incremento del 10% dei consumi energetici rispetto al 2014. Le politiche europee e nazionali sull'efficientamento energetico, introdotte a seguito dell'emanazione della Direttiva europea 2010/31/UE-Rifusione sull'efficienza energetica nell'edilizia (meglio conosciuta come EPBD - Energy Performance of Buildings Directive recast) e della Direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica (nota come EED - Energy Efficiency Directive), hanno favorito il processo di riqualificazione energetica del patrimonio immobiliare esistente, riconoscendo agli interventi di efficientamento energetico il ruolo di leva di sviluppo e occupazione nel settore edilizio oggi in crisi. L'obiettivo minimo prefissato per l'Italia prevede, infatti, il raggiungimento di un risparmio di energia finale pari a 25,8 Mtep da conseguire nel periodo che va dal 2014 al 2020 (ENEA, 2017). Il recupero energetico del patrimonio immobiliare esistente è, tuttavia, un processo complesso che coinvolge molteplici fattori e solleva rilevanti problematiche non solo di natura tecnica e tecnologica (Roberts, 2008), ma anche ambientale, sociale e culturale. Il tema è cruciale ed è ampiamente dibattuto in letteratura. Sono numerosi gli studi che propongono modelli per la stima dei consumi energetici e analizzano l'impatto di misure di incremento dell'efficienza energetica degli edifici sulla riduzione delle emissioni climateranti, così come esiste un nutrito filone di letteratura sulle metodologie di valutazione delle diverse strategie di intervento in termini di impatto economico, ambientale e sociale (es. analisi multicriteriali, *life cycle costing* e *assessment*, modelli econometrici, ecc.). Ciononostante si avverte la mancanza di contributi che affrontino una revisione sistematica della letteratura e propongano una classificazione degli studi più rilevanti relativi agli approcci valutativi innovativi e multidisciplinari. A tal proposito, Martínez-Molina *et al.*, (2016) propongono una disamina dal punto di vista tecnico degli interventi di miglioramento dell'efficienza e del comfort percepito dai fruitori negli edifici storici; Webb (2017) analizza e discute criticamente i criteri, i metodi e i processi decisionali utilizzati per valutare gli interventi di

retrofit in edifici storici e in edifici tradizionali; Šćepanović *et al.*, (2017) effettuano una meta-analisi dei principali interventi di riqualificazione energetica realizzati nel settore residenziale e, attraverso la loro categorizzazione, ne determinano l'efficacia in funzione del contesto in cui sono implementate; Soares *et al.*, (2017) delincono lo stato dell'arte relativo alle strategie di miglioramento delle performance energetiche e ambientali dell'ambiente costruito; Doan *et al.*, (2017) conducono una *review* sistematica sui sistemi di rating della sostenibilità ambientale nell'edilizia, analizzando i programmi di certificazione BREEAM, LEED, CASBEE e Green Star NZ; Kivimaa e MatisKainen (2018) presentano una rassegna di casi studio relativi a innovazioni a bassa energia nel settore residenziale in Europa focalizzando la ricerca sui fattori chiave per il successo degli interventi di efficientamento (es. progettazione, sostenibilità ambientale e sociale, *driver* politici, finanziari e ambientali); Pomponi e Moncaster (2016) effettuano una *review* sistematica sulle strategie di mitigazione e riduzione del carbonio grigio (*embodied carbon*) nell'ambiente costruito.

Lo scopo del presente lavoro è di utilizzare il metodo della ricerca sistematica, in riferimento alla banca dati SCOPUS, per delinare lo stato dell'arte sulle metodologie di valutazione degli interventi di retrofit energetico degli edifici. Attraverso un protocollo dinamico di revisione sistematica della letteratura, vengono individuate le parole chiave rilevanti. In una seconda fase, effettuate le analisi statistiche preliminari (meta-analisi), vengono esaminati, per ogni parola chiave che risulti rilevante, i *paper* principali o più citati reperibili in letteratura e viene proposto un quadro sinottico dei contributi più significativi che sintetizzi gli aspetti metodologici e descrittivi e consenta di individuare gli eventuali gap e delinare possibili ambiti di ricerca futuri.

Il lavoro si articola come segue. Nel paragrafo 2 è illustrato il processo di revisione sistematica della letteratura, sono presentate e discusse le meta-analisi e viene proposto un quadro sinottico di approfondimento sui contributi più significativi in tema di valutazione degli interventi effettuata secondo l'approccio del LCC. Nel paragrafo 3 sono discussi i risultati della revisione e individuati i potenziali *gap* presenti in letteratura. Nel paragrafo 5 sono svolte alcune considerazioni conclusive.

2. REVIEW SISTEMATICA

Nella presente sezione, è proposta una disamina sistematica della letteratura (Fink, 2005) al fine di aggiornare lo stato dell'arte e delinare un quadro teorico-metodologico di riferimento sulla valutazione delle strategie ottimali di riqualificazione energetica degli edifici esistenti e individuare evidenze che possano risultare utili nella predisposizione di eventuali linee guida. Secondo il protocollo di ricerca proposto da Brown (2007), a partire dalla formulazione di un chiaro quesito di ricerca, nella *review* sistematica viene identificata, selezionata e valutata in maniera critica la letteratura rilevante nonché vengono analizzati i dati illustrati e discussi nei contributi inclusi nella revisione,

secondo una procedura che si articola in tre fasi (*step*). In una prima fase di pianificazione della *review* (*planning the review*), è stato verificato che l'ipotesi di ricerca fosse originale ed è stata effettuata una mappatura della letteratura esistente (*literature scoping and mapping*) al fine di individuare i principali temi investigati in tema di approcci valutativi, le eventuali sovrapposizioni e le possibili estensioni. È stato inoltre definito un "protocollo dinamico" di revisione che prevede la possibilità di introdurre delle modifiche in itinere sia dei criteri e dei parametri di ricerca sia dell'impostazione metodologica della *review*, al fine di ottimizzare l'attività di revisione stessa e di renderla il più possibile flessibile e obiettiva. Nella seconda fase (*conducting of the review*), è stata condotta la revisione sistematica, avvalendosi di un gruppo di esperti delle discipline oggetto di analisi che hanno fornito dei *feedback* utili all'ottimizzazione del processo. Il passo successivo, di importanza fondamentale, ha portato a: a) l'individuazione delle parole chiave ritenute più significative e delle relative stringhe di ricerca; b) la costruzione e lo sviluppo dinamico dei criteri di ricerca, impostando gli opportuni vincoli per restringere il campo di indagine secondo un approccio di tipo sequenziale; c) la verifica sulla qualità dei contributi selezionati, escludendo gli articoli ritenuti non significativi. È stato quindi creato un database in cui tutti i contributi, oggetto di successive indagini e analisi specifiche, sono stati catalogati, riportandone titolo, autore/i, data di pubblicazione, collocazione editoriale, principale oggetto di analisi che ha portato all'inclusione del contributo nel database stesso. Nella terza e ultima fase (*reporting of the review*), è stata condotta un'analisi descrittiva e tematica dei contributi e sono stati discussi i risultati ottenuti delineando così uno stato dell'arte aggiornato ed evidenziando i potenziali gap presenti in letteratura.

2.1 Ricerca sistematica

La ricerca sistematica qui proposta è incentrata sugli approcci valutativi degli investimenti in riqualificazione ed efficientamento energetico degli edifici. Il miglioramento delle performance energetiche degli edifici è un processo complesso e articolato che richiede avanzamenti teorici e ricerca innovativa in tema di pratiche costruttive e impiego di materiali non convenzionali, l'implementazione di nuove politiche e strumenti di regolamentazione (es. fissazione di standard) efficienti ed efficaci rispetto al costo, nonché l'interazione di fonti energetiche rinnovabili e una maggiore consapevolezza da parte di progettisti, professionisti e utilizzatori finali (Soares *et al.*, 2017). La riduzione dei consumi energetici e degli impatti ambientali dell'ambiente costruito rappresenta una sfida a livello globale che richiede una conoscenza approfondita dei fattori che determinano il fabbisogno e la domanda di energia. Gli interventi di retrofit, in particolare, sono spesso di natura eterogenea e articolata e richiedono l'impiego di molteplici competenze e specializzazioni che devono essere integrate in contesti spesso molto dinamici e caratterizzati da diverse fonti di incertezza. L'analisi e la valutazione degli

interventi di retrofit degli edifici sono pertanto alquanto difficili da effettuare in quanto gli edifici si configurano come sistemi complessi in cui gli aspetti tecnici, tecnologici, sociali, ambientali ed estetici sono intimamente interconnessi e ogni sotto-sistema produce effetti che si ripercuotono sull'efficienza dell'intero fabbricato giocando, pertanto, un ruolo fondamentale (Kaklauskas *et al.*, 2005; Antonucci *et al.*, 2015). A tal proposito, Ma *et al.* (2012) individuano sei fattori chiave: le politiche e la regolamentazione, le risorse e le aspettative degli utenti finali, le tecnologie di retrofit, le specifiche dell'edificio, i fattori umani e i fattori di incertezza. Un'operazione di riqualificazione energetica di un edificio deve, quindi, essere analizzata sotto diversi profili e non può prescindere da considerazioni di natura tecnica, economica, ambientale e sociale, ma al contempo deve prendere in considerazione anche aspetti culturali e comportamentali degli utilizzatori finali. Le risultanze di una prima disamina della letteratura evidenziano come siano numerosi i modelli e le metodologie di valutazione degli interventi di retrofit energetico degli edifici di natura sia monocriteriale, quali ad esempio le valutazioni economiche (Verbeeck e Hens, 2005; Kaynakli, 2012; Ma *et al.*, 2012; Fumo, 2014; Krarti e Dubei, 2018) fondate sul LCC e sul calcolo del Valore Attuale Netto dell'investimento (*Net Present Value* - NPV), sia multicriteriale o multiobiettivo (Soares *et al.*, 2017; Webb, 2017). In particolare, da una prima disamina della letteratura si evince che sono numerosi i modelli e i metodi di supporto alle decisioni sviluppati e applicati nell'ambito della riqualificazione energetica degli edifici e possono essere essenzialmente suddivisi in due categorie (Soares *et al.*, 2017): modelli "a priori" in cui le soluzioni di intervento sono note a priori (Jaggs e Palmer, 2000; Flourentzou e Roulet, 2002; Rey, 2004), e modelli in cui le soluzioni di retrofit alternative sono definite attraverso modelli di ottimizzazione (Diakaki *et al.*, 2008; Diakaki *et al.*, 2010; Krarti e Bichioua, 2011; Asadi *et al.*, 2012; Petersen e Svedsen, 2012; Wu *et al.*, 2017), che in molti casi utilizzano algoritmi di scelta per ottimizzare il processo decisionale (Eisenhower *et al.*, 2011; Shao *et al.*, 2014; Delgam *et al.*, 2016; Motuzien *et al.*, 2016; Nowak *et al.*, 2016; Si *et al.*, 2016; Lu *et al.*, 2017; Pal *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2017; Jafari e Valentin, 2018). Tra gli approcci multicriteriali, l'*Analityc Hierarchy Process* (AHP) proposto da Saaty negli anni Ottanta (Saaty, 1980), è risultato uno dei più frequentemente adottati (Mohsen e Akash, 1997; Alanne, 2004; Lizana *et al.*, 2016; Si *et al.*, 2016; Roberti *et al.*, 2017; Re Cecconi *et al.*, 2017; D'Alpaos e Bragolusi, 2018).

Più carente appare invece il filone di letteratura incentrato sul valore marginale e la disponibilità a pagare per gli interventi di miglioramento delle performance e dell'efficienza energetica degli edifici (Banfi *et al.*, 2008; Kwak *et al.*, 2010; Farsi, 2010; Michelsen e Madlener, 2012; Phillips, 2012; Achtnicht e Madlener, 2014; Syahid e Zaki, 2016; Carrol *et al.*, 2016; Prete *et al.*, 2017). Si rivela poco nutrito anche il corpo dei lavori di ricerca attinenti l'analisi e la stima benefici indiretti e/o non direttamente monetizzabili derivanti dal miglioramento delle performance e dell'efficienza energetica degli edifici, quali ad esempio l'incremento del level-

lo di comfort percepito (Wu *et al.*, 2017; Galassi e Madlener, 2017), l'aumento del valore di mercato degli immobili riqualificati (Jakob, 2006; Marmolejo-Duarte e Bravi, 2017), l'incremento della qualità estetica del fabbricato (Vanstockem *et al.*, 2018) e la riduzione delle emissioni di CO₂ (Alberini *et al.*, 2018).

Conclusa la disamina preliminare della letteratura sopra descritta, dalla quale sono emersi gli aspetti generali più frequentemente analizzati e gli approcci valutativi più frequentemente adottati (Tabella 1), è stata condotta una ricerca sistematica sulla banca dati SCOPUS al fine di identificare i contributi di letteratura rilevanti in tema di efficienza e riqualificazione energetica degli edifici. Sono stati pertanto introdotti come filtri la lingua, ovvero l'inglese, il periodo di analisi, che va dal 2000 al 2017, la chiave ricerca per titolo, abstract e parole chiave, e come aree tematiche (*subject area*) "Engineering", "Energy" e "Environmental Science".

Alle parole chiave e alle stringhe di ricerca primaria ("valuation" OR "assessment" OR "assessments" AND "approach" OR "approaches" AND "building" OR "buildings" AND "energy" AND "efficiency"), sono state aggiunte, secondo una struttura di ricerca piramidale, una serie di altre parole chiave e stringhe considerate rilevanti per lo specifico oggetto di studio ("economic" AND "technical" "social" AND "environmental" AND "policy" AND "uncertainty" "life cycle cost" OR "LCC" AND "cost" OR "costs" AND "Analytic Hierarchy Process" OR "AHP" AND "decision making" AND "tool" OR "tools" AND "willingness to pay" OR "WTP") ed emerse dalle risultanze della disamina preliminare della letteratura (Tabella 2).

Tabella 1 - Aspetti generali e approcci multidisciplinari emersi dall'analisi preliminare della letteratura

ASPETTI GENERALI	Economico
	Ambientale
	Tecnico
	Sociale
	Incertezza
APPROCCI VALUTATIVI	Life Cycle Cost (LCC)
	Analisi economiche
	AHP
	Decision Making
	Discrete Choice

Sono stati quindi selezionati i contributi, limitatamente ai soli articoli su rivista, più rilevanti in termini di citazioni e di parole chiave di interesse. Tale ricerca ha portato a individuare 882 documenti presenti nella banca dati SCOPUS, che si riducono a 682 introducendo un filtro più restrittivo sul periodo di analisi, limitandolo ai contributi pubblicati tra il gennaio 2010 (anno di emanazione della EPBD-Refusione) e il dicembre 2017.

Tabella 2 - Domanda di ricerca (Research question-RQ), parole chiave e stringhe di ricerca

RQ: Quali sono gli approcci di valutazione rilevanti in tema di efficienza e riqualificazione energetica degli edifici ?	
Parole chiave e stringhe di ricerca primaria	"valuation" OR "assessment" OR "assessments" AND "approach" OR "approaches" AND "building" OR "buildings" AND "energy" AND "efficiency"
Parole chiave e stringhe di secondo livello	"economic" AND "technical" "social" AND "environmental" AND "policy" AND "uncertainty" "life cycle cost" OR "LCC" AND "cost" OR "costs" AND "Analytic Hierarchy Process" OR "AHP" AND "decision making" AND "tool" OR "tools" AND "willingness to pay" OR "WTP"

In una fase successiva sono stati selezionati ulteriori lavori di ricerca citati negli articoli maggiormente citati o ritenuti rilevanti in funzione delle parole chiave di secondo livello e sono stati altresì esclusi dal database i contributi ritenuti non pertinenti a seguito della lettura dell'abstract o del contributo stesso.

2.2 Meta-analisi

Per strutturare la *review* sono state effettuate delle meta-analisi dalle quali emerge in primo luogo il progressivo interesse mostrato dai ricercatori per le valutazioni degli interventi di *retrofit* energetico degli edifici (Figura 1). A partire dal 2010, anno di emanazione della Direttiva europea 2010/31/UE-Refusione sull'efficienza energetica nell'edilizia, meglio conosciuta come EPBD (Energy Performance of Buildings Directive recast), si registra infatti un incremento significativo del numero di contributi proposti in letteratura, seguito ad un ulteriore incremento a partire dal 2012, anno di emanazione ed entrata in vigore della Direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica EED (Energy Efficiency Directive), che ha modificato la EPBD. Questo trend conferma la bontà dell'ipotesi che sottende l'introduzione del filtro relativo al periodo di analisi che va dal gennaio 2010 al dicembre 2017.

Dalle meta-analisi effettuate risulta chiaramente che le aree tematiche maggiormente interessate dalla produzione scientifica in oggetto sono rispettivamente quelle dell'ingegneria (*Engineering*, 64,4%), dell'energia (*Energy*, 47,9%)

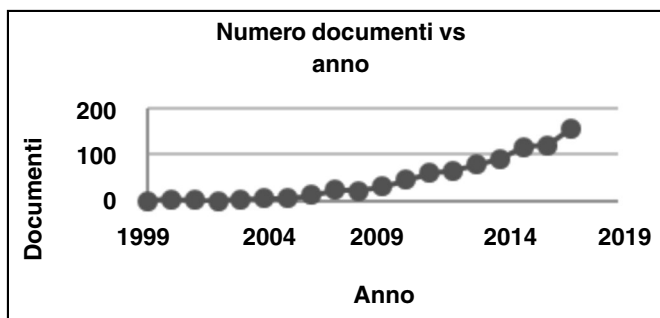


Figura 1 - Documenti pubblicati per anno (Nostre elaborazioni)

e delle scienze ambientali (*Environmental Sciences*, 39,0%), a denotare il carattere di interdisciplinarietà e intersettorialità dei prodotti di ricerca pubblicati (Figura 2).

È interessante notare la geografia di provenienza degli studi condotti (Figura 3), dalla quale si evince che negli Stati Uniti il tema della valutazione degli interventi di riqualificazione energetica degli edifici è fortemente sentito, sia

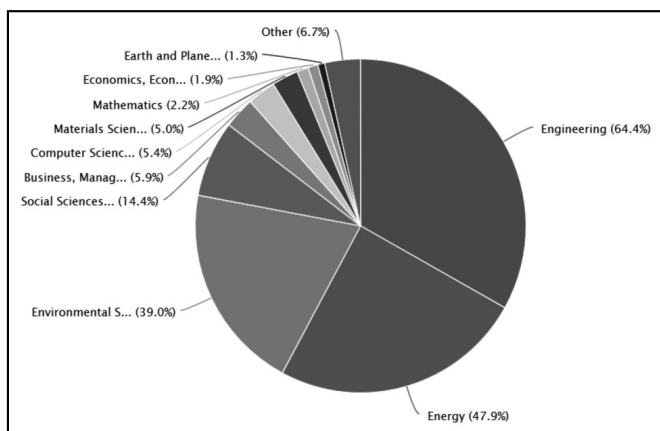


Figura 2 - Documenti per area tematica (Fonte Scopus)

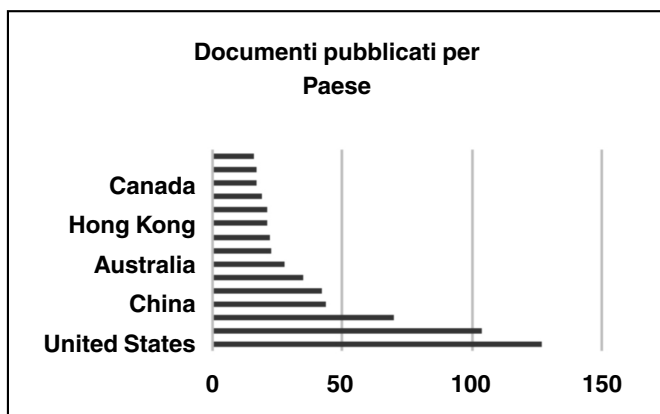


Figura 3 - Documenti pubblicati per Paese (Nostre Elaborazioni)

per la consistenza del patrimonio immobiliare presente sia per la crescente consapevolezza e preoccupazione per gli effetti dei cambiamenti climatici imputabili alle emissioni di gas a effetto serra. Al secondo posto per numero di pubblicazioni si colloca l'Italia a testimonianza del fatto che nel nostro Paese il problema della riqualificazione energetica degli edifici esistenti è di cruciale importanza. Il patrimonio immobiliare italiano, è infatti tra i più vecchi in Europa e uno dei meno efficienti dal punto di vista energetico: il 49% degli asset immobiliari hanno più di cinquant'anni (il 76% è stato costruito prima del 1981) e il 90% degli edifici presenta un eccesso di domanda (ISTAT, 2012).

Dall'analisi delle parole chiave (Figura 4) risulta che tra le parole chiave di secondo livello più strettamente correlate alle valutazioni economiche degli interventi di efficientamento e riqualificazione energetica degli edifici, le maggiormente citate sono "Life Cycle", "Costs" e "Energy Performance", che rimandano in maniera esplicita all'approccio del *Life Cycle Cost*, tanto da farne l'approccio valutativo di elezione perché più frequentemente adottato e studiato in riferimento alla valutazione economica delle strategie di intervento. Incrociando le evidenze illustrate in Figura 3 e Figura 1 è possibile evidenziare come l'implementazione della EPBD e della EED abbia contribuito a focalizzare una buona parte degli interessi di ricerca della comunità scientifica su LCC.

La EPBD e la EED introducono, infatti, il concetto di livello ottimale di prestazione energetica e di soluzione costo-ottimale per i requisiti minimi di prestazione energetica. L'articolo 5 della EPBD stabilisce, infatti, che gli Stati membri calcolino i livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica, avvalendosi del quadro metodologico comparativo stabilito conformemente all'Allegato III e di parametri pertinenti (quali ad esempio le condizioni climatiche e l'accessibilità pratica delle infrastrutture energetiche) e che, successivamente, compari-

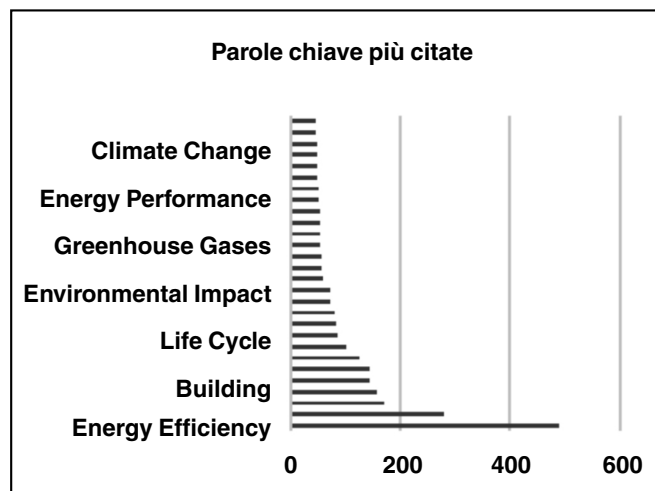


Figura 4 - Parole chiave più citate nei documenti (Nostre Elaborazioni)

no i risultati di tale calcolo con i requisiti minimi di prestazione energetica in vigore. Nella fattispecie, il quadro metodologico comparativo delineato nell'Allegato III prevede che gli Stati membri calcolino il valore attuale netto delle misure di efficienza energetica secondo l'approccio dell'analisi del costo del ciclo di vita, ovvero del *Life Cycle Cost* (LCC). Le Direttive sopra richiamate fanno, inoltre, specifico riferimento alla possibilità per gli Stati membri di introdurre incentivi (anche finanziari), volti a favorire gli interventi di miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici.

2.3 Life cycle cost

Alla luce delle risultanze delle meta-analisi precedentemente illustrate e delle considerazioni sopra svolte sugli effetti delle due Direttive EPBD e EED, si è deciso di effettuare un ulteriore approfondimento e finalizzare la *review* sistematica all'analisi dei contributi in cui fosse stato adottato per la valutazione economica degli interventi il metodo del LCC (127 prodotti).

Degli articoli individuati attraverso la ricerca sistematica condotta secondo le linee guida PRISMA – *Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses* (Liberati *et al.*, 2015), prendendo in esame i maggiormente citati e quelli che trattano in maniera specifica del LCC come strumento di valutazione, sono stati selezionati per il *reporting* 18 articoli, le cui evidenze scientifiche sono sintetizzate nel quadro sinottico di Tabella 3.

I 18 contributi riportati nella Tabella 3 sono stati individuati sulla base del numero di citazioni e alla presenza tra le parole chiave di “*Life Cycle Cost*” o “*LCC*” e “*Costs*” e prendono in esame diverse tipologie edilizie e destinazioni d'uso, differenti zone climatiche e strategie di intervento. Veerbeek e Hens (2010) effettuano un'analisi di inventario del ciclo di vita di quattro edifici residenziali tipo in Belgio e dimostrano come l'energia grigia (*embodied energy*) di un fabbricato sia residuale rispetto al consumo di energia in fase di utilizzo. Tale conclusione rimane a maggior ragione valida se si confronta l'energia grigia di misure di apprestamento energetico con la riduzione dei consumi che la loro realizzazione genera. Dall'analisi della letteratura (Tadeu *et al.*, 2015; Mangan e Oral, 2016; Krarti e Ihm, 2016) emerge come la zona climatica in cui risiede l'edificio sia un fattore fondamentale che determina se una misura di retrofit sia o meno costo-ottimale, poiché l'andamento annuale della temperatura, che regola i flussi termici, è in stretta correlazione con il consumo energetico di un edificio. I principali interventi di *retrofit* analizzati in letteratura (Kneifel, 2010; Corrado *et al.*, 2014; Ferrara *et al.*, 2014; Pikas *et al.*, 2014; Tadeu *et al.*, 2015; Dilara Mangan and Koclar Oral, 2016; Krarti and Ihm, 2016; de Vasconcelos *et al.*, 2016; Di Giuseppe *et al.*, 2017a; Fregonara *et al.*, 2017; Jones *et al.*, 2017; Zangheri *et al.*, 2017;) riguardano l'involucro dell'edificio e in particolare l'isolamento termico delle pareti, della copertura e dei solai, nonché la sostituzione degli infissi con elementi ad alto isolamento termico. Questa

strategia di intervento (Fregonara *et al.*, 2017) consente di ridurre pressoché totalmente i costi di manutenzione e di mantenere costante nel tempo il livello di prestazione energetica raggiunto, garantendo così una contrazione significativa dei consumi. De Angelis *et al.*, (2014) sottolineano come sia fondamentale progettare adeguatamente l'isolamento termico, il cui spessore ottimale viene determinato attraverso un'accurata analisi parametrica, al fine di evitare la realizzazione di spessori inutilmente troppo elevati e conseguentemente non efficaci rispetto al costo.

I risultati dello studio di Krarti e Him (2016) dimostrano come in zone climatiche caratterizzate da temperature diurne molto elevate, sia sufficiente realizzare un modesto (o al limite nullo) isolamento termico dell'involucro esterno, in modo da favorire lo scambio di calore durante la notte. Dall'analisi della letteratura, emerge un significativo interesse per i problemi legati alla realizzazione di interventi costo-ottimali di retrofit energetico che raggiungano i livelli NZEB. A tal proposito, Zangheri *et al.*, (2017) nel loro studio prendono in esame un insieme di opzioni di retrofit attivo e passivo da implementare per raggiungere livelli NZEB in differenti tipologie di edifici ad uso residenziale e non, costruiti tra gli anni Sessanta e Settanta e situati in aree geografiche rappresentative delle condizioni climatiche in Europa, dimostrando che nella maggior parte dei casi analizzati, gli interventi sono risultati economicamente convenienti in presenza di incentivi. A conferma dei risultati di Zangheri *et al.*, (2017), Hamdy *et al.* (2017) e Di Giuseppe *et al.* (2017a) evidenziano che, nel caso di case singole, poiché per il raggiungimento dei *target* NZEB i costi di investimento iniziali sono molto elevati, e hanno un *pay-back* superiore a 30 anni, è necessaria l'erogazione di incentivi fiscali per effettuare l'investimento (Hamdy *et al.*, 2013; Di Giuseppe *et al.*, 2017). Al contrario, Barthelmes *et al.* (2016) analizzano diversi scenari di intervento relativi alla ristrutturazione di un edificio rurale, situato in Piemonte, da trasformare in un edificio residenziale unifamiliare e dimostrano che lo scenario NZEB è economicamente conveniente anche in assenza di incentivi, grazie alla forte integrazione nel progetto di fonti rinnovabili per la produzione di energia. In linea con il precedente contributo, Bottero *et al.*, (2018) evidenziano come, a partire da Barthelmes *et al.*, (2016), l'investimento addizionale, relativo a ciascuno degli scenari di intervento rispetto allo scenario di riferimento (rispetto dei limiti sulle prestazioni energetiche minime), si configuri come un investimento conveniente anche in assenza di incentivi: l'erogazione di incentivi non risulta, quindi, un fattore chiave per motivare l'investitore ad intraprendere il progetto, in quanto gli interventi NZEB si caratterizzano per avere un valore attuale netto positivo in ragione dei consistenti risparmi nei consumi energetici rispetto allo scenario di riferimento e l'erogazione di incentivi, sovradimensionati in tal caso, potrebbe favorire comportamenti di tipo opportunistico (*free-riding*).

Anche il tema dell'incertezza è ampiamente dibattuto in letteratura, per i numerosi effetti sulla scelta del tasso di sconto, sull'evoluzione dei prezzi dell'energia, sui consu-

Tabella 3 - Quadro sinottico dei principali contributi analizzati in riferimento all'approccio LCC

Riferimento pubblicazione	Edificio	Tecnologie di retrofit adottate	Metodo	Risultati principali
Kneifel, 2010	Edifici commerciali	Sistema HVAC, riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria, differenti tipologie di isolamento termico dell'involucro dell'edificio e di serramenti (finestre); sistema LEC (Low Energy Case).	LCC	Le misure adottate riducono del 20-30% il consumo energetico; la progettazione LEC è economicamente vantaggioso; la riduzione delle emissioni di carbonio è pari al 32% in 10 anni.
Hamdy <i>et al.</i> , 2013	Casa singola a 2 piani in climi freddi	Diversi tipi di spessori dell'isolamento di pareti, coperture e pavimentazioni; diverse tipologie di serramenti (finestre); quattro opzioni di ombreggiamento; tre unità di recupero del calore; due opzioni di raffreddamento, quattro sistemi di riscaldamento e diverse dimensioni di sistemi solari in loco.	LCC con ottimizzazione a tre stadi	Le misure costo-ottimali dipendono dal sistema di riscaldamento/raffreddamento installato e dal tasso di aumento del prezzo dell'energia; le dimensioni ottimali dell'impianto fotovoltaico variano da 20 a 15 m ² ; il raffreddamento meccanico non è una misura costo-ottimale a causa dei costi operativi; è possibile raggiungere gli obiettivi NZEB in presenza di incentivi fiscali.
Risaneek e Choudhary, 2013	Edificio a 5 piani ad uso uffici	Isolamento termico della copertura; utilizzo di serramenti con vetri ad alto isolamento termico; utilizzo di caldaie a condensazione; sostituzione dei sistemi di illuminazione e installazione di sensori automatici di controllo; installazione di valvole elettroniche termostatiche nei radiatori.	LCC e NPV (valore attuale netto) con algoritmi di ottimizzazione e analisi di sensitività per trattare l'incertezza	Analisi sull'incertezza sui dati e i parametri economici e tecnici; l'incertezza sulle variabili e sui parametri economici risulta affliggere i risultati in maniera più significativa; le misure costo-ottimali comportano una riduzione delle emissioni di gas serra compresa tra il 10 e il 40%; le misure di riqualificazione che comportano l'installazione di caldaie a condensazione e di sistemi di micro generazione risultano essere efficaci rispetto al costo.
Ferrara <i>et al.</i> , 2014	Casa unifamiliare a due piani	Interventi sull'involucro edilizio: diverso spessore dell'isolante; diversa tipologia e dimensione della finestra; unità di ventilazione meccanica con recupero di calore; pompa di calore a ciclo reversibile aria-aria; ventole di raffreddamento; caldaia a gas a condensazione; caldaia a <i>pellet</i> , impianto elettrico con radiatori elettrici.	LCC con ottimizzazione (algoritmo ottimizzazione con sciami di particelle)	L'isolante termico in legno chiaro è una soluzione costo-ottimale; la caldaia a <i>pellet</i> è la migliore soluzione in termini di costi, i sistemi di isolamento dell'involucro a basse prestazioni sono le soluzioni economicamente più vantaggiose.

segue

Corrado <i>et al.</i> , 2014	Condominio residenziale	Pareti a basso e alto isolamento; sostituzione dei serramenti (finestre); dispositivi di protezione solare; impianto solare termico; impianto fotovoltaico; generatore combinato per riscaldamento, raffreddamento e acqua calda sanitaria.	LCC con tecnica di ricerca sequenziale	La soluzione costo-ottimale comporta un consumo di energia primaria per il raffreddamento, il riscaldamento e la produzione di acqua calda pari a 115 kWh/m ² e il LCC è pari a 676 €/m ² .
Pikas <i>et al.</i> , 2014	Edificio adibito ad uso uffici	Interventi sull'involucro edilizio: diversi spessori dell'isolamento; diverse tipologie e dimensioni delle vetrate; ottimo dimensionamento dei pannelli fotovoltaici; teleriscaldamento con radiatori; <i>chiller</i> raffreddato ad aria e ventilazione a recupero di calore bilanciato con travi fredde.	LCC e NPV	Considerando il clima freddo dell'Estonia, le misure costo-ottimali sono il risultato di un minore rapporto dimensionale finestra-parete, l'installazione di un vetro triplo con riempimento di argon e la realizzazione di pareti con isolamento di 200 mm di spessore; la soluzione costo ottimale prevede un consumo energetico inferiore a 130 kWh/m ² .
De Angelis <i>et al.</i> , 2014	Edificio residenziale di appartamenti di edilizia sociale	Diverse tecnologie di isolamento delle pareti; isolamento della copertura e dei pavimenti; sostituzione di finestre o vetri; installazione di generatore di calore a condensazione; installazione di valvole termostatiche; installazione di pompe di calore e pannelli fotovoltaici.	LCC	In assenza di interventi sugli impianti di riscaldamento, i costi degli interventi di riqualificazione sono compresi tra 160-210 €/mq; il risparmio energetico conseguito con il raggiungimento di prestazioni energetiche di classe B o A è pari a circa 70% per la classe B e 80% per la classe A; tra le diverse tipologie di impianti di riscaldamento, le pompe di calore risultano essere costo-ottimali; gli incentivi fiscali sono rilevanti per rendere conveniente l'investimento.
Tadeu <i>et al.</i> , 2015	Edificio storico a 5 piani	Realizzazione di un tetto termico; isolamento di pareti e pavimenti esterni; diverse tecnologie di finestre e relativi telai isolanti; sistemi di riscaldamento e di acqua calda sanitaria.	LCC	Lo spessore ottimale dell'isolamento termico è al massimo di 140 mm, oltre questo spessore non vi è convenienza economica ad investire; esiste una correlazione tra il tasso di sconto e il prezzo dell'energia; alti tassi di sconto e bassi prezzi dell'energia non favoriscono gli investimenti in misure di retrofit che comportino un basso consumo di energia primaria; la zona climatica influenza il <i>ranking</i> delle misure costo-ottimali.

segue

Krarti and Ihm, 2016	Edificio residenziale unifamiliare	Combinazioni delle seguenti misure: isolamento di pareti esterne e copertura; ottimo dimensionamento delle finestre a sei differenti tipologie di vetri; variazione dell'intensità della luce; variazione del livello di perdita d'aria; impostazione della temperatura di raffreddamento; miglioramento dell'efficienza energetica del sistema di raffrescamento; caldaie a diversi livelli di efficienza.	LCC con diverse tecniche di ottimizzazione (algoritmo genetico, tecnica dello sciame di particelle)	Il risparmio annuale (ottimale) di energia varia tra il 35% e il 55%; le misure costo-ottimali variano in funzione della zona climatica; rispetto ai livelli di prestazione energetica minimi, le misure costo-ottimali comportano un risparmio energetico pari al 30%; per massimizzare il risparmio energetico è necessario aumentare il costo dell'investimento iniziale nella misura del 42%; l'installazione di sistemi di illuminazione e di frigoriferi ad alta efficienza energetica e ad alti settaggi di raffreddamento è economicamente conveniente.
de Vasconcelos <i>et al.</i> , 2016	Edificio residenziale a 7 piani	Interventi sull'involucro edilizio: variazione dello spessore dell'isolamento termico; ventilazione della facciata, applicazione del muro a secco; sostituzione dei serramenti (finestre).	LCC	Le misure economicamente più vantaggiose sono quelle che prevedono l'isolamento della copertura; lo spessore dell'isolamento termico influenza fortemente il consumo di energia primaria; i migliori risultati in termini di performance energetiche si ottengono attraverso l'isolamento delle pareti interne piuttosto che delle pareti esterne.
Dilara Mangan and Koclar Oral, 2016	Edificio residenziale a 16 piani	Interventi sull'involucro edilizio: isolamento termico delle pareti esterne, della copertura (tetto verde) e diverse tipologie di vetro per i serramenti (finestre).	LCC, LCA (analisi del ciclo di vita) e LCCO ₂ (costo emissioni CO ₂)	La zona climatica influisce sul ranking delle misure costo-ottimali; la <i>paper</i> individua per diverse zone climatiche le soluzioni ottimali relative alla progettazione degli elementi isolanti utilizzati e le rispettive caratteristiche tecniche. I risultati delle analisi comparative tra LCE, LCCO ₂ e LCC dipendono in modo significativo dalla tipologia delle misure di miglioramento dell'efficienza energetica.
Barthelmes <i>et al.</i> , 2016	<i>CorTau House</i> , casa singola che raggiunge il target NZEB	Realizzazione di nuovi sistemi impiantistici HVAC (riscaldamento, ventilazione e raffreddamento) e di interventi sull'involucro edilizio (e.g. isolamento termico di pareti e copertura, sostituzione dei serramenti).	LCC	Risulta conveniente raggiungere livelli di prestazioni NZEB, in quanto gli elevati costi di investimento iniziale vengono più che compensati negli anni dai ridotti consumi energetici e dai relativi costi evitati. La misura identificata come costo-ottimale prevede un consumo energetico annuo < 20.25 kWh/m ² a.

segue

Copiello <i>et al.</i> , 2017	Complesso residenziale di case popolari	Isolamento termico di pareti e copertura; sostituzione dei serramenti (finestre); installazione di sistemi di ventilazione meccanica controllata.	LCC e simulazioni Monte Carlo	L'incertezza legata al tasso di sconto influisce sui risultati del calcolo del LCC più dell'incertezza sui prezzi dell'energia; il <i>ranking</i> delle misure costo-ottimali varia significativamente in base ai parametri macroeconomici e soprattutto al tasso di sconto adottato.
Jones <i>et al.</i> , 2017	5 case in Galles	Isolamento delle pareti esterne; isolamento del sottotetto; adozione di doppi vetri; installazione di impianti di illuminazione a LED; installazione di nuova caldaia a gas con serbatoio di acqua calda; installazione di pannelli fotovoltaici; ventilazione a pressione positiva dello spazio loft.	LCC	L'implementazione delle misure comporta: una riduzione delle emissioni CO ₂ compresa tra il 50% e il 75%; un risparmio in termini di costo che varia tra £ 402 e £ 621 l'anno; una riduzione pari al 56% del consumo energetico per il riscaldamento e dell'84% per l'elettricità.
Zangheri <i>et al.</i> , 2017	Quattro tipologie: casa unifamiliare, condominio, ufficio, scuola	Combinazioni delle seguenti misure: isolamento dell'involucro edilizio; installazione di sistemi HVAC di nuova generazione; installazione di sistemi solari; installazione impianti di illuminazione di nuova generazione.	LCC con tecniche preliminari di ottimizzazione	L'implementazione di misure costo-ottimali comporta una riduzione del consumo di energia primaria che varia tra il 36% e l'88%; per periodi superiori a 30 anni, l'LCC per gli edifici che raggiungano l'obiettivo NZEB è in taluni casi inferiore e mai superiore al 33% di LCC di misure che consentano di raggiungere i requisiti minimi di legge.
Di Giuseppe <i>et al.</i> , 2017a	Casa singola unifamiliare	Realizzazione di Involucro ad alte prestazioni; installazione di pompe di calore reversibili ad alta efficienza e/o caldaie a condensazione per riscaldamento e acqua calda sanitaria; installazione di pannelli fotovoltaici (PV) e collettori solari; installazione di sistemi di emissione e controllo per il riscaldamento; installazione di sistemi di ventilazione meccanica di estrazione (MEV).	LCC con simulazioni Monte Carlo	I costi di investimento per la realizzazione di edifici che raggiungano l'obiettivo NZEB sono predominanti rispetto al flusso dei costi di manutenzione e di gestione; l'uso di materiali di rivestimento superisolanti porta ad un incremento significativo dei costi di investimento; scenari che comportano l'implementazione misure più efficienti rispetto alle prestazioni energetiche generano maggiore incertezza sulle stime dei costi globali; il tempo di recupero nel caso di edifici NZEB risulta superiore ai 30 anni.

segue

Fregonara <i>et al.</i> , 2017	Edificio residenziale familiare a due piani	Isolamento termico esterno di pareti opache; sostituzione dei serramenti con pacchetti altamente isolanti; installazione di pannelli fotovoltaici, pannelli solari e unità di ventilazione meccanica controllata decentralizzata.	LCC	Le misure di retrofit prevedono il raggiungimento della classe A di prestazione energetica; gli interventi di retrofit sull'involucro dell'edificio sono i più efficaci rispetto al costo rispetto ad altre misure, non comportando costi di manutenzione e mantenendo il livello delle prestazioni inalterato nel tempo.
Bottero <i>et al.</i> , 2018	<i>CorTau House</i> , casa singola che raggiunge il target NZEB	Sistemi impiantistici HVAC (Riscaldamento, ventilazione e raffreddamento) e interventi sull'involucro edilizio (e.g. isolante termico pareti e copertura, sostituzione dei serramenti).	LCC e NPV	Risulta conveniente raggiungere livelli di prestazioni NZEB rispetto al livello minimo di prestazione energetica previsti dalla norma anche in assenza di incentivi; gli incentivi nel caso di NZEB risultano essere sovradimensionati e possono generare comportamenti opportunistici (<i>free-riding</i>).

mi energetici, e sui costi di manutenzione e di investimento. Il problema viene generalmente trattato attraverso il metodo delle simulazioni Monte Carlo e l'implementazione di analisi di sensitività sulle distribuzioni di probabilità delle variabili stocastiche (Risanek *et al.*, 2013; Di Giuseppe *et al.*, 2017; Copiello, 2017). In particolare, il tasso di sconto influenza in maniera significativa (e maggiore rispetto alla dinamica dei prezzi dell'energia) i risultati delle analisi di LCC e le decisioni di investimento (Tadeu, 2015; Copiello, 2017).

3. DISCUSSIONE DEI RISULTATI E FUTURI SVILUPPI

Come è stato evidenziato nella sezione precedente, sono numerosi i contributi presenti in letteratura che analizzano le diverse misure di retrofit energetico dei fabbricati (Roberts, 2008) e i relativi costi, mentre sono pochi quelli relativi alla valutazione e alla stima dei benefici derivanti dall'implementazione di misure di efficientamento e riqualificazione energetica degli edifici. Il quadro metodologico comparativo per il calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica istituito nel Regolamento Delegato (UE) 244/2012 che integra la Direttiva 31/2010/UE fa esplicito riferimento al calcolo del costo del globale e al metodo del LCC per la valutazione degli interventi. L'approccio valutativo è quindi fortemente orientato alla minimizzazione dei costi che, nella maggior parte dei casi, vengono a coincidere con i costi evitati per l'approvvigionamento energetico e le emissioni di CO₂. Secondo l'approccio del cosiddetto metodo CO (Cost-Optimal), gli Stati membri devono identificare uno scenario di riferimento, rappresentativo del mercato loca-

le delle costruzioni, e confrontare differenti soluzioni di miglioramento dell'efficienza sulla base della domanda di energia primaria delle stesse e del relativo LCC. Le opzioni alternative sono pertanto prioritizzate in ragione delle prestazioni energetiche e non in ragione degli interessi e delle preferenze dei singoli investitori (costruttori o utilizzatori finali). Tuttavia, alcuni investitori potrebbero essere più interessati all'incremento di comfort o al miglioramento delle performance ambientali piuttosto che alle performance economiche (Araújo *et al.*, 2016; Jafari e Valentin 2018; Alberini *et al.*, 2018). Il miglioramento del comfort, della qualità dell'aria interna, una migliore difesa dai rumori esterni potrebbero fornire un valore aggiunto di entità paragonabile al beneficio derivante dal miglioramento dell'efficienza energetica (Jakob, 2006; Prete *et al.*, 2017; Galassi e Madlener, 2017). Gli interventi di retrofit energetico potrebbero infatti essere visti come uno strumento per ridurre i costi e aumentare al contempo le prestazioni ambientali, attraverso l'implementazione di soluzioni che siano efficienti in termini energetici e non siano semplicemente le meno costose (Becchio *et al.*, 2015; Pikas *et al.*, 2014). Va, pertanto, recuperata la dimensione valutativa dell'efficacia rispetto al costo e vanno individuati i livelli di performance da raggiungere analizzando i *trade-off* tra i costi degli interventi e i benefici diretti e indiretti, tangibili e intangibili degli stessi. Un edificio che abbia delle prestazioni energetiche elevate può avere un valore di mercato maggiore rispetto ad uno di basse prestazioni, e tale "premio" (price premium) potrebbe essere di ammontare superiore rispetto alla capitalizzazione dei mancati costi legati al risparmio energetico (Achtnicht, 2011; Popescu *et al.*, 2012; Banfi *et al.*, 2008; Zalejska J.A., 2014; Bonifaci e Copiello, 2015). Tuttavia, le asimmetrie informative potreb-

bera portare gli utenti finali, nel caso in cui fossero consumatori avversi al rischio, a sottostimare il valore dei benefici derivanti dall'adozione di apprestamenti energetici (Farsi, 2010); di qui l'importanza di introdurre una certificazione delle prestazioni energetiche (Carrol *et al.*, 2016), che dovrebbe correggere il fallimento di mercato legato al cosiddetto problema del *market "lemon"* (Akerlof, 1970). Il consenso e l'accettazione da parte della società sono comunque fondamentali nel determinare il successo degli investimenti in riqualificazione energetica degli edifici e delle diverse fasi del processo di innovazione (van Rijnsoever *et al.*, 2015).

In sintesi, dall'analisi preliminare della letteratura emerge quindi che gli stakeholders potrebbero essere disposti a pagare cifre superiori per soluzioni "sostenibili", spinti non solo da motivazioni puramente economiche di risparmio dei costi, ma anche da ragioni quali ad esempio il valore intrinseco, la coscienza ambientale, il *warm glow* (*ego-driven vs social-oriented warm glow*), ecc. Vi è tuttavia una mancanza di metodologie comparative che prendano in considerazione la disponibilità a pagare dell'individuo nella identificazione di soluzioni efficaci rispetto al costo. Le preferenze degli stakeholder rispetto alle soluzioni alternative di retrofit energetico possono, di fatto, risultare un fattore chiave nella individuazione stessa degli apprestamenti (efficienti) e nella loro effettiva implementazione. Questo potrebbe consentire di colmare il divario che esiste tra ricerca scientifica e tecnologica ed effettiva realizzazione degli interventi.

4. CONCLUSIONI

Il presente lavoro propone una *review* sistematica della letteratura sugli approcci di valutazione degli interventi di riqualificazione ed efficientamento energetico degli edifici. Le meta-analisi, effettuate dopo una preliminare analisi della letteratura, hanno evidenziato che sono numerosi i modelli e i metodi di supporto alle decisioni sviluppati e applicati nell'ambito della riqualificazione energetica degli edifici, ma tra questi l'approccio valutativo di elezione è l'LCC che risulta essere il più frequentemente adottato e studiato in riferimento alle valutazioni economiche. Dalle meta-analisi è emerso inoltre che l'implementazione della EPBD e della EED ha contribuito a focalizzare sul LCC una parte significativa degli interessi della comunità scientifica. Si è pertanto deciso di effettuare un ulteriore approfondimento e focalizzare la revisione sistematica sul-

l'analisi dei contributi in cui fosse stato adottato per la valutazione economica degli interventi il metodo del LCC. Dei 127 prodotti della ricerca individuati, ne sono stati selezionati per il reporting 18, i cui risultati principali sono stati evidenziati in un quadro sinottico. Dall'analisi di tali contributi è emerso che: 1) la misura di retrofit maggiormente in grado di migliorare in maniera significativa le prestazioni energetiche degli edifici consiste nella realizzazione di interventi sull'involucro esterno (isolamento di pareti, della copertura e dei solai, sostituzione degli infissi con elementi ad alto isolamento termico), la quale necessita, tuttavia, di un adeguato dimensionamento per risultare costo-ottimale; 2) l'individuazione delle misure costo-ottimali è fortemente condizionata dalla zona climatica in cui l'edificio risiede, stante la stretta relazione che intercorre tra andamento delle temperature, flussi termici e consumi energetici; 3) il raggiungimento dei target NZEB comporta alti costi di investimento iniziali e l'investimento risulta generalmente conveniente solo in presenza di erogazione di incentivi (fiscali); 4) una corretta trattazione dell'incertezza, che affligge la maggior parte delle variabili decisionali in gioco (es. tasso di sconto, evoluzione dei prezzi dell'energia, fabbisogno energetico, costi di investimento e di manutenzione), è fondamentale per la determinazione di soluzioni robuste.

I risultati delle meta-analisi rivelano altresì un modesto interesse in letteratura per la valutazione e la stima dei benefici diretti e indiretti, tangibili e intangibili degli interventi di riqualificazione. Le diverse soluzioni progettuali sono generalmente priorizzate in ragione delle prestazioni energetiche e non in ragione degli interessi e delle preferenze dei singoli investitori, che potrebbero essere più interessati all'incremento di comfort o al miglioramento delle performance ambientali, piuttosto che alle performance economiche. Il maggiore valore di un edificio ad alte prestazioni energetiche ed efficienza potrebbe, infatti, essere superiore, in termini monetari, alla capitalizzazione dei mancati costi futuri ascrivibili al risparmio energetico. Un possibile gap da colmare in letteratura riguarda, pertanto, la stima della domanda di riqualificazione e del valore economico degli interventi in termini di disponibilità a pagare marginale degli stakeholder, i quali potrebbero essere disposti a pagare cifre non trascurabili per soluzioni "sostenibili", spinti non solo da motivazioni puramente economiche di risparmio dei costi, ma anche da ragioni quali ad esempio il valore intrinseco, la coscienza ambientale e il *warm glow*.

* Chiara D'Alpaos, Dipartimento Ingegneria Civile Edile ed Ambientale (ICEA), Università di Padova.

e-mail: chiara.dalpaos@unipd.it

* Paolo Bragolusi, Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale (ICEA), Università degli Studi di Padova.

e-mail: paolo.bragolusi@dicea.unipd.it

Bibliografia

- ACHTNICHT M., *Do environmental benefits matter? Evidence from a choice experiment among house owners in Germany*, *Ecological Economics*, 70, 2011, pp. 2191-2200.
- ACHTNICHT M., MADLENER R., *Factors influencing German house owners' preferences on energy retrofits*, *Energy Policy*, 68, 2014, pp. 254-263.
- AKERLOF G.A., *The market for 'lemons': quality uncertainty and the market mechanism*, *Quarterly Journal of Economics*, 84 (3), 1970, pp. 488-500.
- ALANNE K., *Selection of renovation actions using multi-criteria "knapsack" model*, *Automation in Construction*, 13, 2004, pp. 377-391.
- ALBERINI A., BIGANO A., SCASNY M., ZVERINOVAD I., *Preferences for Energy Efficiency vs. Renewables: What Is the Willingness to Pay to Reduce CO₂ Emissions?*, *Ecological Economics*, 144, 2018, pp. 171-185.
- ANTONIUCCI V., D'ALPAOS C., MARELLA M., *Energy saving in tall buildings: From urban planning regulation to smart grid building solutions*. *International Journal for Housing Science and Its Applications* Volume 39 (2), 2015, pp. 101-110.
- ARAUJO C., ALMEIDA M., BRAGANCA L., BARBOSA J.A., *Cost-benefit analysis method for building solutions*, *Applied Energy*, 173, 2016, pp. 124-133.
- ASADI E, GAMEIRO DA SILVA M., ANTUNES C.H., DIAS L., *Multi-objective optimization for building retrofit strategies: a model and an application*, *Energy and Buildings*, 44, 2012, pp. 81-87.
- BANFI S., FARSI M., FILIPPINI M., JAKOB M., *Willingness to pay for energy-saving measures in residential buildings*, *Energy Econ*, 30 (2), 2008, pp. 503-16.
- BARTHELMES, V.M., BECCHIO, C., BOTTERO, M., CORGNATI, S.P., *L'Analisi del costo ottimale per la definizione di strategie di progettazione energetica: Il caso di un "nearly-Zero Energy Building"*, *Valori e Valutazioni*, 16, 2016, pp. 57-70.
- BECCHIO C., DABBENE P., FABRIZIO E., MONETTI V., FILIPPI M., *Cost optimality assessment of a single family house: building and technical systems solutions for the nZEB target*, *Energy Build*, 90, 2015; pp. 173-87.
- BONIFACI P., COPIELLO S., *Price premium for buildings energy efficiency: empirical findings from a hedonic model*, *Valori e Valutazioni*, 14, 2015, pp. 5-15.
- BOTTERO M., D'ALPAOS C., DELL'ANNA F., *Boosting investments in buildings energy retrofit: the role of incentives*, In Calabrò F., Della Spina L., Bevilacqua C. (Eds.): *New Metropolitan Perspectives – Local Knowledge and Innovation Dynamics Towards Territory Attractiveness Through the Implementation of Horizon/E2020/Agenda2030*, *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2190-3018, 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-92102-0_63.
- BOZORGI A., *Integrating value and uncertainty in the energy retrofit analysis in real estate investment-next generation of energy efficiency assessment tools*, *Energy Efficiency*, 8, 2015, pp. 1015-1034.
- BPIE (Building Performance Institute Europe), *The BPIE data hub for the energy performance of buildings*. In: BPIE data hub. (2015). <https://www.buildingsdata.eu/> (ultimo accesso 28/11/2017).
- BRADY L., ABDELLATIF M., *Assessment of energy consumption in existing buildings*, *Energy and Buildings*, 149, 2017, pp. 142-150.
- BROWN C.R., *Economic theories of the entrepreneur: A systematic review of the literature*, *School of Management, Cranfield University*, 2007, pp. 1-84.
- BUILDING STOCK OBSERVATORY (2018). <https://ec.europa.eu/energy/en/data-analysis/building-stock-observatory> (ultimo accesso 28/11/2017)
- COMMISSIONE DELLE COMUNITÀ EUROPEE, *Efficienza energetica: conseguire l'obiettivo del 20%*, *Comunicazione della Commissione*, Bruxelles, Belgio, 2008.
- COPIELLO S., GABRIELLI L., BONIFACI P., *Evaluation of energy retrofit in buildings under conditions of uncertainty: The prominence of the discount rate*, *Energy*, 137, 2017, pp. 104-117.
- CORRADO V., BALLARINI I., PADUOS S., *Assessment of cost-optimal energy performance requirements for the Italian residential building stock*, *Energy Procedia*, 45, 2014, pp. 443-452.
- D'ALPAOS C., BRAGOLUSI P., *Prioritization of Energy Retrofit Strategies in Public Housing: an AHP model*, In Calabrò F., Della Spina L., Bevilacqua C. (a cura di) *New Metropolitan Perspectives – Local Knowledge and Innovation Dynamics Towards Territory Attractiveness Through the Implementation of Horizon/E2020/Agenda2030*, *Smart innovation, Systems and Technologies*, 2190-3018, 2018. DOI:10.1007/978-3-319-92102-0_56.
- DE ANGELIS E., PANSA G., SERRA E., *Research of economic sustainability of different energy refurbishment strategies for an apartment block building*, *Energy Procedia*, 48, 2014, pp. 1449-1458.
- DELGARM N., SAJADI B., KOWSARY F., DELGARM S., *Multi-objective optimization of the building energy performance: A simulation-based approach by means of particle swarm optimization (PSO)*, *Applied Energy*, 170, 2016, pp. 293-303.
- DE VASCONCELOS A. B., PINHEIRO M. D., MANSO A. CABACO A., *EPBD cost-optimal methodology: Application to the thermal rehabilitation of the building envelope of a Portuguese residential reference building*, *Energy and Buildings*, 111, 2016, pp. 12-25.
- DI AKAKI C., GRIGOROUDIS E., KOLOKOTSA D., *Towards a multi-objective optimization approach for improving energy efficiency in buildings*, *Energy and Buildings*, 40, 2008, pp. 1747-1754.
- DI AKAKI C., GRIGOROUDIS E., KABELIS N., KOLOKOTSA D., KALAITZAKIS K., STAVRAKAKIS G., *A multi-objective decision model for the improvement of energy efficiency in buildings*, *Energy*, 35, 2010, pp. 5483-5496.
- DI GIUSEPPE E., IANNAACONE M., TELLONI M., D'ORAZIO M., DI PERNA C., *Probabilistic life cycle costing of existing buildings retrofit interventions towards nZE target: Methodology and application example*, *Energy and Buildings*, 144, 2017, pp. 416-432.
- DI GIUSEPPE E., MASSIA 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, pp. 442-451.

- DOAN D.T., GHAFARIANHOSEINI A., NAISMITH N., ZHANG T., GHAFARIANHOSEINI A., TOOKEY J., *A critical comparison of green building rating systems*, *Building and Environment*, 123, 2017, pp. 243-260.
- EISENHOWER B., O'NEIL Z., NARAYANAN S., FONOVEROV V.A., MEZIC I., *A methodology for meta-model based optimization in building energy models*, *Energy and Buildings*, 47, 2012, pp. 292-301.
- ENEA, *Rapporto annuale efficienza energetica*, Agenzia Nazionale per l'Efficienza Energetica, 2017, pp. 1-33. http://enerweb.casaccia.enea.it/enearegioni/UserFiles/RAEE_2017.pdf (ultimo accesso 20/12/2017).
- EUROPEAN COMMISSION *Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 Supplementing Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the Energy Performance of Buildings (Recast) by Establishing a Comparative Methodology Framework for Calculating Cost-Optimal Levels of Minimum Energy Performance Requirements for Buildings and Building Elements*, Official Journal of the European Union, Bruxelles, Belgium, 2012a.
- EUROPEAN COMMISSION, *Guidelines Accompanying Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 Supplementing Directive 2010/31/EU on the Energy Performance of Buildings by Establishing a Comparative Methodology Framework for Calculating Cost-Optimal Levels of Minimum Energy Performance Requirements for Buildings and Building Elements*, Official Journal of the European Union, Bruxelles, Belgium, 2012b.
- EUROPEAN COMMISSION, ENERGY, *Transport and GHG Emissions - Trends to 2050 Reference Scenario 2013*, Directorate-General for Energy, Directorate-General for Climate Action and Directorate General for Mobility and Transport, 2013, pp. 1-173.
- EUROPEAN PARLIAMENT, *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, Brussels, Belgium, 2010.
- FERRARA M., FABRIZIO E., VIRGONE J., FILIPPI M., *A simulation-based optimization method for cost-optimal analysis of nearly Zero Energy Buildings*, *Energy and Buildings*, 84, 2014, pp. 442-457.
- FINK A., *Conducting Research Literature Reviews: From the Internet to Paper*, Binghamton University, 2005, pp. 1-173.
- FLOURENTZOU F., ROULET C.A., *Elaboration of retrofit scenarios*, *Energy and Buildings*, 34, 2, 2002, pp. 185-92.
- FREGONARA E., LO VERSO V.R.M., LISA M., CALLEGARI G., *Retrofit Scenarios and Economic Sustainability. A Case-study in the Italian Context*, *Energy Procedia*, 111, 2017, pp. 245-255.
- FUMO N., *A review on the basics of building energy estimation*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 2014, pp. 53-60.
- GALASSI V., MADLENER R., *The Role of Environmental Concern and Comfort Expectations in Energy Retrofit Decisions*, *Ecological Economics*, 141, 2017, pp. 53-65.
- 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, pp. 189-203.
- HANLEY N., MAC MILLAN D., WRIGHT R.E., BULLOCK C., SIMPSON I., PARISSON D., CRABTREE B., *Contingent Valuation Versus Choice Experiments: Estimating the Benefits of Environmentally Sensitive Areas in Scotland*, *Journal of Agricultural Economics*, 49, 1998, pp. 1-15.
- HEO Y., CHOUDHARY R., AUGENBROE G.A., *Calibration of building energy models for retrofit analysis under uncertainty*, *Energy and Buildings*, 47, 2012, pp. 550-560.
- HOPFE C.J., GODFRIED L.M., AUGENBROE G.L.M., HENSEN J.L.M., *Multi-criteria decision making under uncertainty in building performance assessment*, *Building and Environment*, 69, 2013, pp. 81-90.
- ISTAT, 15° Censimento della popolazione e delle abitazioni, <http://www.istat.it/it/censimento-popolazione/censimento-popolazione-2011>, ultimo accesso 1/1/2018.
- JAFARI A., VALENTIN V., *Selection of optimization objectives for decision-making in building energy retrofits*, *Building and Environment*, 130, 2018, pp. 94-103.
- JAGGS M., PALMER J., *Energy performance indoor environmental quality retrofit - a European diagnosis and decision making method for building refurbishment*, *Energy and Buildings*, 31 (2), 2000, pp. 97-101.
- JONES P., XIAOJUN L., PERISOGLU E., PATTERSON J., *Five energy retrofit houses in South Wales*, *Energy and Buildings*, 154, 2017, pp. 335-342.
- KAYNAKLI O., *A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 2012, pp. 415-425.
- KAKLAUSKAS A., ZAVADSKAS E.K., RASLANAS S., *Multivariate design and multiple criteria analysis of building refurbishments*, *Energy and Buildings*, 37, 2005, pp. 361-72.
- KNEIFEL J., *Life-cycle carbon and cost analysis of energy efficiency measures in new commercial buildings*, *Energy and Buildings*, 42, 2010, pp. 333-340.
- KIVIMAA V., MARTISKAINEN M., *Innovation, low energy buildings and intermediaries in Europe: systematic case study review*, *Energy Efficiency*, 11, 2018, pp. 31-51.
- KRARTI M., BICHIOUA Y., *Optimization of envelope and HVAC systems selection for residential buildings*, *Energy and Buildings*, 43, 2011, pp. 3373-3382.
- KRARTI M., IHM P., *Evaluation of net-zero energy residential buildings in the MENA region*, *Sustainable Cities and Society*, 22, 2016, pp. 116-125.
- KRARTI M., DUBEI K., *Review analysis of economic and environmental benefits of improving energy efficiency for UAE building stock*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82 (1), 2018, pp.14-24.
- LIBERATI A., ALTMAN D.G., TETZLAFF J., MULROV C., GOTZSCHE P.C., IOANNIDIS J.P.A., CLARKE M., DEVEREAUX P.J., KLEIJNEN J., MOHER D., *Prisma Statement per il reporting di revisioni sistematiche e meta-analisi degli studi che valutano gli interventi sanitari: spie-gazione ed elaborazione*, *Evidenze*, 7 (6), 2015.

- LIZANA J., BARRIOS-PADURA A., HUELVA M.M., CHACARTEGUI R., *Multi-criteria assessment for the effective decision management in residential energy retrofitting*, Energy and Buildings, 129, 2016, pp. 284-307.
- MANGAN S.D., ORAL G.K., *Assessment of residential building performances for the different climate zones of Turkey in terms of life cycle energy and cost efficiency*, Energy and Buildings, 110, 2016, pp. 362-376.
- MARMOLEJO-DUARTE C., BRAVI M., *Does the Energy Label (EL) Matter in the Residential Market? A Stated Preference Analysis in Barcelona*, Buildings, 7, 2, 2017, pp. 1-53.
- MA Z., COOPER P., DALY D., LEDO L., *Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art*, Energy and Buildings, 55, 2012, pp. 889-902.
- MARTINEZ-MOLINA A., TORT-AUSINA I CHO S., VIVANCOS J.L., *Energy efficiency and thermal comfort in historic buildings: A review. Renewable and Sustainable*, Energy Reviews, 61, 2016, pp. 70-85.
- MECHRI H. E., CAPOZZOLI A., CORRADO V., *USE of the ANOVA approach for sensitive building energy design*, Applied Energy, 87, 2010, pp. 3073-3083.
- MICHELSSEN C., MADLENER R., *Homeowners' preferences for adopting innovative residential heating systems: A discrete choice analysis for Germany*, Energy Economics, 34, 2012, pp. 1271-1283.
- MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO, *Relazione annuale sull'efficienza energetica - Risultati conseguiti e obiettivi al 2020*, Direzione generale per il mercato elettrico, le rinnovabili e l'efficienza energetica, il nucleare, 2017, pp. 1-28.
- MOHSEN M.S., AKASH B.A., *Evaluation of domestic solar water heating system in Jordan using analytic hierarchy process*, Energy Conversion and Management, 38, 18, 1997, pp. 1815-1822.
- MOTUZIEN V., ROGOZA A., LAPINSKIENE V., VILUTIENE T., *Construction solutions for energy efficient single-family house based on its life cycle multi-criteria analysis: a case study*, Journal of Cleaner Production, 112, 2016, pp. 532-541.
- NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS, *Prometheus Model 2013-2014 - Model description*, 2013, pp. 1-44.
- NOWAK P., KSIEK M., DRAPS M., ZAWISTOWSKIC J., *Decision Making with use of Building Information Modeling*, Procedia Engineering, 153, 2016, pp. 519-526.
- PAL S.K., TAKANO A., ALANNE K., PALONEN M., SIREN K., *A multi-objective life cycle approach for optimal building design: A case study in Finnish context*, Journal of Cleaner Production, 143, 2017, pp. 1021-1035.
- PETERSEN S., SVEDSEN S., *Method for component-based economical optimisation for use in design of new low-energy buildings*, Renewable Energy, 38, 2012, pp. 173-180.
- PHILIPS Y., *Landlords versus tenants: Information asymmetry and mismatched preferences for home energy efficiency*, Energy Policy, 45, 2012, pp. 112-121.
- PIKAS E., THALFELDT M., KURNITSKI J., *Cost optimal and nearly zero energy building solutions for office buildings*, Energy and Buildings, 74, 2014, pp. 30-42.
- POMPONI F., MONCASTER A., *Embodied carbon mitigation and reduction in the built environment - What does the evidence say?*, Journal of Environmental Management, 181, 2016, pp. 687-700.
- POPESCU D., BIENERT S., SCHUTZENHOFER C., BOAZU R., *Impact of energy efficiency measures on the economic value of buildings*, Apply Energy, 89, 2012, pp. 454-63.
- PRETE M.I., PIPER L., RIZZO C., PINO G., CAPESTRO M., MILETI A., PICHIERRI M., AMATULLI C., PELUSO A.M., GIUDO G., *Determinants of Southern Italian households' intention to adopt energy efficiency measures in residential buildings*, Journal of Cleaner Production, 153, 2017, pp. 83-91.
- RAPHAEL W., MAVROMATIDIS G., OREHOUNIG K., CARMELIET J., *Multiobjective optimisation of energy systems and building envelope retrofit in a residential community*, Applied Energy, 190, 2017, pp. 634-649.
- RE CECCONI F., TAGLIABUE L.C., MALTESE S., ZUCCARO M., *A multi-criteria framework for decision process in retrofit optioneering through interactive data flow*, Procedia Engineering, 180, 2017, pp. 859-869.
- REY E., *Office building retrofitting strategies: multicriteria approach of an architectural and technical issue*, Energy and Buildings, 36 (4), 2004, pp. 367-72.
- REZAEI R., BROWN J., AUGENBROE G., KIM J., *Assessment of uncertainty and confidence in building design exploration*, Analysis and Manufacturing, 29, 2015, pp. 429-441.
- Roberti F., Oberegger U. F., Lucchi E., Troi A., *Energy retrofit and conservation of a historic building using multi-objective optimization and an analytic hierarchy process*, Energy and Buildings 138, 2017, pp. 1-10.
- ROBERTS S., *Altering existing buildings in the UK*, Energy Policy, 2008, 36, pp. 4482-4486.
- RYSANEK, A.M., CHOUDHARY R., *Optimum building energy retrofits under technical and economic uncertainty*, Energy and Buildings, 57, 2013, pp. 324-337.
- SAATY T.L., *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation*, McGraw-Hill, New York, 1980.
- SHAO Y., GEYERA B., LANG W., *Integrating requirement analysis and multi-objective optimization for office building energy retrofit strategies*, Energy and Buildings, 82, 2014, pp. 356-368.
- SI J., MARJANOVIC-HALBURD L., NASIRI F., BELL S., *Assessment of building-integrated green technologies: A review and case study on applications of Multi-Criteria Decision Making (MCDM) method*, Sustainable Cities and Society, 27, 2016, pp. 106-115.
- SOARES N., BASTOS J., DIAS PEREIRA L., SOARES A., AMARAL A.R., ASADI E., RODRIGUES E., LAMAS F.B., MONTEIRO H., LOPES M.A.R., GASPARI A. R., *A review on current advances in the energy and environmental performance of buildings towards a more sustainable built environment*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 77, 2017, pp. 845-860.
- SYAHID A., TAREQ M.A., ZAKI S.A., *Sustainability or Bust: Malaysian Home Buyers' Stated Preferences for Sustainable*

[
Housing, MATEC Web of Conferences, 8, 13001, 2016, pp. 1-5.

TADEU S., RODRIGUES C., TADEU A., FREIRE F., SIMONES N., *Energy retrofit of historic buildings: Environmental assessment of cost-optimal solutions*, Journal of Building Engineering, 4, 2015, pp. 167-176.

VAN RIJNSOEVER F.J., VAN MOSSEL A., BROECKES K. P.F., *Public acceptance of energy technologies: The effects of labelling, time, and heterogeneity in a discrete choice experiment*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 45, 2015, pp. 817-829

VANSTOKEM J., VRANKEN L., BLEYS B., SOMERS B., HERMY M., *Do Looks Matter? A Case Study on Extensive Green Roofs Using Discrete Choice Experiments*, Sustainability, 10 (2), 2018, pp. 1-15.

VERBEEK G., HENS H., *Energy savings in retrofitted dwellings: economically viable*, Energy and Buildings, 37, 2005, pp. 747-754.

VERBEEK G., HENS H., *Life cycle inventory of buildings: A contribution analysis*, Buildings and Environment, 45, 2010, pp. 964-967.

WEBB A.L., *Energy retrofits in historic and traditional buildings: A review of problems and methods*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 77, 2017, pp. 748-759.

WU R., MAVROMATIDIS G., OREHOUIG K., CARMELIET J., *Multi-objective optimisation of energy systems and building envelope retrofit in a residential community*, Applied Energy, 190, 2017, pp. 634-649

ZALEJSKA-JONSSON A., *Stated WTP and rational WTP: willingness to pay for green apartments in Sweden*, Sustainable Cities and Societies, 13, 2014, pp. 46-56.

ZANGHERI P., ARMANI R., PIETROBON M., PAGLIANO L., *Identification of cost-optimal and NZEB refurbishment levels for representative climates and building typologies across Europe*, Energy Efficiency, 11, 2017, pp. 337-369.