

Existing buildings retrofit through multi-objective optimization: a case-study

Elisa Di Giuseppe*, Gabriele Galdenzi, Marco D’Orazio,
Costanzo Di Perna

Highlights

This work applies genetic algorithms to solve a multi-objective optimization problem in the building energy retrofit field. The aim is finding the design options able to simultaneously maximize the performance in terms of energy consumption, indoor summer comfort and life cycle costs. The methodology is applied to a reference building in Italy, under several renovation scenarios. The calculation is performed through the energy analysis software EnergyPlus integrated to jEPlus + EA. By including the comfort issue in hot climate, this methodological approach could make the cost-optimal strategy introduced by the European legislation more effective.

Abstract

In the light of the regulations on buildings energy performance, the designers face the need to choose among alternative design solutions, having to assess their effectiveness according to several -sometimes conflicting- points of view, such as the energy saving, the indoor comfort, the environmental and economic impact. This paper reports the results of the application of genetic algorithms to solve this “multi-objective optimization problem” in a building retrofit intervention in Italy. The results, even if related to a single case-study, suggest the optimal efficiency measures, whose robustness was tested in different Italian climatic zones.

Keywords

Building retrofit, Multi-objective optimization, Genetic algorithm, Comfort, LCC

1. INTRODUCTION

The construction sector is a priority area of action for the European Union, where it alone determines 40% of community consumptions, to achieve the climate and energy targets set for 2020 and 2050. In particular, the existing buildings renovation is one of the topics of greatest interest in the definition of energy policies, since in Europe the rate of replacement of the existing stock amounts to only 1-1.5% [1]. Consequently, in the last decades, increasingly restrictive measures have been imposed in the design of the building envelope and equipments, in order to substantially reduce energy consumptions during the use.

With the European Directive 2010/31/EC (EPBD recast) [2] the European

Elisa Di Giuseppe

DICEA - Dip. di Ingegneria
Civile, Edile e dell'Architettura,
Università Politecnica delle
Marche, via Breccie Bianche 12,
Ancona, 60131, Italia

Gabriele Galdenzi

DICEA - Dip. di Ingegneria
Civile, Edile e dell'Architettura,
Università Politecnica delle
Marche, via Breccie Bianche 12,
Ancona, 60131, Italia

Marco D’Orazio

DICEA - Dip. di Ingegneria
Civile, Edile e dell'Architettura,
Università Politecnica delle
Marche, via Breccie Bianche 12,
Ancona, 60131, Italia

Costanzo Di Perna

DIISM - Dipartimento di
Ingegneria Industriale e Scienze
Matematiche, Università
Politecnica delle Marche, via
Breccie Bianche 12, Ancona,
60131, Italia

* Corresponding author

Tel.: +39-0712204380;

e-mail: e.digiuseppe@univpm.it

Commission has imposed the construction of new “nearly Zero Energy Buildings” (nZEB) starting from 2020. Recently, with the Recommendations 2016/1318, EC also suggests to pursue buildings renovations at a “nearly zero energy” level [3].

However, while in recent decades it has been relatively simple to achieve considerable improvements in the energy performance of existing buildings in the face of modest -and quite cheap- measures, such the replacement of windows and of thermal equipments or the envelope insulation, the standard “nearly zero” energy consumptions can now be achieved only by using sophisticated and highly performing technologies, with consequent high economic investments. In this context, the EPBD Recast Directive raised the question of the economic evaluation of the energy efficiency measures for buildings, suggesting pursuing design solutions able to reach “optimal” levels of performance in terms of costs.

However, as noted by Ferreira et al. [4], the concepts of “cost optimality” and “nearly zero energy” are correlated, but not always compatible, and could lead to different design choices for the energy retrofit of a building. These problems are matched by the additional performance requirements for a building renovation, such as, for example, the thermo-hygrometric comfort and the acoustic and lighting standards.

The assessment of the energy performance of a building with various design alternatives can be carried out effectively with energy simulation programs. However, there are currently no consolidated methodologies and calculation tools, able to take into account the many - sometimes conflicting - performance requirements, to establish the optimal design solution from different points of view.

This work contributes to the issue by presenting a multi-objective optimization process based on genetic algorithms for the design of energy efficiency measures for a typical residential building in Italy. The innovation character of the research lies in the fact that, in parallel with the search for the design solutions able to minimize the energy consumption for air conditioning and life-cycle costs, it is also concerned with the need to guarantee the necessary thermal comfort inside the building in summer season. This topic is of great interest in the Italian climate context, but also in many other Countries that are increasingly subject to heat waves due to climate change in recent decades.

2. LITERATURE REVIEW

The search for a design solution that is effective under many points of view is one of the so-called “multi-objective optimization” problems, which require

1. INTRODUZIONE

Il settore dell'edilizia è un'area di azione prioritaria per l'Unione Europea, dove determina da solo il 40% dei consumi comunitari, nell'ottica del raggiungimento dei target sul clima e l'energia fissati per il 2020 e il 2050. In particolare, la riqualificazione di edifici esistenti risulta uno dei temi di maggiore interesse nella definizione delle politiche energetiche, poiché in Europa il tasso di sostituzione del patrimonio esistente ammonta solo al 1-1,5% [1]. Conseguentemente, negli ultimi decenni, sono state imposte misure sempre più restrittive nella progettazione degli elementi d'involucro ed impiantistici dei fabbricati, al fine di ridurre in modo consistente i consumi energetici in fase d'uso. Con la Direttiva Europea 2010/31/CE (EPBD recast) [2] la Commissione Europea ha imposto la realizzazione di nuovi edifici “a energia quasi zero” (nearly Zero Energy Buildings, nZEB) a partire dal 2020. Recentemente, con le Raccomandazioni 2016/1318, suggerisce anche di perseguire riqualificazioni ad un “livello di energia quasi zero” [3]. Tuttavia, mentre negli ultimi decenni è stato relativamente semplice ottenere considerevoli miglioramenti della presentazione energetica degli edifici esistenti a fronte di modesti -ed economici- interventi, quali la sostituzione di infissi, dell'impianto di climatizzazione o un blando isolamento dell'involucro, lo standard di consumi energetici “quasi zero” risulta raggiungibile oggi solo utilizzando tecnologie sofisticate e molto prestanti, con conseguenti elevati investimenti economici. In tale contesto, la Direttiva EPBD Recast ha per la prima volta posto la questione della valutazione economica degli interventi di efficientamento energetico degli edifici, suggerendo di perseguire soluzioni progettuali in grado di raggiungere livelli “ottimali” di prestazione in funzione dei costi. Come tuttavia rilevato da Ferreira et al. [4], i concetti di “ottimalità dei costi” e di “energia quasi zero” sono correlati, ma non sempre compatibili, e potrebbero portare a differenti scelte progettuali per la riqualificazione di un edificio. A tali problematiche si affiancano gli ulteriori requisiti prestazionali richiesti al progettista durante un intervento di riqualificazione di un fabbricato, quali, ad esempio, il comfort termo-igrometrico, gli standard acustici e quelli illuminotecnici. La valutazione delle prestazioni energetiche di un edificio alla luce di diverse alternative progettuali può essere svolta efficacemente con programmi di simulazione energetica. Mancano tuttavia oggi metodologie consolidate e strumenti di calcolo, in grado di tenere conto in contemporanea delle numerose - a volte conflittuali- necessità prestazionali, per stabilire la soluzione progettuale ottimale sotto i diversi punti di vista. Questo lavoro fornisce un contributo al tema, presentando un processo di ottimizzazione multi-obiettivo basato su algoritmi genetici per la progettazione di interventi di efficientamento energetico di un

the identification of solutions that minimize or maximize different “objective functions”, sometimes in conflict with each other. This type of problem has often been treated using “Pareto” processes, which allow to identify in the Pareto front the optimal solutions, i.e. all the points for which there is no point that is better at the same time for all the objectives considered in the function of optimization.

The problem becomes considerably complex when trying to pursue more objective functions and when the possible combinations between the variables give rise to thousands of cases. In this regard, the so-called “genetic algorithms”, a category of stochastic algorithms based on the theories of Darwinian evolution, have been used for several decades in various fields. These algorithms allow the less effective solutions to be discarded from a population, by iterating the generations until convergence is achieved with the best solutions.

In recent years these methods have been applied in numerous researches in the field of building design, as reported in the reviews of Attia et al [5] , Machairas et al. [6] and, recently Tian et al. [7].

Over time various calculation and optimization tools have been used, among which the most common are MATLAB toolbox and GenOpt, to be combined with energy simulation tools such as, among others, EnergyPlus or TRNSYS [8].

Generally, the studies have the objective of minimizing the costs of energy efficiency measures in case-study buildings and the related energy consumptions. Eskander et al. [9], for example, use a genetic algorithm encoded in MATLAB© to identify energy measures applied to a building simulated in four different regions of Portugal, such as to optimize these objective functions, also considering the consumption for summer air conditioning. Hamdy et al. [10] compare different design options on the envelope and equipments of a building in Finland, to determine solutions capable of achieving cost-optimal and nZEB standards. Even Harkouss et al. [11] apply a multi-objective optimization methodology based on the effectiveness of costs and consumptions in the design of nZEB buildings in Lebanon and France. Further works are reported e.g. in [12–15].

A lower number of researches on optimal energy efficiency measures also includes targets for maximizing thermal comfort. Among these, Delgarm et al. [16] apply a multi-objective optimization process to a single building environment in four areas of Iran to investigate, by varying several geometric and technical parameters, the measures able to reduce the total energy costs and thermal discomfort (expressed as Predicted Percentage of Dissatisfied,

tipico fabbricato residenziale in Italia. Il carattere di innovazione della ricerca risiede nel fatto che essa, parallelamente al ricercare le soluzioni progettuali in grado di minimizzazione i consumi energetici per la climatizzazione e i costi nel ciclo di vita, si interessa anche alla necessità di garantire il necessario comfort termico interno al fabbricato in fase estiva, tema di grande rilevanza nel contesto climatico italiano, ma anche in molti altri paesi sempre più soggetti alle ondate di calore conseguenti ai mutamenti climatici degli ultimi decenni.

2. STATO DELL'ARTE

La ricerca di una soluzione progettuale che risulti efficace sotto molteplici punti di vista rientra tra i cosiddetti problemi di “ottimizzazione multi-obiettivo”, che richiedono di individuare le soluzioni che minimizzano o massimizzano diverse “funzioni obiettivo”, a volte in contrasto tra loro. Questo tipo di problema è stato spesso trattato utilizzando processi “paretiani”, che permettono di individuare nel fronte di Pareto le soluzioni di ottimo, ovvero tutti i punti per i quali non esiste nessun punto che sia migliore contemporaneamente per tutti gli obiettivi considerati nella funzione di ottimizzazione. Il problema diventa notevolmente complesso quando si cercano di perseguire più funzioni obiettivo e quando le possibili combinazioni tra le variabili danno origine a migliaia di casi. A questo proposito sono utilizzati da qualche decennio in diversi settori i cosiddetti algoritmi genetici, una categoria di algoritmi stocastici basati sulle teorie dell’evoluzione darwiniana. Questi algoritmi permettono di scartare da una popolazione le soluzioni meno efficaci, iterando le generazioni fino al raggiungimento della convergenza alle soluzioni ottimali.

Negli ultimi anni tali metodi sono stati applicati anche in numerose ricerche nell’ambito della progettazione edilizia, come riportato nelle revisioni di Attia et al [5], Machairas et al. [6] e, recentemente, da Tian et al. [7]. Nel tempo diversi strumenti di calcolo ed ottimizzazione sono stati utilizzati, tra cui, i più diffusi risultano MATLAB toolbox e GenOpt, da affiancare a strumenti di simulazione energetica quali, tra i tanti, EnergyPlus o TRNSYS [8].

Generalmente gli studi hanno l’obiettivo di minimizzare i costi di intervento delle misure di efficientamento energetico in edifici casi-studio e i relativi consumi energetici. Eskander et al. [9], ad esempio, usano un algoritmo genetico codificato in MATLAB© per identificare misure di efficientamento applicate ad un edificio simulato in quattro differenti regioni del Portogallo, tali da ottimizzare queste funzioni obiettivo, considerando anche i consumi per la climatizzazione in fase estiva. Hamdy et al. [10] confrontano diverse opzioni progettuali sull’involucro e sulle componenti impiantistiche di un edificio in Finlandia, per determinare le soluzioni in grado di raggiungere standard cost-optimal e nZEB. Anche Harkouss et al. [11] applicano una metodologia di ottimizzazione multi-

PPD). Penna et al. [17] investigate measures to improve the efficiency of a reference building in Italy, introducing a comfort target into the cost-benefit analysis included in the optimization process, while limiting the analysis to the performance in the winter phase. Always in Italy, recently, Ferrara et al. [18] include thermal and visual comfort goals for different orientations and climate zones in the energy optimization process of a school classroom.

The present work aims to provide a contribution to the issue, including among the objective functions, a specific function linked to the thermal comfort in the summer phase without a conditioning system. This function has been used as a dividing line between the different efficiency solutions, to evaluate, among the comfortable solutions, those able to minimize consumptions and costs. These solutions have therefore been compared with those that include an air conditioning system.

3. METHODOLOGY

The work can be schematically summarized in the following main steps:

- selection of a case study building and definition of energy efficiency measures;
- modelling the building with Design Builder software and importing the .idf file into EnergyPlus dynamic energy analysis software;
- modification of EnergyPlus source code in order to include the calculation of global costs according to standard EN 15459 [19];
- definition of the objective functions for the optimization of energy consumption, life-cycle costs and internal thermal comfort;
- calculation of the objective functions in relation to the possible different combinations of the efficiency measures through the jEPlus + EA application.

The case study selected is the “1D” building defined by the CTI (Italian Thermotechnical Committee) as representative of an entire category of residential existing buildings in the Italian context. This case study has been chosen as it is similar to the reference buildings proposed by the EPBD-Recast Directive. Furthermore, the fact of being a CTI “study building” guaranteed the possibility of referring to certain data for the simulation inputs. It is a single-family house, which has a ground floor of 143 m² and includes a basement and an attic of the same surface; the roof is pitched. In determining the starting conditions of construction solutions and equipments, we referred to the database of the European research project TABULA [20].

Specific energy efficiency measures have been designed for the building, considering different performance levels for each one. In particular, the

obiettivo basata sull'efficacia di costi e consumi nella progettazione di edifici nZEB in Libano e Francia. Ulteriori lavori sono riportati ad esempio in [12–15]).

Un numero inferiore di studi sulle misure ottimali di efficientamento energetico include anche obiettivi di massimizzazione del comfort termico. Tra questi, Delgarm et al. [16] applicano un processo di ottimizzazione multi-obiettivo ad un singolo ambiente di un edificio in quattro zone dell'Iran per ricercare, al variare di diversi parametri geometrici e tecnici, gli interventi in grado di ridurre i costi energetici totali e il discomfort termico (espresso come Predicted Percentage of Dissatisfied, PPD). Penna et al. [17] indagano misure di efficientamento di un edificio di riferimento in Italia, introducendo nell'analisi costi-benefici inclusa nel processo di ottimizzazione anche un obiettivo di comfort, limitando tuttavia l'analisi alla prestazione in fase invernale. Sempre in Italia, recentemente, Ferrara et al. [18] includono nel processo di ottimizzazione energetica di un'aula scolastica obiettivi di comfort termico e visivo per diversi orientamenti e zone climatiche.

Il presente lavoro intende fornire un contributo alla tematica, includendo tra le funzioni-obiettivo, una funzione specifica legata al comfort termico in fase estiva in assenza di impianto di condizionamento. Questa funzione è stata impiegata come discriminare tra le diverse soluzioni di efficientamento, per valutare, tra le soluzioni confortevoli, quelle in grado di minimizzare consumi e costi. Queste soluzioni sono quindi state confrontate con quelle che includono un impianto di climatizzazione.

3. METODOLOGIA

Il lavoro può essere schematicamente riassunto nelle seguenti fasi principali:

- selezione di un edificio caso studio e definizione delle misure di efficientamento energetico;
- modellazione dell'edificio con il software Design Builder e importazione del file .idf nel software di analisi energetica dinamica EnergyPlus;
- modifica del codice sorgente di EnergyPlus al fine di includere il calcolo dei costi globali secondo la norma EN 15459 [19];
- definizione delle funzioni obiettivo per l'ottimizzazione dei consumi energetici, dei costi nel ciclo di vita e del comfort termico interno;
- calcolo delle funzioni obiettivo in relazione alle possibili diverse combinazioni per le misure di efficientamento tramite l'applicativo jEPlus+EA.

Il caso studio selezionato è l'edificio “1D” definito dal CTI, Comitato Termotecnico Italiano, rappresentativo di un'intera categoria di edifici residenziali esistenti nel contesto italiano. È stato scelto tale caso studio in quanto riconducibile agli edifici di riferimento proposti dal Decreto EPBD-Recast. Inoltre, il fatto di essere un “edificio studio” del CTI ha garantito la possibilità di riferirsi a grandezze certe per quanto riguarda gli input

following solutions have been considered for the envelope: exterior or interior insulation with different material typologies; application of a reflective paint outside; replacement of windows and installation of a glazing system. For the thermal equipments, two scenarios were assessed:

- in the first, only heating in the winter phase was considered, assuming the replacement of the gas boiler and the installation of a controlled mechanical ventilation system (MV) with heat recovery unit;
- in the second, a heat pump for winter and summer conditioning was considered, together with the mechanical ventilation system; moreover, a photovoltaic system (PV) has been included.

Table 1 shows the energy efficiency measures considered.

In the multi-optimization process the following objective functions were considered:

- minimization of primary energy consumption for heating, ventilation and cooling;
- minimization of global costs, calculated according to EN 15459 in a 30-year life-cycle, considering the initial investment, the annual costs for energy, maintenance and replacement of components, and the residual value of these at the end of the calculation period;
- minimization of internal thermal discomfort in the summer phase, represented by the sum of the hours when the internal operating temperature is out of the range established on the basis of the adaptive model (EN 15251 standard [21]), for the solutions of the scenario 1 (absence of summer air conditioning).

The building was modelled in the Design Builder environment, then the *.idf* file was imported into the EnergyPlus energy analysis software, whose source code was modified in order to include, directly during the calculation of the energy performance, the assessment of the Global Costs.

Through the jEPlus + EA application, the combinations of the efficiency strategies were managed and the genetic algorithm was implemented (Fig.1). The use of this algorithm in the multi-optimization process has made it possible to considerably reduce the computational costs and simulation time, moving from a total search space of over 60000 simulations to less than 6000 calculation combinations.

The evaluation of the energy performance was carried out considering the conditions of use of the building and of the heating equipments of the standard UNI/TS 11300 [22], considering in particular a ventilation rate of 0.3 h^{-1} and a simplified approach for the interior heat gains. The energy simulations were conducted in three Italian climatic zones: Zone E (Torino), Zone D (Ancona),

della simulazione. Si tratta di una villetta monofamiliare, che si sviluppa al piano terra su 143 m² e include un piano interrato e un sottotetto della stessa superficie; la copertura è a falde inclinate. Nel determinare le condizioni di partenza, per quanto riguarda soluzioni costruttive ed impianti, si è fatto riferimento alle banche dati del progetto di ricerca europeo TABULA [20]. Su tale edificio sono stati progettati specifici interventi di efficientamento energetico, considerando per ciascuno diversi livelli prestazionali. In particolare si sono considerati i seguenti interventi sull'involucro: isolamento a cappotto o dall'interno con diverse tipologie di isolante; applicazione di una vernice riflettente all'esterno; sostituzione degli infissi e installazione di un sistema di schermatura delle superfici vetrate. Per gli impianti sono stati valutati due scenari:

- *nel primo, è stato considerato il solo riscaldamento in fase invernale, ipotizzando la sostituzione della caldaia e l'installazione di un impianto di ventilazione meccanica controllata con recuperatore di calore;*
- *nel secondo, si è considerata una pompa di calore per il condizionamento invernale ed estivo, insieme al sistema di ventilazione meccanica; inoltre è stato inserito un impianto fotovoltaico. In Tabella 1 sono riportate le misure di efficientamento energetico considerate.*

Nel processo di multi-ottimizzazione sono state considerate le seguenti funzioni obiettivo:

- *minimizzazione dei consumi di energia primaria per riscaldamento, ventilazione e raffrescamento;*
- *minimizzazione dei costi globali, calcolati ai sensi della norma EN 15459 in un ciclo di vita di 30 anni, considerando l'investimento iniziale, i costi annuali energetici, di manutenzione e sostituzione dei componenti, ed il valore finale di questi al termine del periodo di calcolo;*
- *minimizzazione del discomfort termico interno in fase estiva, rappresentato dalla somma delle ore in cui la temperatura operativa interna esce dal range stabilito sulla base del modello adattivo (norma EN 15251[21]), per le soluzioni dello scenario impiantistico 1 (assenza di impianto di climatizzazione estiva).*

L'edificio è stato modellato in ambiente Design Builder; il file .idf generato è stato poi importato nel software di analisi energetica dinamica EnergyPlus, di cui è stato modificato il codice sorgente al fine includere, direttamente durante il calcolo della prestazione energetica, la valutazione dei Costi Globali. Tramite l'applicativo jEPlus+EA, sono state gestite le combinazioni tra le diverse strategie di efficientamento ed è stato implementato l'algoritmo genetico (Fig.1). L'utilizzo di tale algoritmo nel processo di multi-ottimizzazione ha

Zone B (Palermo).

The building was also modelled in a steady-state energy analysis software in order to verify the dynamic model and evaluate which design solutions allowed to address the current Italian regulatory references on energy efficiency in buildings [23].

permesso di ridurre notevolmente gli oneri computazionali ed i tempi di simulazione, passando da uno spazio totale di ricerca di oltre 60000 simulazioni a meno di 6000 combinazioni di calcolo. La valutazione della prestazione energetica è stata condotta considerando le condizioni d'uso del fabbricato e degli impianti

ENERGY EFFICIENCY MEASURE		REFERENCE PARAMETERS	PERFORMANCE LEVEL	SERVICE LIFE	COSTS		
					€/m ²	total (€)	
EXTERNAL ENVELOPE INSULATION	EXTERNAL INSULATION	INSULATION SYSTEMS WITH EXPANDED POLYSTIRENE (EPS)	X= 40 U= 0,36	50 years	33,21	5713	
			X= 80 U= 0,26		37,21	6401	
			X= 120 U= 0,20		41,21	7089	
			X= 160 U= 0,16		45,21	7777	
			X= 200 U= 0,14		49,21	8465	
			X= 240 U= 0,13		53,21	9153	
	INTERNAL INSULATION	INSULATION SYSTEMS WITH EXPANDED POLYSTIRENE (EPS)	INSULATION THICKNESS X (mm), WALL THERMAL TRANSMITTANCE U-value(W/m ² K)	X= 40 U= 0,36	50 years	18,83	3238
			X= 80 U= 0,26	23,43		4029	
			X= 120 U= 0,20	28,03		4820	
			X= 160 U= 0,16	32,63		5612	
			X= 200 U= 0,14	37,23		6403	
			X= 240 U= 0,13	41,83		7194	
	INSULATION SYSTEMS WITH WOOD FIBER (FL)		X= 40 U= 0,37	50 years	17,56	3020	
			X= 80 U= 0,27		25,44	4375	
			X= 120 U= 0,21		33,32	5730	
			X= 160 U= 0,17		41,20	7086	
			X= 200 U= 0,14		49,08	8441	
			X= 240 U= 0,13		56,96	9796	
EXTERNAL PLASTER	NORMAL PAINTING	SOLAR ABOSRBANCE (-)	0,7	30 years	-	-	
	REFLECTIVE PAINTING		0,2		11,83	2035	

ENERGY EFFICIENCY MEASURE		REFERENCE PARAMETERS	PERFORMANCE LEVEL	SERVICE LIFE	COSTS	
					(€/m ²)	total (€)
WINDOWS REPLACEMENT	GLASS 1: DOUBLE GLASS, WOODEN FRAMES	WINDOW THERMAL TRANSMITTANCE U _w (W/m ² K), SOLAR GLASS FACTOR g _{GL} (-)	U _w =2,10 g _{GL} =0,62	30 years	369	6507
			U _w =1,90 g _{GL} =0,62		378	6670
			U _w =1,58 g _{GL} =0,62		389	6868
			U _w =1,20 g _{GL} =0,45		443	7820
SOLAR SHADING SYSTEM	NO SHADING	REDUCTION FACTOR OF SOLAR GAINS g _{GL+SH} /g _{GL} (-)	-	30 years	-	-
	SEXTERNAL UN SCREENS		0,35		267	4710

SCENARIOS	ENERGY EFFICIENCY MEASURE	PERFORMANCE LEVEL	SERVICE LIFE	COSTS	
				Total cost (€)	
SCENARIO 1	HEATING EQUIPMENT	TRADITIONAL BOILER WITH CENTRALIZED REGULATION SYSTEM	ηGN = 0,88	20 years	2647
		TRADITIONAL BOILER WITH CENTRALIZED REGULATION SYSTEM	ηGN = 0,93		2850
		CONDENSING BOILER WITH ZONE REGULATION SYSTEM	ηGN = 1,00		4072
	VENTILATION	NATURAL VENTILATION	no	18 years	-
		MECHANICAL CONTROLLED VENTILATION WITH HEAT RECOVERY	EFF = 60%		3563
			EFF = 70%		4072
EFF = 90%	5090				
HEAT PUMP FOR HEATING AND COOLING	AIR-WATER HEAT PUMP	COP=2,5 EER=2,3	18 years	2121	
		COP=3,1 EER=2,9		4360	
		COP=4,1 EER=3,5		6600	
		RADIANT FLOOR PANELS		-	50 years
SCENARIO 2	PHOTOVOLTAIC	PANELS, INVERTERS AND CONTROL PANELS	no	30 years	-
			2 kWp 15 m ²		4500
			3 kWp 22,5 m ²		6500
			4 kWp 30 m ²		8500
			5 kWp 37,5 m ²		10500
VENTILATION	NATURAL VENTILATION	no	18 years	-	
		MECHANICAL CONTROLLED VENTILATION WITH HEAT RECOVERY		EFF = 60%	3563
				EFF = 70%	4072
				EFF = 90%	5090

Table 1. Energy efficiency measures and related performance levels, investment costs, service lives.

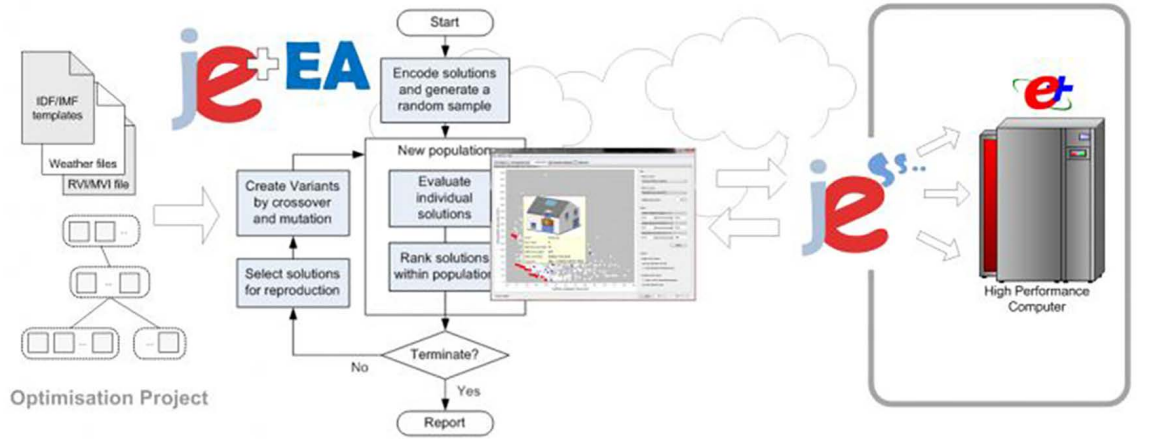


Figure 1. Diagram of the energy simulation and optimization methodology.

4. RESULTS

First, the impact on the thermal comfort of an indoor environment (living room, facing south) of the efficiency measures designed, for the three climatic contexts and in the equipment scenario 1 was assessed. From the totality of the calculated simulations, we extrapolated the only solutions able to guarantee an acceptable level of comfort according to UNI 15251, in relation to a threshold of 5% hours of discomfort compared to the total number of hours in the summer. The graph in Fig. 2 shows the comfortable solutions obtained with the various categories of intervention, expressed as a percentage referred to the total solutions in each category.

previste dagli standard UNI/TS 11300 [22], considerando in particolare un tasso di ventilazione 0.3 h^{-1} e un approccio semplificato per il calcolo degli apporti interni. Le simulazioni energetiche sono state condotte in tre zone climatiche: Zona E (Torino), Zona D (Ancona), Zona B (Palermo). L'edificio è stato inoltre modellato in un programma di analisi energetica semi-stazionaria al fine di verificare il modello dinamico e valutare quali soluzioni progettuali permettessero di rispondere agli attuali riferimenti normativi sull'efficienza energetica negli edifici [23].

4. RISULTATI

In primo luogo è stato valutato l'impatto sul comfort termico di un ambiente interno (soggiorno, esposto a sud) delle misure di efficientamento progettate, per i tre contesti climatici

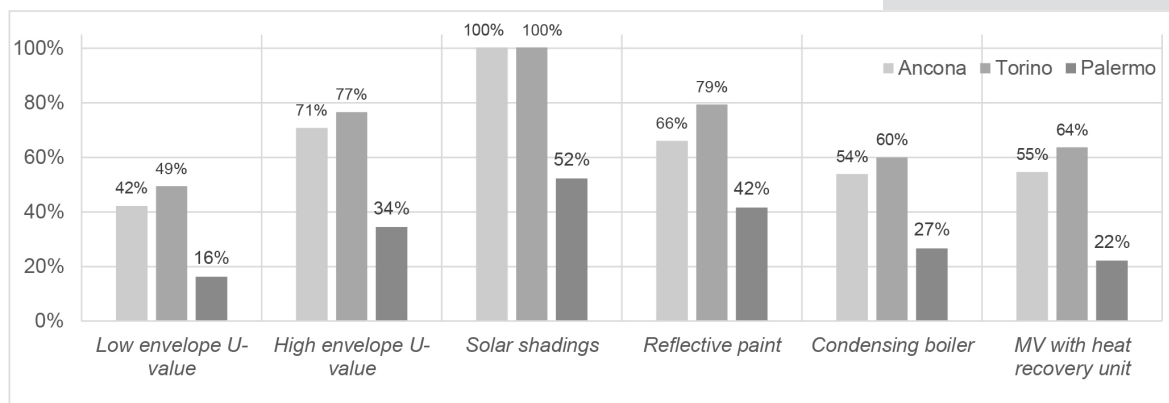


Figure 2. Percentage of comfort solutions obtained with the different categories of intervention in the climatic contexts, compared to the total of the simulated solutions.

In general, the most effective measures are those that allow to reduce the solar gains on the envelope during the summer: shielding systems on glass surfaces (effective in 100% of cases in the contexts of Ancona and Torino and over 50% in the case of Palermo) and reflecting paints on the external

simulati e nello scenario impiantistico 1. Dalla totalità delle simulazioni calcolate sono state estrapolate le sole soluzioni in grado di garantire un livello di comfort accettabile, secondo UNI 15251, in relazione ad una soglia del 5% di ore di discomfort rispetto

surface (effective between 42% and 79% of cases depending on the climatic zones). Furthermore, it is evident that greater envelope transmittance ($U > 0.26$ W/m²K), compared to a high insulation ($U < 0.15$ W/m²K), favours summer thermal comfort for a greater number of cases. This result is easier to obtain in the areas of Ancona and Turin rather than in Palermo, where there is still a sharp decrease in the percentage of comfort solutions, due to the high temperatures reached in the summer.

al numero di ore totali nel periodo estivo. Il grafico in Fig. 2 riporta le soluzioni confortevoli ottenute con le diverse categorie di intervento, riferite in percentuale rispetto al totale delle soluzioni di ogni categoria. In linea generale, le misure più efficaci risultano quelle che permettono di ridurre gli apporti solari sull'involucro in fase estiva: sistemi di schermatura sulle superfici vetrate (efficaci nel 100% dei casi nei contesti di Ancona e Torino e sopra il 50% nel caso di Palermo) e pitture riflettenti sulla superficie esterna

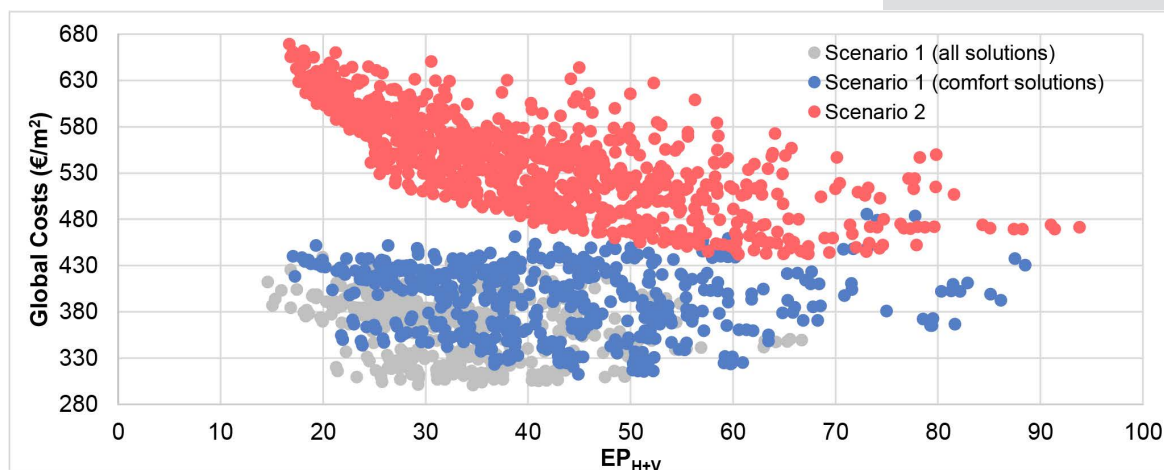


Figure 3. Global costs vs energy consumptions for heating and ventilation (EP_{H+V}) for the solutions in the climatic context of Ancona.

Once selected, for the equipment scenario 1, the only combinations of efficiency measures able to guarantee internal thermal comfort in the summer phase, the global costs of these measures in the life cycle have been assessed. These are shown, in relation to the related energy consumption, on the dispersion chart in Fig. 3 (scenario 1, comfort solutions). The image also shows the totality of the solutions of scenario 1 and those of scenario 2 (which includes a summer air conditioning system).

The minimum area of the curve in the different scenarios, defined as the “optimal costs” band, identifies the solutions able to minimize the costs in the life cycle. These solutions have moderate energy consumption, but not the lowest ever. In fact, the points to the left of the optimal range represent the solutions with low consumption - and therefore cost - but against higher investments for the installation of efficiency measures, and consequently higher global costs; the points on the right represent the solutions with higher costs in the use phase of the building due to the higher energy requirements.

It is evident that solutions of the only heating scenario (blue points in the graph) are clearly advantageous from an economic point of view. The higher global costs in the second scenario (red points in the graph) are due to the

(efficaci tra il 42% e il 79% dei casi a seconda delle zone climatiche). Inoltre risulta evidente come una maggiore trasmittanza dell'involucro ($U > 0.26$ W/m²K), rispetto ad un elevato isolamento ($U < 0.15$ W/m²K), favorisca il benessere termico estivo per un maggior numero di casi. Tale risultato risulta più semplice da ottenere nelle zone di Ancona e Torino piuttosto che a Palermo, dove si assiste comunque ad una netta diminuzione della percentuale di soluzioni di comfort, dovuta alle alte temperature raggiunte in fase estiva. Una volta selezionate, per lo scenario impiantistico 1, le sole combinazioni di interventi in grado di garantire comfort termico interno in fase estiva, si sono valutati i costi globali di tali misure nel ciclo di vita del fabbricato. Questi sono riportati, a fronte dei consumi energetici correlati, sul grafico a dispersione in Fig. 3 (scenario 1, soluzioni di comfort). L'immagine riporta anche la totalità delle soluzioni dello scenario 1 e quelle dello scenario 2 (che prevede un impianto di climatizzazione estiva). La zona di minimo della curva che sottende i punti nei diversi scenari, definita come fascia dei “costi ottimali”, individua le soluzioni in grado di minimizzare i costi nel ciclo di vita. Tali soluzioni hanno consumi energetici moderati, ma non i più bassi in assoluto. Infatti, i punti alla sinistra della fascia ottimale rappresentano le soluzioni con bassi consumi - e quindi costi - ma a fronte di più elevati investimenti per l'installazione delle

installation of more sophisticated equipments and to the summer energy consumption. As an example, for scenario 1, the solution that provides the greatest benefits in terms of costs is characterized by a 12cm EPS insulation, a higher performance glass ($U=1.2 \text{ W/m}^2\text{K}$) and a high efficiency boiler.

Therefore, the prevailing categories of intervention among the solutions in the optimal cost band in the different climatic zones were analysed. The graphs in Fig. 4 and 5 show the box and whisker plots of the global costs distributions of the simulations in the cost-optimal band, subdivided by category of intervention, in scenario 1 and in scenario 2, for the climate zone D (Ancona). The cost distributions of all cost-optimal solutions are also reported.

misure di efficientamento, da cui conseguono maggiori costi globali; i punti alla destra rappresentano le soluzioni con maggiori costi in fase d'uso del fabbricato a causa dei più elevati fabbisogni energetici. È evidente come le soluzioni con solo riscaldamento (punti blu nel grafico) siano nettamente vantaggiose sotto il profilo economico. I maggiori costi globali nel secondo scenario (punti rossi nel grafico) sono dovuti all'installazione di impianti più sofisticati e ai consumi energetici in fase estiva. A titolo di esempio, per lo scenario 1, la soluzione che fornisce i maggiori benefici in termini di costi è caratterizzata da un isolamento in EPS da 12cm, dal vetro a maggiori prestazioni ($U=1.2 \text{ W/m}^2\text{K}$) e dalla caldaia ad alta efficienza. Sono state quindi analizzate le

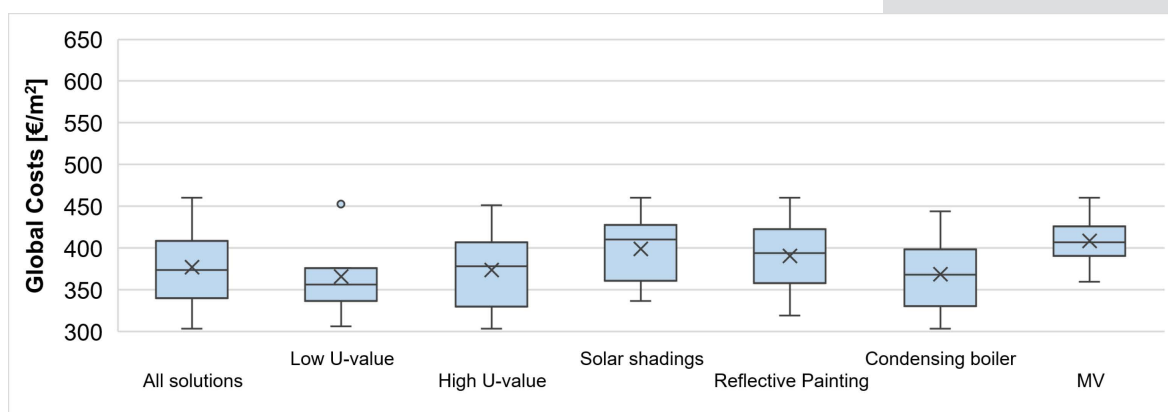


Figure 4. Global costs distributions for the cost-optimal range. Scenario 1 ($35 < EPH+V < 49,7 \text{ kWh/m}^2\text{y}$).

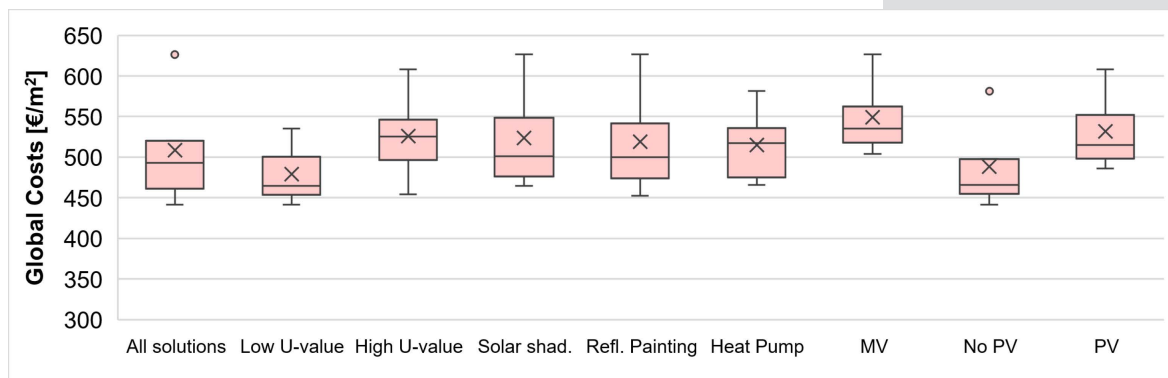


Figure 5. Global costs distributions for the cost-optimal range. Scenario 2 ($50 < EPH+V < 69,9 \text{ kWh/m}^2\text{y}$).

In the first equipment scenario (Figure 4), it especially emerges the convenience of investing in the envelope insulation, together with the replacement of the boiler. Also in the second scenario, acting on the envelope insulation appears more convenient in terms of optimal costs, compared to the installation of equipment such as a high-performance heat pump, a mechanical ventilation system and a photovoltaic system. It should however be emphasized that in this work no specific incentive forms have been considered for these technologies,

categorie di intervento prevalenti tra le soluzioni nella fascia dei costi ottimali nelle diverse zone climatiche. I grafici in Fig. 4 e 5 riportano i box whisker plots delle distribuzioni dei costi globali delle simulazioni nella fascia cost-optimal, suddivise per categoria di intervento, rispettivamente nello scenario 1 e nello scenario 2, per la zona climatica D (Ancona). Sono inoltre riportate le distribuzioni dei costi di tutte le soluzioni della fascia cost-optimal. Nel primo scenario impiantisco (Fig. 4), emerge in particolare

which could obviously favour their use.

Finally, the results obtained in the climatic area of Ancona were compared with those in the other two zones. Tables 2 and 3 show the median values of the global costs distributions for each energy efficiency category in Ancona and the percentage deviations compared to the other two areas. In the first equipment scenario (Table 2), it is basically confirmed what achieved in the Ancona area. In Torino, equipments measures appear to be more cost-effective, given the greater consumption in the winter phase. In the climatic zone of Palermo, on the other hand, solutions with low levels of insulation and shading systems are more advantageous, allowing to contain the overheating of indoor environments. Also in the second equipment scenario (Table 3) similar trends are observed. It can be seen that in the simulations carried out in Palermo the greater solar irradiation makes the installation of a photovoltaic system more effective.

la convenienza di investire sull'isolamento dell'involucro esterno, parallelamente alla sostituzione della caldaia. Anche nel secondo scenario intervenire sull'involucro appare più conveniente in termini di costi ottimali, rispetto all'installazione di dotazioni impiantistiche quali una pompa di calore ad alte prestazioni, un sistema di ventilazione meccanica ed un impianto fotovoltaico. Va comunque sottolineato che in questo lavoro non sono state considerate forme di incentivazione specifiche per tali tecnologie, che potrebbero ovviamente avvantaggiare il loro uso. Infine sono stati messi a confronto i risultati ottenuti nella zona di Ancona con quelli nelle altre due zone. Le Tabelle 2 e 3 riportano i valori mediani delle distribuzioni dei costi globali per ogni categoria nella zona di Ancona e gli scostamenti percentuali rispetto alle altre due zone. Nello scenario di solo riscaldamento (Tabella 2) tendenzialmente è confermato quanto si ottiene nella zona di Ancona. A Torino appaiono più convenienti gli interventi sugli impianti, dati i maggiori consumi in fase invernale. Nella zona climatica di Palermo invece

SCENARIO 1									
	All solutions	Low U-value	High U-value	Solar shading	Painting	Boiler	MV		
ANCONA	374	357	378	410	394	378	407		
TORINO	+9%	+13%	+10%	+7%	+8%	+8%	+6%		
PALERMO	-23%	+1%	-30%	-28%	-26%	-22%	-13%		

SCENARIO 2									
	All solutions	Low U-value	High U-value	Solar shading	Painting	Heat Pump	MV	PV	NO PV
ANCONA	493	465	525	501	500	517	535	466	515
TORINO	+9%	+13%	+12%	+12%	+11%	+5%	+5%	+12%	+6%
PALERMO	-6%	+1%	-11%	+3%	+1%	-5%	+2%	-1%	-10%

Table 2. Median values of global costs distributions for the cost-optimal band in Ancona area and percentage deviations with the values obtained in the other climatic locations. Scenarios 1 and 2.

5. CONCLUSIONS

The present work shows the application of a multi-objective methodology based on genetic algorithms for the implementation of energy requalification interventions of the existing building stock, aimed to minimizing the energy consumption, the global costs in the life cycle and the internal thermal discomfort in summer. This issue is of great interest, as part of the recent debate at a regulatory and scientific level, on the need to obtain increasingly “zero-energy” buildings at reduced costs and with high levels of performance. The work focused in particular on the need to ensure adequate internal thermal comfort during the summer, a very important aspect in the Italian climate

sono più vantaggiose le soluzioni con bassi livelli di isolamento e sistemi di contenimento dei carichi radiativi solari, che consentono di contenere il surriscaldamento degli ambienti interni. Anche nello scenario con pompa di calore (Tabella 3) si riscontrano andamenti simili. Si può notare come nelle simulazioni svolte a Palermo la maggiore irradiazione solare renda più efficace l'installazione di un impianto fotovoltaico.

5. CONCLUSIONI

Il presente lavoro mostra l'applicazione di una metodologia multi-obiettivo basata su algoritmi genetici volta alla realizzazione di interventi di riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente, con l'obiettivo di minimizzare i consumi energetici, i costi nel ciclo di vita e il discomfort

context, but also in many other Countries increasingly subject to heat waves due to global climate change.

The work, applying multi-objective simulations based on genetic algorithms to a building case study, intends to present the innovation of the methodological approach that, applied to several reference buildings in different climatic conditions and in relation to different efficiency measures, could make the cost-optimal strategy introduced in European and national legislation more effective. The design directions that are drawn from the specific case study underline the importance of limiting the solar gains on the envelope during the summer (use of solar shading and reflective paints), rather than the use of plant equipments for air conditioning. This is not obvious if we consider the recent push to realize increasingly sophisticated equipments, often expensive both in the investment and in the use phase.

6. REFERENCES

- [1] European Commission - Ad-hoc Industrial Advisory Group. Energy-Efficient Buildings PPP Multi-Annual roadmap and longer term strategy. 2010.
- [2] EU Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast).
- [3] Commission Recommendation (EU) 2016/1318 of 29 July 2016 on guidelines for the promotion of nearly zero-energy buildings and best practices to ensure that, by 2020, all new buildings are nearly zero-energy buildings.
- [4] Ferreira M., Almeida M., Rodrigues A., Silva S.M., Comparing cost-optimal and net-zero energy targets in building retrofit, "Building Research & Information", 44 (2016), p. 188–201, doi:10.1080/09613218.2014.975412.
- [5] Attia S., Hamdy M., O'Brien W., Carlucci S., Assessing gaps and needs for integrating building performance optimization tools in net zero energy buildings design, "Energy and Buildings", 60 (2013), p. 110–124, doi:10.1016/j.enbuild.2013.01.016.
- [6] Machairas V., Tsangrassoulis A., Axarli K., Algorithms for optimization of building design: A review, "Renewable and Sustainable Energy Reviews", 31 (2014), p. 101–12, doi:10.1016/j.rser.2013.11.036.
- [7] Tian Z., Zhang X., Jin X., Zhou X., Si B., Shi X., Towards adoption of building energy simulation and optimization for passive building design: A survey and a review, "Energy and Buildings", 158 (2018), p.1306–1316, doi:10.1016/j.enbuild.2017.11.022.
- [8] Dalla Mora T., Peron F., Romagnoni P., Almeida M., Ferreira M., Tools and procedures to support decision making for cost-effective energy and carbon emissions optimization in building renovation, "Energy and Buildings" 167 (2018), p. 200–215, doi:10.1016/j.enbuild.2018.02.030.
- [9] Eskander M.M., Sandoval-Reyes M., Silva C.A., Vieira S.M., Sousa J.M.C., Assessment of energy efficiency measures using multi-objective optimization in Portuguese households, "Sustainable Cities and Society", 35 (2017), p. 764–773, doi:10.1016/j.scs.2017.09.032.
- [10] Hamdy M., Hasan A., Siren K., A multi-stage optimization method for cost-optimal and nearly-zero-energy building solutions in line with the EPBD-recast 2010, "Energy and Buildings", 56 (2013), p. 189–203, doi:10.1016/j.enbuild.2012.08.023.
- [11] Harkouss F., Fardoun F., Biwole P.H., Multi-objective optimization methodology for net zero energy buildings, "Journal of Building Engineering", 16 (2018), p. 57–71, doi:10.1016/j.jobe.2017.12.003.
- [12] Asadi E., Da Silva M.G., Antunes C.H., Dias L., Multi-objective optimization for building retrofit strategies: A model and an application, 44 (2012), p. 81–87, doi:10.1016/j.enbuild.2011.10.016.
- [13] Ascione F., Bianco N., De Stasio C., Mauro G.M., Vanoli G.P., A new methodology for cost-optimal analysis by means of the multi-objective optimization of building energy performance, "Energy and Buildings", 88 (2015), p. 78–90.
- [14] Carreras J., Boer D., Guillén-Gosálbez G., Cabeza L.F., Medrano M., Jiménez L., Multi-

termico interno in fase estiva. Tale tematica è di grande interesse, nell'ambito del recente dibattito, a livello normativo e scientifico, sulla necessità di ottenere edifici sempre più "a energia zero", a costi ridotti, e con elevati livelli prestazionali. Il lavoro si è in particolare focalizzato sulla necessità di garantire adeguato comfort termico interno in fase estiva, aspetto molto importante nel contesto climatico italiano, ma anche di molti altri paesi sempre più soggetti a fenomeni di ondate di calore conseguenti ai mutamenti climatici globali.

Il lavoro, applicando le simulazioni multi-obiettivo basate su algoritmi genetici ad un caso studio, intende presentare l'innovazione dell'approccio metodologico che, applicato a diversi edifici di riferimento in diverse condizioni climatiche e in relazione a diverse misure di efficientamento, potrebbe rendere maggiormente efficace la strategia dei costi-ottimali introdotta nella legislazione europea e nazionale. Le indicazioni progettuali che si traggono dal caso studio specifico a cui la metodologia è stata applicata sottolineano l'importanza di limitare gli apporti solari sull'edificio in fase estiva (uso di schermature solari, vernici riflettenti), piuttosto che l'impiego di dotazioni impiantistiche per la climatizzazione. Tale aspetto non risulta scontato, se si considera la recente spinta a realizzare impianti sempre più sofisticati, ma spesso costosi, sia in fase di investimento, che in fase di utilizzo.

- objective optimization of thermal modelled cubicles considering the total cost and life cycle environmental impact, "Energy and Buildings", 88 (2015), p. 335–46, doi:10.1016/j.enbuild.2014.12.007.
- [15] Pombo O., Allacker K., Rivela B., Neila J., Sustainability assessment of energy saving measures: a multi-criteria approach for residential buildings retrofitting—A case study of the Spanish housing stock, "Energy and Buildings", 116 (2016), p. 384–394, doi:10.1016/j.enbuild.2016.01.019.
- [16] Delgarm N., Sajadi B., Delgarm S., Multi-objective optimization of building energy performance and indoor thermal comfort: A new method using artificial bee colony (ABC), "Energy and Buildings", 131 (2016), p. 42–53, doi:10.1016/j.enbuild.2016.09.003.
- [17] Penna P., Prada A., Cappelletti F., Gasparella A., Multi-objectives optimization of Energy Efficiency Measures in existing buildings, "Energy and Buildings", 95 (2015), p. 57–69, doi:10.1016/j.enbuild.2014.11.003.
- [18] Ferrara M., Sirombo E., Fabrizio E., Automated optimization for the integrated design process: the energy, thermal and visual comfort nexus, "Energy and Buildings", 168 (2018), p. 413–427, doi:10.1016/j.enbuild.2018.03.039.
- [19] CEN European Committee for Standardization. EN 15459 Economic evaluation procedure for energy systems in buildings. 2007.
- [20] Corrado V., Ballarini I., Corgnati S.P., Typology Approach for Building Stock National scientific report on the TABULA activities in Italy, 2012.
- [21] CEN European Committee for Standardization. EN 15251 Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. 2007.
- [22] UNI/TS 11300-1 Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale. 2014.
- [23] Decreto Ministeriale 26.06.2015: Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici.