

Finanziato nell'ambito del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza PNRR. Missione 4, Componente 2, Investimento 1.3 Creazione di "Partenariati estesi alle università, ai centri di ricerca, alle aziende per il finanziamento di progetti di ricerca di base"



D. 6.2.1.1.

Indicators for cost effective policies reducing emissions from residential buildings.

An approach based on minimum-cost, marginal-cost, and cost-effectiveness indicators to support energy retrofit decision-making.

Document data	
Indicators for cost effective policies reducing emissions from residential buildings. An approach based on minimum-cost, marginal-cost, and cost-effectiveness indicators to support energy retrofit decision-making.	Spoke 6 Work Package 2 D6.2.1.1
Owner	Università degli Studi di Trieste Università degli Studi di Padova
Contributor/s	Raul Berto, Dipartimento di Ingegneria e Architettura - DIA, Università degli Studi di Trieste Paolo Rosato, Dipartimento di Ingegneria e Architettura - DIA, Università degli Studi di Trieste Chiara D'Alpaos, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale - ICEA, Università degli Studi di Padova
Document version	17/12/2025
Last version date	17/12/2025

Executive summary

Il documento presenta un modello volto a stimare i costi degli interventi di riqualificazione energetica degli edifici residenziali, con riferimento a obiettivi di miglioramento espressi in salti di classe energetica. Il cuore del modello consiste nella costruzione, per ciascun obiettivo prestazionale, della corrispondente frontiera di costo minimo, individuando la combinazione di interventi meno onerosa tra quelle capaci di conseguire esattamente un dato numero di salti di classe. Il metodo è formulato in modo generale e replicabile rispetto a tipologia edilizia, epoca costruttiva e classe energetica iniziale, ed è implementato in foglio di calcolo sui dataset disponibili.

A partire da questa base, il report sviluppa tre indicatori complementari: l'indicatore di costo minimo, l'indicatore di costo marginale e l'indicatore di costo-efficacia. In tal modo, il contributo non si limita a identificare la soluzione meno costosa, ma mira anche a migliorare l'interpretazione economica dei percorsi di riqualificazione e a rendere confrontabili obiettivi diversi in termini di onerosità incrementale e rendimento medio dell'investimento.

L'applicazione esemplificativa, riferita alla tipologia edilizia "a blocco", epoca 1971–1984, classe energetica iniziale G, mostra che la frontiera di costo minimo può risultare non monotona per i primi salti di classe. Tale evidenza non costituisce un'anomalia del modello, ma una conseguenza della natura discreta delle classi energetiche. Il report sottolinea inoltre che, nella decisione reale, il solo criterio del costo non è sufficiente: vincoli tecnico-normativi e co-benefici non catturati dall'Attestato di Prestazione Energetica (APE) possono rendere rilevanti anche soluzioni non ottime in senso strettamente economico.

Nel complesso, la procedura proposta fornisce una base analitica replicabile e scalabile per supportare decisioni progettuali, analisi comparative e valutazioni di policy sul patrimonio edilizio residenziale.

TABLE OF CONTENTS

Executive summary.....	3
1. Premessa	5
2. L'indicatore di costo minimo	7
3. L'indicatore di costo marginale.....	9
4. L'indicatore di costo-efficacia	10
5. Discussione dei risultati.....	11
6. Conclusioni	12

1. Premessa

Il modello sviluppato ha l'obiettivo principale di individuare la combinazione di interventi di riqualificazione energetica che consente di ottenere esattamente k salti di classe energetica al minor costo possibile. L'approccio è formulato in modo generale e replicabile: fissate le caratteristiche dell'edificio (tipologia edilizia, epoca costruttiva e classe energetica ante-operam), il modello seleziona, tra le combinazioni di interventi disponibili, quelle efficienti rispetto al vincolo prestazionale espresso in numero di salti di classe.

La base dati su cui è stato costruito il modello è la stessa sviluppata nella ricerca *"Stima di funzioni di costo per la riqualificazione energetica del patrimonio edilizio residenziale"* (Berto R., Rosato P.), cui si rimanda per una descrizione estesa. L'unica variazione riguarda le variabili relative ai salti di classe: nella codifica originale erano state definite tre variabili binarie (0/1) che descrivevano 1 salto di classe energetica (aAPE_1), 2 salti di classe energetica (aAPE_2) e 3 o più salti di classe energetica (aAPE_3P), che in questa versione del dataset sono state sostituite dalla variabile JUMP (ordinale, 1-9) (si veda **Table 1**).

Nel presente report, a scopo esemplificativo e per focalizzare l'illustrazione del procedimento, si è utilizzato il dataset della tipologia edilizia "a blocco" (variabile TIP_3=1), di epoca 1971-1984 (variabile AGE_3=1) e classe energetica iniziale 'G' (variabile APE_ANTE=10). Tale scelta non limita la generalità del metodo, infatti gli indicatori proposti possono essere estesi alle altre tipologie edilizie, epoche costruttive e classi energetiche ante-operam contenute nel dataset completo. **Table 1** riporta l'elenco completo delle variabili presenti nel dataset, la loro descrizione e la relativa codifica.

Variabile	Descrizione	Tipo	Valori ammessi
AC	Allestimento cantiere (intervento accessorio)	Binaria	0 = no, 1 = sì
AGE_1	Epoca di costruzione 1939-1954	Binaria	0 = no, 1 = sì
AGE_2	Epoca di costruzione 1955-1970	Binaria	0 = no, 1 = sì
AGE_3	Epoca di costruzione 1971-1984	Binaria	0 = no, 1 = sì
APE_ANTE	Classe energetica ante intervento	Ordinale	1(A4)–10(G)
CALD	Sostituzione caldaia	Binaria	0 = no, 1 = sì
COP_INCL	Isolamento copertura inclinata	Binaria	0 = no, 1 = sì

Variabile	Descrizione	Tipo	Valori ammessi
COP_P	Isolamento copertura piana	Binaria	0 = no, 1 = sì
COST	Costo complessivo della combinazione degli interventi in €/m ² di superficie totale in pianta dell'edificio	Continua	Numeri reali positivi
FV	Impianto fotovoltaico	Binaria	0 = no, 1 = sì
IBR	Sistema ibrido	Binaria	0 = no, 1 = sì
INF	Sostituzione infissi	Binaria	0 = no, 1 = sì
INV_V	Isolamento involucro verticale opaco	Binaria	0 = no, 1 = sì
ISO_PAV	Isolamento pavimento disperdente	Binaria	0 = no, 1 = sì
JUMP	Salto di classe energetica prodotto dalla combinazione di interventi	Ordinale	1–9
LV	Sistemi di protezione collettiva anticaduta (intervento accessorio)	Binaria	0 = no, 1 = sì
PDC	Pompa di calore	Binaria	0 = no, 1 = sì
RAD	Impianto radiante a pavimento	Binaria	0 = no, 1 = sì
SOL_TERM	Impianto solare termico	Binaria	0 = no, 1 = sì
TIP_1	Tipologia edilizia monofamiliare	Binaria	0 = no, 1 = sì
TIP_2	Tipologia edilizia bifamiliare	Binaria	0 = no, 1 = sì
TIP_3	Tipologia edilizia a blocco	Binaria	0 = no, 1 = sì
TIP_4	Tipologia edilizia a schiera	Binaria	0 = no, 1 = sì

Table 1 – Codifica delle variabili presenti nel dataset.

A partire da tale base informativa, il report definisce tre indicatori:

1. **L'indicatore di costo minimo** $C(k)$, ossia il costo minimo tra le combinazioni che determinano esattamente k salti.
2. **L'indicatore di costo marginale** $MC(k)$, che misura l'incremento di costo associato al passaggio da $k - 1$ a k salti sulla frontiera di costo minimo.
3. **L'indicatore di costo-efficacia** $CE(k)$, che sintetizza il costo medio per salto di classe quando l'obiettivo è ottenere direttamente k salti.

Gli indicatori sono implementati in foglio di calcolo e consentono di identificare la combinazione ottima per ciascun obiettivo di prestazione in termini di salti di classe energetica.

2. L'indicatore di costo minimo

Il numero di salti di classe energetica k è l'obiettivo di prestazione fissato ai fini dell'ottimizzazione. Per ogni valore intero k nel range osservato ($k = 1, \dots, 9$, essendo la classe energetica di partenza 'G' e la massima raggiungibile 'A4'), l'obiettivo è individuare, tra tutte le combinazioni che determinano esattamente k salti di classe, quella con costo minimo.

Poiché la tipologia edilizia, l'epoca e la classe iniziale sono fisse, l'indice p identifica univocamente una combinazione di interventi con un certo salto di classe energetica.

Sia

$$P_k = \{p: JUMP_p = k\}$$

l'insieme di tutte le combinazioni che determinano esattamente k salti di classe.

Per ciascun k si definisce l'indicatore di costo minimo nel seguente modo:

$$C(k) = \min_{p \in P_k} C_p$$

dove C_p è il costo di riqualificazione energetica associato alla combinazione p .

L'insieme delle combinazioni che realizzano tale minimo è:

$$P_k^* = \{p \in P_k: C_p = C(k)\}.$$

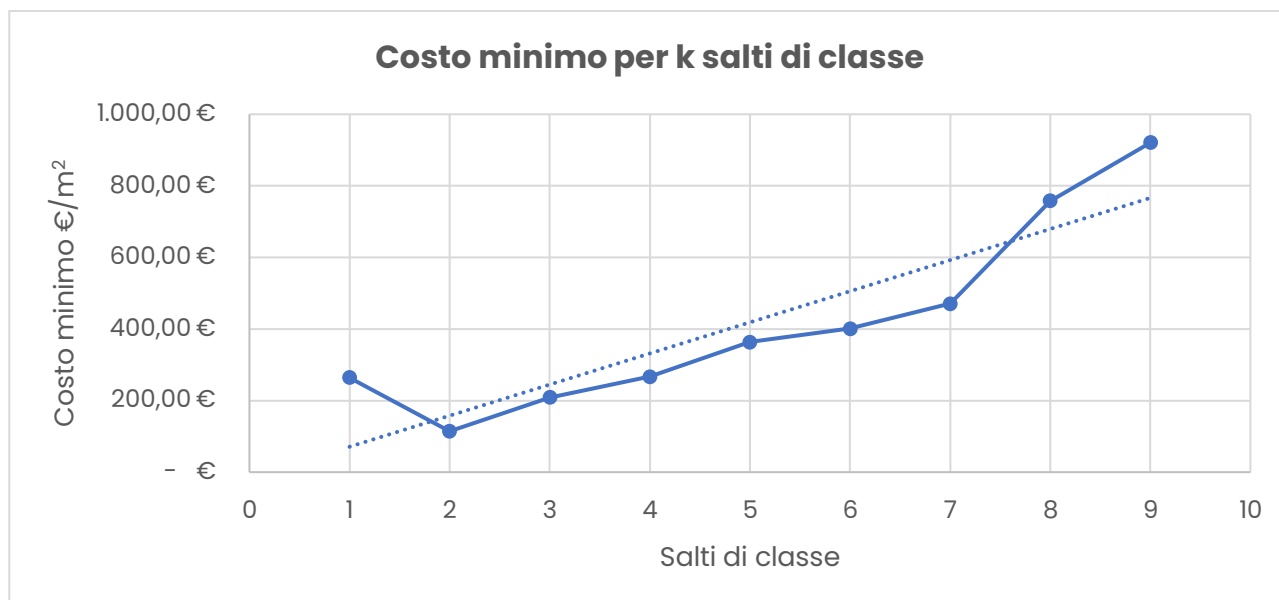
Queste combinazioni costituiscono la **frontiera di costo minimo** per un obiettivo di miglioramento energetico corrispondente a k salti di classe.

L'indicatore di costo minimo è stato implementato in un foglio di calcolo che restituisce, per ogni salto di classe k , la combinazione di interventi (**Table 2**).

JUMP k	1	2	3	4	5	6	7	8	9
MIN_COST $C(k)$	264,14 €/m ²	114,21 €/m ²	208,63 €/m ²	267,27 €/m ²	363,11 €/m ²	400,86 €/m ²	470,55 €/m ²	758,21 €/m ²	920,47 €/m ²
INF	0	0	1	1	1	1	1	1	1
INV_V	0	1	1	1	1	1	1	1	1
COP_INCL	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ISO_PAV	0	0	0	1	1	1	1	0	1
CALD	1	0	0	0	0	1	0	1	1
RAD	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SOL_TERM	0	0	0	0	0	0	0	1	1
FV	0	0	0	0	0	0	0	0	1
PDC	1	0	0	0	1	1	1	1	1

IBR	1	0	0	0	0	0	1	1	1
-----	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Table 2 – Indicatore di costo minimo e relativa combinazione di interventi per ciascun salto di classe obiettivo. Valori per tipologia edilizia “a blocco” di epoca 1971-1984, classe energetica iniziale ‘G’.



Ad esempio, per $k = 2$ la combinazione ottima risulta composta dall'isolamento dell'involucro verticale (INV_V). Per $k = 9$ la soluzione ottima prevede la realizzazione di tutti gli interventi esclusi soltanto l'isolamento della copertura (COP_INCL) e il sottosistema di emissione radiante a pavimento (RAD).

Osservando il grafico notiamo che la funzione di costo minimo $C(k)$ non è monotona per i primi valori di k e presenta discontinuità per i valori elevati. Questo può essere spiegato come una conseguenza strutturale dell'ottimizzazione per salti esatti di classe. Infatti, l'insieme delle combinazioni che generano esattamente k salti non è annidato in quello di $k - 1$, e la classificazione energetica opera per soglie discrete. Infatti, osservando le combinazioni ottime che portano a $k = 2$ (INV_V) e $k = 1$ (ISO_PAV + FV + PDC), notiamo che il “salto” da 1 a 2 non rappresenta l'aggiunta incrementale di un intervento, ma un cambio completo di tecnologia.

L'indicatore di costo minimo, costruito in questo modo su un caso particolare, ovvero tipologia edilizia “a blocco”, di epoca 1971-1984 e classe energetica iniziale ‘G’, può essere utilizzato anche in un contesto più generale, ovvero per le diverse tipologie edilizie τ , epoche α e classe energetica iniziale γ contenute nel dataset completo. La formulazione può allora essere così espressa:

$$C(k | \gamma, \tau, \alpha) = \min_{p \in P_{k,\gamma,\tau,\alpha}} C_p$$

dove $P_{k,\gamma,\tau,\alpha}$ è l'insieme delle combinazioni che, su edifici con caratteristiche (γ, τ, α) , producono esattamente k salti di classe energetica.

L'algoritmo sviluppato per il foglio di calcolo rimane identico, ma viene eseguito sui diversi dataset relativi alle diverse tipologie edilizie e epoche.

3. L'indicatore di costo marginale

Una volta costruita la funzione di costo minimo $C(k)$, è possibile derivare il corrispondente costo marginale del k -esimo salto di classe. Per $k = 1$

$$MC(1) = C(1)$$

(costo per ottenere il primo salto, partendo dalla situazione iniziale). Per $k \geq 2$

$$MC(k) = C(k) - C(k - 1)$$

$MC(k)$ misura il costo incrementale per passare da una soluzione ottima con $k - 1$ salti a una soluzione ottima con k salti.

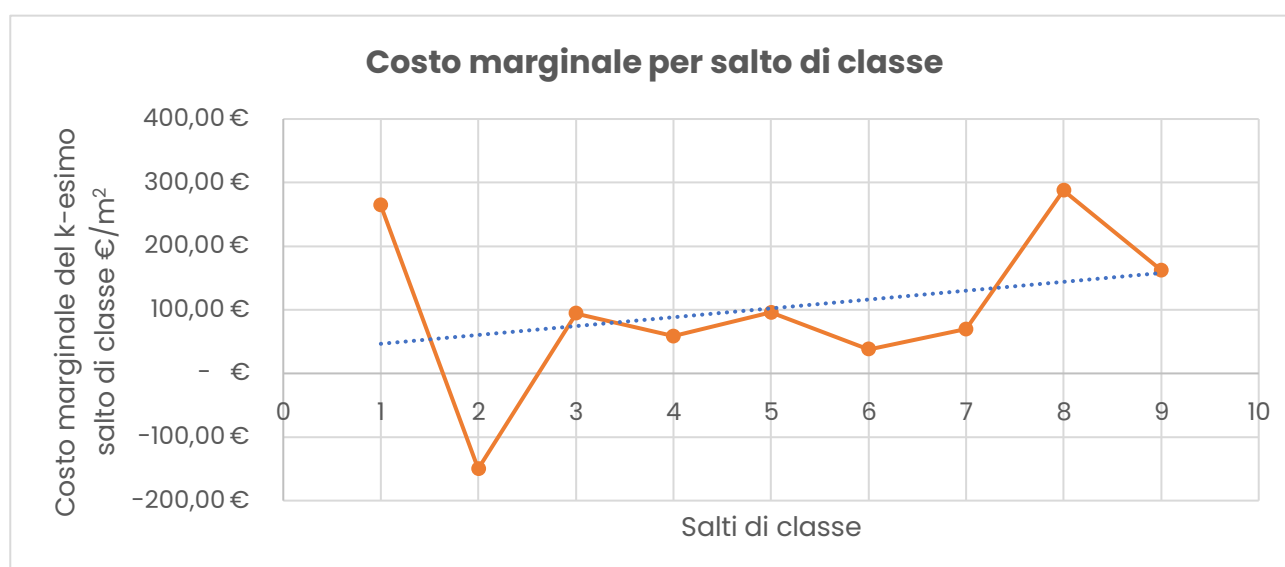
Ne deriva che:

$$C(k) = \sum_{j=1}^k MC(j)$$

cioè il costo minimo per ottenere k salti è la somma dei costi marginali necessari ad aggiungere, uno dopo l'altro, ciascun salto.

JUMP k	1	2	3	4	5	6	7	8	9
MCOST $MC(k)$	264,14 €/m ²	-149,93 €/m ²	94,43 €/m ²	58,64 €/m ²	95,84 €/m ²	37,75 €/m ²	69,68 €/m ²	287,66 €/m ²	162,26 €/m ²

Table 3 – Costi marginali di miglioramento energetico. Valori per tipologia edilizia "a blocco" di epoca 1971-1984, classe energetica iniziale 'G'.



Procedendo per k crescenti, le combinazioni ottime mostrano via via una maggiore intensità tecnologica, con alcuni passaggi che introducono tecnologie aggiuntive

associate a incrementi marcati di $MC(k)$. I valori di $MC(k)$, inoltre, mostrano discontinuità che corrispondono a cambi strutturali delle combinazioni degli interventi.

4. L'indicatore di costo-efficacia

Oltre al costo minimo $C(k)$ e al costo marginale $MC(k)$, è stato definito un indicatore di costo-efficacia per salto di classe energetica. Per ogni valore k del salto di classe energetica, si definisce l'indicatore di costo-efficacia come:

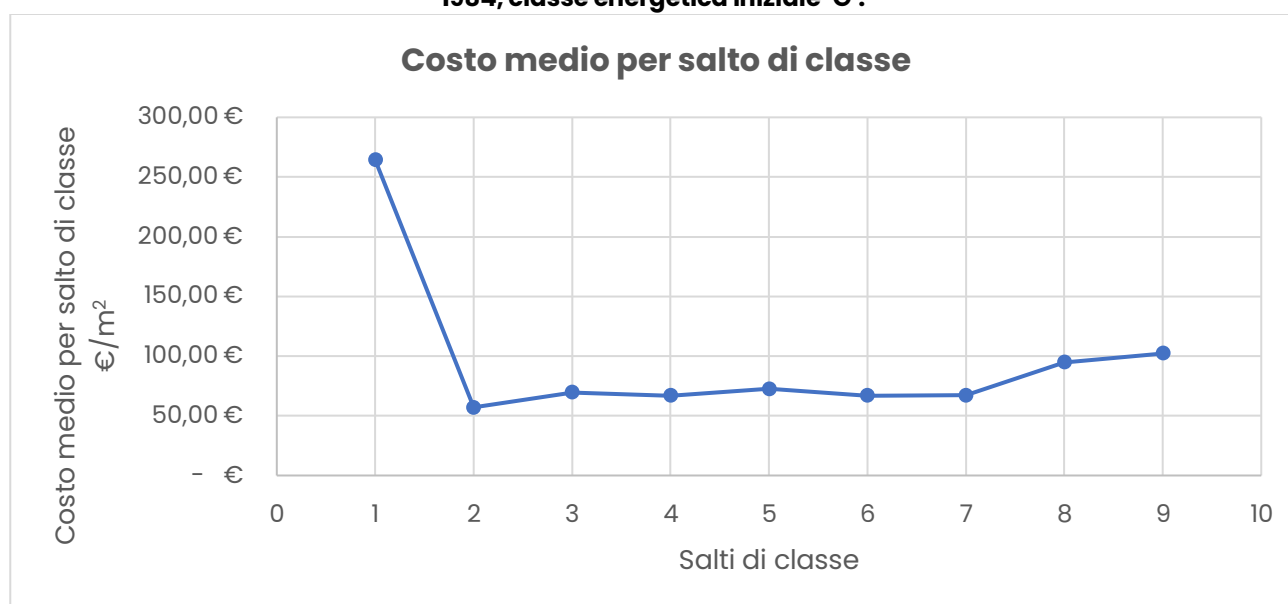
$$CE(k) = \frac{C(k)}{k}$$

dove $C(k)$ è il costo minimo della combinazione ottimale che produce esattamente k salti di classe energetica.

L'indicatore $CE(k)$ misura il costo medio per unità di miglioramento energetico quando l'obiettivo è ottenere direttamente un miglioramento di k classi, e la combinazione di interventi è scelta sulla base del criterio del costo minimo. In altri termini, rappresenta il rapporto tra costo di investimento e efficacia tecnica dello stesso (espressa in salti di classe), per un dato obiettivo di riqualificazione energetica.

JUMP k	1	2	3	4	5	6	7	8	9
COST-EFF $CE(k)$	264,14 €/m ²	57,10 €/m ²	69,54 €/m ²	66,82 €/m ²	72,62 €/m ²	66,81 €/m ²	67,22 €/m ²	94,78 €/m ²	102,27 €/m ²

Table 3 – Costo-efficacia medio per salto di classe, . Valori per tipologia edilizia "a blocco" di epoca 1971-1984, classe energetica iniziale 'G'.



I valori di costo-efficacia medio $CE(k)$ mostrano un valore molto alto per $k = 1$, un minimo per $k = 2$, valori relativamente stabili tra $k = 3$ e $k = 7$, un aumento marcato per

$k = 8$ e $k = 9$, coerente con i picchi marginali e con l'ingresso di interventi impiantistici più invasivi.

5. Discussione dei risultati

Nel caso studio emerge che il costo minimo associato a due salti di classe energetica risulta inferiore al costo minimo associato a un solo salto, ossia $C(2) < C(1)$, con conseguente $MC(2) = C(2) - C(1) < 0$. Questo risultato non va interpretato come evidenza che “fare due salti costa meno che farne uno” in senso incrementale, bensì come conseguenza strutturale della formulazione del problema e della natura discreta dell'output.

Il modello seleziona, per ciascun valore k , la combinazione di interventi con il minor costo tra quelli che producono esattamente k salti di classe. Poiché gli insiemi di combinazioni ammissibili per “esattamente 1 salto” e “esattamente 2 salti” non sono annidati (e possono essere anche molto diversi tra loro), la funzione $C(k)$ non è vincolata a essere monotona. Inoltre, la classificazione energetica è discreta e basata su soglie: alcuni interventi possono attraversare più soglie con un costo relativamente contenuto, mentre altre combinazioni, pur più costose, possono produrre un solo salto di classe.

Dal punto di vista economico, se si assumesse che tutte le tecnologie siano sempre fattibili e che l'unico obiettivo sia massimizzare i salti di classe al minimo costo di investimento, una situazione in cui $C(2) < C(1)$ implicherebbe che la combinazione di interventi che produce 1 salto di classe energetica è dominata (cioè non razionale sceglierla). Tuttavia, nella decisione reale entrano in gioco vincoli e benefici non rappresentati dall'indicatore $C(k)$ (che misura esclusivamente il costo minimo condizionato alla classe energetica), i quali possono rendere ancora rilevante un pacchetto che appare “dominato” sul solo criterio del costo. In particolare, ci si riferisce a:

1. vincoli di fattibilità tecnico-architettonica e normativa: interventi come l'isolamento dell'involucro verticale possono risultare non ammissibili o fortemente penalizzati in edifici con vincoli (facciate tutelate, manufatti storici, ...) o per limiti geometrici e di sagoma. In tali contesti, l'insieme delle combinazioni ammissibili cambia e la frontiera $C(k)$ andrebbe ricalcolata sul sottoinsieme fattibile.
2. co-benefici non catturati dall'APE: l'ottimizzazione è condotta rispetto ai salti di classe energetica, ma alcune tecnologie possono generare benefici aggiuntivi non catturati nel calcolo della prestazione energetica ai fini della determinazione

della classe. Tra questi ci sono la riduzione della spesa elettrica complessiva per gli usi non termici (elettrodomestici, illuminazione) e un maggior comfort indoor.

In sintesi, la non monotonicità di $C(k)$ per i primi valori di k , sebbene non sia un risultato atteso è un risultato possibile in un'ottimizzazione su salti esatti e in uno spazio discreto di combinazioni; essa non invalida il modello, ma richiede una corretta interpretazione.

6. Conclusioni

Il lavoro presenta un modello di ottimizzazione che, a partire da un database di combinazioni di interventi di riqualificazione energetica e relativi costi, costruisce una frontiera di costo minimo $C(k)$ del miglioramento energetico espresso in salti di classe.

A partire da $C(k)$ il modello deriva indicatori che arricchiscono l'interpretazione economica e ne migliorano l'utilità applicativa, ovvero il costo marginale $MC(k)$, che evidenzia l'onerosità incrementale del miglioramento energetico e l'indicatore di costo-efficacia $CE(k)$, che sintetizza il costo medio per salto di classe e permette di individuare livelli di obiettivo particolarmente efficienti.

L'applicazione alla tipologia edilizia considerata (edificio "a blocco", epoca 1971–1984, classe energetica iniziale 'G') evidenzia tre elementi di rilievo. In primo luogo, la funzione di costo minimo $C(k)$ risulta non monotona per i primi valori di k (in particolare $C(2) < C(1)$), con conseguente $MC(2) < 0$: tale comportamento è coerente con l'impostazione "esattamente k salti" e con la natura discreta delle classi energetiche, che può rendere più economico attraversare due soglie con un pacchetto specifico (ad esempio, per $k = 2$ la combinazione ottima è l'isolamento dell'involucro verticale, INV_V) rispetto a fermarsi a una sola soglia con un pacchetto diverso (per $k = 1$ la combinazione ottima è ISO_PAV + FV + PDC). In secondo luogo, per valori intermedi di k (circa $3 \leq k \leq 7$) il profilo di $C(k)$ mostra un incremento relativamente regolare e i valori di $MC(k)$ rimangono nell'ordine di grandezza di poche decine di €/m² per salto, mentre il costo-efficacia $CE(k)$ risulta relativamente stabile. Questo andamento è compatibile con una fase in cui il miglioramento energetico può essere ottenuto tramite combinazioni "modulari" di interventi, senza richiedere discontinuità tecnologiche particolarmente onerose. Infine, l'analisi segnala una soglia tecnologica per valori elevati di k , dove la frontiera di costo minimo diventa sensibilmente più ripida: il passaggio a $k = 8$ comporta un incremento marginale molto elevato e un peggioramento marcato dell'indicatore costo-efficacia, seguito da un ulteriore incremento a $k = 9$.

In prospettiva, il modello è immediatamente estendibile alle altre tipologie edilizie, epoche di costruzione e classi energetiche ante-operam, sulla base del dataset già disponibile citato in premessa al lavoro.

Sviluppi ulteriori possono riguardare l'integrazione di metriche energetiche più granulari (kWh/m² anno risparmiati) e ambientali (emissioni evitate).

Nel complesso, la procedura proposta fornisce una base replicabile e scalabile per supportare sia decisioni progettuali a scala di edificio sia analisi comparative e di policy su stock edilizi, traducendo la complessità delle combinazioni tecnologiche in indicatori economici interpretabili in maniera relativamente agevole e direttamente utilizzabili.