

AUTOMATED DESIGN PROCESS FOR COST-EFFECTIVE SUSTAINABLE ARCHITECTURE

A performance based approach

Abstract

In the pursuit of the Agenda 2030 goal to develop more sustainable cities, the delivery of energy efficient and performance reliable buildings at an affordable cost takes indeed a crucial role. In this work, a multi-objective design optimization procedure, driven by a genetic algorithm, is proposed as a state of the art methodology to deliver an optimized project, assessing the attainment of energy and economic performance targets by the means of an Automated Building Performance Simulation (ABPS) process. The proposed workflow allows to analyse several design configurations in a fully automated way at an early stage of the design process, when strategic choices, having a strong impact on the final performance of the building, are made. The optimization process leads to the minimization of the Construction Cost and Annual Energy Need of a case study building, by the implementation of several passive strategies.

Keywords: Sustainable Development, Performance Improvement, Multi-Objective Optimization, Parametric Algorithmic Modelling, Automated Workflow

1 Introduction

To accomplish Agenda 2030 goal for the attainment of sustainable cities, increasingly stringent requirements are requested from designers regarding the achievement of specific performance objectives of the developed projects, from the financial and operational point of view. The need for the development of design strategies that bring the optimization of buildings Performance to the core of the design process imposes itself with increasing vigour. The aim of this paper is to describe and apply an innovative design optimization workflow that allows to explore a wide design space, optimizing the computational time by focusing the research on the solutions that maximize or minimize the chosen performance indicators. A good choice of the design variables, in the first stages of the design process, allows indeed to deliver a project that reaches energy saving performance targets (Fig. 1), avoiding redesign costs (Fig. 2). The goal of improving architectural cost-efficiency and sustainability is obtained by setting the Construction Cost and the Annual Energy Need as the two performance indicators to be minimized in the carried out optimization routine.

1.1 The notion of Performance

Although in his writing "De Architectura" Vitruvius never speaks directly of performance, this idea can certainly be recognized by a

A performance based approach

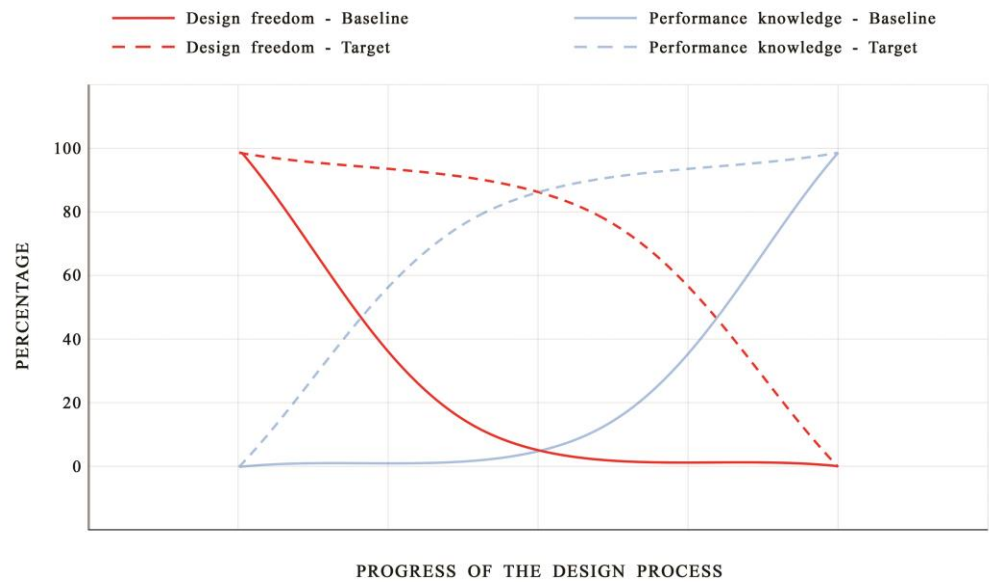


Fig. 1 - The curves of design freedom and performance knowledge throughout the design process. Comparison between baseline and target trend.

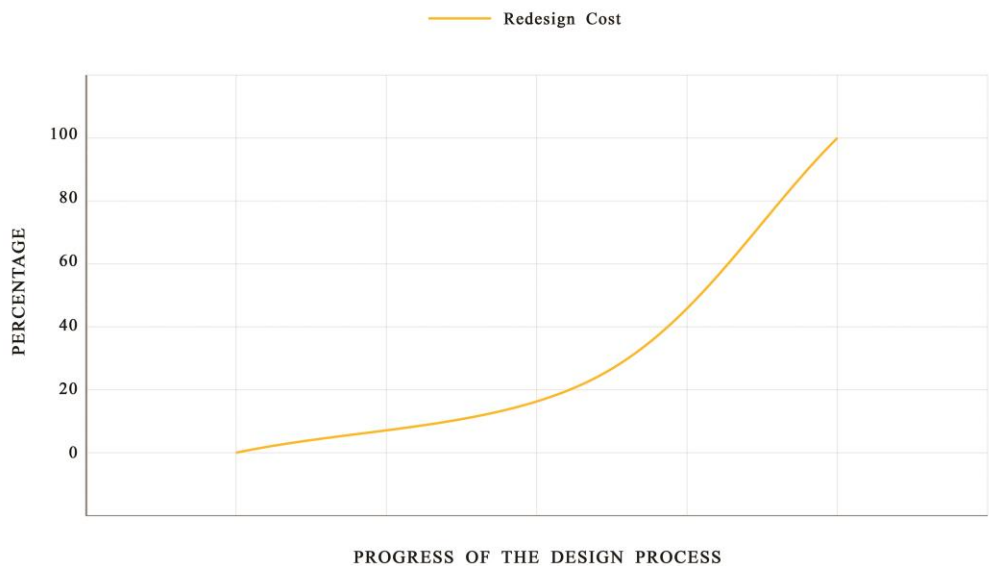


Fig. 2 - The redesign cost curve throughout the design process

modern reader in the concepts of Firmitas, Utilitas, Venustas, to which today we would refer respectively with the words: Structural Performance, Functional Performance, Aesthetic Performance. While some early approaches to the concept of performance in architecture originate from the debate that began in the early 1930s between form and function, the actual concept of performance emerged in the human and social sciences in the mid-twentieth century, starting in the

1940s and 1950s with the intellectual movement known as the Performative Turn, and then expanding to natural sciences, technology and economics. In architecture, a huge increase in complexity of the approach to the project, resulting from the research of the Cold War and the space race, is experienced. In this context, in 1967 the American magazine Progressive Architecture dedicated an entire issue to performance: "Performance Design" (Fig. 3), in which the origins of this

architectural approach in systems analysis and systems engineering are identified. Methodologies for dealing with complex engineering problems, which involved mathematical modelling for the purpose of optimization and efficiency are also emphasized [1]. Recent developments in the performative approach to architecture contemplate the work of Branko Kolarevic and Ali Malkawi, who, within the work

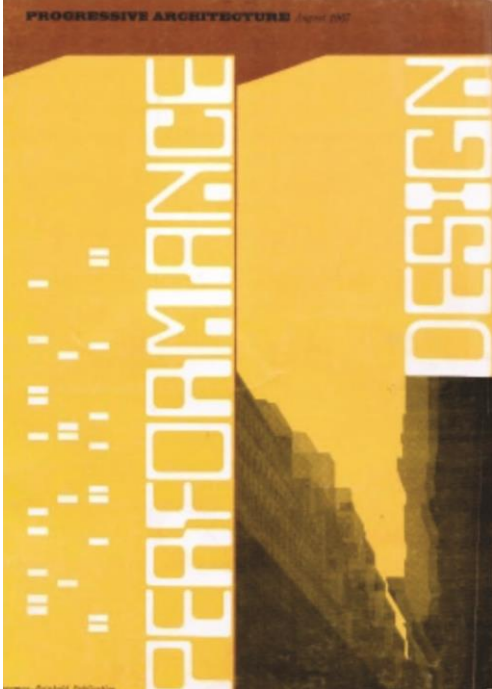


Fig. 3 - Progressive Architecture, August 1967

“Performative Architecture” give emphasis to the influence of performance on the process and practice of the architectural project [2]. A “morpho-ecological” approach to the project, with generative methods that integrate ecological, topological and structural data for the development of dynamic forms in close connection with their environment, was instead proposed in 2008 during Ocean’s Conception Performative exhibition. Finally, with the volume “Building performance analysis”, Pieter De Wilde assembles the body of knowledge on the subject and addresses the methods of performance analysis, moving towards the definition of an emerging theory of building performance [3].

1.2 Performance Optimization

The International Council of Research and Innovation in Building and Construction (CIB), defines the “Performance Approach” as working in terms of “goals” rather than “means”. With the word “goals” it refers to desirable technical attributes for the building such as safety, structural stability or resistance to loads. The “means” instead constitute systems and technical solutions of the building considered in its material essence [3]. Guide A of CIBSE then specifies this concept in the energy field by defining energy performance as “measurable results relating to energy efficiency, energy use and energy consumption”. Measurability is then a required attribute of the aforementioned “goals” that, during the architectural design process, allows to

benchmark the performance of a specific building configuration, with several others. Performance is then an attribute of a system that describes how well it meets specific requirements, in a way that can be measured (Fig. 4) [4]. The concept of measurement itself is therefore crucial for the performance analysis and optimization process. In this paper, performance measurement is addressed by the means of simulation, since the building is in a development phase and it does not yet exist. Simulation involves the use of algorithms to imitate reality, performing a virtual experiment on a model that represents the building with a predetermined level of detail. The opportunity of using the computer to simulate the performance of buildings allows the creation of a workflow that uses the nesting capability of the algorithms to perform multiple simulations in a recursive and automatic way [5]. This process is known as Automated Building Performance Simulation (ABPS). Creating a digital model and analysing it in a simulation environment, an immediate feedback on the

The multiplicity of Performance Objectives that the building is required to meet during its life-cycle are taken into account in a Multi-Objective Multidisciplinary Optimization approach and a Genetic Algorithm is therefore considered as the engine of the ABPS process [7]. This optimization technique leads to the generation of a set of solutions, through the research and approximation of the Pareto Front. These solutions represent optimal versions of the building. Once generated several optimal building configurations, decision-making actions will be therefore based on the analysis of these already enhanced solutions. For this purpose, parametric algorithmic modelling, in addition to guaranteeing the designer a complete and effective control over the geometric model and the information associated with it, becomes an indispensable tool to ensure that the interoperability of the model between optimization and simulation software enjoys total automation, also providing a direct link with the database applications. Thanks to the interoperability of a

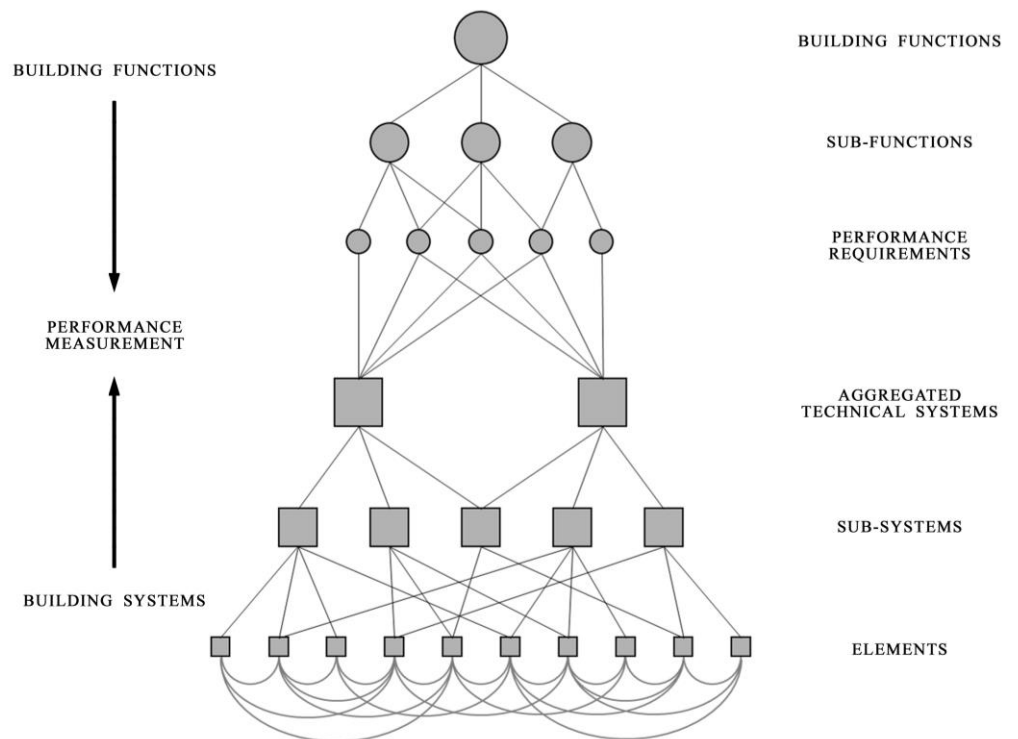


Fig. 4 - Performance measurement diagram

behaviour of the building is indeed achievable. The results of the analyses can therefore be used to generate configurations of the same building that will exhibit better performance behaviour. This process is called Building Performance Optimization (BPO) [6].

2 Methodology

In order to develop a workflow that makes contemporaneity between development and optimization of a project its strength, the implementation of ABPS is a crucial node. In this recursive design process, the operations of generation of an architectural model configuration through a set of variables, analysis of the model in a simulated environment and collection of performance results are performed cyclically starting from an initial set up performed by the designer.

software for programming and optimization (Matlab), a suite for algorithmic parametric modelling (Rhinceros - Grasshopper), a data management software (Microsoft Excel), and an engine for the dynamic simulation of energy need (EnergyPlus), a pool of several configurations of a case study building are generated and analysed. Several different solutions to the minimization problem of Annual Energy Need and Construction Cost are finally retrieved from the process.

2.1 Parametric Algorithmic Modelling

An algorithm is a procedure for solving a problem or performing a specific task, described by means of a list of simple and unambiguous operations. The execution of algorithms requires the input of well-defined data and provides equally well-defined outputs.

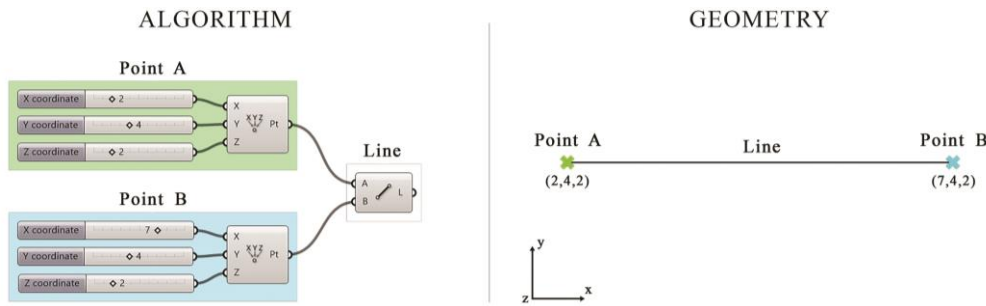


Fig. 5 - A basic sample of the parametric algorithmic modelling paradigm realized in Grasshopper.

Algorithms can be described and executed even outside of electronic programming environments, but they adapt perfectly to the architecture of computers, making optimal use of their computing capability, performing operations quickly and without a constant presence of the human operator. By increasing productivity and drastically reducing the burden of repetitive operations, today, the use of algorithms allows the designer to deal with very complex problems and devoting more time to the creative act. Algorithms, indeed, are increasingly being applied to the elaboration of geometric models. The integration of algorithms into traditional modelling software is now carried out in two forms: scripting and visual programming. In both cases, the three-dimensional workspace is integrated with an editor for compiling the algorithm. This type of modelling, in addition to expanding the potential of parametric modelling, provides easy access to all the parameters used for the generation of geometries and guarantees an accurate control of the model. As a basic example, a line can be described with the visual programming method by introducing in the modelling software the vector of the coordinates of its starting and ending points (Fig. 5). Each model parameter is furthermore allowed to exist in the form of a variable, which can be defined in a fixed range. This, in the architectural field, leads to the creation of associative models, in which one or more parameters remain variable during the design operations, allowing procedures such as form-finding to be easily performed. The new possibilities for design and planning allowed by algorithms and computational procedures range from the processing of large quantities of data to the displaying of complex information, which would be hardly represented otherwise. The ability to perform simulations with the computational method allows the generation of shapes, even complex ones, pursuing the optimization of buildings performance. Form-finding operations can indeed be driven by the need to optimize the resistance to the applied loads or the response of the building to the agents of a simulated environment (wind, sun, etc.), but also its construction cost and energy need [8].

2.2 Multi-objective optimization

In multi-objective optimization problem, the search for the optimal solution (the one that maximizes or minimizes a specific function) is extended to two or more functions, typically in contrast with each other (Fig. 6). In this case,

there may not be a single solution that optimizes both functions at the same time, but the concept of dominance can be used to identify more than one optimal solution. These solutions constitute the Pareto Front in the space of the optimization objectives. This curve represents the set of optimal solutions and it consists of all the points of the objective space that are not dominated. In other words, those points for which there is no one point that is better at the same time for all the objectives considered in the optimization process. The Pareto Front in many cases cannot be calculated analytically by means of an explicit mathematical formula and within reasonable computational times. It is therefore necessary to resort to meta-heuristic methodologies including the genetic algorithm, to explore the objective space in search of the set of admissible solutions, known as the Pareto Front. Several optimization algorithms allow the search for the minimum or the maximum of the objective functions [9]. These can be divided into two classes: deterministic algorithms, and metaheuristic algorithms. The latter, taking inspiration from the laws that regulate natural phenomena, do not include the calculation of function derivatives in the search process. The genetic algorithm is included among these and it configures as a recursive process that acts as a mimesis of the natural evolutionary process, assuming its tools:

selection, reproduction, mutation, cloning [10]. Genetic algorithms are research methods of proven robustness both from theoretical and empirical point of view in the analysis of complex systems, as they were firstly developed for optimization problems whose functions are computationally burdensome and whose derivatives are not easily obtainable or may not even exist [11].

2.3 Performance Objectives

The performance objectives minimized in the case study, a two-storey office building, are evaluated by the means of two performance indicators: Annual Energy Need of the building and Construction Cost of the considered variables. Performance indicators are used to quantify the performance of several configurations of the building. In engineering, performance indicators are often used to indicate a parameter of interest. Specifically, they are used to establish the extent to which the performance objectives are achieved. The term performance indicator has been widely used in the construction sector since it was coined in the late 1990s. A performance indicator must therefore be quantifiable, shared, and preferably suitable for computational analysis to allow measurement of performance of the generated design alternatives [12]. The energy simulation consists in the realization of a numerical model capable of describing the characteristics of the building immersed in the boundary conditions. The reference standard for the calculation of the energy need for heating and cooling of the building is the UNI TS 11300 Part 1. A dynamic simulation is performed to evaluate the Annual Energy Need of the building with a sub-hour resolution. The software used for the analysis is EnergyPlus, one of the most established in the literature [13]. The EPW file containing the weather data of an Italian locality is retrieved from the Honeybee online database and linked to the algorithmic modelling environment (Fig. 7).

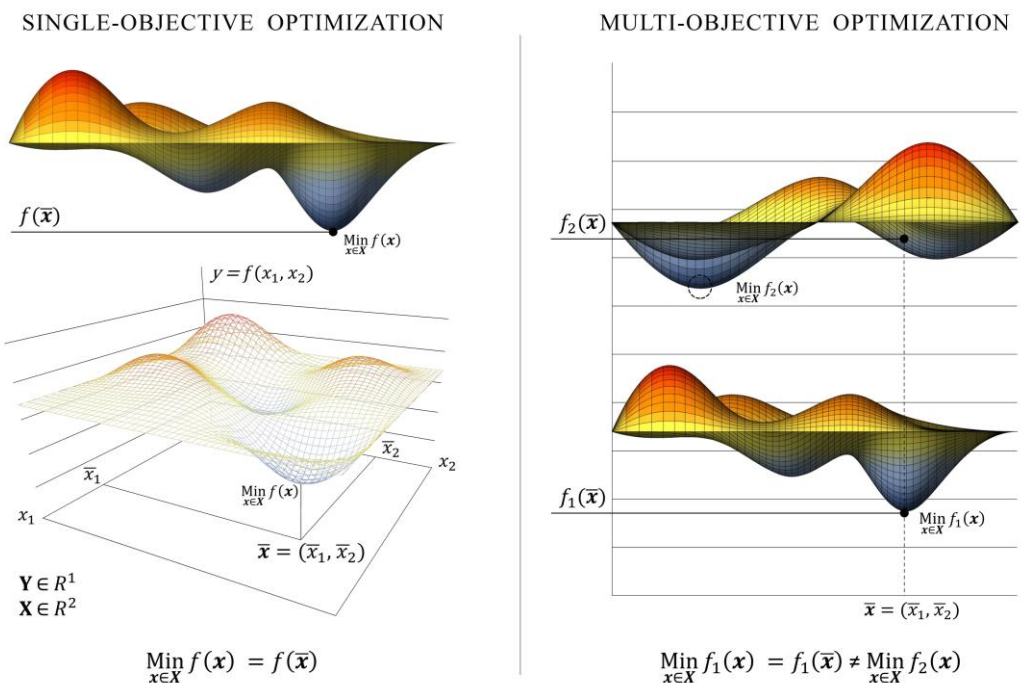


Fig. 6 - Single-objective and multi-objective optimization comparison.

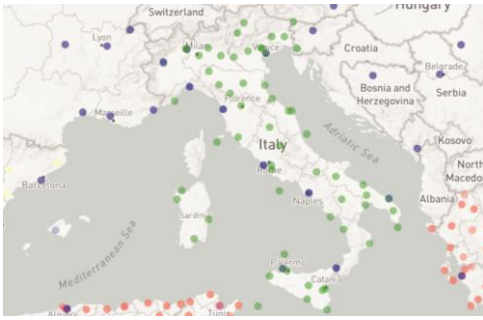


Fig. 7 - An excerpt of the Honeybee online database of EPW climatic files.

The Construction Cost is calculated through an analytical procedure that allows to identify all the processes required for the actual execution of each variable feature of the building. The evaluation of the Construction Cost of each variable, therefore, is carried out by means of the (1):

$$C_i = Q_i \cdot P_i \quad (1)$$

Where:

Q_i : manufacturing amount of each variable i

P_i : manufacturing unitary price of the variable i

Measurements are made by querying the geometric model by the means of several Grasshopper components, unit prices are retrieved from standard price lists of the locality in which the building is located (Fig. 8). The total Construction Cost is then evaluated by the (2).

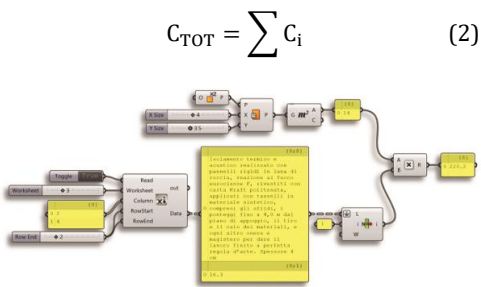


Fig. 8 - A portion of the Grasshopper visual algorithm that evaluates the Construction Cost

3 Results and Discussion

The scope of this paper of describing an innovative methodology for the early stages of the design process is reached. It results in an automated workflow that integrates the evaluation of the building performance during the design course itself. The automation of the building simulation allows to speed up the process of evaluating the performance of multiple architectural configurations, allowing to analyze several versions of the building in a completely automated way. The genetic algorithm integration, furthermore, provides a high reduction of the computation time, focusing the research only on the solutions that better answer the performance objectives that the building is requested to fulfil. Building configurations that lead to good values of the imposed performance objectives are, indeed, generated and selected for the creation of even better alternatives by the genetic algorithm, running in the software Matlab. The entire operation is performed acting on the geometric variables of the building model: each set of variables identifies indeed a unique

configuration of the building. The visual scripting software Grasshopper is coupled with Matlab by the means of a temporary csv file, allowing to generate the building geometric models from the several considered variables sets. Energetic simulation and cost evaluation are then performed on each model, after thermal and economic information of the construction materials have been retrieved from an Excel database, thanks to the full interoperability of this software with Grasshopper. The described methodology is applied to a case study to test sustainability enhancements that can be achieved in the Mediterranean climate. A two-storey office building is modelled in a parametric algorithmic software and subjected to the optimization process, by setting variable several design parameters among which: window to wall ratio, insulating layer thickness, glazing type, shading devices [14]. Sundry configurations of the building (Pareto optimal solutions), which led to the best values either of Construction Cost and Annual Energy Need, are retrieved from the process (Fig. 9). Optimal solutions are visualized in a Cartesian graphic that enables to simultaneously read the two performance objectives results of the optimization process for each building configuration (Fig. 10). The immediacy of the comparison between the optimized solutions constitutes a noteworthy improvement of the decision-making process.

Agenda 2030 objective number 11.3 states: "By 2030, enhance inclusive and sustainable urbanization and capacity for participatory, integrated and sustainable human settlement planning and management in all countries". In this context the results of the proposed workflow appear to be very promising for the definition of an integrated design strategy that should be included in the first stages of the buildings development. A method that allows to decrease the building energy demand together with its construction cost constitutes, indeed, a very valuable tool to enhance the sustainability of each architectural proposal.

4 Conclusions

In this paper a workflow for multidisciplinary multi-objective optimization of the performance of buildings is outlined and tested on a case study office. With the described process, the generation and analysis of multiple configurations of the architectural model becomes a fully automated process. The concept of Performance and the Performance analysis through ABPS, the characterization of optimization problems, and the genetic algorithm, as a metaheuristic method for identifying optimal solutions to multi-objective problems, are discussed. Through the generation and analysis of several solutions, an operation that would have cost the human designer a very long time, it was therefore possible to obtain a good approximation of the Pareto Front. The solutions belonging to the Front are excellent for at least one of the performance objectives. The huge amount of data coming out of the process provides a cost-benefit analysis of the intervention, by relating

the economic and energetic performance of the building, in a simple and direct way and is immediately usable for decision-making operations. Future developments of this methodology, that is expected to be absorbed in BIM modelling in 2030 [15], may concern the expansion of the design variables and performance objectives implemented in the optimization process [16].

REFERENCES

- [1] Hensel, M.: *Performance-oriented architecture: rethinking architectural design and the built environment*. Wiley, Chicester, 2013.
- [2] Kolarevic, B., Malkawi, A. eds: *Performative architecture: beyond instrumentality*. Spon Press, New York, 2005.
- [3] de Wilde, P.: *Building performance analysis*. Wiley, New York, 2018.
- [4] Augenbroe, G.: "The role of simulation in performance-based building." In: Hensen, J.L.M. and Lamberts, R. (eds.) *Building Performance Simulation for Design and Operation*. Routledge, London, 2019.
- [5] Touloupaki, E., Theodosiou, T.: "Performance simulation integrated in parametric 3D modeling as a method for early stage design optimization - A review", in *Energies*. 10, 2017, pp. 1-18.
- [6] Brunelli, C., Castellani, F., Garinei, A., Biondi, L., Marconi, M.: "A procedure to perform multi-objective optimization for sustainable design of buildings", in *Energies*. 9, 2016, pp. 1-15.
- [7] Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R.F., Mauro, G.M., Vanoli, G.P.: "Resilience of robust cost-optimal energy retrofit of buildings to global warming: A multi-stage, multi-objective approach", in *Energy Build.* 153, 2017, pp. 150-167.
- [8] Cody, B.: *Form follows energy: using natural forces to maximize performance*. Birkhauser, 2017.
- [9] Machairas, V., Tsangrassoulis, A., Axarli, K.: "Algorithms for optimization of building design: A review", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 31, 2014, pp. 101-112.
- [10] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T.: "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II", in *IEEE Trans. Evol. Comput.* 6, 2002, pp. 182-197.
- [11] Hamdy, M., Hasan, A., Siren, K.: "Applying a multi-objective optimization approach for Design of low-emission cost-effective dwellings", in *Build. Environ* 46, 2011, pp. 109-123.
- [12] Becker, R.: "Fundamentals of performance-based building design", in *Build. Simul.* 1, 2008, pp. 356-371.
- [13] Athienitis, A., O'Brien, W. eds: *Modeling, design, and optimization of net-zero energy buildings*. Wiley, 2015.
- [14] D'Agostino, P.: *Il progetto dell'ombra. Geometria e tecnologia delle schermature solari*. CUES, 2012.
- [15] Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., Teicholz, P.: *BIM Handbook: A guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers*, Wiley, 2018.
- [16] Deutsch, R.: *Convergence: the redesign of design*. Wiley, 2017.

UN PROCESSO DI PROGETTAZIONE AUTOMATIZZATO PER UN'ARCHITETTURA SOSTENIBILE E DAL COSTO CONTENUTO
Un approccio basato sulle prestazioni

Abstract

Nel perseguimento degli obiettivi dell'Agenda 2030 per lo sviluppo di città più sostenibili, la consegna di edifici ad alta efficienza energetica e prestazioni affidabili ad un costo accessibile assume un ruolo cruciale. Nel presente lavoro, viene proposta una procedura di

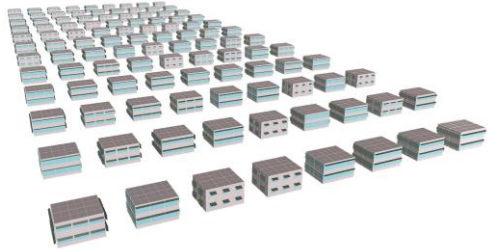


Fig. 9 - An overall view of the generated Pareto optimal solutions.

ottimizzazione multi-obiettivo del design, guidata da un algoritmo genetico, come metodologia all'avanguardia per fornire un progetto ottimizzato, valutando il raggiungimento di obiettivi di prestazione energetica ed economica mediante un processo noto come Automated Building Performance Simulation (ABPS). Il flusso di lavoro proposto consente di analizzare diverse configurazioni di progetto in modo completamente automatizzato nelle fasi iniziali del processo di progettazione, quando vengono eseguite scelte strategiche, che hanno un forte impatto sulle prestazioni finali dell'edificio. Il processo di ottimizzazione porta alla minimizzazione del costo di costruzione e del fabbisogno energetico annuale di un caso studio, attraverso l'implementazione di diverse strategie passive.

Parole chiave: sviluppo sostenibile, miglioramento delle prestazioni, ottimizzazione multi-obiettivo, modellazione parametrica algoritmica, flusso di lavoro automatizzato.

1 Introduzione

Al fine di raggiungere l'obiettivo dell'Agenda 2030 per il raggiungimento di città sostenibili, ai progettisti sono richiesti requisiti sempre più rigorosi per quanto riguarda il raggiungimento di specifici obiettivi di performance dei progetti sviluppati, dal punto di vista finanziario ed operativo. La necessità di sviluppare strategie di progettazione che portino l'ottimizzazione della Performance degli edifici al centro del processo di progettazione si impone con crescente vigore. Lo scopo di questo studio è di descrivere e applicare un innovativo flusso di lavoro di ottimizzazione del design che consenta di esplorare un ampio spazio di progettazione, ottimizzando i tempi di calcolo focalizzando la ricerca sulle soluzioni che massimizzano o minimizzano gli indicatori di performance scelti. Una buona scelta delle variabili di progettazione, nelle prime fasi del processo di progettazione, consente infatti di realizzare un progetto che raggiunga obiettivi prestazionali di risparmio energetico (Fig. 1), evitando costi di riprogettazione (Fig. 2). L'obiettivo di migliorare l'efficienza e la sostenibilità dei costi dell'architettura è raggiunto impostando il costo di costruzione e il fabbisogno energetico annuale come due indicatori di prestazione da minimizzare nella routine di ottimizzazione effettuata.

1.1 Il concetto di Performance

Anche se nel suo scritto "De Architectura" Vitruvio non parla mai direttamente della performance, questa idea può certamente essere riconosciuta da un lettore moderno nei concetti di Firmitas, Utilitas, Venustas, a cui oggi faremmo riferimento rispettivamente con le parole: Performance Strutturale, Performance Funzionale, Performance Estetica. Mentre alcuni primi approcci al concetto di performance in architettura hanno origine dal dibattito che iniziò nei primi anni '30 tra forma e funzione, l'attuale concetto di performance è emerso nelle scienze umane e sociali a metà del XX secolo, a partire dagli anni '40 e Anni '50 con il movimento intellettuale noto come Performative Turn, per poi espandersi nelle scienze naturali, nella tecnologia ed in economia. In architettura, si è verificato un significativo aumento della complessità dell'approccio al progetto, derivante dalla ricerca durante la Guerra Fredda e la corsa allo spazio. In

questo contesto, nel 1967 la rivista americana Progressive Architecture dedicò un intero numero alla performance: "Performance Design" (Fig. 3), in cui sono identificate le origini di questo approccio architettonico nell'analisi e nell'ingegneria dei sistemi. Vengono inoltre enfatizzate le metodologie per affrontare problemi ingegneristici complessi, che hanno comportato la modellizzazione matematica ai fini di ottimizzazione ed efficienza [1]. I recenti sviluppi nell'approccio performativo all'architettura contemplano il lavoro di Branko Kolarevic e Ali Malkawi che con "Performative Architecture" pongono l'accento sull'influenza delle prestazioni sul processo e sulla pratica del progetto architettonico [2]. Un approccio "morfo-ecologico" al progetto, con metodi generativi che integrano dati ecologici, topologici e strutturali per lo sviluppo di forme dinamiche in stretto collegamento con il loro ambiente, è stato invece proposto nel 2008 durante la mostra "Ocean's Conception Performative". Infine, con il volume "Building Performance Analysis", Pieter De Wilde riunisce il corpus di conoscenze sull'argomento e affronta i metodi di analisi delle prestazioni, muovendosi verso la definizione di una teoria emergente della performance degli edifici [3].

1.2 Ottimizzazione della Performance

Il Consiglio internazionale per la ricerca e l'innovazione nell'edilizia e nelle costruzioni (CIB) definisce "l'approccio prestazionale" come il lavorare in termini di "obiettivi" anziché "mezzi". Con la parola "obiettivi" si riferisce ad attributi tecnici desiderabili per l'edificio come sicurezza, stabilità strutturale o resistenza ai carichi. I "mezzi" invece costituiscono sistemi e soluzioni tecniche dell'edificio considerato nella sua essenza materiale [3]. La Guida A del CIBSE specifica quindi questo concetto nel campo energetico definendo le prestazioni energetiche come "risultati misurabili relativi all'efficienza energetica, all'uso e al consumo di energia". La "misurabilità" è quindi un attributo richiesto dei suddetti "obiettivi" che, durante il processo di progettazione architettonica, consente di confrontare le prestazioni di una specifica configurazione dell'edificio con molte altre.

La performance è quindi un attributo di un sistema che descrive il modo in cui esso soddisfa requisiti specifici, in un modo che può essere misurato (Fig. 4) [4]. Il concetto stesso di misurazione è quindi cruciale per l'analisi delle prestazioni e il processo di ottimizzazione. Nel presente lavoro, la misurazione della performance viene effettuata mediante la simulazione, poiché l'edificio è in una fase di sviluppo e non esiste ancora. La simulazione prevede l'uso di algoritmi per imitare la realtà, eseguendo un esperimento virtuale su un modello che rappresenta l'edificio con un livello di dettaglio prestabilito. L'opportunità di utilizzare il computer per simulare le prestazioni degli edifici consente la creazione di un flusso di lavoro che utilizza la capacità di annidamento degli algoritmi per eseguire simulazioni multiple in modo ricorsivo e automatico [5]. Questo processo

automatizzato è denominato Automated Building Performance Simulation (ABPS). Creando un modello digitale ed analizzandolo in un ambiente di simulazione, è di fatto possibile ottenere un feedback immediato sul comportamento dell'edificio. I risultati delle analisi possono quindi essere utilizzati per generare configurazioni dello stesso edificio che mostreranno un migliore comportamento prestazionale. Questo processo è noto come Building Performance Optimization (BPO) [6].

2 Metodologia

Al fine di sviluppare un flusso di lavoro che faccia della contemporaneità tra sviluppo e ottimizzazione di un progetto il suo punto di forza, l'implementazione della ABPS è un nodo cruciale. In questo processo di progettazione ricorsiva, le operazioni di generazione di una configurazione del modello architettonico attraverso una serie di variabili, l'analisi del modello in un ambiente simulato e la raccolta dei risultati delle prestazioni vengono eseguite ciclicamente a partire da una configurazione iniziale creata dal progettista. La molteplicità degli Obiettivi di Performance che l'edificio deve soddisfare durante il suo ciclo di vita viene presa in considerazione in un approccio di ottimizzazione multidisciplinare multi-obiettivo e un algoritmo genetico viene quindi considerato il motore del processo di ABPS. Questa tecnica di ottimizzazione porta alla generazione di una serie di soluzioni, attraverso la ricerca e l'approssimazione del Fronte di Pareto. Tali soluzioni rappresentano quindi versioni ottimali dell'edificio. Le azioni di decision-making si baseranno quindi sull'analisi di soluzioni già ottimizzate. A tal fine, la modellazione parametrica algoritmica, oltre a garantire al progettista un controllo completo ed efficace sul modello geometrico e sulle informazioni ad esso associate, diventa uno strumento indispensabile per garantire che l'interoperabilità del modello tra software di ottimizzazione e simulazione sia completamente automatizzata, fornendo anche un collegamento diretto con le applicazioni di database. Grazie all'interoperabilità di un software di programmazione e ottimizzazione (Matlab), una suite per la modellazione parametrica algoritmica (Rhinoceros - Grasshopper), un software di gestione dei dati (Microsoft Excel) e uno per la simulazione dinamica del fabbisogno energetico (EnergyPlus), un pool di diverse configurazioni di un edificio oggetto di studio viene generato e analizzato. Da tale processo vengono quindi estratte molte soluzioni diverse al problema di minimizzazione del fabbisogno energetico annuale e dei costi di costruzione.

2.1 Modellazione parametrica algoritmica

Un algoritmo è una procedura per risolvere un problema o eseguire un compito specifico, descritta mediante un elenco di operazioni semplici ed inequivocabili. L'esecuzione di algoritmi richiede l'inserimento di dati ben definiti e fornisce output ugualmente ben definiti. Gli algoritmi possono essere

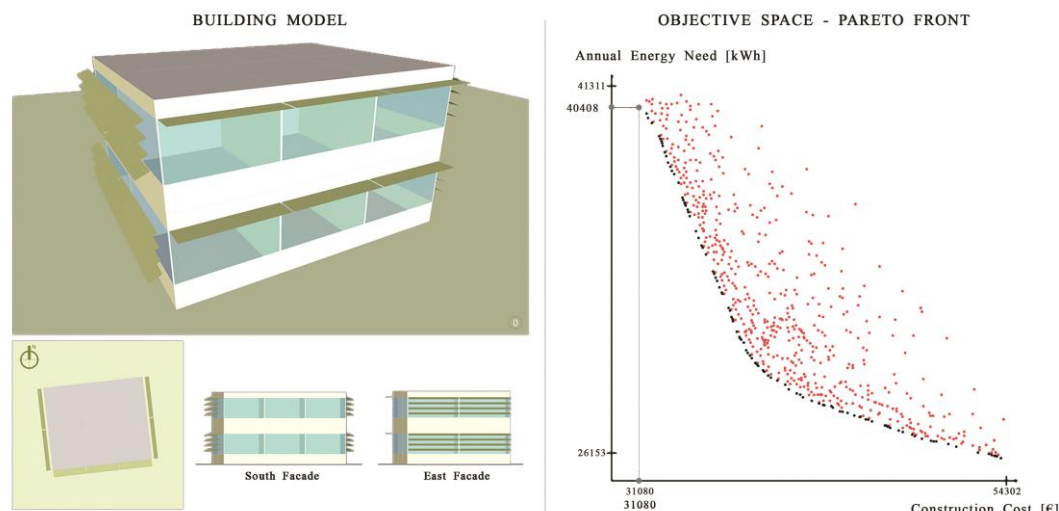


Fig. 10 - Visualization of the analysed configurations of the building in the Objective space.

descritti ed eseguiti anche al di fuori degli ambienti di programmazione elettronica, ma si adattano perfettamente all'architettura dei computer, facendo un uso ottimale delle loro capacità di elaborazione, eseguendo operazioni rapidamente e senza una presenza costante dell'operatore umano. Aumentando la produttività e riducendo drasticamente l'onere delle operazioni ripetitive, oggi l'uso di algoritmi consente al progettista di affrontare problemi molto complessi e dedicare più tempo all'atto creativo. Gli algoritmi, infatti, sono oggi sempre più applicati all'elaborazione di modelli geometrici. L'integrazione degli algoritmi nei software di modellazione tradizionale può essere eseguita in due forme: lo scripting ed il visual scripting. In entrambi i casi, l'area di lavoro tridimensionale è integrata con un editor per la compilazione dell'algoritmo. Questo tipo di modellazione, oltre ad espandere il potenziale della modellazione parametrica, offre un facile accesso a tutti i parametri utilizzati per la generazione delle geometrie e garantisce un controllo accurato del modello. Come esempio di base, una linea può essere descritta con il metodo di programmazione visiva introducendo nel software di modellazione i vettori delle coordinate dei suoi punti iniziale e finale (Fig. 5). Ciascun parametro del modello può inoltre esistere sotto forma di variabile, che può essere definita in un intervallo ben determinato. Ciò, nel campo dell'architettura, porta alla creazione di modelli associativi, in cui uno o più parametri rimangono variabili durante le operazioni di progettazione, consentendo di eseguire facilmente procedure come il Form-finding. Le nuove possibilità di progettazione e pianificazione permesse da algoritmi e procedure computazionali vanno dall'elaborazione di grandi quantità di dati alla visualizzazione di informazioni complesse, che difficilmente sarebbero altrimenti rappresentate. La capacità di eseguire simulazioni con il metodo computazionale consente la generazione di forme, anche complesse, perseguendo l'ottimizzazione delle prestazioni degli edifici. Le operazioni di ricerca della forma possono infatti essere guidate dalla necessità di ottimizzare la resistenza ai carichi applicati o dalla risposta dell'edificio agli agenti di un ambiente simulato (vento, sole, ecc.) [8], ma anche il suo costo di costruzione e fabbisogno di energia.

2.2 Ottimizzazione multi-obiettivo

Nel problema dell'ottimizzazione multi-obiettivo, la ricerca della soluzione ottimale è estesa a due o più funzioni, in genere in contrasto tra loro (Fig. 6). In questo caso, potrebbe non esserci un'unica soluzione che ottimizzi entrambe le funzioni contemporaneamente, ma il concetto di dominanza può essere utilizzato per identificare più di una soluzione ottimale. Queste soluzioni costituiscono il Fronte di Pareto nello spazio degli obiettivi di ottimizzazione. Il Fronte è la curva che rappresenta l'insieme di soluzioni ottimali ed è costituita da tutti i punti dello spazio obiettivo che non sono dominati. In altre parole, quei punti per i quali non esiste un punto migliore allo stesso tempo per tutti gli obiettivi considerati nel processo di ottimizzazione. Il Fronte di Pareto in molti casi non può essere calcolato analiticamente per mezzo di una formula matematica esplicita e in tempi di calcolo ragionevoli. È quindi necessario ricorrere a metodi meta-euristici, incluso l'algoritmo genetico, per esplorare lo spazio obiettivo alla ricerca dell'insieme di soluzioni ammissibili, noto come Fronte di Pareto. Numerosi algoritmi di ottimizzazione consentono la ricerca del minimo o del massimo di funzioni obiettivo [9]. Questi possono essere suddivisi in due classi: algoritmi deterministici e algoritmi meta-euristici. Questi ultimi, ispirandosi alle leggi che regolano i fenomeni naturali, non includono il calcolo di derivate di funzione nel processo di ricerca. L'algoritmo genetico è incluso tra questi e si configura come un processo ricorsivo che funge da mimesi del naturale processo evolutivo, assumendo i suoi strumenti: selezione, riproduzione, mutazione, clonazione [10]. Gli algoritmi genetici sono metodi di ricerca di comprovata solidità sia dal punto di vista teorico che empirico nell'analisi di sistemi complessi, poiché sono stati inizialmente sviluppati per problemi

di ottimizzazione le cui funzioni sono computazionalmente gravose e le cui derivate non sono facilmente ottenibili o potrebbero non esistere [11].

2.3 Obiettivi di Performance

Gli Obiettivi di performance minimizzati nel caso studio, un edificio per uffici a due piani, sono valutati mediante due indicatori di prestazione: il fabbisogno energetico annuale dell'edificio ed il costo di costruzione delle variabili considerate. Gli indicatori di performance vengono utilizzati per quantificare le prestazioni di diverse configurazioni dell'edificio. In ingegneria, gli indicatori di prestazione sono infatti spesso usati per indicare un parametro di interesse. In particolare, vengono utilizzati per stabilire in che misura vengono raggiunti gli obiettivi di prestazione. Il termine indicatore di prestazioni è stato ampiamente utilizzato nel settore delle costruzioni sin da quando è stato coniato alla fine degli anni '90. Un indicatore di prestazione deve pertanto essere quantificabile, condiviso e preferibilmente adatto all'analisi computazionale per consentire la misurazione della prestazione delle alternative progettuali generate [12]. La simulazione energetica consiste nella realizzazione di un modello numerico in grado di descrivere le caratteristiche dell'edificio immerso nelle condizioni al contorno. Lo standard di riferimento per il calcolo del fabbisogno energetico per il riscaldamento e il raffrescamento dell'edificio è la UNI TS 11300 Parte 1. Una simulazione dinamica viene eseguita per valutare il fabbisogno energetico annuale dell'edificio con una risoluzione sub-oraria. Il software utilizzato per l'analisi è EnergyPlus, uno dei più affermati in letteratura [13]. Il file EPW contenente i dati meteorologici di una località italiana viene recuperato dal database online Honeybee e collegato all'ambiente di modellazione algoritmica (Fig. 7). Il costo di costruzione è calcolato attraverso una procedura analitica che consente di identificare tutti i processi richiesti per l'effettiva esecuzione di ogni caratteristica variabile dell'edificio. La valutazione del costo di costruzione di ciascuna variabile, pertanto, viene effettuata mediante la (1).

$$C_i = Q_i \cdot P_i \quad (1)$$

Dove:

Q_i : quantità di produzione di ciascuna variabile i

P_i : prezzo unitario di produzione di ciascuna variabile i

Le misurazioni sono eseguite interrogando il modello geometrico mediante i componenti di Grasshopper, mentre i prezzi unitari sono estratti dai listini prezzi standard della località in cui si trova l'edificio (Fig. 8). Il costo di costruzione totale viene quindi valutato mediante la (2).

$$C_{TOT} = \sum C_i \quad (2)$$

3 Risultati e Discussione

Lo scopo di questo documento di descrivere una metodologia innovativa per le prime fasi del processo di progettazione è raggiunto. Esso si traduce in un flusso di lavoro automatizzato che integra la valutazione delle prestazioni dell'edificio durante il corso di progettazione stesso. L'automazione della simulazione dell'edificio consente di accelerare il processo di valutazione delle prestazioni di più configurazioni architettoniche, consentendo di analizzare diverse versioni dell'edificio in modo completamente automatizzato. L'integrazione dell'algoritmo genetico, inoltre, fornisce un'elevata riduzione dei tempi di calcolo, concentrando la ricerca solo sulle soluzioni che rispondono meglio agli obiettivi prestazionali che l'edificio deve soddisfare. Configurazioni che portano a valori ottimali degli obiettivi prestazionali imposti vengono infatti generate e selezionate per la creazione di alternative ancora migliori dall'algoritmo genetico, in esecuzione nel software Matlab. L'intera operazione viene eseguita agendo sulle variabili geometriche del modello dell'edificio: ogni set di variabili identifica infatti una configurazione unica dello stesso. Il software di

scripting visivo Grasshopper è accoppiato a Matlab per mezzo di un file csv temporaneo, che consente di generare i modelli geometrici dell'edificio dai diversi set di variabili considerati. La simulazione energetica e la valutazione dei costi vengono quindi eseguite su ciascun modello, dopo che le informazioni termiche ed i costi dei materiali da costruzione sono state recuperate da un database Excel, grazie alla piena interoperabilità di questo software con Grasshopper. La metodologia descritta viene applicata a un caso di studio per testare i miglioramenti in termini di sostenibilità che possono essere raggiunti nel clima mediterraneo. Un edificio per uffici a due piani è modellato in un software parametrico algoritmico e sottoposto al processo di ottimizzazione, impostando come variabili diversi parametri di progettazione tra cui: il rapporto finestra/parete, lo spessore dello strato isolante, il tipo di finestra, i dispositivi di ombreggiamento [14]. Diverse configurazioni dell'edificio (soluzioni ottimali di Pareto), che hanno portato ai migliori valori del costo di costruzione e del fabbisogno energetico annuale, vengono recuperate dal processo (Fig. 9). Le soluzioni ottimali sono visualizzate in un grafico cartesiano che consente di leggere simultaneamente i risultati dei due obiettivi prestazionali del processo di ottimizzazione per ciascuna configurazione dell'edificio (Fig. 10). L'immediatezza del confronto tra le soluzioni ottimizzate costituisce un notevole miglioramento del processo decisionale.

L'obiettivo numero 11.3 dell'Agenda 2030 afferma: "Entro il 2030, migliorare l'urbanizzazione inclusiva e sostenibile e la capacità di pianificazione e gestione partecipativa, integrata e sostenibile degli insediamenti umani in tutti i paesi". In questo contesto, i risultati del flusso di lavoro proposto sembrano essere molto promettenti per la definizione di una strategia di progettazione integrata che andrebbe essere inclusa nelle prime fasi dello sviluppo degli edifici. Un metodo che consente di ridurre la domanda di energia dell'edificio insieme al suo costo di costruzione costituisce, in effetti, uno strumento molto prezioso per migliorare la sostenibilità di ogni proposta architettonica.

4 Conclusioni

In questo studio un flusso di lavoro per l'ottimizzazione multidisciplinare multi-obiettivo della performance degli edifici viene descritto e testato su un caso di studio. La generazione e l'analisi di più configurazioni del modello architettonico viene ricondotta ad un processo completamente automatizzato. Vengono discussi il concetto di performance e l'analisi delle prestazioni attraverso la ABPS, la caratterizzazione dei problemi di ottimizzazione e l'algoritmo genetico, come metodo metaeuristico per identificare soluzioni ottimali a problemi multi-obiettivo. Attraverso la generazione e l'analisi di diverse soluzioni, un'operazione che sarebbe costata molto tempo al progettista umano, è stato quindi possibile ottenere una buona approssimazione del Fronte di Pareto. Le soluzioni appartenenti al Fronte risultano ottime per almeno uno degli obiettivi prestazionali. L'enorme mole di dati emersi dal processo fornisce un'analisi costi-benefici dell'intervento, mettendo in relazione le prestazioni economiche ed energetiche dell'edificio, in modo semplice e diretto ed è immediatamente utilizzabile per le operazioni decisionali. I futuri sviluppi di questa metodologia, che dovrebbe essere assorbita dalla modellazione BIM nel 2030 [15], potrebbero riguardare l'espansione delle variabili di progettazione e degli obiettivi prestazionali implementati nel processo di ottimizzazione [16].