



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia
e lo sviluppo economico sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Sviluppo di una metodologia per l'individuazione dei requisiti di
prestazione energetica ottimali in funzione dei costi

Paolo Zangheri, Lorenzo Pagliano



end-use Efficiency Research Group
Gruppo di ricerca sull'efficienza negli usi finali dell'energia



SVILUPPO DI UNA METODOLOGIA PER L'INDIVIDUAZIONE DEI REQUISITI DI PRESTAZIONE ENERGETICA
OTTIMALI IN FUNZIONE DEI COSTI

Paolo Zangheri, Lorenzo Pagliano (Dipartimento di Energia - Politecnico di Milano)

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia

Progetto: Studi e valutazioni sull'uso razionale dell'energia: Tecnologie per il risparmio elettrico nel settore civile

Responsabile del Progetto: Gaetano Fasano, ENEA

Indice

Sommario	4
Introduzione	5
Descrizione delle attività svolte e risultati	6
<i>Metodologia proposta dalla Direttiva Europea 2010/31/CE</i>	6
<i>Annotazioni per lo sviluppo di una metodologia di calcolo per il contesto Italiano</i>	9
<i>Esempio di applicazione della metodologia</i>	12
Edificio di riferimento	12
Varianti di involucro edilizio	13
Varianti impiantistiche	15
Risultati	16
Conclusioni	19
Riferimenti bibliografici	20
Appendice – Curriculum scientifico del gruppo di lavoro	21

Sommario

Il presente studio è finalizzato allo sviluppo e test di una metodologia di calcolo, applicabile nel contesto Italiano, per la caratterizzazione del "livello ottimale in funzione dei costi" ovvero il livello di prestazione energetica (fabbisogno per riscaldamento, raffrescamento e ventilazione, acqua calda sanitaria e illuminazione) che comporta il costo più basso durante il ciclo di vita economico stimato degli edifici. Lo studio si inserisce nel quadro delineato dalle recente Direttiva Europea 2010/31/UE [1] (altrimenti conosciuta come "EPBD Recast") che, a partire dall'analisi dell'attuale problema energetico (correlato a fattori ambientali, sociali, economici e politici), giunge all'introduzione del concetto di "Edifici ad energia quasi zero".

A partire dall'analisi critica dell'approccio di calcolo delineato dalla Commissione Europea, si presenta una procedura di calcolo applicabile al contesto italiano e un esempio di applicazione della stessa per un edificio di riferimento adibito ad uffici in contesto milanese.

Come esempio di utilizzo, la curva energia-costi ricavata è stata utilizzata per caratterizzare dal punto di vista tecnologico l'area dell'ottimo economico e ricavare indicazioni generali di carattere progettuale.

Introduzione

L'obiettivo del presente studio è quello di impostare e testare una metodologia di calcolo *cost-optimal*, tramite la quale sia possibile associare un valore di fabbisogno energetico e di costo globale a varianti tecnologiche di edificio, che possa risultare utile al fine di:

- ricavare curve che evidenzino il rapporto tra consumo energetico e prestazione economica di una serie di combinazioni tecnologiche;
- sviluppare analisi di sensitività sui principali parametri di calcolo (ad esempio: tasso d'interesse, prezzi dell'energia, periodo di calcolo);
- individuare target prestazionali ottimali dal punto di vista dei costi;
- produrre statistiche sulle tecnologie edilizie che caratterizzano le combinazioni ottimali;
- confrontare i fabbisogni energetici associati all'ottimizzazione dei costi con quelli corrispondenti ai limiti forniti dalla normativa vigente e in via di definizione (con particolare riferimento all'obiettivo "a energia quasi zero");
- effettuare analisi sull'implementazione di sistemi in grado di sfruttare fonti energetiche rinnovabili in termini di convenienza economica e di valenza per il raggiungimento di edifici a energia quasi zero;
- valutare l'implementazione di politiche d'incentivo all'adozione di particolari tecnologie o al raggiungimento di obiettivi energetici limite.

Descrizione delle attività svolte e risultati

Metodologia proposta dalla Direttiva Europea 2010/31/CE

Lo schema metodologico generale che un'analisi *cost-optimal* deve seguire viene fornito dalla rifusione della EPBD [1] e dal successivo Regolamento Delegato (UE) N. 244/2012 [2], completato dalle relative linee guida di accompagnamento. Esso è composto dai seguenti passi metodologici:

- definizione di edifici di riferimento;
- definizione di misure/pacchetti/varianti di efficienza energetica;
- valutazione del fabbisogno energetico finale e primario delle varianti di edificio;
- valutazione dei costi delle misure/pacchetti/varianti tecnologiche;
- generazione di una curva fabbisogno - costo.

Per soddisfare il primo punto, ogni Stato Membro deve selezionare un numero di edifici di riferimento tale da rappresentare nel modo più ampio possibile il parco edilizio nazionale. Gli edifici possono essere differenziati per età, destinazione d'uso, dimensioni, condizioni climatiche esterne, condizioni climatiche interne, tradizioni costruttive nazionali o locali (geometria, materiali, ecc), posizione (esposizione, orientamento), comportamento degli occupanti.

I pacchetti/varianti di misure sono definiti da combinazioni di scelte tecnologiche finalizzate all'efficienza energetica dell'edificio. Tali tecnologie riguardano i seguenti gruppi:

- involucro edilizio;
- riscaldamento;
- acqua calda sanitaria;
- sistemi di ventilazione;
- raffreddamento;
- illuminazione;
- automazione e controllo dell'edificio.

I pacchetti di misure devono essere definiti riferendosi alla prestazione energetica tipica dello stock esistente e ai requisiti minimi di efficienza in vigore, fino a raggiungere livelli di performance vicini ad includere edifici a energia quasi zero.

L'obiettivo è quello di ricavare il fabbisogno di energia primaria per ogni pacchetto tecnologico, attraverso metodologie di calcolo in conformità con le pertinenti norme nazionali o europee, (come per esempio le UNI TS 11300-1-2-3 [3] [4] [5]) In ogni caso, sarà dapprima necessario il calcolo del consumo energetico netto dell'edificio (Energia Utile), per poi passare al calcolo dell'energia totale fornita all'edificio (Energia Finale) e, eventualmente considerando l'energia generata dall'edificio stesso (per esempio nel caso si utilizzino sistemi fotovoltaici o di cogenerazione), alla valutazione dell'utilizzo totale di Energia Primaria¹.

Come metodo per una valutazione economica (che deve essere condotta sia adottando una prospettiva macro-economica che finanziaria), la rifusione della EPBD suggerisce l'utilizzo del valore attuale netto o NPV (*Net Present Value*). Il valore attuale netto è un metodo standard per la valutazione finanziaria dei progetti a lungo termine e può essere ricavato utilizzando il metodo di calcolo dei costi globali descritto nella norma EN 15459 [6]. Questo documento definisce il costo globale di una misura di efficienza energetica come una funzione di vari fattori:

- costi di investimento iniziali;
- costi periodici o annuali;
- valori finali.

La quantificazione dei costi di investimento iniziali (risultando possibile omettere sia i costi che rimangono uguali in tutte le misure in considerazione che quelli relativi agli elementi edilizi che non hanno alcuna influenza sulla prestazione energetica di un edificio²) deve comprendere:

¹ Energia Primaria: energia da fonti rinnovabili e non rinnovabili, che non ha subito alcun processo di conversione o trasformazione (UNI EN 15603).

² In accordo con il Regolamento Delegato (UE) N. 244/2012 [2].

- i costi delle misure d'efficienza dell'involucro edilizio: misure per ridurre la trasmittanza termica degli elementi costruttivi, misure relative alla tenuta all'aria dell'involucro;
- i costi dei sistemi di approvvigionamento energetico per riscaldamento e acqua calda sanitaria: sistemi di approvvigionamento fossile o rinnovabile, compreso lo stoccaggio e la distribuzione;
- i costi degli eventuali impianti di ventilazione e condizionamento: sistemi di ventilazione con o senza recupero di calore, sistemi di raffrescamento attivi;
- il costo degli impianti di illuminazione;
- altri investimenti connessi all'energia, come dispositivi esterni di ombreggiamento, automazione di componenti e sistemi edilizi/impiantistici;
- costi di installazione di sistemi e componenti.

I costi annuali includono i costi per l'approvvigionamento energetico, il quale copre la domanda di riscaldamento e raffreddamento, ventilazione, acqua calda sanitaria ed illuminazione, compresa l'energia ausiliaria. Essi comprendono anche costi operativi, costi di manutenzione e costi per la sostituzione periodica. I guadagni derivanti da energia prodotta possono essere sottratti dai costi per l'approvvigionamento energetico. Il corso della vita (vita utile di servizio) degli elementi che compongono i pacchetti dovrebbe essere impostato in base alle informazioni contenute nelle norme europee (ad esempio, nella stessa EN 15459 [6]). La scelta dei tassi di interesse è un contributo importante per questo calcolo. I tassi assunti potrebbero essere diversi a seconda della prospettiva (privata o sociale). Il calcolo potrebbe essere effettuato con tassi variabili, per poter verificare i risultati anche in caso di andamenti finanziari non previsti.

Il valore finale di un componente rappresenta il suo residuo valore di mercato alla fine del periodo di calcolo. Infatti il tempo di calcolo scelto potrebbe essere più breve o più lungo rispetto alla durata dei singoli componenti o sistemi.

Le metodologie di calcolo del fabbisogno di energia primaria e dei costi globali vengono riassunte graficamente nelle seguenti figure.

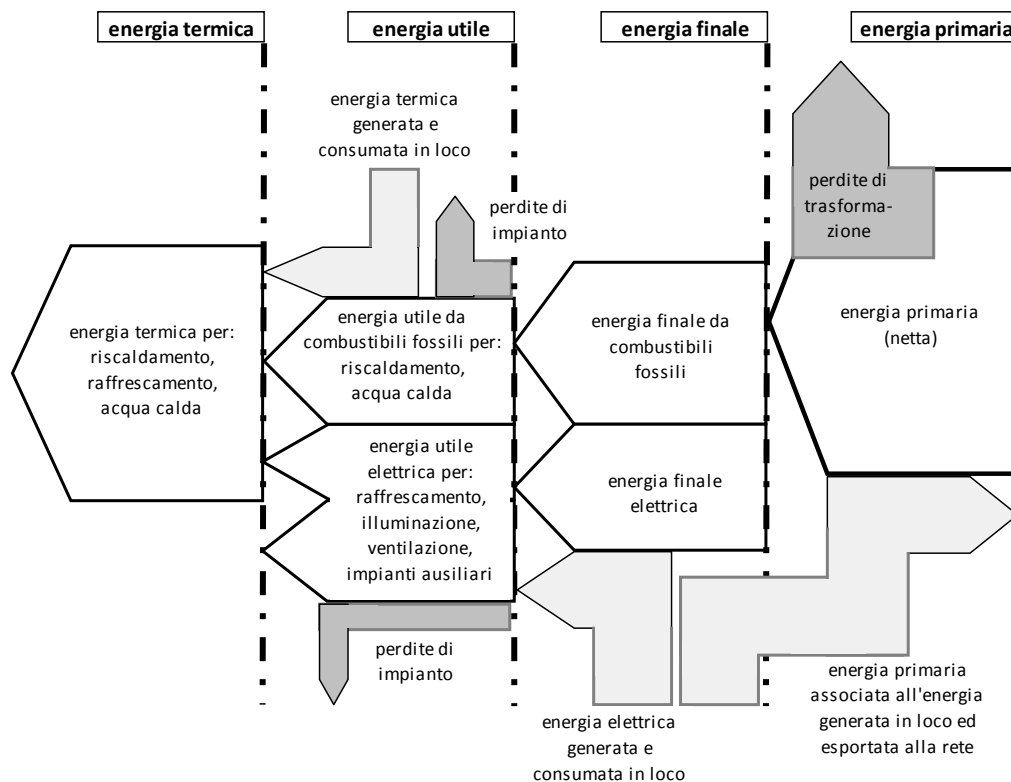


Figura 1 – Schema di calcolo del fabbisogno di energia primaria.

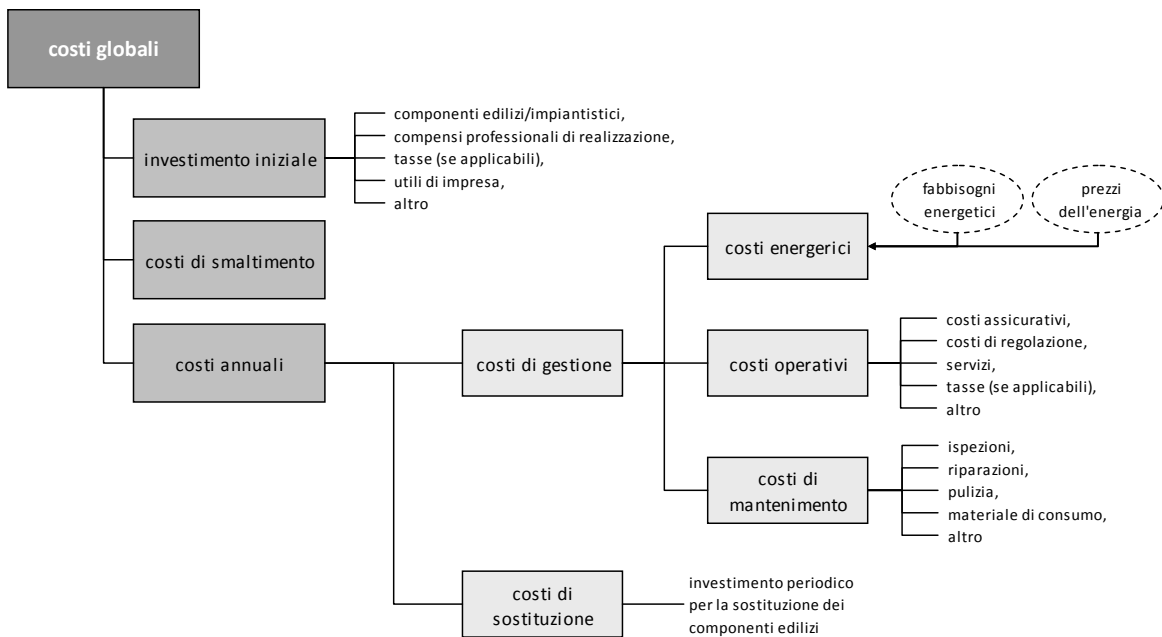


Figura 2 – Schema di calcolo dei costi globali.

Annotazioni per lo sviluppo di una metodologia di calcolo per il contesto Italiano

Come più volte sottolineato dai documenti di indirizzo della Commissione Europea, nell'adozione del quadro metodologico comune, la metodologia di calcolo e di analisi *cost-optimal* può e deve essere adattata dai diversi Stati Membri ai rispettivi contesti nazionali. Volendo supportare l'adattamento al contesto italiano, di seguito si riassumono e commentano i principali requisiti di carattere generale (Tabella 1).

Tabella 1 – Sintesi e commento dei principali requisiti di calcolo richiesti dalla procedura *cost-optimal* Europea.

Ambito	Requisito	Commento
Generale	Sono da considerare le seguenti destinazioni d'uso: i) abitazioni monofamiliare, ii) condomini di appartamenti e multifamiliari, iii) edifici adibiti a uffici, iv) altri edifici non residenziali (scolastici, ospedalieri, alberghieri, sportivi, commerciali) per i quali esistono specifici requisiti di prestazione energetica.	In riferimento al parco esistente italiano si considera rilevante focalizzare l'analisi primariamente sugli edifici realizzati negli anni '50 – '70, mentre per quanto concerne le condizioni climatiche risulta difficile individuarne un'unica, media dei diversi contesti nazionali: l'analisi andrebbe sviluppata per almeno 3 <i>dataset</i> climatici.
	Per ciascuna categoria di edifici è necessario definire almeno un edificio di riferimento per gli edifici di nuova costruzione e almeno due per gli edifici esistenti sottoposti a ristrutturazione completa. Gli edifici di riferimento devono essere tipici in termini di geometria e sistemi, prestazione energetica dell'involucro e dei sistemi, funzionalità e delle condizioni climatiche e dell'ubicazione geografica.	
	Nella selezione delle misure di efficienza energetica per gli edifici nuovi ed esistenti vanno considerati tutti i parametri impiegati per il calcolo che hanno un impatto diretto o indiretto sulla prestazione energetica dell'edificio, ma misure/pacchetti/varianti decisamente poco ottimali in funzione dei costi possono essere esclusi dal calcolo.	Essendo generalmente delicato escludere a priori delle tecnologie d'involucro e impiantistiche, si ritiene che sia metodologicamente più affidabile considerare il più alto numero di varianti edilizie, eventualmente a discapito del massimo dettaglio di calcolo.
Calcolo del fabbisogno di energia primaria delle varianti edilizie	Le varianti edilizie devono essere compatibili con i livelli di qualità dell'aria e di comfort dell'ambiente interno di cui alla norma CEN 15251 o norme nazionali equivalenti.	Ciò comporta un adeguamento dei tassi di rinnovo d'aria (naturale o meccanica) al cambiare delle caratteristiche di permeabilità all'aria dell'involucro edilizio.
	Per il calcolo della prestazione energetica è possibile adottare le pertinenti norme CEN esistenti o un metodo di calcolo nazionale equivalente.	In contesto italiano, considerata l'importanza del fabbisogno di raffrescamento, si ritengono maggiormente affidabili gli approcci di calcolo dinamico.
	Per la valutazione della prestazione energetica di misure/pacchetti/varianti è necessario calcolare prima l'energia necessaria per il riscaldamento e il raffrescamento (energia termica utile) e, successivamente, l'energia fornita ai sistemi di riscaldamento, raffrescamento, ventilazione, acqua calda sanitaria e illuminazione degli spazi (energia finale per ogni vettore energetico). Il consumo risultante di energia primaria deve essere calcolato impiegando fattori di conversione di energia definiti a livello nazionale e deducendo completamente l'energia primaria associata all'energia prodotta in loco.	In accordo con tale requisito risulta possibile suddividere il calcolo in tre passi successivi: i) calcolo dell'energia termica utile, richiesta dall'involucro edilizio, attraverso simulazione dinamica; ii) calcolo dell'energia finale descrivendo gli impianti termici attraverso opportuni coefficienti di prestazione e calcolando in modo semplificato i fabbisogni di energia ausiliaria; iii) calcolo dell'energia primaria

		impiegando opportuni fattori di conversione. Si ritiene che tale successione permetta di considerare un elevato numero di varianti edificio-impianto e quindi di riconoscere con una buona approssimazione la curva <i>cost-optimal</i> .
Calcolo dei costi globali delle varianti edilizie	I costi globali delle varianti edilizie devono essere calcolati sulla base di una prospettiva macroeconomica (che considera i costi e i benefici per tutta la società degli investimenti in efficienza energetica) e di una prospettiva prettamente finanziaria (che considera solamente l'investimento stesso). Nel primo caso deve essere considerata anche il costo delle emissioni di gas a effetto serra.	Le due prospettive vengono distinte considerando o non alcune categorie di costo (tasse, costo delle emissioni, incentivi) e associando diversi valori ad alcuni parametri di calcolo (tasso di interesse reale).
	Il periodo di calcolo è fissato a 30 anni per gli edifici residenziali e pubblici e a 20 anni per gli edifici commerciali non residenziali.	Nonostante tale requisito, risulta sensato sviluppare analisi di sensitività su tale parametro di calcolo.
	Nella definizione dei cicli di vita economici degli elementi edilizi si individua come riferimento la norma EN 15459.	Tale norma non considera però alcune tecnologie d'involucro e d'impianto.
	La procedura richiede di considerare la proiezione delle tariffe energetiche (di cui si forniscono dei riferimenti) e, facoltativamente, dei costi dei componenti edilizi sostituiti durante il periodo di calcolo.	Comunque venga valutata la proiezione dei costi edilizi, si suggerisce di sviluppare una specifica analisi di sensitività, per valutare l'effetto di tale parametro sul risultato finale.

Nell'ambito dell'approccio di stima dei fabbisogni di energia primaria a tre passi proposto in Tabella 1, si ritiene sensato considerare dalle 15 alle 30 varianti di involucro (per cui calcolare in maniera dettagliata i fabbisogni di energia termica per riscaldamento e raffrescamento) a cui associare 1 000 - 2 000 varianti di impianto (per cui calcolare i fabbisogni di energia finale in maniera semplificata), per ottenere un totale di 15 000 - 50 000 varianti di edificio-impianto (caratterizzate dai relativi fabbisogni di energia primaria e costi globali). In tale maniera sarà possibile considerare la maggior parte delle soluzioni tecnologiche normalmente adottate e riconoscere con buona approssimazione, nel grafico fabbisogni-costi, la curva di ottimo economico, come fronte inferiore della "nuvola" di punti generati.

Al fine di limitare le simulazioni dinamiche di varianti di involucro edilizio risulta necessario ragionare su pacchetti tecnologici piuttosto che su singole misure. Al fine di considerare i parametri fisici che più influenzano i fabbisogni energetici si individuano i seguenti pacchetti tecnologici:

- Pacchetto 1 – Parametri fisici associati alle superfici opache dell'involucro edilizio (pareti esterne, copertura e solaio su terreno), descritte primariamente dalla loro trasmittanza (o livello di isolamento).
- Pacchetto 2 – Parametri fisici associati alle superfici trasparenti dell'involucro edilizio. Questa famiglia comprende la trasmittanza termica dei serramenti (vetro + telaio) e la permeabilità all'aria degli infissi.
- Pacchetto 3 – Parametri fisici associati al controllo dei carichi termici estivi: fattore solare delle superfici trasparenti, riflettanza dell'involucro, massa termica efficace e livello di ventilazione naturale notturna durante il periodo estivo.

Considerando tre variazioni per ogni misura si otterranno 27 modelli di involucro per cui quantificare i fabbisogni di energia termica (utile) di riscaldamento e raffrescamento.

Per quanto concerne le varianti di impianto, è possibile riferirsi alla seguente suddivisione in sottosistemi impiantistici:

- Impianto di riscaldamento:
 - Sottosistema di generazione;
 - Sottosistema di distribuzione;
 - Sottosistema di emissione;
 - Sottosistema di regolazione.
- Impianto di raffrescamento:
 - Sottosistema di generazione;
 - Sottosistema di distribuzione;
 - Sottosistema di emissione;
 - Sottosistema di regolazione.

Oltre a questi, il sistema impiantistico viene completato con i seguenti elementi:

- Impianto di ventilazione meccanica;
- Recupero del calore;
- Impianti solari installati presso l'edificio.

Esempio di applicazione della metodologia

Edificio di riferimento

Come test della metodologia delineata precedentemente ci si è riferiti al contesto milanese e a una tipologia edilizia destinata ad uffici, già considerata in un precedente rapporto ENEA [7].

L'edificio di medie dimensioni si sviluppa verticalmente in 4 piani fuori terra, che terminano in una copertura a doppia falda, con colmo sfalsato da un elemento verticale. Le facciate si presentano lineari e regolari, e sono scandite da una distribuzione uniforme delle superfici finestrate. Vengono qui riportate le planimetrie principali e le viste prospettiche, con una sintesi dei dati dimensionali principali.

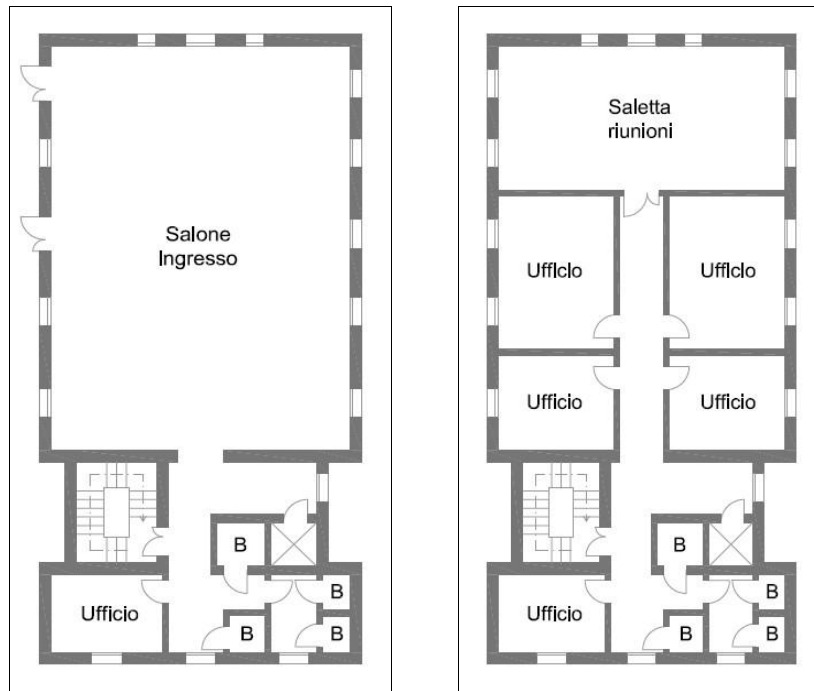


Figura 3 – Pianta del piano terra e dei piani superiori

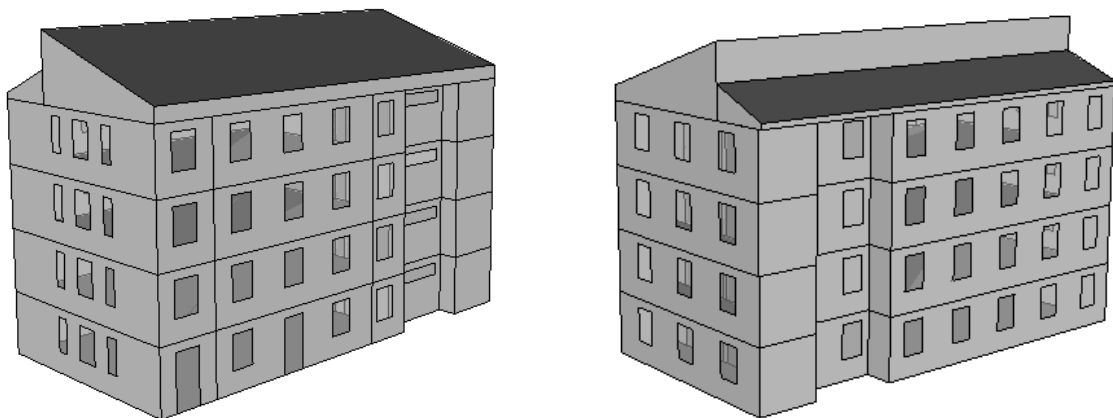


Figura 4 - Viste prospettiche dell'edificio.

Tabella 2 – Principali caratteristiche geometriche dell'edificio.

Destinazione d'uso	Ufficio
Numero piani fuori terra	4
Esposizione principale	Est / Ovest
Dimensioni globali	21.8 x 10.7 x 12.0 (h) m
Percentuale superficie vetrata	15 %
Superficie disperdente totale	1247 m ²
Superficie utile	924 m ²
Volume climatizzato	2772 m ³
Rapporto S/V	0.45

Nella definizione dei regimi di occupazione degli ambienti interni si sono considerati un livello di 12,0 m²/persona negli uffici e di 3,5 m²/persona nelle sale riunione, mentre nelle zone di comunicazione (scale e corridoi) e dei locali di servizio non si è considerata una presenza fissa di persone.

Per determinare gli apporti termici dovuti all'uso dell'impianto di illuminazione si sono considerati i valori massimi di potenza elettrica installata di 10 W/m² negli uffici/sale riunioni e di 7 W/m² nelle zone di circolazione e si è considerato che la potenza per l'illuminazione, effettivamente utilizzata dagli occupanti degli edifici, variasse in funzione del livello di illuminazione naturale negli ambienti interni.

Per gli apporti termici dovuti all'uso delle apparecchiature elettriche (computer, stampanti, macchinari fotocopiatrici, etc.) si è considerato un installato di 7 W/m² nelle zone ufficio e tipici regimi di utilizzo.

Varianti di involucro edilizio

In riferimento ai pacchetti tecnologici presentati in precedenza si sono considerate tre livelli di variazione dei principali parametri termo-fisici, che vengono riportati nella tabella seguente.

Tabella 2 – Variazione dei parametri termo-fisici dell'involucro edilizio.

PACCHETTO	MISURA		VARIAZIONI			
	CODICE	DESCRIZIONE	COD	NOTE	VALORI	U.M.
1	1	Isolamento termico sup. opache	1	Pareti esterne	0.80	W/m ² K
				Copertura	1.40	W/m ² K
				Solaio su terreno	2.00	W/m ² K
			2	Pareti esterne	0.34	W/m ² K
				Copertura	0.30	W/m ² K
				Solaio su terreno	0.33	W/m ² K
			3	Pareti esterne	0.20	W/m ² K
				Copertura	0.20	W/m ² K
				Solaio su terreno	0.20	W/m ² K
2	2	Isolamento termico sup. trasparenti	1	Finestre	3.00	W/m ² K
			2	Finestre	2.20	W/m ² K
			3	Finestre	1.09	W/m ² K
	3	Permeabilità dell'involucro	1	n ₅₀	2.50	1/h
			2	n ₅₀	1.00	1/h
			3	n ₅₀	0.60	1/h
3	4	Controllo solare (manuale)	1	SF	0.60	-
			2	SF	0.30	-
			3	SF	0.10	-
	5	Riflettanza involucro	1	-	0.10	-
			2	-	0.50	-
			3	-	0.70	-
	6	Massa termica	1	Capacità termica	52.36	Wh/m ² K
			2	Capacità termica	58.59	Wh/m ² K
			3	Capacità termica	63.24	Wh/m ² K
	7	Ventilazione naturale	1	-	0.00	1/h
			2	-	1.75	1/h
			3	-	6.00	1/h

Combinando le variazioni sono state generate le 27 varianti d’involucro (Tabella 3), contraddistinti da una serie di tre numeri, rappresentativi del livello di variazione delle famiglie di parametri sopra definite.

Tabella 3 – Varianti di involucro considerate.

MODELLO	PACCHETTO 1	PACCHETTO 2	PACCHETTO 3
0	1	1	1
1	1	1	2
2	1	1	3
3	1	2	1
4	1	2	2
5	1	2	3
6	1	3	1
7	1	3	2
8	1	3	3
9	2	1	1
10	2	1	2
11	2	1	3
12	2	2	1
13	2	2	2
14	2	2	3
15	2	3	1
16	2	3	2
17	2	3	3
18	3	1	1
19	3	1	2
20	3	1	3
21	3	2	1
22	3	2	2
23	3	2	3
24	3	3	1
25	3	3	2
26	3	3	3

Le simulazioni degli involucri e le quantificazioni economiche sono state condotte traducendo le specifiche variazioni dei parametri termo-fisici considerati in misure tecnologiche in grado di soddisfarle. In particolare:

- Pacchetto 1 – le stratigrafia delle componenti edilizie opache sono state fissate ed è stato variato lo spessore dello strato isolante per raggiungere i livelli obiettivo di trasmittanza;
- Pacchetto 2 – si sono selezionati opportuni infissi (vetrocamera + telaio) in grado di recepire i relativi requisiti di trasmittanza e di permeabilità all’aria (riferendosi alle classe di permeabilità all’aria dei serramenti da UNI 12207 [8]).
- Pacchetto 3 – i requisiti di fattore solare sono stati raggiunti selezionando differenti misure di controllo solare (tende interne e differenti frangisole esterni) opportunamente accoppiate agli infissi precedentemente definiti; la riflettenza dell’involucro è stata variata modificando l’albedo delle superfici esterne; per le variazioni della massa termica efficace interna sono stati convenientemente modificati i materiali di finimento interno (spessore dell’intonaco delle pareti interne, pavimenti e controsoffittature sulle solette interne); l’aumento dei ricambi d’aria notturni durante il periodo di raffrescamento è stato tradotto nell’implementazione di logiche di ventilazione trasversale attraverso l’apertura degli infissi esterni (finestre) ed interni (porte).

Per la quantificazione dei costi di investimento relativi alle diverse tecnologie d'involucro considerate ci si è riferiti al prezzario 2011 per opere pubbliche del Comune di Milano [9].

Varianti impiantistiche

In riferimento all'impostazione discussa in precedenza, sono state selezionate diverse varianti per ciascun sotto-sistema impiantistico a cui sono stati associati opportuni coefficienti di prestazione riferendosi agli standard UNI TS 11300-1-2-3 [3] [4] [5], utili per il calcolo dei fabbisogni di energia finale.

Scartando le combinazioni impiantistiche impraticabili e raramente adottate sono state ricavate circa 1 500 varianti impiantistiche, che, una volta accoppiate alle 27 varianti di involucro, hanno generato circa 40 000 varianti di sistema edificio-impianto.

Tabella 4 – Varianti considerate per gli impianti di riscaldamento e raffrescamento.

IMPIANTO	SOTTO-IMPIANTO	DESCRIZIONE DELLA VARIANTE	COEFFICIENTE DI PRESTAZIONE			
			$\eta_{\text{Riscaldamento}}$			$\eta_{\text{Raffrescamento}}$
			η_{h1}	η_{h2}	η_{h3}	η_{c1}
RISCALDAMENTO	Generazione	Caldaia standard	80%	80%	80%	
		Caldaia a condensazione	104%	95%	-	
		Pompa di calore di media efficienza	250%	150%	-	200%
		Pompa di calore di alta efficienza	350%	225%	-	300%
		Pompa di calore geotermica	500%	325%	-	450%
	Emissione	Pavimento radiante non isolato	98%	96%	94%	
		Pavimento radiante isolato	99%	98%	97%	
		Radiatore	95%	94%	92%	
		Ventilconvettore	96%	95%	94%	
		Diffusori d'aria	96%	95%	94%	
	Distribuzione	Interna non isolata	98%	96%	95%	
		Interna poco isolata	99%	97%	96%	
		Interna isolata	99%	98%	97%	
	Controllo	Climatico	86%	84%	80%	
		Termostatico	97%	95%	91%	
Climatico + termostatico		98%	97%	95%		
RAFFRESCAMENTO	Generazione	Chiller di media efficienza				200%
		Chiller di alta efficienza				300%
		Pompa di calore di media efficienza	250%	150%	-	200%
		Pompa di calore di alta efficienza	350%	225%	-	300%
		Pompa di calore geotermica	500%	325%	-	450%
	Emissione	Pavimento radiante non isolato				97%
		Pavimento radiante isolato				97%
		Soffitto radiante isolato				98%
		Ventilconvettore				98%
		Diffusori d'aria				97%
	Distribuzione	Interna isolata				99%
	Controllo	Climatico				90%
		Termostatico				98%
Climatico + termostatico					99%	
RECUPERO DEL CALORE	Assente	0%				
	Media efficienza	60%				
	Alta efficienza	80%				

Per quanto concerne gli impianti ad energia rinnovabile ci si è concentrati su quelli fotovoltaici, considerando l'installazione di moduli di pannelli in silicio cristallino moderatamente ventilati (con un

fattore di potenza di picco pari a $0,15 \text{ kW/m}^2$). Tre differenti dimensioni dell'impianto captante (50 m^2 , 150 m^2 and 230 m^2) sono state implementate, generando più di 120 000 varianti complessive.

Per ottenere il fabbisogno complessivo in termini di energia primaria e i costi globali delle varianti di edificio si sono resi necessari alcuni dimensionamenti di massima e calcoli secondari. In particolare:

- Potenza dei generatori: la potenza di riscaldamento/raffreddamento dei generatori è stata ottenuta per ciascuna variante d'involucro dai risultati delle simulazioni dinamiche (fabbisogno energetico) ed eseguendo un calcolo in regime stazionario durante le condizioni critiche.
- Ventilazione: coerentemente con il ricambio aria calcolato utilizzando la norma EN 15251:2007 [10] e impostato nelle simulazioni dinamiche ($1,14 \text{ h}^{-1}$), l'energia ausiliaria necessaria per la ventilazione è stata calcolata per tutte le varianti d'edificio attraverso un dimensionamento semplificato.
- Sistemi ausiliari: l'energia consumata dalle pompe di circolazione è stata calcolata per ogni variante edificio-impianto in accordo con la norma UNI TS 11300-2:2008 [4].
- Illuminazione: l'energia consumata dagli impianti di illuminazione è stata ottenuta direttamente dalla simulazione dinamica.
- Per quanto concerne la domanda di energia per l'acqua calda, tenendo conto della destinazione dell'edifici di riferimento (uffici), questo requisito non è stato preso in considerazione, in accordo con la norma EN 15316-3-1:2007 [11].

Per la quantificazione dei costi di investimento relativi alle diverse tecnologie impiantistiche considerate ci si è riferiti al prezzario 2011 per opere pubbliche del Comune di Milano [9].

Risultati

La campagna di simulazione delle varianti di involucro edilizio è stata condotta in ambiente EnergyPlus (versione 5.0), ottenendo i fabbisogni di energia termica per riscaldamento e raffreddamento mostrati in figura 5.

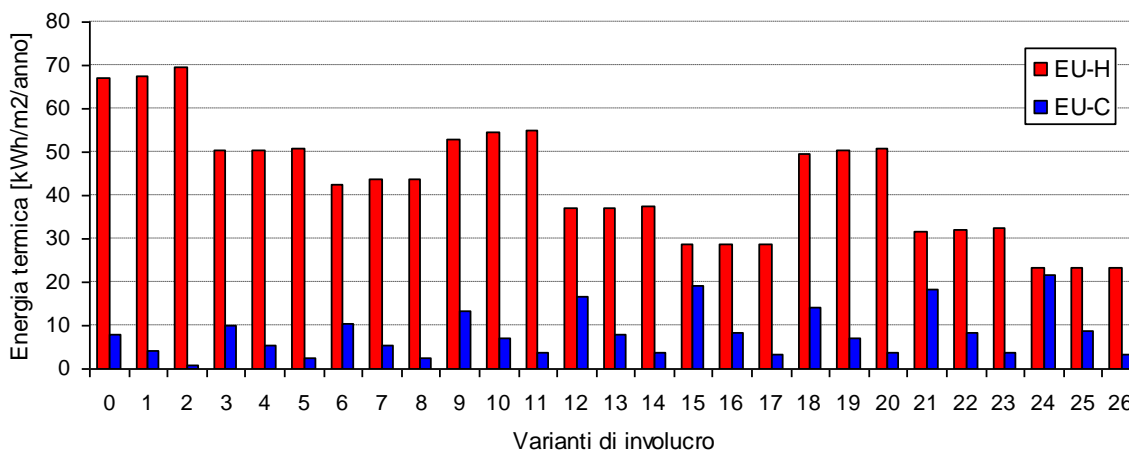


Figura 5 – Fabbisogni di energia termica di riscaldamento (EU_H) e raffreddamento (EU_C) risultanti dalla campagna di simulazione delle varianti di involucro edilizio.

Come sottolineato in precedenza si è cercato di considerare un numero molto elevato di variazioni edificio per permettere un affidabile riconoscimento del fronte inferiore della regione di livelli ottimali indagata. In generale, le frontiere inferiori delle "nuvole di punti" ottenute hanno una pendenza non molto pronunciata, ma riconoscibile e un asintoto verticale, che limita l'effetto delle tecnologie di efficienza energetica considerate. Ciò è dovuto al fatto che, per questo esercizio, non sono state considerate variazioni tecnologica in grado di ridurre l'energia consumata per i sistemi di illuminazione, ventilazione e ausiliari (circa $70 \text{ kWh/m}^2/\text{anno}$).

Di seguito si riportano i risultati ottenuti considerando le prospettive finanziaria (Figura 6) e macroeconomica (Figura 7), caratterizzate dai principali parametri di calcolo riportati in tabella 5.

Tabella 5 – Principali parametri di calcolo nel caso di prospettiva finanziaria e macroeconomica.

	PROSPETTIVA FINANZIARIA	PROSPETTIVA MACROECONOMICA
Periodo di calcolo	30 anni	
Fattore di conversione energia Primaria/Finale - elettricità	2,17	
Fattore di conversione energia Primaria/Finale – gas naturale	1	
Prezzo dell'elettricità (tasse escluse)	0,15 €/kWh _{el}	
Prezzo del gas naturale (tasse escluse)	0,07 €/kWh _{th}	
Aumento annuale dei prezzi energetici	2%	
Costo base di costruzione	1250 €/m ²	
Tasso reale di interesse	4%	2%
Incentivi economici	esclusi	
Tasse (IVA)	incluse	escluse
Costo di evitato danno ambientale	escluso	incluso (20 €/tCO ₂)

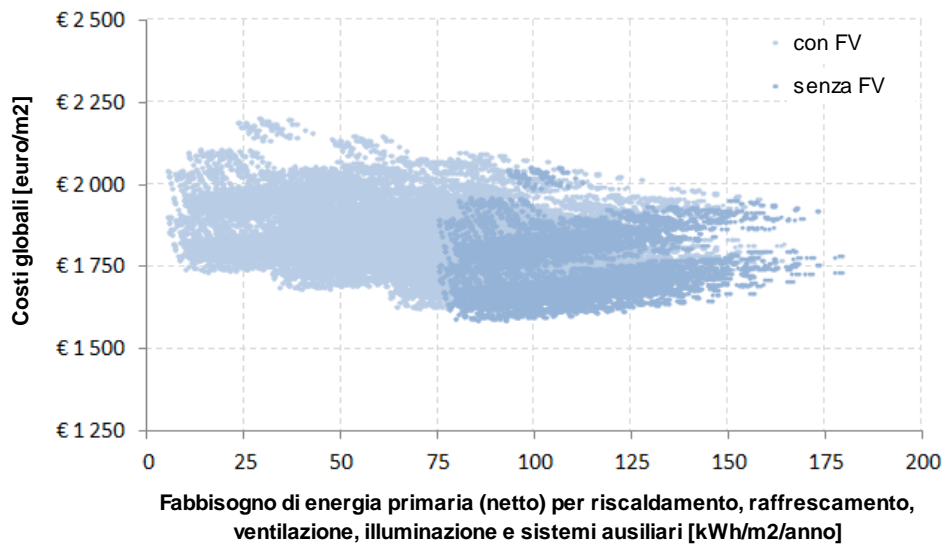


Figura 6 – Costi globali per fabbisogno energetico secondo una prospettiva finanziaria, considerando o meno l'installazione di impianti fotovoltaici.

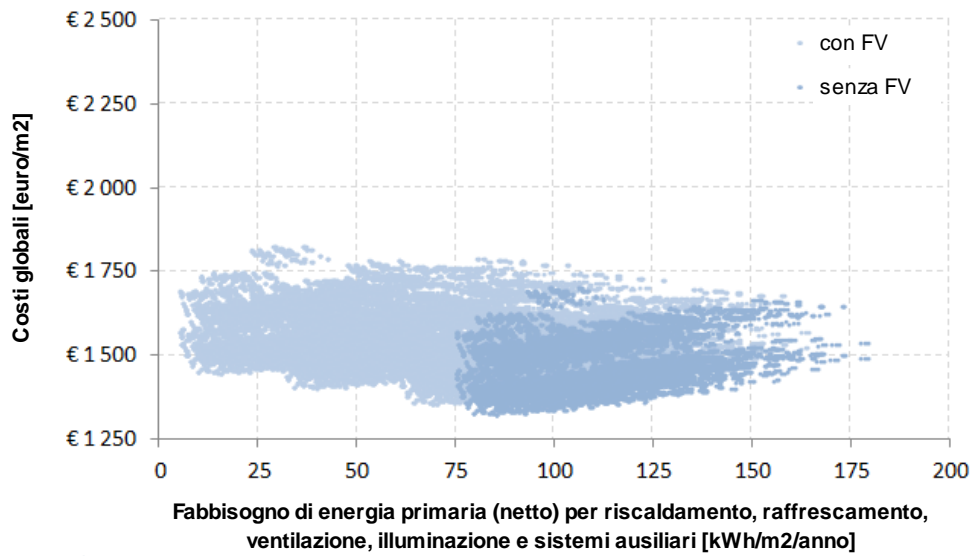
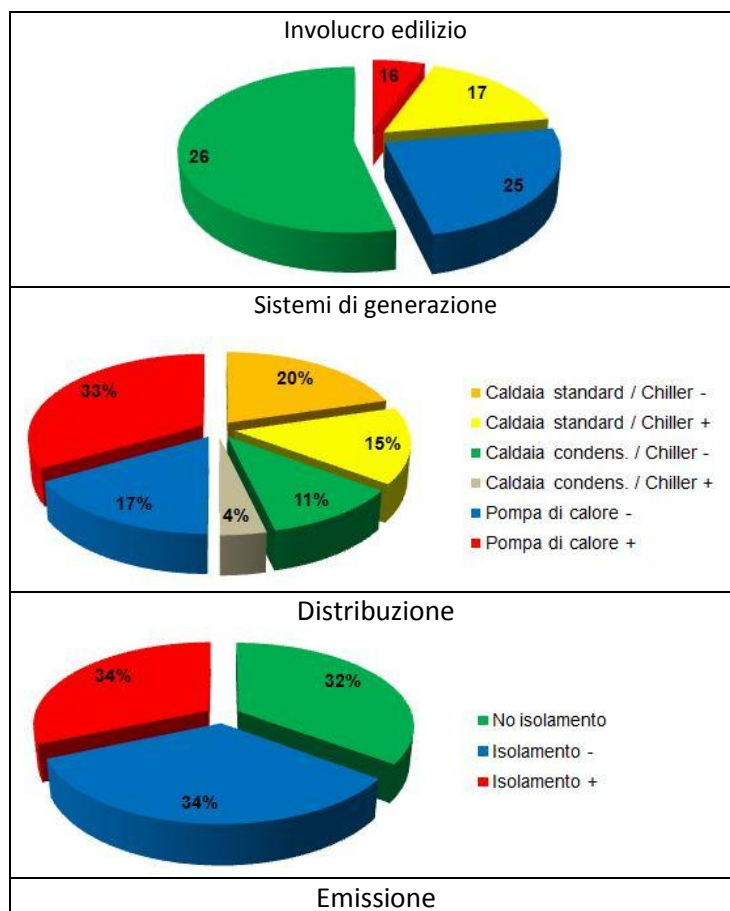


Figura 7 – Costi globali per fabbisogno energetico secondo una prospettiva macroeconomica, considerando o meno l’installazione di impianti fotovoltaici.

Al fine di fornire esempi di utilizzo e contestualizzare i risultati ottenuti la regione ottimale è stata investigata statisticamente: i grafici seguenti mostrano i risultati della caratterizzazione effettuata sulle 150 varianti costruzione migliori (con minori costi globali).



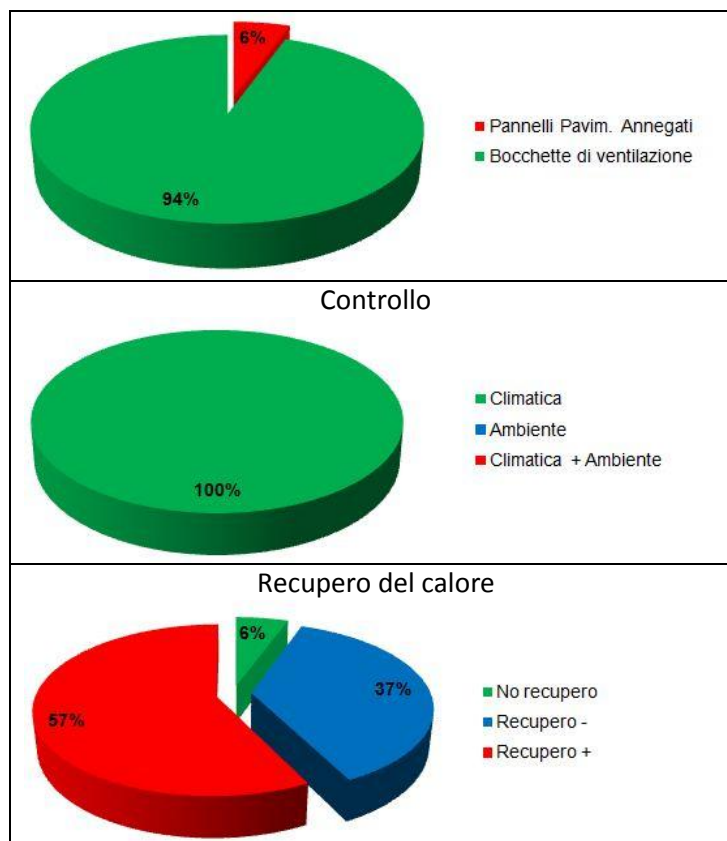


Figura 8 – Individuazione statistica delle tecnologie più ricorrenti nell'area dell'ottimo economico ottenuto.

Conclusioni

Il presente studio rappresenta una delle prime applicazioni al contesto italiano della metodologia *cost-optimal* delineata dalla Commissione Europea e introdotta attraverso la Direttiva Europea 2010/31/UE [1]. Durante lo studio è stato sviluppato uno strumento di calcolo in grado di calcolare ed associare ad un elevato numero di varianti edificio-impianto i relativi fabbisogni di energia primaria per riscaldamento e raffrescamento e i relativi costi globali.

Esso è stato testato, in accoppiamento con una campagna di simulazione dinamica, per individuare e caratterizzare in prima approssimazione la regione dell'ottimo edilizio per un edificio di riferimento nel contesto di Milano. Su questa base, un lavoro di verifica del database dei costi e delle tipologie rappresentative dello stock edilizio consentirebbe di approfondire e confermare o correggere ove necessario queste prime conclusioni. In particolare, per lo specifico edificio analizzato si sono riconosciute: i) la convenienza delle tecnologie d'involucro e strategie passive analizzate (isolamento termico delle superfici opache dell'involucro edilizio, protezioni solari, ventilazione naturale notturna e soprattutto componenti finestrati ad alte prestazioni); ii) la convenienza di impianti di climatizzazione a tutt'aria³, integrati a strategie di recupero del calore durante la fase di riscaldamento.

Oltre che per le analisi condotte in questo studio, la procedura di calcolo utilizzata viene proposta per sviluppare analisi di sensitività sui parametri economici di base (periodo di calcolo, tasso di interesse, tasso di inflazione, prezzi attuali e futuri dell'energia, ecc.), nonché per simulare in maniera semplificata l'effetto di politiche di incentivo economico rivolte alle tecnologie di efficienza energetica considerate.

³ In particolare questa conclusione richiederà un approfondimento basato su un aumento del dettaglio del database dei costi

Riferimenti bibliografici

1. Direttiva 2010/31/UE, Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010 sulla prestazione energetica nell'edilizia (rifusione), 2010.
2. Regolamento Delegato (UE) N. 244/2012 della Commissione che integra la direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio sulla prestazione energetica nell'edilizia istituendo un quadro metodologico comparativo per il calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici e degli elementi edilizi, 16 gennaio 2012.
3. UNI TS 11300-1 – “Prestazione energetica degli edifici – Parte 1: determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale”, 2008.
4. UNI TS 11300-2 – “Prestazione energetica degli edifici – Parte 2: determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria”, 2008.
5. UNI TS 11300-3 – “Prestazione energetica degli edifici – Parte 3: determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva”, 2008.
6. UNI EN 15459 – “Prestazione energetica degli edifici – Procedura di valutazione economica dei sistemi energetici degli edifici”, 2008.
7. Pagliano L., Pietrobon M., Zangheri P., “Definizione degli indici e livelli di fabbisogno dei vari centri di consumo energetico degli edifici adibiti a uffici”, Usi termici – analisi del potenziale di risparmio energetico, Report ENEA, Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente, 2009.
8. UNI EN 12207 – “Finestre e porte: permeabilità all'aria – Classificazione”, 2000.
9. Comune di Milano, Direzione Centrale Infrastrutture e LL. PP., Settore Programmazione e Controllo OO. PP., “Listino dei prezzi per l'esecuzione di opere pubbliche e manutenzioni”, 2011.
10. UNI EN 15251 – “Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica”, 2008.
11. UNI EN 15316-3-1 – “Impianti di riscaldamento degli edifici - Metodo per il calcolo dei requisiti energetici e dei rendimenti dell'impianto - Parte 3-1: Impianti per la produzione di acqua calda sanitaria, caratterizzazione dei fabbisogni (fabbisogni di erogazione)”, 2008.

Appendice – Curriculum scientifico del gruppo di lavoro

eERG è il Gruppo di ricerca sull'efficienza negli usi finali dell'energia, attivo dal 1996 presso il Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano. L'approccio interdisciplinare di eERG connette ricerca in nuove tecnologie e in fisica degli edifici, analisi economica e delle politiche energetiche, audit e progettazione di interventi, e comprende: ricerca scientifica e tecnologica svolta in partnership con gruppi accademici e agenzie europee e statunitensi; trasferimento dei risultati verso l'applicazione, attraverso cooperazione con l'industria, istituzioni italiane ed europee, enti locali; didattica universitaria e post-universitaria e attività di formazione e divulgazione.

Il direttore di eERG, Lorenzo Pagliano, laureato in Fisica cum Laude, Dottore di Ricerca in Energetica, è stato Visiting Researcher presso il Lawrence Berkeley Laboratory (California, USA). Sue aree di ricerca sono gli edifici a bassa energia, il comfort termico e l'analisi delle politiche energetiche. Tiene il corso di Fisica dell'Edificio presso la facoltà di Ingegneria Edile e Architettura, di Building Physics, è Direttore del Master RIDEF, è membro del Comitato editoriale della rivista Energy Efficiency (Springer) e Advances in Building Energy Research, è membro del Consiglio Direttivo dello European Council for an Energy Efficient Economy (ECEEE).

Paolo Zangheri, Dottore di Ricerca in Energetica, collabora con eERG dal 2004. E' responsabile di progetti di ricerca europei e si occupa di misure di comfort e di simulazioni termo-energetiche di edifici. E' responsabile delle attività di misura di eERG, in laboratorio e in situ, in una serie di edifici low energy e case passive.