

LA METODOLOGIA DELLA LIFE CYCLE ASSESSMENT NELLA RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA DEGLI EDIFICI STORICI

Marina Mistretta^a, Francesco Guarino^b, Maurizio Cellura^b

^a PAU - Dipartimento di Patrimonio Architettura Urbanistica, Università Mediterranea di Reggio Calabria, Via dell'Università 25,
89124 - Reggio Calabria, Italia

^b DI - Dipartimento di Ingegneria, Università di Palermo, Viale delle Scienze, 90128 - Palermo, Italia
marina.mistretta@unirc.it; francesco.guarino@unipa.it; maurizio.cellura@unipa.it

Abstract

Historic buildings are complex systems of cultural, architectural, and identity value, they need particular attention to ensure that they are preserved, used, and managed over time in a sustainable way. This implies a demand for retrofit solutions able to improve indoor thermal conditions while reducing the use of energy sources and preserving the heritage significance. The presented paper proposes a life-cycle approach to assess energy and environmental assessment specifically devoted to historic building energy retrofit. To this purpose, the presented LCA-based method allows to understand whether the achieved energy benefits could be supported in a life cycle perspective or were overcome by the environmental burdens of the actions. This method could be used to support public policies in the preservation of cultural value buildings, allowing for the assessment of the most effective actions to save energy and to minimize environmental impacts along the whole building life-cycle. As main result, the paper aims at supporting decision makers in selecting energy retrofit solutions, tailored to solve the conflict between conservation and energy performance requirements.

KEY WORDS: *Building Heritage, Energy, Retrofit, Life Cycle Assessment, Historic Buildings.*

1. Introduzione

Il settore delle costruzioni rappresenta una quota significativa degli impatti ambientali in UE. Secondo l'Agenzia Internazionale dell'Energia, gli edifici rappresentano il 36% degli usi finali di energia e il 39% delle emissioni climateranti nel 2018. In particolare, l'edilizia residenziale, che rappresenta circa il 46% del settore, è responsabile del 70% del consumo complessivo di energia e delle emissioni di gas serra nel settore di riferimento [1]. Costruzioni di bassa qualità caratterizzate da involucri sottili in un paese dove il raffrescamento è particolarmente rilevante, impianti di riscaldamento, ventilazione e condizionamento a bassa efficienza, proprietà strutturali limitate, soggette a danni in caso di eventi sismici, sono solo alcune delle caratteristiche che ne caratterizzano

una quota significativa del patrimonio edilizio in Italia [2]. In tale contesto, il settore dell'edilizia residenziale gioca un ruolo chiave in tutti i livelli del processo costruttivo: 1) estrazione delle materie prime e produzione dei materiali da costruzione; 2) costruzione e gestione dell'edificio; 3) demolizione del manufatto edilizio e conseguente smaltimento dei materiali di scarto.

La fase d'uso è responsabile dei maggiori consumi di energia rispetto alle altre fasi di ciclo di vita, imputabili principalmente alla climatizzazione degli ambienti.

Gli edifici esistenti presentano impatti specifici superiori rispetto alle nuove costruzioni, nelle quali il miglioramento delle caratteristiche termo-fisiche degli elementi di involucro e l'adozione di soluzioni impiantistiche ad alta efficienza determinano una sensibile riduzione dei consumi energetici in fase d'uso.

L'analisi delle prestazioni energetiche degli edifici si pone come punto focale di una discussione tecnica e normativa, che inizia con le prime Direttive europee [3, 4], emanate in tale settore, e che hanno costituito un importante passo verso la definizione di criteri di efficienza energetica del sistema edificio-impianto e la promozione delle tecnologie di sfruttamento delle fonti rinnovabili.

Nella transizione verso un'economia low carbon, la riqualificazione del patrimonio edilizio, attraverso la riabilitazione di edifici esistenti, dovrebbe mirare alla riduzione degli impatti ambientali, mediante interventi di riqualificazione energetica orientati al rispetto delle normative vigenti in materia di efficienza energetica, comfort e funzionamento [5]. Tra gli edifici esistenti, quelli storici giocano un ruolo significativo, poiché cresce la necessità di adattarli ai requisiti imposti dalla normativa vigente in materia di risparmio energetico, e, al tempo stesso, tali requisiti entrano in conflitto con i principi del restauro e della conservazione.

Tuttavia, la valorizzazione e la gestione sostenibile degli edifici storici è un argomento rilevante per l'identità culturale e il patrimonio delle città europee [6], mettendo in gioco approcci interdisciplinari, procedure diagnostiche dedicate e strumenti specifici [7].

La sfida è quindi la riduzione dei consumi energetici e delle emissioni climalteranti, senza modificare in misura significativa il valore del patrimonio costruito esistente. In proposito, la Norma UNI EN 16883:2017 (UNI EN, 2017) [8] fornisce linee guida per migliorare la prestazione energetica degli edifici storici, nel rispetto della loro valenza culturale, ma lascia una lacuna nella definizione di strumenti e metodi di valutazione delle prestazioni energetiche in questi tipi di edifici [9].

In tale contesto, la metodologia di Life Cycle Assessment (LCA) riveste particolare importanza in termini di affidabilità e rilevanza scientifica dei risultati, come strumento di supporto nella scelta delle tipologie di interventi conservativi, dei materiali e delle tecniche maggiormente adatte alla riduzione dei consumi energetici e delle emissioni climalteranti degli edifici. Tra gli operatori del settore emerge ormai con chiarezza la consapevolezza che la concreta applicazione dei principi dell'economia circolare a un forte percorso di decarbonizzazione del settore edile necessita di un approccio Life Cycle Thinking, corredato dell'impiego della metodologia LCA.

Alla luce delle precedenti considerazioni, il presente lavoro intende, pertanto, contribuire allo stato dell'arte, proponendo una metodologia di valutazione energetica e ambientale specificatamente dedicata alla riqualificazione degli edifici storici, secondo un approccio del ciclo di vita. Questa metodologia potrebbe essere utilizzata per definire linee guida ad hoc, di supporto alle politiche pubbliche che incoraggerebbero la conservazione degli edifici storici.

2. Obiettivi

Una valutazione esaustiva delle prestazioni energetico-ambientali del sistema edificio deve essere condotta con riferimento al "ciclo di vita" dell'edificio stesso, analizzando tutte le fasi precedenti al funzionamento dell'edificio (la produzione e il trasporto dei materiali edili al sito di costruzione e la realizzazione dell'edificio) e le fasi di manutenzione e rinnovamento/retrofit, demolizione dell'immobile e smaltimento dei rifiuti originati dalla demolizione [10].

In tale contesto, la metodologia LCA consente di valutare le prestazioni energetico-ambientali dei prodotti, considerando i consumi di risorse energetiche e materiali e le emissioni associate a tutte le fasi di ciclo di vita, dall'acquisizione delle materie prime, attraverso i processi di fabbricazione, uso e manutenzione/retrofit, fino allo smaltimento/riciclo/riuso. Essa consente, inoltre, di determinare gli "aspetti-chiave" (hot-spot) del bilancio energetico-ambientale, ossia i componenti e le fasi del ciclo di vita responsabili degli impatti ambientali più rilevanti, al fine di individuare soluzioni progettuali che consentiranno di migliorare le prestazioni dell'edificio (ad esempio, la sostituzione di taluni materiali da costruzione con altri eco-etichettati o l'utilizzo di impianti e componenti con migliori prestazioni ambientali).

Analoghe considerazioni possono essere fatte nel caso di interventi di riqualificazione energetica di edifici storici. In questo caso, infatti, la metodologia LCA permette di stimare l'eco-profilo delle azioni di retrofit e di valutare il consumo energetico dell'edificio dopo il retrofit. Pertanto, un approccio basato sul ciclo di vita può supportare la selezione delle migliori azioni di retrofit, votate per aumentare l'efficienza energetica degli edifici.

Nelle sezioni successive, gli autori descrivono una procedura metodologica, basata sull'approccio di ciclo di vita, che può essere applicata per valutare gli impatti energetici e ambientali delle misure di adeguamento negli edifici storici. Questa procedura è presentata in conformità con gli standard internazionali della serie ISO 14040 [11].

2.1. Life Cycle Energy Analysis (LCEA)

La valutazione del consumo globale di energia di un edificio secondo un approccio di ciclo di vita, nota come *Life Cycle Energy Analysis* (LCEA), include i seguenti aspetti:

- l'energia incorporata dei materiali e dei componenti di impianto (*Initial Embodied Energy*), che rappresenta il consumo di energia primaria associato alle fasi di manifattura e trasporto dei materiali edili impiegati e dei componenti degli impianti di servizio, dall'estrazione delle materie prime necessarie alla manifattura/assemblaggio del prodotto finito, inclusi i trasporti fino al sito di costruzione e la fase di fabbricazione dell'edificio;

- il consumo di energia primaria in fase d'uso, imputabile principalmente ai fabbisogni di energia per la climatizzazione degli spazi confinati, per la produzione di acqua calda sanitaria e per il funzionamento delle apparecchiature elettriche;

- il consumo di energia primaria durante le fasi di manutenzione e/o ristrutturazione (*Recurring Embodied Energy*), che include sia l'energia consumata durante le fasi di manutenzione ordinaria, sia l'energia incorporata dei materiali e dei componenti d'impianto di sostituzione nelle fasi di ristrutturazione, compresa l'energia spesa durante la fase di installazione;

- il consumo di energia primaria di fine vita dell'edificio (*Demolition Energy*), associato alla demolizione e smantellamento dell'edificio e per il riciclaggio, riuso o smaltimento dei materiali di risulta, inclusi i trasporti. In proposito, occorre sottolineare che è difficile prevedere in dettaglio lo svolgimento della fase di smaltimento già all'atto della progettazione, il consumo di energia dovuto alla fase di demolizione (energia impiegata dalle macchine da cantiere, emissioni in aria ed acqua, ecc.) e lo smaltimento e/o recupero dei materiali di risulta. Pertanto, si ricorre all'analisi di scenario, nella quale l'analista contempla diverse ipotesi e tecnologie di trattamento dei rifiuti (ad esempio, totale smaltimento in discarica, ovvero recupero e riciclo di materiali inerti, demolizione selettiva, termovalorizzazione delle frazioni combustibili, ecc.).

3. Metodologia: La Life Cycle Assessment applicata agli interventi di retrofit energetico degli edifici storici

Quando l'analisi dei consumi di energia di un edificio in fase d'uso rivela la necessità di migliorarne le prestazioni energetiche, la metodologia LCA rappresenta un utile strumento di supporto nella scelta di interventi di retrofit, mirati all'isolamento termico dell'involucro, all'efficienza di sistemi energetici, alla promozione delle tecnologie alimentate da fonti energetiche rinnovabili per il riscaldamento, la generazione di elettricità e la produzione di acqua calda sanitaria [12].

Tuttavia, da un punto di vista di ciclo di vita, tali interventi inducono variazioni non trascurabili nell'incidenza relativa tra le diverse fasi di ciclo di vita. Infatti, a fronte di una riduzione dei consumi energetici in fase d'uso, aumenta il contributo relativo dell'energia incorporata dei materiali e componenti.

Le suddette considerazioni sono valide anche per gli edifici storici, per i quali, sulla base di quanto previsto dalla EN 16883 [8], la valutazione dell'energia incorporata secondo un approccio di ciclo di vita è uno dei criteri attraverso cui scegliere le migliori misure di miglioramento energetico.

I paragrafi successivi descrivono sinteticamente la procedura metodologica per la valutazione degli impatti energetico-ambientali interventi di retrofit energetico, in conformità agli standard internazionali UNI EN ISO 14040 [11].

3.1. Definizione dell'obiettivo

Nell'ipotesi in cui un edificio sia sottoposto a interventi di retrofit, l'applicazione della metodologia LCA è finalizzata a [13]:

- valutare gli impatti energetico-ambientali degli interventi di retrofit;
- stimare il risparmio energetico netto ottenibile con le azioni proposte e la relativa energia incorporata;
- valutare i benefici ambientali e gli effetti negativi indotti dalle azioni di retrofit, al fine di verificare se i relativi risparmi energetici ed impatti ambientali evitati siano superiori all'energia incorporata delle azioni di retrofit e ai relativi impatti ambientali del ciclo di vita.

La valutazione dei risparmi di energia indotti in fase di uso deve essere condotta attraverso i seguenti step:

- analisi pre-retrofit dei consumi di energia dei sistemi impiantistici, in relazione ad esempio al clima, alla destinazione d'uso, alle ore di funzionamento e al comportamento degli utenti;
- analisi post-retrofit, attraverso attività di monitoraggio o simulazioni termofisiche dell'edificio;
- calcolo dei risparmi energetici conseguiti, attraverso un bilancio tra i consumi di energia in fase di uso pre-retrofit e post-retrofit.

3.2. Unità funzionale e confini del sistema

La metodologia LCA non presenta risultati di impatto energetico e ambientale potenziale per l'intero sistema in oggetto di studio, bensì fornisce tali risultati in proporzione all'output di produzione o di utilizzo del sistema in oggetto. Tale output è definito come Unità Funzionale, UF, e rappresenta l'unità di prestazione di un sistema di prodotto, cui sono riferiti tutti i risultati [11].

Pertanto, l'unità funzionale (UF) costituisce l'unità di riferimento rispetto alla quale normalizzare i dati raccolti e riferire i risultati dell'analisi. La definizione di unità funzionale deve risultare compatibile con la funzione del sistema in esame e può essere intesa come indice delle prestazioni del sistema stesso, ovvero del servizio reso all'utente. Con riferimento agli interventi di retrofit, poiché la funzione è di tipo prestazionale, ossia la riduzione dei consumi energetici dell'edificio, una scelta idonea di UF è l'intervento stesso. Ad esempio, se l'intervento è costituito dall'isolamento termico degli elementi di involucro, l'impatto di un isolante termico può essere riferito alla massa dell'isolante oppure alla sua superficie di installa-

zione, o ancora, essere riferito alle prestazioni termofisiche dell'isolante stesso. Per interventi caratterizzati dall'installazione di impianti a tecnologie rinnovabili, l'UF può essere prestazionale, ossia la potenza installata o la produzione di energia.

La definizione dei confini del sistema consiste nell'individuazione delle unità di processo o fasi da contemplare all'interno del sistema di prodotto e nella determinazione del grado di dettaglio dell'analisi. Tali scelte dipendono dagli obiettivi dell'analisi e dagli altri elementi del campo di applicazione, nonché dai vincoli in termini di disponibilità di dati e risorse.

In uno studio di LCA per la valutazione delle prestazioni energetico-ambientali di interventi di retrofit, gli impatti energetico-ambientali devono essere calcolati con riferimento alla fase di produzione dei materiali e dei componenti di impianto da installare, inclusi i processi di acquisizione delle materie prime e delle risorse energetiche, e le fasi di trasporto.

3.3. Analisi di Inventario e qualità dei dati

L'analisi di inventario (*Life Cycle Inventory*), è la fase della LCA che comprende la compilazione e la quantificazione dei flussi in entrata e in uscita per un dato sistema di prodotto con riferimento al suo ciclo di vita.

Scopo principale di questa fase è, pertanto, la computazione di tutte le materie prime che sono state impiegate e la stima delle emissioni in aria, acqua e suolo che sono state generate durante l'intero ciclo di vita, con riferimento all'unità funzionale.

I dati da inserire nell'inventario devono essere raccolti per ogni unità di processo compresa nei confini del sistema, al fine di quantificare i flussi in ingresso e in uscita.

Essi si distinguono in:

- dati primari, specifici del sistema in esame, raccolti direttamente nei siti di produzione associati ai processi inclusi nei confini del sistema, o ottenuti tramite da aziende produttrici di settore;
- dati secondari, ricavabili da database internazionali o da studi di letteratura;
- dati proxy, primari o secondari, relativi a un processo che è simile a quello dell'inventario, ma non rappresentativo, utilizzabili in sostituzione di dati rappresentativi, qualora non disponibili.

I parametri che definiscono la qualità dei dati sono la rappresentatività geografica, temporale e tecnologica, la precisione, la completezza, la coerenza, la riproducibilità, il grado di incertezza e le fonti. La qualità dei dati influenza l'affidabilità e la robustezza dell'intero studio di LCA.

L'analisi di inventario include la quantificazione dei seguenti flussi per ogni fase inclusa nei confini del sistema:

- energia e masse in ingresso (materie prime, acqua, elettricità, combustibile, prodotti, semilavorati, ecc.);

- reflui di processo (emissioni in aria, acqua, suolo e sottosuolo);
- masse in uscita (prodotti ed eventuali co - prodotti);

Oltre ai flussi di processo devono essere stimati:

- impatti e consumi relativi all'energia elettrica utilizzata;
- impatti e consumi relativi ai combustibili impiegati;
- impatti e consumi relativi al sistema di smaltimento rifiuti.

Il consumo di carburante e le emissioni atmosferiche associate alle fasi di trasporto devono essere calcolate in base alla modalità di trasporto e alla distanza tra i siti di produzione e il sito di installazione degli interventi di retrofit. L'output della fase di inventario è costituito dalla Tabella di Inventario che riporta i flussi di materie prime ed energia, le emissioni in aria, acqua e suolo e i rifiuti prodotti riferiti all'UF (vedi Tab.1).

Categorie di impatto	Nomenclatura/Unità di misura
Climate change	CC (kgCO _{2eq})
Ozone depletion	ODP (kgCFC _{11eq})
Human toxicity, cancer effects	HT-ce (CTU _h)
Human toxicity, non-cancer effects	HT-nce (CTU _h)
Particulate matter	PM (kg PM _{2.5eq})
Ionizing radiation HH	IR-hh (kBqU _{235eq})
Ionizing radiation E (interim)	IR-E (CTU _e)
Photochemical ozone formation	POFP (kgNMVOC _{eq})
Acidification	AP (molH _{+eq})
Terrestrial eutrophication	EUT (molN _{eq})
Freshwater eutrophication	EUF (kgP _{eq})
Marine eutrophication	EUM (kgN _{eq})
Freshwater ecotoxicity	EFw (CTU _e)
Land use	LU (CTU _e)
Water resource depletion	WRD (m ³ water _{eq})
Mineral, fossil and renewable resource depletion	ADP (kgSb _{eq})
Global Energy Requirement	GER (MJ)

Tab. 1 - Categorie di impatto energetico-ambientale (fonte: nostra elaborazione)

3.4. Analisi degli impatti di ciclo di vita (Life Cycle Impact Analysis, LCIA)

Nella redazione dell'eco-profilo delle azioni di retrofit degli edifici, la Life Cycle Impact Analysis (LCIA) consente di valutare gli impatti energetici e ambientali di tali azioni, attraverso idonei indicatori, in grado di rappresentare in modo sintetico e completo i risultati dell'analisi di inventario sul consumo di risorse e le emissioni ambientali.

La LCIA consente di identificare il contributo di ciascuna fase del ciclo di vita agli impatti globali e gli *hot-spot* lungo l'intero ciclo di vita. La tabella (vedi Tab.1) mostra gli indicatori di impatto ambientali ed energetici secondo il metodo di valutazione ILCD 2011 [14].

Il consumo di energia primaria nel ciclo di vita dell'edificio,

espresso come Global Energy Requirement (GER), rappresenta l'indicatore più efficace per esprimere il consumo di energia in forme diverse. Esso tiene conto di tutte le perdite relative ai processi di estrazione delle risorse, della loro trasformazione e distribuzione e richiede la valutazione dell'uso di elettricità e combustibili fossili, in base alle diverse efficienze negli usi finali (riscaldamento, acqua calda sanitaria, illuminazione, ecc.) [14].

In dettaglio, il GER può essere calcolato attraverso l'analisi energetica del ciclo di vita (LCEA), tenendo conto del contributo al consumo di energia primaria di ogni fase, rispetto all'intero ciclo di vita dell'edificio. Esso comprende le fasi relative alla produzione di materiali da costruzione e alla produzione di sistemi energetici, inclusi l'estrazione di materie prime e l'approvvigionamento di risorse e il trasporto al sito di costruzione, il processo di costruzione dell'edificio, la fase d'uso, la manutenzione/ristrutturazione e fine vita. Pertanto, il GER rappresenta la somma di tutti gli input energetici necessari per produrre i componenti, i materiali e i servizi necessari per il processo di produzione. In dettaglio, può essere descritto dall'equazione (1):

$$GER = EE_i + E_o + EE_r + DE \quad (1)$$

in cui:

- EE_i rappresenta l'energia incorporata dei materiali e dei componenti di impianto (*Initial Embodied Energy*). Essa è l'energia primaria complessivamente consumata per la produzione dei materiali da costruzione e dei sistemi impiantistici, la costruzione dell'edificio e le fasi di trasporto associate [MJ];

- E_o rappresenta l'energia primaria consumata durante la fase d'uso dell'edificio [MJ];

- EE_r indica il consumo di energia primaria durante le fasi di manutenzione e/o ristrutturazione (*Recurring Embodied Energy*). Pertanto, deve essere calcolata con riferimento all'energia incorporata dei materiali e dei componenti di sostituzione e all'energia direttamente consumata durante la manutenzione/rifacimento dell'edificio [MJ];

- DE (*Demolition Energy*) è il consumo di energia primaria consumata durante la fase di demolizione dell'edificio e smaltimento dei materiali di risulta, inclusi i trasporti [MJ].

La valutazione del consumo di energia primaria consente di definire il bilancio energetico dell'edificio e di individuare le fasi di maggior impatto, evidenziando come una variazione dei consumi energetici in una determinata fase possa influenzare significativamente le fasi successive.

È noto che gli interventi di efficientamento energetico, mirati essenzialmente al risparmio di energia in fase d'uso, comportano variazioni non trascurabili nell'incidenza relativa tra le diverse fasi di ciclo di vita: a fronte di una riduzione dei consumi energetici in fase d'uso, infatti,

aumenta il contributo relativo della fase di produzione di materiali e componenti. Quindi, a fronte di una riduzione dei consumi di energia in fase d'uso, si verifica un incremento dell'energia incorporata [16].

Sulla base di tali considerazioni la metodologia LCA appare rilevante per valutare la significatività e il ruolo di tutte le fasi di ciclo di vita nella valutazione globale delle prestazioni energetico-ambientali di un edificio, e costituisce un approccio fondamentale per la definizione e il calcolo degli indicatori di prestazione da impiegare nei processi di certificazione.

3.4.1. Energia incorporata

Per energia incorporata o embodied energy di un edificio si intende l'energia primaria complessivamente impiegata nei processi di produzione dell'edificio e dei suoi componenti. Essa, pertanto, è data dall'energia incorporata dei materiali e dei sistemi impiantistici e tecnologici, prima definita, e dall'energia primaria consumata durante le fasi di costruzione dell'edificio e di installazione degli impianti di servizio. Nella letteratura di settore più recente, si è comunque diffusa una definizione più generale, secondo cui l'energia incorporata deve essere stimata includendo anche l'energia consumata durante le fasi di manutenzione e sostituzione di materiali e componenti.

Pertanto, sulla base di tali considerazioni, l'energia incorporata di un edificio è il risultato dei due contributi definiti nel paragrafo 3.4: EE_i e EE_r .

L'energia incorporata iniziale EE_i si può definire con la seguente espressione:

$$EE_i = \sum_j m_j EE_j + E_{i,c} \quad (2)$$

dove:

- m_j rappresenta la quantità di materiale o componente impiegato j (kg);

- EE_j rappresenta l'energia incorporata del materiale j (MJ/kg);

- $EE_{i,c}$ rappresenta l'energia primaria consumata durante la fase di costruzione dell'edificio [MJ].

EE_r deve essere calcolata con riferimento all'energia incorporata dei materiali e dei componenti di sostituzione e all'energia direttamente consumata durante la manutenzione/rifacimento dell'edificio. Il tasso di sostituzione dell'elemento da sostituire è legato alla vita utile, sia dell'edificio, che dell'elemento di sostituzione. In essa sono inclusi anche i trasporti dei materiali e dei componenti sostitutivi dal sito di produzione al sito di installazione.

EE_r può essere stimata con la seguente equazione:

$$EE_r = \sum_j m_j E_j \left(\frac{t_e}{t_m} - 1 \right) + E_M \quad (3)$$

dove:

- m_j rappresenta la quantità di materiale j impiegato

nella sostituzione [kg];

- E_j rappresenta l'energia incorporata del materiale j [MJ/kg];

- t_e rappresenta la vita utile dell'edificio [anni];

- t_m rappresenta la vita utile del materiale di sostituzione [anni];

- E_M rappresenta l'energia primaria consumata durante la fase di manutenzione/rifacimento dell'edificio [MJ].

3.4.2. Energia in fase d'uso

Per determinare il fabbisogno energetico relativo alla fase di uso di un edificio occorre eseguire il bilancio termico, computando gli apporti termici (radiazione solare, calore prodotto all'interno per la presenza di persone, sorgenti luminose artificiali, elettrodomestici) e le dispersioni termiche verso l'ambiente esterno, con riferimento all'intero ciclo di vita dell'edificio.

I fattori più significativi che influiscono sul bilancio energetico dell'edificio sono:

- condizioni climatiche esterne, quali temperatura e umidità dell'aria, radiazione solare, velocità del vento) e la presenza di sistemi di schermatura solare e di protezione dal vento;

- isolamento termico delle pareti e dei tetti;

- ricambi d'aria;

- temperatura di progetto interna, da garantire, che può essere diversa in parti diverse dell'edificio o in periodi diversi del giorno;

- orientamento, dimensione e tipologia delle superfici finestrate dell'edificio (trasmissione termica e trasmissione solare);

- produzione interna di calore dovuta all'attività antropica nell'interno degli ambienti confinati (cucina, apparecchiature elettriche, persone, ecc., ma non l'impianto di riscaldamento);

- le caratteristiche dell'impianto di riscaldamento, che comprendono la generazione, la distribuzione, i sistemi di controllo, ecc.

Il riscaldamento, la ventilazione e il condizionamento dell'aria (HVAC Heating, Ventilation and Air Conditioning) e l'illuminazione rappresentano la maggiore aliquota tra i consumi energetici di un edificio.

Ciò sottolinea l'importanza di ottimizzare le performance dei servizi e dei sistemi essenziali dell'edificio.

Il fabbisogno energetico di una costruzione non dipende, però, soltanto dalle prestazioni individuali dei componenti strutturali dell'involucro edilizio (pareti, finestre e tetti), dell'impianto HVAC e dei sistemi di illuminazione, ma anche dalle loro prestazioni complessive, come sistema integrato all'interno dell'insieme edificio-impianti.

L'analisi deve quindi riguardare le complesse interazioni dinamiche che la costruzione ha con il relativo ambiente

ed i suoi sistemi. I modelli di simulazione termica, in particolare, permettono di quantificare i flussi energetici che interessano l'involucro edilizio ed i carichi termici degli ambienti, di stimare le prestazioni energetiche del sistema edificio impianto, nonché di disporre di un sistema diagnostico che consenta il controllo automatico del sistema e il funzionamento degli impianti.

3.4.3. Energia di demolizione

L'energia di demolizione comprende tutti i processi che avvengono nel fine vita dell'edificio. Essa è stimata tenendo conto sia dei consumi di energia durante le fasi di smantellamento, che dei consumi associati alle operazioni di smaltimento/riciclaggio dei materiali di risulta.

In essa sono inclusi anche i consumi di energia nelle fasi di trasporto associate. L'energia di demolizione deve includere anche il fine vita dei componenti sostituiti nella fase di ristrutturazione. Va tenuto conto dell'energia risparmiata derivante dall'utilizzo evitato di materie prime vergini, dovuto al riciclo dei materiali.

3.5. Benefici energetico-ambientali connessi agli interventi di retrofit

Al fine di quantificare i benefici di adeguate azioni di retrofit volte a migliorare l'efficienza energetica degli edifici storici, è necessario effettuare l'analisi delle prestazioni energetiche e ambientali degli interventi di retrofit.

Questa deve essere eseguita mediante una valutazione comparativa degli impatti generati durante il ciclo di vita e di quelli evitati con la loro realizzazione. Pertanto, è necessario calcolare i benefici conseguibili in termini di risparmio di energia primaria e di impatti ambientali evitati, a partire dai risultati ottenuti dallo studio di LCA e dalla simulazione termofisica dell'edificio.

La simulazione dinamica dell'edificio è utile per determinare la riduzione del consumo di energia primaria durante la fase d'uso indotta da interventi di retrofit, con riferimento sia agli usi termici, che elettrici.

Sulla base dei risultati della LCA e della simulazione termofisica dell'edificio, è possibile definire gli indici di *payback* energetico ed ambientale, che consentono di stimare in quanto tempo il consumo di energia primaria e gli impatti ambientali sono bilanciati per effetto della realizzazione degli interventi di retrofit.

Al fine di ottenere una descrizione più approfondita delle prestazioni energetiche e ambientali delle azioni di retrofit e per confrontare diverse alternative, agli indicatori di impatto, definiti nella tabella (vedi Tab. 1), si aggiungono i seguenti indici: l'indice di *payback* energetico ($E_{P,T}$), l'indice di *payback* ambientale ($E_{M,P,T}$) e and the Energy Return Ratio.

In dettaglio, per ogni azione di retrofit si definisce l'indice di *payback* energetico ($E_{P,T}$) come il tempo necessario a risparmiare l'energia (valutata come primaria) equiva-

lente a quella consumata durante il ciclo di vita dell'intervento di retrofit stesso:

$$E_{P,T} = \frac{GER}{E_{r,a}} \quad (4)$$

Nella (4) GER rappresenta il consumo globale di energia primaria relativo al ciclo di vita dell'intervento di retrofit [GJ] e $E_{r,a}$ indica l'energia risparmiata annualmente, per effetto dell'intervento considerato [GJ/a].

Si definisce indice di payback ambientale il tempo necessario affinché l'impatto potenziale evitato durante la fase d'uso uguagli quello indotto durante il ciclo di vita di ogni intervento di retrofit. In particolare, con riferimento all'indicatore di impatto ambientale *Climate Change*, esso si definisce con la seguente espressione:

$$Em_{P,T} = \frac{CC}{CC_{e,a}} \quad (5)$$

dove CC è calcolato con riferimento al ciclo di vita della misura di retrofit [kgCO_{2-eq}] e $CC_{e,a}$ è l'impatto evitato annuo con la realizzazione della misura stessa [kgCO_{2-eq}/anno].

Ai suddetti indici si associa il ritorno energetico E_R , che indica quante volte il risparmio energetico supera il consumo globale di energia primaria GER. Esso è definito come segue:

$$E_R = \frac{E_r}{GER} \quad (6)$$

Nella (6) E_r indica il risparmio di energia primaria complessivamente indotto dalla misura di retrofit.

L'entità dei benefici energetici e ambientali conseguibili e dei tempi di ritorno corrispondenti consentono di valutare l'opportunità, sia in termini di risparmi di energia primaria che di impatti evitati, della realizzazione degli interventi di retrofit su un edificio.

4. Conclusioni

La stringente necessità di operare sul patrimonio architettonico esistente, nell'ottica del miglioramento delle prestazioni energetiche, pone davanti ad un conflitto che si articola fra l'osservazione dei principi propri del restauro e della conservazione e i limiti imposti dalla normativa relativa al contenimento dei consumi energetici.

Quelli storici sono edifici per i quali le esigenze conservative emergono con forza nel caso di interventi di riqualificazione energetica, che talvolta modificano l'assetto statico e funzionale dell'edificio esistente.

La sfida è quindi la riduzione dei consumi energetici e delle emissioni climalteranti, senza modificare in misura significativa il valore del patrimonio costruito esistente.

Quando un edificio storico è sottoposto a interventi di ri-

qualificazione energetica, l'inclusione dei requisiti di conservazione del patrimonio edilizio nell'ambito delle pratiche sostenibili e lo sviluppo della normativa di riferimento deve tener conto della valutazione di criteri ambientali.

La valutazione dell'intero ciclo di vita dell'edificio è fondamentale per valutare la fattibilità della riabilitazione, in termini di sostenibilità ed eco-progettazione degli interventi di retrofit energetico, e per stimare i benefici energetici e ambientali connessi agli interventi stessi.

L'attuale standard europeo fornisce linee guida per migliorare in modo sostenibile le prestazioni energetiche degli edifici storici, senza alcuna considerazione sul ciclo di vita. In questo documento, è stato presentato un approccio energetico e ambientale basato sul ciclo di vita per valutare l'eco-profilo delle azioni di adeguamento per edifici storici. Tale approccio consente di quantificare il risparmio energetico indotto dalle azioni di retrofit energetico, l'aumento dell'energia incorporata e gli impatti ambientali estesi all'intero ciclo di vita dell'edificio.

I risultati della valutazione consentono di stimare se i benefici raggiunti in termini di risparmio energetico e impatti evitati sono superiori ai costi energetici e ambientali connessi alla realizzazione delle azioni di retrofit.

La metodologia presentata, pertanto, può costituire uno strumento di supporto al processo decisionale per consentire la valutazione delle azioni più efficaci volte al risparmio energetico e per ridurre al minimo gli impatti ambientali lungo l'intero ciclo di vita dell'edificio.

Bibliografia

- [1] International energy agency, Global status report for buildings and construction. Paris, 2019
- [2] Guarino F., Cellura M., Longo S., Gulotta T., Mistretta M., Tumminia G., Ferraro M., Antonucci, V.: *Integration of building simulation and life cycle assessment: A TRNSYS application*. In: Energy Procedia, vol. 101, pp. 360 - 367, 2016
- [3] European Parliament, Directive 2002/91/CE of 16 December 2002 on the energy performance of buildings, 2002
- [4] European Parliament, Directive 2006/32/CE of 5 April 2006 on energy end-use efficiency and energy services and repealing Council Directive 93/76/EEC, 2006
- [5] Almås A.J., Lisø K.R., Hygen H.O., Øyen C.F., Thue J.V.: *An Approach to Impact Assessments of Buildings in a Changing Climate*. In: Building Research & Information, vol. 39(3), pp. 227 - 38, 2011
- [6] Norrström H.: *Sustainable and Balanced Energy Efficiency and Preservation in Our Built Heritage*. In: Sustainability, vol. 5(6), pp. 2623 - 43, 2013.
- [7] Mazzola E., Dalla Mora T., Peron F., Romagnoni P.: *An Integrated Energy and Environmental Audit Process for Historic Buildings*. In: Energies, n. 12, p. 3940, 2019
- [8] CEN: EN 16883, Conservation of cultural heritage - Guidelines for improving the energy performance of historic buildings, 2017
- [9] Galiano-Garrigós A., González-Avilés A., Rizo-Maestre C., Andújar-Montoya M.: *Energy efficiency and economic viability as decision factors in the rehabilitation of historic buildings*. In: Sustainability (Switzerland), vol. 11(18), 2019

- [10] Cellura M., Guarino F., Longo S., Mistretta M.: *Modeling the energy and environmental life cycle of buildings: A co-simulation approach*. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews, n. 80, pp. 733 - 742, 2017
- [11] ISO: ISO 14040, Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework. International Organization for Standardization, 2006
- [12] Cellura M., Guarino F., Longo S., Mistretta M., Orioli A.: *The role of the building sector for reducing energy consumption and greenhouse gases: An Italian case study*. In: Renewable Energy, n. 60, pp. 586 - 597, 2013
- [13] Beccali M., Cellura M., Fontana M., Longo S., Mistretta M.: *Energy retrofit of a single-family house: Life cycle net energy saving and environmental benefits*. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews, n. 27, pp. 283 - 293, 2013
- [14] Mistretta M., Beccali M., Cellura M., Guarino F., Longo S.: *Benefits of refurbishment. Nearly zero energy building refurbishment: A multidisciplinary approach*. In: Springer Nature, pp. 99 - 117, 2013
- [15] Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.J., Bauer C., Doka G., Dones R., Hischier R., Hellweg S., Humbert S., Köllner T., Loerincik Y., Margni M., Nemecek T.: *Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods*. Final Report Ecoinvent Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, 2007
- [16] Torgal F.P., Mistretta M., Kaklauskas A., Granqvist C.G., Cabeza L.F.: *Nearly zero energy building refurbishment: A multidisciplinary approach*. In: Springer Nature, pp. 1 - 658, 2014

