

METODOLOGIA

Metodologia di svolgimento

L'attività prevede l'applicazione della simulazione energetica dinamica con il software *EnergyPlus* e l'ottimizzazione economica mediante un algoritmo genetico implementato nel software *Design Builder* a edifici di riferimento appartenenti a diverse zone climatiche italiane, con l'obiettivo di individuare le soluzioni di retrofit energetico ottimali dal punto di vista dei costi, migliorando nel contempo la prestazione energetica e garantendo il raggiungimento del target nZEB.

È stata adottata una procedura di diagnosi energetica, elaborata seguendo i principi della norma UNI CEI EN 16247 parti 1-3 e della norma UNI CEI/TR 11428.

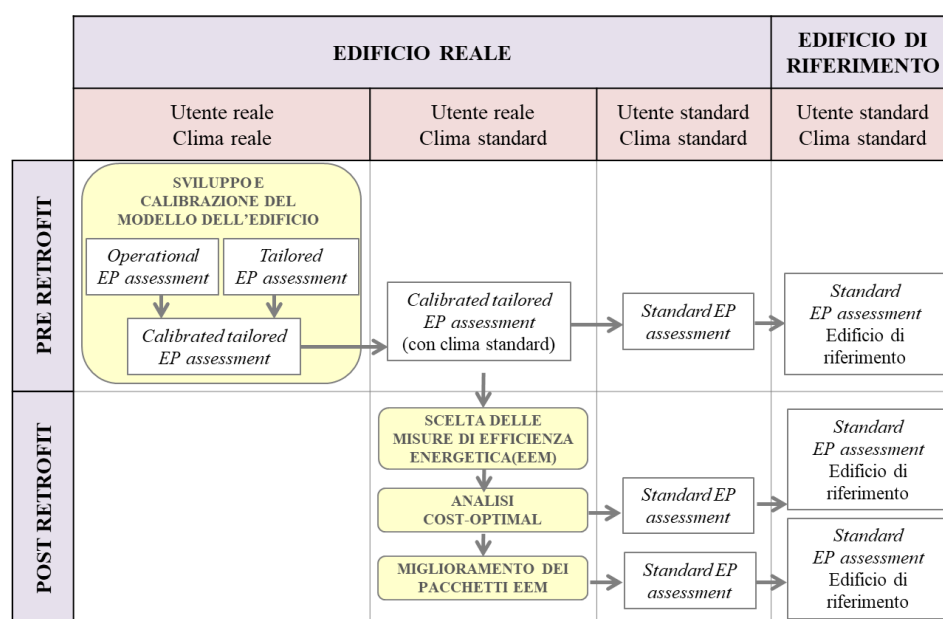


Figura 1 – Procedura di diagnosi energetica.

La procedura, illustrata in Figura 1, si suddivide in due macro fasi: la fase di pre-retrofit e la fase di post-retrofit. Nella fase di pre-retrofit si analizza l'edificio allo stato di fatto e si effettuano una valutazione energetica adattata all'utenza e una valutazione energetica d'esercizio al fine di calibrare il modello; la fase di post-retrofit, invece, comprende le analisi energetiche ed economiche applicate al modello calibrato, volte allo studio dell'effetto di possibili misure di efficienza energetica da adottarsi per la riqualificazione dell'edificio. Nello specifico, nella seconda fase si applica uno strumento di ottimizzazione, volto all'individuazione di quelle misure di efficienza energetica che, se adottate, porterebbero a minimizzare il costo globale valutato nel ciclo di vita economico dell'edificio. Partendo dalla/e soluzione/i ottimali sotto il profilo economico, si testano successivamente le misure o i pacchetti di misure tecnicamente fattibili che porterebbero a soddisfare il target nZEB, e si valuta l'impatto economico e ambientale di queste soluzioni confrontato con quello generato dalla/e soluzione/i ottimale/i.

L'ottimizzazione applicata nell'analisi è di tipo multi-obiettivo, eseguita mediante il *Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) implementato nel software *Design Builder*. NSGA-II (*Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm*) è una revisione evoluta di NSGA in cui viene utilizzato l'elitismo ed una nuova metodologia di mantenimento della diversità, la *crowding distance*. In NSGA-II viene utilizzata una classificazione delle soluzioni secondo un ordine di dominanza. Il principio su cui si basa è quello di assegnare un livello o un fronte di dominanza a tutte le soluzioni di una popolazione. Le soluzioni non-domite all'interno di tutta la popolazione avranno rank 1. Le soluzioni non-domite tra tutta la popolazione tranne le soluzioni di rank 1 avranno rank 2 e così via.

Il costo globale dell'edificio comprende i costi degli investimenti in misure di efficienza energetica ed energia da fonti rinnovabili, i costi di manutenzione e di funzionamento, i costi energetici, gli utili derivanti dalla produzione di energia ed i costi di smaltimento (a fine ciclo vita dell'immobile). Nello specifico, i costi utilizzati nelle simulazioni e i parametri economici sono stati ricavati dal report del Ministero dello Sviluppo Economico sull'applicazione della metodologia di calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica. La verifica dei requisiti nZEB è stata condotta in ottemperanza al D.M. 26 giugno 2015.

La modellazione necessaria per l'individuazione della soluzione cost-optimal con il software *DesignBuilder* prevede, sul modello calibrato, di testare le diverse opzioni di efficienza energetica scelte sulla base della fattibilità tecnica. Il modello deve però essere preliminarmente caratterizzato da quelle proprietà che lo strumento esclude dall'ottimizzazione. Esse comprendono:

- » la tenuta all'aria dell'involucro;

- » il contributo dei ponti termici;
- » la tecnologia impiantistica (tipo di generatore di calore, presenza di ventilazione meccanica, impianto di acqua calda sanitaria, impianto solare termico, impianto fotovoltaico);
- » i parametri per il controllo dell'illuminazione artificiale;
- » i costi medi totali di sostituzione e manutenzione, riferiti alla vita utile.

L'analisi ambientale è stata sviluppata insieme all'analisi economica utilizzando metodologie di analisi di ciclo di vita (LCA). La LCA è una valutazione degli impatti cumulativi generati da un oggetto o un sistema dalla culla alla tomba (*from cradle to grave*). La LCA è un'analisi complessa perché include un'elevata incertezza legata al lungo periodo di vita delle costruzioni; un così lungo periodo può implicare cambiamenti significativi nella funzione dell'edificio, nei periodi di occupazione da parte degli utenti, nel comportamento energetico e nelle caratteristiche di involucro. Queste mutazioni possono avere un'influenza considerevole sulla domanda di energia e sui carichi ambientali dell'edificio preso in considerazione. La LCA è regolata dagli standard ISO 14040 e ISO 14044 che definiscono gli orientamenti generali con cui condurre l'analisi mentre le Product Category Rules (PCR) definiscono procedure metodologiche più dettagliate per la realizzazione di analisi riguardanti specifici prodotti. La PCR riguardante gli edifici è stata presa come punto di riferimento metodologico. Tale procedura prevede la distinzione degli impatti generati dalle diverse fasi dell'edificio, come rappresentato in Figura 2: fase di estrazione delle materie prime e costruzione-assemblaggio dell'edificio, fase d'uso dell'edificio e fase di fine vita (o di demolizione). Tale schema permette di quantificare i possibili trasferimenti degli impatti da una fase all'altra: le riqualificazioni energetiche degli edifici riducono gli impatti legati alla fase d'uso ma incrementano quelli connessi alla fase di produzione-costruzione e di fine vita.

Le analisi LCA sono in grado di restituire diversi indicatori d'impatto riguardanti il cambiamento climatico, lo sfruttamento di risorse non rinnovabili, la distruzione/creazione dell'ozono atmosferico, l'acidificazione di suolo e acque, l'eutrofizzazione, la tossicità per l'uomo, lo sfruttamento dell'acqua e del suolo. Fra le diverse categorie di impatto incluse all'interno di metodologie LCA sono state prese in considerazione il cambiamento climatico e lo sfruttamento di risorse energetiche (sia fossili che rinnovabili). Gli indicatori che permettono di quantificare tali impatti sono il Global Warming Potential (IPCC GWP 100y) e la Cumulative Energy Demand (CED).

Può essere definita come energia incorporata (Embodied Energy) la quantità di energia che è legata alla fase di produzione e assemblaggio dei materiali che compongono l'edificio; similmente il carbonio incorporato (Embodied Carbon) include le emissioni equivalenti di gas serra che vengono generate durante le fasi di produzione e assemblaggio dei componenti dell'edificio.

Fase di produzione			Fase di costruzione		Fase d'uso							Fase di fine vita				Benefici opzionali
Estrazione materie prime	Trasporto alla fabbrica	Processo di fabbricazione	Trasporto al cantiere	Processo di costruzione	Uso	Manutenzione	Riparazione	Sostituzione	Riqualificazione	Uso di energia in fase operativa	Uso di acqua in fase operativa	Demolizione	Trasporto	Lavorazione dei rifiuti	Smaltimento	Potenziale riutilizzo, riciclo
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D

Figura 2 – Fasi dell'analisi LCA di edifici considerate.

L'analisi LCA è molto utile per identificare quali siano i retrofit più efficaci da un punto di vista ambientale nella fase di progettazione dell'intervento di riqualificazione energetica. Alcuni indicatori utili a tale scopo sono l'energy payback time e il carbon payback time. Essi vengono definiti come il rapporto fra variazione di energia incorporata (o carbonio incorporato) ed il risparmio energetico annuale (o la riduzione di emissioni climalteranti) conseguiti a seguito di interventi di riqualificazione energetica.

L'attività prevede quindi l'applicazione della simulazione energetica dinamica con il software *EnergyPlus* per la determinazione dei consumi energetici in fase d'uso degli edifici ex ante ed ex post l'intervento di riqualificazione e l'uso del software *SimaPro* per condurre l'analisi LCA utilizzando i database inclusi all'interno del pacchetto la cui validità è riconosciuta a livello internazionale.

L'obiettivo è quello di individuare le soluzioni di retrofit energetico più performanti dal punto di vista ambientale, che migliorano la prestazione energetica e garantiscono un rapido ritorno sugli impatti trasferiti alle componenti embodied.

In questo contesto, le attività principali svolte nel contesto del progetto di ricerca dell'Unità Operativa 5 possono essere sintetizzate come segue:

- » Utilizzo della procedura dei gruppi di lavoro del MiSE per il calcolo dei livelli ottimali di EP in funzione dei costi;

- » Applicazione comparata dei metodi di calcolo della normativa internazionale e di un modello di simulazione dinamica;
- » Valutazione della qualità dell'ambiente interno (FprEN 16798-1 e -2);
- » Analisi dei costi di investimento e manutenzione relativi a un'ampia gamma di misure di efficienza energetica;
- » Analisi LCA di edifici e misure di efficienza energetica;
- » Calcolo dei payback times ambientali;
- » Effettuazione di analisi di sensibilità nei confronti di alcuni fattori chiave.

Ogni attività è stata svolta applicando la metodologia precedentemente descritta a diversi casi studio.

Casi studio applicativi (se presenti)

Il quadro metodologico per la valutazione e l'ottimizzazione delle prestazioni energetiche degli edifici in riferimento agli aspetti economici è in corso di applicazione su un numero di casi studio comprendente sia edifici reali che edifici tipo. I casi studio reali sono i seguenti:

- » un palazzo ad uso uffici (categoria E.2);
- » un blocco di appartamenti di edilizia popolare (categoria E.1);
- » un plesso scolastico (categoria E.7).
- » un edificio prototipo ideale ad uso residenziale (categoria E.1);
- » un edificio nZEB prototipo.

Tutti i casi studio sono siti a Torino e sono rappresentativi delle rispettive categorie d'uso per la zona climatica E (2100-3000 GG) nel periodo di costruzione 1940-60 (edifici ad uso uffici ed uso scolastico) ed inizio anni '90 (edificio di edilizia pubblica). Per quanto riguarda i casi studio edifici tipo, si è fatto riferimento agli edifici di riferimento considerati nell'attività di ricerca inerente all'aggiornamento delle informazioni per la valutazione tecnico-economica degli interventi di riqualificazione energetica di edifici, in previsione di un aggiornamento del D.M. 26 giugno 2015 sulle nuove prescrizioni e i requisiti minimi di prestazione energetica. Tra gli edifici di riferimento, il caso studio considerato è rappresentativo della tipologia edilizia ad uso uffici (categoria E.2).

Caso studio 1: Palazzo ad uso uffici

Il palazzo ad uso uffici (Figura 3) ha una struttura portante in pilastri in calcestruzzo armato e tamponamenti in laterizio ed è composto da due corpi di fabbrica, un volume principale di sette piani fuori terra e due interrati, che ospita prevalentemente gli uffici e i servizi per il pubblico, e un volume secondario composto da due piani interrati, in cui si trovano gli archivi e gli spazi tecnici.



Figura 3 – Edificio per uffici - Inserimento nel contesto dell'edificio (da Google Maps).

Per quanto riguarda l'involucro edilizio, il caso studio è caratterizzato da componenti edilizi non isolati e serramenti originali caratterizzati da telai in legno con vetri doppi e telai in alluminio senza taglio termico con vetri singoli. Per quanto riguarda, invece, gli impianti tecnici, l'edificio è servito da un unico impianto di riscaldamento allacciato alla rete di teleriscaldamento; i terminali di emissione sono prevalentemente ventilconvettori e radiatori.

I profili di utenza reale relativi ai comportamenti degli occupanti sono stati stabiliti sulla base di questionari forniti all'utenza, in cui sono state richieste informazioni generali sull'ufficio e informazioni riguardanti i giorni e gli orari lavorativi, l'apertura delle finestre, la gestione delle tapparelle avvolgibili, delle schermature solari, l'utilizzo dell'illuminazione artificiale e la gestione dell'impianto di riscaldamento.

L'edificio è stato suddiviso in 17 zone termiche, adottando criteri basati sulla destinazione d'uso degli spazi, su aspetti legati all'utenza e altri correlati alle proprietà e alla gestione degli impianti tecnici.

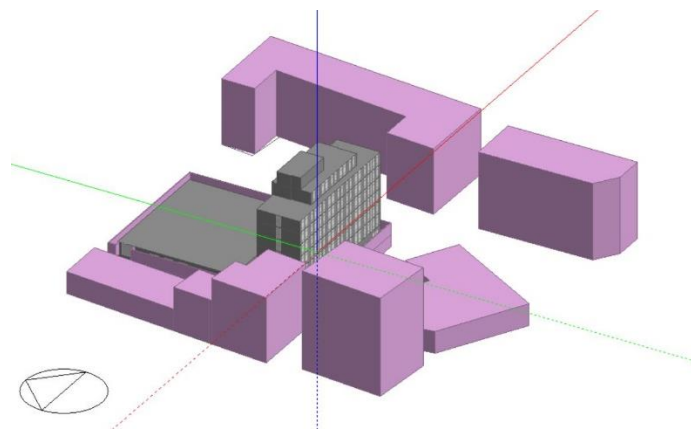


Figura 4 – Edificio per uffici - Estrapolazione della geometria 3D del modello di simulazione.

Il modello di simulazione dell'edificio nello stato di fatto è stato creato sulla base dei dati di input sopra descritti. La Figura 4 riporta un'estrapolazione della geometria 3D dell'edificio e del contesto. Poiché gli indici statistici considerati al fine della validazione del modello di simulazione, risultanti dal confronto tra i risultati della valutazione d'esercizio (consumi energetici reali) e quella adattata all'utenza, non rispettavano i limiti riportati in letteratura (ASHRAE Guideline-14:2014), è stato necessario tarare il modello di simulazione al fine di far coincidere l'energia termica erogata risultante dalla valutazione adattata all'utenza con quella risultante dalla valutazione d'esercizio. I parametri che sono stati considerati per la calibrazione riguardano aspetti sia gestionali (comportamento dell'utenza) sia impiantistici (es. temperatura di mandata dell'acqua nel circuito primario dell'impianto).

La prestazione energetica dell'edificio (modello calibrato e con dati climatici standard) è pari a 227,4 kWh/m², in termini di energia primaria non rinnovabile annua utilizzata per gli usi energetici presenti nell'edificio (riscaldamento ambiente e illuminazione artificiale). L'impatto ambientale dell'edificio, in termini di emissioni annue di CO₂, è pari a 40,2 kg/m², e il costo globale, stimato in un periodo di 30 anni (considerando i soli costi energetici e di manutenzione), è pari a 446,2 €/m².

L'applicazione delle misure di efficienza energetica all'edificio è stata condotta nell'ottica di effettuare una ristrutturazione importante di primo livello. Le 12 misure di efficienza energetica considerate per la riqualificazione dell'edificio riguardano sia l'involucro (es. isolamento termico delle pareti verso l'esterno, schermature solari, etc.) sia gli impianti tecnici (es. sostituzione del generatore di calore, installazione di collettori solari termici e pannelli fotovoltaici), e per ognuna di queste sono stati considerati da uno a quattro livelli prestazionali differenti: per ogni livello si è calcolata la prestazione energetica ed il rispettivo costo, il quale comprende il costo della tecnologia, dell'installazione e della ipotetica dismissione della soluzione allo stato di fatto. Le tecnologie proposte sono di tipo avanzato e coerenti con i principi di fattibilità tecnico-ambientale-economica e replicabilità su larga scala. Tra le soluzioni tecnologiche dei generatori di energia termica sono state considerate le seguenti alternative: teleriscaldamento (invariabilità rispetto allo stato di fatto), pompa di calore e generatore a biomassa. I terminali di emissione dell'impianto di riscaldamento sono stati sostituiti con ventilconvettori per garantire il loro utilizzo sia per il riscaldamento sia per il raffrescamento. Si è assunto un fabbisogno di acqua calda sanitaria in coerenza con la specifica tecnica UNI/TS 11300-2. Il servizio di raffrescamento, non presente allo stato di fatto, è stato considerato solo in fase di riqualificazione dell'edificio.

Il caso studio è stato inoltre considerato nell'attività inerente alla valutazione della qualità dell'ambiente interno, secondo quanto specificato dalla normativa tecnica EN 16798-1 e -2. In questo contesto, è stato studiato l'effetto che misure di riqualificazione nell'ottica nZEB dell'involucro e sugli impianti hanno sulla qualità dell'ambiente interno, in particolare sul comfort termico e visivo, relativamente ad un piano tipo rappresentativo dell'edificio (5° piano fuori terra). La ricerca è stata sviluppata in due attività:

- 1) inizialmente, è stato valutato l'effetto che il pacchetto specifico di misure di riqualificazione che garantiscono il costo globale più basso e il rispetto dei requisiti nZEB hanno sulla performance termica e visiva dell'ambiente interno;
- 2) in secondo luogo, diverse misure di riqualificazione energetica sull'involucro edilizio sono state combinate e considerate nella valutazione dell'ambiente interno, al fine di ottimizzare la performance globale dell'edificio e ad individuare un pacchetto di misure di riqualificazione in grado di garantire sia il comfort termico che il comfort visivo, nel rispetto dei requisiti richiesti per gli edifici ad energia quasi zero.

Il comfort termico è stato valutato attraverso gli indici specificati dalla norma tecnica EN 16798-1. Applicando il cosiddetto criterio adattativo, la temperatura operativa di comfort varia in funzione della *outdoor running mean temperature*, definita come media esponenziale della temperatura dell'aria esterna. Questo criterio è valido per temperature di funzionamento comprese tra 10 °C e 30 °C. Gli indici di comfort termico considerati sono i seguenti:

- » la percentuale di ore di occupazione in cui la temperatura operante dell'ambiente supera l'intervallo consigliato per un livello medio di comfort (categoria II di EN 16798-1). In particolare, questa gamma si riferisce a una variazione della temperatura ottimale di comfort operativo di +3 °C (limite massimo) e -4 °C (limite inferiore);

- » le ore pesate di discomfort (WHD), determinate separatamente per il discomfort caldo (WHD_w) e freddo (WHD_c), secondo quanto prescritto dalla normativa tecnica EN ISO 7730.

Il comfort visivo è stato valutato separatamente per luce naturale e illuminazione artificiale. Per l'illuminazione naturale sono stati utilizzati tre indici:

- » il fattore medio di luce diurna (DF);
- » la *spatial Daylight Autonomy* (sDA_{300,50%} e sDA_{500,50%});
- » la percentuale di ore di occupazione in cui il DGP (*Daylight Glare Probability*) supera una soglia definita (FDGP_{exceeded}).

La valutazione del comfort visivo relativo all'illuminazione artificiale è stata condotta attraverso gli indici specificati dalla norma EN 12464-1:

- » illuminamento medio mantenuto (E_m);
- » uniformità di illuminamento (U);
- » *Unified Glare Rating* (UGR).

Per quanto riguarda la prima attività (vd. elenco precedente), la metodologia proposta comprende tre step:

- Fase 1) Analisi del piano dell'edificio nella condizione attuale (Exist.B).
- Fase 2) Applicazione del pacchetto costo-ottimale nZEB di misure di efficienza energetica relative solo ai componenti dell'involucro edilizio (nZEB *).
- Fase 3) Applicazione dell'intero pacchetto di misure di efficienza energetica nZEB (nZEB).

Mentre la valutazione delle prestazioni energetiche è stata effettuata su base annua, per valutare l'effetto del retrofit sull'involucro sulla temperatura interna e sul relativo livello di comfort, l'indice di comfort termico è stato calcolato per i mesi che non appartengono né alla stagione di riscaldamento né alla stagione di raffreddamento. Per quanto riguarda la luce naturale, la valutazione del comfort visivo è stata condotta per l'edificio era nella condizione attuale (fase 1) e dopo il retrofit dell'involucro (fase 2), mentre le performance dell'attuale impianto di illuminazione è stata confrontata con quella relativa al nuovo impianto di illuminazione (fase 3).

Per quanto riguarda, invece, la seconda attività (vd. elenco precedente), diciotto combinazioni di misure di efficienza energetica sono state considerate nell'ottimizzazione della performance globale del piano dell'edificio. In particolare, sono state considerate tre misure di efficienza energetica sull'involucro opaco e cinque sull'involucro trasparente, comprendendo sia l'isolamento dell'involucro che l'applicazione di sistemi di schermatura con diverse strategie di controllo. La metodologia applicata consiste di tre fasi:

- Fase 1) in una simulazione preliminare eseguita per valutare e applicare una serie di regole di controllo delle schermature basate sul comfort visivo per determinare una schedule ottimizzata di funzionamento delle schermature;
- Fase 2) nella seconda fase, in EnergyPlus è implementato un loop di controllo per definire una schedule ottimizzata di funzionamento delle schermature basata sul comfort termico;
- Fase 3) infine, la terza fase ha lo scopo di identificare una strategia combinata di controllo delle schermature per ottimizzare sia il comfort sia visivo che termico; a tal fine, il loop di controllo definito nella fase precedente viene implementato con una schedule ottimizzata di funzionamento delle schermature basata sul comfort visivo.

I risultati di ciascuna fase sono la definizione di programmi orari di funzionamento delle schermature, quindi implementati nei software di simulazione per il calcolo degli indici di comfort visivo e termico e per la valutazione delle prestazioni energetiche per il riscaldamento, il raffreddamento e illuminazione.

Caso studio 2: Blocco di appartamenti di edilizia popolare

L'edificio è composto da due corpi di fabbrica, identici e speculari, costituiti ciascuno da 6 piani fuori terra. Dei due corpi di fabbrica, l'edificio esposto ad ovest è stato scelto come oggetto di analisi (Figura 5). L'edificio, costruito nei primi anni '90, è caratterizzato da una struttura portante in pilastri in calcestruzzo armato e tamponamenti in cassavuota, nella quale è stato inserito uno strato di 4 cm isolamento termico, e con strato esterno di mattoni rifiniti a faccia vista. I solai disperdenti (superiore verso il sottotetto e inferiore verso il piano terra) sono tutti in laterocemento coibentati. Per quanto riguarda l'involucro trasparente, questo è caratterizzato da serramenti a doppio vetro (con aria all'interno) e telaio in legno, dotati di tapparelle avvolgibili. Sono inoltre presenti schermature solari quali tende parasole sulla maggior parte dei balconi.



Figura 5 – Blocco di appartamenti di edilizia popolare (facciate Est e Ovest).

Per quanto riguarda gli impianti tecnici, ogni appartamento è servito da un impianto di tipo autonomo, per la produzione combinata di riscaldamento e ACS. L'attuale impianto di riscaldamento è stato rinnovato tra il 2007 e il 2008, a seguito di un'ampia sostituzione delle caldaie a livello di condominio. Le caldaie installate sono, per la maggior parte, caldaie murali istantanee a camera aperta. L'impianto di riscaldamento ha funzionamento continuo, con temperatura di set-back impostabile dall'utenza e regolazione tramite termostato ambientale.

I profili di utenza reale relativi ai comportamenti degli occupanti sono stati stabiliti sulla base di questionari forniti all'utenza, in cui sono state richieste informazioni generali e informazioni riguardanti il numero di occupanti, le ore effettive di presenza all'interno di ogni ambiente, le abitudini che influenzano il comportamento energetico dell'edificio, quali ad esempio l'apertura delle finestre, correlata alla ventilazione naturale, e la gestione delle schermature mobili e delle chiusure oscuranti. Poiché non è stato possibile reperire le informazioni relative a tutti gli appartamenti, si è definito un profilo di occupazione tipo, sulla base dei dati raccolti, relativo al nucleo familiare medio presente nei condomini analizzati.

L'intero condominio è servito da impianti di riscaldamento e produzione di ACS autonomi per ogni appartamento. Per tale motivo, ad ogni tipologia di appartamento presente è stata assegnata una diversa zona termica.

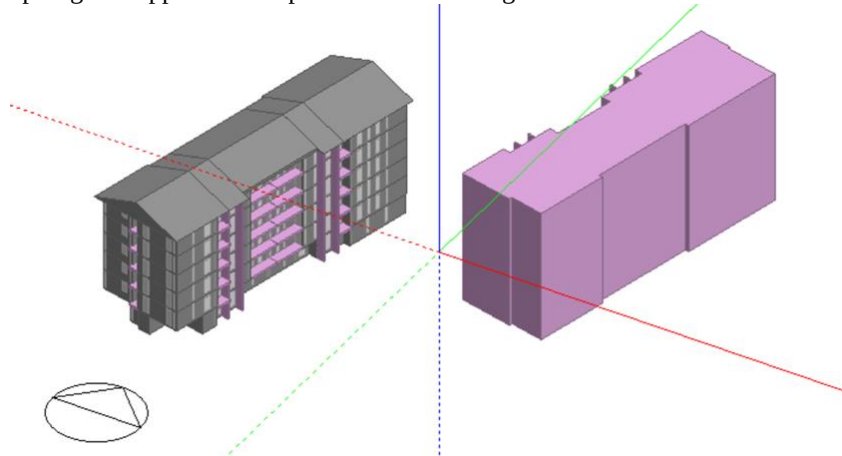


Figura 6 – Blocco di appartamenti di edilizia popolare (facciate Est e Ovest).

Il modello di simulazione dell'edificio nello stato di fatto è stato creato sulla base dei dati di input sopra descritti. La Figura 6 riporta un'estrapolazione della geometria 3D dell'edificio e del contesto. Poiché gli indici statistici considerati al fine della validazione del modello di simulazione, risultanti dal confronto tra i risultati della valutazione d'esercizio (consumi energetici reali) e quella adattata all'utenza, non rispettavano i limiti riportati in letteratura (ASHRAE Guidelina-14:2014), è stato necessario tarare il modello di simulazione al fine di far coincidere l'energia termica erogata risultante dalla valutazione adattata all'utenza con quella risultante dalla valutazione d'esercizio. I parametri che sono stati considerati per la calibrazione riguardano aspetti sia gestionali (comportamento dell'utenza) sia impiantistici (rendimento delle caldaie e temperatura di set-back dell'impianto di riscaldamento). La prestazione energetica dell'edificio (modello calibrato e con dati climatici standard) è pari a 127,1 kWh/m², in termini di energia primaria non rinnovabile annua utilizzata per gli usi energetici presenti nell'edificio (riscaldamento ambiente e produzione di acqua calda sanitaria). L'impatto ambientale dell'edificio, in termini di emissioni annue di CO₂, è pari a 28,5 kg/m², e il costo globale, stimato in un periodo di 30 anni (considerando i soli costi energetici e di manutenzione), è pari a 267,4 €/m².

L'applicazione delle misure di efficienza energetica all'edificio è stata condotta nell'ottica di effettuare una ristrutturazione importante di primo livello. Le 8 misure di efficienza energetica considerate per la riqualificazione dell'edificio riguardano sia l'involucro (es. isolamento termico delle pareti verso l'esterno, schermature solari, etc.) sia gli impianti tecnici (es. sostituzione del generatore di calore, installazione di collettori solari termici e pannelli

fotovoltaici), e per ognuna di queste sono stati considerati da uno a tre livelli prestazionali differenti: per ogni livello si è calcolata la prestazione energetica ed il rispettivo costo, il quale comprende il costo della tecnologia, dell'installazione e della ipotetica dismissione della soluzione allo stato di fatto. Le tecnologie proposte sono di tipo avanzato e coerenti con i principi di fattibilità tecnico-ambientale-economica e replicabilità su larga scala. Tra le soluzioni tecnologiche dei generatori di energia termica sono state considerate le seguenti alternative: caldaie a condensazione autonome o pompe di calore aria-acqua (e sostituzione dei terminali di emissione). Il servizio di raffrescamento, non presente allo stato di fatto, è stato considerato solo in fase di riqualificazione dell'edificio.

Il caso studio è stato inoltre considerato nell'attività inerente alla valutazione della qualità dell'ambiente interno. In questo contesto, è stato studiato l'effetto che misure di riqualificazione nell'ottica nZEB dell'involucro e sugli impianti hanno sulla qualità dell'ambiente interno di diversi alloggi posizionati su differenti piani e con diversi orientamenti.

Il comfort termico è stato valutato attraverso gli indici specificati dalla norma tecnica EN 16798-1. In questo caso, il comfort termico è stato analizzato considerando sia periodi con gli impianti tecnici spenti (applicando il cosiddetto criterio adattativo) e con gli impianti accesi (applicando la teoria di Fanger). Gli indici di comfort termico considerati sono i seguenti:

- » la percentuale di ore di occupazione in cui la temperatura operante dell'ambiente supera l'intervallo consigliato per un livello medio di comfort (categoria II di EN 16798-1). In particolare, questa gamma si riferisce a una variazione della temperatura ottimale di comfort operativo di $+3^{\circ}\text{C}$ (limite massimo) e -4°C (limite inferiore);
- » il *Predicted Mean Vote* (PMV) e il *Predicted Percentage Dissatisfied* (PPD), secondo quanto descritto nella norma tecnica UNI EN ISO 7730;
- » le ore pesate di discomfort (WHD), determinate separatamente per il discomfort caldo (WHD_w) e freddo (WHD_c), secondo quanto prescritto dalla normativa tecnica EN ISO 7730.

Il lavoro è strutturato nelle seguenti fasi:

- Fase 1) Valutazione del comfort termico nella stagione di riscaldamento (e raffrescamento, nel caso della soluzione nZEB), analizzato secondo la teoria di Fanger e la norma UNI EN ISO 7730, sulla base dei valori dei parametri ambientali forniti dal software DesignBuilder, come output di simulazione;
- Fase 2) Sviluppo dell'analisi di sensibilità, condotta facendo variare la temperatura di set-point degli impianti di riscaldamento e raffrescamento (quest'ultimo nel caso dell'edificio nZEB). Per le varie configurazioni analizzate si sono definiti gli indici di discomfort stagionali, i cui valori sono stati confrontati con i rispettivi valori di fabbisogno di energia termica per il riscaldamento e il raffrescamento;
- Fase 3) Valutazione del comfort termico fuori dalla stagione di riscaldamento, condotta secondo il metodo del comfort adattivo, descritto nelle norme EN 16798-1 e -2;
- Fase 4) Confronto della temperatura ottimale (calcolata secondo quanto prescritto dalla norma tecnica EN 16798-1) con l'effettiva temperatura operativa oraria di ogni zona termica, fornita dal software di simulazione DesignBuilder, e definizione degli indici di discomfort stagionali.

Caso studio 3: Plesso scolastico

Il terzo caso studio è un complesso scolastico, composto da due corpi di fabbrica: un edificio scolastico superiore e una palestra. La scuola è composta da quattro piani fuori terra e da un piano seminterrato non riscaldato; la palestra, invece, si estende su un livello parzialmente interrato (Figura 7). Le pareti perimetrali sono in muratura a cassavuota nel corpo principale e in termo-laterizio nella palestra. I serramenti sono di due tipologie: telaio in legno e vetro semplici (originali) e telaio in alluminio e vetro doppio. Per quanto riguarda, invece, gli impianti tecnici, l'edificio è servito da un impianto di riscaldamento (presente nell'intero complesso scolastico), costituito da due generatori di calore a gas metano, e un impianto di ventilazione meccanica (presente nella palestra e nell'aula magna).



Figura 7 – Complesso scolastico - Inserimento nel contesto dell'edificio (da Google Maps).

I profili di utenza reale relativi ai comportamenti degli occupanti sono stati stabiliti sulla base di questionari forniti all'utenza e di interviste con il dirigente scolastico.

L'edificio è stato suddiviso in 20 zone termiche, adottando criteri basati sulla destinazione d'uso degli spazi, su aspetti legati all'utenza e altri correlati alle proprietà e alla gestione degli impianti tecnici. Ad oggi è stata definita in DesignBuilder la geometria tridimensionale e buona parte delle caratteristiche termofisiche dell'involucro. La Figura 8 riporta un'estrapolazione della geometria 3D dell'edificio e del contesto.

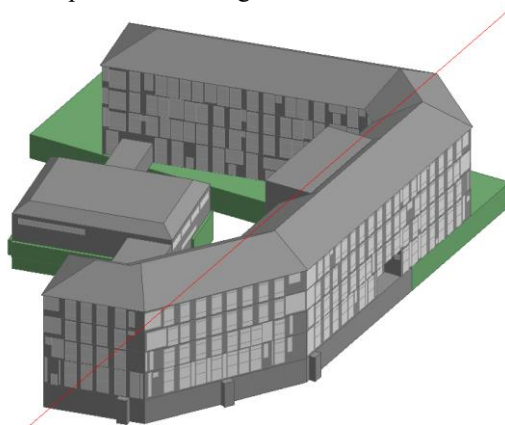


Figura 8 – Complesso scolastico - Estrapolazione della geometria 3D del modello di simulazione.

Nell'ottica di sviluppare una ristrutturazione importante di primo livello, sono state proposte tre soluzioni nZEB che prevedono:

- 1) nZEB1: un maggiore isolamento dell'involucro opaco e trasparente, la sostituzione del sistema di illuminazione e l'installazione di pannelli fotovoltaici con potenza totale pari a 80 kWp;
- 2) nZEB2: la sostituzione del sistema di generazione con il teleriscaldamento, accoppiato ad uno scambiatore di calore;
- 3) nZEB3: la sostituzione del sistema di generazione con una caldaia a biomassa accoppiata ad un serbatoio di accumulo.

Le 14 misure di efficienza energetica considerate riguardano sia l'involucro sia gli impianti tecnici, e per ognuna di queste si considerano da uno a quattro livelli prestazionali differenti. Tra le soluzioni tecnologiche dei generatori di energia termica sono state considerate le seguenti alternative: caldaia a condensazione, teleriscaldamento, pompa di calore e generatore a biomassa. Con riferimento alla produzione di acqua calda sanitaria, si è assunto un fabbisogno di acqua calda sanitaria in coerenza con la specifica tecnica UNI/TS 11300-2. Il servizio di raffrescamento, non presente allo stato di fatto, è stato considerato solo in fase di riqualificazione dell'edificio.

L'applicazione del quadro metodologico per la valutazione e l'ottimizzazione delle prestazioni energetiche dell'edificio in riferimento agli aspetti economici ha permesso di individuare una combinazione di interventi di retrofit che rappresentano una soluzione di cost-optimality.

A seguito della valutazione energetica è stata sviluppata un'analisi LCA allo scopo di determinare l'efficacia da un punto di vista ambientale sia delle soluzioni di retrofit ipotizzate (nZEB 1, nZEB 3 e cost-optimal) che di ogni singola misura di efficienza energetica implementata. Non è stato possibile modellare la soluzione nZEB 2 da un punto di vista LCA che è stata quindi trascurata. Ciò è legato alla difficoltà di calcolare gli impatti legati alla rete di teleriscaldamento e all'allocazione degli stessi all'edificio scolastico in esame.

L'analisi LCA non considera gli impatti connessi al fine vita e modella i trasporti supponendo una distanza di 60 km fra cantiere e luogo di produzione. Il mezzo di trasporto scelto è un veicolo commerciale alimentato a diesel.

Gli indicatori considerati per valutare l'efficacia ambientale degli interventi di retrofit sono i payback times energetici e della CO₂. I risultati ottenuti per il payback energetico e della CO₂ sono stati confrontati con quelli riguardanti i tempi di ritorno economici allo scopo di verificarne la consistenza da un punto di vista sia ambientale che economico.

Il calcolo dei risparmi energetici annuali ottenibili da ogni misura di efficienza energetica adottata all'interno dei diversi scenari di retrofit ha permesso di determinare il payback energetico di ognuna di esse: esso è stato definito come il rapporto fra incremento di energia incorporata e risparmio annuale di energia primaria conseguibile implementando ognuna di esse. Gli indicatori Cumulative Energy Demand versione 1.09 e Global Warming Potential versione 1.03 sono stati utilizzati per il calcolo dell'embodied energy e dell'embodied carbon.

Infine è stato determinato il risparmio energetico conseguibile dalle diverse misure di efficienza energetica sull'intero ciclo di vita dell'edificio. L'intervallo di tempo considerato come vita utile dell'edificio a seguito del retrofit è pari a 50 anni. Diverse frequenze di sostituzione sono inoltre state ipotizzate per i diversi interventi come suggerito dalla EN 15804: 25 anni per gli interventi sulle superfici vetrate, 20 anni per quanto riguarda la sostituzione degli impianti, 100 anni per le strutture portanti dell'edificio.

Caso studio 4: Edificio di riferimento ad uso uffici

Il caso studio è un edificio-tipo ad uso uffici caratteristico dell'epoca costruttiva compresa tra gli anni 1946 e 1976, strutturato sulla base delle informazioni estrapolate dall'indagine effettuata da Margiotta e Puglisi (2009). In particolare,

si tratta di un edificio a due piani fuori terra con struttura in calcestruzzo armato e tamponatura in muratura di laterizio con intercapedine d'aria. I serramenti sono in vetro-camera semplice e telaio di alluminio senza schermature solari. La copertura è piana, non isolata, e il solaio inferiore è su terreno. L'edificio è servito da un impianto di riscaldamento centralizzato con generatore di calore standard a gas e sistema di emissione a radiatori; l'acqua calda sanitaria è prodotta da bollitori elettrici ad accumulo; sono installati sistemi multi-split per il raffrescamento; l'impianto di illuminazione è a sorgenti fluorescenti, a funzionamento manuale on-off. L'edificio è stato considerato in due zone climatiche rappresentative italiane: zona climatica E (Milano) e B (Palermo).

Il presente case studio è stato considerato nell'attività inerente allo sviluppo di analisi di sensibilità a diversi fattori. In particolare, il caso studio è stato utilizzato per ricercare le condizioni che garantiscono, in una ristrutturazione edilizia importante, il soddisfacimento della totalità dei requisiti energetici richiesti dall'attuale quadro normativo nazionale. L'indagine è stata sviluppata attraverso un'analisi parametrica che considera diverse misure di efficienza energetica e i relativi livelli prestazionali, che interessano sia il fabbricato sia gli impianti termici. Le sedici misure di efficienza energetica considerate includono interventi sull'involucro edilizio opaco e trasparente, sugli impianti di riscaldamento, raffrescamento, produzione di acqua calda sanitaria (ACS), ventilazione e illuminazione, e l'introduzione di impianti a fonti rinnovabili, nell'ottica di effettuare una ristrutturazione importante di primo livello. Per ogni EEM sono state considerate fino a cinque diverse opzioni di livello prestazionale crescente. Gli interventi sull'involucro consistono nell'isolamento termico delle pareti verso l'esterno (a cappotto o, in alternativa, nell'intercapedine), dei solai superiore ed inferiore, nella sostituzione dei serramenti esistenti con componenti più performanti e nell'installazione di sistemi di schermatura solare. Per quanto riguarda gli interventi sugli impianti, sono testate diverse configurazioni, quali: sistemi multi-split per il raffrescamento e caldaia a gas per riscaldamento e ACS (a bassa temperatura oppure a condensazione); in alternativa, sistema a pompa di calore a compressione invertibile per riscaldamento e raffrescamento, e produzione di ACS. L'impianto allo stato di fatto è incluso tra le soluzioni ipotizzate. Insieme alla sostituzione del generatore di calore è prevista la sostituzione dei terminali di emissione del calore. Tra le misure sono contemplati: l'impianto solare termico per la produzione di ACS, l'impianto fotovoltaico, i recuperatori di calore per la ventilazione, sistemi di regolazione dell'emissione del calore e l'impianto di illuminazione a LED con o senza controllo.

L'analisi parametrica è stata effettuata in tre fasi:

- Fase 1) Definizione dei pacchetti *cost-optimal* per l'edificio di riferimento nelle due zone climatiche considerate e verifica dei requisiti legislativi relativi all'involucro e agli impianti;
- Fase 2) Analisi parametrica relativa ai soli parametri relativi all'involucro edilizio e verifica dei requisiti legislativi. Sono state testate tutte le combinazioni delle opzioni di efficienza e sono stati calcolati gli indici che permettono il confronto con i requisiti minimi per il solo fabbricato;
- Fase 3) A partire da un pacchetto di misure di efficienza energetica che soddisfa i requisiti minimi legislativi relativi al fabbricato, analisi parametrica relativa ai soli parametri relativi agli impianti termici, inclusi gli impianti a fonti rinnovabili e verifica dei requisiti legislativi. Sono stati calcolati gli indici che hanno permesso il confronto con la totalità dei requisiti legislativi ed è stato determinato il costo globale di ogni configurazione.

Nelle fasi 2 e 3, sono stati condotti dei confronti delle soluzioni ottimali risultati dall'analisi parametriche con i pacchetti di misure di efficienza energetica che garantiscono il minor costo globale.

Caso studio 5: Edificio ideale ad uso residenziale

Il quinto caso studio è un edificio-tipo ad uso residenziale realizzato seguendo i requisiti minimi stabiliti dal D.M. numero 162 del 15 luglio 2015 riguardanti le caratteristiche dell'involucro e di efficienza degli impianti. Si tratta di un modulo residenziale minimo di due piani con struttura puntiforme in calcestruzzo armato e tamponature di muratura tradizionale in blocchi di laterizio con isolamento in intercapedine. La massa superficiale delle strutture verticali è pari a 240 kg/m². I serramenti sono in vetro-camera con telaio in legno. La copertura è piana con isolamento sulla parte superiore rispetto alla struttura portante (i valori limite di trasmittanza termica periodica sono rispettati) e il solaio contro-terra è dotato di strato di ventilazione ed isolato sotto il massetto del pavimento.

L'edificio è completamente elettrico e servito da un impianto di riscaldamento, raffrescamento e produzione di acqua calda sanitaria centralizzato con una pompa di calore elettrica aria-acqua; il sistema di emissione è realizzato tramite fan-coils. Un illuminamento pari a 200 lux è garantito su ogni stanza dell'edificio. L'acqua calda sanitaria è garantita a 45°C considerando un uso pari a 50 litri/persona giornalieri. Per quanto riguarda la stima dei consumi legati a elettrodomestici sono stati presi come riferimento valori di letteratura: sono stati calcolati 1590 kWh complessivi per gli assorbimenti elettrici legati a frigoriferi, lavatrici, televisori, computer, radio ed apparecchi in stand-by. L'impianto fotovoltaico non è integrato nell'edificio e l'orientamento e l'inclinazione dei pannelli sono ottimali. Il free-cooling notturno è ipotizzato per ogni location e schermature solari esterne sono installate su ogni finestra.

L'edificio baseline qui definito viene utilizzato per due studi diversi.

Studio 5.1

Lo scopo dello studio 5.1 è determinare i payback ambientali legati alla riqualificazione dell'edificio baseline costruito secondo gli standard attualmente in vigore sull'efficienza energetica (D.M. 162 del 2015) in un nZEB, standard che sarà obbligatorio a partire dal 2021 per tutti i nuovi edifici pubblici e privati.

L'edificio scelto come caso studio è stato idealmente posizionato in tre diverse zone climatiche rappresentative del clima italiano: zona climatica E (Torino), C (Roma Fiumicino) e B (Palermo).

Gli impianti presenti all'interno dell'edificio funzionano in condizioni standard e seguendo il periodo di riscaldamento caratteristico di ogni zona climatica: 14 ore di riscaldamento dal 15 ottobre al 15 aprile per Torino, 10 ore da 15 Novembre al 31 Marzo per Fiumicino e 8 ore da dicembre ad fine marzo per Palermo. Gli orari di accensione e spegnimento degli impianti sono stati ipotizzati in base alle consuetudini medie di utilizzo del riscaldamento in Italia. L'impianto d'illuminazione è a sorgenti fluorescenti con funzionamento manuale on-off.

L'edificio baseline viene riqualificato in un edificio nZEB attraverso un incremento delle prestazioni di isolamento dell'involucro, un incremento dell'efficienza dei sistemi illuminanti e tramite l'integrazione di pannelli fotovoltaici in grado di garantire un bilanciamento annuale nullo fra carico e generazione. In particolare, l'isolamento di involucro viene incrementato fino al raggiungimento dei limiti previsti dal D.M. numero 162 del 15 luglio 2015 per le costruzioni realizzate a partire dal 2021 e le superfici vetrate sono sostituite con una vetrocamera dotata di intercapedine di 13 mm riempita con gas Argon e triplo vetro con trattamento basso emissivo. Inoltre, le lampade fluorescenti sono sostituite con lampade a LED.

Lo studio 1 si articola in tre fasi:

- Fase 1) Definizione dei fabbisogni energetici dell'edificio di riferimento nelle diverse località e calcolo dei risparmi energetici conseguibili a seguito della trasformazione in nZEB tramite simulazione dinamica in Energy Plus;
- Fase 2) Modellazione LCA allo scopo di determinare l'incremento di energia e carbonio incorporato a seguito della riqualificazione;
- Fase 3) Calcolo dei payback ambientali e verifica dell'influenza della location.

Studio 5.2

L'obiettivo dello studio 5.2 è minimizzare la life cycle energy di un edificio autonomo completamente elettrico. Il caso studio baseline viene quindi ipotizzato privo di allacciamento a reti energetiche (gas, elettricità) grazie all'installazione di una batteria agli ioni di litio e di un serbatoio per lo stoccaggio di diesel. La batteria permette di stoccare l'energia prodotta da PV mentre il diesel viene utilizzato per alimentare un gruppo di generatori elettrici di piccola taglia che sono alternativamente accessi in caso di necessità: cioè quando c'è richiesta di energia e la batteria è scarica.

L'edificio è stato idealmente posizionato in tre diverse zone climatiche rappresentative del territorio italiano: zona climatica E (Bolzano), C (Roma) e B (Palermo). Il profilo di accensione degli impianti è basata sugli orari medi di funzionamento degli impianti individuate da statistiche ISTAT.

L'edificio di riferimento, ipotizzato autonomo e con performance di involucro ed efficienza degli impianti conformi alla normativa attuale, viene sottoposto a diversi interventi di retrofit riguardanti l'incremento-riduzione dell'isolamento di involucro e di produzione da fonte fotovoltaica.

In particolare, lo studio 2 si articola in quattro fasi:

- Fase 1) Calcolo dei fabbisogni energetici finali (dell'edificio di riferimento e a seguito della variazione degli spessori di isolamento) nelle diverse località tramite Energy Plus;
- Fase 2) Modellazione delle componenti impiantistiche (PV e generatore elettrico) in Matlab per la definizione dei consumi di energia primaria non rinnovabile;
- Fase 3) Integrazione dell'analisi energetica ed LCA in Matlab;
- Fase 4) Calcolo dei minimi riguardanti la Life Cycle Energy dell'edificio.

Caso studio 6: Edificio nZEB prototipo

Il sesto caso studio è un edificio nZEB prototipo di carattere puramente sperimentale e progettato come spazio espositivo (vedi Figura 9). Lo studio riguardante l'edificio è stato sviluppato in collaborazione con l'unità operativa 6, Università degli Studi di Trento. L'edificio è situato a Trento, in zona climatica E.

L'edificio ha una superficie lorda pari a 122 m² ed è caratterizzato da due piani con una scala interna di collegamento. La struttura delle pareti perimetrali è leggera in montanti di legno a cui sono collegati quattro pannelli di isolamento che garantiscono una trasmittanza termica molto bassa (0,117 W/m²K). Anche il tetto è dotato di struttura lignea e di elevato isolamento che garantisce una trasmittanza termica complessiva è pari a 0,149 W/m²K. Anche il solaio intermedio e quello contro terra sono isolanti ed hanno trasmittanze rispettivamente di 0,24 W/m²K e 0,13 W/m²K. La trasmittanza delle finestre è anch'essa ampiamente sotto i limiti imposti dalla normativa italiana ed attualmente vigenti. Il sistema di riscaldamento è alimentato tramite una pompa di calore aria-acqua e i sistemi di emissioni sono pannelli radianti a pavimento per il riscaldamento e ventilconvettori per il raffrescamento. L'impianto è sempre acceso per garantire condizioni di comfort standard all'interno e per scopi sperimentali.

Una superficie pari a 23 m² di pannelli fotovoltaici è in grado di coprire interamente il fabbisogno energetico annuale dell'edificio. La vita utile dell'edificio è supposta pari a 50 anni, come prescritto dalle PCR, mentre quella degli impianti che lo caratterizzano è pari a 20 anni.



Figura 9 – Edificio prototipo – Fotografia in corrispondenza dell'ingresso.

Lo studio ha riguardato la modellazione LCA dell'edificio e un'analisi di sensibilità riguardante alcune metodologie di calcolo utilizzate per il calcolo dei fabbisogni energetici in fase operativa.

Lo studio riguardante il caso studio 6 si articola in quattro fasi:

- Fase 1) Elaborazione dei dati sperimentali riguardanti i profili di carico e generazione dell'edificio;
- Fase 2) Definizione dettagliata dell'inventario di materiali e flussi energetici che hanno riguardato il processo di assemblaggio dell'edificio;
- Fase 3) Analisi LCA dell'edificio;
- Fase 4) Analisi di sensibilità riguardante alcune metodologie operative applicate durante la LCA.

Lo scopo dell'analisi è quello di definire dei valori di riferimento per quanto riguarda i consumi energetici cumulativi e le emissioni climateranti totali nel ciclo di vita di un edificio dalle alte prestazioni energetiche e realizzato con struttura leggera e assemblaggio a secco. La definizione di tali valori può essere utile come riferimento per l'ottimizzazione dei carichi ambientali associati al ciclo di vita di un edificio. Infine, l'analisi si prefigge come obiettivo quello di verificare la sensibilità dei risultati rispetto ad alcuni scenari di decarbonizzazione della produzione di energia elettrica e di modellazione dell'intensità di carbonio connessa al kWh elettrico.

Gli scenari di decarbonizzazione ipotizzati si basano sulla Strategia Energetica Nazionale (2017) che fornisce degli obiettivi per quanto riguarda i futuri mix energetici legati alla produzione di energia elettrica in Italia. L'International Energy Agency ha inoltre fornito alcuni scenari (World Energy Outlook) che sono stati adottati nel presente caso studio e sviluppati come segue:

- Current Policy Scenario (CPS): denominato anche "Base Scenario" nella SEN 2017 considera la continuazione delle politiche sulla decarbonizzazione che sono state già adottate a metà 2017;
- New Policy Scenario (NPS): include le intenzioni annunciate entro la metà del 2017 (incluso l'accordo di Parigi);
- Sustainable Development Scenario (SDS): affronta il cambiamento climatico in accordo con gli obiettivi dell'accordo di Parigi e garantisce una prevalente produzione da fonti rinnovabili entro il 2050.

A partire dai mix energetici ipotizzati dai diversi scenari è stato possibile costruire due curve che rappresentano l'evoluzione del fattore di intensità di carbonio ($\text{kg CO}_2/\text{kWh}_e$) nel tempo. In particolare, la curva blu riportata in Figura 10 rappresenta l'evoluzione del fattore di intensità di carbonio ottenibile attraverso l'implementazione del CPS fino al 2030 mentre la curva rossa di Figura 10 riporta l'intensità di carbonio considerando il NPS sviluppato fino al 2030 e il SDS sviluppato fino al 2050. Una volta raggiunti gli obiettivi prefissati dai diversi scenari il valore di CI è supposto rimanere costante.

Una seconda analisi di sensibilità riguardante i risultati delle emissioni di carbonio sul ciclo di vita è stata condotta considerando diverse metodologie di modellazione del valore di intensità di carbonio: in particolare è stato sviluppato un modello di calcolo stazionario ed uno dinamico. Il modello stazionario considera il valore medio annuale di CI mentre il calcolo dinamico ricostruisce i valori di CI a livello mensile e orario. Figura 11 mostra i valori di CI ottenuti su base mensile. Si osserva come tali valori siano variabili a livello stagionale ed anche a livello orario: nelle ore notturne, ad esempio, il valore di CI tende ad aumentare a causa della minore disponibilità di produzione da PV; tale ridotta disponibilità di produzione da PV si verifica anche nei mesi invernali.

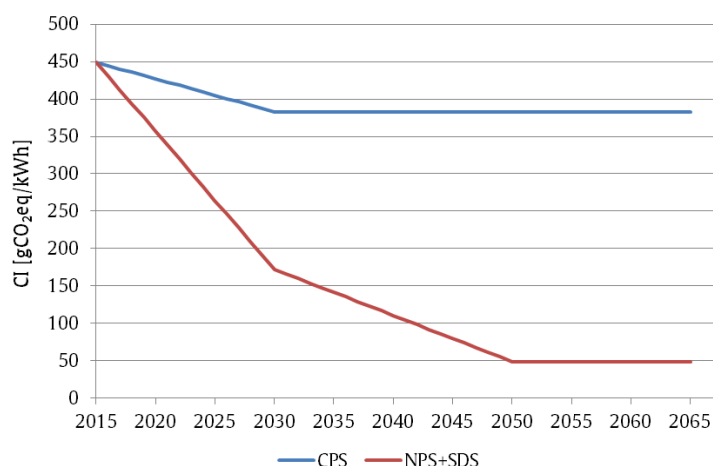


Figura 10. Supposed linear evolution of the Italian CI (blue CPS, red NPS-SDS) for LV electricity.

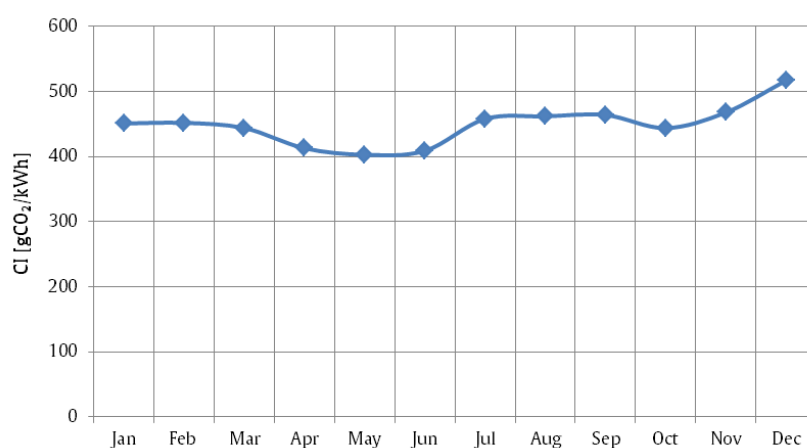


Figura 11. Monthly carbon intensity for low voltage electricity in Italy (2015).

Allo scopo di verificare l'affidabilità dei risultati ottenuti essi sono stati confrontati con dei valori di letteratura riguardanti edifici simili: gli edifici scelti sono situati in Italia e sono caratterizzati da bassi consumi energetici e dall'integrazione di fotovoltaico in modo tale da garantire una adeguata copertura da risorsa rinnovabile. In particolare, è stato selezionato un edificio nZEB prefabbricato (Tumminia 2018), un secondo edificio nZEB prefabbricato (Tumminia 2016), un edificio nZEB (Leaf House, Cellura 2016), un edificio residenziale ad energia netta positiva ricavato da riqualificazione di containers di cui sono ipotizzate tre configurazioni (Schiavoni 2017). Sono inoltre stati scelti due edifici di riferimento: un edificio tradizionale per abitazione unifamiliare (Asdrubali 2016) e l'edificio che rappresenta il caso studio 5 progettato secondo gli standard attuali in vigore in Italia per quanto riguarda l'efficienza energetica (considerando le configurazioni di nelle tre diverse locations). Poiché i risultati da studi diversi sono difficilmente paragonabili a causa delle differenti metodologie e ipotesi applicative messe in atto, sia per quanto riguarda lo sfruttamento di risorse energetiche che per quanto riguarda le emissioni di gas climalteranti, è stata proposta una standardizzazione delle metodologie utilizzate all'interno dei diversi lavori. Tale standardizzazione prevede di trascurare ogni tipo di beneficio, considerato come riduzione dei carichi ambientali, derivante da esportazione di energia PV in rete o da management delle componenti dell'edificio durante il fine vita.

Risultati

Caso studio 1: Palazzo ad uso uffici

Per quanto riguarda il primo caso studio, i calcoli di ottimizzazione sono stati svolti separatamente per ciascun generatore di calore: sono state ottenute tre soluzioni cost-optimal, una per ogni generatore. Il grafico in Figura 12 mostra i risultati dell'ottimizzazione per la soluzione con pompa di calore. I punti di colore rosso rappresentano le soluzioni del fronte di Pareto determinato dalle ultime generazioni dell'algoritmo di ottimizzazione. Il punto rosso più evidente rappresenta la soluzione ottimale dal punto di vista del costo globale.

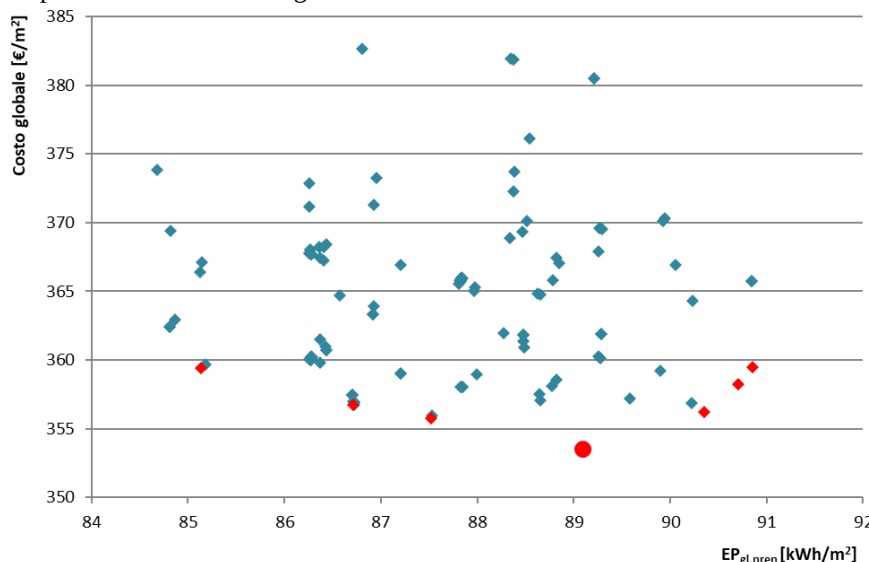


Figura 12 – Edificio per uffici – Pompa di calore. Soluzioni corrispondenti alle generazioni dell'algoritmo di ottimizzazione.

La Figura 13 riporta il differenziale di costo globale, rispetto allo stato di fatto, delle tre soluzioni cost-optimal, una per ciascun generatore analizzato. Dall'immagine si evince che, per una valutazione su 30 anni, la soluzione ottimale in funzione dei costi è rappresentata dalla pompa di calore: con questa soluzione si ottiene una riduzione del costo globale pari a 92 €/m² e del 60% del fabbisogno energetico rispetto allo stato di fatto.

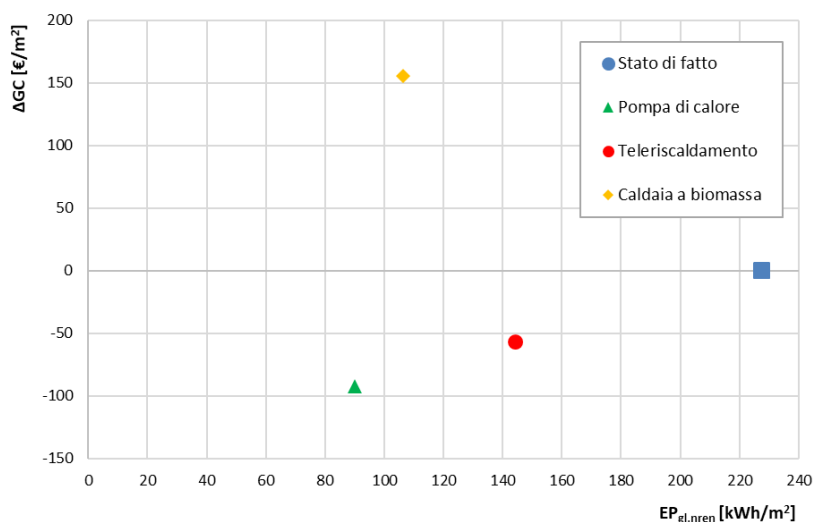


Figura 13 – Edificio per uffici - Differenziale del costo globale (rispetto allo stato di fatto) in relazione all'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile.

Sulla base dei risultati derivanti dalla verifica di conformità alle prescrizioni del D.M. 26 giugno 2015 per la soluzione cost-optimal, si è proceduto a variare i livelli delle misure di efficienza energetica della soluzione stessa affinché l'edificio rispetti i valori limite per il target nZEB: nello specifico, è stato aumentato il livello di isolamento termico delle pareti perimetrali (da 0,30 W/m²K a 0,23 W/m²K) e dei serramenti (da 1,90 W/m²K a 1,40 W/m²K), è stata considerata l'installazione di schermature solari più performanti per gli orientamenti sud, est ed ovest (fattore solare del vetro con schermatura pari a 0,17) ed è stato assunto un livello più alto della potenza di picco del sistema fotovoltaico (15 kWp). La soluzione nZEB determina un ridotto risparmio energetico (4%) rispetto alla soluzione cost-optimal in termini di EP

globale non rinnovabile. Tuttavia, presenta un costo globale superiore alla soluzione cost-optimal di 62 €/m². Dal punto di vista ambientale, le emissioni annue di CO₂ riferite all'edificio riqualificato in nZEB ammontano a 16,6 kg/m². Attraverso un'analisi di sensibilità è stata verificata l'influenza di interventi specifici di riqualificazione sul fabbisogno energetico globale dell'edificio, riqualificato con la soluzione cost-optimal individuata precedentemente. Come mostrano i risultati riportati in Figura 14, la soluzione nZEB, rispetto all'intervento sul solo fabbricato, pur avendo lo stesso livello di EP globale totale, presenta una quota elevata di fabbisogno coperto da fonti rinnovabili. La sola integrazione delle fonti rinnovabili riduce il fabbisogno di energia primaria non rinnovabile del 5%, dato che va ad incidere solo sui consumi elettrici diversi dalla climatizzazione che sono molto ridotti.

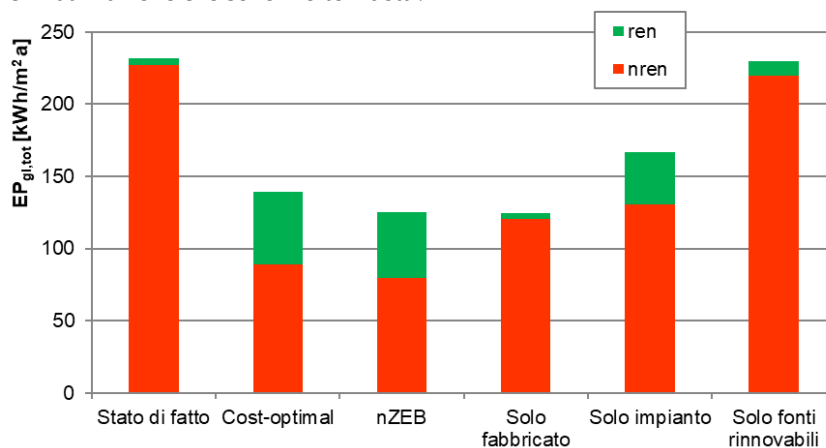


Figura 14 – Edificio per uffici - Risultati dell'analisi di sensibilità per interventi singoli.

Per quanto riguarda la valutazione della qualità dell'ambiente interno, l'attività è stata svolta in due fasi. Di seguito vengono riportati separatamente i risultati di ciascuna fase.

Per quanto riguarda la prima fase, i risultati della ricerca mostrano che i requisiti nZEB relativi all'involucro dell'edificio possono portare a effetti opposti. Infatti, la contropartita dell'annullamento delle ore di discomfort termico è un peggioramento del comfort visivo. La riduzione della superficie vetrata netta e l'aumento delle ostruzioni esterne derivanti dall'aggiunta di 16 cm di isolante termico portano ad una riduzione della penetrazione del sole e al conseguente aumento della domanda di energia elettrica di illuminazione. Infatti, anche se la prestazione energetica complessiva viene ridotta applicando la soluzione nZEB*, la domanda di energia elettrica aumenta del 36%. Applicando un sistema di illuminazione progettato per garantire condizioni di illuminazione confortevoli in base alle esigenze di illuminazione, la domanda di energia luminosa diminuisce del 18%, nonostante la riduzione della luce diurna. I risultati della valutazione della qualità ambientale interna sono riportati rispettivamente nella Figura 15 e nella Figura 16 per il comfort termico e visivo.

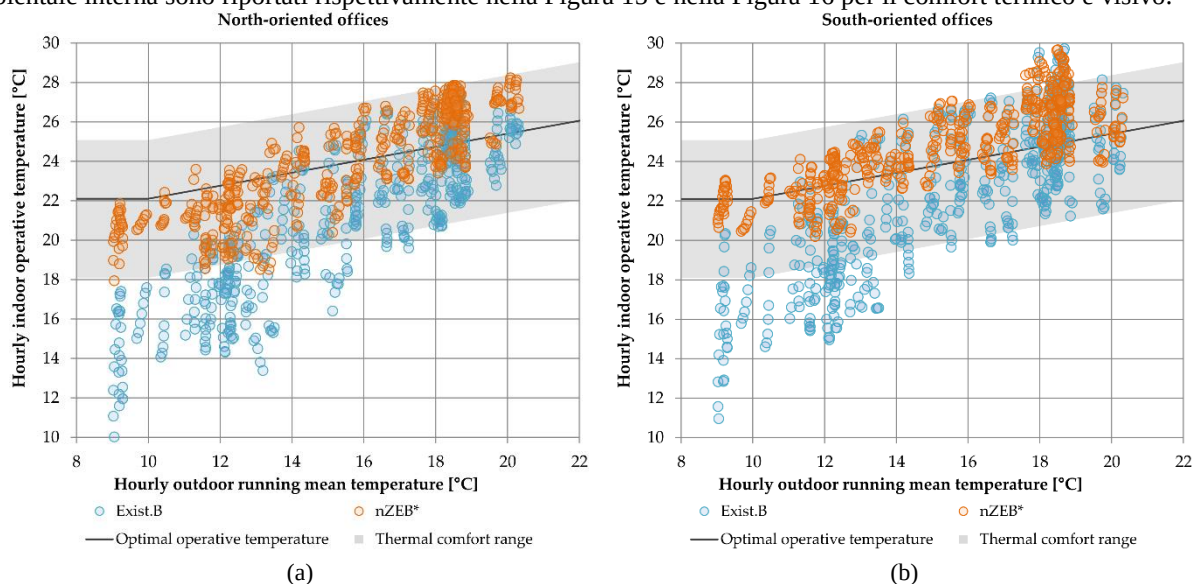


Figura 15 – Edificio per uffici – Ore di free-floating e comfort termico: confronto tra l'edificio alle condizioni esistenti e considerando il retrofit dell'involucro per gli edifici esposti a Nord (a sinistra) e a Sud (a destra).

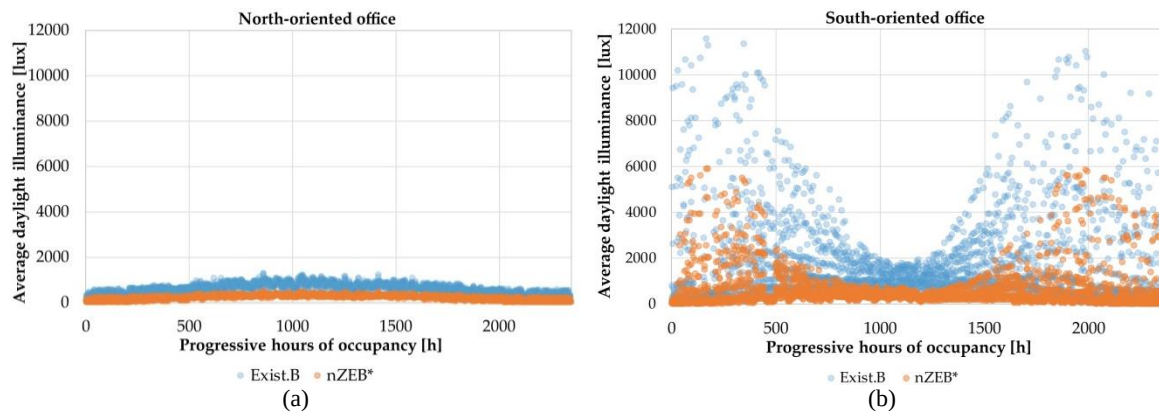


Figura 16 – Edificio per uffici – Illuminamento medio nelle ore di occupazione su base annuale - Confronto tra l'edificio alle condizioni esistenti e considerando il retrofit dell'involucro per gli edifici esposti a Nord (a) e a Sud (b).

Per quanto riguarda la seconda fase, le analisi energetico-ambientali sulle diciotto combinazioni di misure di efficienza energetica mostrano dei risultati interessanti. In primo luogo, la performance termica e visiva è strettamente legata al tipo di controllo applicato alle schermature (Figura 17). Infatti, da un lato le migliori performance termiche si registrano con un controllo della schermatura basato sul comfort termico, sia in termini di qualità dell'ambiente interno che di energia; dall'altro, questo tipo di controllo comporta la peggior performance visiva, in termini di discomfort da abbagliamento. Lo stesso trend si registra se si analizzano le combinazioni con un controllo delle schermature basate sul comfort visivo. Analizzando, invece, i casi con il controllo delle schermature combinato (ottimizzazione del comfort termico e del comfort visivo), è possibile notare un netto miglioramento della performance visiva, mentre la performance termica rimane invariata (rispetto al controllo basato sul comfort termico). I risultati dell'analisi termica, visiva ed energetica condotta sulle combinazioni di misure di efficienza energetica considerate è riportata in Figura 18. Alla luce anche dell'analisi energetica, è possibile affermare che una soluzione ottimale che garantisca il comfort termico, il comfort visivo e il rispetto dei requisiti nZEB può essere individuata. Infatti, la combinazione ottimale è caratterizzata da l'isolamento a cappotto con materiale innovativo (3 cm di VIP), un serramento caratterizzato da un doppio vetro e telaio in PVC (5 cm) e l'operazione dei sistemi di schermatura combinato. Questa combinazione (ISO2-WIN2-SHA3), oltre ad ottimizzare la performance termica e visiva, rappresenta anche una delle soluzioni con performance energetiche migliori.

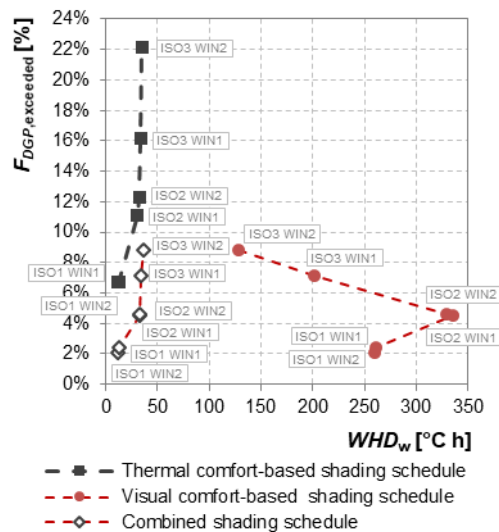


Figura 17 – Edificio per uffici – Indici $F_{DGP,exceeded}$ e WHD_w per le combinazioni testate.

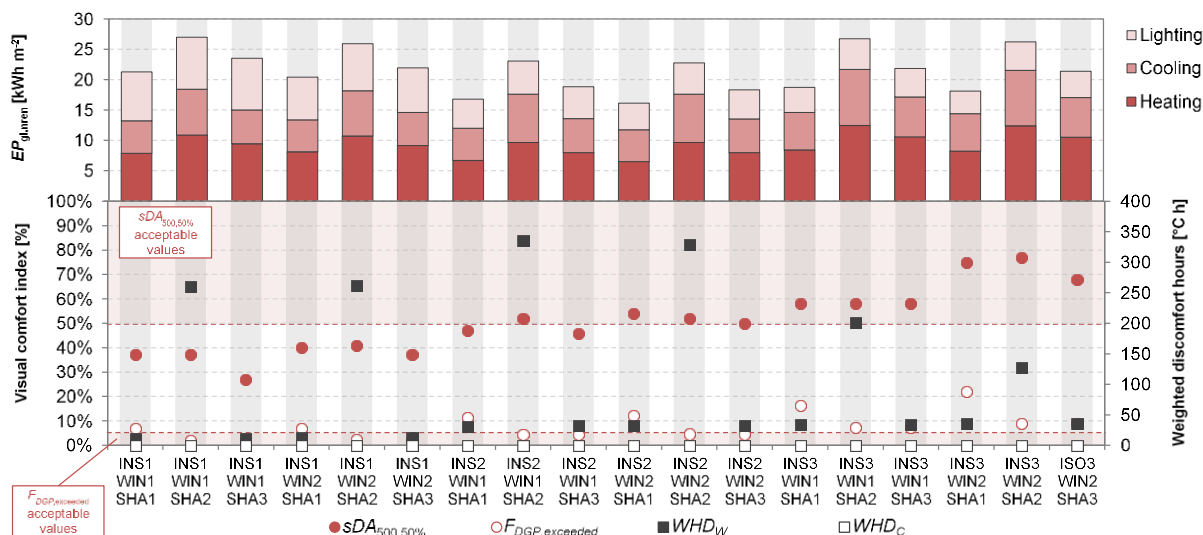


Figura 18 – Edificio per uffici – Risultati dell’analisi termica, visiva ed energetica.

Caso studio 2: Blocco di appartamenti di edilizia popolare

Dal momento che l’edificio considerato è già discretamente performante (discreto livello di isolamento termico, serramenti con vetro-camera e generatori di calore di recente sostituzione), la quasi totalità degli interventi di riqualificazione energetica non risulta essere economicamente conveniente. I migliori risultati sono stati osservati nel caso in cui si decida di mantenere il sistema di generazione attuale, così come il livello di isolamento attuale dell’involucro verticale (sia opaco, sia trasparente). In tal caso, si è osservato che, agendo sull’isolamento dei due solai estremi (verso piano terra e verso sottotetto), e installando un impianto solare termico per la produzione di ACS, è possibile ottenere la soluzione ottimale dal punto di vista economico, che consente una riduzione del costo globale pari a circa 30 €/m² (cost-effective) a fronte di un risparmio energetico di poco inferiore del 20% rispetto allo stato di fatto (Figura 19). L’appartamento-tipo nella configurazione cost-optimal così ottenuta rientra nella classe energetica C, e rispetta solo parte dei requisiti minimi di prestazione energetica richiesti per un intervento di ristrutturazione importante di primo livello (D.M. 26/06/2015).

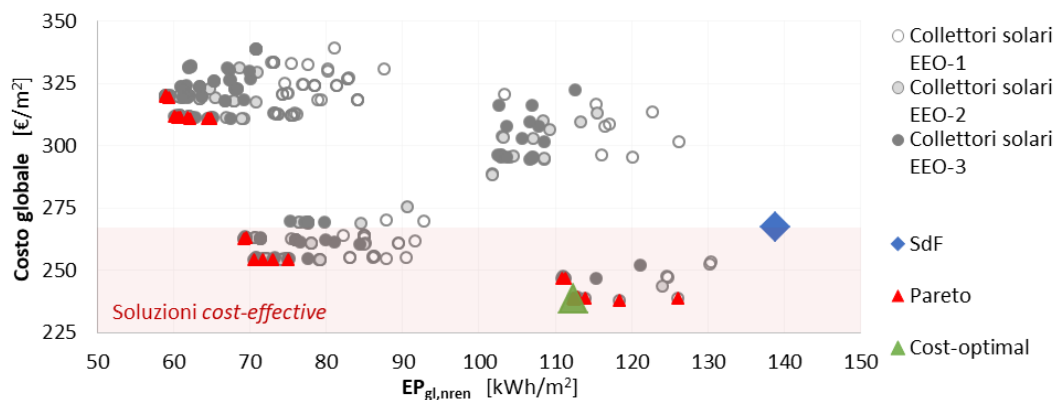


Figura 19 – Blocco di appartamenti – Configurazioni generate dall’algoritmo di ottimizzazione (NSGA2).

La configurazione nZEB è stata invece selezionata considerando come sistema di generazione (sia riscaldamento, sia integrazione ACS da solare termico) una pompa di calore invertibile, e conseguente sostituzione dei terminali di emissione. L’utilizzo di pompe di calore consente, da un lato, un maggiore sfruttamento delle fonti rinnovabili (sia solare termico sia fotovoltaico), dall’altro di prevedere anche il raffrescamento estivo degli appartamenti (il cui contributo va ad influenzare la prestazione energetica globale dell’edificio). La pompa di calore è poi abbinata a tutti i livelli più performanti di intervento sugli altri componenti dell’edificio, escluso l’isolamento dell’involucro opaco. La classe energetica conseguente relativa all’appartamento-tipo è A2, e i requisiti minimi possono considerarsi verificati. La soluzione nZEB comporta un ulteriore risparmio energetico circa del 54% rispetto alla soluzione cost-optimal, che corrisponde però ad un aumento del costo globale dell’investimento, esclusi i costi energetici relativi al periodo estivo, pari a circa il 90% rispetto allo stato di fatto (senza incentivi).

Alcune tra le varie misure di intervento ipotizzate (solai, involucro opaco, solare termico e sistema di generazione) sono state poi analizzate separatamente, tramite un'analisi di sensibilità volta ad individuare quali tecnologie avessero un maggior effetto sulla riduzione dei consumi e del costo globale (Figura 20).

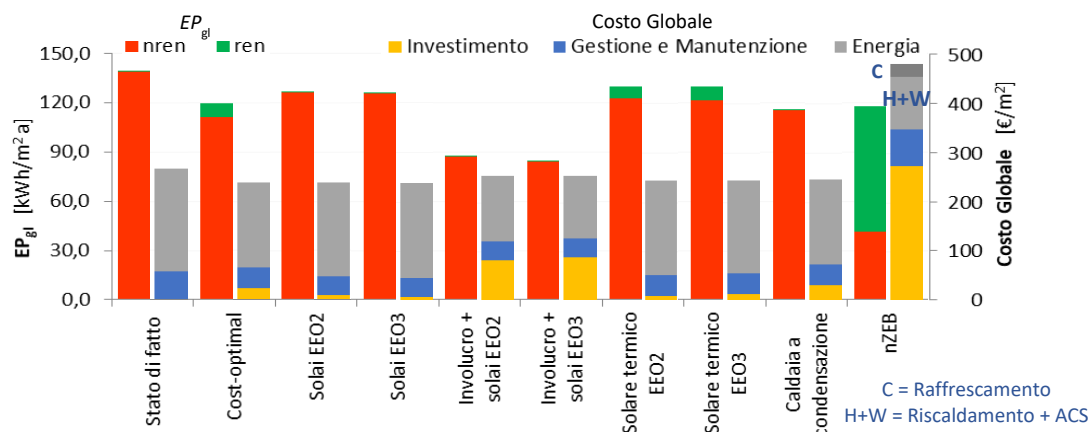
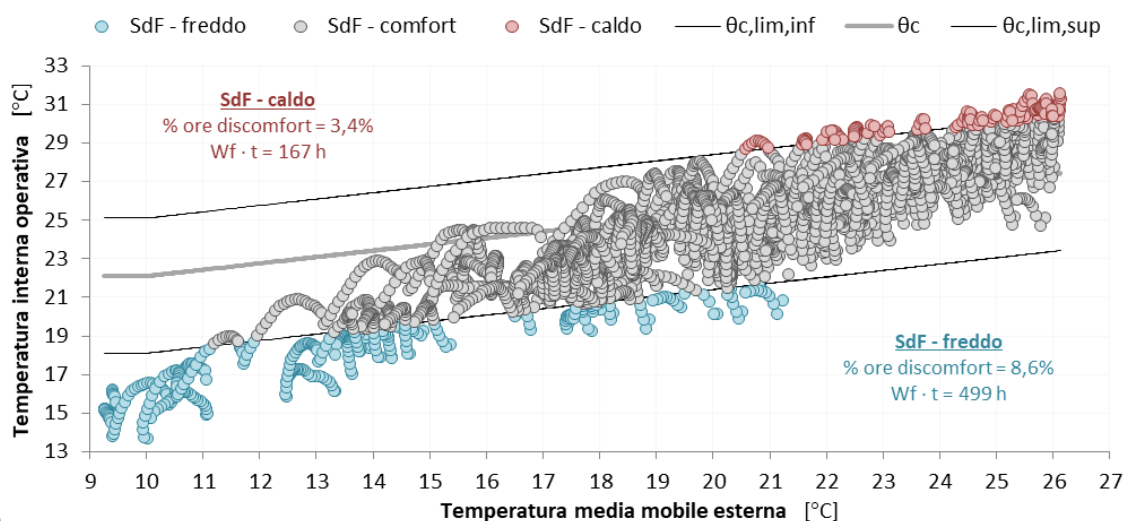


Figura 20 – Blocco di appartamenti – Analisi di sensibilità per le singole tipologie di intervento considerate: $EP_{gl,tot}$ e Costo Globale.

Si è osservato che l'isolamento termico dell'intero involucro opaco (inteso come involucro verticale + primo ed ultimo solaio) rappresenta la soluzione più efficace, consentendo di ottenere un risparmio massimo del 40% sul fabbisogno di energia primaria globale non rinnovabile. Tale risparmio consente ovviamente una forte riduzione del costo relativo all'energia utilizzata dall'edificio, ma purtroppo un intervento di questa entità richiede costi di investimento iniziali molto alti, che portano il costo globale dell'intervento quasi allo stesso livello del costo dello stato di fatto.

Per quanto riguarda l'analisi della qualità dell'ambiente interno, di seguito ne vengono riportati i risultati. Le analisi di comfort di tipo adattivo hanno dimostrato l'efficacia della strategia nZEB* nella riduzione del discomfort freddo, mentre in caso di discomfort caldo l'effetto è minimo, se non controproducente (nel caso delle zone termiche orientate a nord ovest). A seconda della zona termica considerata, la percentuale di ore in discomfort caldo (sulla stagione analizzata) varia da un minimo di 8% ad un massimo di 23%. Si è quindi dimostrata la necessità dell'utilizzo di sistemi di condizionamento estivo. In Figura 21 vengono riportati, a titolo di esempio, i risultati ottenuti per la zona termica 1 al 2° piano.



a)

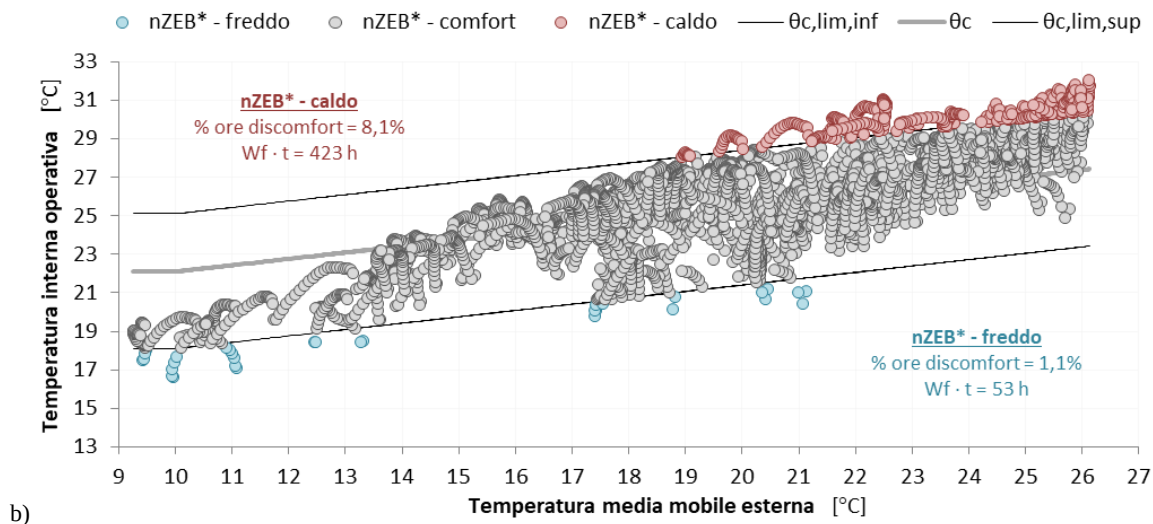


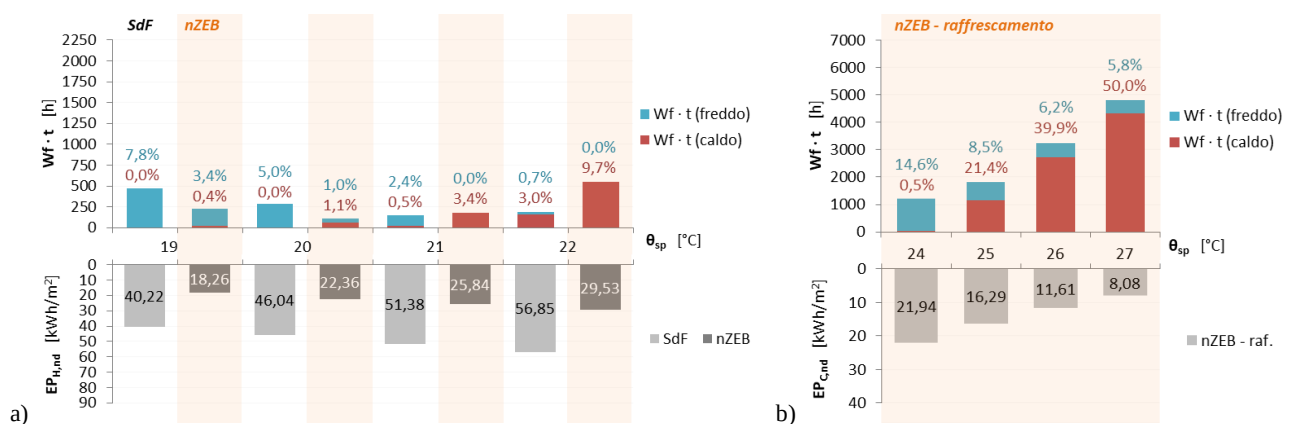
Figura 21 – Blocco di appartamenti – 2°P - ZT1: relazione tra t_o e t_{rm} , con individuazione degli indici di discomfort. a) SdF; b) nZEB.

A questo punto è stata effettuata la verifica del comfort stazionario orario ad impianti accesi: per lo stato di fatto si è considerata la stagione di riscaldamento (15/10 - 15/04), mentre per l'edificio nZEB, l'intero anno (stagione di riscaldamento 15/10 - 15/04 + raffrescamento 16/04 - 14/10). Tale procedura richiede l'assunzione di alcune variabili (attività metabolica, resistenza termica del vestiario e velocità dell'aria interna), e per tale motivo i risultati ottenuti non sono generalizzabili. Sono comunque estremamente utili per capire le potenzialità di variazione del livello di comfort e la sua relazione con i fabbisogni energetici conseguenti. L'analisi è stata effettuata variando la temperatura di set-point di riscaldamento tra 19 °C e 22 °C, e quella di raffrescamento tra 24 °C e 27 °C. I livelli di comfort ottenuti sono stati confrontati con i corrispondenti fabbisogni di energia termica, in modo tale da individuare la temperatura di set-point ottimale anche in funzione dei consumi energetici. Tale temperatura varia in funzione della zona termica, e tende ad essere di un grado più elevata nel caso di edificio allo stato di fatto. In ogni caso, non assume mai il valore di 22 °C (caldo eccessivo).

La configurazione nZEB ha l'effetto costante di ridurre i consumi (tra il 30% e il 60% a seconda della zona termica), il discomfort totale e il discomfort freddo, mentre il discomfort caldo tende ad aumentare per appartamenti orientati a nord-ovest e a diminuire per quelli orientati a sud-est.

Per quanto riguarda il periodo di raffrescamento, si è osservato come, in caso di livelli di isolamento molto elevati (target nZEB), sia necessario utilizzare una temperatura di set-point di 25°C (un grado in meno rispetto a quella comunemente utilizzata per la progettazione estiva).

Analogamente all'analisi precedente, si riportano in Figura 22 i risultati relativi alla zona termica 1 al 2° piano, e alla zona termica 5 al quinto piano.



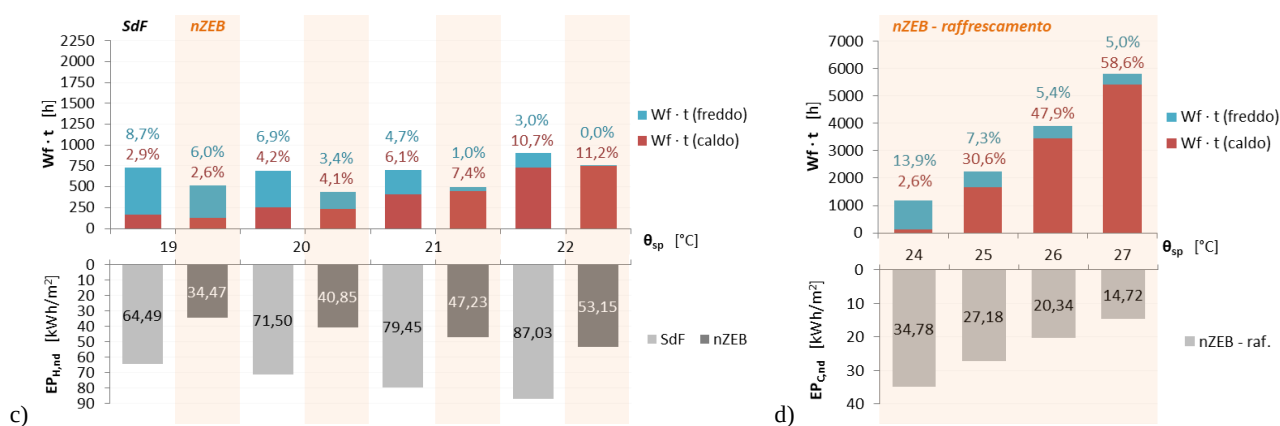


Figura 22 – Blocco di appartamenti – Relazione tra discomfort e fabbisogni al variare di θ_{sp} . a) 2°C - ZT1 riscaldamento; b) 2°C - ZT1 raffreddamento; c) 5°C - ZT5 riscaldamento; d) 5°C - ZT5 raffreddamento.

Caso studio 3: Plesso scolastico

Per quanto riguarda il terzo caso studio, in attesa dei risultati dell'ottimizzazione con simulazione dinamica dettagliata, si riportano quelli derivanti da una valutazione preliminare condotta con il metodo di calcolo semi-stazionario (UNI/TS 11300) associato ad un modello di ottimizzazione sviluppato sui principi teorici di Christensen et al. (2006). Il modello si basa su una tecnica di ricerca dell'ottimo secondo un processo sequenziale con definizione intermedia di ottimi parziali (Figura 23).

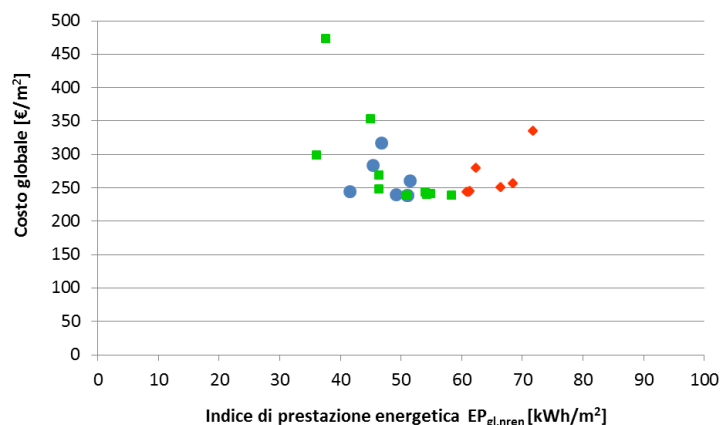


Figura 23 – Complesso scolastico – Risultati della cost-optimisation.

La Figura 24 riporta il differenziale di costo globale rispetto allo stato di fatto, delle soluzioni cost-optimal ed nZEB. Dall'immagine si evince come per una valutazione su 30 anni, la soluzione ottimale in funzione dei costi ottenga una riduzione del costo globale di soli 114 €/m². Mentre le soluzioni nZEB1 ed nZEB2 risultano ancora efficaci in termini di costo, la soluzione che prevede l'utilizzo del generatore a biomassa ottiene un ΔGC positivo, e quindi non può essere considerata *cost-effective*.

Attraverso un'analisi parametrica è stata indagata l'influenza di ciascuna misura di efficienza energetica sulla prestazione dell'edificio. Dell'edificio riqualificato secondo il target nZEB, sono state analizzate separatamente le seguenti misure di efficienza energetica (Figura 25): isolamento dell'involucro opaco e trasparente (OP+W); installazione di schermature solari (SH); ventilazione meccanica con recupero di calore (VMC); sostituzione del generatore con pompa di calore (HP); sostituzione del generatore con caldaia a biomassa (BIO); sostituzione del generatore con pompa di calore, in abbinamento a pannelli fotovoltaici e collettori solari termici per ACS (HP+PV+TS).

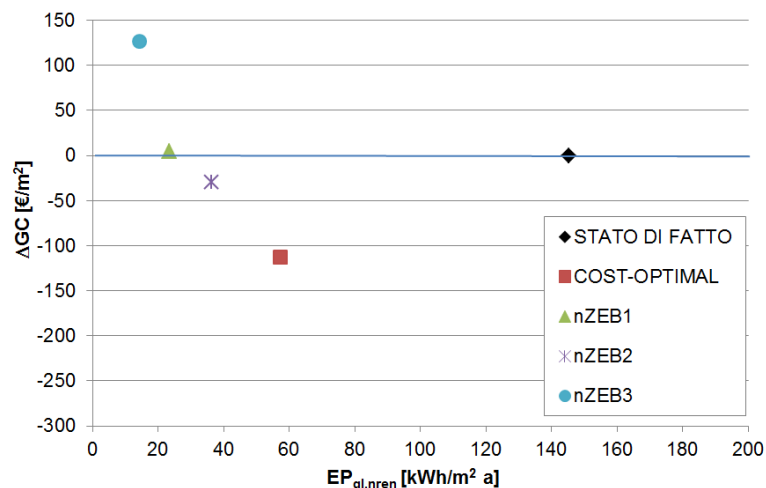


Figura 24 – Complesso scolastico - Differenziale del costo globale (rispetto allo stato di fatto) in relazione all'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile.

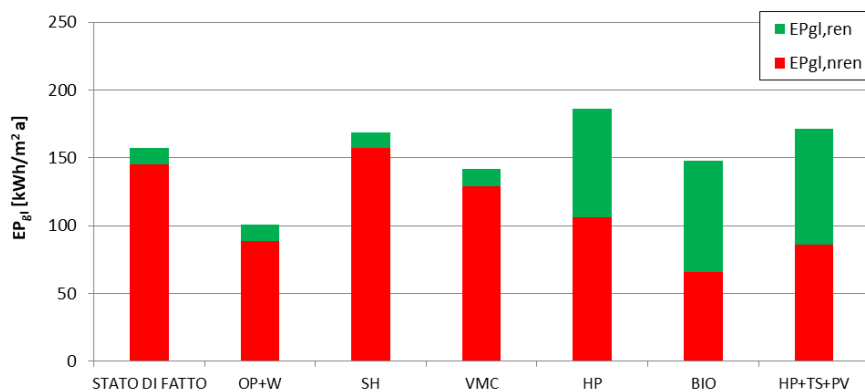


Figura 25 – Complesso scolastico - Risultati dell'analisi di sensibilità per interventi singoli.

A seguito dell'analisi energetica è stata sviluppata una LCA che ha permesso di calcolare i payback ambientali e confrontarli con quelli economici come riportato in Figura 26. Si può osservare come i tempi di ritorno economici risultano essere sempre superiori rispetto a quelli energetici e riguardanti le emissioni equivalenti di carbonio. Inoltre la soluzione ottimale da un punto di vista dei costi risulta essere anche quella caratterizzata dai tempi di ritorno LCA più bassi. La soluzione *cost-effective* rappresenta quindi l'ipotesi di retrofit più efficace sotto tutti i punti di vista (economico, energetico ed ambientale) con bassi costi/carichi ambientali iniziali ed elevati potenziali di risparmio economico/energetico e, di conseguenza, di emissioni climalteranti.

La Figura 27 riporta i valori dei payback energetici ottenuti per ogni misura di efficienza energetica adottata all'interno dei diversi scenari di retrofit. Gli interventi di retrofit hanno tempi di ritorno diversi ed alcuni mostrano un'efficacia maggiore. Gli interventi sull'involucro, ad esempio, sono meno desiderabili poiché hanno un tempo di ritorno molto elevato mentre gli interventi riguardanti gli impianti (installazione di pompe di calore, impianti fotovoltaici, caldaie a biomassa) sono notevolmente più competitivi. L'intervento con più basso payback energetico è quello riguardante la sostituzione delle lampade fluorescenti con lampade LED. Viene infine riportato in Figura 28 il risparmio cumulativo di energia conseguibile nel tempo dopo l'implementazione di ogni misura di efficienza energetica adottata. I risultati dimostrano che alcuni interventi hanno un potenziale in termini di risparmio energetico maggiore all'interno del ciclo di vita di un edificio.

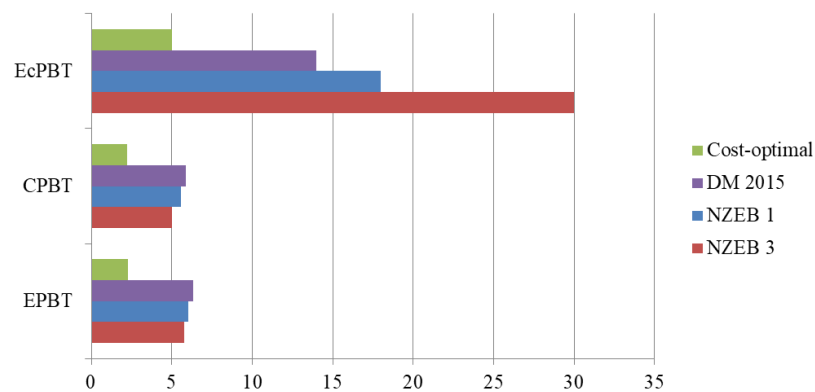


Figura 26 – Paragone fra payback economici (EcPBT), energetici (EPBT) ed ambientali (CPBT).

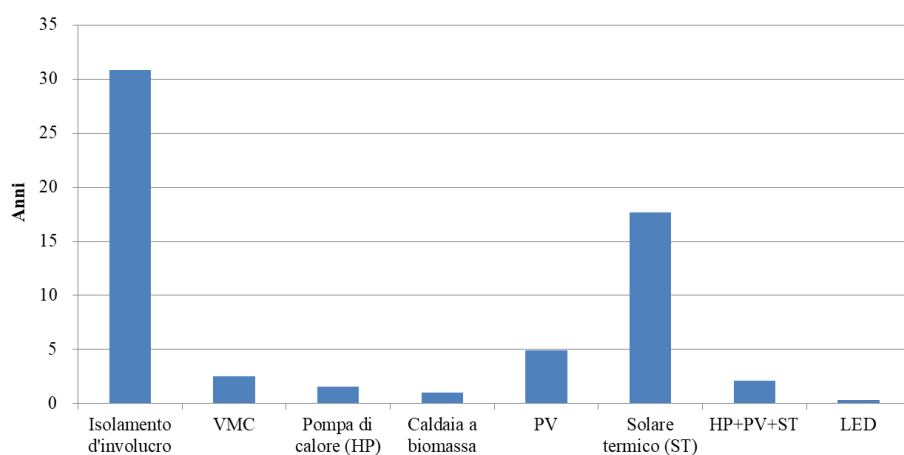


Figura 27 – Payback energetico per le diverse misure di efficienza energetica adottate.

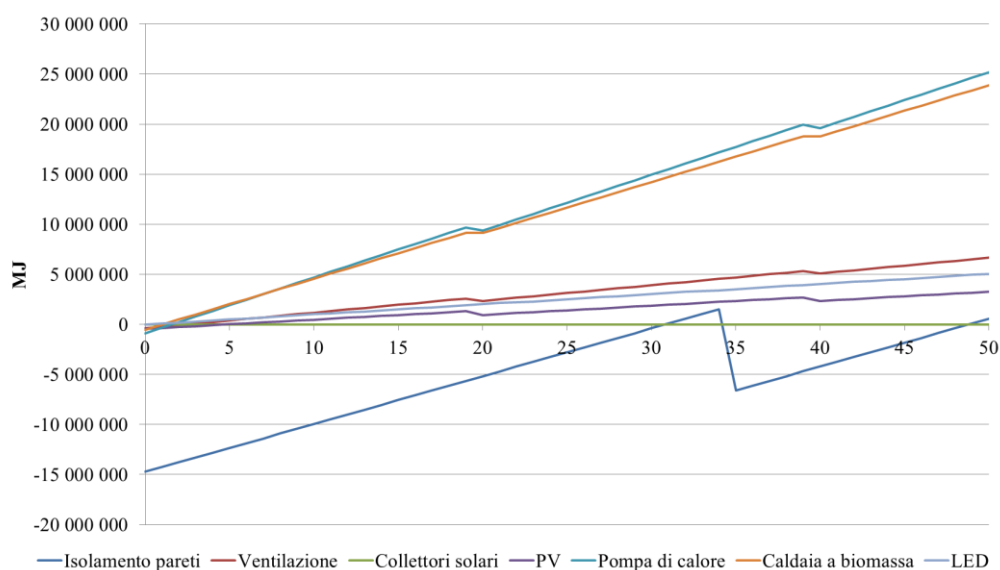


Figura 28 – Energia Cumulativa risparmiata (valori positivi) nel tempo dagli interventi di retrofit adottati..

Caso studio 4: Edificio di riferimento ad uso uffici

Per quanto riguarda l'edificio di riferimento ad uso uffici, la procedura di ottimizzazione, sulla base dei costi di investimento e dell'energia risparmiata, sfavorisce gli interventi di isolamento termico a favore di impianti efficienti ma meno costosi, caratterizzati dal sistema multi-split per il raffrescamento, dalla caldaia a condensazione per il riscaldamento e la produzione di acqua calda sanitaria, e dall'impianto fotovoltaico. Per quanto riguarda la verifica dei requisiti legislativi, le soluzioni *cost-optimal* non soddisfano i requisiti relativi all'involucro (in nessuna delle due zone climatiche), ma garantiscono il soddisfacimento della maggior parte dei requisiti relativi agli impianti, fatta esclusione della copertura da fonti rinnovabili.

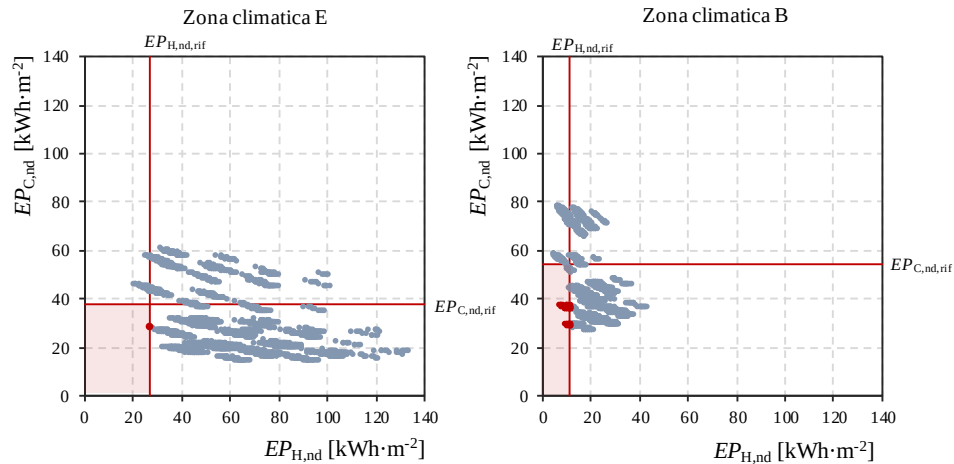


Figura 29 – Edificio di riferimento ad uso uffici – Configurazioni delle opzioni di efficienza energetica del fabbricato a confronto con i limiti di legge.

In Figura 29 vengono riportati i risultati dell'analisi parametrica relativa al fabbricato dell'edificio in esame. Dall'analisi della Figura 29 è possibile avanzare le seguenti considerazioni: per la zona climatica E, una sola combinazione di EEO (pari allo 0,04% dei casi analizzati) rispetta i requisiti, mentre in zona climatica B, il rispetto dei requisiti viene garantito dal 3,2% dei casi; in zona climatica E, l'unica configurazione che rispetta i requisiti legislativi relativi al fabbricato è caratterizzata dal massimo livello di isolamento termico di ciascun componente d'involucro e dalla presenza di schermature solari mobili; in zona climatica B, per effetto di un valore limite di H'T troppo restrittivo e di gran lunga inferiore a quello dell'edificio di riferimento, è sempre necessario un livello di isolamento termico pari o superiore a quello dell'edificio di riferimento; per quanto riguarda il comportamento termico estivo dell'edificio in esame e sulla base dei risultati ottenuti, è quindi possibile affermare – per entrambe le zone climatiche – che il rispetto dell'area solare equivalente estiva per unità di superficie utile di pavimento viene garantito solo tramite la combinazione di serramenti molto performanti con schermature solari, sia mobili che sia fisse.

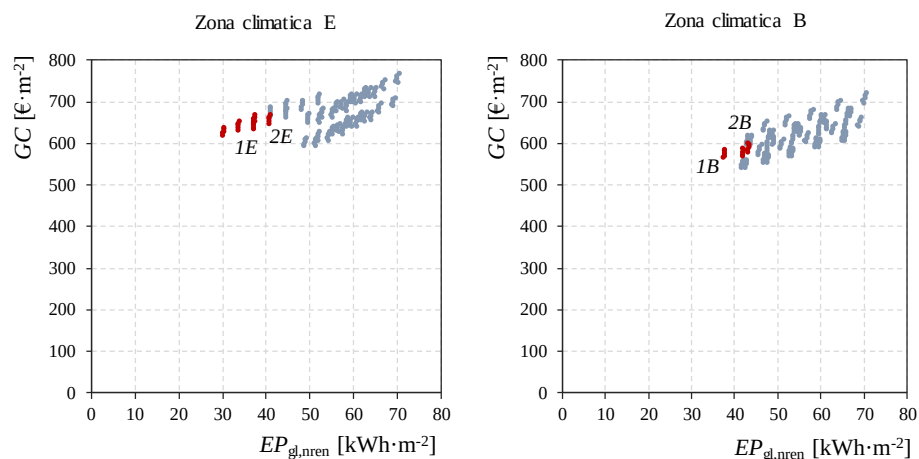


Figura 30 – Edificio di riferimento ad uso uffici – Configurazioni delle opzioni di efficienza energetica degli impianti: indice di prestazione energetica globale non rinnovabile e costo globale.

L'analisi parametrica per l'intero sistema fabbricato-impianto è stata svolta, per ciascuna zona climatica, a partire da una configurazione d'involucro che rispetta la totalità dei requisiti legislativi sopra citati. Per la zona climatica E è stata scelta l'unica configurazione che soddisfa tutti i requisiti. Per la zona climatica B, la configurazione d'involucro scelta è quella che più si avvicina al livello di isolamento termico dell'edificio di riferimento del D.M. 26/06/2015. In Figura 30, i punti di colore rosso rappresentano le combinazioni di EEO che permettono il rispetto di tutti i requisiti legislativi, relativi sia all'involucro edilizio sia agli impianti. In generale, è possibile affermare – per entrambe le zone climatiche – che il rispetto dei requisiti legislativi sugli impianti termici è fortemente condizionato dal rispetto della copertura del fabbisogno da fonti

rinnovabili. Infatti, mentre i valori minimi delle efficienze medie stagionali degli impianti di climatizzazione invernale, estiva e di produzione di acqua calda sanitaria vengono verificati dal 75% delle combinazioni testate, la copertura minima del fabbisogno energetico da fonti rinnovabili (sia RER H+C+W, sia RERW) viene garantita solo dal 12,5% (Milano) e dal 7,5% (Palermo) delle combinazioni. Le uniche configurazioni di soluzioni impiantistiche che permettono il rispetto della totalità dei requisiti legislativi (punti rossi in Figura 30) sono quelle che associano la pompa di calore a compressione per gli usi riscaldamento, raffrescamento e produzione di acqua calda sanitaria, con l'impianto fotovoltaico caratterizzato da valori di potenza di picco superiori alla minima prescritta dal D. Lgs. 28/2011. Confrontate con le soluzioni *cost-optimal*, le configurazioni verificate dal D.M. 26/06/2015 portano a costi globali molto superiori, ma rappresentano soluzioni più efficienti dal punto di vista energetico. Infatti, per la zona climatica E, le soluzioni che soddisfano i requisiti portano ad un aumento del costo globale che varia tra il 29% e il 39%, ma a riduzioni dell'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile dell'edificio che varia tra il 7% e il 19%. In zona climatica B, invece, si tratta di incrementi tra il 25% e il 33% del costo globale, a fronte di decrementi tra il 3% e l'8% dell'energia primaria non rinnovabile.

Caso studio 5: Edificio prototipo ideale ad uso residenziale

Studio 5.1

Lo studio 5.1 ha permesso di determinare l'entità dell'incremento delle componenti di Embodied Energy e Carbon a seguito del retrofit a nZEB e i relativi valori di payback energetico ed ambientale ottenibili a causa della riduzione dei consumi in fase operativa.

In primo luogo, è stata determinata l'incidenza delle diverse fasi di ciclo di vita dell'edificio. Ipotizzando una vita utile dell'edificio pari a 60 anni, la fase d'uso contribuisce in media alla percentuale maggiore del consumo energetico globale (65%), mentre la componente incorporata contribuisce per il 33% e il fine vita si attesta al 2%. Simili risultati si hanno per gli impatti derivanti dalle emissioni climalteranti: componente di carbonio incorporato al 36%, contributo delle emissioni in fase d'uso pari al 60% e fine vita al 4%.

Nel dettaglio, l'energia incorporata all'edificio risulta pari a:

- » 60 kWh/m²a per l'edificio situato a Torino
- » 58 kWh/m²a per l'edificio situato a Roma Fiumicino
- » 57 kWh/m²a per l'edificio situato a Palermo

L'energia primaria richiesta dall'edificio in fase operativa risulta pari a:

- » 129 kWh/m²a per l'edificio situato a Torino
- » 109 kWh/m²a per l'edificio situato a Roma Fiumicino
- » 120 kWh/m²a per l'edificio situato a Palermo

L'energia di fine vita risulta uguale a:

- » 4 kWh/m²a per l'edificio situato a Torino
- » 4 kWh/m²a per l'edificio situato a Roma Fiumicino
- » 4 kWh/m²a per l'edificio situato a Palermo

Per quanto riguarda la valutazione delle emissioni di gas climalteranti all'interno del ciclo di vita dell'edificio sono stati ottenuti i seguenti risultati per la componente incorporata:

- » 14,1 kg CO₂eq per l'edificio situato a Torino
- » 13,8 kg CO₂eq per l'edificio situato a Roma Fiumicino
- » 13,6 kg CO₂eq per l'edificio situato a Palermo

Le emissioni in fase d'uso dell'edificio risultano pari a:

- » 25,0 kg CO₂eq per l'edificio situato a Torino
- » 21,3 kg CO₂eq per l'edificio situato a Roma Fiumicino
- » 23,4 kg CO₂eq per l'edificio situato a Palermo

Il fine vita dell'edificio genera un quantitativo di emissioni uguali a:

- » 1,8 kg CO₂eq per l'edificio situato a Torino
- » 2,0 kg CO₂eq per l'edificio situato a Roma Fiumicino
- » 1,8 kg CO₂eq per l'edificio situato a Palermo

L'entità del trasferimento degli impatti a seguito della riqualificazione a nZEB consiste in un incremento dell'energia incorporata pari in media al 26%. Si osserva un incremento maggiore a Torino (+31%) a causa della maggiore richiesta di isolamento di involucro e della necessità di una maggiore superficie fotovoltaica per il raggiungimento del target nZEB. A Roma Fiumicino e Palermo l'incremento di energia incorporata è pari rispettivamente al 25% e 22%. Similmente l'incremento della componente incorporata delle emissioni climalteranti è in media pari al 19%: +21% a Torino, +18% a Roma e +16% a Palermo.

Tale trasferimento degli impatti risulta essere solo temporaneo poiché i payback ambientali sono inferiori rispetto alla vita utile dell'edificio e delle singole componenti caratterizzanti la riqualificazione (isolanti ed impianti). I valori dei tempi di ritorno energetico e della CO₂ calcolati sono riportati in Figura 31. Payback più bassi sono stati ottenuti per l'edificio situato a Palermo a causa del maggior irraggiamento solare su superficie orizzontale caratterizzante la zona che

incrementa la produzione fotovoltaica, i risparmi conseguibili dall'introduzione dell'impianto fotovoltaico e riduce l'energia incorporata aggiuntiva necessaria per il raggiungimento dello standard nZEB.

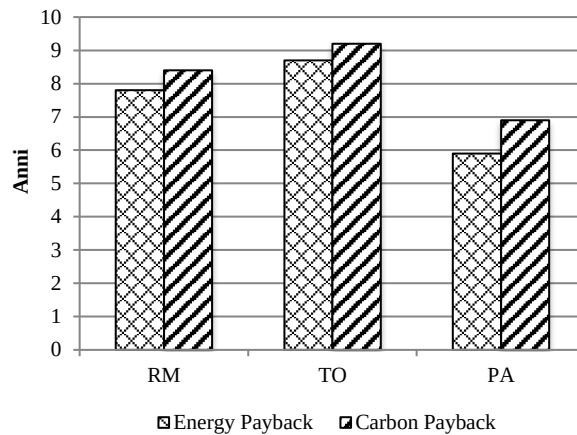


Figura 31 – Tempi di ritorno per la trasformazione in nZEB del caso studio in tre diverse città italiane.

Studio 5.2

Il caso studio 5.2 è stato impiegato anche per un'ulteriore analisi riguardante la ricerca di una soluzione di minimo per quanto riguarda l'energia cumulativa di ciclo di vita (LCE) in caso di edificio completamente autonomo da reti di distribuzione dell'energia elettrica.

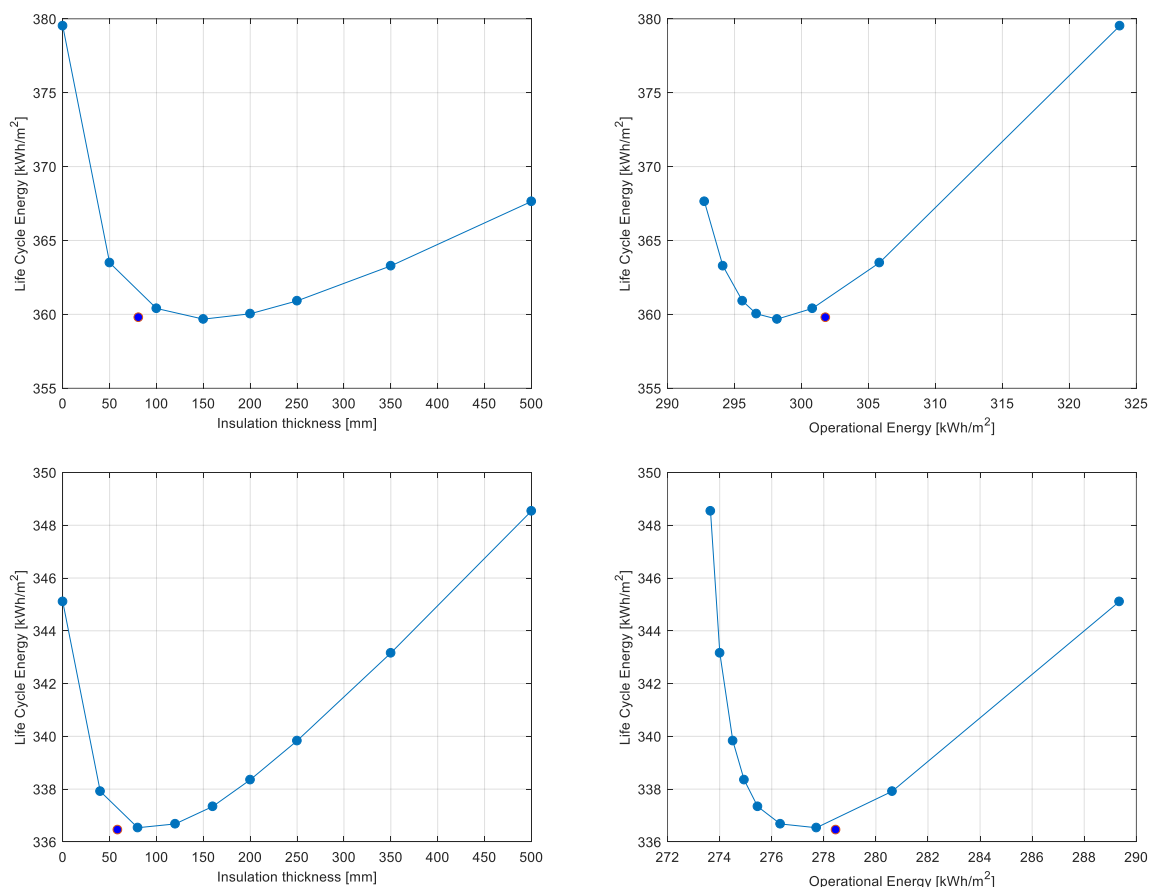


Figura 32 – Energia di ciclo di vita per a seguito della variazione di isolamento dell'involucro (BZ sopra – RM sotto).

Figura 32 riporta la Life Cycle Energy dell'edificio al variare dello spessore di isolamento di tetto e pareti verticali (a sinistra) e quindi della sua energia operativa (a destra). Si osserva come un incremento dello spessore di isolamento oltre il livello ottimale provochi un incremento della Life Cycle Energy del sistema con una relazione non lineare. Tale incremento si traduce inevitabilmente in un aumento del costo dell'edificio sul ciclo di vita. Il punto blu scuro riportato in Figura 32 rappresenta la media ponderata, rispetto alla superficie d'involucro, degli spessori necessari a garantire il

rispetto dei limiti di trasmittanza termica individuati dal D.M. 162 del 2015. Per edifici autonomi tali limiti non rappresentano la soluzione ottimale ed un incremento di isolamento può contribuire alla riduzione della LCE.

Allo scopo di ulteriormente ridurre l'energia operativa dell'edificio è stato ipotizzato di installare una quantità crescente di pannelli fotovoltaici (da 1 a 20 unità) e di immagazzinare tutta l'energia prodotta da PV in uno storage di taglia crescente. Il modello analizza quindi l'edificio considerando variabile sia lo spessore di isolante, sia il numero di pannelli fotovoltaici installati che influenzano la taglia dello storage. La Figura 33 riporta i valori di Life Cycle Energy del sistema isolamento-PV-storage al variare del numero di pannelli e di spessore di isolante. Da essa si evince che il livello ottimale si raggiunge per un numero di pannelli variabile in funzione della località (8 pannelli a BZ, 6 a RM e V a PA che corrispondono ad una capacità della batteria pari a circa 3 kWh). Figura 33 mostra inoltre che, oltre tale livello ottimale, l'installazione del complesso sistema di storage dell'energia fotovoltaica sia in grado di ridurre l'energia operativa solo a spese di un incremento considerevole di quella di ciclo di vita. Tale incremento risulta non lineare. La sensibilità dei risultati di Life Cycle Energy rispetto allo spessore di isolamento è molto bassa e gli spessori prescritti da normativa possono essere considerati ottimali. Infine, la configurazione che garantisce il raggiungimento dell'edificio nZEB si caratterizza per un livello di Life Cycle Energy molto superiore rispetto al valore di minimo.

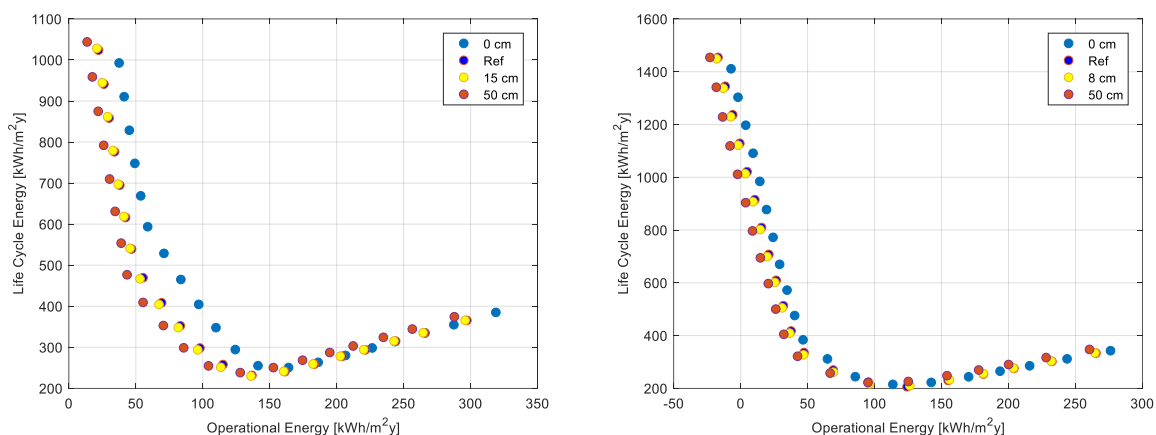


Figura 33 – Energia di ciclo di vita a seguito della variazione di spessore di isolante e del numero di pannelli (BZ a sinistra – RM a destra).

Caso studio 6: Edificio nZEB prototipo

L'accurato sistema di monitoraggio che è stato installato all'interno dell'edificio ha permesso di determinare i profili orari di carico e generazione fotovoltaica. Il consumo totale di energia finale dell'edificio risulta pari a 36,4 kWh/m²a di cui 19,1 kWh/m²a per il riscaldamento e 17,3 kWh/m²a per il raffrescamento. La produzione annuale di energia elettrica da fotovoltaico è uguale a 44,1 kWh/m²a che risulta superiore rispetto ai carichi energetici dell'edificio che può quindi essere considerato un nearly Zero Energy Building. Un sensibile mismatch fra energia prodotta e carichi dell'edificio è stato rintracciato e ciò rende positivo il bilanciamento fra energia importata ed esportata positivo (l'edificio è dipendente per circa il 60% del suo fabbisogno dalla rete). A seguito dell'analisi dei dati riguardanti il fabbisogno energetico dell'edificio è stata condotta un'analisi LCA dettagliata allo scopo di determinare la domanda cumulativa di energia e il totale delle emissioni di CO₂ equivalenti caratterizzanti l'intero ciclo di vita della costruzione.

Le Figure Y1 e Y2 riportano i risultati ottenuti per la Cumulative Energy Demand (CED) e il Global Warming Potential (GWP) distinti per componenti incorporate, operative e di fine vita.

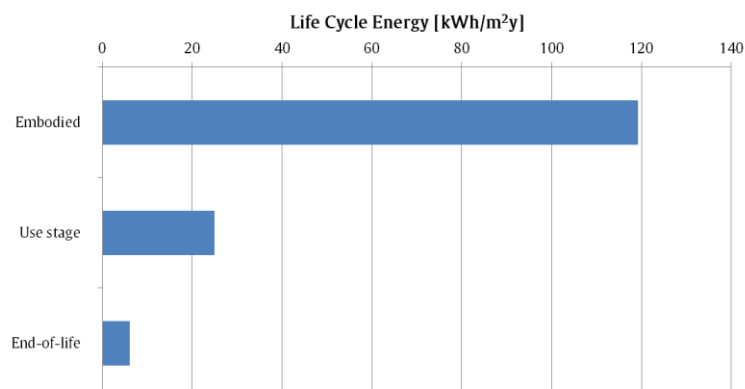


Figura 34 – Bilanciamento energetico all'interno del ciclo di vita.

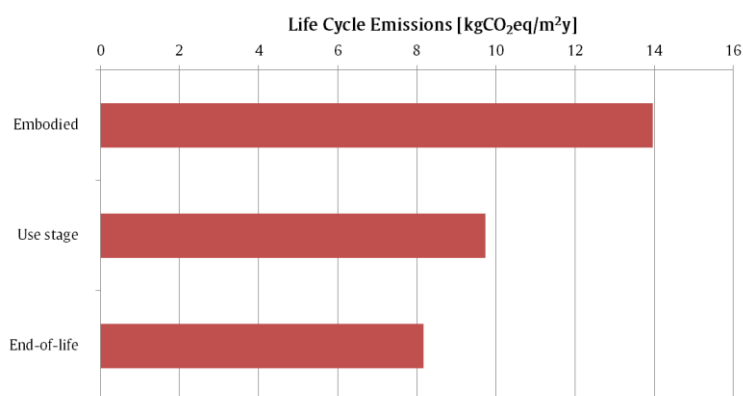


Figura 35 – Bilanciamento delle emissioni all'interno del ciclo di vita.

Come si può osservare la componente incorporata dell'energia è la prevalente all'interno del ciclo di vita (79%), seguita dalla componente legata alla fase operativa (17%) e dal fine vita (4%). Per quanto riguarda il bilanciamento delle emissioni il contributo maggiore è dato dal carbonio incorporato all'edificio (44%) seguito dalle emissioni legate alla fase operativa (31%) e da quelle connesse al fine vita (25%). L'incidenza più rilevante della fase di fine vita nel bilanciamento delle emissioni rispetto a quello energetico è legata al rilascio del carbonio biogenico dei prodotti lignei che sono inceneriti dopo la dismissione della costruzione.

Il bilanciamento sia energetico che delle emissioni di edifici tradizionali vede una larga prevalenza della componente legata alla fase operativa dell'edificio: sono rintracciabili diversi studi di letteratura che confermano uno share degli impatti legati alla fase d'uso variabile fra il 70% e il 90%. La prevalenza delle componenti incorporate all'interno della LCA del caso studio dimostra la presenza di un trasferimento dei carichi ambientali da una fase all'altra del ciclo di vita. Tale trasferimento dei carichi genera dei benefici sia da un punto di vista energetico che ambientale solo se viene ridotto l'impatto globale dell'edificio.

I risultati dell'analisi di sensitività mostrano l'entità della variazione delle emissioni di carbonio sul ciclo di vita dell'edificio considerando diversi scenari di decarbonizzazione e modellazione dell'intensità di carbonio connessa al kWh elettrico. La massima riduzione degli impatti globali ricavabile considerando uno scenario di forte decarbonizzazione e di nuove politiche di incentivo per lo sviluppo delle risorse rinnovabili nella produzione di energia elettrica è pari al 20% (vedi Figura 36). Questo risultato conferma l'elevata incertezza dei risultati riguardanti la LCA di edifici. La loro lunga vita utile, infatti, genera la necessità di ipotesi riguardanti scenari futuri che provocano elevata aleatorietà. La sensibilità dei risultati rispetto al metodo di modellazione dipende fortemente dal time step della simulazione: una aggregazione mensile dei dati, sia energetici che riguardanti la CI, sottostima pesantemente le emissioni come si può osservare dalla Figura 37. La simulazione dinamica oraria permette, invece, di quantificare le emissioni in modo più accurato ed di evitare rilevanti sottostime.

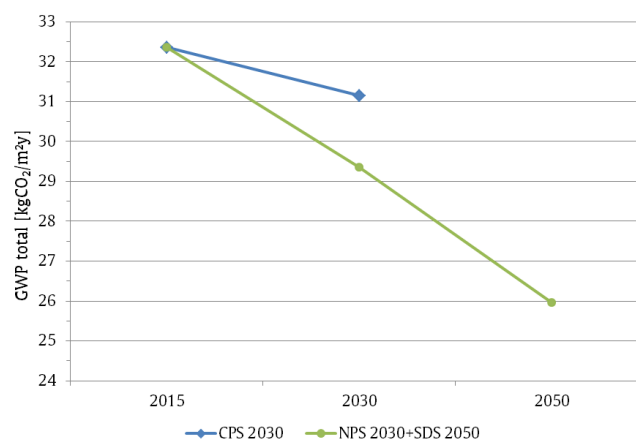


Fig. 36. GWP dell'edificio considerando diversi scenari di decarbonizzazione.

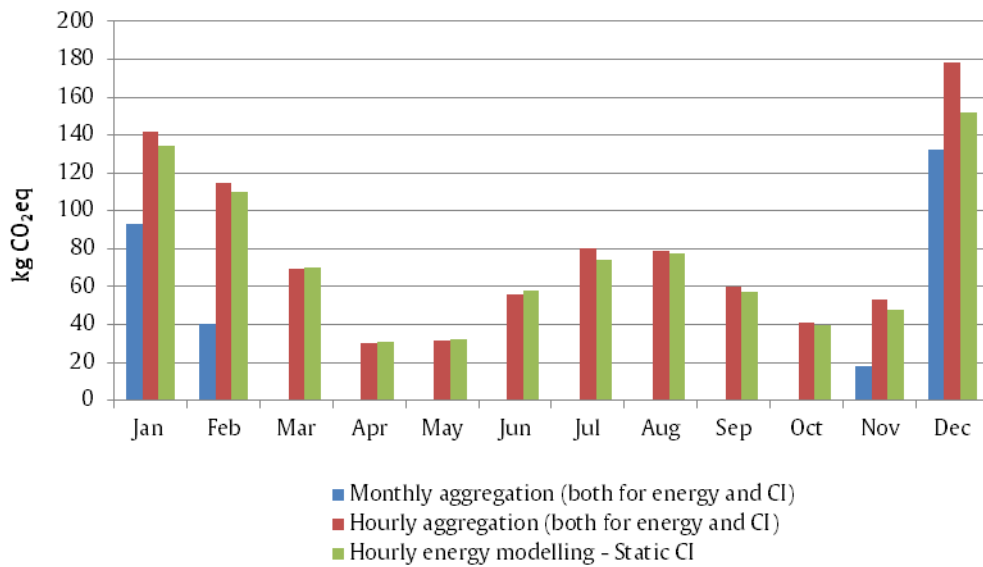


Fig. 37. Emissioni mensili totali con diversi periodi di aggregazione per i dati riguardanti i carichi e la CI.

Il confronto con altri studi di letteratura riguardanti casi studio simili è mostrato in Figura 38: i valori di energia operativa sono riportati sull'asse x e di energia di ciclo di vita sull'asse y. Il marcatore a cerchio individua i risultati ottenuti per il caso studio 6.

Il ricalcolo dei risultati secondo una metodologia uniforme permette di individuare la presenza di una serie di soluzioni dominanti rispetto ad altre (riportate in rosso). Considerando che i valori di energia operativa dell'edificio tradizionale per abitazione unifamiliare (Asdrubali 2016) e degli edifici low-energy (caso studio 5.1) sono superiori a 100 kWh/m²a, è inoltre possibile osservare che alcune soluzioni nZEB possono ridurre la Life Cycle Energy mentre in altri casi si ha uno spostamento che provoca un incremento della domanda di risorse energetiche e quindi di impatti globali. Tale incremento degli impatti cumulativi si osserva principalmente per alcune configurazioni dell'edificio a energia netta positiva (Schiavoni 2017).

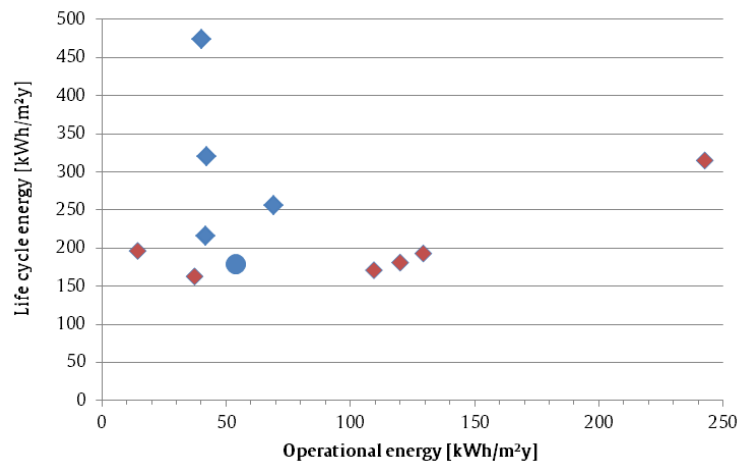


Figura 38– Confronto fra caso studio e valori di letteratura.