



Ricerca di Sistema elettrico

Definizione di parametri per l'ottimizzazione di interventi di riqualificazione in considerazione del rapporto costi/benefici

Salvatore Carlucci, Lorenzo Pagliano

DEFINIZIONE DI PARAMETRI PER L'OTTIMIZZAZIONE DI INTERVENTI DI RIQUALIFICAZIONE IN CONSIDERAZIONE DEL RAPPORTO COSTI/BENEFICI

Salvatore Carlucci, Lorenzo Pagliano (Politecnico di Milano, ERG)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: Razionalizzazione e Risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico

Obiettivo:

Responsabile del Progetto: arch. Gaetano Fasano, ENEA



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Definizione di parametri per l'ottimizzazione di interventi di riqualificazione in considerazione del rapporto costi/benefici"

Responsabile scientifico ENEA: arch Gaetano Fasano

Responsabile scientifico POLIMI: prof. Lorenzo Pagliano

Gli autori ringraziano tutti i partecipanti del Subtask B del progetto integrato IEA SHC Task40/ECBCS Annex52 intitolato "Towards Net Zero Energy Solar Buildings" per le utili discussioni.

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
2 METODOLOGIA	6
2.1 VALUTAZIONE DEL COMFORT TERMICO IN UN EDIFICIO	7
2.2 APPROCCIO DI RISOLUZIONE DI UN'OTTIMIZZAZIONE MULTI-OBIETTIVO.....	8
3 DESCRIZIONE DEL CASO STUDIO	8
3.1 SCELTA E SETTAGGI DEI MODELLI FISICI NEL SOFTWARE DI SIMULAZIONE DINAMICA	9
3.2 DATI DI INPUT DIPENDENTI DAGLI OCCUPANTI.....	9
3.2.1 <i>Programma giornaliero del tasso di occupazione delle zone termiche</i>	10
3.2.2 <i>Programma giornaliero usato per simulare l'illuminazione artificiale</i>	11
3.2.3 <i>Programma giornaliero usato per simulare l'uso di apparecchiature elettriche</i>	12
3.3 IMPIANTO DI VENTILAZIONE MECCANICA CON UNITÀ DI RECUPERO DEL CALORE	12
4 DEFINIZIONE DEL PROBLEMA DI OTTIMIZZAZIONE	13
4.1 VARIABILI DI PROGETTO E ALTERNATIVE PROGETTUALI	13
4.1.1 <i>Componenti opachi dell'involucro edilizio</i>	14
Pareti perimetrali	14
Coperture inclinate	15
Pavimento su locali non riscaldati.....	15
4.1.2 <i>Sistemi vetrati</i>	16
4.1.3 <i>Strategia di controllo dei dispositivi di schermatura solare</i>	16
4.1.4 <i>Strategia di controllo della ventilazione naturale notturna</i>	17
4.2 SOMMARIO DELLE ALTERNATIVE PROGETTUALI PROPOSTE PER OGNI VARIABILE DI PROGETTO	18
4.3 LE FUNZIONI OBIETTIVO	19
4.4 L'ALGORITMO DI OTTIMIZZAZIONE.....	19
5 DISCUSSIONE DEI RISULTATI	20
5.1 TEMPI DI CALCOLO	20
5.2 SCENARIO FREE-FLOATING	20
5.3 SCENARIO CONDIZIONATO	23
6 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI.....	25
7 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	26
8 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	28
9 CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO.....	29

Sommario

Al fine di supportare, in ambito nazionale, il raggiungimento di alcuni degli obiettivi fissati dalla rifusione della Direttiva Europea sulla Prestazione Energetica degli Edifici (D. 2010/31/EU) e dalla sua trasposizione in Italia (decreto legge 63/2013), questo rapporto descrive una nuova procedura di ottimizzazione di supporto alla progettazione di edifici a energia quasi zero. Questa procedura attua le specifiche riportate nella norma europea EN 15251 relative al dimensionamento ottimale dei sistemi passivi di un edificio. Questa norma propone che, durante il periodo estivo, in una prima fase, i sistemi passivi di un edificio siano dimensionati usando come riferimento il modello di comfort adattivo; ma, se la temperatura operativa all'interno degli ambienti non rispetta il criterio di comfort di lungo periodo scelto, è necessario installare un sistema di raffrescamento meccanico. In tal caso, i criteri progettuali di riferimento devono essere espressi in accordo con il modello di comfort di Fanger. Tuttavia, questo cambiamento di modello di comfort di riferimento può creare una discontinuità, poiché la migliore variante di edificio individuata usando il modello adattivo, può non coincidere con la migliore variante individuata con il modello di Fanger.

In questo rapporto, si descrive una nuova procedura di ottimizzazione specificamente creata per supportare la progettazione di edifici a energia quasi zero. Essa trae spunto dal criterio di dimensionamento proposto nell'EN 15251 e lo estende in modo da essere usato su tutto l'anno e con tutti i modelli di comfort ora in vigore. Essa è stata implementata usando un motore di ottimizzazione (GenOpt) che guida un motore di simulazione dinamica (EnergyPlus) attraverso le varianti di edificio che costituiscono lo spazio del problema. L'obiettivo è di individuare quelle varianti dell'edificio che minimizzano, in una prima fase, due indici di discomfort termico di lungo periodo stagionali, costruiti su un modello di comfort adattivo; tuttavia, se le condizioni interne non rispettano i limiti del modello adattivo di riferimento o non soddisfano le attese dell'analista/progettista, s'introduce un impianto meccanico nel concetto energetico dell'edificio e il discomfort termico è valutato rispetto al modello di comfort di Fanger.

Al fine di implementare un flusso di lavoro automatico è stato necessario introdurre nel software EnergyPlus, attraverso il modulo *Energy Management System*, il calcolo dei suddetti indicatori di discomfort di lungo periodo, attraverso la scrittura di alcuni codici nel linguaggio *EnergyPlus Reference Language*.

Gli indici di discomfort di lungo periodo utilizzati in questa procedura hanno dimostrato, data una specificata variante di edificio, di fornire valutazioni del discomfort termico simili nonostante siano costruiti su diversi modelli di comfort. Pertanto, la procedura proposta implementa, ed anche estende, la procedura di progettazione suggerita dalla norma EN 15251 senza generare discontinuità rilevanti.

1 Introduzione

Al fine di supportare, in ambito nazionale, il raggiungimento di alcuni degli obiettivi fissati dalla rifusione della Direttiva Europea sulla Prestazione Energetica degli Edifici (r-EPBD) e dalla sua trasposizione in Italia (decreto legge 63/2013), questo rapporto presenta una procedura di ottimizzazione che ha lo scopo di supportare la progettazione di edifici a energia quasi zero.

Uno degli approcci alla realizzazione di edifici a basso impatto ambientale consiste nel progettare edifici che richiedano poca energia durante il periodo di esercizio delle proprie funzioni. Negli edifici attuali (siano essi residenziali o commerciali), l'energia necessaria per il condizionamento degli ambienti interni costituisce una parte predominante della loro domanda di energia primaria totale; questo avviene sia in Europa sia negli Stati Uniti d'America [1, 2]. Nel maggio del 2010, l'Unione Europea ha approvato la rifusione della Direttiva Europea sulla Prestazione Energetica degli Edifici 2010/31/UE (r-EPBD), in cui si afferma che i nuovi edifici occupati e di proprietà di autorità pubbliche e tutti i nuovi edifici dovranno essere edifici a energia quasi zero rispettivamente dopo 31/12/2018 e dopo il 31/12/2020 [3].

La r-EPBD stabilisce anche che i piani nazionali debbano stimolare l'aumento degli edifici a energia quasi zero. Secondo l'Art. 2, essi sono edifici *“ad altissima prestazione energetica, [...]”* e *“il fabbisogno energetico molto basso o quasi nullo dovrebbe essere coperto in misura molto significativa da energia da fonti rinnovabili, compresa l'energia da fonti rinnovabili prodotta in loco o nelle vicinanze”*. Inoltre, nella considerazione preliminare n. 8, essa specifica che *“le misure per l'ulteriore miglioramento della prestazione energetica degli edifici dovrebbero tenere conto delle condizioni climatiche e locali, nonché dell'ambiente termico interno e dell'efficacia sotto il profilo dei costi”* [3].

La procedura descritta in questo rapporto usa le tecniche proprie dell'ottimizzazione (matematica) per individuare le proprietà termofisiche di componenti dell'involucro edilizio e dei sistemi passivi dell'edificio, che minimizzano il discomfort termico valutato secondo specifiche metriche sia durante il periodo estivo, che invernale. Questo processo permette di massimizzare la prestazione energetica di un edificio sulla base delle specificità climatiche e locali, nonché dei profili di utilizzo dell'edificio da parte degli occupanti.

La procedura usa un software di ottimizzazione, GenOpt [4], per guidare uno strumento di simulazione dinamica degli edifici, EnergyPlus [5]. Nella versione proposta in questo report, la tecnica di ottimizzazione usata è un algoritmo di ottimizzazione a sciame di particelle (*Particle swarm optimization algorithm*).

L'idea alla base della procedura di supporto alla progettazione presentata in questo rapporto consiste nell'esplorare lo *spazio del problema (problem space)* costituito dal grande numero di variabili di edificio che possono essere costruite combinando diverse proprietà dei componenti dell'involucro edilizio e strategie passive. L'obiettivo è di individuare la variante, o le varianti, di edificio che minimizzano due funzioni obiettivo (oppure una loro combinazione) che rappresentano rispettivamente il discomfort termico valutato durante il periodo invernale ed estivo. A differenza di altre procedure, quella proposta in questo rapporto può essere adottata non solo in edifici dotati di impianti meccanici per il controllo ambientale, ma anche in edifici in cui la temperatura è libera di fluttuare (*free-floating*).

L'utilizzo di tecniche per la valutazione del discomfort termico per ottimizzare edifici non è nuova. Diversi ricercatori hanno usato metriche costruite a partire dai due indici introdotti da Fanger [6]: il Voto medio previsto (PMV) e la Percentuale prevista di insoddisfatti (PPD).

Wang e Jin [7] usano il metodo della somma pesata per risolvere un problema di ottimizzazione multi-obiettivo, dove uno dei termini scelti è il discomfort termico valutato come il quadrato del PMV orario. Kolokotsa et al. [8] e Mossolly et al. [9] usano, invece, il quadrato della differenza tra un valore di riferimento del PMV scelto dall'analista e il PMV orario. Nassif et al. [10], Nassif et al. [11] e Kummert e André [12] minimizzano il PPD orario per ottimizzare la strategia di controllo degli impianti meccanici per il controllo ambientale. Magnier e Haghghat [13] costruiscono una funzione di utilità moltiplicando il PMV medio su tutto l'anno e su tutte le zone occupate dell'edificio per una funzione che è proporzionale al

numero di ore in cui il valore assoluto del PMV è maggiore di 0.5. Corbin et al. [14] usano come funzione obiettivo la differenza tra il PMV orario rispetto alla condizione di neutralità ($PMV = 0$) pensata per la superficie netta di pavimento di ogni zona dell'edificio. Angelotti et al. [15] usano un indice di discomfort di lungo periodo costruito sul PMV per ottimizzare la strategia di ventilazione naturale in un edificio e il progetto di uno scambiatore interrato ad esso asservito.

Più di recente, le norme hanno offerto ai progettisti anche la possibilità di utilizzare i modelli di comfort adattivo che possono essere usati negli edifici ventilati naturalmente o privi di impianti meccanici per il controllo ambientale [16, 17].

Data la grande varietà e numero di metriche per valutare il discomfort termico di lungo periodo, Carlucci e Pagliano [18] riassumono i punti di forza e debolezza dei principali indicatori di lungo periodo presenti nella letteratura scientifica e nelle norme tecniche.

2 Metodologia

In termini fisici, la procedura di ottimizzazione che si propone per progettare edifici energia quasi zero consiste di due fasi: una prima fase in cui l'ottimizzazione dell'involucro edilizio e delle tecnologie passive dell'edificio è svolta senza considerare il contributo degli impianti meccanici per il controllo ambientale (modalità *free-floating*) e l'obiettivo dell'ottimizzazione è di garantire condizioni ambientali all'interno dell'edificio il più simile possibile alle condizioni ottimali proposte dal modello di comfort adattivo [19, 20]; nel caso in cui i requisiti di comfort termico previsti dal modello adattivo non possono essere soddisfatti ricorrendo solo alle strategie passive, vi è una seconda fase che prevede l'introduzione di opportuni sistemi meccanici efficienti per il controllo ambientale (HVAC) nel concetto energetico dell'edificio, e le condizioni di comfort termico sono valutate ricorrendo al modello di comfort di Fanger [6].

È quindi possibile calcolare la domanda di energia complessiva richiesta dall'edificio in uno specifico periodo temporale (nella maggioranza dei casi potrà essere l'anno, ma altre scelte sono possibili); domanda di energia che può essere espressa in termini di energia erogata o primaria, secondo la specifica definizione di edificio a zero energia scelta dall'analista [21]. In fine, tale domanda deve essere coperta dalla produzione di energia da fonti rinnovabili disponibili preferenzialmente nel sito dell'edificio (o nelle sue immediate vicinanze). Un ultimo aspetto che è in fase di discussione in letteratura scientifica è la valutazione dell'efficacia dello scambio energetico tra l'edificio e le reti tecnologiche: si dovrebbero preferire quelle soluzioni che massimizzano la contemporaneità tra la domanda di energia dell'edificio e la generazione di energia rinnovabile [22].

In sintesi, la procedura di proposta intende ottimizzare un edificio, all'inizio, in assenza di impianti meccanici minimizzando il discomfort termico valutato secondo uno dei modelli di comfort adattivo (questo è chiamato *Scenario free-floating*), successivamente, e solo se necessario, si introducono opportuni impianti meccanici che garantiscono le condizioni di comfort obiettivo espresse secondo il modello di Fanger e minimizzano l'energia per il controllo ambientale (questo è chiamato *Scenario condizionato*) [23].

Una parte importante della procedura è quindi l'identificazione di un metodo affidabile per la valutazione del discomfort termico in un edificio. Tale metodo deve essere disponibile sia per i modelli adattivi – europeo e americano [19, 24]-, sia per quello di Fanger [6], e deve garantire una valutazione simile delle condizioni termiche in una data variante di edificio secondo tutti e tre i modelli di comfort attualmente in vigore nelle norme tecniche internazionali [17, 25, 26]. A tal fine si usa il *Long-term Percentage of Dissatisfied* che è un indice di discomfort di lungo periodo specificamente costruito in tre versioni ognuna sviluppata in accordo ad uno dei modelli di comfort sopra citati [27].

Operativamente, la procedura usa un software di ottimizzazione, GenOpt [4], per guidare uno strumento di simulazione dinamica degli edifici, EnergyPlus [5]. Nella versione proposta in questo report, la tecnica di ottimizzazione usata è un algoritmo di ottimizzazione a sciame di particelle (*Particle swarm optimization algorithm*). Una rassegna di tecniche e strumenti di ottimizzazione è riportata in [28].

2.1 Valutazione del comfort termico in un edificio

Un numero considerevole di autori ha usato indici e metriche per stimare il discomfort termico. Tali metodi spesso valutano il discomfort termico calcolando la percentuale di ore in cui si registrano condizioni non confortevoli, o sommando i gradi di sfioramento di una certa temperatura di comfort [18]. Pertanto, non riflettono accuratamente la risposta termica di un tipico individuo predicibile utilizzando una teoria di comfort termico comprovata da studi e analisi dei dati raccolti sul campo; piuttosto sono modelli analitici che forniscono un'informazione abbastanza grossolana di quanto le condizioni termiche in un certo ambiente sono state lontane dalle condizioni di riferimento. Per ovviare a questo limite, la procedura di ottimizzazione proposta utilizza l'indicatore di lungo periodo chiamato *Long-term Percentage of Dissatisfied* (LPD) [27], che stima il discomfort termico di lungo periodo, pesando una stima della *Probabilità di insoddisfatti* (*Likelihood of dissatisfied*) rispetto ai tassi di occupazione e alle ore di occupazione (in un certo periodo di calcolo) di ogni zona termica costituente un edificio. La sua equazione è

$$LPD(LD) \equiv \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{z=1}^Z (p_{z,t} \cdot LD_{z,t} \cdot h_t)}{\sum_{t=1}^T \sum_{z=1}^Z (p_{z,t} \cdot h_t)} \quad (1)$$

dove t è un contatore del passo temporale usato per la valutazione (l'ora); T è l'ultimo passo temporale del periodo di calcolo; z è il contatore delle zone termiche dell'edificio; Z è il numero totale delle zone dell'edificio, $p_{z,t}$ è il tasso di occupazione in una certa zona e in un certo momento; $LD_{z,t}$ è la Probabilità di insoddisfatti all'interno di una certa zona in un certo passo temporale inside; h_t è la durata del passo temporale (e.g., 1 ora).

La probabilità di insoddisfatti (LD) è una funzione analitica che stima: "the severity of the deviations from a theoretical thermal comfort objective, given certain outdoor and indoor conditions at specified time and space location" [27]. Tuttavia, poiché l'obiettivo teorico del comfort termico dipende dallo specifico modello di comfort adottato, anche le equazioni che descrivono la LD varieranno per ogni modello di comfort usato.

Per quanto riguarda il modello adattivo europeo, la LD è valutata attraverso il cosiddetto *Overheating Risk*, introdotto in [29]

$$LD_{Adaptive}^{EN} = \frac{e^{0.4734 \cdot \Delta\theta_{op} - 2.607}}{1 + e^{0.4734 \cdot \Delta\theta_{op} - 2.607}} \quad (2)$$

dove $\Delta\theta_{op}$ è il valore assoluto della differenza tra la temperatura operativa interna e la temperatura ottimale di comfort calcolata secondo il modello attrattivo europeo.

Per quanto riguarda il modello adattivo americano, la LD è valutata attraverso il cosiddetto *ASHRAE Likelihood of Dissatisfied* (ALD), introdotto in [27]

$$LD_{Adaptive}^{ASHRAE} = ALD = \frac{e^{0.008 \cdot \Delta\theta_{op}^2 + 0.406 \cdot \Delta\theta_{op} - 3.050}}{1 + e^{0.008 \cdot \Delta\theta_{op}^2 + 0.406 \cdot \Delta\theta_{op} - 3.050}} \quad (3)$$

dove $\Delta\theta_{op}$ è il valore assoluto della differenza tra la temperatura operativa interna e la temperatura ottimale di comfort calcolata secondo il modello attrattivo americano. Essa è una funzione continua ottenuta dagli autori attraverso l'analisi statistica dei dati raccolti sul campo durante alcune interviste di comfort e registrati all'interno della database ASHRAE RP-884 [30].

Riguardo il modello di comfort di Fanger, il PPD calcola direttamente la probabilità di insoddisfatti come funzione del PMV usando l'equazione [6]

$$LD_{Fanger} = PPD = 100 - 95^{-0.03353 PMV^4 - 0.2179 PMV^2} \quad (4)$$

Il LPD può essere calcolato sia in estate sia in inverno, ed è applicabile per ottimizzare un edificio dotato o privo di impianti meccanici per il controllo ambientale. Secondo [27] il LPD nelle due versioni Fanger e adattivo americano valuta in modo simile il discomfort termico, per tanto queste due versioni del LPD

vengono usate per costruire le funzioni obiettivo necessarie per implementare la procedura di ottimizzazione in due fasi proposta.

2.2 Approccio di risoluzione di un'ottimizzazione multi-obiettivo

In genere, nei problemi di ottimizzazione multi-obiettivo, una singola soluzione non è capace di minimizzare al contempo tutte le funzioni obiettivo. L'obiettivo di un'ottimizzazione multi-obiettivo consiste quindi nell'identificare quelle varianti che sono migliori di altre rispetto ad almeno una delle funzioni obiettivo e allo stesso tempo non peggiorano tutte le altre funzioni obiettivo. Tali varianti sono chiamate *varianti non dominate* e appartengono alla cosiddetta *frontiera di Pareto*.

L'obiettivo di questo rapporto non è quello di identificare l'insieme delle varianti non dominate per il problema di ottimizzazione in esame, piuttosto è quello di impostare una procedura di ottimizzazione e di testarla su un caso studio per supportare il progettista nell'identificazione di almeno un'affidabile variante di edificio di energia quasi zero tra tutte quelle disponibili. Pertanto il problema di ottimizzazione multi-obiettivo viene risolto ricorrendo alla tecnica della scalarizzazione che fornisce invece una sola soluzione ottimale per ogni ottimizzazione. La scalarizzazione prevede che le funzioni obiettivo che governano il problema di ottimizzazione siano combinate in una *funzione di utilità*. Le singole funzioni obiettivo possono essere anche pesate attraverso opportuni fattori di peso.

Riguardo il nostro problema di ottimizzazione, si assume di preferire quelle varianti di edificio che minimizzano la loro distanza euclidea dal *punto di utopia* (punto in cui le due funzioni obiettivo assumono valore zero). Pertanto tra le funzioni di utilità disponibili [31], si sceglie di usare il metodo della somma esponenziale pesata (*weighted exponential sum method*)

$$f_U = \sum_{i=1}^n w_i [F_i(\mathbf{x})]^p : F_i(\mathbf{x}) > 0 \quad \forall i \quad (5)$$

dove w_i sono i fattori di peso di ogni funzione obiettivo, tali che $w_i > 0$, \mathbf{x} è il vettore dei valori delle variabili di progetto, e $F_i(\mathbf{x})$ sono i valori assunti dalle funzioni obiettivi. Per questo problema di utilizzazione non c'è un'apparente ragione per pesare diversamente le due funzioni obiettivo, pertanto i fattori di peso sono stati posti uguali ad 1. L'esponente p è stato posto uguale a 2; pertanto la funzione di utilità misura il quadrato della distanza euclidea tra una certa soluzione e il punto di utopia, in modo che più corte la distanza, migliore è la variante di edificio. Questo approccio di ottimizzazione non fornisce un insieme di soluzioni ottimali appartenenti alla frontiera di partito, ma solo una soluzione ottimale. Naturalmente l'uso della funzione di utilità (scalare) forza a priori il risultato dell'ottimizzazione, tuttavia ha il vantaggio di semplificare il processo di scelta dell'utente finale.

Il motore di ottimizzazione GenOpt [4], versione 3.1.0, è stato usato per minimizzare la funzione di utilità scelta che combina le due funzioni obiettivo che misurano la probabilità di discomfort termico percepibile nei periodi invernale ed estivo.

3 Descrizione del caso studio

La metodologia proposta viene testata sulla progettazione di una casa unifamiliare isolata, situata a Mascali (CT) in Sicilia (figura 1). La casa unifamiliare è composta da un piano fuori terra occupato e da un piano interrato non occupato e usato come garage e locale tecnico. La superficie di pavimento netta è 148 m² e il suo volume netto condizionato è 445 m³. La famiglia è composta da 4 persone, e una stanza della casa è usata come ufficio.

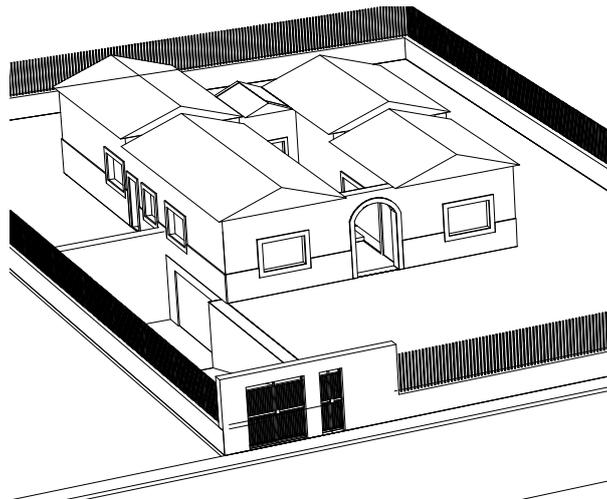


Figura 1 – Vista tridimensionale della casa oggetto dello studio

Mascalucia è nella zone 'Csa' secondo la zonizzazione di Köppen [32], che è caratterizzata da un clima temperato con estate secca, anche chiamato clima mediterraneo. Al fine di simulare le più probabili condizioni climatiche locali, è stato costruito un *anno tipico di riferimento* (*typical reference year*) usando i dati climatici registrati e misurati con risoluzione temporale oraria nella stazione meteorologica di Pedara (CT) situata ad 1 km dal sito di costruzione, dal 2003 al 2009.

3.1 Scelta e settaggi dei modelli fisici nel software di simulazione dinamica

Le simulazioni termo-energetiche dell'edificio sono state svolte usando il software di simulazione energetica dinamica degli edifici EnergyPlus [5], versione 6.0.0.23. I modelli fisici e gli algoritmi per calcolare gli scambi energetici sono stati scelti al fine di ottimizzare il bilanciamento tra accuratezza dei risultati e tempi di calcolo: (1) la frequenza di aggiornamento dei percorsi solari è stata impostata a 20 giorni, (ii) il flusso di calore attraverso i componenti opachi dell'involucro edilizio è stato calcolato attraverso il metodo delle funzioni trasferimento con una risoluzione temporale di quattro passi temporali per ora, (iii) il flusso di calore scambiato per ventilazione naturale in prossimità delle superfici interne ed esterne dei componenti dell'involucro edilizio è stato calcolato con l'algoritmo di convezione adattativo (*adaptive convection algorithm*) [33]. Il modello numerico così impostato è richiede 15-16 minuti per eseguire la singola simulazione di una variante di edificio.

3.2 Dati di input dipendenti dagli occupanti

Il profilo di occupazione tipico, giornaliero su base oraria, relativo al tasso di occupazione degli ambienti è stato costruito in base alle informazioni fornite dal proprietario e alla destinazione d'uso degli ambienti. I tipici profili d'uso, giornalieri su base oraria, dell'illuminazione artificiale e delle apparecchiature elettriche sono stati costruiti a partire dai dati disponibili nella banca dati di eERG [34], che raccoglie dati da misure di carichi elettrici in edifici residenziali e non.

3.2.1 Programma giornaliero del tasso di occupazione delle zone termiche

L'edificio è stato progettato per ospitare quattro persone. Nelle simulazioni, il numero massimo di occupanti previsto nella zona giorno è quattro persone, una persona è prevista nell'ufficio, due persone sono previste nella camera doppia e una persona è prevista in ogni camera singola. Nelle restanti zone della casa (lavanderia, spazi di distribuzione), non essendoci una presenza di persone continuativa maggiore di un'ora al giorno, non è stata prevista la presenza di occupanti. In figura 2 si riportano i profili del tasso di occupazione per ogni stanza del modello numerico usati nelle simulazioni dinamiche, differenziati per due scenari d'uso: giorni feriali e giorni festivi.

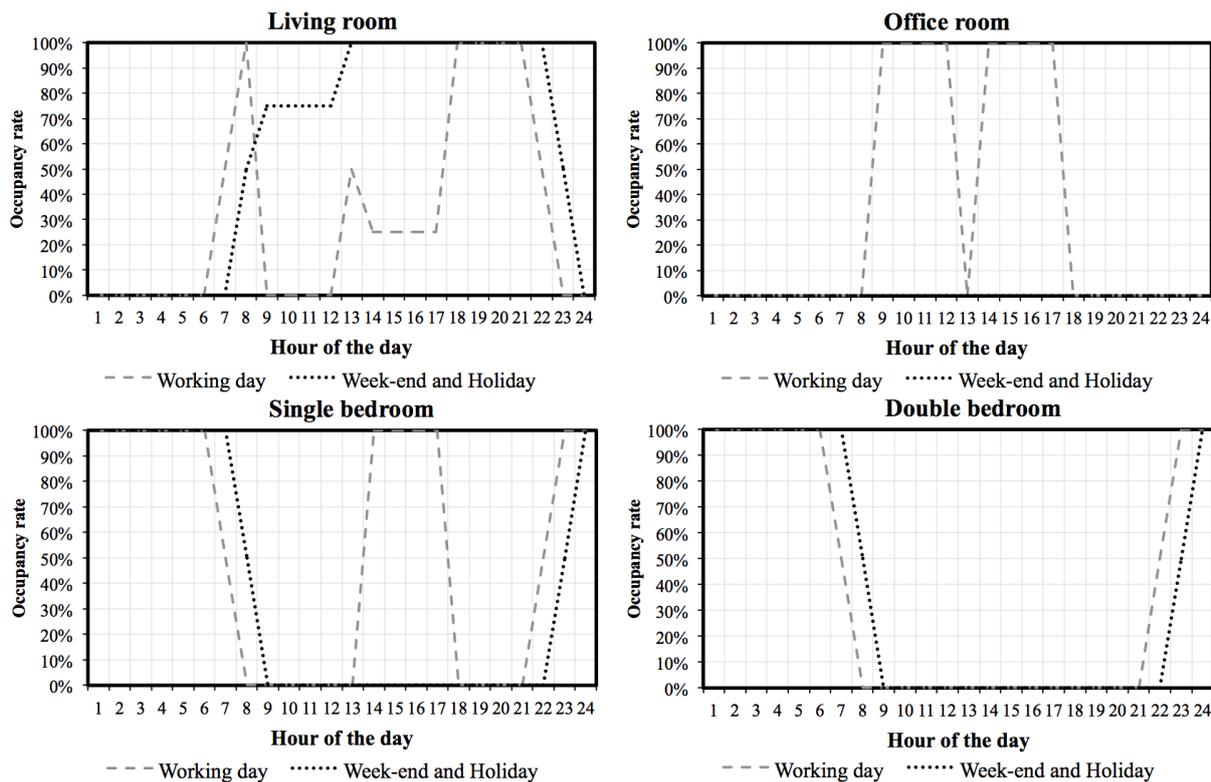


Figura 2 — Programmi giornalieri del tasso di occupazione per ogni zona termica

3.2.2 Programma giornaliero usato per simulare l'illuminazione artificiale

Le potenze elettriche medie orarie utilizzate per l'illuminazione artificiale sono riportate per ogni zona in Tabella 1.

Tabella 1 — Potenze elettriche medie orarie utilizzate per l'illuminazione artificiale

Nome della zona	Superficie netta di pavimento (m ²)	Potenza elettrica installata per unità di superficie utile (W/m ²)	Potenza elettrica installata per zona (W)
Zona giorno	70.8	12	850
Ufficio	14.3	10	143
Camera doppia	20.5	5	103
Camera singola (per singola stanza)	9.0	10	90
Bagni (totale)	17.5	10	175
Lavanderia	7.3	10	73

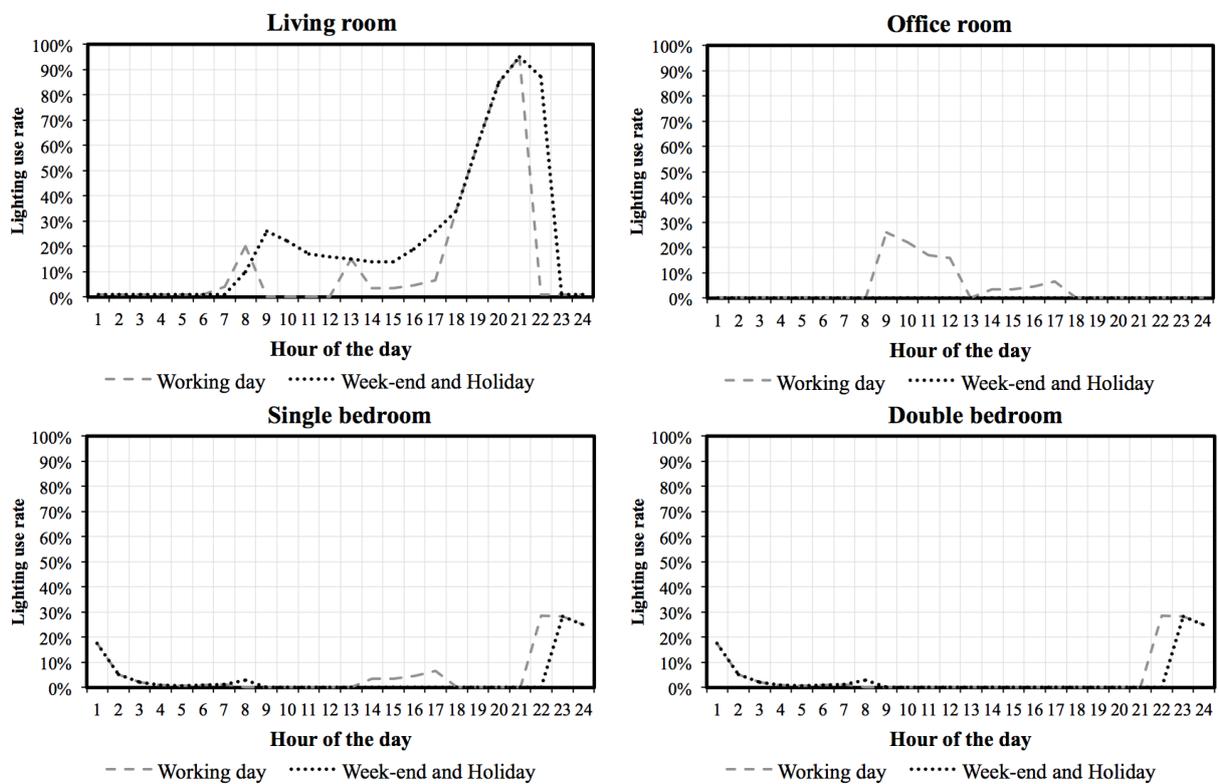


Figura 3 — Programmi orari per l'illuminazione artificiale usati nelle simulazioni dinamiche

3.2.3 Programma giornaliero usato per simulare l'uso di apparecchiature elettriche

Le potenze elettriche medie orarie utilizzate per l'uso delle apparecchiature elettriche sono riportate per ogni zona del modello dell'edificio in Tabella 2.

Tabella 2 — Potenze elettriche medie orarie massime utilizzate per le apparecchiature elettriche

Nome della zona	Superficie netta di pavimento (m ²)	Potenza elettrica installata per unità di superficie utile (W/m ²)	Potenza elettrica installata per zona (W)
Zona giorno	70.8	10	708
Ufficio	14.3	15	215
Camera doppia	20.5	10	205
Camera singola (per singola stanza)	9.0	10	90
Bagni (totale)	17.5	0	0
Lavanderia	7.3	13	95

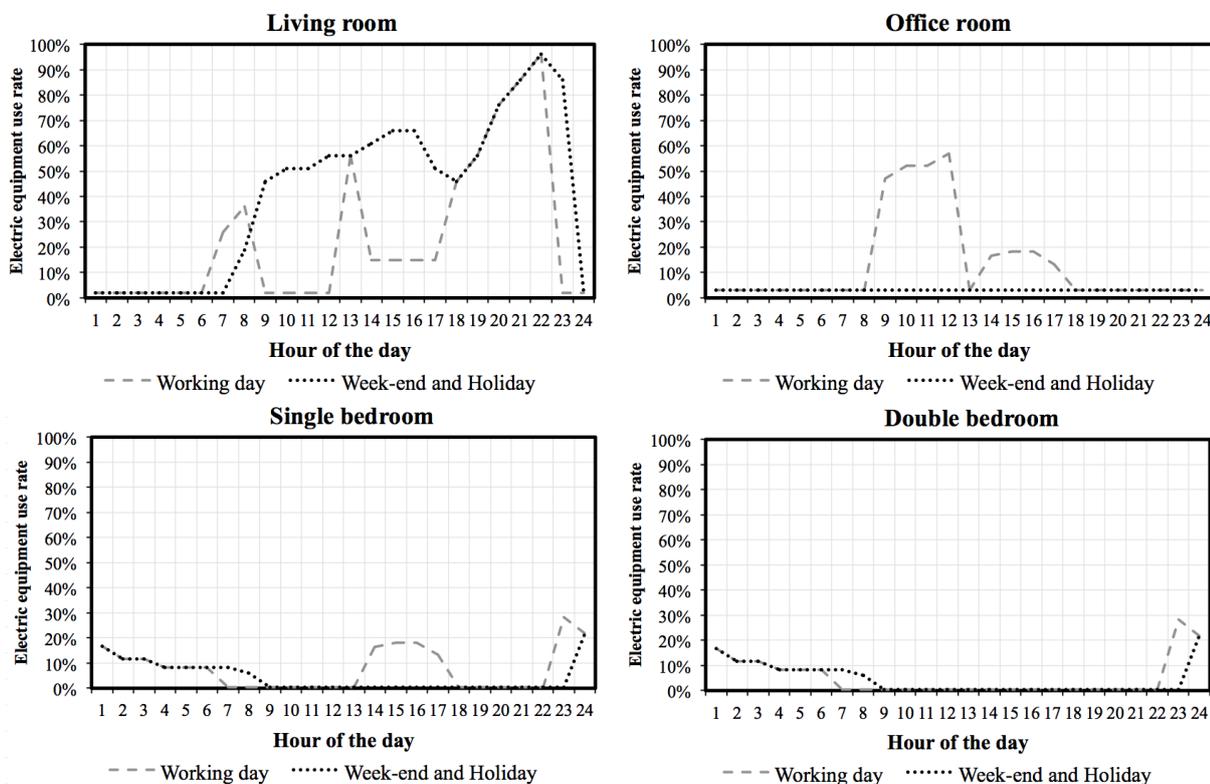


Figura 4 — Programmi orari per l'uso di apparecchiature elettriche usati nelle simulazioni dinamiche

3.3 Impianto di ventilazione meccanica con unità di recupero del calore

Al fine di garantire un'adeguata qualità dell'aria interna, è stato impostato nelle simulazioni numeriche un tasso di ricambio d'aria minimo di 0.6 h⁻¹; tale valore è stato stimato secondo la norma EN 15251. Questa strategia è stata simulata per evitare di sottostimare i carichi termici estivi e le perdite termiche invernali dovuti alla ventilazione igienico-sanitaria necessaria per garantire la qualità dell'aria interna di progetto. Pertanto, un impianto di ventilazione meccanica controllata equipaggiato con un'unità di recupero del calore ad alta efficienza è stato incluso nel concetto energetico dell'edificio. L'unità di recupero del calore che si è scelto di installare è caratterizzata da un'efficienza termica pari a 0.92.

4 Definizione del problema di ottimizzazione

La progettazione energetica di un edificio è un problema multi-variabile che può accettare diverse soluzioni caratterizzate da diverse prestazioni (costi, energia, qualità, ...). Dato l'elevato numero di *alternative progettuali* (*design options*) che possono essere prese in considerazione per ogni *variabile di progetto* (*design variables*), il numero delle possibili *varianti di edificio* (*building variants*) che possono essere combinate è molto grande, e non tutte possono essere simulate in un intervallo temporale compatibile con la fase di progettazione di un edificio.

La procedura di ottimizzazione proposta intende quindi esplorare lo spazio del problema costituito dal grande numero di varianti di edificio disponibili in un tempo relativamente breve, adottando una metodologia che consiste in:

1. costruire il *modello numerico* dell'edificio oggetto di ottimizzazione nel software di simulazione dinamica scelto in modalità free-floating,
2. identificare e scegliere le *variabili di progetto* rispetto cui svolgere l'ottimizzazione,
3. identificare e scegliere le *alternative progettuali* per ogni *variabile di progetto*,
4. istruire il software di ottimizzazione scelto circa le *variabili di progetto* scelte e, per ognuna di esse, le diverse *alternative progettuali*,
5. inserire le *funzioni obiettivo* nel software di ottimizzazione scelto, e scelta dei requisiti di accettabilità per ognuna di esse,
6. (preparare tutti i file di supporto che possono essere necessari per accoppiare il software di simulazione dinamica con il software di ottimizzazione)¹,
7. scegliere l'algoritmo di ottimizzazione e dei relativi settaggi nel software di ottimizzazione
8. avviare la prima ottimizzazione,
9. analisi dei risultati e verifica che le soluzioni ottimali rispettano i requisiti di accettabilità.
10. Se i requisiti vengono rispettati, la soluzione identificata è la soluzione ottimale rispetto al problema di ottimizzazione identificato,
11. Se i requisiti non vengono totalmente soddisfatti, si introducono gli opportuni impianti meccanici nel modello numerico, si aggiornano le funzioni obiettivo e si avvia l'ottimizzazione.

4.1 Variabili di progetto e alternative progettuali

L'ottimizzazione è stata eseguita ipotizzando un certo numero di *alternative progettuali* per ognuna delle seguenti *variabili di progetto*:

- 9 alternative progettuali per le pareti esterne,
- 9 alternative progettuali per il tetto,
- 9 alternative progettuali per il pavimento,
- 5 alternative progettuali per i sistemi vetrati installati a sud-est,
- 5 alternative progettuali per i sistemi vetrati installati a sud-ovest,
- 5 alternative progettuali per i sistemi vetrati installati a nord-est,
- 5 alternative progettuali per i sistemi vetrati installati a nord-ovest,
- 5 alternative progettuali per i sistemi vetrati installati a nella corte centrale,
- 3 strategie di controllo delle protezioni solari sono state proposte per controllare i dispositivi ombreggianti installati su ogni finestra,
- 2 strategie di controllo sono proposte per la gestione delle finestre con apertura a ribalta,
- 3 strategie di controllo sono proposte per gestire l'apertura delle finestre a due ante.

¹ La presenza o meno di questa fase e l'eventuale file da predisporre, dipendono dal tipo di software di ottimizzazione scelto.

Pertanto il numero totale delle *varianti di edificio* che è possibile costruire combinando tutte le *alternative progettuali* per ogni *variabile di progetto* è:

$$BV = \prod_{i=1}^v o_i = 17\,006\,112 \tag{6}$$

Dove *BV* è il numero delle *varianti di edificio* disponibili, *v* sono le *variabili di progetto* e *o_i* è il numero di *alternative progettuali* per ciascuna *variabile di progetto*. L'insieme di tutte le *varianti di edificio* disponibili costituisce lo *spazio del problema* dello specifico problema di ottimizzazione oggetto di analisi, che è quindi costituito da più di 17 milioni di possibili soluzioni.

4.1.1 Componenti opachi dell'involucro edilizio

Le alternative progettuali per i componenti opachi dell'involucro edilizio sono state selezionate costruite in modo da predisporre tre livelli di trasmittanza stazionaria (*U*) e tre livelli di trasmittanza periodica (*Y₁₀*). I tre livelli sono indicati con i segni +, o, - per identificare rispettivamente una prestazione alta, media e bassa riguardo uno specifico parametro fisico.

La trasmittanza stazionaria è utile primariamente per descrivere il comportamento invernale di un certo componente dell'involucro, in quanto fornisce una misura della densità di flusso di calore trasferito attraverso il componente in condizioni stazionarie per ogni grado di differenza tra la temperatura interna ed esterna. La trasmittanza periodica è utile per descrivere il comportamento dinamico del componente opaco e, ipotizzando una variazione di temperatura sinusoidale con un periodo di tempo 24 h, misura "l'ampiezza della massa volumica di flusso termico su di un lato quando l'ampiezza della temperatura sul medesimo lato è pari a zero e sussiste un'ampiezza di temperatura di una unità sul lato opposto" [35]. Oltre alla trasmittanza periodica si riportano per ogni alternativa progettuale anche i valori dello sfasamento e del fattore di decremento che sono comunemente usati per descrivere la prestazione estiva di un componente opaco.

Pareti perimetrali

Si è assunto che ogni alternativa progettuale proposta sia adottata per modellare tutte le pareti perimetrali dell'edificio indipendentemente dalla loro esposizione o orientamento.

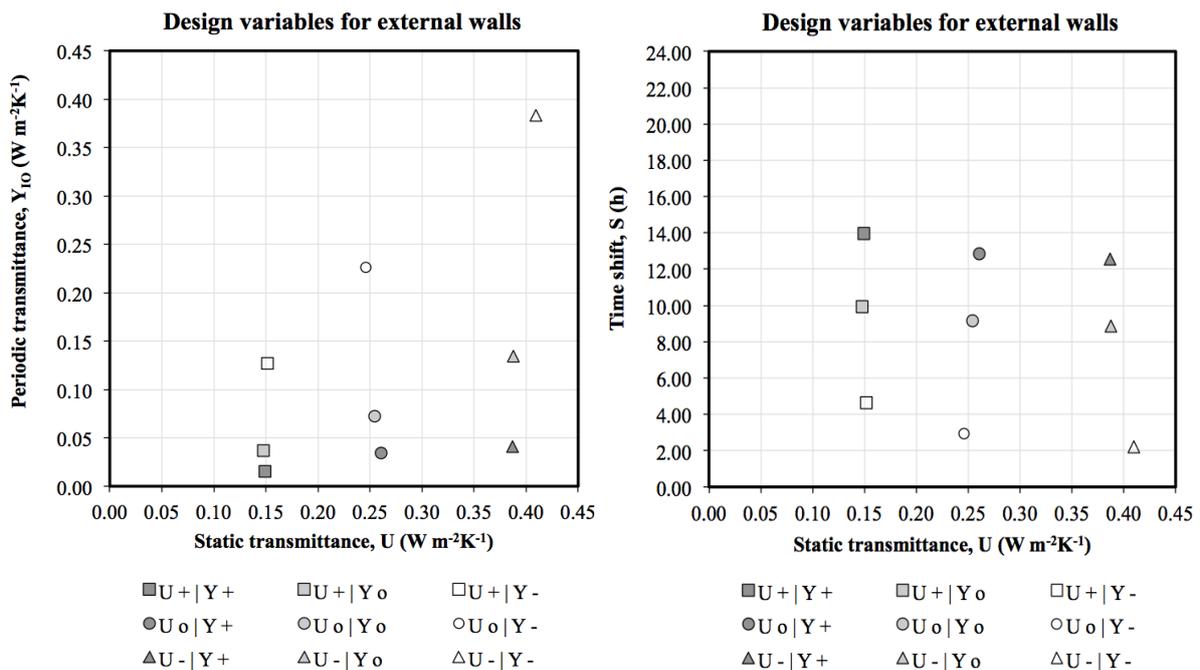


Figura 5 — Parametri fisici delle alternative progettuali proposte per le pareti perimetrali

Coperture inclinate

Si è assunto che ogni alternativa progettuale proposta sia adottata per modellare tutte le coperture inclinate dell'edificio indipendentemente dalla loro esposizione.

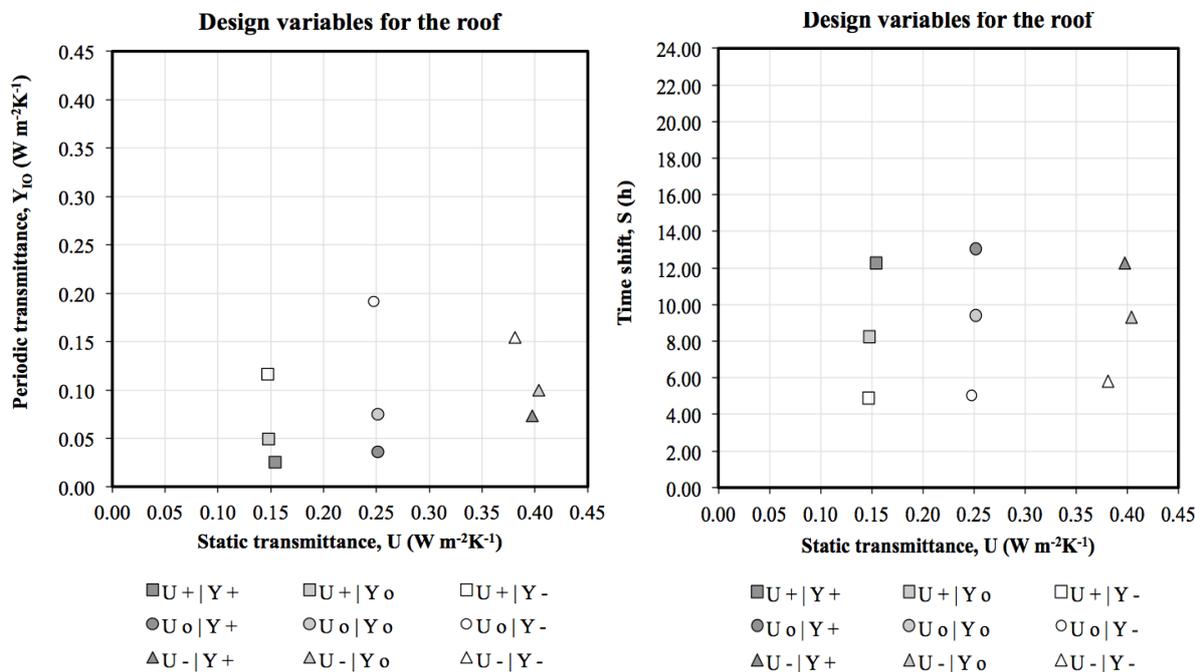


Figura 6 — Parametri fisici delle alternative progettuali proposte per le coperture inclinate

Pavimento su locali non riscaldati

Si è assunto che ogni alternativa progettuale proposta sia adottata per modellare tutti i pavimenti su locali non riscaldati dell'edificio.

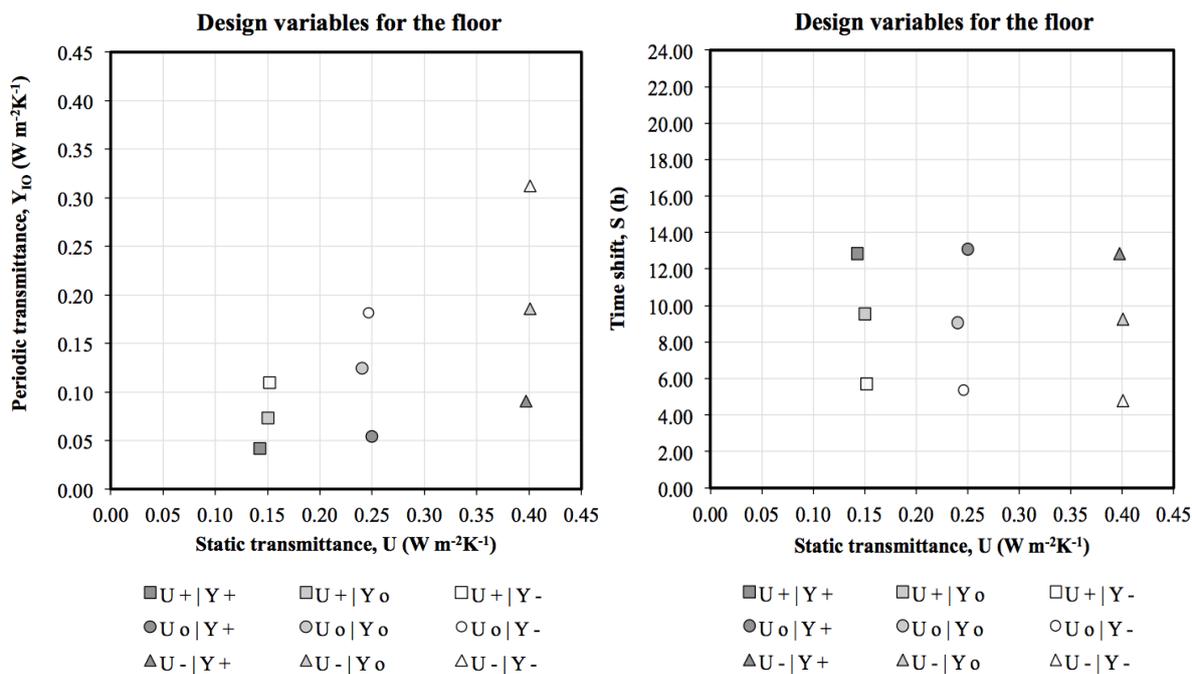


Figura 7 — Parametri fisici delle alternative progettuali proposte per i pavimenti su locali non riscaldati

4.1.2 Sistemi vetrati

Le alternative progettuali proposte per la modellazione della vetrata delle finestre dell'edificio, sono state costruite in modo da ottenere delle configurazioni caratterizzate da tre livelli prestazionali per la trasmittanza stazionaria (U_g) e il fattore solare (g). I tre livelli sono indicati con i segni +, o, - per identificare rispettivamente una prestazione alta, media e bassa. Sono proposte sei alternative di sistemi vetrati ottenute combinando diversi tipi di vetri, rivestimenti e gas di riempimento (tabella 3 e figura 8).

Tabella 3 — Le alternative progettuali proposte per il sistema vetrato

Identificativo alternativa	Trasmittanza, U_g ($W m^{-2}K^{-1}$)	Fattore solare, g -	Trasmittanza visibile, t_v -
U - g -	2.667	0.753	0.808
U - g +	2.667	0.338	0.334
U o g o	1.065	0.533	0.711
U o g +	1.099	0.375	0.597
U + g o	0.582	0.489	0.690
U + g +	0.586	0.355	0.577

Il telaio è invece non è una delle variabili di progetto del problema di ottimizzazione presentato ed è stato tenuto fisso in tutte le simulazioni. La sua trasmittanza stazionaria è di $1.2 W m^{-2}K^{-1}$.

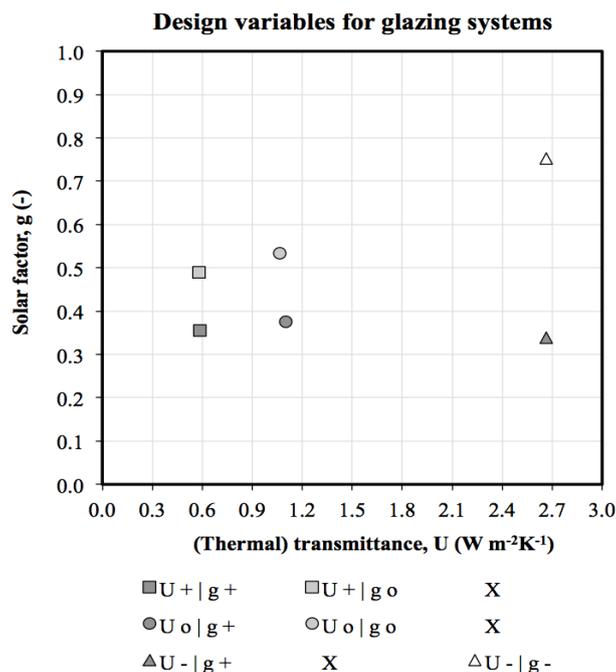


Figura 8 — Parametri fisici delle alternative progettuali proposte per i sistemi vetrati

Dal momento che la quantità e distribuzione giornaliera della radiazione solare incidente è molto diversa per ciascuno degli orientamenti dell'edificio, i sei tipi di sistemi vetrati sono stati testati indipendentemente per ogni orientamento: sud-est, sud-ovest, nord-est e nord-ovest. A causa della forma a "C" della casa, i sei sistemi vetrati sono stati testati anche nelle finestre che affacciano sull'atrio centrale.

4.1.3 Strategia di controllo dei dispositivi di schermatura solare

Sono state testate tre diverse strategie di controllo dei dispositivi di schermatura solare. Le schermature solari implementate sono dei dispositivi mobili a lamelle orientabili. Quando è necessario controllare il guadagno solare, le lamelle vengono azionate in modo che ad ogni passo temporale siano in grado di bloccare solo la componente diretta della radiazione solare [33]. Le tre strategie di controllo differiscono (i)

per la grandezza fisica meteorica misurata e (ii) per il diverso grado di parzializzazione del controllo dei dispositivi di ombreggiatura:

1. La strategia più semplice, indicata con *OutTemp*, consiste nel misurare la temperatura a bulbo secco dell'aria esterna e quando questa supera un valore di soglia (impostato per tutte le simulazioni a 25 °C), tutti i dispositivi di schermatura vengono simultaneamente chiusi in modo da intercettare la sola componente diretta della radiazione solare;
2. La strategia intermedia, indicata con *InTemp*, consiste nel misurare la temperatura di bulbo secco dell'aria interna in ogni zona dell'edificio e quando in una zona termica si supera un valore di soglia (impostato per tutte le simulazioni a 25 °C), i dispositivi di schermatura appartenenti alla stessa zona termica vengono simultaneamente chiusi in modo da intercettare la sola componente diretta della radiazione solare;
3. La strategia di controllo più complessa e precisa, indicata con *WinSol*, consiste nel misurare irradianza totale (diretta + diffusa) incidente su ciascuna finestra, e quando essa supera un valore di soglia (impostato per tutte le simulazioni a 100 W m⁻² [36]), il dispositivo di schermatura appartenente alla stessa finestra viene chiuso in modo da intercettare la sola componente diretta della radiazione solare.

4.1.4 Strategia di controllo della ventilazione naturale notturna

Le strategie di controllo della ventilazione naturale notturna sono rivolte a gestire l'apertura della finestra durante notti d'estate. Diversi parametri fisici e valori di set-point sono stati utilizzati in letteratura scientifica per gestire questa strategia di raffrescamento passivo. Kolokotroni e Aronis [37], per ridurre il fabbisogno di raffreddamento di un edificio per uffici, attivano la ventilazione notturna nelle simulazioni dinamiche, se in dato passo temporale, sia la temperatura a bulbo secco dell'aria esterna supera i 12 °C, sia la temperatura a bulbo secco dell'aria interna supera la temperatura di set-point di riscaldamento posta a 18 °C. Invece Artmann, et al. [38] propongono di attivare la ventilazione notturna se la media delle temperature superficiali all'interno di una stanza supera i 20 °C, e al contempo la temperatura dell'aria esterna è più bassa di almeno 3 °C della media delle temperature superficiali.

In generale, le condizioni per attivare la ventilazione naturale devono essere stabilite in modo da mediare tra la riduzione del rischio di surriscaldamento, il potenziale di raffrescamento passivo, possibili condizioni di discomfort termico globale e locale. Fraisse et al. [39], in un articolo di revisione bibliografica, hanno mediato i valori proposti in letteratura per ciascuna di queste condizioni:

- La condizione di surriscaldamento è di solito espressa in letteratura come il superamento di una temperatura dell'aria interna. Il valore medio di tale temperatura di soglia è di 23 °C per gli edifici per uffici;
- Il potenziale di raffreddamento è per lo più espresso o in termini di temperatura massima dell'aria esterna, o in termini di differenza minima tra la temperatura dell'aria interna ed quella esterna. La media della differenza minima tra la temperatura dell'aria interna e la temperatura dell'aria esterna è di 2 °C con una media della temperatura massima dell'aria esterna non maggiore di 22 °C.
- La tipica condizione di discomfort termico globale è espressa in termini di temperatura operativa interna minima sotto alla quale è alta la probabilità che avvengano fenomeni di eccessivo raffreddamento. Il valore medio della temperatura operativa interna minima riportato in letteratura è 20 °C.
- La tipica condizione di discomfort termico locale è espressa in termini della temperatura dell'aria esterna sotto alla quale è alta la probabilità di discomfort da correnti d'aria. Il valore medio della temperatura dell'aria esterna dei dati riportati in letteratura è di 12 °C.

Sulla base a tali valori osservazioni, nelle simulazioni dinamiche, le finestre vengono aperte, tutte le sere della settimana tra le 21:00 e le 08:00, se la temperatura dell'aria interna è più alta sia della temperatura dell'aria esterna sia della temperatura del set-point di ventilazione impostato a 20 °C per evitare un eccessivo raffreddamento.

Le alternative progettuali relative alla strategia di ventilazione notturna si concretizzano attraverso diverse percentuali di apertura delle finestre.

Poiché nell'edificio sono previste finestre con apertura a ribalta e finestre con apertura a doppia anta, esse sono caratterizzate da differenti ipotesi di apertura.

- 2 alternative progettuali sono previste per le finestre con apertura a ribalta (0%, 100%),
- 3 alternative progettuali sono previste per le finestre con apertura a doppia anta (0%, 50%, 100%).

4.2 Sommario delle alternative progettuali proposte per ogni variabile di progetto

In tabella 5, si riporta l'elenco di tutte le alternative progettuali per ogni variabile di progetto analizzata.

Tabella 5 – Alternative progettuali proposte per ogni variabile di progetto

Variabile di progetto	Quantità fisiche	Alternative progettuali
Parete perimetrale	U ($W m^{-2}K^{-1}$) Sfasamento (h)	0.149 14.0 0.147 9.9 0.152 4.6 0.261 12.9 0.254 9.2 0.246 2.9 0.387 12.6 0.387 8.9 0.410 2.2
Copertura inclinata	U ($W m^{-2}K^{-1}$) Sfasamento (h)	0.154 12.3 0.148 8.2 0.147 4.9 0.252 13.1 0.251 9.4 0.248 5.0 0.398 12.3 0.404 9.3 0.381 5.8
Pavimento su locali non riscaldati	U ($W m^{-2}K^{-1}$) Sfasamento (h)	0.143 12.8 0.150 9.6 0.152 5.7 0.250 13.1 0.240 9.0 0.246 5.4 0.397 12.9 0.401 9.3 0.401 4.8
Sistemi vetrati a sud-est	U_g ($W m^{-2}K^{-1}$) g (%)	0.586 36 0.582 49 1.099 38 1.065 53 2.667 34 2.667 75
Sistemi vetrati a sud-ovest	U_g ($W m^{-2}K^{-1}$) g (%)	0.586 36 0.582 49 1.099 38 1.065 53 2.667 34

Variabile di progetto	Quantità fisiche	Alternative progettuali
		2.667 75
Sistemi vetrati a nord-est e nord-ovest	U_g ($W m^{-2}K^{-1}$) g (%)	0.586 36 0.582 49 1.099 38 1.065 53 2.667 34 2.667 75
Sistemi vetrati affacciati sull'atrio centrale	U_g ($W m^{-2}K^{-1}$) g (%)	0.586 36 0.582 49 1.099 38 1.065 53 2.667 34 2.667 75
Strategie di controllo dei dispositivi di schermatura	Grandezza fisica e valore di soglia	$T_{air,int} > 25\text{ }^{\circ}C$ $T_{air,out} > 25\text{ }^{\circ}C$ $I_{g,w} > 100\text{ }W/m^2$
Apertura delle finestre a ribalta	Percentuale di apertura (%)	0 100
Apertura delle finestre a doppia anta	Percentuale di apertura (%)	0 50 100

4.3 Le funzioni obiettivo

La procedura in due fasi proposta consiste nell'ottimizzare un edificio, prima, in modalità free-floating minimizzando il discomfort termico valutato rispetto ad un modello di comfort adattivo (Scenario Free-floating), poi (e se necessario) si introduce un impianto meccanico per il controllo ambientale; questo implica che il discomfort termico venga valutato rispetto al modello di Fanger e che si quantifichi ed ottimizzi il sistema impiantistico al fine di minimizzare l'energia da esso richiesta per il controllo ambientale (Scenario Condizionato).

Le funzioni obiettivo usate per risolvere il primo problema di ottimizzazione nello Scenario Free-floating sono lo LPD nella versione ASHRAE (LD calcolato con l'Eq. 3) calcolato per il periodo invernale ed estivo. Le due funzioni obiettivo sono combinate nella funzione di utilità

$$f_U(\mathbf{x}) = f(LPD_{Adaptive\ ASHRAE}^{Winter}, LPD_{Adaptive\ ASHRAE}^{Summer}) = (LPD_{Adaptive\ ASHRAE}^{Winter})^2 + (LPD_{Adaptive\ ASHRAE}^{Summer})^2. \quad (7)$$

Invece, nello Scenario Condizionato, le funzioni obiettivo usate per risolvere il primo problema di ottimizzazione sono lo LPD nella versione di Fanger (LD calcolato con l'Eq. 4) calcolato per il periodo invernale ed estivo. Le due funzioni obiettivo sono combinate nella funzione di utilità

$$f_U(\mathbf{x}) = f(LPD_{Fanger}^{Winter}, LPD_{Fanger}^{Summer}) = (LPD_{Fanger}^{Winter})^2 + (LPD_{Fanger}^{Summer})^2. \quad (8)$$

4.4 L'algoritmo di ottimizzazione

Nel presente studio si è utilizzato l'algoritmo di ottimizzazione a sciame di particelle (*Particle swarm optimization algorithm*) per la sua robustezza ed efficacia nel convergere verso il minimo globale della funzione di utilità [40]. Nella tabella 6 si riportano i valori dei parametri di impostazione utilizzati durante il presente studio.

Tabella 6 – Valori delle impostazioni dell’algoritmo di ottimizzazione

PSOIW algorithm
Main = PSOIW;
NeighborhoodTopology = vonNeumann;
NeighborhoodSize = 5;
NumberOfParticle = 20;
NumberOfGeneration = 30;
Seed = 0;
CognitiveAcceleration = 2.8;
SocialAcceleration = 1.3;
MaxVelocityGainContinuous = 0.5;
MaxVelocityDiscrete = 4;
InitialInertiaWeight = 1.2;
FinalInertiaWeight = 0;

5 Discussione dei risultati

La procedura di supporto alla progettazione di edifici a energia quasi zero proposta prevede che l’edificio sia in una prima fase ottimizzato in assenza di impianti per il controllo ambientale (Scenario free-floating), minimizzando la combinazione (Eq. 7) del LPD (Eq. 1) nella versione ASHRAE (Eq. 3) calcolato sia durante il periodo invernale, sia durante quello estivo. Nel caso in cui la variante ottimale di edificio, identificata dopo questa prima ottimizzazione, soddisfa i requisiti di comfort termico scelti e le aspettative del progettista, la procedura di progettazione si conclude, e l’edificio, almeno in linea teorica, non richiederebbe l’uso energia per il controllo ambientale per fornire le sperate condizioni interne; al contrario, se le condizioni interne della variante ottimale non soddisfano i requisiti di comfort scelti, o l’aspettativa del progettista, si procede con la seconda fase durante la quale l’edificio viene dotato degli opportuni impianti per il controllo ambientale (Scenario controllato), che vengono ottimizzati per la minimizzazione dell’energia richiesta per il controllo ambientale.

5.1 Tempi di calcolo

Date le impostazioni dell’algoritmo di ottimizzazione riportate in tabella 6, l’ottimizzazione ha eseguito 600 simulazioni del modello numerico in EnergyPlus per un tempo totale di calcolo di 29 h 53m.

L’ottimizzazione è stata eseguita su un iMac dotato di un processore Intel Core i5 quad-core a 2.5 GHz con 4 GB di memoria RAM a 1333 MHz DDR3, su cui è installato il sistema operativo Mac OS X Lion 10.7.5.

5.2 Scenario free-floating

Per il caso in esame, la procedura ha identificato una variante di edificio ottimale che, in assenza di impianti per il controllo ambientale, fornisce dei valori stagionali dello LPD minori del 10% (Figura 9). Ricordiamo inoltre che, anche in condizioni di comfort ideali, la Likelihood of dissatisfied, sia nella versione di Fanger, sia in quella ASHRAE, non può comunque essere minore di circa il 5 %, per definizione.

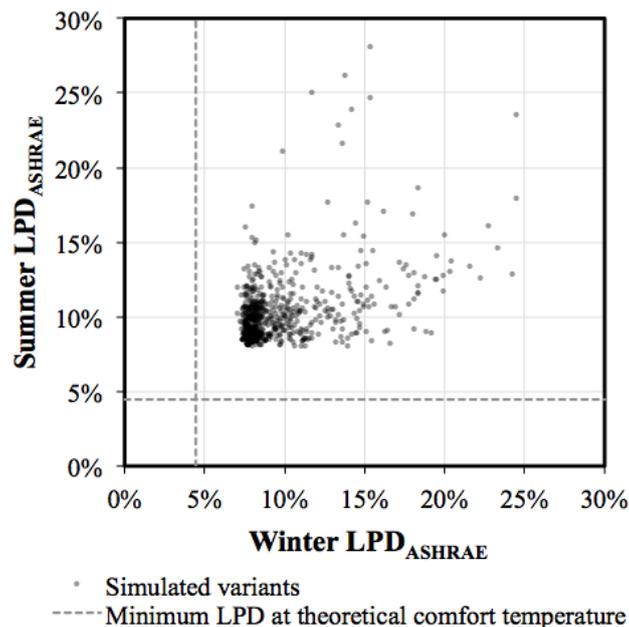


Figura 9 – Posizione delle varianti simulate nello spazio del problema descritto dalle due funzioni obiettivo per lo Scenario free-floating

Le principali caratteristiche tecniche della variante di edificio ottimale sono:

1. pareti perimetrali e copertura con trasmittanze stazionarie molto basse, $U = 0.15 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, che limitano lo scambio di energia con l'ambiente esterno in entrambe le stagioni;
2. pavimenti su spazi non riscaldati con una trasmittanza stazionaria relativamente alta, $U = 0.40 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, che permette di usare il piano interrato come un pozzo termico durante l'estate, senza compromettere eccessivamente la prestazione invernale;
3. copertura e pavimento caratterizzati da un alto sfasamento, $S > 12 \text{ h}$, e pareti perimetrali con uno sfasamento più basso, $8 \text{ h} < S < 10 \text{ h}$;
4. i sistemi vetrati usati per le finestre esposte a sud-est (questa facciata dell'edificio è caratterizzata da ampie superfici vetrate e circonda la zona giorno) hanno un fattore solare abbastanza alto, $g = 0.49$, probabilmente perché permette un ragionevolmente alto guadagno solare durante l'inverno nelle ore di occupazione della zona giorno e di estate l'eccessiva radiazione solare viene intercettata dalla schermatura mobile esterna;
5. per ogni altra esposizione, i sistemi vetrati hanno un valore molto basso della trasmittanza stazionaria, $U_g = 0.59 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, e del fattore solare, $g = 0.36$, che riducono gli scambi di energia incontrollati verso e dall'ambiente esterno attraverso il sistema vetrato;
6. l'apertura delle finestre è massima (solo nella zona giorno) durante le notti estive che garantisce il massimo potenziale di raffrescamento passivo da ventilazione naturale notturna;
7. la grandezza fisica usata come parametro di controllo (e.g., radiazione solare incidente su una finestra, temperatura dell'aria esterna, temperatura dell'aria interna) per attivare i dispositivi di controllo solare montati sulle finestre non è fondamentale se la soglia è impostata opportunamente, e può essere scelta considerando anche altre prestazioni non termiche come ad esempio la disponibilità di illuminazione naturale e il rischio di abbagliamento per gli occupanti.

Riguardo la prestazione termica, la variante di edificio ottimale è caratterizzata in modalità free-floating, i.e., senza alcun intervento impiantistico, da temperature operative interne compatibili con la classe di accettabilità del 80% proposta dalla norma americana ASHRAE 55 [26]; avvengono solo pochi sfioramenti al di fuori della zona di comfort adattivo così come definito nella norma (Figure 10).

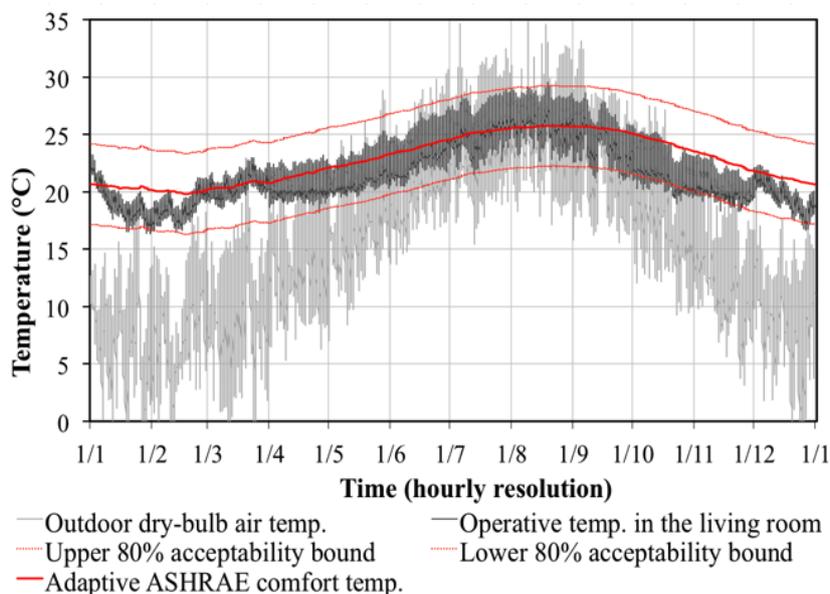


Figura 10 – Temperature operative nella zona giorno in assenza di impianti per il controllo ambientale, comparate con l’intervallo di comfort della modello adattivo americano per una accettabilità dell’80%

Riguardo la prestazione energetica, la ripartizione per usi energetici dell’energia erogata (solo elettricità) è: (i) 3.1 kWh_{el}/(m² a) per la ventilazione meccanica; (ii) 6.5 kWh_{el}/(m² a) per l’illuminazione; (iii) 15.3 kWh_{el}/(m² a) per le apparecchiature elettriche; (iv) 2.6 kWh_{el}/(m² a) per la produzione di acqua calda sanitaria (ACS). In tal modo l’energia elettrica totale richiesta dall’edificio in un anno è 4 087 kWh_{el}. Il consumo di energia per tutti questi usi elettrici è più alto se confrontato con altre case passive e la ragione è dovuta alla presenza dell’ufficio che si è supposto occupato in modo continuativo, cinque giorni alla settimana per otto ore al giorno.

Infine, per compensare l’energia elettrica richiesta dall’edificio, si assume di integrare 13 pannelli fotovoltaici con celle in silicio monocristallino (efficienza nominale del 18.4% e potenza nominale di 300 W per pannello) nella falda a sud-est del tetto per un’area captante totale di 21.2 m². Data la pendenza della copertura di 22° e assumendo un fattore di conversione da corrente continua a corrente alternata di 0.77, si stima che l’impianto fotovoltaico caratterizzato da una potenza di picco di 3.9 kW_p sia in grado di generare 4 911 kWh_{el} in un anno. Pertanto, dato il bilancio energetico netto tra domanda e generazione di energia elettrica convertiti in energia primaria attraverso il fattore di conversione nazionale, la produzione di energia rinnovabile presso l’edificio dovrebbe essere leggermente maggiore di tutta l’energia elettrica richiesta dall’edificio, incluso l’energia per l’illuminazione artificiale e le apparecchiature elettriche (Figura 11).

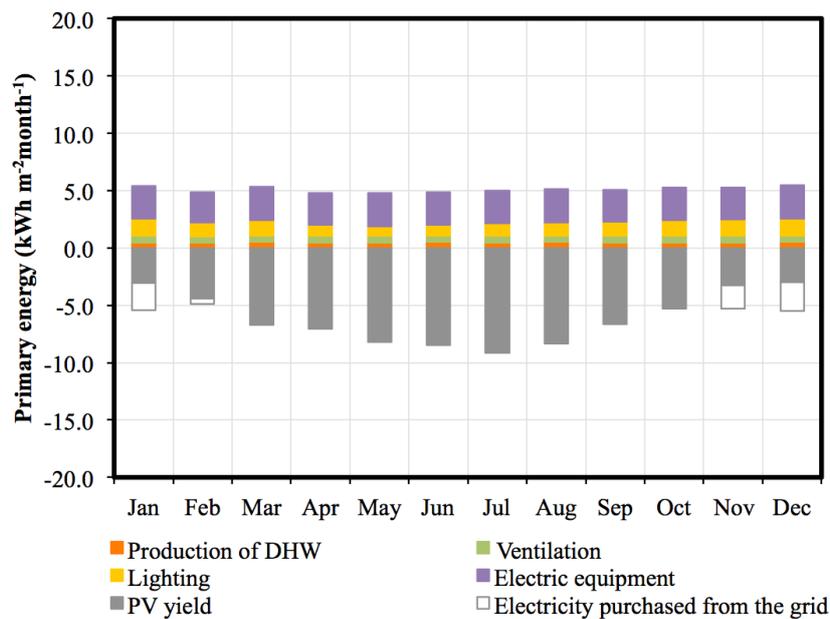


Figura 11 – Bilancio di energia primaria della casa inclusa la generazione da fotovoltaico nello Scenario free-floating

Tuttavia, su una risoluzione temporale differente, e.g., giornaliera o oraria, potrebbe esserci un maggiore disaccoppiamento tra la generazione e l'autoconsumo di energia.

5.3 Scenario condizionato

Se le condizioni interne non sono in accordo con i requisiti di comfort termico oppure se non soddisfano le aspettative dell'analista, si introduce un impianto meccanico per il controllo ambientale nella variante ottimale individuata con la precedente ottimizzazione in free-floating. In questo secondo Scenario, le condizioni di comfort devono essere però espresse e devono fare riferimento al modello di comfort di Fanger. La temperatura di comfort ottimale durante il periodo estivo è stata calcolata assumendo un'attività metabolica di 1.2 met, un lavoro esterno di 0 met, una resistenza dell'abbigliamento fissa per l'estate di 0.5 clo, una velocità dell'aria di 0.1 m/s e una umidità relativa del 50%. Invece la temperatura di comfort ottimale durante il periodo invernale è stata calcolata assumendo un'attività metabolica di 1.2 met, un lavoro esterno di 0 met, una resistenza dell'abbigliamento fissa per l'estate di 1.0 clo, una velocità dell'aria di 0.0 m/s e una umidità relativa del 50%. Esse sono state usate per impostare le temperature di setpoint degli impianti di controllo ambientale ($\theta_{conf, Fanger}$) nel modello numerico: 21.5 °C per il riscaldamento e 26.4 °C per il raffrescamento. Nel modello è stata introdotta una pompa di calore reversibile combinata con un sistema di distribuzione a tutt'aria, un umidificatore e due ventilatori.

Nella figura 12 si riporta l'andamento della temperatura operativa nella zona giorno simulata nello Scenario condizionato. Esse viene confrontata con le temperature ottimali di comfort secondo il modello di Fanger e con gli intervalli di comfort relativi alla Categoria II della EN 15251 che sono proposti per gli edifici di nuova costruzione.

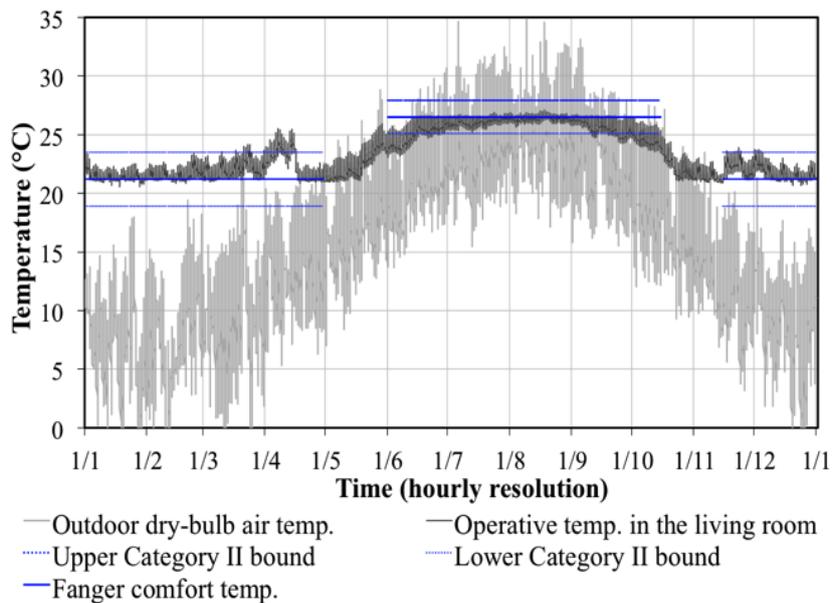


Figura 12 – Temperature operative all’interno della zona giorno nello Scenario condizionato, confrontate con gli intervalli di comfort calcolati per PMV ± 0.5

Secondo questo Scenario, l’edificio richiede solo energia elettrica che è il solo vettore energetico usato dall’edificio per il suo funzionamento. In questo caso, l’energia erogata può essere usata al pari dell’energia primaria per descrivere chiaramente la bilancia energetica dell’edificio (Figura 13).

L’energia erogata per il riscaldamento ammonta a 7.3 kWh/(m² a) e quella necessaria per il raffrescamento (comprendendo sia la quota sensibile, sia quella latente) è di 9.5 kWh/(m² a). La domanda totale di energia erogata per tutti gli usi dell’edificio (compreso anche l’illuminazione artificiale e l’energia per le apparecchiature elettriche) è di 48.8 kWh/(m² a) equivalente a 7 253 kWh per anno. Infine, l’energia primaria totale annua nello Scenario condizionato ammonta a 108 kWh/(m² a).

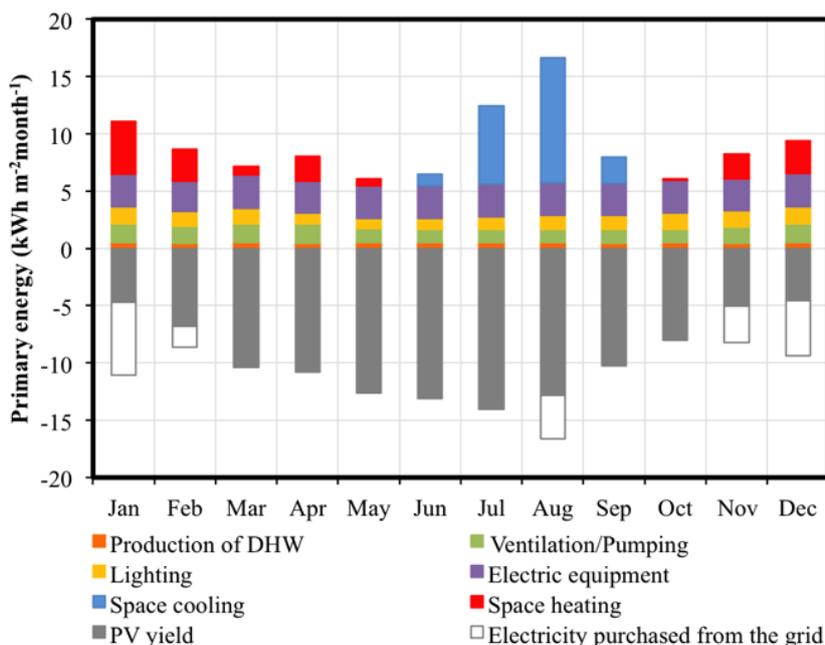


Figura 13 – Bilancio mensile espresso in termini di energia elettrica dell’edificio comprendente anche la generazione fotovoltaica secondo lo Scenario condizionato

6 Conclusioni e sviluppi futuri

In questo rapporto è stata presentata una nuova procedura di ottimizzazione concepita per supportare i progettisti nella progettazione di edifici ad energia quasi zero. Questa procedura usa un motore di simulazione dinamica della prestazione termica ed energetica degli edifici guidato da un motore di ottimizzazione che permette di esplorare il vasto insieme delle possibili varianti di edificio alla ricerca di quelle varianti che minimizzano una certa funzione obiettivo (o una combinazione di più funzioni obiettivo). Nello specifico, il problema di ottimizzazione proposto minimizza una funzione di utilità (costruita per essere il quadrato della distanza euclidea definita nello spazio del problema) che combina due indici di discomfort termico di lungo-periodo riferiti rispettivamente al periodo estivo ed invernale. L'indice di discomfort termico di lungo-periodo usato è il *Long-term Percentage of Dissatisfied*.

La procedura proposta fa propria la proposta della norma EN 15251 per prevede prima un'ottimizzazione dei sistemi passivi di un edificio rispetto ad un modello di comfort adattivo (chiamato Scenario free-floating); se le condizioni interne non rispettano le condizioni prescritte dalla relativa categoria di comfort, oppure non soddisfa le aspettative del progettista, si introduce nel concetto energetico dell'edificio un impianto per il controllo ambientale e lo si ottimizza in modo da minimizzarne l'energia richiesta per il controllo ambientale (chiamato Scenario condizionato).

Questa procedura è stata applicata alla progettazione energetica di una casa monofamiliare sita a Mascalucia (CT) in Sicilia, località caratterizzata da un clima Mediterraneo per cui le condizioni estive prevalgono, seppur limitatamente, su quelle invernali.

La procedura ha permesso di individuare le soluzioni ottimali per 10 variabili di progetto che hanno permesso di mantenere la probabilità di discomfort termico, valutata con il LPD, sotto il 10 % sia in estate, sia in l'inverno, e la temperatura operativa è ricaduta all'esterno dell'intervallo di accettabilità dell'80%, definito secondo la norma ASHRAE 55, solo in un numero limitato di ore.

In sintesi, la procedura di ottimizzazione a supporto della progettazione di edifici a energia quasi zero proposta:

- integra la procedura di progettazione energetica degli edifici, delineata dalla norma europea EN 15251,
- la estende al periodo invernale in modo da permettere un'ottimizzazione indirizzata su tutto l'anno,
- può essere applicata in edifici dotati o privi di impianti per il controllo ambientale,
- può essere usata in combinazione con tutti i modelli di comfort termico inclusi nelle norme,
- può essere utilizzata per ottimizzare qualsiasi edificio, indipendentemente dalla specifica destinazione d'uso,
- i tempi computazionali della ottimizzazione eseguita su un personal computer con capacità di calcolo attualmente tipica per una macchina desktop, sono compatibili con la pratica progettuale.

Possibili sviluppi e miglioramenti futuri della procedura proposta potrebbero mirare:

- all'aumento delle funzioni obiettivo oggetto di ottimizzazione, e.g., per includere anche la minimizzazione del discomfort luminoso;
- all'integrazione della procedura di ottimizzazione in software di analisi energetica dinamica o, possibilmente in soluzioni software BIM,
- All'esecuzione di un'analisi multi-obiettivo (attualmente non prevista tra le librerie di GenOpt),
- All'integrazione di un'analisi di robustezza delle varianti di edificio ottimali facenti parte della frontiera di Pareto.

7 Riferimenti bibliografici

1. Perez-Lombard L., Ortiz J. and Pout C. (2008) A review on buildings energy consumption information. *Energ Buildings* 40: 394-398.
2. Carlucci S., Pagliano L. and Pietrobon M. (2013) Analysis of 85 green buildings within the GreenBuildingplus Project: a basis for supporting energy efficient investments. *Advanced Materials Research* 689: 49-53.
3. European Parliament and Council (2010) Energy performance of buildings. In: Book Energy performance of buildings, Editor (Ed)^(Eds). Official Journal of the European Union, City.
4. Wetter M. (2001) GenOpt - A Generic Optimization Program. In: Book GenOpt - A Generic Optimization Program, Editor (Ed)^(Eds). City: 601 - 608.
5. Crawley D.B., Lawrie L.K., Winkelmann F.C., Buhl W.F., Huang Y.J., Pedersen C.O., Strand R.K., Liesen R.J., Fisher D.E., Witte M.J. and Glazer J. (2001) EnergyPlus: Creating a new-generation building energy simulation program. *Energ Buildings* 33: 319-331.
6. Fanger P.O. (1970) Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering Danish Technical Press.
7. Wang S.W. and Jin X.Q. (2000) Model-based optimal control of VAV air-conditioning system using genetic algorithm. *Build Environ* 35: 471-487.
8. Kolokotsa D., Stavrakakis G.S., Kalaitzakis K. and Agoris D. (2002) Genetic algorithms optimized fuzzy controller for the indoor environmental management in buildings implemented using PLC and local operating networks. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 15: 417-428.
9. Mossolly M., Ghali K. and Ghaddar N. (2009) Optimal control strategy for a multi-zone air conditioning system using a genetic algorithm. *Energy* 34: 58-66.
10. Nassif N., Kaji S. and Sabourin R. (2004) Two-objective on-line optimization of supervisory control strategy. *Building Services Engineering Research and Technology* 25: 241-251.
11. Nassif N., Kaji S. and Sabourin R. (2005) Optimization of HVAC control system strategy using two-objective genetic algorithm. *HVAC and R Research* 11: 459-486.
12. Kummert M. and André P. (2005) Simulation of a model-based optimal controller for heating systems under realistic hypotheses. Montreal, 555-562.
13. Magnier L. and Haghghat F. (2010) Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network. *Build Environ* 45: 739-746.
14. Corbin C.D., Henze G.P. and May-Ostendorp P. (2012) A model predictive control optimization environment for real-time commercial building application. *Journal of Building Performance Simulation*: 1-16.
15. Angelotti A., Pagliano L. and Solaini G. (2004) Summer cooling by earth-to-water heat exchangers: experimental results and optimisation by dynamic simulation. In: Book Summer cooling by earth-to-water heat exchangers: experimental results and optimisation by dynamic simulation, Editor (Ed)^(Eds). City: 678-686.
16. ANSI/ASHRAE (2004) Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. In: Book Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, Editor (Ed)^(Eds). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, City.
17. CEN (2007) Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics. In: Book Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics, Editor (Ed)^(Eds). European Committee for Standardization, City.
18. Carlucci S. and Pagliano L. (2012) A review of indices for the long-term evaluation of the general thermal comfort conditions in buildings. *Energ Buildings* 53: 194-205.
19. Nicol J.F. and Humphreys M.A. (2002) Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings* 34: 563-572.
20. de Dear R.J. and Brager G.S. (1998) Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. *Proc. Proceedings of the 1998 ASHRAE Winter Meeting, San Francisco, CA, USA*, 145-167.

21. Marszal A.J., Heiselberg P., Bourrelle J.S., Musall E., Voss K., Sartori I. and Napolitano A. (2011) Zero Energy Building - A review of definitions and calculation methodologies. *Energy and Buildings* 43: 971-979.
22. Sartori I., Napolitano A. and Voss K. (2012) Net zero energy buildings: A consistent definition framework. *Energy and Buildings* 48: 220-232.
23. Carlucci S., Pagliano L. and Zangheri P. (2013) Optimization by discomfort minimization for designing a comfortable net zero energy building in the Mediterranean climate. *Advanced Materials Research* 689: 44-48.
24. de Dear R.J. and Brager G.S. (1998) Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. San Francisco, CA, USA, 145-167.
25. ISO (2005) Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. In: Book Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, Editor (Ed)^(Eds). International Organization for Standards, City: 52.
26. ANSI/ASHRAE (2010) Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. In: Book Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, Editor (Ed)^(Eds). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, City.
27. Carlucci S. (2013) Thermal Comfort Assessment of Buildings Springer, London.
28. Attia S., Hamdy M., O'Brien W. and Carlucci S. (2013) Assessing gaps and needs for integrating building performance optimization tools in net zero energy buildings design. *Energy Buildings* 60: 110-124.
29. Nicol J.F., Hacker J., Spires B. and Davies H. (2009) Suggestion for new approach to overheating diagnostics. *Building Research and Information* 37: 348-357.
30. de Dear R.J. (1998) Global database of thermal comfort field experiments. San Francisco, CA, USA, 1141-1152.
31. Marler R.T. and Arora J.S. (2004) Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 26: 369-395.
32. Köppen W.P.G., Rudolf (1930) *Handbuch der klimatologie* Gebrüder Borntraeger, Berlin.
33. US-DoE (2010) InputOutput Reference: The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output. In: Book InputOutput Reference: The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output, Editor (Ed)^(Eds). US Department of Energy, City.
34. eERG (2004) Misure dei consumi di energia elettrica nel settore domestico - Risultati delle campagne di rilevamento dei consumi elettrici presso 110 abitazioni in Italia. In: Book Misure dei consumi di energia elettrica nel settore domestico - Risultati delle campagne di rilevamento dei consumi elettrici presso 110 abitazioni in Italia, Editor (Ed)^(Eds). End-use Efficiency Research Group (eERG), City.
35. CEN (2007) Dynamic thermal characteristics - Calculation methods. In: Book Dynamic thermal characteristics - Calculation methods, Editor (Ed)^(Eds). European Committee for Standardization, City.
36. Candanedo J.A., O'Neill B., Pantic S. and Athienitis A. (2007) Studies of control strategies for the Concordia solar house. In: Book Studies of control strategies for the Concordia solar house, Editor (Ed)^(Eds). City.
37. Kolokotroni M. and Aronis A. (1999) Cooling-energy reduction in air-conditioned offices by using night ventilation. *Applied Energy* 63: 241-253.
38. Artmann N., Manz H. and Heiselberg P. (2008) Parameter study on performance of building cooling by night-time ventilation. *Renewable Energy* 33: 2589-2598.
39. Fraisse G., Boichot R., Kouyoumji J. and Souyri B. (2010) Night cooling with a Ventilated Internal Double Wall. *Energy and Buildings* 42: 393-400.
40. Hopfe C.J. (2009) Uncertainty and sensitivity analysis in building performance simulation for decision support and design optimization. Doctor of Philosophy Ph.D, Eindhoven University of Technology, Eindhoven.

8 Abbreviazioni ed acronimi

ACS	Acqua calda sanitaria
ALD	ASHRAE Likelihood of Dissatisfied
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
eERG	end-use Efficiency Research Group
g	Fattore di trasmissione dell'energia solare totale (fattore solare), secondo UNI EN ISO 410
HVAC	Heating, Ventilation and Air-Conditioning
LD	Likelihood of dissatisfied
LPD	Long-term Percentage of Dissatisfied
PMV	Voto medio previsto
PPD	Percentuale prevista di insoddisfatti
PSO	Particle swarm optimization
PSOIW	Particle swarm optimization with inertia weight
r-EPBD	Rifusione della Direttiva Europea sulla Prestazione Energetica degli Edifici
S	Sfasamento, secondo UNI EN ISO 13786:2008
τ_v	Fattore di trasmissione luminosa, secondo UNI EN ISO 410:2004
U	Trasmittanza stazionaria, secondo UNI EN ISO 6946:2008 per componenti edilizi opachi
U_g	Trasmittanza stazionaria, secondo UNI EN ISO 673:2009 per vetrate
Y_{10}	Trasmittanza periodica, secondo UNI EN ISO 13786:2008 per componenti edilizi opachi

9 Curriculum scientifico del gruppo di lavoro

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

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

Salvatore Carlucci, laureato *cum laude* in Ingegneria edile nel 2005 e dottore di ricerca Ingegneria edile nel 2012 presso il Politecnico di Milano, è un assegnista di ricerca presso il Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano.

Dal 2006, è docente del Master RIDEF (Rinnovabili, Decentramento e l'Efficienza energetica) organizzato dal Politecnico di Milano, ed è esercitante per il corso di Fisica dell'edificio presso le Facoltà di Ingegneria Edile Architettura del Politecnico di Milano. Nel 2007, è stato professore a contratto di Metodi di controllo ambientale per la Facoltà di Architettura e Società dello stesso ateneo.

Dal 2008, è membro e contributore tecnico del progetto congiunto SHC Task40 / ECBCS Annex52 promosso dall'Agenzia Internazionale sull'Energia (IEA).

La sua attività di ricerca è confluita nella pubblicazione di circa 20 pubblicazioni scientifiche e tecniche che affrontano prevalentemente tematiche relative alla fisica dell'edificio, al comfort termico e visuale, alla simulazione numerica della prestazione termo-energetica degli edifici, a tecniche di ottimizzazione matematica per il supporto alla progettazione di edifici ad alte prestazioni e a edifici a zero energia.