



Analisi multicriteria per l'isolamento termico di un edificio esistente adibito ad uffici

Ricerca a cura di D. D'Agostino, M. D'Auria., F. Minelli, F. Minichiello

Presenta: ING. FEDERICO MINELLI email: federico.minelli@unina.it

Università degli Studi di Napoli Federico II – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Outline

- DIRETTIVA EUROPEA EPBD IV
- GLOBAL WARMING POTENTIAL (GWP)
- LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA)
- SCELTA DELL'ISOLAMENTO TERMICO PER IL RETROFIT DI UN EDIFICIO ESISTENTE CON ANALISI MULTICRITERIA – MULTI-CRITERIA DECISION-MAKING (MCDM)

Legislazione EU

Directive 2002/91/EC – Energy Performance of Buildings Directive (EPBD)

Directive 2006/32/EC – Energy end-use efficiency and energy services

Directive 2009/28/EC – Renewable Energy Directive (RED)

Directive 2010/31/EU – Recast Energy Performance of Buildings Directive II (EPBD II)

Directive 2012/27/EU – Energy Efficiency Directive (EED)

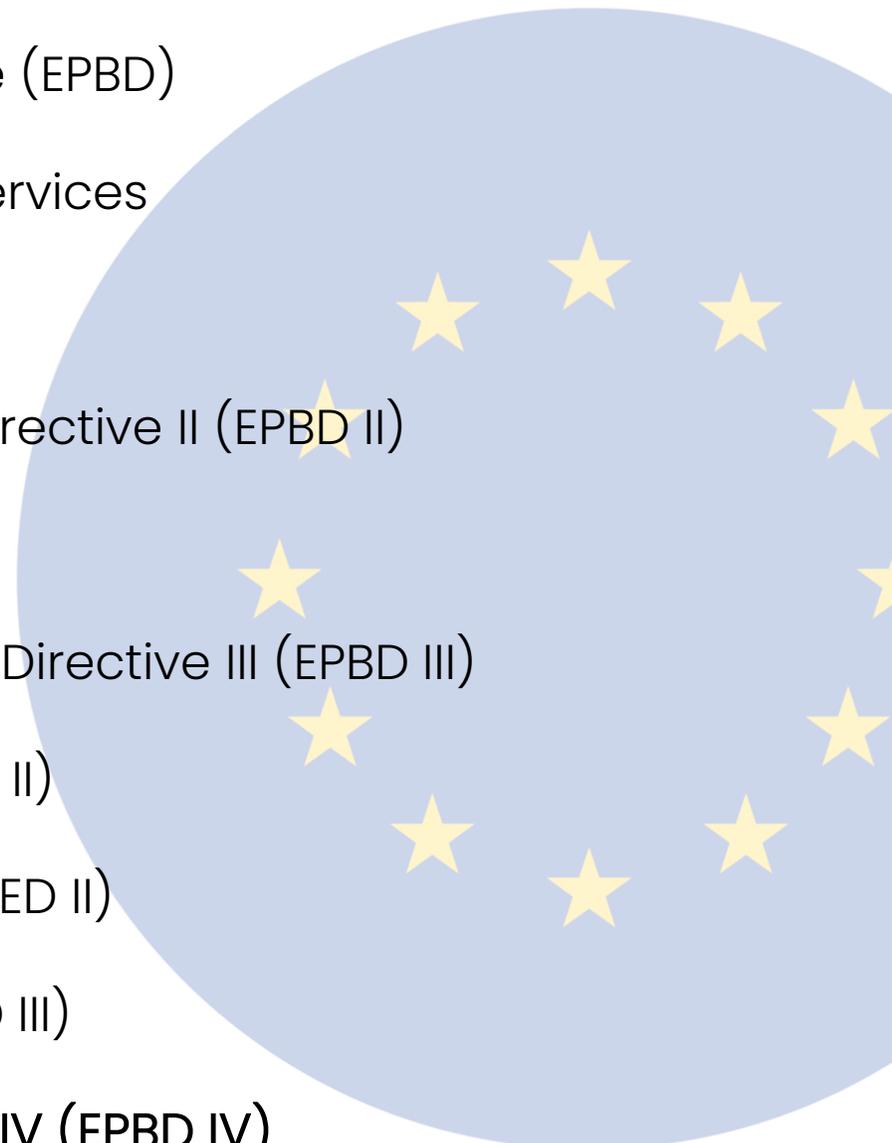
Directive 2018/844/EU – Recast Energy Performance of Buildings Directive III (EPBD III)

Directive 2018/2001/EU – Recast Energy Efficiency Directive II (EED II)

Directive 2018/2002/EU – Recast Renewable Energy Directive II (RED II)

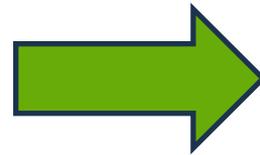
Directive 2023/1791/EU – Recast Energy Efficiency Directive III (EED III)

In progress... – Recast Energy Performance of Buildings Directive IV (EPBD IV)



Direttiva Europea EPBD IV

OBIETTIVO – contribuire al piano della Commissione Fit for 55, che prevede una riduzione delle emissioni del **55%** entro il **2030** (rispetto ai livelli del 1990), per poi giungere alla **neutralità climatica** entro il **2050**.



REGOLAMENTO UE 2021/1119 – Normativa europea sul clima

EPBD IV – Zero Emission Buildings (ZEB)

Dovranno essere certificati come Zero Emission Buildings (ZEB)

- ✓ Dal **1 gennaio 2026** – edificio di nuova costruzione occupati o gestiti dalla PA o di proprietà.
- ✓ Dal **1 gennaio 2028** tutti gli edifici di nuova costruzione.
Valori soglia:
 - Zona mediterranea – residenziale < 60 kWh/m²a
– non residenziale < 70 kWh/m²a
 - Zona continentale – residenziale < 65 kWh/m²a
– non residenziale < 85 kWh/m²a

EPBD IV – Zero Emission Buildings (ZEB)

- ✓ Dal 1 gennaio 2026 – obbligo di inserire negli APE il valore di GWP del ciclo di vita dell'edificio
- ✓ Entro il 31 dicembre 2025 – nuova struttura dell'APE conforme alla direttiva
- La classe B corrisponde agli edifici ad emissioni zero
- La classe G corrisponde al 15% degli edifici con le prestazioni peggiori del parco immobiliare
- La classe A+:
 - fabbisogno di energia < 15 kWh/m²a
 - produzione da fonti rinnovabili > valore limite su base media mensile
 - positività carbonica in termini di GWP del ciclo di vita dell'edificio

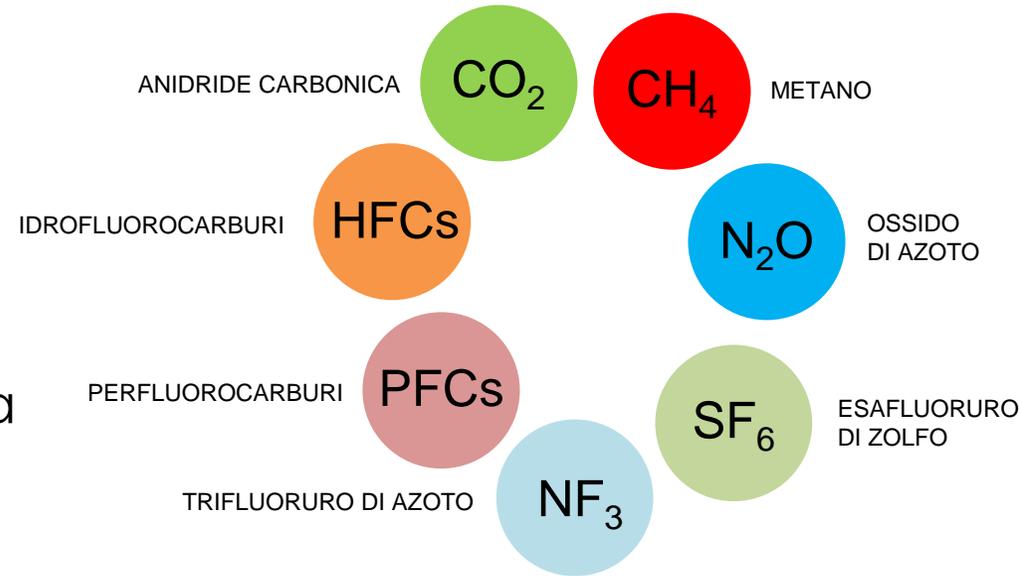
Global Warming Potential (GWP)

Il **potenziale di riscaldamento globale** (abbreviato con GWP dall'inglese Global Warming Potential) esprime il **contributo all'effetto serra** di un gas in rapporto all'effetto della CO₂, il cui potenziale di riferimento è posto pari a 1.

Il GWP di una miscela di gas si calcola come segue:

$$GWP = \sum_{i=1}^n GWP_i * q_i$$

GWP_i : potenziale di riscaldamento della specie i-esima
 q_i : concentrazione della specie i-esima



Sostanza	GWP	Note
CO ₂	1	riferimento
R32	675	idrofluorocarburo
R410A	2088	miscela di R32 e R125

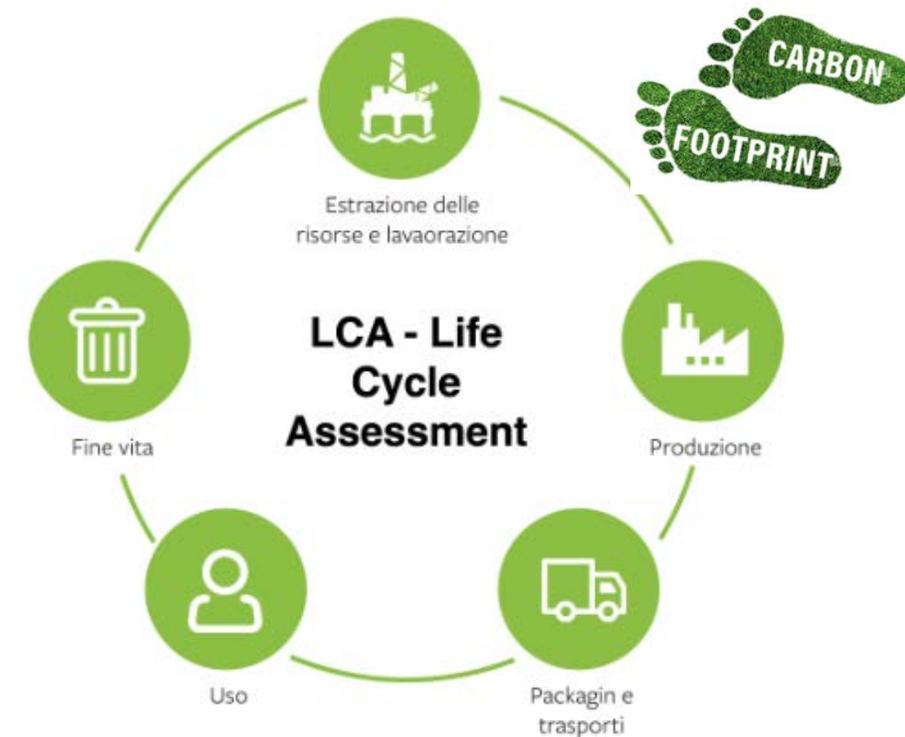
Edificio e Life Cycle Assessment (LCA)

PRODUZIONE (embodied carbon): materiali necessari per la costruzione: legno, cemento, acciaio, isolanti. Provenienza di questi materiali e modo in cui vengono realizzati.

COSTRUZIONE (embodied carbon): energia utilizzata, rifiuti prodotti ed emissioni rilasciate durante la costruzione.

USO (operational carbon): emissioni legate al consumo energetico nel corso della vita.

BUILDING LIFE CYCLE ASSESSMENT															
Fase di Produzione			Fase di Costruzione		Fase d'Uso							Fase di Fine Vita			
Materie Prime	Trasporto	Produzione	Trasporto	Installazione	Uso	Manutenzione	Riparazione	Sostituzione	Ricondizionamento	Energia della fase d'uso	Consumo di acqua della fase d'uso	Demolizione	Trasporto	Processamento Rifiuti	Dismissione
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4
X	X	X	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND



Materiali da costruzione ed EPD

La Dichiarazione Ambientale di Prodotto (Environmental Product Declaration EPD) è una certificazione volontaria che descrive le prestazioni ambientali legate al **Ciclo di Vita** dei prodotti o servizi, in accordo con lo Standard Internazionale ISO 14025.

Il Sistema EPD International è il programma di riferimento per le aziende italiane sulle dichiarazioni ambientali, normate da ISO 14025 e EN 15804.

L'analisi che descrive l'impatto ambientale legato alla **produzione** riguarda:

- il consumo energetico e di materie prime;
- la produzione di rifiuti;
- le emissioni di CO₂;
- la quantità di risorse idriche necessarie alla produzione;
- ecc....

Materiali da costruzione e Certificazione EPD

All'interno della procedura EPD ad esempio vengono inclusi i moduli A1-A3, che includono :

- I processi di **produzione** e consumo di energia e materiali nel sistema (A1);
- Il **trasporto** fino al cancello della fabbrica (A2);
- I processi di **manifattura**, così come il trattamento dei rifiuti di processo (A3).

DESCRIPTION OF THE SYSTEM BOUNDARY (X = INCLUDED IN LCA; MND = MODULE NOT DECLARED)																
PRODUCT STAGE			CONSTRUCTION PROCESS STAGE		USE STAGE							END OF LIFE STAGE			BENEFITS AND LOADS BEYOND THE SYSTEM BOUNDARIES	
Raw material supply	Transport	Manufacturing	Transport from the gate to the site	Assembly	Use	Maintenance	Repair	Replacement	Refurbishment	Operational energy use	Operational water use	De-construction demolition	Transport	Waste processing	Disposal	Reuse-Recovery-Recycling-potential
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
X	X	X	X	X	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	X	X	X	X
RESULTS OF THE LCA - ENVIRONMENTAL IMPACT: 1 m³ EPS foam (25 kg/m³)																
Parameter	Unit	A1-A3		A4	A5	C2	C3/1	C3/2	C4/1	C4/2	D/1	D/2				
GWP	[kg CO ₂ -Eq.]	77.08		1.47	0.76	0.26	0.00	18.13	84.29	0.00	-42.76	-59.57				
ODP	[kg CFC11-Eq.]	4.91E-9		6.74E-12	1.78E-12	9.74E-13	0.00E+0	2.80E-9	1.61E-10	0.00E+0	-1.77E-9	-4.72E-9				
AP	[kg SO ₂ -Eq.]	1.85E-1		3.86E-3	5.75E-5	7.40E-4	0.00E+0	1.88E-2	4.81E-3	0.00E+0	-1.85E-1	-1.62E-1				
EP	[kg (PO ₄) ³ -Eq.]	1.75E-2		9.04E-4	1.21E-5	1.58E-4	0.00E+0	2.18E-3	1.01E-3	0.00E+0	-8.91E-3	-1.44E-2				
POCP	[kg ethene-Eq.]	3.70E-1		-1.14E-3	5.19E-6	-2.47E-4	0.00E+0	2.86E-3	6.04E-4	0.00E+0	-1.19E-2	-3.03E-2				
ADPE	[kg Sb-Eq.]	3.79E-5		9.77E-8	4.59E-9	7.71E-9	0.00E+0	1.92E-6	4.08E-7	0.00E+0	-6.53E-6	-3.24E-5				
ADPF	[MJ]	2176.90		20.21	0.10	3.60	0.00	273.13	8.00	0.00	-580.56	-1919.90				
Caption	GWP = Global warming potential; ODP = Depletion potential of the stratospheric ozone layer; AP = Acidification potential of land and water; EP = Eutrophication potential; POCP = Formation potential of tropospheric ozone photochemical oxidants; ADPE = Abiotic depletion potential for non-fossil resources; ADPF = Abiotic depletion potential for fossil resources															

Materiali da costruzione e Certificazione EPD

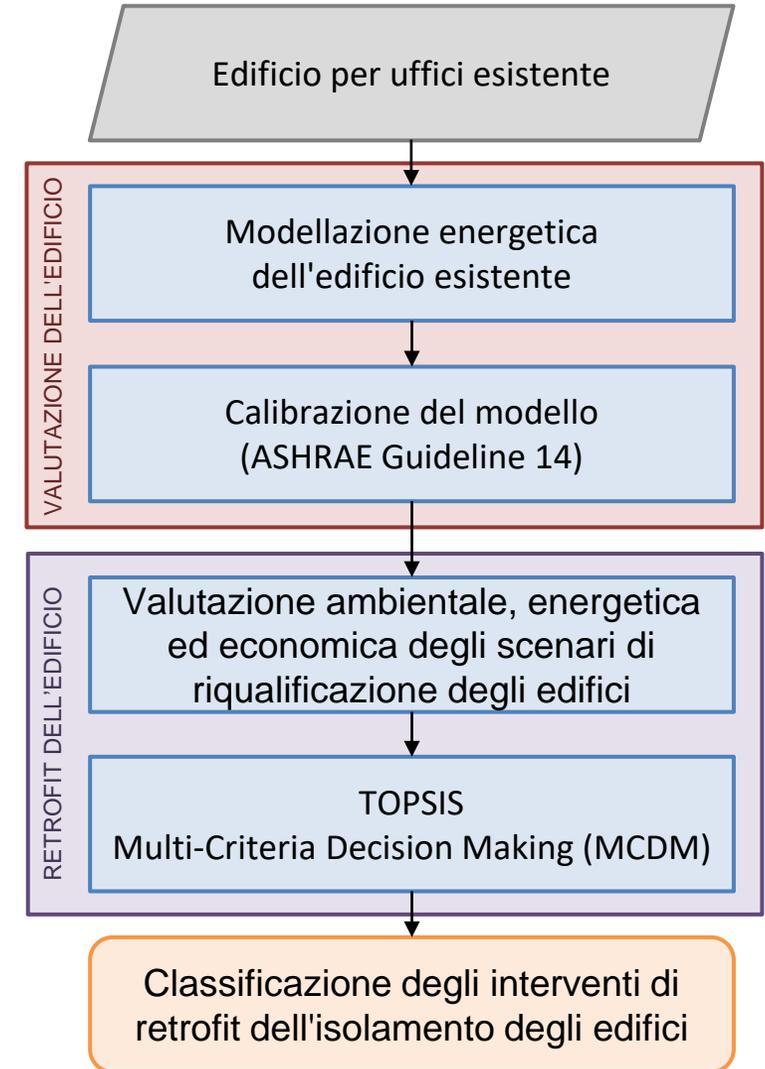
DESCRIPTION OF THE SYSTEM BOUNDARY (X = INCLUDED IN LCA; MND = MODULE NOT DECLARED)																
PRODUCT STAGE			CONSTRUCTION PROCESS STAGE		USE STAGE							END OF LIFE STAGE			BENEFITS AND LOADS BEYOND THE SYSTEM BOUNDARIES	
Raw material supply	Transport	Manufacturing	Transport from the gate to the site	Assembly	Use	Maintenance	Repair	Replacement	Refurbishment	Operational energy use	Operational water use	De-construction demolition	Transport	Waste processing	Disposal	Reuse-Recovery-Recycling-potential
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
X	X	X	X	X	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	X	X	X	X
RESULTS OF THE LCA - ENVIRONMENTAL IMPACT: 1 m³ EPS foam (25 kg/m³)																
Parameter	Unit	A1-A3	A4	A5	C2	C3/1	C3/2	C4/1	C4/2	D/1	D/2					
GWP	[kg CO ₂ -Eq.]	77.08	1.47	0.76	0.26	0.00	18.13	84.29	0.00	-42.76	-59.57					
ODP	[kg CFC11-Eq.]	4.91E-9	6.74E-12	1.78E-12	9.74E-13	0.00E+0	2.80E-9	1.61E-10	0.00E+0	-1.77E-9	-4.72E-9					
AP	[kg SO ₂ -Eq.]	1.85E-1	3.86E-3	5.75E-5	7.40E-4	0.00E+0	1.88E-2	4.81E-3	0.00E+0	-1.85E-1	-1.62E-1					
EP	[kg (PO ₄) ³ -Eq.]	1.75E-2	9.04E-4	1.21E-5	1.58E-4	0.00E+0	2.18E-3	1.01E-3	0.00E+0	-8.91E-3	-1.44E-2					
POCP	[kg ethene-Eq.]	3.70E-1	-1.14E-3	5.19E-6	-2.47E-4	0.00E+0	2.86E-3	6.04E-4	0.00E+0	-1.19E-2	-3.03E-2					
ADPE	[kg Sb-Eq.]	3.79E-5	9.77E-8	4.59E-9	7.71E-9	0.00E+0	1.92E-6	4.08E-7	0.00E+0	-6.53E-6	-3.24E-5					
ADPF	[MJ]	2176.90	20.21	0.10	3.60	0.00	273.13	8.00	0.00	-580.56	-1919.90					
Caption	GWP = Global warming potential; ODP = Depletion potential of the stratospheric ozone layer; AP = Acidification potential of land and water; EP = Eutrophication potential; POCP = Formation potential of tropospheric ozone photochemical oxidants; ADPE = Abiotic depletion potential for non-fossil resources; ADPF = Abiotic depletion potential for fossil resources															

GWP →

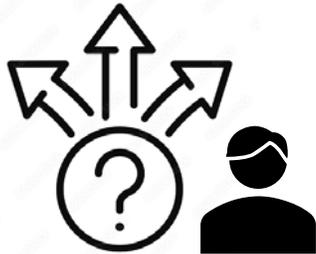
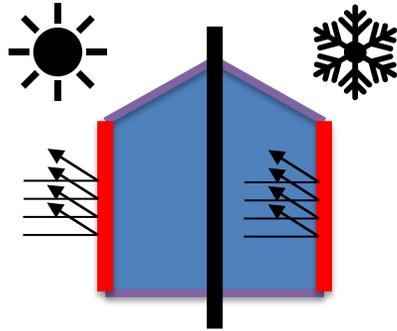
Scopo dell'attività di ricerca

Analisi di scenario di **retrofit** – isolamento termico dell'involucro

- 20 diverse configurazioni di retrofit sono state analizzate:
 - 10 materiali termoisolanti con caratteristiche diverse
 - 2 modalità di installazione: interna o esterna.
- 3 Key Performance Indicators (KPIs) (Criteri di performance) sono considerati con un approccio di Multi-Criteria Decision-Making (MCDM):
 - Consumo annuo di Energia Primaria (EP) [kWh/m²anno]
 - Riduzione del potenziale di riscaldamento globale (GWP) [kgCO_{2-eq}/anno]
 - Discounted PayBack period (DPB) – tempo di ritorno attualizzato [anni]
- La metodologia di Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) denominata **Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)** viene usata per classificare le alternative.



SCELTA DELL'ISOLANTE



Retrofit ed efficienza energetica negli edifici esistenti

- Efficienza energetica
- Global Warming Potential (GWP)
- Costo

Isolamento termico (strategia passiva)

Processo decisionale multicriterio (MCDM)

Caso studio: edificio esistente adibito ad uffici

Località - Pomigliano D'Arco (sud Italia)

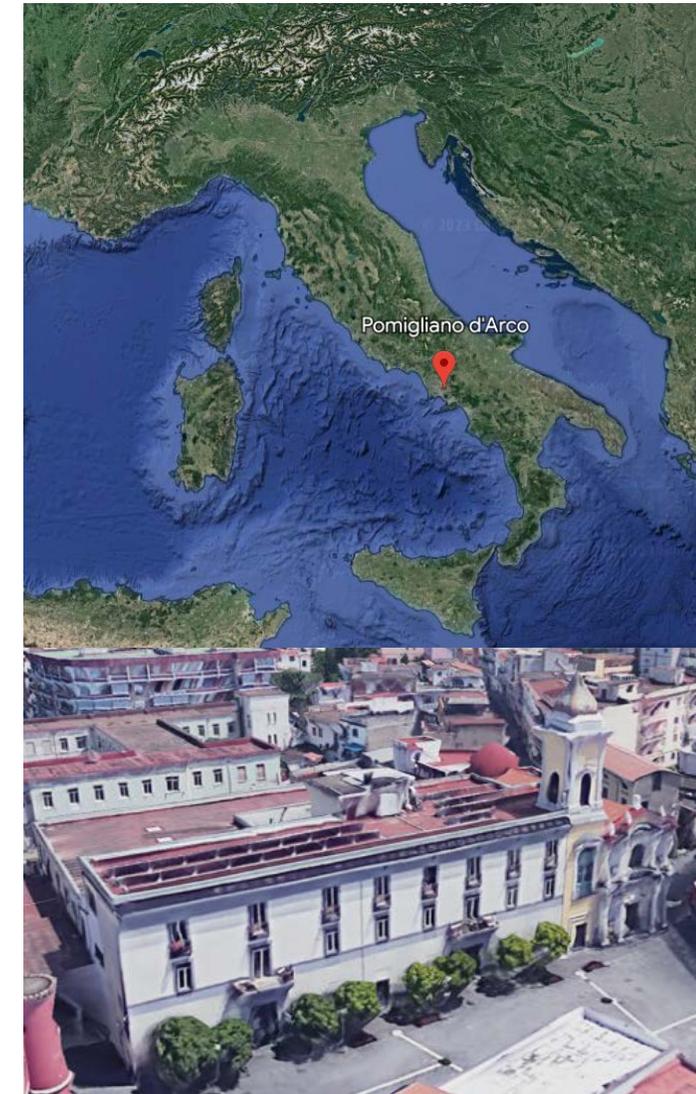
	Unità di misura	Valore
Altitudine	m	45
Latitudine		40°51'25" N
Longitudine		14°23'34" E
Zona climatica italiana (DPR 412/93 [1])		C
Setpoint della temperatura dell'aria in inverno	°C	20
Setpoint dell'umidità relativa dell'aria in inverno	%	50
Stagione di riscaldamento		15 novembre - 31 marzo

Involucro edilizio

Involucro edilizio componente	Trasmittanza termica	Valore limite di trasmittanza termica per la zona climatica C (DPR 412/93 [1]), come richiesto dalla normativa italiana (DM 26.06.2015 [2])
	W/m ² K	W/m ² K
Pavimento (solaio in cemento)	1.55	0.38
Tetto (solaio in cemento)	1.68	0.33
Parete (muratura di tufo)	1.03	0.34
Finestre (doppio vetro con telaio in PVC)	2.5	2.2

Impianto HVAC (2019)

Servizi	Riscaldamento, Raffrescamento, Acqua calda sanitaria (ACS)
Impianto di riscaldamento	Radiatori
Generatore per riscaldamento	Caldaia a gas metano
Generatore per ACS	Caldaia a gas metano



Caso studio: edificio esistente adibito ad uffici

Prima calibrazione del modello (2019)

ASHRAE Guideline 14 [3] per la calibrazione su base mensile.

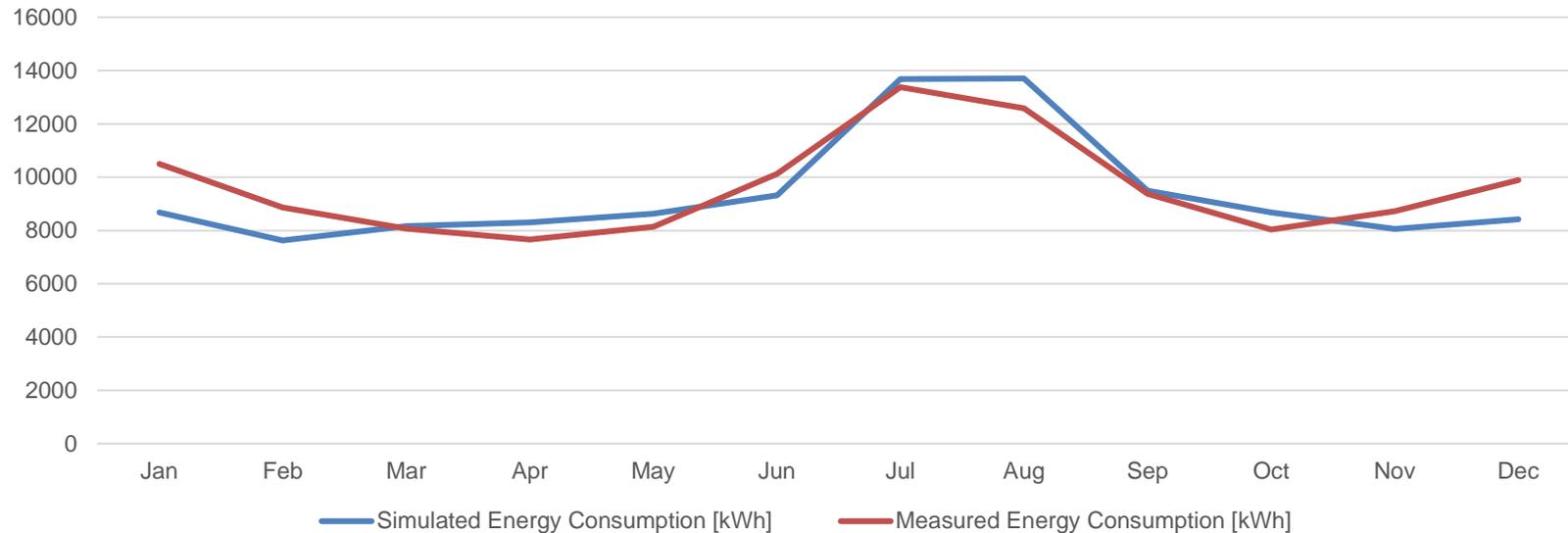
$$MBE[\%] = \frac{\sum_{i=1}^N (d_s - d_m)}{\sum_{i=1}^N d_m}$$

$$Cv(RMSE)(\%) = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (d_s - d_m)^2}{N}}}{m_s}$$

	MBE _{LIMITE}	MBE	Cv(RMSE) _{LIMITE}	Cv(RMSE)	Verificato
Elettricità	±5%	-2.3%	15%	9.8%	Sì



Energia elettrica (2019)



Caso studio: edificio esistente adibito ad uffici

Prima calibrazione del modello (2019)

ASHRAE Guideline 14 [3] per la calibrazione su base mensile.

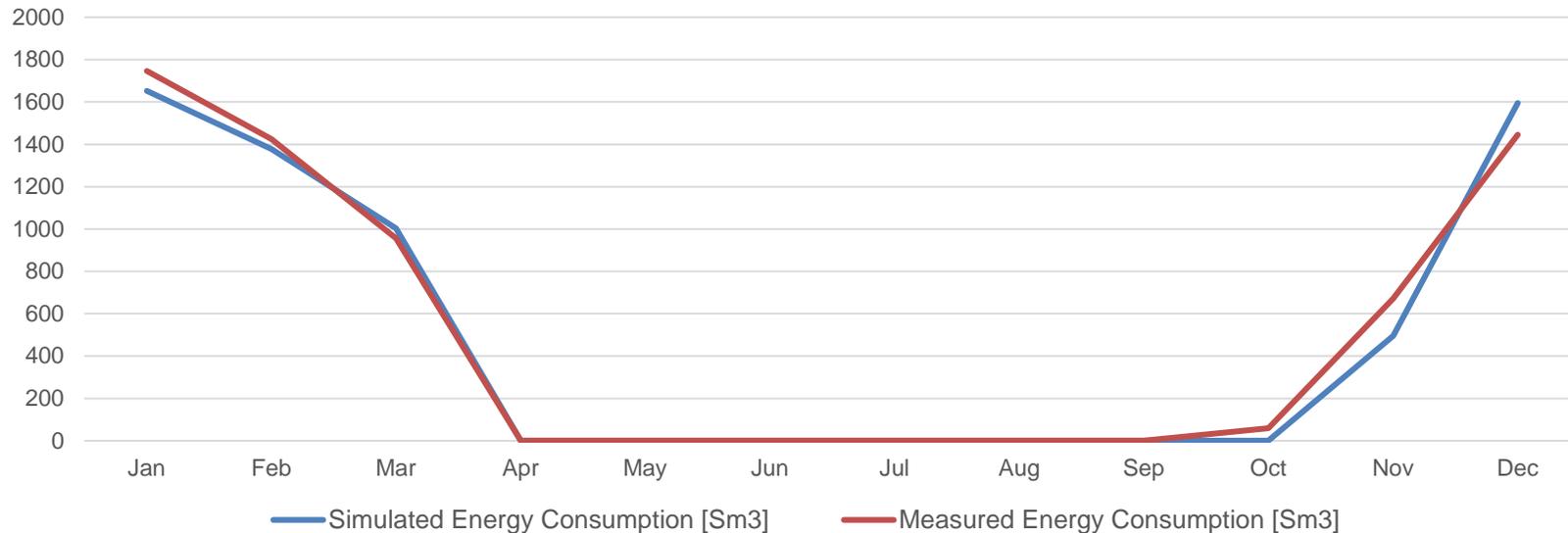
$$MBE[\%] = \frac{\sum_{i=1}^N (d_s - d_m)}{\sum_{i=1}^N d_m}$$

$$Cv(RMSE)(\%) = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (d_s - d_m)^2}{N}}}{m_s}$$

	MBE _{LIMITE}	MBE	Cv(RMSE) _{LIMITE}	Cv(RMSE)	Verificato
Elettricità	±5%	-2.8%	15%	14.6%	Si



Natural Gas (2019)



Caso studio: edificio esistente adibito ad uffici

Località - Pomigliano D'Arco (sud Italia)

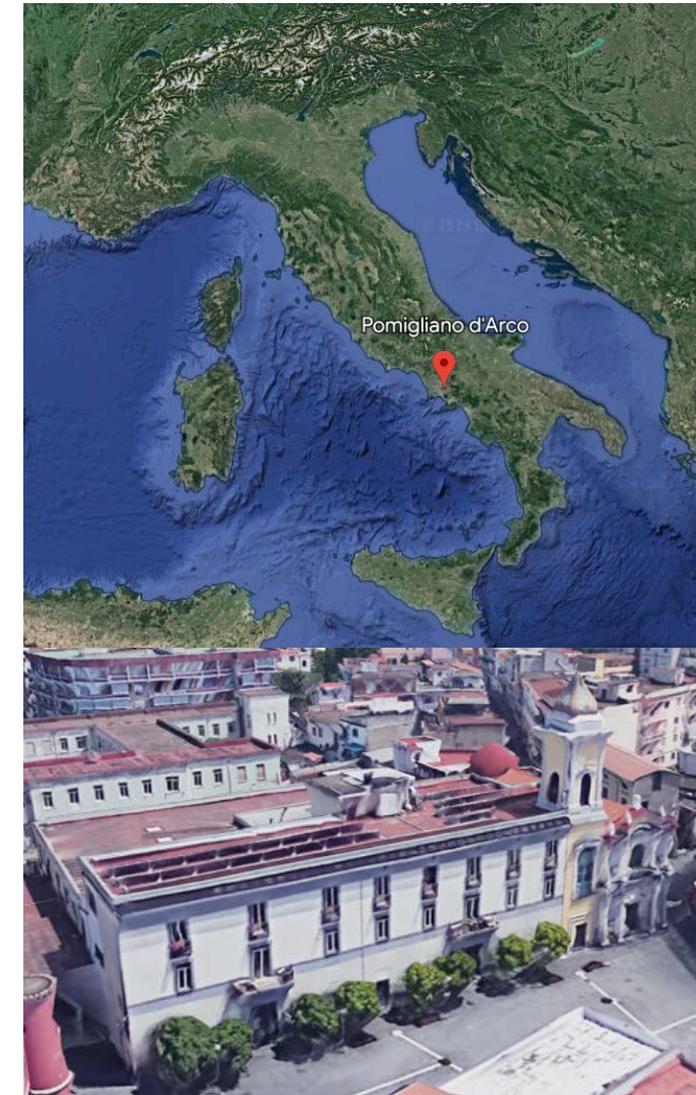
	Unità di misura	Valore
Altitudine	m	45
Latitudine		40°51'25" N
Longitudine		14°23'34" E
Zona climatica italiana (DPR 412/93 [1])		C
Setpoint della temperatura dell'aria invernale	°C	20
Setpoint umidità relativa invernale	%	65
Stagione di riscaldamento		15 novembre - 31 marzo

Involucro edilizio

Involucro edilizio componente	Trasmittanza termica	Valore limite di trasmittanza termica per la zona climatica C (DPR 412/93 [1]), come richiesto dalla normativa italiana (DM 26.06.2015 [2])
	W/m ² K	W/m ² K
Pavimento (solaio in cemento)	1.55	0.38
Tetto (solaio in cemento)	1.68	0.33
Parete (muratura di tufo)	1.03	0.34
Finestre (doppio vetro con telaio in PVC)	2.5	2.2

Impianto HVAC (2020)

Servizi	Riscaldamento, Raffrescamento, Ventilazione meccanica, Acqua calda sanitaria (ACS)
Impianto HVAC	Terminali ad espansione diretta + aria primaria
Generatore per riscaldamento e raffrescamento	Variable Refrigerant Volume (VRV)
Generatore per ACS	Pompa di calore aria-acqua con accumulo



Caso studio: edificio esistente adibito ad uffici

Seconda calibrazione del modello (2020)

ASHRAE Guideline 14 [3] per la calibrazione su base mensile.

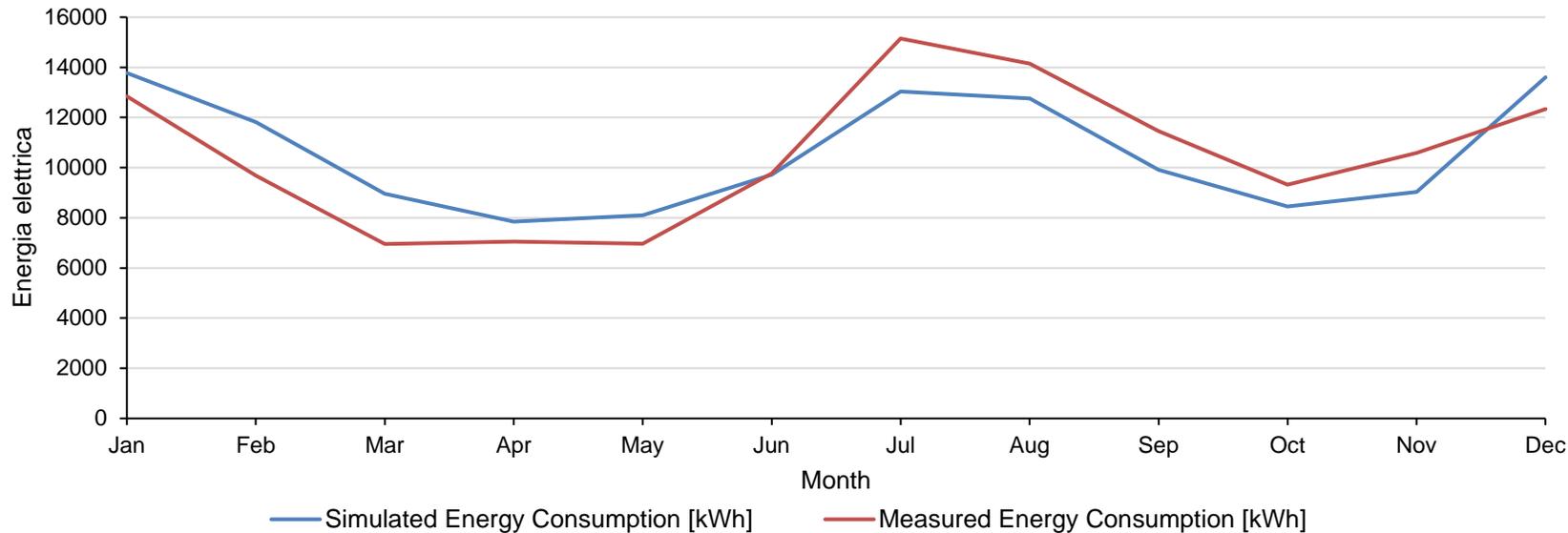
$$MBE[\%] = \frac{\sum_{i=1}^N (d_s - d_m)}{\sum_{i=1}^N d_m}$$

$$Cv(RMSE)(\%) = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (d_s - d_m)^2}{N}}}{m_s}$$

	MBE_{LIMITE}	MBE	$Cv(RMSE)_{LIMITE}$	$Cv(RMSE)$	Verificato
Elettricità	±5%	-0.6%	15%	13.7%	Sì



Energia elettrica (2020)



Caso studio: edificio esistente adibito ad uffici

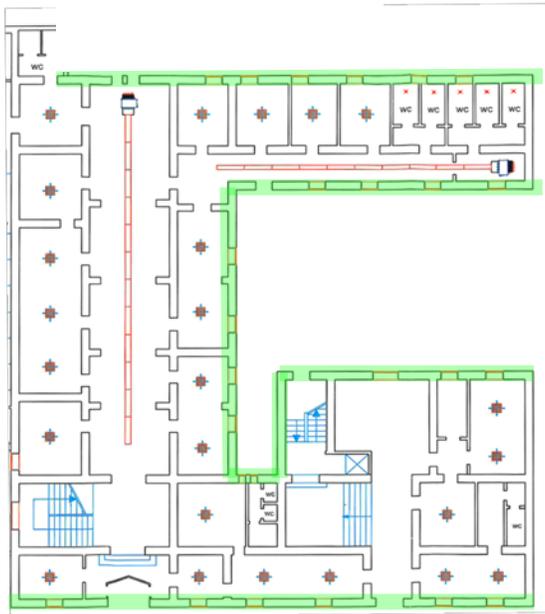
Retrofit: scenari di isolamento dell'involucro

Superficie utile dell'edificio: 2335 m²

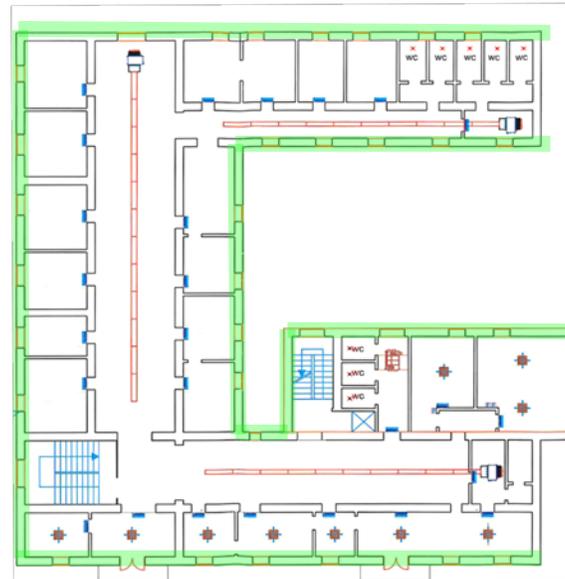
Superficie esterna della parete da isolare: 1427 m²

N°20 scenari di isolamento:

- 2 posizioni di isolamento: interno / esterno
- 10 materiali isolanti

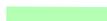


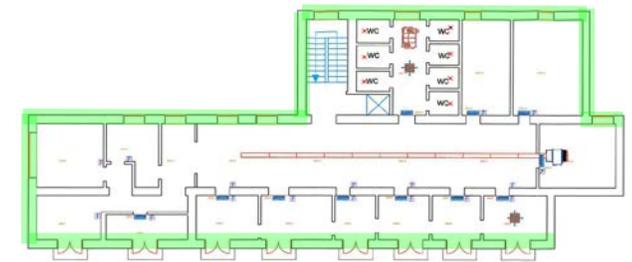
Piano Terra



Piano Primo

Legenda

 Pareti esterne sottoposte a retrofit



Secondo piano

Caso studio

Retrofit: Scenari di isolamento dell'involucro

- 2 Posizioni isolamento: interno esterno
- 10 materiali isolanti

$U_{WALL}: 1.04 \text{ W/m}^2\text{K}$

 $U_{WALL,RETROFIT}: 0.29 \text{ W/m}^2\text{K}$

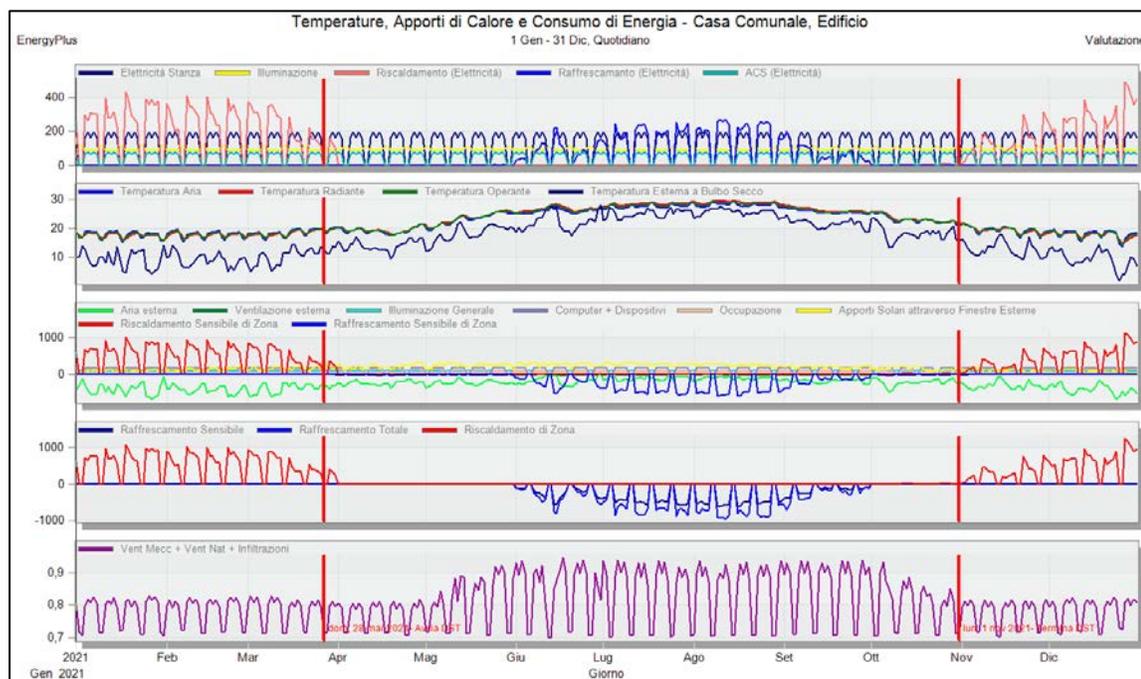
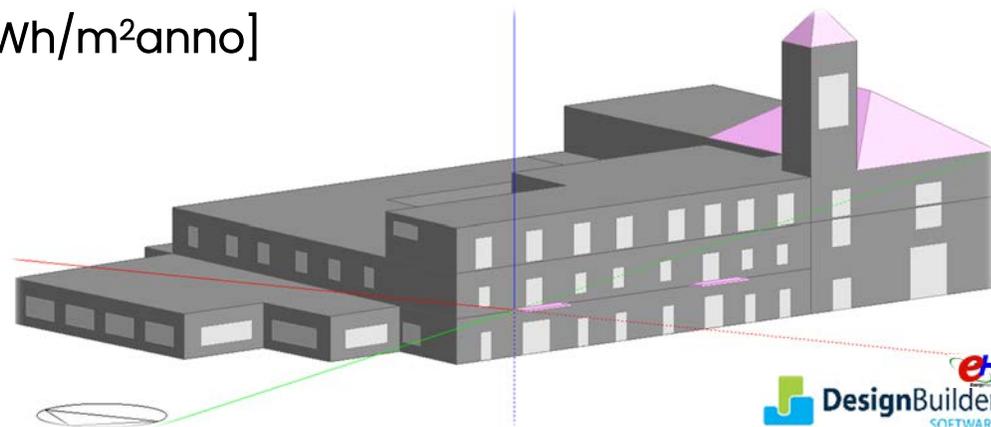
Materiale termoisolante		Posizione	Conduktività termica	Capacità termica	ρ	Spessore	Trasmittanza periodica	Costo
			W/mK	J/(kgK)	Kg/m ³	m	W/m ² K	€/m ²
Cellulari	Poliuretano espanso	Interno	0.025	1260	42	0.06	0.0043	82.26
		Esterno	0.025	1260	42	0.06	0.0030	82.26
	Polistirene espanso (EPS)	Interno	0.034	1260	27	0.09	0.0044	86.70
		Esterno	0.034	1260	27	0.09	0.0030	86.70
Porosi	Perlite espansa	Interno	0.055	1000	100	0.14	0.0040	30.50
		Esterno	0.055	1000	100	0.14	0.0028	30.50
	Argilla espansa	Interno	0.11	1000	600	0.28	0.0007	27.80
		Esterno	0.11	1000	600	0.28	0.0005	27.80
Fibrosi	Lana di roccia	Interno	0.035	1030	60	0.09	0.0043	73.83
		External	0.035	1030	60	0.09	0.0030	73.83
	Fibra di legno	Internal	0.036	2100	60	0.09	0.0041	87.96
		External	0.036	2100	60	0.09	0.0029	87.96
Innovativi	Vacuum insulation panels (VIP)	Internal	0.004	1000	500	0.01	0.0043	192.1
		External	0.004	1000	500	0.01	0.0030	192.1
	Aerogel	Internal	0.015	1000	230	0.04	0.0042	359.3
		External	0.015	1000	230	0.04	0.0029	359.3
Intonaci termoisolanti	Intonaco a base di sughero	Internal	0.045	1000	360	0.11	0.0030	65.00
		External	0.045	1000	360	0.11	0.0021	65.00
	Intonaco isolante calce-cemento	Internal	0.087	1000	410	0.22	0.0016	72.00
		External	0.087	1000	410	0.22	0.0012	72.00

Metodologia

Key Performance Indicators 1/3

- Modello energetico calibrato
- Simulazione energetica dinamica annuale
- Software: Design Builder + EnergyPlus
- Fattori italiani di conversione dell'energia primaria

Consumo Energia Primaria [kWh/m²anno]



Costruzioni	
Strati	Proprietà della superficie
Immagine	Calcolato
Costo	Analisi di condensazione
Superficie più interna	
Coefficiente convettivo di scambio di calore (W/mq-K)	2,152
Coefficiente radiativo di scambio di calore (W/mq-K)	5,540
Resistenza di superficie (mq-K/W)	0,130
Superficie più esterna	
Coefficiente convettivo di scambio di calore (W/mq-K)	19,870
Coefficiente radiativo di scambio di calore (W/mq-K)	5,130
Resistenza di superficie (mq-K/W)	0,040
Nessuno strato termicamente eterogeneo	
Valore-U da superficie a superficie (W/mq-K)	1,261
Valore-R (mq-K/W)	0,963
Valore-U (W/mq-K)	1,039
Con strato termicamente eterogeneo (BS EN ISO 6946)	
Spessore muro (m)	0,6400
Cm - Capacità Termica interna (KJ/mq-K)	130,3040
Limite di resistenza superiore (mq-K/W)	0,963
Limite di resistenza inferiore (mq-K/W)	0,963
Valore-U da superficie a superficie (W/mq-K)	1,261
Valore-R (mq-K/W)	0,963
Valore-U (W/mq-K)	1,039

Metodologia

Key Performance Indicators 2/3

Global Warming Potential (GWP) [kgCO₂-eq/anno]

Fattore di emissione di CO₂: 0.65 kg CO₂/kWh_e



Riduzione operational CO₂

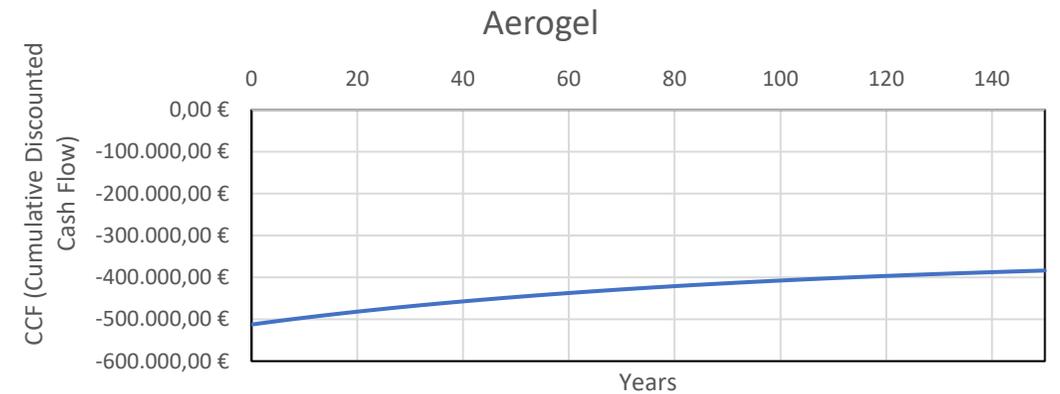
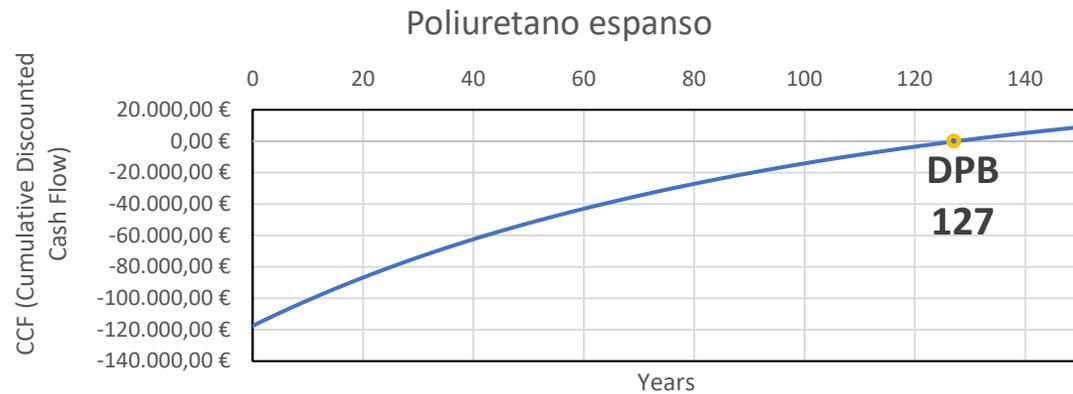
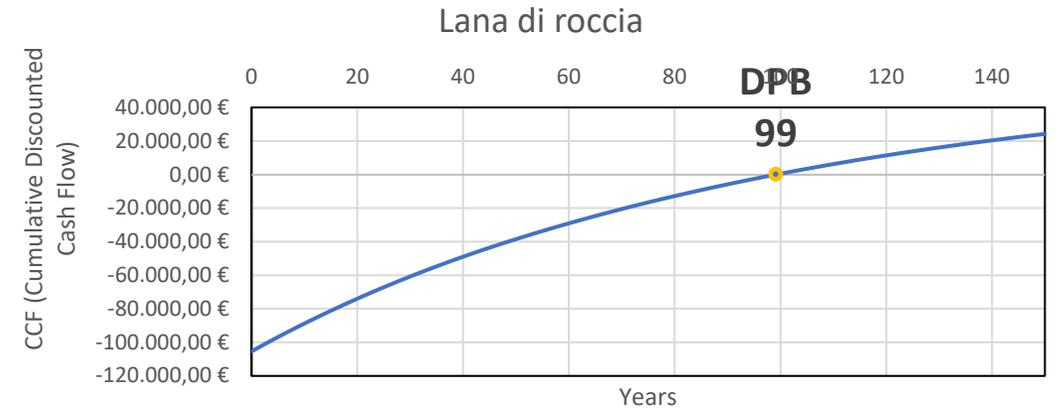
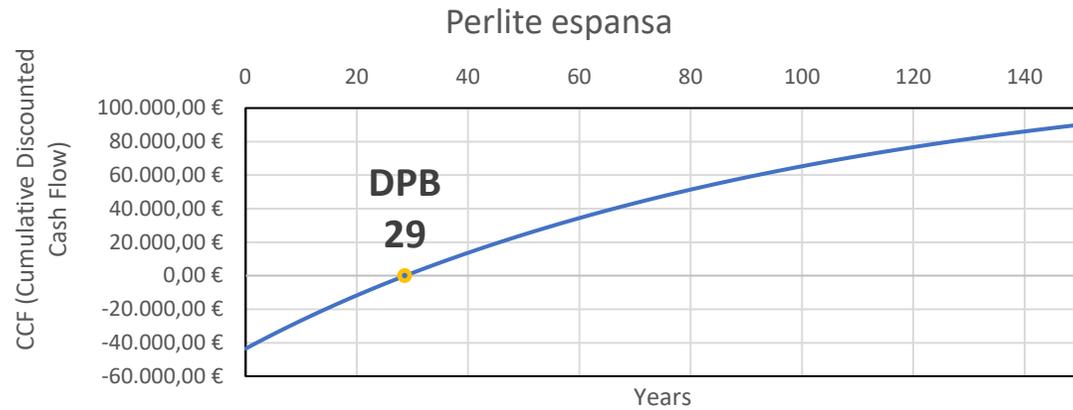
Materiale termoisolante		Vita utile	Embodied GWP	Fonte
		Years	kg CO ₂ -eq/m ² _{WALL}	
Cellulari	Poliuretano espanso	50	10.4	[4]
	Polistirene espanso (EPS)	40	4.5	[4]
Porosi	Perlite espansa	30	4.0	[5]
	Argilla espansa	30	8.1	[6]
Fibrosi	Lana di roccia	50	3.6	[4]
	Fibra di legno	30	1.6	[5]
Innovativi	Vacuum Insulation Panels (VIP)	30	29.9	[7]
	Aerogel	30	15.6	[7]
Intonaci termoisolanti	Intonaco a base di sughero	20	1.9	[8]
	Intonaco isolante calce-cemento	20	3.8	[8]

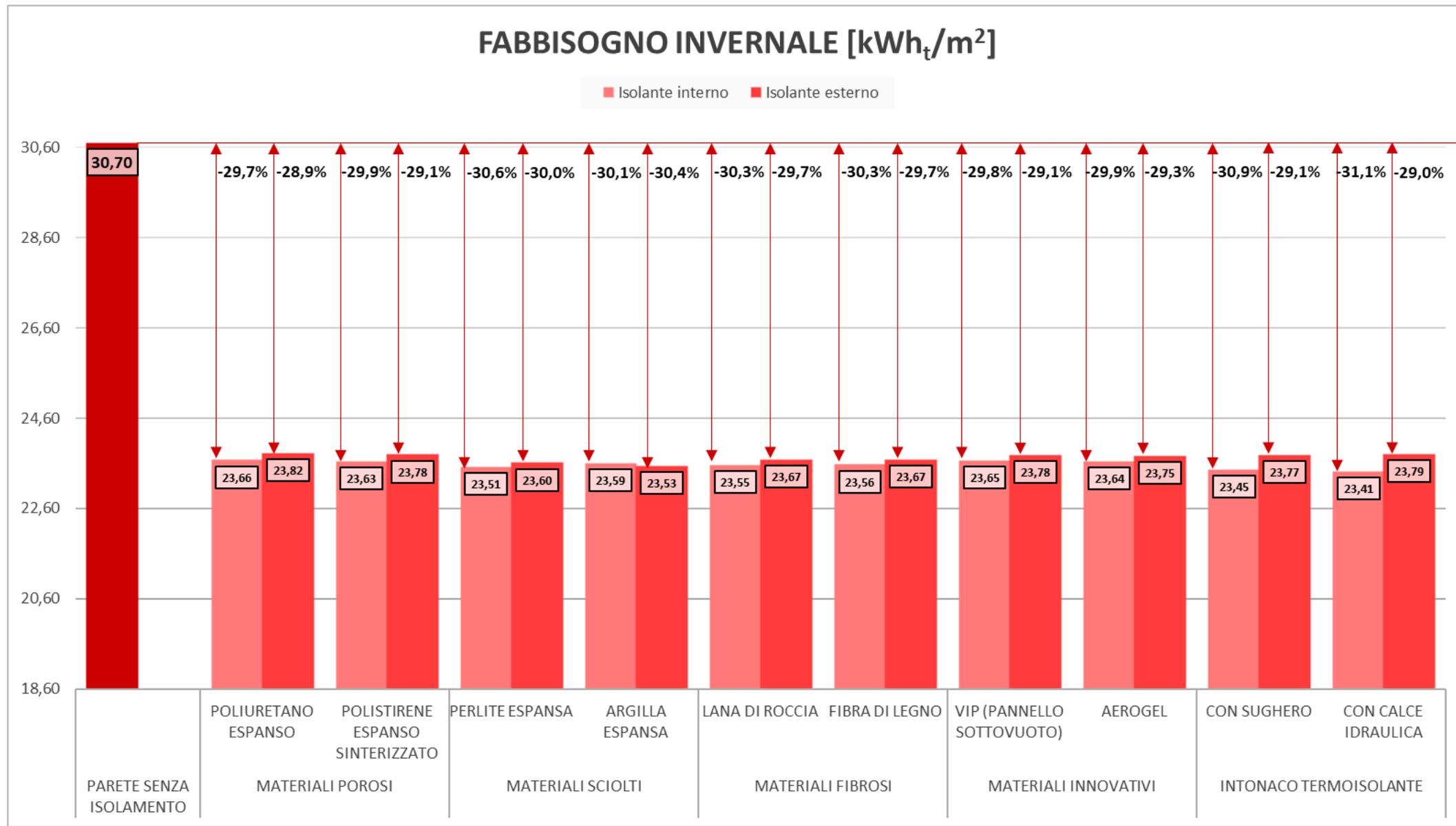
Metodologia

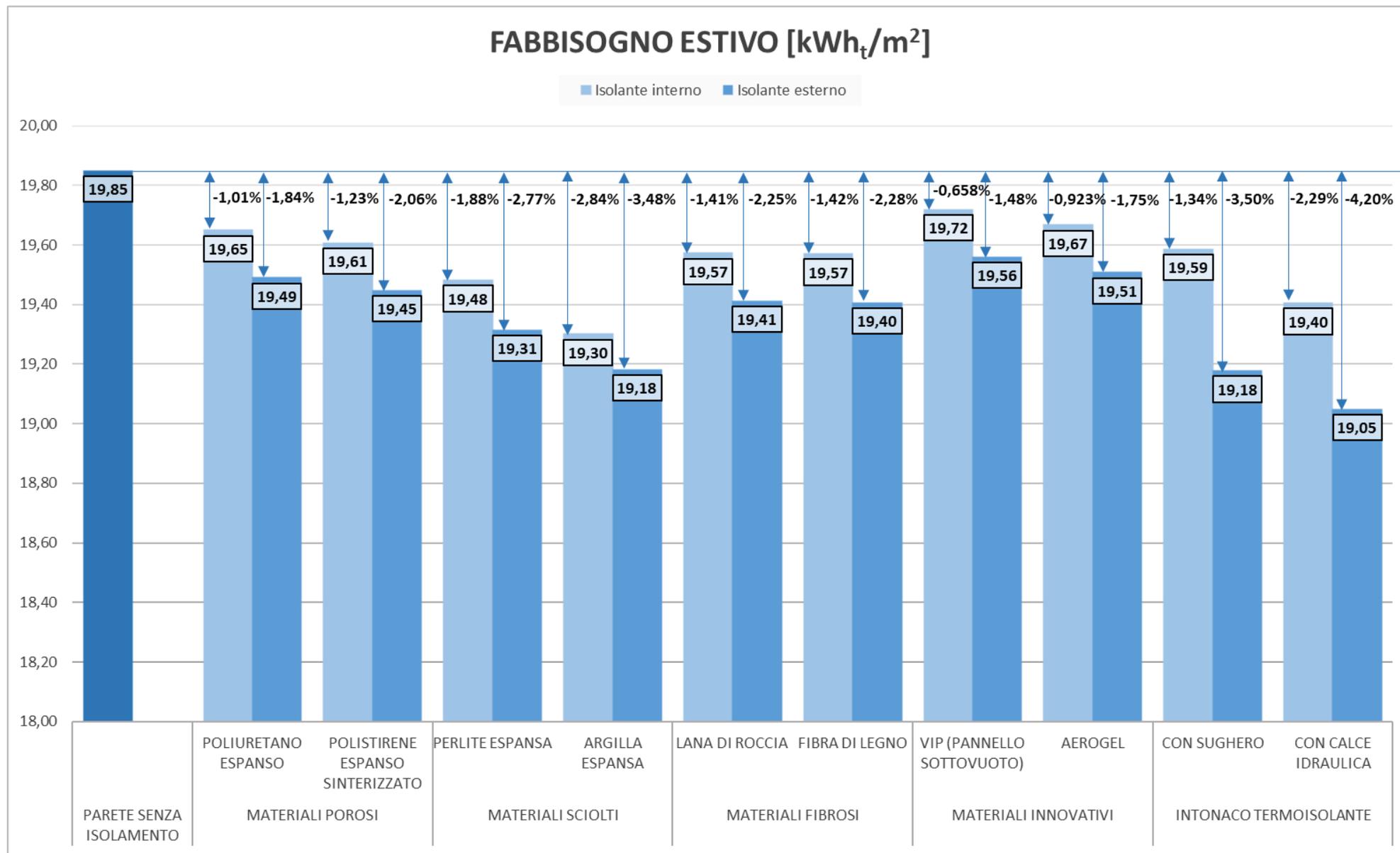
Key Performance Indicators 3/3

Discounted PayBack period (DPB)

Costo dell'energia elettrica: 0.25 €/kWh_e

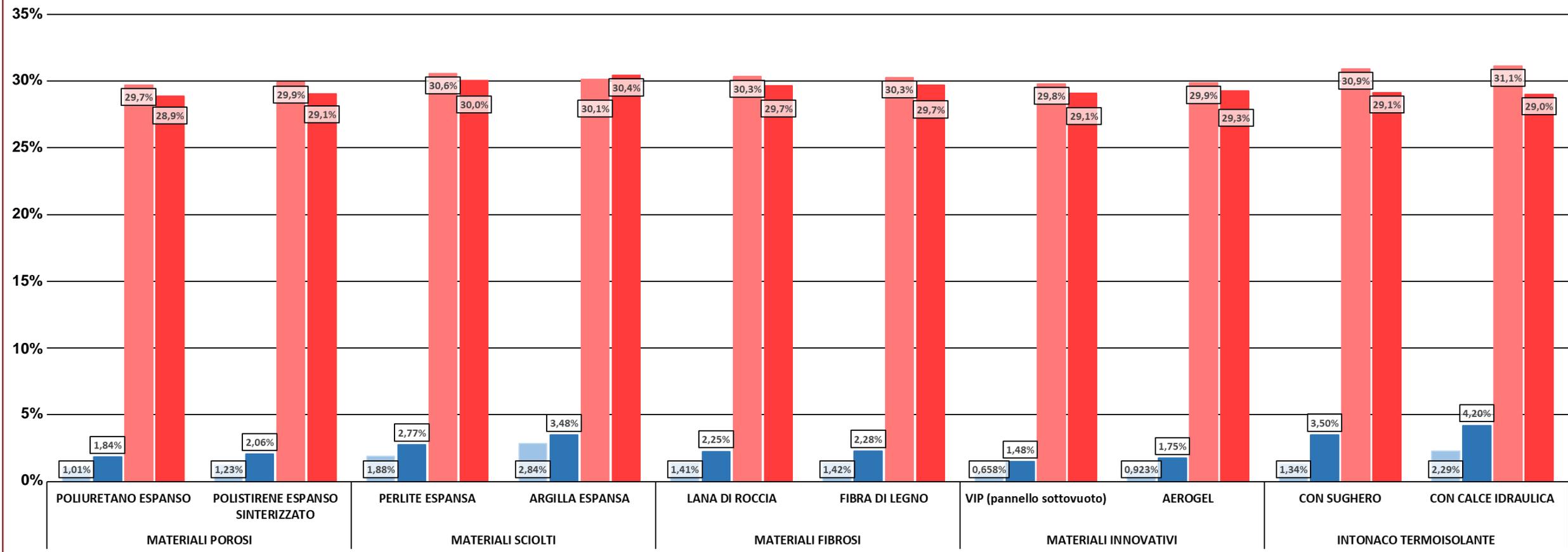


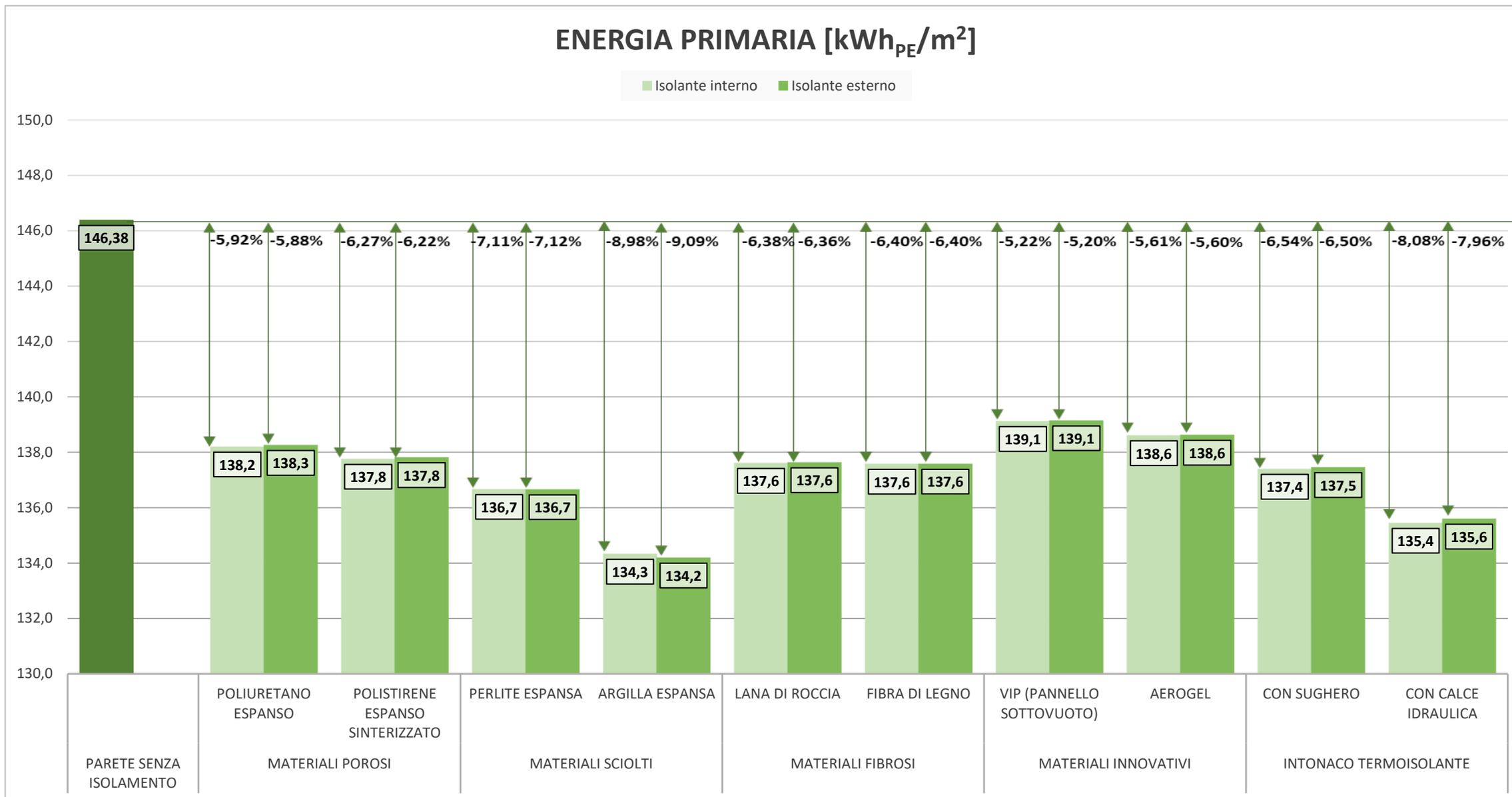




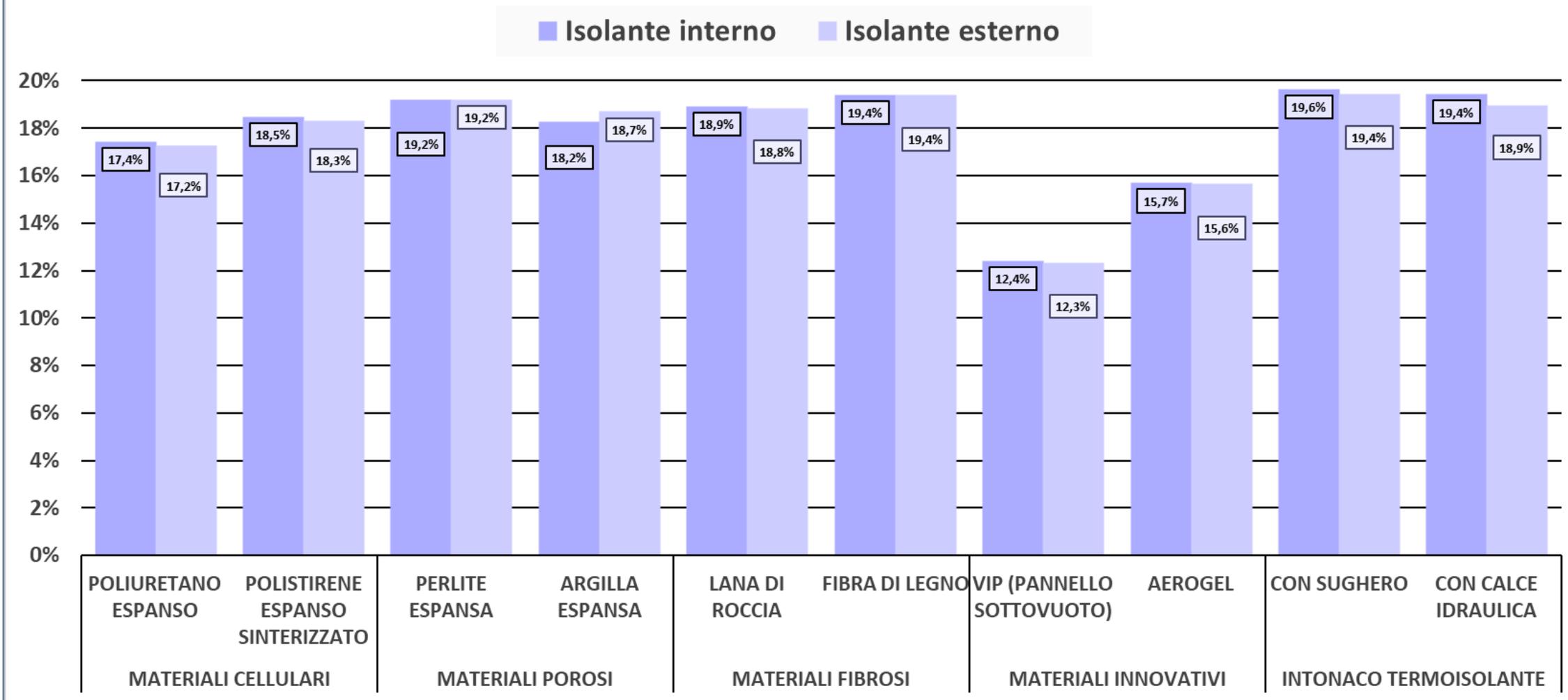
RIDUZIONE ANNUA DEL FABBISOGNO DI ENERGIA TERMICA [%]

■ REGIME ESTIVO Isolante interno
 ■ REGIME ESTIVO Isolante esterno
 ■ REGIME INVERNALE Isolante interno
 ■ REGIME INVERNALE Isolante esterno

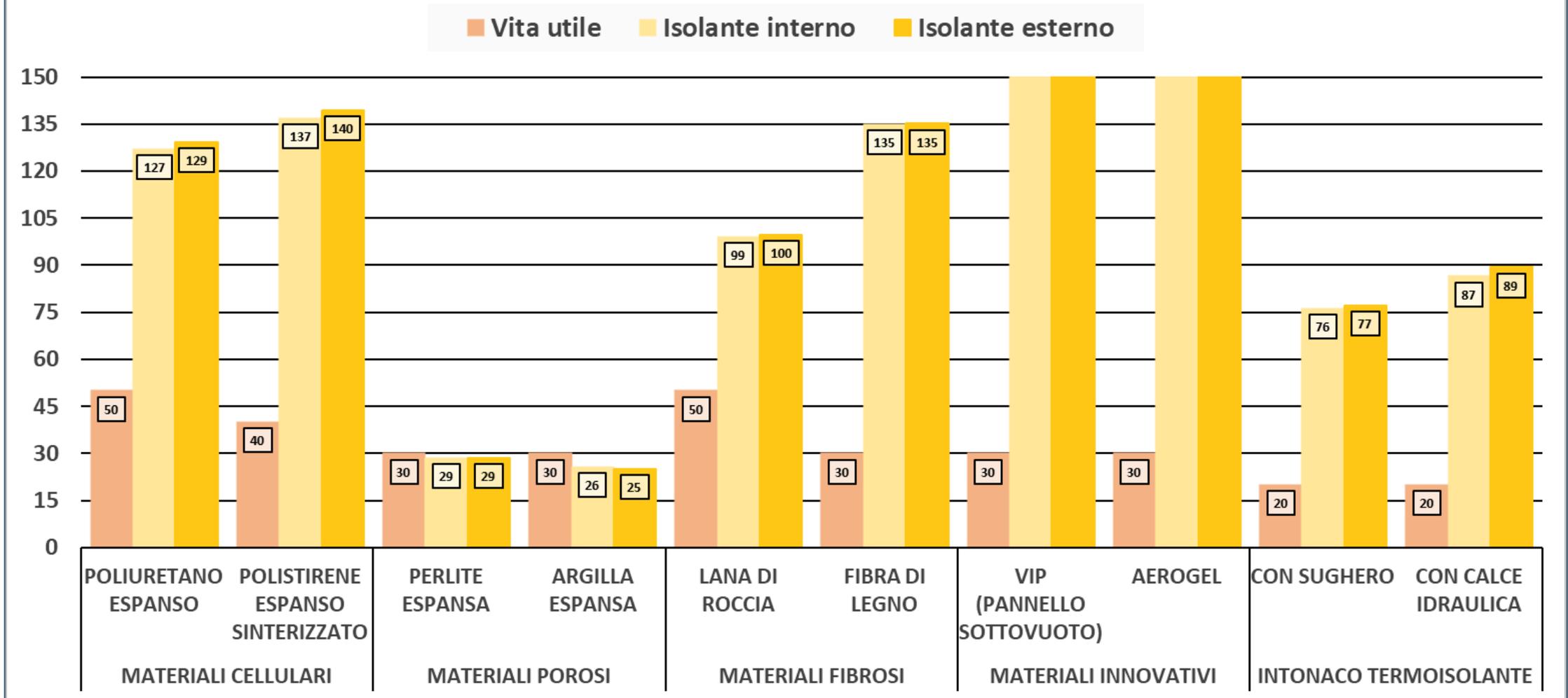




RIDUZIONE ANNUA DELLE EMISSIONI DI CO₂ [%]



DISCOUNTED PAYBACK PERIOD (DPB) – TEMPO DI RITORNO ATTUALIZZATO



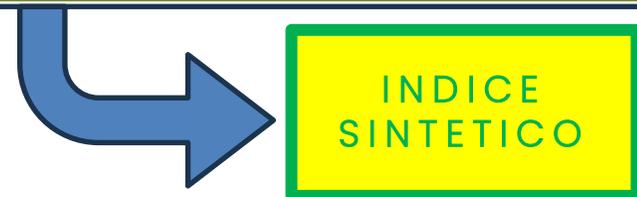
Risultati

Materiale termoisolante		Posizione	Consumo annuo di Energia Primaria (EP)	Discounted PayBack period (DPB)	Riduzione del potenziale di riscaldamento globale (GWP)
			kWh/m ² anno	numero di anni	kg _{CO2-eq} /anno
Cellulari	Poliuretano espanso	Interno	138,2	127,1	4105,7
		Esterno	138,3	129,4	4069,6
	Polistirene espanso (EPS)	Interno	137,8	137,0	4337,5
		Esterno	137,8	139,6	4300,0
Porosi	Perlite espansa	Interno	136,7	28,7	4510,4
		Esterno	136,7	28,6	4515,1
	Argilla espansa	Interno	134,3	25,6	4326,5
		Esterno	134,2	25,1	4414,9
Fibrosi	Lana di roccia	Interno	137,6	99,1	4402,7
		External	137,6	99,7	4388,0
	Fibra di legno	Internal	137,6	135,0	4553,8
		External	137,6	135,2	4551,1
Innovativi	Vacuum insulation panels (VIP)	Internal	139,1	>150	3093,8
		External	139,1	>150	3076,2
	Aerogel	Internal	138,6	>150	3800,4
		External	138,6	>150	3790,3
Intonaci termoisolanti	Intonaco a base di sughero	Internal	137,4	76,2	4674,7
		External	137,5	77,1	4635,7
	Intonaco isolante calce-cemento	Internal	135,4	86,5	4633,6
		External	135,6	89,4	4535,1

Risultati

Materiale termoisolante		Posizione	Consumo annuo di Energia Primaria (EP)	Discounted PayBack period (DPB)	Riduzione del potenziale di riscaldamento globale (GWP)
			kWh/m ² anno	numero di anni	kg _{CO2-eq} /anno
Cellulari	Poliuretano espanso	Interno	138,2	127,1	4105,7
		Esterno	138,3	129,4	4069,6
	Polistirene espanso (EPS)	Interno	137,8	137,0	4337,5
		Esterno	137,8	139,6	4300,0
Porosi	Perlite espansa	Interno	136,7	28,7	4510,4
		Esterno	136,7	28,6	4515,1
	Argilla espansa	Interno	134,3	25,6	4326,5
		Esterno	134,2	25,1	4414,9
Fibrosi	Lana di roccia	Interno	137,6	99,1	4402,7
		External	137,6	99,7	4388,0
	Fibra di legno	Internal	137,6	135,0	4553,8
		External	137,6	135,2	4551,1
Innovativi	Vacuum insulation panels (VIP)	Internal	139,1	>150	3093,8
		External	139,1	>150	3076,2
	Aerogel	Internal	138,6	>150	3800,4
		External	138,6	>150	3790,3
Intonaci termoisolanti	Intonaco a base di sughero	Internal	137,4	76,2	4674,7
		External	137,5	77,1	4635,7
	Intonaco isolante calce-cemento	Internal	135,4	86,5	4633,6
		External	135,6	89,4	4535,1

La Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) consente di individuare un indice sintetico per classificare le alternative



Metodologia MCDM

Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) - Definizione del problema

Il problema consiste nella classificazione di m alternative, indicate dal vettore

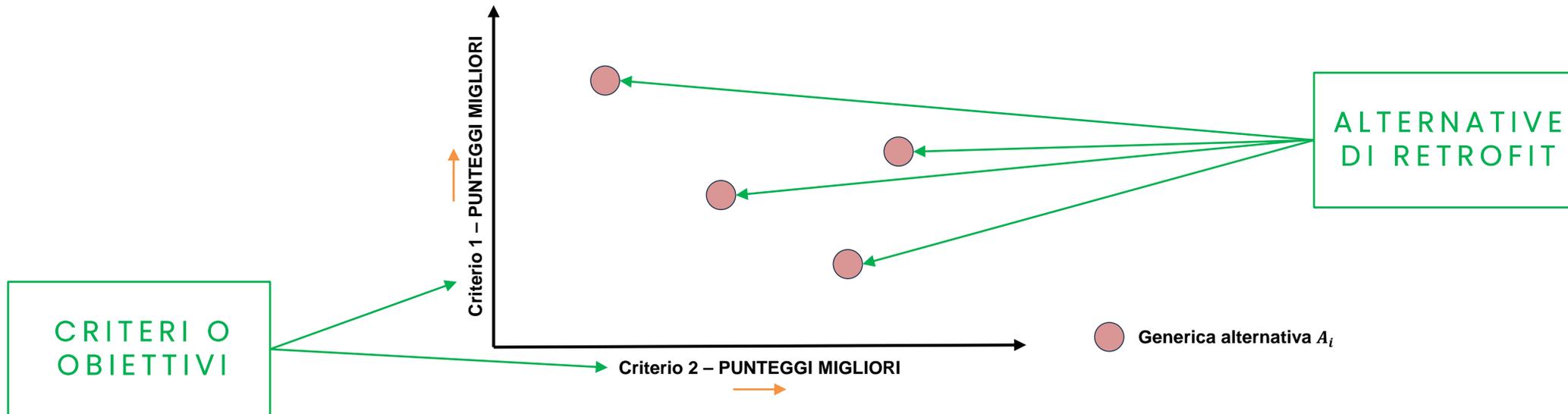
$$A = A_i (i = 1, 2, \dots, m)$$

sulla base di n criteri influenti, indicati dal vettore

$$C = C_j (j = 1, 2, \dots, n)$$

considerando gli n pesi relativi, rappresentati dal vettore

$$W = W_j (j = 1, 2, \dots, n)$$



Metodologia MCDM

Il punteggio delle alternative secondo ciascun criterio, noto anche come valutazione delle prestazioni, è espresso sotto forma della matrice di valutazione o **matrice decisionale** $X = (x_{ij})_{m \times n}$, creato dall'intersezione delle m opzioni o soluzioni progettuali alternative A_i degli n criteri di prestazione C_j , come segue:

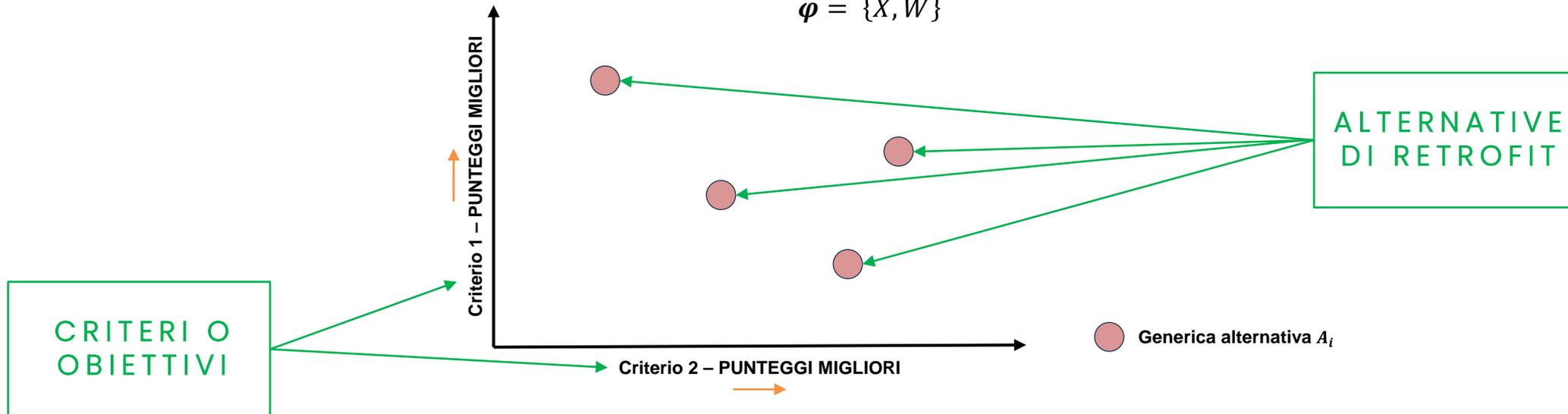
$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & \dots & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

Il vettore dei pesi W è scelto in modo che:

$$\sum_{j=1}^n W_j = 1$$

Definiti la **matrice decisionale** X ed il **vettore dei pesi** W , il problema di MCDM φ può essere espresso come segue:

$$\varphi = \{X, W\}$$



Metodologia MCDM

Metodo di risoluzione (TOPSIS) 1/4

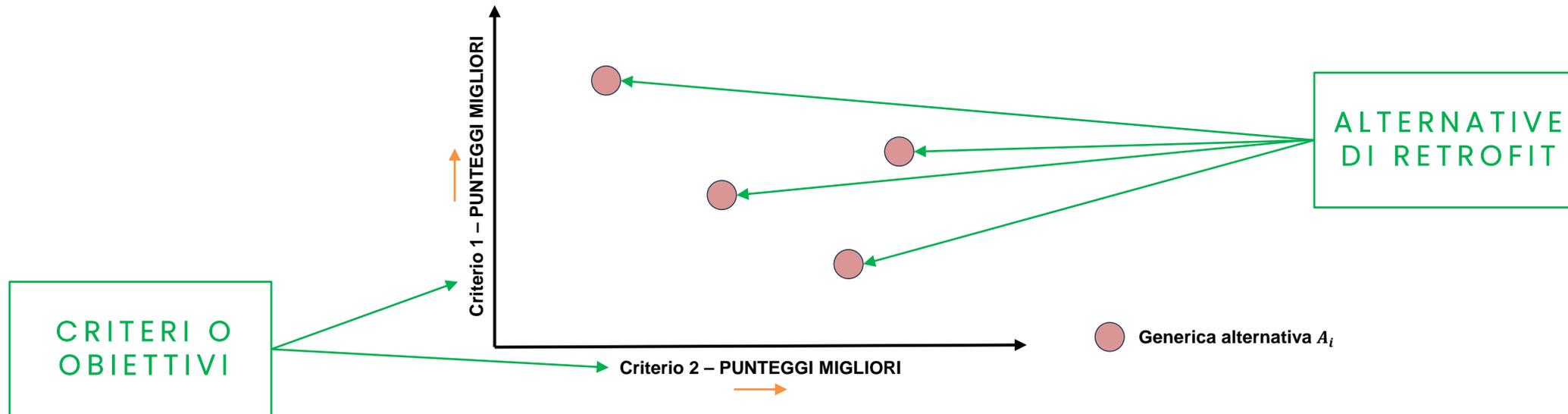
La soluzione al problema, ricercata con metodo TOPSIS, è rappresentata da un insieme di m punteggi di preferenza v_i , che compongono il vettore $V = V_i (i = 1, 2, \dots, m)$, che permette di classificare le alternative.

Al fine di consentire la comparabilità delle valutazioni delle prestazioni con dimensioni incongrue, la matrice di valutazione $X = (x_{ij})_{m \times n}$ è normalizzata per ottenere la matrice normalizzata $R = (r_{ij})_{m \times n}$ mediante normalizzazione vettoriale, come segue:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n$$

La matrice normalizzata R viene pesata utilizzando il vettore W per ottenere la matrice normalizzata pesata $T = (t_{ij})_{m \times n}$, come segue:

$$t_{ij} = r_{ij} \cdot w_j, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n$$



Metodologia MCDM

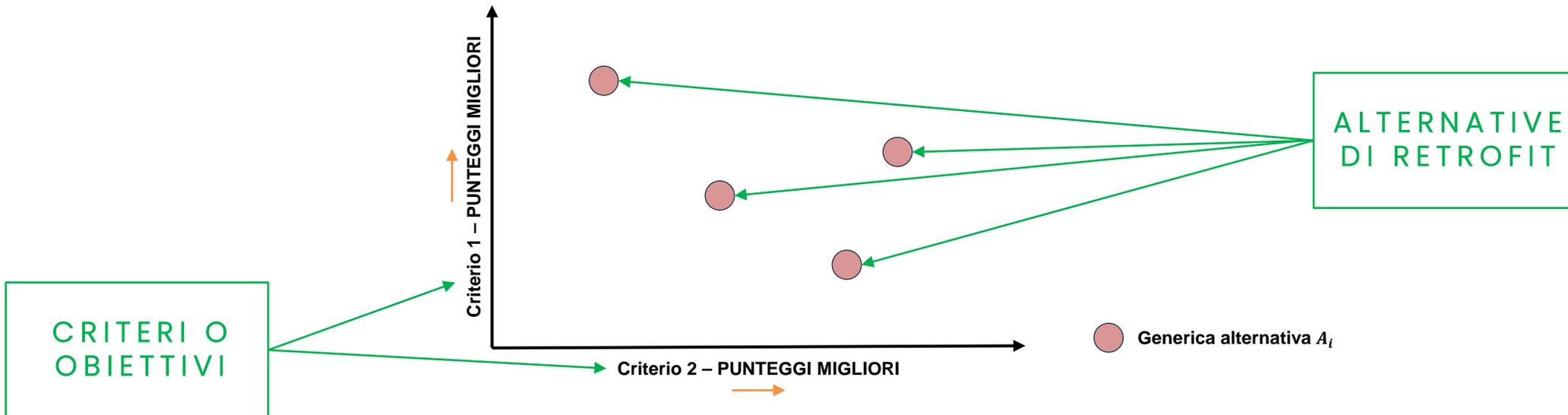
Metodo di risoluzione (TOPSIS) 2/4

L'alternativa migliore ideale $A^+ = [t_1^+, t_2^+, \dots, t_n^+]$ è determinata come segue:

$$t_j^+ = \begin{cases} \max t_{ij}, & \text{se } j \text{ è un attributo di benefit} \\ \min t_{ij}, & \text{se } j \text{ è un attributo di costo} \end{cases}$$

L'alternativa peggiore ideale $A^- = [t_1^-, t_2^-, \dots, t_n^-]$ è determinata come segue:

$$t_j^- = \begin{cases} \min t_{ij}, & \text{se } j \text{ è un attributo di benefit} \\ \max t_{ij}, & \text{se } j \text{ è un attributo di costo} \end{cases}$$



Metodologia MCDM

Metodo di risoluzione (TOPSIS) 2/4

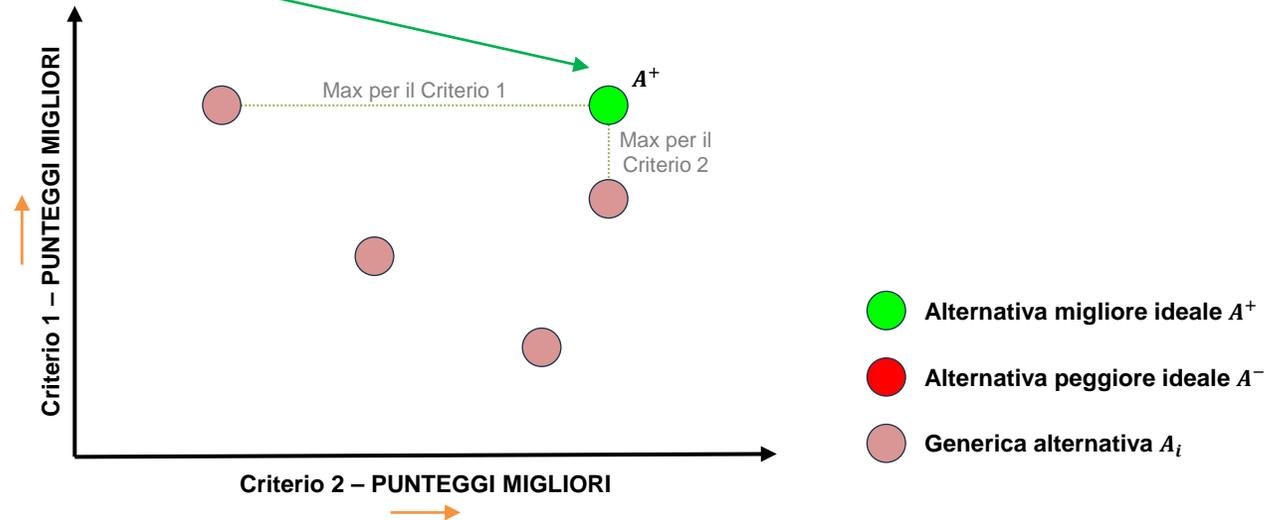
L'alternativa migliore ideale $A^+ = [t_1^+, t_2^+, \dots, t_n^+]$ è determinata come segue:

$$t_j^+ = \begin{cases} \max t_{ij}, & \text{se } j \text{ è un attributo di benefit} \\ \min t_{ij}, & \text{se } j \text{ è un attributo di costo} \end{cases}$$

L'alternativa peggiore ideale $A^- = [t_1^-, t_2^-, \dots, t_n^-]$ è determinata come segue:

$$t_j^- = \begin{cases} \min t_{ij}, & \text{se } j \text{ è un attributo di benefit} \\ \max t_{ij}, & \text{se } j \text{ è un attributo di costo} \end{cases}$$

ALTERNATIVA
MIGLIORE
IDEALE



Metodologia MCDM

Metodo di risoluzione (TOPSIS) 2/4

L'alternativa migliore ideale $A^+ = [t_1^+, t_2^+, \dots, t_n^+]$ è determinata come segue:

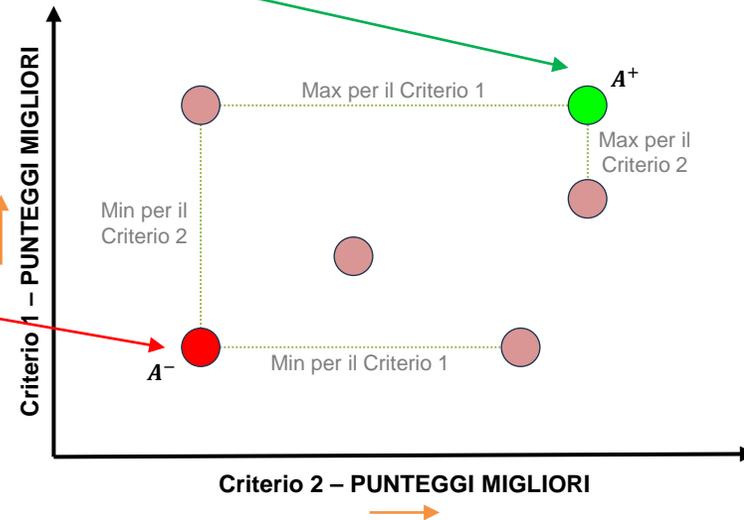
$$t_j^+ = \begin{cases} \max t_{ij}, & \text{se } j \text{ è un attributo di benefit} \\ \min t_{ij}, & \text{se } j \text{ è un attributo di costo} \end{cases}$$

L'alternativa peggiore ideale $A^- = [t_1^-, t_2^-, \dots, t_n^-]$ è determinata come segue:

$$t_j^- = \begin{cases} \min t_{ij}, & \text{se } j \text{ è un attributo di benefit} \\ \max t_{ij}, & \text{se } j \text{ è un attributo di costo} \end{cases}$$

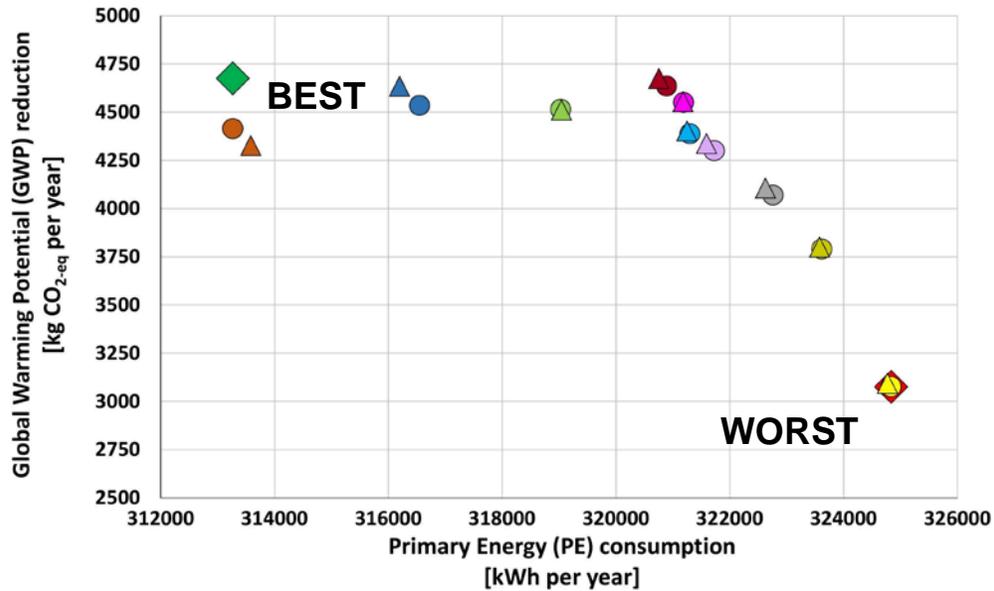
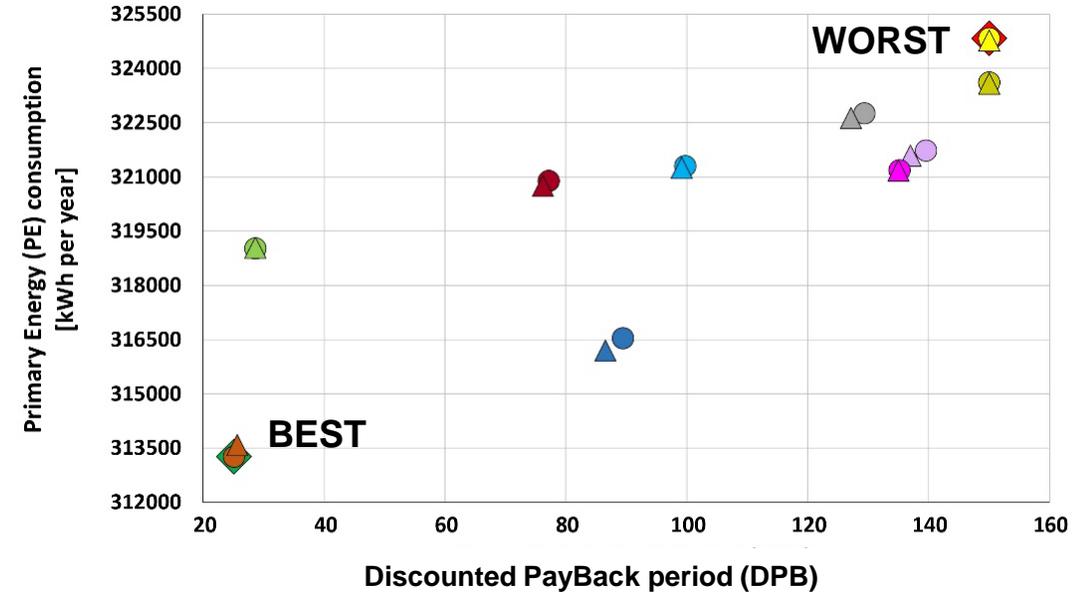
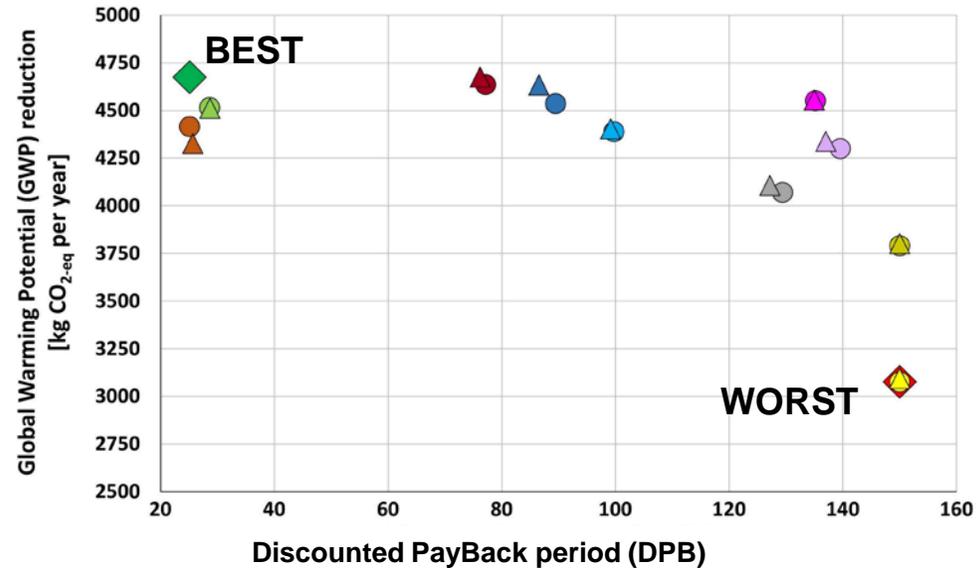
ALTERNATIVA
MIGLIORE
IDEALE

ALTERNATIVA
PEGGIORE
IDEALE



- Alternativa migliore ideale A^+
- Alternativa peggiore ideale A^-
- Generica alternativa A_i

Metodologia MCDM



LEGENDA

- POLIURETANO ESPANSO ESTERNO
- FIBRA DI LEGNO ESTERNO
- ▲ POLIURETANO ESPANSO INTERNO
- ▲ FIBRA DI LEGNO INTERNO
- POLISTIRENE ESPANSO SINTERIZZATO ESTERNO
- ▲ VIP (pannello sottovuoto) ESTERNO
- ▲ POLISTIRENE ESPANSO SINTERIZZATO INTERNO
- VIP (pannello sottovuoto) INTERNO
- PERLITE ESPANSA ESTERNO
- AEROGEL ESTERNO
- ▲ PERLITE ESPANSA INTERNO
- ▲ AEROGEL INTERNO
- ARGILLA ESPANSA ESTERNO
- TERMOINTONACO CON SUGHERO ESTERNO
- ▲ ARGILLA ESPANSA INTERNO
- ▲ TERMOINTONACO CON SUGHERO INTERNO
- LANA DI ROCCIA ESTERNO
- TERMOINTONACO CON CALCE IDRAULICA ESTERNO
- ▲ LANA DI ROCCIA INTERNO
- ▲ TERMOINTONACO CON CALCE IDRAULICA INTERNO

Metodologia MCDM

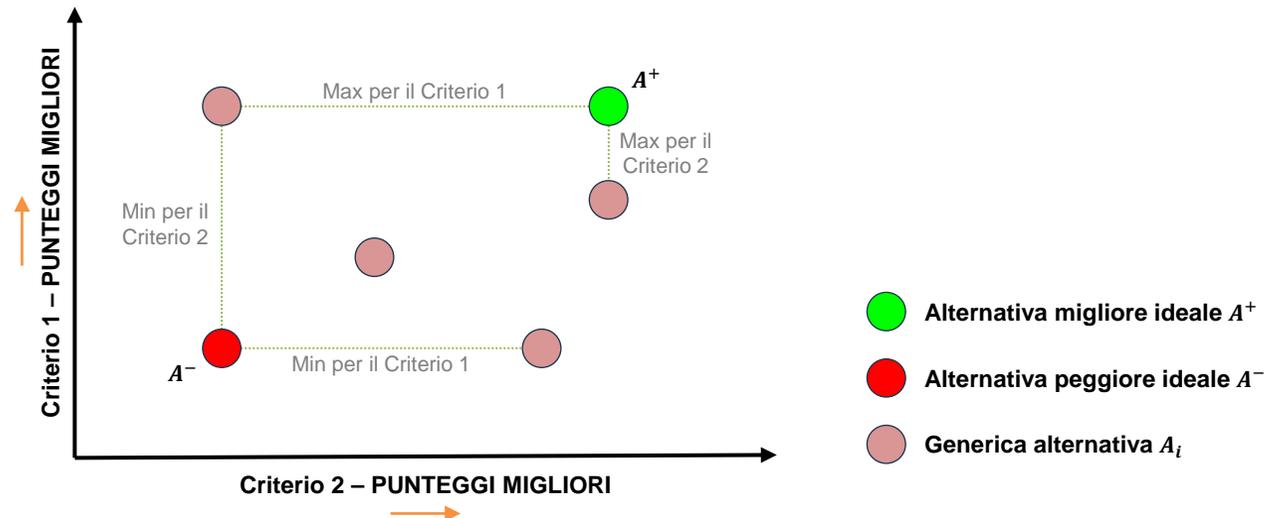
Metodo di risoluzione (TOPSIS) 3/4

La **distanza euclidea n-dimensionale** d_i^+ tra l'**alternativa** i e l'**alternativa migliore ideale** A^+ viene calcolata come segue:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (t_{ij} - t_j^+)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

The **distanza euclidea n-dimensionale** d_i^- tra l'**alternativa** i e l'**alternativa peggiore ideale** A^- viene calcolata come segue:

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (t_{ij} - t_j^-)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m$$



Metodologia MCDM

Metodo di risoluzione (TOPSIS) 3/4

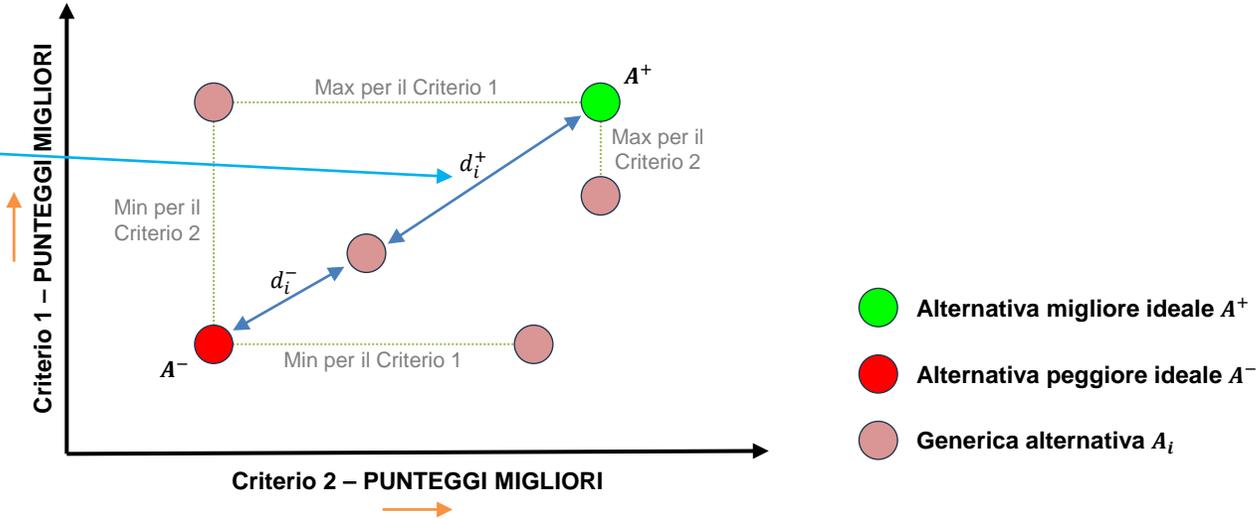
La **distanza euclidea n-dimensionale** d_i^+ tra l'**alternativa i** e l'**alternativa migliore ideale** A^+ viene calcolata come segue:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (t_{ij} - t_j^+)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

The **distanza euclidea n-dimensionale** d_i^- tra l'**alternativa i** e l'**alternativa peggiore ideale** A^- viene calcolata come segue:

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (t_{ij} - t_j^-)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

DISTANZA EUCLIDEA



Metodologia MCDM

Metodo di risoluzione (TOPSIS) 4/4

La **somiglianza** di ogni alternativa con l'alternativa peggiore viene utilizzata per creare il vettore dei **punteggi di preferenza V** ed è calcolata come segue:

$$v_i = \frac{d_i^-}{(d_i^- + d_i^+)}, \quad 0 \leq v_i \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

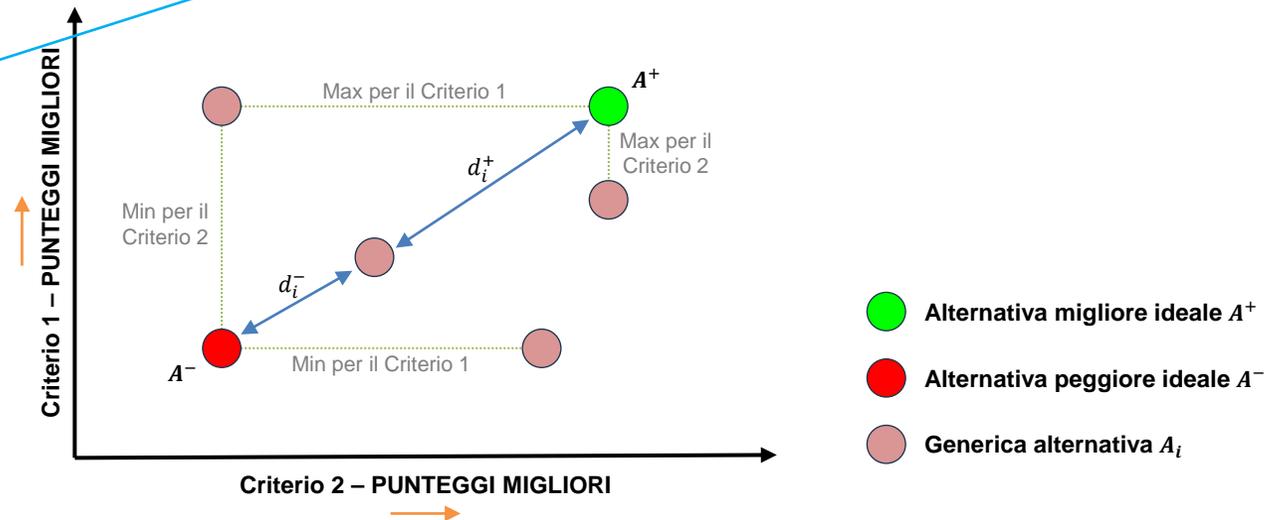
Le alternative sono classificate in base a v_i , $i = 1, 2, \dots, m$. Le opzioni più performanti sono identificate da valori più elevati di v_i e si può anche affermare che:

$v_i = 1 \Leftrightarrow$ la soluzione i coincide con la migliore alternativa ideale

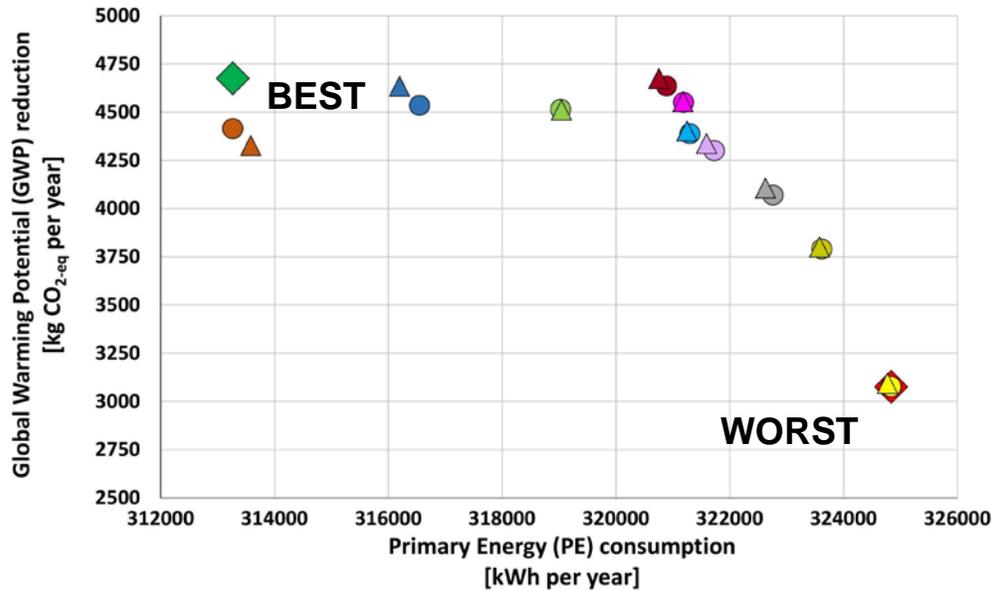
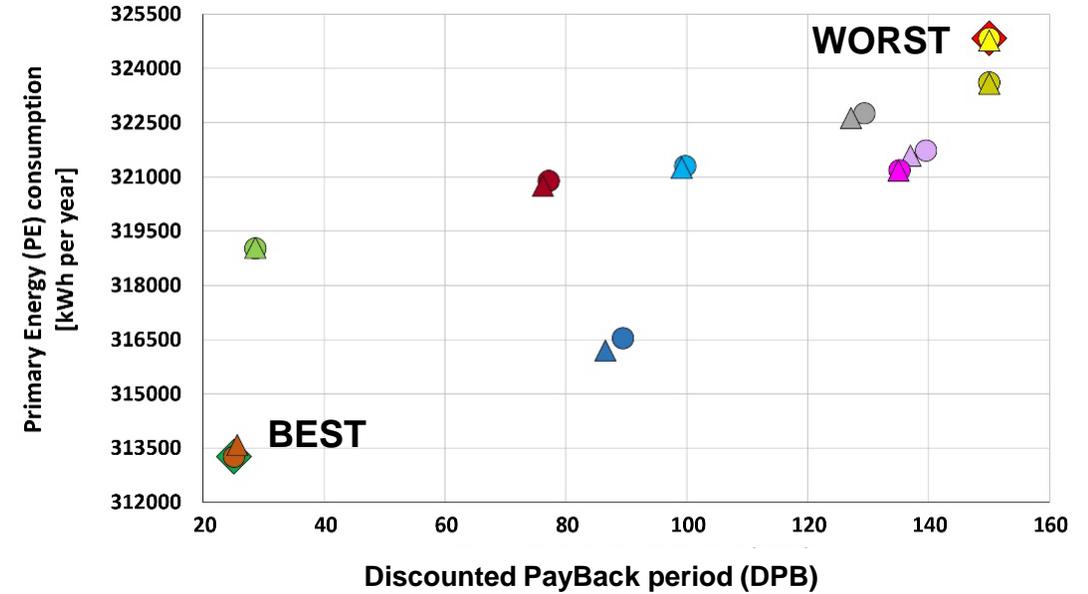
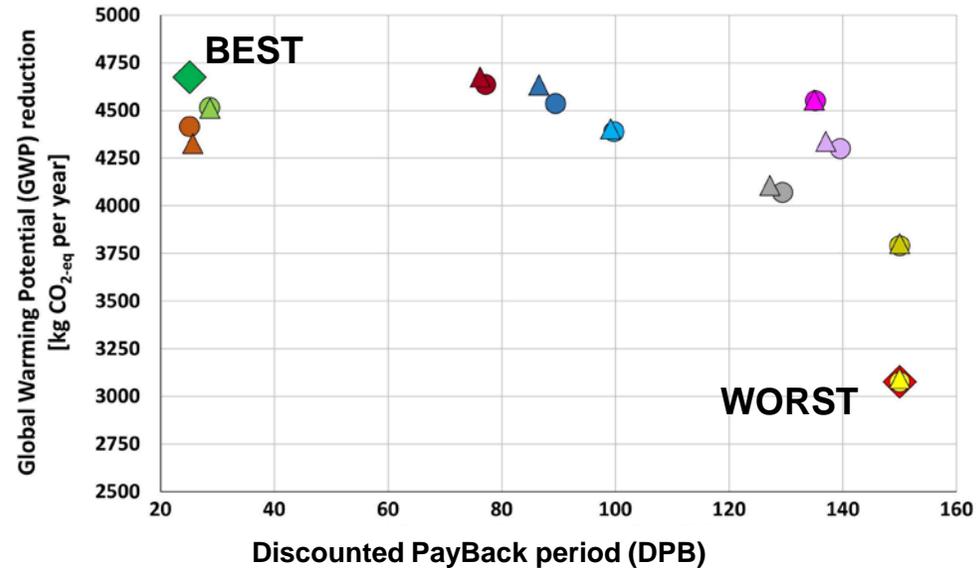
$v_i = 0 \Leftrightarrow$ la soluzione i coincide con l'alternativa peggiore ideale

e

INDICE
SINTETICO



Metodologia MCDM



LEGENDA

- POLIURETANO ESPANSO ESTERNO
- FIBRA DI LEGNO ESTERNO
- ▲ POLIURETANO ESPANSO INTERNO
- ▲ FIBRA DI LEGNO INTERNO
- POLISTIRENE ESPANSO SINTERIZZATO ESTERNO
- VIP (pannello sottovuoto) ESTERNO
- ▲ POLISTIRENE ESPANSO SINTERIZZATO INTERNO
- VIP (pannello sottovuoto) INTERNO
- PERLITE ESPANSA ESTERNO
- AEROGEL ESTERNO
- ▲ PERLITE ESPANSA INTERNO
- ▲ AEROGEL INTERNO
- ARGILLA ESPANSA ESTERNO
- TERMOINTONACO CON SUGHERO ESTERNO
- ▲ ARGILLA ESPANSA INTERNO
- ▲ TERMOINTONACO CON SUGHERO INTERNO
- LANA DI ROCCIA ESTERNO
- TERMOINTONACO CON CALCE IDRAULICA ESTERNO
- ▲ LANA DI ROCCIA INTERNO
- ▲ TERMOINTONACO CON CALCE IDRAULICA INTERNO

Classifica delle soluzioni alternative di isolamento termico ottenute con il metodo TOPSIS

Descrizione dello scenario di retrofit	Punteggio
Perlite espansa - esterno	0.96
Perlite espansa - interno	0.96
Argilla espansa - esterno	0.95
Argilla espansa - interno	0.93
Intonaco a base di sughero - interno	0.62
Intonaco a base di sughero - esterno	0.62
Intonaco calce-cemento - interno	0.55
Intonaco calce-cemento - esterno	0.53
Lana di roccia - interno	0.45
Lana di roccia - esterno	0.45
Fibra di legno - interno	0.27
Fibra di legno - esterno	0.27
Poliuretano espanso - interno	0.25
Polistirene espanso (EPS) - interno	0.24
Poliuretano espanso - esterno	0.24
Polistirene espanso (EPS) - esterno	0.23
Aerogel - interno	0.13
Aerogel - esterno	0.13
Pannelli isolanti sottovuoto (VIP) - interno	0.00
Pannelli isolanti sottovuoto (VIP) - esterno	0.00

Conclusioni

- Sono state studiate n°20 diverse configurazioni di retrofit:
 - 10 materiali termoisolanti con caratteristiche diverse
 - 2 modalità di installazione: interna o esterna.
- N°3 KPI sono considerati con un approccio decisionale multicriterio (MCDM):
 - Consumo annuo di energia primaria (PE)
 - Riduzione del potenziale di riscaldamento globale (GWP)
 - Discounted Payback Period (DPB)
- In inverno si ottiene una riduzione media del 30% del fabbisogno di energia termica, mentre in estate si osserva uno scarso beneficio dell'isolamento termico (riduzione dell'energia termica del 2%).
- Si osserva una bassa variabilità del risparmio annuale di energia primaria (5% – 9%) tra gli scenari di retrofit simulati, principalmente a causa del fatto che la trasmittanza termica della parete ottenuta è uguale.
- Si osservano differenze significative per riduzione GWP (12% – 20%) e tempo di ritorno attualizzato (20 – >100 anni) tra le diverse soluzioni.

Riferimenti

- [1]. President of the Italian Republic, D.P.R. 26 agosto 1993 n.412. Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia (in Italian), Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, 1993.
- [2]. Italian Ministry of Economic Development, Decreto Interministeriale del 26 giugno 2015. Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici (in Italian), Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, 2015.
- [3]. ANSI/ASHRAE, ASHRAE Guideline 14-2002 Measurement of Energy and Demand Savings, ASHRAE. 8400 (2002) 170.
- [4]. G. Grazieschi, F. Asdrubali, G. Thomas, Embodied energy and carbon of building insulating materials: A critical review, Cleaner Environmental Systems 2 (2021) 100032.
- [5]. S. Schiavoni, F. D'Alessandro, F. Bianchi, F. Asdrubali, Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis, Renew. Sust. Energy Rev. 62 (2016) 988–1011.
- [6]. N. Pargana, M. Duarte, J. Dinis, J. De Brito, Comparative environmental life cycle assessment of thermal insulation materials of buildings, Energy and Buildings 82 (2014) 466–481.
- [7]. S. Resalati, T. Okoroafor, P. Henshall, N. Simoes, M. Gonçalves, M. Alam, Comparative life cycle assessment of different vacuum insulation panel core materials using a cradle to gate approach, Building and Environment 188 (2021).
- [8]. C. Carbonaro, S. Tedesco, F. Thiebat, S. Fantucci, V. Serra, M. Dutto, An integrated de-sign approach to the development of a vegetal-based thermal plaster for the energy ret-rofit of buildings, Energy and Buildings 124 (2016) 46–59.

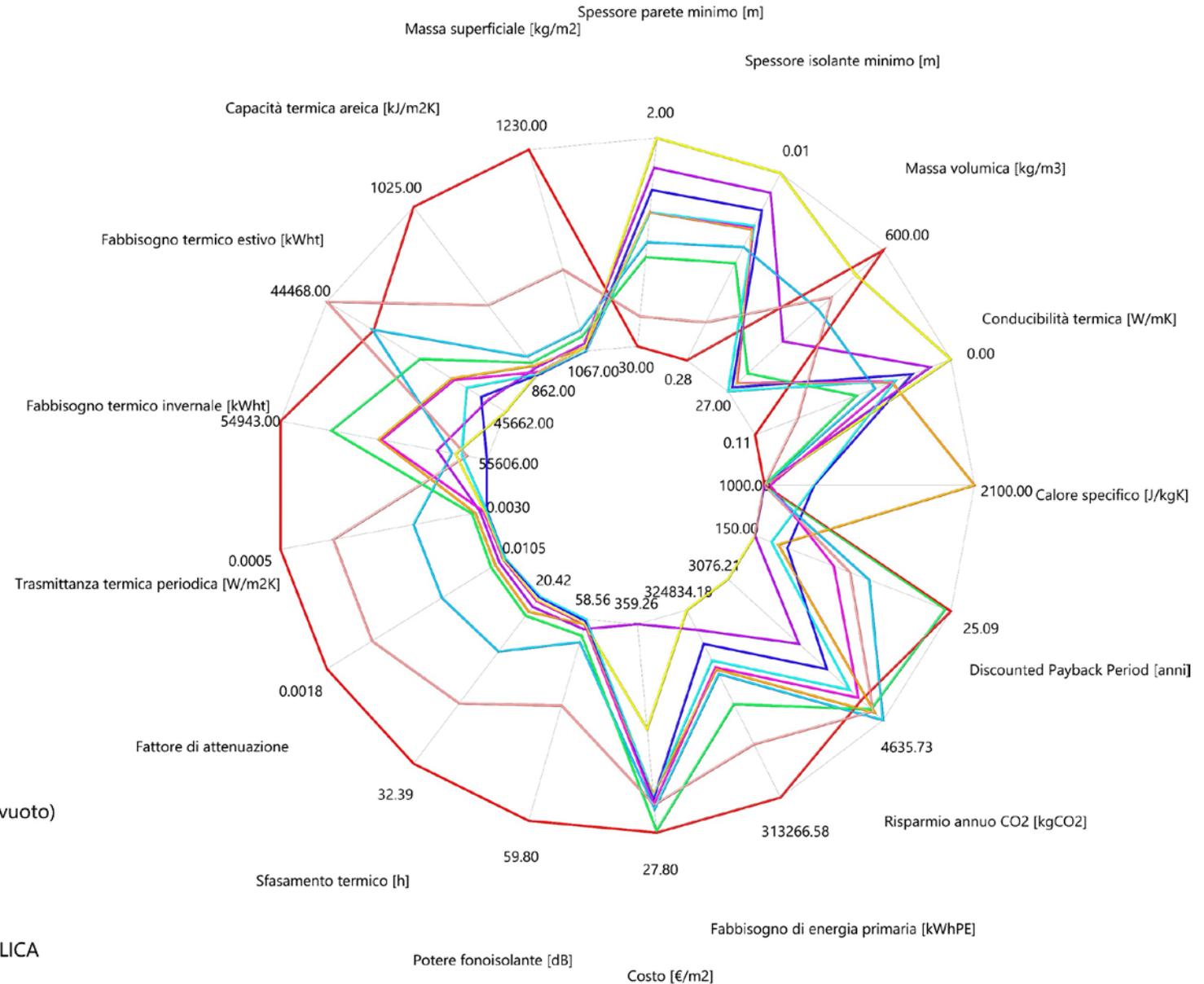
Sono stati considerati solo **3 criteri**:

- Consumo annuo di energia primaria (PE)
- Riduzione del potenziale di riscaldamento globale (GWP)
- Discounted Payback Period (DPB)

MA...

Considerando altri criteri i risultati possono cambiare drasticamente!!!

— POLIURETANO ESPANSO	— FIBRA DI LEGNO
— POLISTIRENE ESPANSO SINTERIZZATO	— VIP (pannello sottovuoto)
— PERLITE ESPANSA	— AEROGEL
— ARGILLA ESPANSA	— CON SUGHERO
— LANA DI ROCCIA	— CON CALCE IDRAULICA



CONTATTI

Ing. Federico Minelli

Email: federico.minelli@unina.it

Tel: +39 345 8205536

Scuola Politecnica e
delle Scienze di Base



Università degli Studi di Napoli Federico II



DIPARTIMENTO DI
INGEGNERIA
INDUSTRIALE

Grazie per l'attenzione