

Un nuovo prezzario per la valutazione di interventi di retrofit su archetipi di edifici

Federico Dell'Anna*, Giulia Vergerio**, Stefano Corgnati***, Giulio Mondini****

parole chiave: efficienza energetica degli edifici, listino prezzi, edifici di riferimento, costi di investimento, costi di gestione

Abstract

La recente Direttiva 2018/844/EU rappresenta il riferimento principale per la strategia italiana di lungo termine per il rinnovamento dello stock edilizio, sia pubblico che privato. In questo quadro, il presente studio si pone l'obiettivo di costruire un prezzario strutturato per la valutazione sintetica di interventi di retrofit energetico degli edifici quale strumento a supporto di professionisti e ricercatori nelle valutazioni di fattibilità. Unitamente ai costi, per ciascuno scenario di efficientamento energetico ipotizzato, vengono fornite informazioni anche in termini di consumi energetici e conseguenti emissioni di

gas serra. La metodologia adottata per raggiungere questo obiettivo è caratterizzata da due fasi successive: la valutazione energetica e quella finanziaria.

Dopo aver introdotto la metodologia, l'articolo fornisce la descrizione della sua applicazione a 8 archetipi di edifici multifamiliari selezionati dal database di TABULA. Tale approccio è potenzialmente replicabile al fine di estendere la conoscenza di valori di riferimento in termini di prezzi, consumi ed emissioni per scenari di retrofit energetico.

1. INTRODUZIONE

Gli Stati membri dell'Unione Europea si sono impegnati in un processo volto ad affrontare la questione legata ai cambiamenti climatici in conformità con il Protocollo di Kyoto, attraverso l'adozione di politiche di decarbonizzazione a scala comunitaria e nazionale. Per la prima volta, a livello europeo, è stato previsto un approccio integrato tra le politiche energetiche e la lotta ai cambiamenti climatici con il Pacchetto Clima-Energia 2020. A partire dal 2009, una serie di Direttive, e successive revisioni, si sono susseguite con l'obiettivo principale di ridurre le emissioni di gas serra, aumentare la quota di energia prodotta da fonti rinnovabili e aumentare il risparmio energetico (Commissione Europea, 2002; 2010). Nel 2015 l'impegno è stato confermato quando, durante la XXI Conferenza delle Parti dell'UNFCCC (COP 21) della Convenzione quadro per la lotta contro i cambia-

menti climatici, è stato adottato l'accordo di Parigi. L'ultima Direttiva (EU) 2018/844 (Commissione Europea, 2018), che modifica la Direttiva (EU) 2010/31 sulla prestazione energetica degli edifici, rappresenta la linea guida per la preparazione della strategia italiana a lungo termine per il rinnovo del settore edilizio. La Direttiva impone agli Stati membri un censimento degli edifici, sia pubblici che privati, presenti sul territorio nazionale, e un programma per il raggiungimento dell'obiettivo di decarbonizzazione al 2050, con target intermedi fissati al 2030 e 2040.

In quest'ottica, l'Italia ha adottato il Piano nazionale integrato per l'energia e il clima (PNIEC, 2018) per il raggiungimento di chiari obiettivi in campo energetico. Il primo obiettivo punta ad accelerare il processo di riduzione delle emissioni, con una spinta all'elettrificazione dei consumi, considerando il 2030 come un passo intermedio verso una decarbonizzazione avanzata del settore della produ-

zione dell'energia entro il 2050. Le azioni sostenibili dovrebbero valorizzare le diverse forme di autoconsumo in un sistema che favorisca cittadini e imprese. La PNIEC definisce le stime preliminari che rappresentano la base per la preparazione di una strategia nazionale. In questo contesto, il ruolo degli edifici è ben riconosciuto.

Secondo uno studio statistico basato su dati ISTAT (2011), il settore edilizio italiano è composto principalmente da edifici residenziali (circa l'84%). Il 51,8% degli edifici residenziali è costituito da case unifamiliari, ma circa il 70% della popolazione italiana vive in edifici plurifamiliari. Il settore residenziale è seguito, in termini di composizione del settore edilizio nazionale, dagli edifici ad uso produttivo, commerciale e per servizi. Solo il 4% circa del totale è rappresentato dagli edifici ad uso turistico/alberghiero (Buso *et al.*, 2017). La maggior parte degli edifici residenziali si trova nella zona climatica E (47,4%), alla quale appartengono 4250 comuni italiani su un totale di 8100. Il raggiungimento degli obiettivi energetici è strategicamente legato alla messa in campo di strumenti normativi, fiscali, economici e di pianificazione (Bottero *et al.*, 2019a; D'Alpaos e Bragolusi, 2018). In questo contesto, la definizione di edifici di riferimento, cioè di edifici che possano essere considerati rappresentativi di un campione più ampio, può rappresentare un approccio utile, in quanto può offrire uno strumento per le amministrazioni pubbliche e per i professionisti nella stima dei potenziali risparmi energetici provenienti dal settore edilizio.

Coerentemente a questo approccio, il punto di partenza di questo studio è stato principalmente il database costruito nell'ambito del progetto TABULA (Typology Approach for Building Stock Energy Assessment, 2009-2012), un progetto europeo che ha definito, secondo un approccio comune a scala europea, una serie di edifici di riferimento per lo stock edilizio dei paesi partecipanti, classificati per tipologia costruttiva ed epoca di costruzione, caratterizzandoli in termini di prestazioni energetiche correnti e potenziale risparmio energetico ottenibile attraverso misure di efficienza energetica (Ballarini *et al.*, 2014). Il presente studio si focalizza su quelle tipologie di edifici residenziali più comuni nei contesti urbani, esplorandone il potenziale, tenuti in considerazione gli ultimi aggiornamenti normativi europei e nazionali in tema di efficientamento energetico degli edifici. Bisogna ricordare, infatti, che la qualità ambientale delle città è inferiore rispetto al contesto suburbano e rurale, e gli edifici svolgono un ruolo fondamentale in questo senso. Oltre a diverse misure di efficienza energetica alla scala del singolo edificio, è stata ipotizzata la connessione al sistema di teleriscaldamento per tener conto delle misure di approvvigionamento di energia diffuse in alcune grandi città italiane. Le diverse azioni volte all'efficientamento sono state valutate da un punto di vista energetico, in termini di kWh consumati, ma anche valutando le conseguenti performance ambientali, stimando le emissioni di gas a effetto serra (CO₂ equivalente) dovute ai consumi energetici. Alle informazioni relative alle principali caratteristiche degli edifici in termini di involucro e impianti e alle loro performance ener-

getico-ambientali, sono state associate informazioni finanziarie in termini di costi di investimenti e costi di gestione per i diversi scenari di retrofit ipotizzati. Lo studio mira a limitare la carenza di dati in questi termini, creando un prezioso strutturato a supporto di professionisti e ricercatori nella fase di valutazione della fattibilità degli investimenti energetici (Becchio *et al.*, 2018, Bottero *et al.*, 2019b). La ricerca nasce dalla collaborazione tra il Dipartimento Interateneo di Scienze, Progetto e Politiche del Territorio (DIST) e il Dipartimento Energia (DENERG) del Politecnico di Torino, che negli ultimi anni stanno collaborando allo sviluppo di studi integrati in campo energetico ed economico a supporto della decisione.

Il documento è strutturato in 5 sezioni principali; la Sezione 1 include l'introduzione; la Sezione 2 descrive la metodologia applicata nella ricerca. L'applicazione della metodologia su 8 edifici di riferimento è presentata nella Sezione 3. I risultati sono discussi nella Sezione 4. Le conclusioni sono riassunte nella Sezione 5.

2. METODOLOGIA

L'obiettivo di questo studio è quello di definire una lista di prezzi parametrici per interventi di retrofit energetico per 8 archetipi di edificio, detti "edifici di riferimento". Accanto ai costi, vengono forniti anche i consumi e le emissioni di gas serra al metro quadro per gli stessi edifici sotto diversi scenari di retrofit. La metodologia adottata per raggiungere questo obiettivo è suddivisa in due fasi successive: l'analisi energetica e la valutazione finanziaria. Mentre quest'ultima è fondamentale alla definizione delle spese di esercizio e degli investimenti necessari agli interventi (se previsti) per ciascun archetipo nelle sue condizioni attuali e nei diversi scenari di retrofit, la prima fase valutativa (quella energetica) è funzionale al calcolo dei consumi energetici e delle conseguenti emissioni di gas serra associati agli edifici sotto le stesse assunzioni (pre e post-intervento). I due processi valutativi sono descritti nei paragrafi seguenti.

2.1 L'analisi energetica

L'obiettivo della fase di analisi energetica è quello di definire dei valori di riferimento in termini di consumi e le relative emissioni di gas serra per gli edifici sotto analisi nelle loro condizioni di performance attuali e in quelle previste per le varie ipotesi di retrofit. Per raggiungere questo obiettivo è necessario costruire dei modelli energetici degli edifici analizzati ed eseguirli definendone le variabili (es. trasmittanze dell'involucro, efficienze degli impianti, ecc.) caratterizzanti le loro prestazioni attuali e quelle attese conseguentemente agli interventi di retrofit.

In particolare, questa fase richiede di: i) scegliere il campione di edifici sul quale sviluppare l'analisi; ii) raccogliere i dati necessari; iii) costruire il modello energetico, definendo preventivamente l'approccio modellistico appropriato; iv) scegliere gli scenari di retrofit che si vogliono

valutare; v) eseguire i modelli nelle condizioni rappresentative dello stato corrente degli edifici e dopo averne variato i parametri in accordo alle ipotesi di retrofit selezionate.

Come detto nell'introduzione, essendo l'obiettivo di questo studio quello di definire valori parametrici di costi e stime di riferimento relativamente a consumi ed emissioni per differenti ipotesi di retrofit, si è scelto di selezionare come edifici da analizzare degli edifici di riferimento dal database di TABULA. Gli edifici di riferimento (detti Reference Buildings, o RBs) sono edifici reali o costruiti secondo analisi statistiche che possono essere considerati rappresentativi di un campione di edifici più ampio, identificati in base a delle variabili chiave come la tipologia edilizia (edifici monofamiliari, case a schiera, edifici multifamiliari o blocchi di appartamenti) e il periodo di costruzione (" <1900 ", " $1901-1920$ ", " $1921-1945$ ", " $1946-1960$ ", " $1961-1975$ ", " $1976-1990$ ", " $1991-2005$ ", " >2006 ") (Corgnati *et al.*, 2013). Tra i 32 RBs definiti nell'ambito del progetto TABULA (8 periodi di costruzione per 4 classi tipologiche) come rappresentativi dello stock edilizio italiano, ne sono stati selezionati 8 per questa applicazione, come sarà illustrato in seguito (sezione 3). Di conseguenza, il processo di ricerca dei dati necessari è stato condotto riferendosi al database di TABULA. I dati tipicamente richiesti per questo tipo di applicazioni sono i dati geometrici, le informazioni relative all'involucro edilizio e agli impianti e, infine, i profili di gestione e occupazione. Per costruire i modelli energetici necessari alla valutazione delle performance energetiche prima e dopo gli interventi di retrofit, è possibile scegliere un approccio quasi-stazionario che, in Italia, è regolato dal pacchetto di norme tecniche UNI/TS 11300 (CTI, 2019). Il processo di calcolo può essere gestito tramite strumenti appositamente sviluppati o utilizzando software professionali. Tra questi ultimi, MasterClima (MasterClima, 2017) rappresenta uno strumento flessibile e una soluzione affidabile. Grazie ai modelli sviluppati tramite questo strumento, i consumi dei diversi RBs nelle loro condizioni attuali di performance possono essere calcolati e calibrati rispetto ai corrispondenti valori forniti da TABULA. A questo punto, i modelli possono essere utilizzati per testare differenti misure di efficienza energetica e/o una serie di loro combinazioni (scenari), al fine di stimare i potenziali risparmi energetici e, conseguentemente, le emissioni evitate di gas serra. Le misure di efficienza energetica possono essere relative sia all'involucro edilizio (es. isolamento delle pareti, sostituzione delle finestre, ecc.) che agli impianti. Modificando i parametri relativi a involucro e impianti all'interno dei modelli energetici ed eseguendoli, vengono calcolate le nuove performance energetico-ambientale dell'edificio in termini di consumi e di emissioni associate.

I consumi energetici calcolati attraverso questa metodologia rappresentano il punto di partenza per il calcolo delle spese di esercizio (in termini di costi delle bollette) sotto le differenti ipotesi di retrofit. Questo punto rappresenta uno dei passaggi chiave della valutazione finanziaria,

insieme alla stima dei costi di manutenzione e di investimento necessari ad ottenere tali condizioni di performance.

2.2 Valutazione finanziaria

La Direttiva Europea 2010/31/CE (EPBD recast) ha introdotto il concetto di *cost optimal*, costo ottimale, per la valutazione sia di progetti di riqualificazione energetica che di nuove costruzioni. L'obiettivo di quest'approccio è identificare il livello ottimale di rendimento energetico garantito da bassi costi di investimento e di gestione. Se il livello di prestazione energetica è misurato come la quantità di energia richiesta per soddisfare il fabbisogno energetico dell'edificio, il costo viene calcolato utilizzando la formula del costo globale. Il costo globale è calcolato secondo lo standard EN 15459-2017 (CEN, 2017), che considera una serie di costi che devono essere sostenuti durante l'intero ciclo di vita dell'edificio: costi di investimento iniziali, costi di gestione, costi di sostituzione e valore residuo (Barthelmes *et al.*, 2016).

Nel prezziario proposto in questo articolo, si è fatto principalmente riferimento ai costi iniziali di investimento e ai costi di gestione. I costi di investimento iniziali sono tutti i costi iniziali da affrontare per la realizzazione del retrofit energetico. I costi di gestione comprendono invece i costi di manutenzione e i costi operativi da sostenere per l'approvvigionamento dei sistemi di generazione di energia.

Per ottenere il costo totale di investimento di ciascuna misura proposta, i costi iniziali per la riqualificazione dell'involucro edilizio e dei sistemi impiantistici sono stati calcolati analiticamente. In particolare, per ogni elemento, il costo di investimento è determinato a partire da un prezzo di riferimento o dalla ricerca diretta sul mercato.

Per quanto riguarda invece le voci di costo di manutenzione, è stata consultata la UNI EN 15459:2018 (CTI, 2018), nella quale sono definiti la durata della vita dei singoli componenti e i costi di manutenzione per i diversi sistemi energetici. I costi sono espressi in percentuale sul costo dell'investimento iniziale e consistono in una spesa annuale che include i costi di manutenzione, funzionamento, riparazione e assistenza. Infine, i costi operativi fanno riferimento principalmente ai costi energetici da sostenere per la produzione di energia termica per il riscaldamento e la produzione di acqua calda sanitaria (ACS) e all'energia elettrica per il funzionamento degli ausiliari dei sistemi di distribuzione e generazione per entrambi gli usi finali.

3. APPLICAZIONE

In questa sezione dell'articolo viene proposta l'applicazione della metodologia descritta in sezione 2. In particolare, previa scelta del campione degli edifici da studiare, questa sezione mira a descrivere il processo grazie al quale sono stati definiti dei valori di riferimento di consumi, emissioni e costi (di esercizio, di manutenzione e di inve-

stimento) per 8 archetipi di edificio. La struttura di questa sezione riflette gli step metodologici di analisi energetica (3.1) e valutazione finanziaria (3.2).

3.1 Calcolo della prestazione energetica degli edifici

In accordo con l'obiettivo di fornire dei valori di riferimento in termini di consumi, emissioni e costi a supporto di professionisti e ricercatori nella fase di valutazione di fattibilità degli investimenti nel campo del retrofit degli edifici, il campione di edifici da analizzare è stato selezionato dal database di RBs definiti nell'ambito del progetto TABULA come rappresentativi dello stock edilizio italiano. In particolare, sono stati selezionati 8 RBs. Essi sono blocchi di appartamenti ("Apartment Block", o AB) ed edifici multifamiliari ("multi-family houses", o MFH) per quattro epoche di costruzione ("1946-1960", "1961-1975", "1976-1990" and "1991-2005"), rappresentando le tipologie più numerose sul territorio italiano, specialmente in contesti urbani. Come detto sopra, i RBs possono essere edifici reali o determinati secondo analisi statistiche a livello di stock edilizio. Quelli selezionati per questa applicazione sono tutti edifici reali che, nell'ambito del progetto TABULA, sono stati individuati essere rappresentativi della categoria alla quale appartengono. La raccolta dati necessaria alla costruzione dei modelli energetici è stata condotta consultando il database di TABULA come principale riferimento per i dati geometrici e per le caratteristiche tecnologiche e le performance di involucro e impianti. Queste ultime sono definite in termini, rispettivamente, di trasmittanze U (esprese in W/m^2K) ed efficienze. Le performance dei differenti sottosistemi impiantistici (emissione, regolazione, distribuzione, accumulo e generazione) sono definite in termini di efficienze o come perdite termiche medie, parametrizzate rispetto alla superficie netta climatizzata del RB, così come i consumi elettrici degli ausiliari. Le principali informazioni relative agli 8 RBs analizzati sono riportate nella sezione 4 di questo articolo, mentre per ulteriori informazioni si rimanda alla brochure del progetto TABULA (Corrado *et al.*, 2014). Sulla base dei dati così collezionati, sono stati costruiti 8 modelli energetici, i quali hanno consenti-

to di calcolare la performance energetico-ambientale di ciascun RB, rappresentando la base per la simulazione delle diverse misure di efficienza energetica. Le simulazioni energetiche basate sul metodo di calcolo semi-stazionario, sono state sviluppate con il supporto del software professionale MasterClima e in accordo con la normativa tecnica di riferimento (UNI/TS 11300-1) come semplice bilancio energetico per la determinazione del fabbisogno di riscaldamento (considerate anche le capacità termiche dei componenti e includendo gli apporti interni, così come quelli solari, assumendo di non avere ostruzioni né schermature), al quale si aggiungono le perdite termiche dovute ai diversi sottosistemi impiantistici (emissione, regolazione, distribuzione, accumulo e generazione) al fine di calcolare i consumi finali di riscaldamento (UNI/TS 11300-2). Lo stesso approccio è stato utilizzato per il calcolo dei consumi per la produzione di ACS, il cui fabbisogno per famiglia è stato stimato sulla base dei metri quadri di abitazione (UNI/TS 11300-2). Prima di simulare gli interventi per i differenti scenari di efficienza energetica, i modelli sono stati calibrati rispetto ai risultati forniti da TABULA stessa in termini di consumi al metro quadro, con un errore al di sotto del 3% in 5 casi su 8 e tra il 4% e l'8% (solo in un caso) nei rimanenti 3. Quindi, sono stati selezionati tre scenari di retrofit energetico, derivanti dalla combinazione di differenti misure di efficienza energetica, come descritto in Tabella 1.

In particolare, sono stati definiti 3 scenari di retrofit EE denominati Gas ("Gas"), Elettrico ("Elettrico") e Teleriscaldamento ("TLR"), per suggerire, tramite i loro nomi, la scelta della tecnologia di generazione di energia termica che li caratterizza. Tutti gli scenari comprendono un radicale intervento in termini di miglioramento della prestazione dell'involucro, tale da soddisfare i requisiti minimi di trasmittanza definiti dalla norma in materia (Ministero dello sviluppo economico, 2015) e da ridurre il fabbisogno termico invernale in ambiente. Nei casi in cui è prevista la sostituzione dei generatori tradizionali con caldaie a condensazione, i radiatori sono sostituiti con terminali operanti a bassa temperatura, mentre l'installazione di pompe di calore è combinata alla messa in opera di pannelli radianti a pavimento. In tutti gli edifici di riferimento in cui

Tabella 1 - Scenari di retrofit come combinazione di interventi su involucro edilizio e impianti

Scenari EE	IMPIANTI_ Sostituzione delle caldaie a gas tradizionali con caldaie a condensazione (inclusa la sostituzione dei radiatori).	Sostituzione delle caldaie a gas tradizionali con pompe di calore (inclusa la sostituzione dei radiatori) + installazione di pannelli fotovoltaici.	Allacciamento dell'edificio alla rete di teleriscaldamento (sia per il servizio di riscaldamento che per quello di acqua calda sanitaria).
INVOLUCRO_ Isolamento dell'involucro opaco (pareti e solai) e sostituzione dei serramenti.	Scenario Gas	Scenario Elettrico	Scenario TLR

Un nuovo prezzario per la valutazione di interventi di retrofit su archetipi di edifici

il riscaldamento sia autonomo (cioè per appartamento), tale servizio è combinato a quello di produzione di ACS, a meno che vi siano boiler elettrici per il secondo, nel qual caso essi vengono mantenuti. In tutti questi casi, sia il riscaldamento che la produzione di ACS sono resi centralizzati tramite gli interventi di retrofit ipotizzati. Quando solo il servizio di ACS è autonomo, l'introduzione di una caldaia a condensazione per questo non ne implica la centralizzazione, cosa che invece avviene negli scenari di retrofit che contemplino l'installazione di pompe di calore o di sottostazioni di teleriscaldamento. L'introduzione e/o la sostituzione di accumuli termici è sempre prevista per entrambi gli usi finali di riscaldamento e produzione di ACS (Figura 1).

Le simulazioni per ciascuno scenario sono state eseguite in MasterClima, quindi adottando lo stesso approccio computazionale descritto sopra, permettendo di valutare i fabbisogni e i consumi per i due usi finali analizzati (riscaldamento e ACS). Nessun risultato in termini di livello di comfort raggiunto è stato valutato. Inoltre, è importante sottolineare come ai modelli degli 8 RBs, anche nella loro configurazione di progetto, siano state applicate delle assunzioni simili a quelle già adottate nel progetto TABULA. Per esempio, sono stati impiegati valori parametrici di perdite dovute al sottosistema di accumulo termico per simulare l'installazione di tale tecnologia. Allo stesso modo sono stati fissati coefficienti di performance medi stagionali per le pompe di calore.

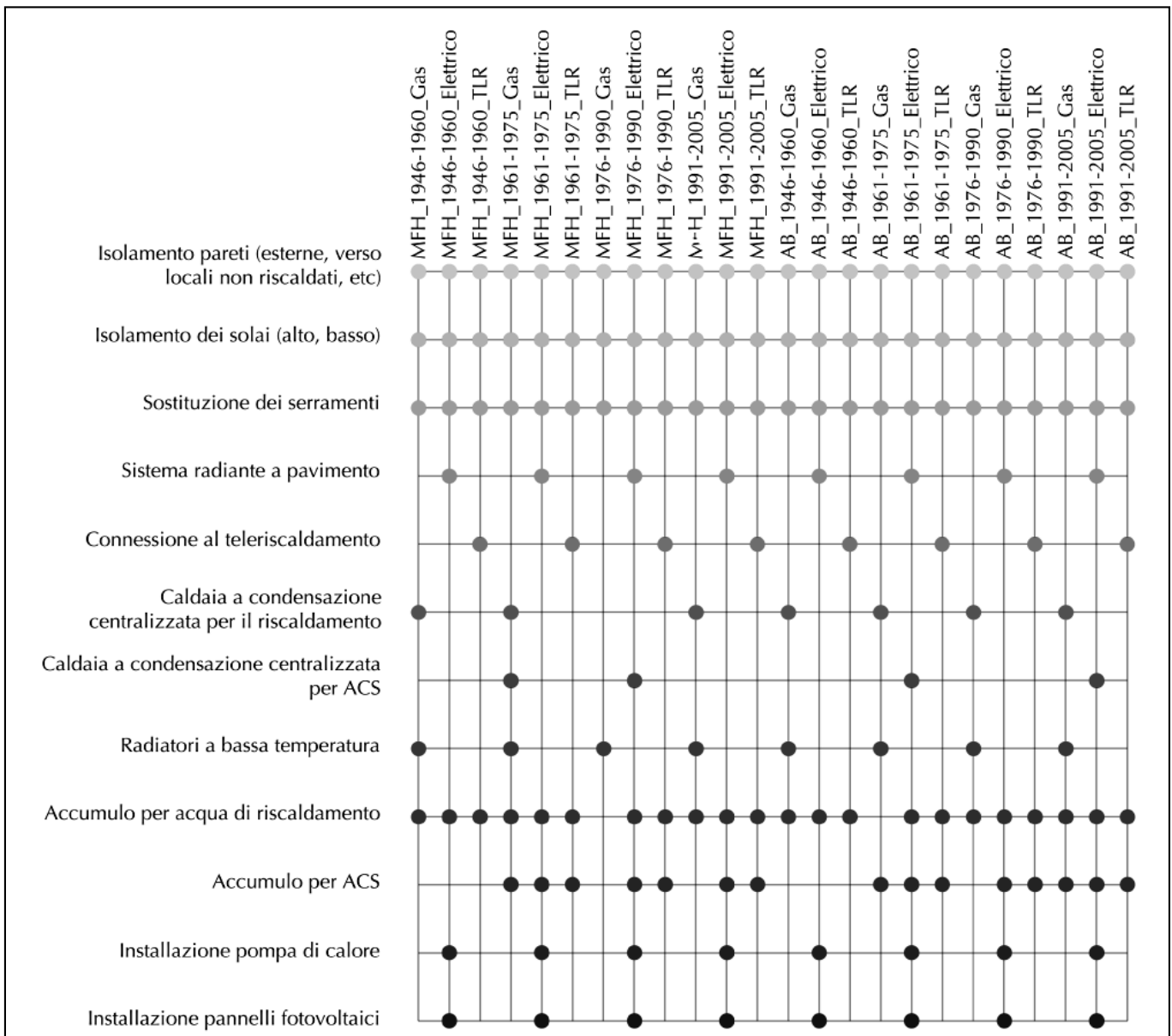


Figura 1 - Descrizione degli scenari di retrofit

Eseguendo i modelli degli 8 RBs prima e dopo la variazione dei parametri caratterizzanti le differenti ipotesi di retrofit, è stato possibile ottenere i risultati riportati in Tabella 6. In particolare, sono stati calcolati i consumi finali per ciascun vettore energetico (gas naturale, energia elettrica e calore fornito dal teleriscaldamento) e, a partire da questi, è stato possibile computare il consumo di energia primaria e le emissioni di gas serra tramite l'applicazione, rispettivamente, dei coefficienti di conversione in energia primaria e dei fattori di emissione. Tali fattori sono riportati in Tabella 2 per ciascuno dei vettori energetici considerati.

I consumi finali di energia per vettore energetico rappresentano il punto di partenza per la stima dei costi energetici, i quali rappresentano la quota fondamentale dei costi di esercizio stimati nella valutazione finanziaria (Sezione 3.2).

3.2 Stima dei costi di ciclo di vita

Per quanto riguarda le voci di costo di intervento per il retrofit energetico si è fatto riferimento al Prezzario DEI (DEI, 2018), includendo: assemblaggio dei ponteggi; retrofit dell'involucro opaco con rifacimento di intonaci esterni, insufflaggio o isolamento esterno e sostituzione di serramenti secondo la normativa italiana vigente; installazione di un nuovo sistema di distribuzione per riscaldamento e ACS; sostituzione dei sistemi di generazione per la produzione di ACS e fornitura di riscaldamento; installazione di pannelli fotovoltaici (FV) dove prevista. Per ogni singola misura implementata, il costo è stato calcolato analiticamente tramite computo metrico estimativo. Per ogni elemento il suo costo è determinato da un listino prezzi di riferimento (prezzo unitario, €/m² o €/unità) o da ricerche dirette sul mercato.

Il listino prezzi di riferimento principale utilizzato in questa ricerca è quello della Regione Piemonte (2018). In caso di elementi mancanti, si è fatto riferimento al listino prezzi della Provincia autonoma di Bolzano (2018) e al listino prezzi del Comune di Milano (2018). Sono stati inclusi tutti i prezzi relativi a materiali, manodopera e installazioni tecniche. Per fare ciò, per ogni tipologia di edificio studiato, è stato stimato il costo di investimento al metro quadrato e il costo di sostituzione dei sistemi preesistenti.

Inizialmente è stato creato un listino prezzi unitario, in cui sono stati specificati tutti gli elementi di costo per ciascun elemento implementato nella fase di riqualificazione energetica. È stato considerato anche il costo della manodopera. Nel caso non fosse già incluso nel costo d'investimento dell'elemento considerato, è stata considerata una voce di costo aggiuntiva. Successivamente, è stato elaborato un calcolo analitico che ha consentito di determinare tutte le superfici per ciascun componente dell'edificio di riferimento (superficie esterna, porte e finestre, taglia dei generatori di riscaldamento, ecc.). La Tabella 3 mostra un estratto del calcolo analitico per quanto riguarda l'involucro trasparente e opaco di un RB. Per ottenere il costo di investimento complessivo per ciascuno dei RB, i costi dei singoli elementi sono stati combinati. Per gli scenari di retrofit che includono la connessione al teleriscaldamento, oltre ai costi dell'impianto, sono stati considerati i costi di allacciamento alla rete. Per il calcolo di questo contributo, è stato fatto riferimento ai valori forniti da IREN (2019a), considerando che l'edificio si trovi vicino alla rete di teleriscaldamento esistente. In questo caso, l'importo del contributo viene impostato su base forfettaria in base al volume dell'edificio da riscaldare.

Un ulteriore aspetto da tenere in considerazione durante il ciclo di vita è la manutenzione degli elementi costruttivi e dei sistemi impiantistici. Questi costi coprono le spese necessarie per mantenere il corretto funzionamento del sistema nel corso degli anni. La UNI EN 15459/2018 (CTI, 2018) definisce i costi di manutenzione durante la vita utile degli elementi; in particolare, questi costi sono calcolati come percentuale del loro costo di investimento iniziale. Seguendo lo standard europeo, i costi di manutenzione annuali riguardano principalmente il sistema dell'impianto (Tabella 4). Laddove i costi di manutenzione non fossero disponibili, si è fatto riferimento a studi di casi reali (SUPSI, 2010).

I costi annuali comprendono anche i costi di gestione, generati durante la fase di esercizio dell'edificio. In questo caso si tratta di costi energetici, dipendenti dalla domanda energetica del sistema e dalla tipologia di vettore energetico impiegato per il suo soddisfacimento. In particolare, negli scenari selezionati sono stati inclusi il

Tabella 2 - Coefficienti di conversione in energia primaria e fattori di emissione di CO_{2eq} per ciascun vettore energetico considerato

	Coefficiente di conversione in energia primaria	Fattore di emissione di CO _{2eq}
Gas naturale	1,05 [-]	0,1969 [kgCO _{2eq} /kWh]
Energia elettrica dalla rete	2,42 [-]	0,4332 [kgCO _{2eq} /kWh]
Energia elettrica da fotovoltaico	1 [-]	0 [kgCO _{2eq} /kWh]
Teleriscaldamento	1,5 [-]	0,3088 [kgCO _{2eq} /kWh]

Fonte: DM 26/06/2015 (coefficienti di conversione in energia primaria) UNI/TS 11300-4 (fattori di emissione).

Tabella 3 - Costi d'investimento di un RB

1946-1960 AB	Descrizione	Id. prezzario di riferimento	Prezzo unitario	Prezzo totale
Misura: Sostituzione serramenti				
Superficie serramenti: 217 m ²	Rimozione delle finestre, rimozione dei detriti, e trasporto in un impianto di smaltimento autorizzato.	01.A02.C00.005	12,58 €/m ²	2'729,86
	Finestra con due porte; superficie fino a 3,5 m ²	03.P08.G01.045	235,91 €/m ²	51'192,47
	Installazione di finestre e porte, di qualsiasi spessore, di qualsiasi forma, dimensione e numero di ante in legno.	01.A17.B30.005	39,90 €/m ²	8'658,30
	Doppi vetri a bassa emissione.	01.P20.B04.025	44,67 €/m ²	9'636,39
Misura: Isolamento involucro				
Superficie muri esterni: 1'050 m ²	Rimozione dell'intonaco, rimozione dei detriti, compreso il trasporto verso un impianto di smaltimento autorizzato.	01.A02.B60.005	6,53 €/m ²	6'856,50
	Intonaco realizzato con malta cementizia.	01.A10.B20.065	15,91 €/m ²	16'705,50
	Ponteggio tubolare esterno multidirezionale. Sono inclusi trasporto, montaggio e smontaggio (per i primi 30 giorni)	01.P25.A98.005	11,65 €/m ²	12'232,50
	Ponteggio tubolare esterno multidirezionale. Sono inclusi trasporto, montaggio e smontaggio (per cinque mesi oltre il primo)	01.P25.A98.010	1,75 €/m ²	5'127,50
	Isolante termoacustico sfuso in scaglie per insufflaggio.	03.P09.G08.005	2,64 €/kg	16'428,30
	Insufflaggio di materiali isolanti termoacustici in scaglie nelle cavità delle pareti.	03.A07.B02.005	67,80 €/m ²	71'190,00
	Pittura a base d'acqua e a base di resine sintetiche, lavabile, su intonaco esterno.	01.A20.E30.010	9,36 €/m ²	5'484,96

gas naturale proveniente dalla rete nazionale, l'energia elettrica dalla rete, il teleriscaldamento di un fornitore locale e l'energia elettrica dai pannelli fotovoltaici installati in loco e destinati all'autoconsumo. È stato quindi necessario calcolare i costi operativi in base ai consumi energetici per vettore stimati grazie ai modelli energetici (Sezione 3.1). I prezzi del gas e dell'energia elettrica sono stati definiti consultando i dati ARERA (Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente) (ARERA, 2018), mentre il costo operativo nel caso degli scenari TLR è stato estrapolato dalle tariffe effettive di teleriscaldamento aggiornate al primo trimestre del 2019 per l'area di Torino (IREN, 2019b). Tutti i vettori energetici includono una quota fissa e una variabile. In particolare, la quota variabile è espressa in €/kWh, da moltiplicare per i consumi effettivi, mentre la quota fissa è espressa in €/anno, €/kW

ed €/m³ riscaldati rispettivamente per gas, elettricità e teleriscaldamento, ed è indipendente dal consumo effettivo.

La quota variabile per il gas varia a seconda della regione amministrativa. Si è fatto riferimento ai clienti domestici residenti nel nord-ovest dell'Italia. Nel calcolo sono state incluse tasse, spese di gestione e trasporto, IVA e accise. La quota fissa è stata tradotta in un valore parametrico espresso in €/m² per ciascun RB, stimando il numero di famiglie che occupano l'edificio a partire dal numero di appartamenti presenti nel RB.

La quota variabile per l'energia elettrica varia in base alla fascia di consumo. Dividendo i consumi totali per il numero di famiglie è stato definito che era possibile ipotizzare di fare riferimento alla banda più bassa per tutti i casi

Tabella 4 - Costi di manutenzione annuali stabiliti dalla UNI EN 15459/2018

Componente	% su costo d'investimento
Intonaco	0
Isolamento	0
Serramenti (in legno)	0,5
Caldaia a condensazione	2
Sistema radiante a pavimento	2
Pompa di calore	2-4
Pompe di circolazione	2
Pannello fotovoltaico	1
Accumulo acqua calda sanitaria	1

eccetto le tipologie "MFH 1946-1969" e "AB1946-1969". Anche per l'energia elettrica, sono state incluse le tasse, l'IVA e le accise. La quota fissa è stata tradotta in un valore parametrico espresso in €/m² per ciascun RB, conoscendo il numero di famiglie e fissando una potenza media del contatore per famiglia (pari a 3 kW o a 4,5 kW, quest'ultima quando è installata una pompa di calore). Come definito a livello nazionale, per l'energia elettrica autoprodotta consumata sono state calcolate solo le accise (ARERA, 2018).

Infine, la quota variabile per il teleriscaldamento è stata assunta da un fornitore locale, mentre la relativa quota fissa è stata convertita in un valore parametrico espresso in €/m² per ciascun RB, conoscendo il volume riscaldato. Tutti i parziali dei costi sono presentati nella seguente tabella (Tabella 5).

Tabella 5 - Quota variabile e fissa dei costi energetici per ciascun RB elaborate da ARERA (2018)

		Blocchi di appartamenti (AB)			
		'46 -'60	'61 -'75	'76 -'90	'91 -'05
Gas	[€/kWh]	0,0618	0,0618	0,0618	0,0618
Teleriscaldamento	[€/kWh]	0,0749	0,0749	0,0749	0,0749
Energia elettrica	[€/kWh]	0,1907	0,1414	0,1414	0,1414
Energia elettrica da fotovoltaico	[€/kWh]	0,0227	0,0227	0,0227	0,0227
Gas	[€/m ²]	1,3498	1,3824	1,1538	1,0913
Teleriscaldamento (riscaldamento)	[€/m ²]	2,9392	-	-	-
Teleriscaldamento (riscaldamento e acqua calda sanitaria)	[€/m ²]	-	3,6072	3,6072	3,6072
Energia elettrica	[€/m ²]	1,0004	1,0053	0,8350	0,7961
Energia elettrica (con pompa di calore)	[€/m ²]	1,0238	1,0197	0,8451	0,8087
		Edifici multifamiliari (MFH)			
		'46 -'60	'61 -'75	'76 -'90	'91 -'05
Gas	[€/kWh]	0,0618	0,0618	0,0618	0,0618
Teleriscaldamento	[€/kWh]	0,0749	0,0749	0,0749	0,0749
Energia elettrica	[€/kWh]	0,1907	0,1414	0,1414	0,1414
Energia elettrica da fotovoltaico	[€/kWh]	0,0227	0,0227	0,0227	0,0227
Gas	[€/m ²]	1,2377	1,0615	0,9838	1,3279
Teleriscaldamento (riscaldamento)	[€/m ²]	2,9392	-	-	-
Teleriscaldamento (riscaldamento e acqua calda sanitaria)	[€/m ²]	-	3,6072	3,6072	3,6072
Energia elettrica	[€/m ²]	0,9603	0,8383	0,7633	1,0118
Energia elettrica (con pompa di calore)	[€/m ²]	1,0033	0,8825	0,7975	1,0487

4. RISULTATI

L'applicazione riportata nella Sezione 3 è risultata nella realizzazione di una serie di schede restituite di seguito (Tabella 6). In tali schede sono state riportate le principali caratteristiche degli edifici in termini di geometria e tecnologie di involucro edilizio e di sistemi impiantistici, sia per lo stato di fatto che per i diversi scenari di retrofit ipotizzati. Accanto alle descrizioni sono riportati dei valori parametrici (cioè espressi su metro quadro di superficie climatizzata) in termini di consumi, di costi energetici e di emissioni di gas serra, che possono essere considerati di riferimento per le classi di edifici studiati. Per i tre scenari di retrofit, i costi di esercizio includono, accanto ai costi energetici, anche la quota di manutenzione. La performance energetica degli 8 RBs (nella situazione corrente e post-retrofit) è espressa in termini di energia primaria totale per riscaldamento e ACS al metro quadro riscaldato, compresi i consumi elettrici degli ausiliari impiantistici, mentre la loro performance ambientale è definita come emissioni di CO_{2eq} dovute ai consumi, anch'esse normalizzate al metro quadro riscaldato. Questa rappresentazione per schede (Tabella 6) permette di apprezzare le differenze tra le misure di efficienza energetica implementate per ciascun RB e di avere una lettura critica dei loro impatti in termini di consumi, emissioni e costi. Il fatto che i dati siano normalizzati, consente di impiegarli per valutare la convenienza di certi interventi, facendo di queste schede un supporto allo sviluppo di piani preliminari di fattibilità per edifici multifamiliari, così frequenti nei contesti urbani.

Guardando ai risultati ottenuti in termini di costi energetici, è possibile osservare come i costi fissi rappresentino una percentuale compresa tra il 10% e il 25% della bolletta dei RB nelle loro condizioni di performance correnti. L'incidenza dei costi fissi cresce in presenza di retrofit energetico dei RB, poiché i consumi, dunque i conseguenti costi variabili, decrescono. Allo stesso modo, i costi fissi pesano di più sulle bollette degli edifici più nuovi rispetto a quelli meno recenti, in quanto i primi sono caratterizzati da migliori performance energetiche, quindi minori consumi. La soluzione che prevede la connessione al teleriscaldamento non è così conveniente come ci si aspetterebbe, specialmente in edifici più recenti. Infatti, a fronte di una migliore performance energetica degli edifici più nuovi, caratterizzati quindi da consumi più bassi, i costi fissi del teleriscaldamento non risultano molto vantaggiosi, influenzando la competizione tra generatori a gas naturale e teleriscaldamento a sfavore di quest'ultimo. Anche in termini di impatti ambientali il teleriscaldamento non è sempre la soluzione ottimale rispetto all'adozione di impianti centralizzati a livello di edificio. Tuttavia, è molto importante sottolineare come i consumi di energia primaria e le emissioni in caso di adozione del teleriscaldamento siano stati calcolati facendo riferimento a fattori di conversione standard. Differenti risultati si otterrebbero se si utilizzassero le specifiche fornite dal fornitore locale in termini di fattori di conversione in energia primaria e fattori di emissione, i quali sono strettamente dipendenti dalla tipologia di centrale. Dall'altra parte, lo scenario

elettrico consente una riduzione dei costi energetici. Infatti, l'efficienza energetica delle pompe di calore garantisce una riduzione dei consumi che controbilancia in parte le alte tariffe per l'energia elettrica rispetto a quelle per la fornitura di gas naturale. Poiché gli scenari di retrofit hanno un limitato impatto sui consumi per ACS, i vantaggi ottenuti dal retrofit in termini di riduzione di costi energetici sono soprattutto connessi al servizio di riscaldamento e non sempre risulta conveniente la sostituzione degli impianti di ACS verso soluzioni con diverso vettore energetico rispetto a quello di partenza. Venendo ai costi di investimento, le soluzioni basate su tecnologie elettriche (pompe di calore e pannelli fotovoltaici) prevedono in generale maggiori costi di investimento, così come maggiori costi di manutenzione, poiché è richiesta una manodopera più specializzata, comportando un generale aumento dei costi di esercizio negli scenari elettrici rispetto agli altri. Per avere un quadro completo delle voci di costo incluse nel calcolo del valore di costo di investimento parametrizzato al metro quadro riscaldato e riportato in Tabella 6, si faccia riferimento alla Figura 1, mentre maggiori specifiche relativamente ai costi energetici e di manutenzione sono riportate rispettivamente in Tabella 4 e in Tabella 5.

5. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Grazie a questo studio è possibile investigare il potenziale risparmio di energia e di emissioni ottenibili tramite interventi di retrofit energetico su una serie di RB. Lo studio è partito dai risultati del progetto TABULA, il quale ha contribuito a dimostrare il potenziale del concetto di RB nella definizione di strategie nazionali per la riduzione dei consumi energetici. In particolare, in questo studio si è fatto riferimento allo stock edilizio residenziale italiano, nello specifico agli edifici multifamiliari collocati in zona climatica E. Infatti, gli 8 RBs selezionati per questo studio sono tutti edifici reali collocati in Regione Piemonte (Italia) che, nell'ambito del suddetto progetto TABULA, sono stati definiti quali edifici di riferimento, in quanto rappresentativi della categoria alla quale appartengono in termini di tipologia costruttiva ed epoca di costruzione. A partire dal database di TABULA, sono stati costruiti gli 8 modelli energetici e sono stati valutati performance energetico-ambientali e costi (di investimento e di esercizio) nelle loro condizioni correnti e per scenari di retrofit energetico. In particolare, i costi di esercizio sono stati computati facendo riferimento alla formula di Costo Globale fornita dalla Direttiva Europea in materia, quali costi operativi (cioè i costi energetici) e costi di manutenzione. Questo ha permesso di ottenere un prezzario per alcuni tipi edilizi, nella forma, in particolare, di valori parametrici di costi per lo stato di fatto e per differenti scenari, accompagnati da stime relativamente alle performance energetiche ottenibili e agli impatti ambientali correlati. Allo stesso tempo, grazie a questo studio, è possibile avere un quadro di alcune possibili misure di efficienza energetica che, essendo accompagnate da valori di riferimento normalizzati sui metri quadri riscaldati, possono essere impiegate in futuri studi volti a valutarne la fattibilità per edifici simili.

Tabella 6 - Descrizione degli edifici di riferimento (RB) e risultati

	EDIFICI	Involucro	Impianto	Risultati
MFH 1946-1960	 <p>Volume riscaldato 3076 m³ Superficie netta totale 961,3 m² N. di appartamenti 12</p>	<p>Muri Muratura in laterizio (25-38 cm) $U_m = 1,53 \text{ W/m}^2\text{°C}$ Tetto Tetto a falde in legno $U_m = 1,8 \text{ W/m}^2\text{°C}$ Solaio Solaio latero-cementizio $U_m = 1,3 \text{ W/m}^2\text{°C}$ Serramenti Telaio in legno, vetro singolo $U_m = 4,9 \text{ W/m}^2\text{°C}$</p>	<p>Riscaldamento Centralizzato, caldaia a gas (efficienza 0,85) Acqua calda sanitaria Autonomo, boiler elettrici (efficienza 0,75) Fonti energetiche rinnovabili Nessuna</p>	<p>Consumi (energia primaria) 335,86 kWh/m²a Emissioni 62,38 kgCO_{2eq}/m²a Costi energetici 23,39 €/m²a (di cui fissi: 9%)</p>
MFH 1961-1975	 <p>Volume riscaldato 3074 m³ Superficie netta totale 934 m² N. di appartamenti 10</p>	<p>Muri Muratura in laterizio (25-30 cm) $U_m = 1,23 \text{ W/m}^2\text{°C}$ Tetto Tetto a falde in latero-cemento $U_m = 2,2 \text{ W/m}^2\text{°C}$ Solaio Solaio latero-cementizio $U_m = 1,3 \text{ W/m}^2\text{°C}$ Serramenti Telaio in legno, vetro singolo $U_m = 4,9 \text{ W/m}^2\text{°C}$</p>	<p>Riscaldamento Autonomo, caldaie a gas (efficienza 0,88) Acqua calda sanitaria Autonomo, caldaie a gas (efficienza 0,84), combinato con il servizio di riscaldamento Fonti energetiche rinnovabili Nessuna</p>	<p>Consumi (energia primaria) 238,15 kWh/m²a Emissioni 44,63 kgCO_{2eq}/m²a Costi energetici 15,92 €/m²a (di cui fissi: 12%)</p>
MFH 1976-1990	 <p>Volume riscaldato 4136 m³ Superficie netta totale 1209 m² N. di appartamenti 12</p>	<p>Muri Muratura in laterizio con basso isolamento (25 cm) $U_m = 0,79 \text{ W/m}^2\text{°C}$ Tetto Tetto a falde in latero-cemento $U_m = 2,2 \text{ W/m}^2\text{°C}$ Solaio Solaio latero-cementizio con basso isolamento $U_m = 1,12 \text{ W/m}^2\text{°C}$ Serramenti Telaio metallico, doppio vetro $U_m = 3,7 \text{ W/m}^2\text{°C}$</p>	<p>Riscaldamento Autonomo, caldaie a gas (efficienza 0,88) Acqua calda sanitaria Autonomo, caldaie a gas (efficienza 0,84), combinato con il servizio di riscaldamento Fonti energetiche rinnovabili Nessuna</p>	<p>Consumi (energia primaria) 156,58 kWh/m²a Emissioni 29,33 kgCO_{2eq}/m²a Costi energetici 10,97 €/m²a (di cui fissi: 16%)</p>
MFH 1991-2005	 <p>Volume riscaldato 3526 m³ Superficie netta totale 1120,5 m² N. di appartamenti 15</p>	<p>Muri Muratura in laterizio e in cls (30 cm) con medio livello di isolamento $U_m = 0,59 \text{ W/m}^2\text{°C}$ Tetto Tetto a falde in latero-cemento $U_m = 2,2 \text{ W/m}^2\text{°C}$ Solaio Solaio latero-cementizio con medio isolamento $U_m = 0,81 \text{ W/m}^2\text{°C}$ Serramenti Telaio in legno, doppio vetro trattato $U_m = 2,2 \text{ W/m}^2\text{°C}$</p>	<p>Riscaldamento Centralizzato, caldaia a gas (efficienza 0,77) Acqua calda sanitaria Autonomo, caldaie a gas (efficienza 0,8) Fonti energetiche rinnovabili Nessuna</p>	<p>Consumi (energia primaria) 131,11 kWh/m²a Emissioni 24,55 kgCO_{2eq}/m²a Costi energetici 10,06 €/m²a (di cui fissi: 23%)</p>





segue

Tabella 6 - Descrizione degli edifici di riferimento (RB) e risultati (continua)

Involucro	Impianto	Risultati
MFH 1946-1960 Isolamento completo dell'involucro opaco e sostituzione dei serramenti in accordo con gli standard nazionali (DM 26/06/2015)	Sostituzione della caldaia a gas tradizionale con altra più performante (solo per il riscaldamento)	Consumi: 90,92 kWh/m ² a Emissioni: 16,45 kgCO _{2eq} /m ² a Costi energetici: 8,95 €/m ² a (di cui fissi: 25%) Costi di manutenzione: 0,097 €/m ² a Costi di investimento: 182,38 €/m ²
	Sostituzione della caldaia a gas tradizionale con pompa di calore (solo per il riscaldamento) + pannelli fotovoltaici	Consumi: 58,98 kWh/m ² a Emissioni: 6,52 kgCO _{2eq} /m ² a Costi energetici: 4,39 €/m ² a (di cui fissi: 23%) Costi di manutenzione: 1,20 €/m ² a Costi di investimento: 444,53 €/m ²
	Connessione alla rete di teleriscaldamento (solo per il riscaldamento)	Consumi: 106,27 kWh/m ² a Emissioni: 19,95 kgCO _{2eq} /m ² a Costi energetici: 11,28 €/m ² a (di cui fissi: 35%) Costi di manutenzione: 0,029 €/m ² a Costi di investimento: 206,91 €/m ²
MFH 1961-1975 Isolamento completo dell'involucro opaco e sostituzione dei serramenti in accordo con gli standard nazionali (DM 26/06/2015)	Sostituzione delle caldaie a gas tradizionali con altre più performanti	Consumi: 55,82 kWh/m ² a Emissioni: 10,37 kgCO _{2eq} /m ² a Costi energetici: 5,18 €/m ² a (di cui fissi: 37%) Costi di manutenzione: 0,162 €/m ² a Costi di investimento: 227,72 €/m ²
	Sostituzione delle caldaie a gas tradizionali con pompe di calore + pannelli fotovoltaici	Consumi: 27,26 kWh/m ² a Emissioni: 3,46 kgCO _{2eq} /m ² a Costi energetici: 2,19 €/m ² a (di cui fissi: 40%) Costi di manutenzione: 1,113 €/m ² a Costi di investimento: 456,71 €/m ²
	Connessione alla rete di teleriscaldamento	Consumi: 81,46 kWh/m ² a Emissioni: 4,58 kgCO _{2eq} /m ² a Costi energetici: 8,59 €/m ² a (di cui fissi: 52%) Costi di manutenzione: 0,473 €/m ² a Costi di investimento: 250,96 €/m ²
MFH 1976-1990 Isolamento completo dell'involucro opaco e sostituzione dei serramenti in accordo con gli standard nazionali (DM 26/06/2015)	Sostituzione delle caldaie a gas tradizionali con altre più performanti	Consumi: 49,97 kWh/m ² a Emissioni: 9,26 kgCO _{2eq} /m ² a Costi energetici: 4,68 €/m ² a (di cui fissi: 37%) Costi di manutenzione: 0,361 €/m ² a Costi di investimento: 224,23 €/m ²
	Sostituzione delle caldaie a gas tradizionali con pompe di calore + pannelli fotovoltaici	Consumi: 29,46 kWh/m ² a Emissioni: 4,77 kgCO _{2eq} /m ² a Costi energetici: 2,42 €/m ² a (di cui fissi: 33%) Costi di manutenzione: 1,096 €/m ² a Costi di investimento: 364,01 €/m ²
	Connessione alla rete di teleriscaldamento	Consumi: 76,67 kWh/m ² a Emissioni: 15,55 kgCO _{2eq} /m ² a Costi energetici: 8,27 €/m ² a (di cui fissi: 53%) Costi di manutenzione: 0,543 €/m ² a Costi di investimento: 211,02 €/m ²
MFH 1991-2005 Isolamento completo dell'involucro opaco e sostituzione dei serramenti in accordo con gli standard nazionali (DM 26/06/2015)	Sostituzione delle caldaie a gas tradizionali con altre più performanti	Consumi: 45,21 kWh/m ² a Emissioni: 8,45 kgCO _{2eq} /m ² a Costi energetici: 5,00 €/m ² a (di cui fissi: 47%) Costi di manutenzione: 0,201 €/m ² a Costi di investimento: 194,35 €/m ²
	Sostituzione delle caldaie a gas tradizionali con pompe di calore + pannelli fotovoltaici	Consumi: 25,92 kWh/m ² a Emissioni: 3,29 kgCO _{2eq} /m ² a Costi energetici: 2,68 €/m ² a (di cui fissi: 39%) Costi di manutenzione: 1,793 €/m ² a Costi di investimento: 437,40 €/m ²
	Connessione alla rete di teleriscaldamento	Consumi: 78,32 kWh/m ² a Emissioni: 15,89 kgCO _{2eq} /m ² a Costi energetici: 8,60 €/m ² a (di cui fissi: 54%) Costi di manutenzione: 0,554 €/m ² a Costi di investimento: 212,53 €/m ²

segue

Tabella 6 - Descrizione degli edifici di riferimento (RB) e risultati (continua)

	EDIFICI	Involucro	Impianto	Risultati
AB 1946-1960	 <p>Volume riscaldato 5949 m³ Superficie netta totale 1763 m² N. di appartamenti 24</p>	<p>Muri Muratura in laterizio (30 cm) e in cls (18 cm) $U_m = 1,67 \text{ W/m}^2\text{°C}$ Tetto Tetto a falde in legno $U_m = 1,8 \text{ W/m}^2\text{°C}$ Solaio Solaio latero-cementizio $U_m = 1,3 \text{ W/m}^2\text{°C}$ Serramenti Telaio in legno, vetro singolo $U_m = 4,9 \text{ W/m}^2\text{°C}$</p>	<p>Riscaldamento Centralizzato, caldaia a gas tradizionale (efficienza 0,85) Acqua calda sanitaria Autonomo, boiler elettrici (efficienza 0,75) Fonti energetiche rinnovabili Nessuna</p>	<p>Consumi (energia primaria) 292,74 kWh/m²a Emissioni 54,28 kgCO_{2eq}/m²a Costi energetici 21,02 €/m²a (di cui fissi: 11%)</p>
AB 1961-1975	 <p>Volume riscaldato 9438 m³ Superficie netta totale 2869 m² N. di appartamenti 40</p>	<p>Muri Muratura in laterizio (40 cm) $U_m = 1,11 \text{ W/m}^2\text{°C}$ Tetto Tetto a falde in latero-cemento $U_m = 2,2 \text{ W/m}^2\text{°C}$ Solaio Solaio latero-cementizio $U_m = 1,52 \text{ W/m}^2\text{°C}$ Serramenti Telaio in legno, vetro singolo $U_m = 4,9 \text{ W/m}^2\text{°C}$</p>	<p>Riscaldamento Centralizzato, caldaia a gas tradizionale (efficienza 0,71) Acqua calda sanitaria Centralizzato, caldaia a gas tradizionale (efficienza 0,73) Fonti energetiche rinnovabili Nessuna</p>	<p>Consumi (energia primaria) 281,25 kWh/m²a Emissioni 52,66 kgCO_{2eq}/m²a Costi energetici 18,95 €/m²a (di cui fissi: 13%)</p>
AB 1976-1990	 <p>Volume riscaldato 12685 m³ Superficie netta totale 4125 m² N. di appartamenti 48</p>	<p>Muri Muratura in laterizio (40 cm) e in cls (18 cm) con basso isolamento $U_m = 0,76 \text{ W/m}^2\text{°C}$ Tetto Tetto piano in latero-cemento $U_m = 1,85 \text{ W/m}^2\text{°C}$ Solaio Solaio latero-cementizio con basso isolamento $U_m = 0,98 \text{ W/m}^2\text{°C}$ Serramenti Telaio metallico, doppio vetro $U_m = 3,7 \text{ W/m}^2\text{°C}$</p>	<p>Riscaldamento Centralizzato, caldaia a gas tradizionale (efficienza 0,85) Acqua calda sanitaria Autonomo, caldaie a gas tradizionali (efficienza 0,80) Fonti energetiche rinnovabili Nessuna</p>	<p>Consumi (energia primaria) 124 kWh/m²a Emissioni 23,20 kgCO_{2eq}/m²a Costi energetici 9,29 €/m²a (di cui fissi: 21%)</p>
AB 1991-2005	 <p>Volume riscaldato 9912 m³ Superficie netta totale 3271 m² N. di appartamenti 36</p>	<p>Muri Muratura in laterizio (40 cm) e in cls (30 cm) con medio isolamento $U_m = 0,59 \text{ W/m}^2\text{°C}$ Tetto Tetto piano in latero-cemento con medio isolamento $U_m = 0,7 \text{ W/m}^2\text{°C}$ Solaio Solaio latero-cementizio con medio isolamento $U_m = 0,77 \text{ W/m}^2\text{°C}$ Serramenti Telaio in legno, doppio vetro $U_m = 3,4 \text{ W/m}^2\text{°C}$</p>	<p>Riscaldamento Autonomo, caldaie a gas tradizionali (efficienza 0,88) Acqua calda sanitaria Autonomo, caldaie a gas tradizionali (efficienza 0,84), combinato con il servizio di riscaldamento Fonti energetiche rinnovabili Nessuna</p>	<p>Consumi (energia primaria) 97,36 kWh/m²a Emissioni 18,22 kgCO_{2eq}/m²a Costi energetici 7,62 €/m²a (di cui fissi: 25%)</p>

segue

Un nuovo prezzario per la valutazione di interventi di retrofit su archetipi di edifici

Tabella 6 - Descrizione degli edifici di riferimento (RB) e risultati (continua)

Involucro	Impianto	Risultati
AB 1946-1960 Isolamento completo dell'involucro opaco e sostituzione dei serramenti in accordo con gli standard nazionali (DM 26/06/2015)	Sostituzione delle caldaie a gas tradizionali con altre più performanti (solo per il riscaldamento)	<i>Consumi:</i> 88,13 kWh/m ² a <i>Emissioni:</i> 15,91 kgCO _{2eq} /m ² a <i>Costi energetici:</i> 8,97 €/m ² a (di cui fissi: 26%) <i>Costi di manutenzione:</i> 0,021 €/m ² a <i>Costi di investimento:</i> 181,03 €/m ²
	Sostituzione delle caldaie a gas tradizionali con pompe di calore (solo per il riscaldamento) + pannelli fotovoltaici	<i>Consumi:</i> 61,04 kWh/m ² a <i>Emissioni:</i> 7,37 kgCO _{2eq} /m ² a <i>Costi energetici:</i> 4,72 €/m ² a (di cui fissi: 22%) <i>Costi di manutenzione:</i> 1,305 €/m ² a <i>Costi di investimento:</i> 425,08 €/m ²
	Connessione alla rete di teleriscaldamento (solo per il riscaldamento)	<i>Consumi:</i> 96,65 kWh/m ² a <i>Emissioni:</i> 18,03 kgCO _{2eq} /m ² a <i>Costi energetici:</i> 10,77 €/m ² a (di cui fissi: 37%) <i>Costi di manutenzione:</i> 0,016 €/m ² a <i>Costi di investimento:</i> 180,50 €/m ²
AB 1961-1975 Isolamento completo dell'involucro opaco e sostituzione dei serramenti in accordo con gli standard nazionali (DM 26/06/2015)	Sostituzione delle caldaie a gas tradizionali con altre più performanti	<i>Consumi:</i> 53,85 kWh/m ² a <i>Emissioni:</i> 10 kgCO _{2eq} /m ² a <i>Costi energetici:</i> 5,55 €/m ² a (di cui fissi: 43%) <i>Costi di manutenzione:</i> 0,181 €/m ² a <i>Costi di investimento:</i> 184,02 €/m ²
	Sostituzione delle caldaie a gas tradizionali con pompe di calore + pannelli fotovoltaici	<i>Consumi:</i> 26,96 kWh/m ² a <i>Emissioni:</i> 3,37 kgCO _{2eq} /m ² a <i>Costi energetici:</i> 2,30 €/m ² a (di cui fissi: 44%) <i>Costi di manutenzione:</i> 1,893 €/m ² a <i>Costi di investimento:</i> 430,16 €/m ²
	Connessione alla rete di teleriscaldamento	<i>Consumi:</i> 78,64 kWh/m ² a <i>Emissioni:</i> 15,95 kgCO _{2eq} /m ² a <i>Costi energetici:</i> 8,61 €/m ² a (di cui fissi: 54%) <i>Costi di manutenzione:</i> 0,025 €/m ² a <i>Costi di investimento:</i> 195,06 €/m ²
AB 1976-1990 Isolamento completo dell'involucro opaco e sostituzione dei serramenti in accordo con gli standard nazionali (DM 26/06/2015)	Sostituzione delle caldaie a gas tradizionali con altre più performanti	<i>Consumi:</i> 39,79 kWh/m ² a <i>Emissioni:</i> 7,41 kgCO _{2eq} /m ² a <i>Costi energetici:</i> 4,33 €/m ² a (di cui fissi: 46%) <i>Costi di manutenzione:</i> 0,102 €/m ² a <i>Costi di investimento:</i> 134,51 €/m ²
	Sostituzione delle caldaie a gas tradizionali con pompe di calore + pannelli fotovoltaici	<i>Consumi:</i> 23,59 kWh/m ² a <i>Emissioni:</i> 2,91 kgCO _{2eq} /m ² a <i>Costi energetici:</i> 1,96 €/m ² a (di cui fissi: 43%) <i>Costi di manutenzione:</i> 1,427 €/m ² a <i>Costi di investimento:</i> 356,52 €/m ²
	Connessione alla rete di teleriscaldamento	<i>Consumi:</i> 68,12 kWh/m ² a <i>Emissioni:</i> 13,79 kgCO _{2eq} /m ² a <i>Costi energetici:</i> 7,92 €/m ² a (di cui fissi: 56%) <i>Costi di manutenzione:</i> 0,029 €/m ² a <i>Costi di investimento:</i> 137,39 €/m ²
AB 1991-2005 Isolamento completo dell'involucro opaco e sostituzione dei serramenti in accordo con gli standard nazionali (DM 26/06/2015)	Sostituzione delle caldaie a gas tradizionali con altre più performanti	<i>Consumi:</i> 49,28 kWh/m ² a <i>Emissioni:</i> 9,13 kgCO _{2eq} /m ² a <i>Costi energetici:</i> 4,78 €/m ² a (di cui fissi: 39%) <i>Costi di manutenzione:</i> 0,159 €/m ² a <i>Costi di investimento:</i> 160,67 €/m ²
	Sostituzione delle caldaie a gas tradizionali con pompe di calore + pannelli fotovoltaici	<i>Consumi:</i> 24,10 kWh/m ² a <i>Emissioni:</i> 3,04 kgCO _{2eq} /m ² a <i>Costi energetici:</i> 1,96 €/m ² a (di cui fissi: 41%) <i>Costi di manutenzione:</i> 1,656 €/m ² a <i>Costi di investimento:</i> 387,75 €/m ²
	Connessione alla rete di teleriscaldamento	<i>Consumi:</i> 67,86 kWh/m ² a <i>Emissioni:</i> 13,74 kgCO _{2eq} /m ² a <i>Costi energetici:</i> 7,86 €/m ² a (di cui fissi: 56%) <i>Costi di manutenzione:</i> 0,017 €/m ² a <i>Costi di investimento:</i> 161,48 €/m ²

I valori riportati in Tabella 6 devono essere considerati indicativi per valutazioni preliminari, tenendo a mente che molti dei dati di input allo studio fanno riferimento alla realtà del nord Italia, in particolare alla Regione Piemonte. In particolare, i costi di investimento, di esercizio e di manutenzione sono soggetti a variazioni nel tempo. Inoltre, è importante considerare che, nella costruzione dei modelli energetici sia dello stato di fatto che delle condizioni di progetto sono state incluse delle assunzioni simili a quelle definite in TABULA, specie relativamente alle caratteristiche dei diversi sottosistemi impiantistici, al fine di mantenere i risultati generalizzabili.

I risultati ottenuti da questo studio possono rappresentare la base per successive investigazioni che mirino a includere altre tipologie edilizie, così da coprire una porzione di stock edilizio sempre più ampia. Negli ultimi anni, la letteratura scientifica sta ponendo molta attenzione nella valutazione delle esternalità prodotte dalle operazioni di efficienza energetica, i cosiddetti co-benefici (IPCC, 2014).

Generalmente, gli impatti extra coinvolgono diversi attori, in primo luogo i proprietari degli immobili (Becchio *et al.*, 2017). In futuro, è possibile proporre listini prezzi che includano altri parametri da prendere in considerazione nelle fasi di valutazione preliminare. In quest'ottica, la scelta del decisore non è influenzata soltanto da parametri finanziari ed energetici, ma anche da aspetti qualitativi e percettivi dell'investimento. Nel settore privato, le ore di comfort termico garantite da una certa combinazione di misure di efficienza rispetto ad altre possono fornire indicazioni utili. Un parametro che indichi il grado di sicurezza energetica garantito da un impianto fotovoltaico in termini di riduzione dei blackout energetici può rassicurare l'investitore. L'aumento del valore immobiliare è uno dei parametri più studiati e verificati nella letteratura scientifica (Bottero *et al.*, 2018). In questo contesto, le informazioni qualitative sulle prestazioni degli edifici, in termini di classe energetica degli edifici, rappresentano un indicatore che riflette direttamente i vantaggi del retrofit.

* **Federico Dell'Anna**, Dipartimento Interateneo di Scienze, Progetto e Politiche del Territorio (DIST), Politecnico di Torino.

e-mail: federico.dellanna@polito.it

** **Giulia Vergerio**, Dipartimento Energia (DENERG), Politecnico di Torino.

e-mail: giulia.vergerio@polito.it

*** **Stefano Paolo Corgnati**, Dipartimento Energia (DENERG), Politecnico di Torino.

e-mail: stefano.corgnati@polito.it

**** **Giulio Mondini**, Dipartimento Interateneo di Scienze, Progetto e Politiche del Territorio (DIST), Politecnico di Torino.

e-mail: giulio.mondini@polito.it

Bibliografia

ARERA (2018), Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente. Disponibile all'indirizzo: <https://www.arera.it/inglese/index.htm>. Consultato il 12 Maggio 2018.

BALLARINI I., CORGNATI S., CORRADO V., *Use of reference buildings to assess the energy saving potentials of the residential building stock: The experience of TABULA project*, Energy Policy, Vol. 68, 2014, pp. 273-284.

BARTHELMES V., BECCHIO C., BOTTERO M., CORGNATI S., *Cost-optimal analysis for the definition of energy design strategies: the case of a nearly-Zero Energy Building*, Valori e valutazioni, Vol. 16, 2016, pp. 61-76.

BECCIO C., BOTTERO M., CORGNATI S., DELL'ANNA F., *A MCDA-based approach for evaluating alternative requalification strategies for a Net-Zero Energy District (NZED), Multiple Criteria Decision Making*. Springer, Cham, 2017, pp. 189-211.

BECCIO C., BOTTERO M., CORGNATI S., DELL'ANNA F., *Decision making for sustainable urban energy planning: an integrated evaluation framework of alternative solutions for a NZED (Net Zero-Energy District) in Turin*, Land Use Policy, Vol. 78, 2018, pp. 803-817.

BOTTERO M., BRAVI M., DELL'ANNA F., MONDINI G., *Valuing buildings energy efficiency through Hedonic Prices Method: are*

spatial effects relevant?, Valori e valutazioni, Vol. 21, 2018, pp. 27-39.

BOTTERO M., COMINO E., DELL'ANNA F., DOMINICI L., ROSSO M., *Strategic Assessment and Economic Evaluation: The Case Study of Yanzhou Island (China)*, Sustainability, Vol. 11(4), 1076, 2019b.

BOTTERO M., D'ALPAOS C., DELL'ANNA F., *Boosting investments in buildings energy retrofit: The role of incentives*, Smart Innovation, Systems and Technologies, Vol. 101, 2019b, pp. 593-600.

BUSO T., DELL'ANNA F., BECCHIO C., BOTTERO M., CORGNATI S., *Of comfort and cost: Examining indoor comfort conditions and guests' valuations in Italian hotel rooms*, Energy Research & Social Science, Vol. 32, 2017, pp. 94-111.

CEN (2017), *Energy performance of buildings - Economic Evaluation Procedure for Energy Systems in Buildings*, EN 15459:2017. Comité Européen de Normalisation Standard.

COMMISSIONE EUROPEA (2002), Direttiva 2002/91/CE, Energy Performance of Building Directive (EPBD), Bruxelles.

COMMISSIONE EUROPEA (2010), Direttiva 2010/31/CE, Energy Performance of Building Directive Recast (EPBD recast), 2010, Bruxelles.

COMMISSIONE EUROPEA (2018), Direttiva 2018/844/CE,

Energy Performance of Building Directive 2nd Recast (new EPBD), Bruxelles.

COMUNE DI MILANO (2018), Listino prezzi per l'esecuzione di opere pubbliche e manutenzioni, Volume 1.2.

CORGNATI S. P., FABRIZIO E., FILIPPI M., MONETTI V., *Reference buildings for cost optimal analysis: Method of definition and application*, Applied Energy, Vol. 102, 2013, pp. 983-993.

CORRADO V., BALLARINI I., CORGNATI S. P. (2014), *Building Typology Brochure – Italy. Fascicolo sulla Tipologia Edilizia Italiana*. ISBN: 987-88-8202-065-1. Disponibile all'indirizzo: http://www.building-typology.eu/downloads/public/docs/brochure/IT_TABULA_TypologyBrochure_POLITO.pdf. Consultato il 15 Marzo 2019.

CTI (2018), Prestazione energetica degli edifici - Sistemi di riscaldamento e sistemi di raffrescamento idronici negli edifici - Parte 1: Procedura di valutazione economica per i sistemi energetici negli edifici - UNI EN 15459-1:2018. Comitato Termotecnico Italiano.

CTI (2019), Prestazioni energetiche degli edifici - 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l'illuminazione in edifici non residenziali. UNI/TS 11300-2:2019. Comitato Termotecnico Italiano.

D'ALPAOS C., BRAGOLUSI P., *Buildings energy retrofit valuation approaches: State of the art and future perspectives*, Valori e Valutazioni, Vol. 20, 2018, pp. 79-92.

DEI, Tipografia del Genio Civile (2018), Prezzi informativi dell'edilizia per Recupero, Ristrutturazione e Manutenzione; Rome.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2014), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. University Press Cambridge, Cambridge. Disponibile all'indirizzo: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_full.pdf. Consultato il 11 Marzo 2019.

IREN (2019a), *Contributo di allacciamento e attività incluse*. Disponibile all'indirizzo: <https://www.gruppoiren.it/modality-di-allacciamento>. Consultato il 11 Marzo 2019.

IREN (2019b), *Tariffe teleriscaldamento per uso domestico*

a Torino. Disponibile all'indirizzo: <https://www.irenlucegas.it/documents/66424/360788/TORINO+tariffe+tele+I%C2%B0+trim+2019.pdf/af2d6de4-69e7-4b90-b4b4-660f1418c30e>. Consultato il 15 Marzo 2019.

ISTAT (2011), *Censimento Popolazione Abitazioni 2011*. Disponibile all'indirizzo: http://dati-censimentopopolazione.istat.it/Index.aspx?DataSetCode=DICA_EDIFICIRES. Consultato il 11 Marzo 2019.

MASTERCLIMA SOFTWARE (2017). Disponibile all'indirizzo: <http://www.masterclima.info/page/Software.aspx>. Consultato il 15 Marzo 2019.

MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO (2015). DM 26/06/2015 - *Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici*. Disponibile all'indirizzo: <https://www.mise.gov.it/index.php/it/normativa/decreti-interministeriali/2032966-decreto-interministeriale-26-giugno-2015-applicazione-delle-metodologie-di-calcolo-delle-prestazioni-energetiche-e-definizione-delle-prescrizioni-e-dei-requisiti-minimi-degli-edifici>. Consultato il 15 Marzo 2019.

PNIEC (2018), Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima Italiano. Disponibile all'indirizzo: https://www.mise.gov.it/images/stories/documenti/Proposta_di_Piano_Nazionale_Integrato_per_Energia_e_il_Clima_Italiano.pdf. Consultato il 11 Marzo 2019.

PROVINCIA AUTONOMA DI BOLZANO (2018), Prezzario provinciale. Disponibile all'indirizzo: <http://www.provincia.bz.it/lavoro-economia/appalti/elenco-prezzi-provinciale-online.asp#accept-cookies>. Consultato il 12 Maggio 2018.

REGIONE PIEMONTE (2018), Prezzi di riferimento per opere e lavori pubblici nella regione Piemonte. Disponibile all'indirizzo: <http://www.sistemapiemonte.it/cms/privati/territorio/servizi/929-consultazione-prezzario-regionale-opere-pubbliche/3427-prezzario-2018>. Consultato il 11 Maggio 2018.

SUPSI (2010), *Analisi preliminare teleriscaldamento*. Disponibile all'indirizzo: <http://www.supsi.ch/isaac/dms/isaac/docs/studi-ambientali/Rapporto-analisi-preliminare-teleriscaldamento--quartiere-Casarico-/Rapporto%20analisi%20preliminare%20teleriscaldamento%20%28quartiere%20Casarico%29.pdf>. Consultato il 11 Maggio 2018.