

Assessments and Decision-Making in the Planning Phase: The Impact of Computational Intelligence

Alessandra Cucurnia*, Giuseppe Ridolfi**

keywords: optioneering, performative BIM, generative design, performative simulation, assessment

Abstract

The article focuses on the preliminary feasibility checks of the design alternatives contemplated by systems for the creation of Italian Public Works, which, in light of the law, represent an essential condition to start any project that can be financed with public resources.

In relation to the foregoing, it describes the information content of the systems put in place for the rational and sustainable management of the initiatives (Requirements Framework, Design Alternatives Feasibility Document, Technical and Economic Feasibility Project) which, initiating formalizations with different degrees of connotation and intensity, adjusted to the specific nature of the project, aim to mitigate the inevitability of the uncertainty scenarios characterising the interventions.

Starting with the regulatory framework, and more generally referring to the efficiency and effectiveness objectives of the design, the contribution analyses the phase of drawing up the alternatives as a moment to justify the rationale of the public investment, focusing on the opportunities offered by new digital design technologies. In particular, this in-depth analysis uses parametric simulation in its various forms and advancements

in place as it is specifically geared towards supporting decision-making based on performances and comparison with alternatives in an objective and shareable manner. More extensively and in addition to the impact on the value and reliability of the results, the paper indicates how these tools become new forms of collective intelligence opening up to the definitive affirmation of organizational models capable of operating, from the initial phases of the process, in a transparent and collaborative way rather than with the current forms of antagonism that compete on price.

In this regard, Optioneering is introduced as an area of engineering concerned with selection for the comparison of design alternatives and, on the basis of an original interpretation of the BIM (Performative BIM), an outline is given of the implementation of the design performance in the computational technologies now included within specific theoretical-operational areas such as parametric design, Performance-Based Building Simulation, Generative Design, up to the emergence of artificial intelligence in the design and management of the built environment.

1. INTRODUCTION

Due to the characteristic “circulatory” nature of the

building process, repercussions on the entire imple-

mentation procedure brought about by decision-making positions assumed in the initial stages, as also maintained by scrutiny of previous implementation practices, are decisive in relation to the qualitative level seen in the end products.

As a result, in order to achieve effective systems for the creation of Public Works, the planning tools, such as preparatory documents for planning and the technical and economic feasibility project, the first level of technical in-depth examination of the programming, represent strategic devices that aim to circumvent margins of interpretative discretion and, at the same time, counteract the occurrence of malfunctions in implementation procedures, protecting the conceptual values of the architecture.

In this regard, in order to prepare the entire process, the procurement rules allow for the progressive use of electronic modelling tools for construction and infrastructure, which first ensure the reliability and then the unequivocal nature of the developments to be associated with graphic, descriptive, performance-based and economic documents, also contemplating processes to mitigate potential threats that could jeopardize the feasibility of the interventions.

These tools, contemplating interdisciplinary contributions, allow us to anticipate any implementation difficulties. They check the choices concerning their feasibility, sustainability, compatibility, costs/benefits ratio and lifecycle management¹. At the same time, they assist the verification and validation practices aimed, in the design phase, at detecting and correcting defects and, in the implementation phase, at certifying that the performance, scheduling and economic aspects of the work comply with the project forecasts.

2. ASSESSMENT OF THE MOST APPROPRIATE INTERVENTION SCENARIOS IN THE PLANNING OF PUBLIC WORKS

2.1 The Public Works implementation procedure

Regardless of the different intervention models, the process of creating Public Works is divided into four key parts that occur as invariant elements, which correspond to the Planning, Design, Construction and Management stages, char-

acterised by specific attributions in terms of activities, roles and responsibilities (Fig. 1).

The Planning, which aims to make the client's requests unambiguous, based on the needs to be met in relation to the specific type of user, produces a general idea of the work; it indicates any design alternatives to be analysed, specifies the implementation methods and provides reliable information on the timing and financial resources, defining a preparatory information package for all subsequent developments in the procedure.

Through the acquisition and processing of data deriving from the planning stage, the Planning describes the work in detail so that the relationship between the client and the executor is fully defined, enhancing the technical-construction, functional, aesthetic and economic solutions in order to ensure maximum quality through a design response consistent with the requirements framework outlined in the previous phase.

Construction represents the synthesis between design intent and production reality. This stage involves the implementation of procedures to assign the works, management of the execution of the project and checking that the work done complies with the design instructions.

Finally, the Management is dedicated to supporting the operational phase of the work, seeking to preserve the functionality of the constituent elements over time.

Each phase performs identifiable sequences of events, made up of consistent activities geared towards producing preset results that presuppose forms of technical transfer or handovers, and as such, in the transition periods prior to the shift between the different segments, they must be checked by continuous comparison² with the indications of the programme and approved in order to ensure their completeness and suitability.

This set up, creating inevitable interdependence between the various parts of the process, of which the previous ones represent a prerequisite and input for the subsequent ones, marks planning as an essential condition to start any type of implementation procedure that can be funded with public resources.

Prior to the actual planning stage, before the start of the implementation processes, Administrations develop and publish a *Requirements Framework* (RF)³ on their institutional sites in order to ensure that the interventions correspond to the community's requirements, the client's needs and the end users' expectations. In this Framework they identify the general objectives to be pursued.

¹ "All consecutive and/or interlinked stages, including research and development to be carried out, production, trading and its conditions, transport, use and maintenance, throughout the existence of the product or the works or the provision of the service, from raw material acquisition or generation of resources to disposal, clearance and end of service or utilization», art. 3, paragraph 1, letter hhhh), Legislative Decree 50/2016 as subsequently amended: Public Contract Code (hereinafter also referred to as the Code).

² Which reaches completion through testing to guarantee the reliability of the final outcome in terms of compliance with what was planned during the programming, defined in the design phase and materially accomplished during implementation.

³ "The document which is written and approved by the public administration in the phase before the program of the purchase and which identifies, on the basis of the data available, in relation

The RF summarises the requirements analysis and conforming to the fundamental principle according to which there is not just one way to solve a problem but a varied repertoire of possible solutions defines, if the conditions are met, the competing interventions that will be analysed subsequently.

To protect the effectiveness of the development strategies and the reliability of the designs, the Administrations themselves next prepare the *Design Guidelines Document (DIP)*⁴, the aim of which is to transfer their requests to the process operators. This document is made up of graphic, descriptive, analytical and procedural documents, and by specifying and systematizing the content of the RF it summarises all the activities and plans them in detail in terms of the duration, sequence, liability, resources and results, and represents them in a set of instructions for the implementation programme.

The technical, qualitative, environmental and economic examination and assessment of the alternative methods envisaged in the RF is done during the drafting of the *Design Alternatives Feasibility Document (DOCFAP)*⁵, prepared prior to the start of the designing and developed with a different level of in-depth analysis depending on the type and scope of the specific intervention.

The DOCFAP, also through a prior assessment of the territorial and environmental sustainability of the alternatives examined, identifies the solution that has the best cost/benefits ratio for the community and environment. This is then approved by the contracting authority, justifying the investment (Loiero and Maiolo, 2017) and decreeing its inclusion in the triennial programme of works that it intends to bring to completion⁶.

The programming products constitute preparatory documents for the subsequent design phase which is broken

down into: *Technical and Economic Feasibility Project; Final Design; Detailed Design*.

Interpreting the need to anticipate the investigative work, the Technical and Economic Feasibility Project⁷, which replaces the former Preliminary Project and, if developed at two subsequent times, incorporates the process of checking the feasibility of the alternatives into its first processing phase⁸, is produced on the basis of the investigations, studies and preventive checks having taken place⁹, which represent its essential input prerequisite. On the basis of the indications contained in the RF and in compliance with the content of the approved DOCFAP, the feasibility project determines the performance, dimensional, typological and economic characteristics, and the functional specifications and requirements to offset and mitigate the environmental impact of the solution, providing precise information that generally cannot be changed in the subsequent phases.

The Final Design¹⁰ corresponds to the technical-economic refinement of the work aimed at further enhancing the cost/benefits ratio in the life cycle. This is where the works to be carried out are fully identified, in line with the indications set out in the previous design level and in compliance with the preparatory documents for the design, and all aspects linked to obtaining opinions, approval, permits and clearances are specified in order to obtain the Building Permit.

Developed in compliance with the Final Design, the Detailed Design¹¹, accompanied by a maintenance plan for the work and its parts in the operational phase, accurately and thoroughly defines each element in formal, typological, qualitative, dimensional and economic terms. This represents an essential condition to ensure whether the work can actually be accomplished.

The design, which involves the implementation and synthesis of environmental, functional, technological and economic choices that contribute to the satisfaction of the needs outlined in the RF, on the basis of the indications set out in the DIP and the outcomes of the feasibility checks arising from the Planning, comes to represent the object unequivocally, conveying precise instructions to all operators involved in the execution.

to the typology of the work or the purchase to be realized the general objectives to be pursued through the realization of the purchase, the need of the collectivity at the basis of the purchase, the specific qualitative and quantitative needs which have to be satisfied through the purchase, even in relation to the specific typology of users to which the purchase are made for», art. 3, paragraph 1, letter ggggg-nonies), Code, the content of which is specified in more detail in article 14 paragraph 2 of the Regulations Scheme of execution, implementation and integration (hereinafter referred to as the Regulations), as per article 216, paragraph 27-ocies of the Code.

⁴ Art. 14, paragraphs 3, 4, 5 Regulations.

⁵ "the document wherein the possible project alternatives are identified and analyzed and wherein any alternative evaluation is noted, under the qualitative profile, also under an environmental perspective, and under the technical and economical perspectives too", art. 3, paragraph 1, letter ggggg-quater), Code.

⁶ The administration assesses the DOCFAP and can request clarifications and integrations regarding the proposed design solution and the alternatives examined. The preliminary investigation concludes with the approval of the contracting authority, which then arranges for the development of the second phase of the technical and economic feasibility project (art. 18, paragraph 8, Regulations).

⁷ Art. 23, paragraphs 5, 6, Code.

⁸ The Technical and Economic Feasibility Project is usually drawn up in two subsequent phases. The first phase consists of preparing the design alternatives feasibility document (art. 17, paragraphs 1, 2, Regulations).

⁹ Geological, hydrogeological, hydrological, hydraulic, geotechnical, seismic, historical, landscape and urban planning surveys; environmental and landscape feasibility studies; preventive checks concerning the archaeological interest and the possibility of reusing existing real estate assets and regenerating brownfield sites (art. 23, paragraph 6, Code).

¹⁰ Art. 23, paragraph 7, Code.

¹¹ Art. 23, paragraph 8, Code.

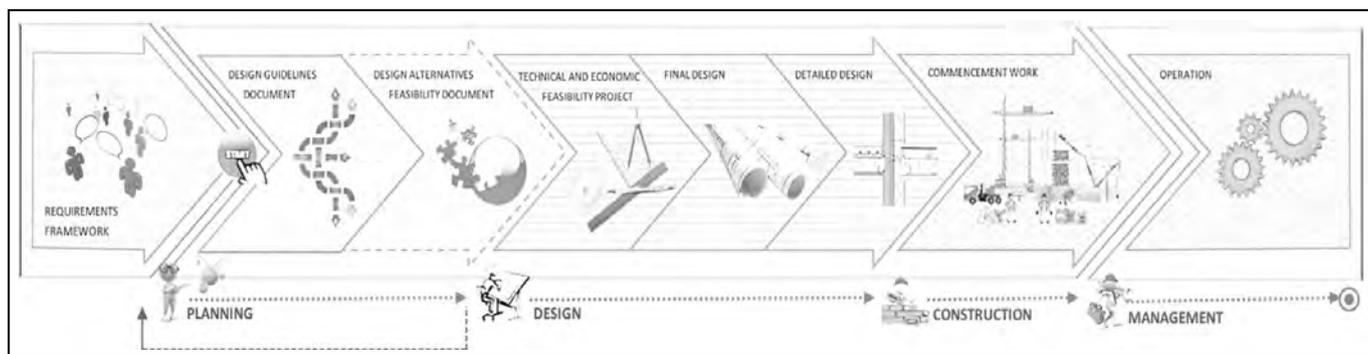


Figure 1 - Implementation Process Structure.

Due to the consequentiality mechanisms established between the various phases of the process and the interdependence relationship existing between its same levels of technical in-depth analysis, the planning represents the means that, within the implementation process, enables the shift from the programming to the building phase.

2.2 Analysis of the alternative scenarios in the initial stages of the process

Underlying the creation of public works is triennial planning which summarises and coordinates the building works ready for commencement, with the aim of meeting the community's needs.

A work is considered ready for commencement when its full coverage is assured in terms of the resources necessary to create it. To guarantee this principle, the regulations state that each intervention, in order to be officially authorized for the implementation process, must be accompanied by a DOCFAP. The latter, drawn up in compliance with the content of the RF and the DIP, based on territorial technical, financial economic, and administrative management assessments, reflects and validates the investments of the Public Administration.

The DOCFAP – or the first phase of drawing up the Technical and Economic Feasibility Project – through formalizations with differentiated levels of characterization and depth, and described in detail according to the specific nature of the contexts, explores, in terms of costs/benefits attainable, the most appropriate alternative scenarios that can be envisaged through which the initiatives can be implemented (Pennisi and Scandizzo, 2003), enhancing their potential and advantages and also comparing them with a situation where no intervention takes place. With reference to geographical location, environmental and landscape compatibility, the relationship with the infrastructures, dimensions, typological, technological and plant engineering solutions, implementation methods, compliance with regulations, and economic and temporal consistency, it identifies the best competing option which may also coincide with the choice to 'not proceed', thereby preventing the start of the construction process.

The feasibility checks, key elements of the initiatives roll-out process that enhance the Triennial Programme and justify the policies of the administrations, understood as the practice of defining and evaluating opportunities, represent an essential tool to support the decision-making operators in the rational, efficient and economically sustainable management of public investments (Acampa, 2019).

The Technical and Economic Feasibility Project, an essential condition for the funding of the works¹², collects and encodes the DOCFAP information and, by carrying out studies, investigations and surveys that evolve the cognitive framework, it validates the results through evaluation and prefiguring actual even more realistic feasibility profiles, giving greater reliability to the economic estimate and substantiating the opportunity of the solution to be consolidated in the subsequent project levels (final and detailed).

As is known¹³, tools to assist ex-ante decisions are particularly important in planning, understood as a vehicle capable of producing social and economic development, competitiveness and the enhancement of resources (Bassi et al., 2019). Similarly, intervention strategies that in the initial phases contemplate inclusive evaluations of multidimensional parameters and factors, if correctly handled in the interactions, represent a formal guarantee of achieving quality (Manganelli, 2017; Bentivegna, 2019). In fact, as any type of modification implies connotations on several levels, it cannot be denied that greater attention to the necessary multidisciplinary contributions, mitigating the risks ascribable to the effects and relations that connote the overall outcomes, results in positive reverberations.

¹² "For works whose amount is equal to or exceeds € 1 million, for the purposes of the inclusion in the annual list, contracting authorities shall previously approve the project of technical and economic feasibility", art. 21, paragraph 3, Code.

¹³ MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI, *Comparative study on International ex-ante assessment methods for Public Works*, Rome, 2011.

The exploration of design alternatives, mainly aimed at meeting requirements, implying a huge commitment of resources in the initial stages of the process for the benefit of subsequent processing, presupposes an integrated approach to the design process. However, in customary practices quality often has a reductionist meaning, free from the multidimensional connotations that are increasingly decisive today with respect to current project scenarios. On the other hand, virtualization and digital collaboration mechanisms, underlying the use of advanced electronic modelling tools, contemplate the necessary multidisciplinary contributions as significant parameters of the evaluation procedures, prefiguring the overall performance of the competitive solutions in a significantly more careful, reliable and aware manner in relation to the needs of the client over the life cycle. The aforementioned tools, if consistently employed and made operative, implement the traditional models ensuring the actual feasibility of the works, their plausibility with respect to the alternatives, in addition to the risks connected with the need to introduce variations. By gradually refining structures geared towards the optimal pursuit of the purposes, virtuous and concretely tangible processes are configured which, through multidimensional and interdisciplinary assumptions, ensure the achievement of steps that can steadily be qualitatively improved.

These advanced approaches that develop and simulate solutions involving all phases of the building process, that are related to the entire life cycle of the buildings and their components and deal with the production systems and techniques of constructing and managing the building structures, *formally* postulate the achievement of maximum efficiency in the use of the resources.

3. OPTIONEERING AND GENERATIVE DESIGN FOR THE VALUE OF PROJECT AND ITS ORGANIZATIONS IN THE EARLY STAGE DESIGN

3.1 Alternatives generation and evaluation in a transparent manner

The project for the transformation of the environment is a decisional act (Cross, 2006) which, by its innovative nature (Brown and Chandrasekaran, 1985; Gero, 1990), contemplates the formulation and comparison of multi-scale and multi-dimensional hypotheses that is different in size and nature regardless of the disciplines involved. More or less consciously it is what every designer puts in action in his/her ideational process that is poetically described as a creative act since it relies on experience and tacit knowledge (Laseau, 1989) of which the sketch, progressing by successive approximations towards the solution sought, is an emblem and privileged instrument (Maldonado, 1992: 102). In fact, even in an authorial vision, the choice derives from

a generative process and from the comparison of competing alternatives that, in this case, remains opaque and not fully comprehensible in its genesis. Given the infinity of potentially considerable alternatives and the uncertainty of the effects, the “intuitive” character of this approach can present an unquestionable validity due to its intrinsic efficiency in terms of execution times.

Things get complicated when the choice must be made in tandem with other subjects holding differentiated and sometimes antagonistic points of view, or worse, representing someone else that is the scenario in which public decisions are made. In this type of decision, an important requirement is transparency, where clarity of form, formalization of the object, and decision-making procedures based on the comparison of explicit alternatives are essential.

As discussed above and consistently, the Italian Public Contracts Code requires the preparation of the DOCFAP, a specific document dedicated to the evaluation of project alternatives.

These alternatives may concern not only large-scale aspects, but also and above all many other aspects related to the building scale, such as its morphology, its energetic behavior, structural, constructive and technological options, the functional layout, maintenance and management repercussions: aspects that in the current practice are poorly – if not totally – obliterated during the program phase.

3.2 Optioneering and Concurrent Design in the Early Design Stage.

The rationalization of public decision-making processes through the adoption of formalized methodologies started in the sector of infrastructural engineering (Dupuit, 1844; Congress of the United States of America, 1936) subsequently finding their first systematizations in the marginalist¹⁴ economic interpretation and, after the Second World War, adopting some special “measurement” techniques, where the most known is the so-called Cost-Benefit¹⁵.

¹⁴ Economic current that interprets the products value in relation to the consumer’s desirability/convenience whose marginal utility, decreasing with the progress of availability and consumption, represents its fundamental concept. In this perspective and in a market with perfect competition, the decision is defined as a rational act which efficiently allocates resources in relation to marginal utility (marginal productivity) pursuing an equilibrium rather than pure economic growth or equity: in others words, according to the classic Pareto definition, improving the conditions of someone without harming others.

¹⁵ Cost/Benefit Analysis are methodologies and techniques aimed at analyzing the “return” of public investments through effectiveness evaluations which, starting from the 1970s, became widespread as tools for the validation of projects for international organizations such as the OECD, the UNIDO and the World Bank. In Italy the first significant experiences of value analysis in the public

Afterwards, in the 90s these methodologies evolved in the Multi-Criteria Evaluation¹⁶ extending application in different fields such as Project Management, and more specifically, Value Management and Value Engineering with the term of *Optioneering*: a structured problem-solving process based on the comparison, on a performance basis, of alternative solutions developed for a multidisciplinary competition. The adoption of these techniques in construction leads to a radical impact on project organization, marking the separation from hierarchical-sequential procedures and the fragmented procurement. Concurrent, Simultaneous, or Parallel Engineering are some of the terms that identify these new approaches where the common element can be recognised in the federated action of different actors and in the anticipation of their contributions already in the initial phases of the process where, as shown by the famous Mac Leamy's Curve (The Construction Users Roundtable, 2004: 4), antecedent diagrams (Paulson, 1976) and other studies (AIA 2012), is augmented the leverage of decisions on the project value.

However, these approaches are not new in the history of construction. Probably the best known and most investigated example is the Empire State Building, built in a period when, on the threshold of the Great Depression, *the race for the sky*, namely the mad rush to build the highest skyscraper in the world, was staged in Manhattan. To design and build Art Deco buildings of seventy up to a hundred floors that would change and connote the New York skyline in less than two years required the use of management methods taken from the automotive industry that are today known as Fast-track, Integrated Delivery Project, Lean Production, Project Management.

The chronicles report that the *Scheme K* of the Empire State Building Preliminary Design was released on the night of 1929, October the Third, after examining 16 alternatives in less than a month from the design procurement and setting a communal table where architects, structural engineers, mechanical engineers, electrical engineers, suppliers and sub-contractors, as well as lenders and real estate agents in charge of marketing «were in constant consultation with both of the others» (Reis, 2009: 57).

constructions begin to appear in 1982 with the *Legge Finanziaria* of that year establishing the obligation of feasibility studies and, within the *Segreteria Generale della Programmazione*, the use of Cost/Benefit Analysis as tools for the evaluation of public projects investment. A more systematic use of the feasibility study will take place in 1988 with the obligation to use it in the evaluation of the interventions planned in the *Fondo Investimenti Occupazione* and almost simultaneously it will enter the construction sector with the *Piano straordinario d'investimenti per l'edilizia sanitaria* where, in its regulations, the feasibility study was declared as an "indispensable moment and separate from designing" to access financing.

¹⁶ The multi-criteria models are a family of techniques and evaluation instruments with greater degree of complexity where the first critical element is represented by the selection, in a necessarily limited number, of points of view and, from these, the criteria to evaluate different attributes of each alternatives in competition.

3.3 Parametric information modeling and performance simulation: Performative BIM

Compared to this precedent, however, we should note that today's *Optioneering* techniques show significant differences. These differences are due to the information theory that, at the turn of the 1950s (Shannon, 1948), developed with strong influences in every field of theoretical and operational research laying the foundations for an objective, measurable and operable treatment of information content: briefly, for a formalization of the phenomena in the language of mathematics where cybernetics represented its new discipline. Almost at the same time, the consequences in the construction sector and specifically in design practice led to visions according to which the project could govern itself through rational methods that discovered – precisely – in cybernetics and self-regulation systems their operational references¹⁷; in the objective measurability of attributes, the criteria for decision-making which inaugurated the so-called Performance Based Design¹⁸.

In recent years the rapid development of information and telecommunications technologies and the increased computational capabilities have led to further and significant modifications in the world of construction until producing a substantial overlap / identification between Project Management and Information Management, between problem modeling and information modeling. It has been a change that nowadays is recognizable in Building Information Modeling (BIM): an information model indexed by the geometry of the building and enabling concurrent operability (Eastmann et al., 2008: 26-43; Acampa et al., 2019).

¹⁷ Historical anticipations of this "cybernetic" change in Design were the public-school intervention programs promoted in the United States between the late 1950s and the early 1960s on seminal ideas by Ezra Ehrenkrantz, Chris Arnold, Jonathan King and initiated by a first test conducted in Cupertino in 1960 as a pilot application of a research developed in New York on Ford's financing. Subsequently this test was extended to the construction of thirteen Californian schools and other interventions for different destinations and locations. «It is from these experiences that design evolves towards a logical-mathematical formalization, cybernetic, whose profound nature is the information flow recognised as the most influential element of some revolutionary research run by Christopher Alexander, S.A. Gregory, Abraham A. Moles, Christopher Jones, Morris Asimov and in Italy, above all, by Giuseppe Ciribini and Alberto Rosselli, disseminator of the new theories that came from the other side of the ocean" (Ridolfi, 2016: 39, translated from the original).

¹⁸ After the introduction in the 1930s of some performance standards by the US National Bureau of Standards and the experiments described in the previous footnote, the systematic use of Performance Based Design in the construction sector spread in the 1980s on the basis of the requirement-performance approach and consequent regulatory orientations aimed at freeing the market, innovation and quality (AA.VV., 1990). This regulatory approach, of which Sweden provided the first systematization (NKB, 1978), had effects on the design by imposing the definition of the building object in relation to specific objectives, needs and conditions of use objectively based on requirements specifications and to be evaluated in its actual correspondence through validated test and measurement methods/tools.

At present and borrowing the bipartite division of language established by J.L. Austin (1962), it is possible to recognize two different applicative thread: the first definable as *Informative* (constative) BIM, where modeling and information are mainly related to the automation of the project production and contract management; the second identifiable as *Performative*¹⁹ BIM where information modeling is aimed at soliciting actions. These actions can be ascribed to the exploratory and simulation activities typical of the ideational phases with effects on the quality of the work and effectiveness of the choices since, as among the first, the inventor of Ecotect Andrew Marsh pointed out (2008) they can be implemented with greater availability of information or with greater "context awareness".

The declination for exploration purposes of the BIM, as exemplified by Autodesk's commercial choices on the Revit²⁰ platform, derives from potentialities unknown to the previous design tools concerning the dynamic and interactive updates propagation of

the various attributes to all the components of the project (instanting) and the generation of variants from source models (versioning). These features allow the study of alternatives in an extensive and economic way and their evaluation on a performative basis in relation to certain bound-

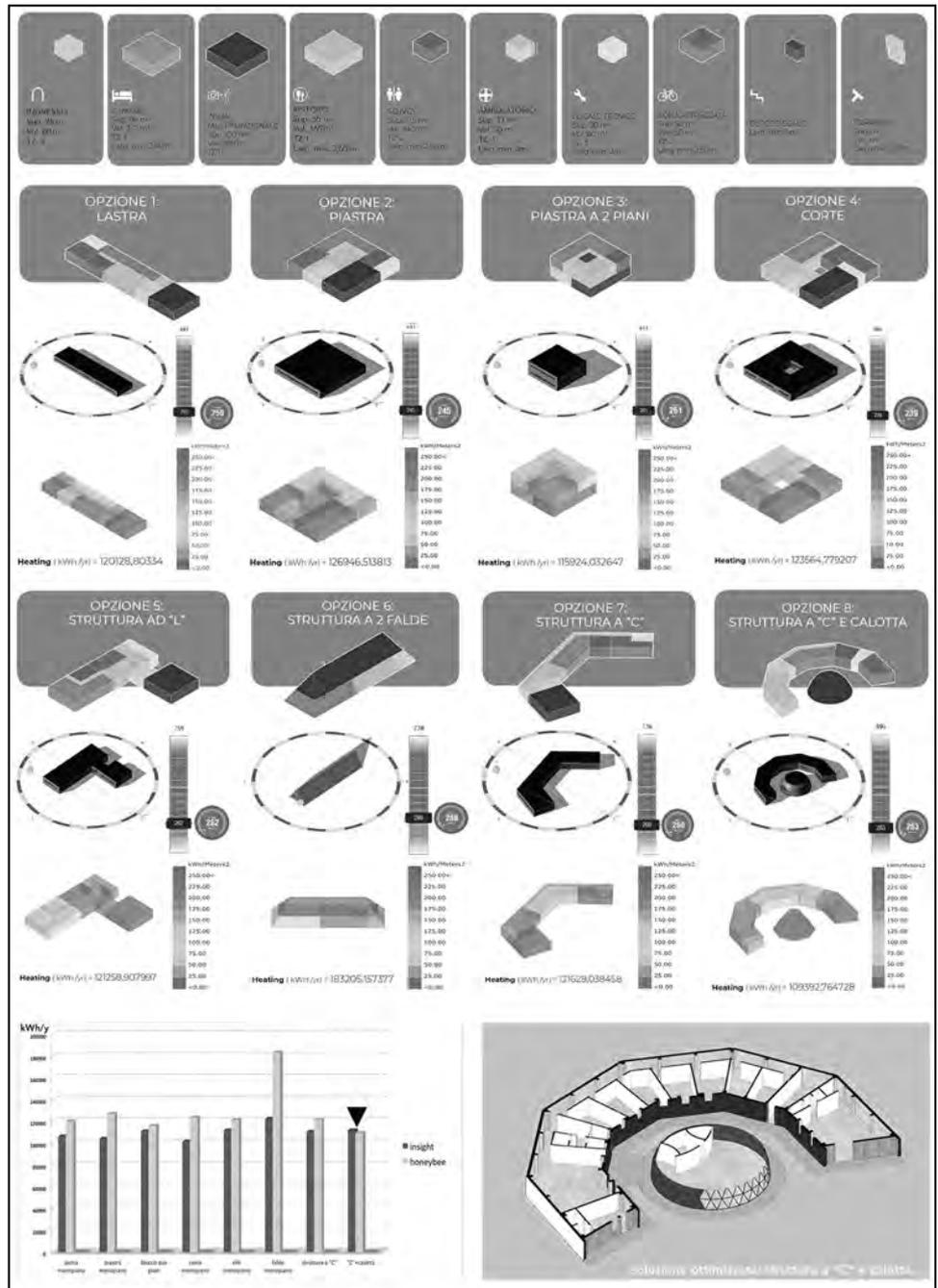


Figure 2 - Conceptual Mass Energy Optioneering
A. Carmignani, L. Pizzo, A. Purcareata, Ljòs Center, excerpt from *Environmental Design Lab*
Prof. G. Ridolfi)
Preliminary Design definition by comparing the annual energy consumption of solution developed at the conceptual mass level. Computational modeling and simulation performed using Revit-Insight and Rhino-Grassopper-HoneyBee.

¹⁹ The *performative* term is used here to distinguish, more generally, information devices aimed at producing an action unlike the current use which in design language refers to the performance approach. This second interpretation of *Performative Architecture* is traceable, for the first time, in the title chosen for the symposium held in October 2003 at the University of Pennsylvania (Kolarevic and Malkawi, 2005). The same interpretation is linked to the *Performative Design Studio*, a special work unit of Skidmore, Owings and Merrill LLP dedicated to computational simulation applied to different disciplinary fields.

²⁰ Since the date of purchase in 2002 from the Revit Technologies Inc. and also through an aggressive acquisition and integration policy, Autodesk has greatly expanded Revit's capabilities. Among these, many of the new features have concerned performance simulation and interface user friendly simplification.

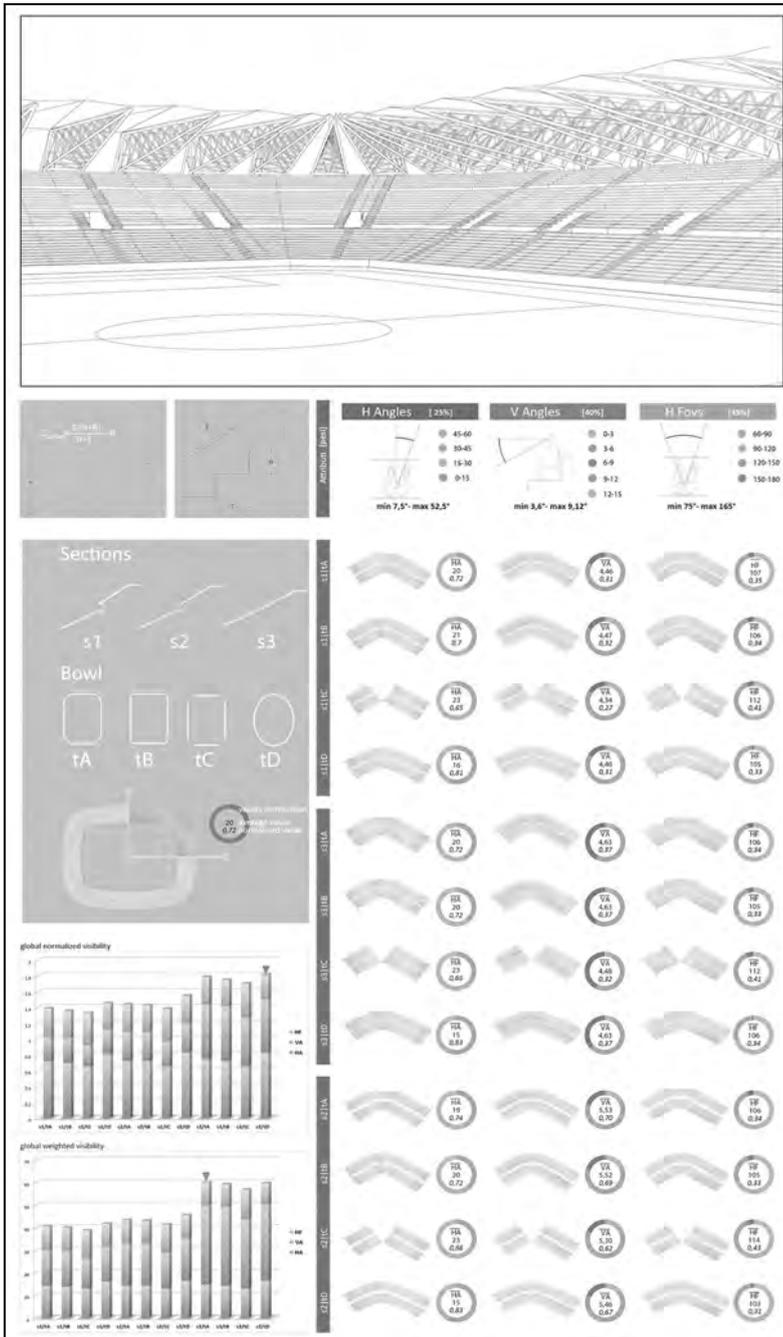


Figure 3 - Generation and evaluation of stadium design alternatives through performance based computational tools .

(M.Tedesco's Master, Thesis AA 2019-20, supervisor prof. Giuseppe Ridolfi)

The preliminary design definition results from visual comfort optimisation. In this example of parametric optimization, the design process was conducted with the Grasshopper visual programming environment using its Bowl Builder library. The generation process took place in four steps:

- 1- generation of the stands profiles based on three types of usual sections (s1, s2, s3) in compliance with the minimum values of C-Value as defined in the UEFA Guide to Quality Stadiums (2011) (point 5 section C2- D Designing the stadium bowl); respect of 30 cm as the minimum seat distance from the backrest as per UEFA Stadium infrastructure regulations, 2010); compliance with the capacity limits established in the program;
- 2- attributes and relative importance weights specification with reference to three visual quality coefficients (angles H, angles V, focus H);
- 3- generation of twelve solutions resulting from the use of optimized sections on four bowls types (tA, tB, t3, tC);
- 4- automatic calculation of the normalized deviations from the optimal values and comparison of the weighted summations for identification of final solutions.

that involved the user-friendly simplification of the interfaces, entailing, on the one hand, the return of the elaborations in a mainly graphic high-fidelity form, therefore able to facilitate the communicability of the choices even to non-experts (Malkawi, 2005) (Fig. 3). On the other hand, the introduction of visual programming environments that has extended, to a considerable number of users, the customization of the simulation tools previously reserved for scripting initiates. As a result, since the initial phases it is now more possible to conduct simulations including the Life Cycle, to intersect different disciplinary areas, and to involve a larger number of operators in the alternatives evaluation and

decision-making process. Among the main advantages of these methodologies, constituted as a specific field of engineering with the name of Multi-disciplinary Design

ary conditions, specific behaviors, and measurable benchmarks of the impacts²¹.

These functionalities have been represented in two distinct and specialized sectors since the 1970s: the Solid Modeling and the Performance-Based Building Simulation which, thanks to the advances in information technology, have seen a rapid convergence to become powerful tools available to the majority of designers (Fig. 2). Nowadays, software, plug-ins and add-ons are widespread tools capable of modeling phenomena through complex systems of differential algebraic equations (Augenbroe, 2003). This process was accompanied by another significant change

²¹ The Building Performance Simulation (BPS) was born in the '70s as a specialist area of Parametric Modeling (PM) and Performance-Based Design (PBD) allowing to base Design no longer on "what the building will look like" (Garber, 2014: 184), but on performance measurements (Kolarevic, 2002) or, as A. Saggio pointed out, to move from *if then* to *what if* (2007: 36) up to include assessments under extreme functional and / or environmental conditions (De Wit, 2003: 25).

Optimization, we highlight the ability to run the *Optioneering* through numerical-computational optimizations on a performance and parametric basis, and to improve its creative value because by speeding up the computation it is now possible to explore a remarkable number of alternatives beyond the experience and the norm limits which is, as mentioned above, essential in the Early Stage Design.

3.4 Generative Design and optimization of the Feasibility Project

In the architectural design the methodologies previously described have inaugurated a new paradigm identified by the neologisms Parametricism 2.0 (Schumacher, 2016) or better Post-Parametric Automation (Andia and Spiegelhalter, 2015) that, «in the face of complex problems and not attributable to linear solvers, rediscover the old method of proceeding “by trial and error”, but with the possibility of automatically generating an endless number of attempts from which solutions emerge, sometimes unexpected» (Ridolfi, 2019: 48 - translated from the original).

Most commonly, the use of parametric modeling for the automatic generation of solutions is defined in a family of application products included in the term of Generative Design where the search for optimized solutions uses resolution algorithms that “mimic”, in Evolutionary Design, the natural selection logics of classical Darwinism (Bansal et al., 2019) and, in Swarm Intelligences, the collaborative logics of the evolutionary theories (Kennedy et al., 2001).

These applications materialize forms of intelligence, initially used for structural topological optimization, and then extended, in a more complete form, to different design problems thanks – as already mentioned – to the diffusion of visual programming environments such as Grasshopper, a Rhinoceros plug-in, to which followed Dynamo by Autodesk and Marionettes by Nemetschek Group.

Particularly in Evolutionary Design, the most widespread form of Generative Design, the evaluation of alternatives is based on genetic algorithms that exploit forms of intelligence searching for performance optimization. In an automated manner and starting from specific characteristics (genotypes), this kind of algorithms provides the stochastic generation of alternatives (phenotypes), the recombination of solutions from previous generations (crossover), the measurement of performance and, following selections based on the fitness criterion, the identification of satisfactory solutions up to inform, in the product engineering, rapid prototyping of the object from which to start again for possible and further optimization phases. As one of the Autodesk slogans states, Generative Design is a new way of designing in which the object co-designs itself²². It should be emphasized that these methods do not give rise to a single solution, but to a family of solutions that call into question designers and/or decision makers for the final choice and/or negotiation among those more desirable²³.

Referring to multidisciplinary evaluations, optimization algorithms can, in fact, implement functions aimed at searching the Pareto Optimal Front and, therefore, able to select a family of optimized solutions, so-called *non-dominated*²⁴ solutions.

The choice to pursue a family of optimized solutions rather than “the solution”, as well as being coherent with the nature of the problem (pursuing multiple, even conflicting, objectives), and with the methodology of choice (safeguarding the decision-making faculty of decision makers), meets specific requirements of today’s calculation tools in which the processing time remains a limit that is resolved only in the acceptance of the “approximation”. For this purpose, different types of genetic algorithms based on *scalarization* and other techniques that introduce selection criteria in addition to that of Pareto dominance are aimed at accelerating the convergence in the search for optimized solutions.

In this context, the *scalarization* implies the reduction of the multiple objectives to a single objective, commonly achieved through the introduction of “weighted” preferences in order to obtain a single value to be compared or by converting all the functions, excepting one, in constraints. In evolutionary algorithms, however, this technique has the defect of limiting the extent of the search for alternatives, since it limits the successive generations around a specific point of the Pareto Optimal Front generally identified already in the early calculation cycles. Besides the *ranking* method based on “objective dominance” other techniques for the simplification of the objective functions and at the same time safeguarding the effectiveness and the breadth of the exploration, concern processes of information crossover and selection based on *crowding* and/or *constraints* where the former consists in selecting solutions with the minimum distance from the optimal and the latter

²² This is the slogan launched by Autodesk in the promotion of Dreamcatcher, a new computational environment that uses Generative Design for structural topology optimization. Another ambitious project by Autodesk towards the implementation of Artificial Intelligence in the construction sector is Refinery in which Generative Design and Evolutionary Optimization are extended to other aspects of Design.

²³ It is the so-called *a posteriori optimization* method in which the Pareto optimal solutions are subsequently subjected to the negotiation of the decision makers. It is opposed to other more “deterministic” methods which, based on preferences already expressed (*a priori optimization*), identify unique solutions through specific mathematical functions where the most intuitive and used among them is the *maximum curvature*.

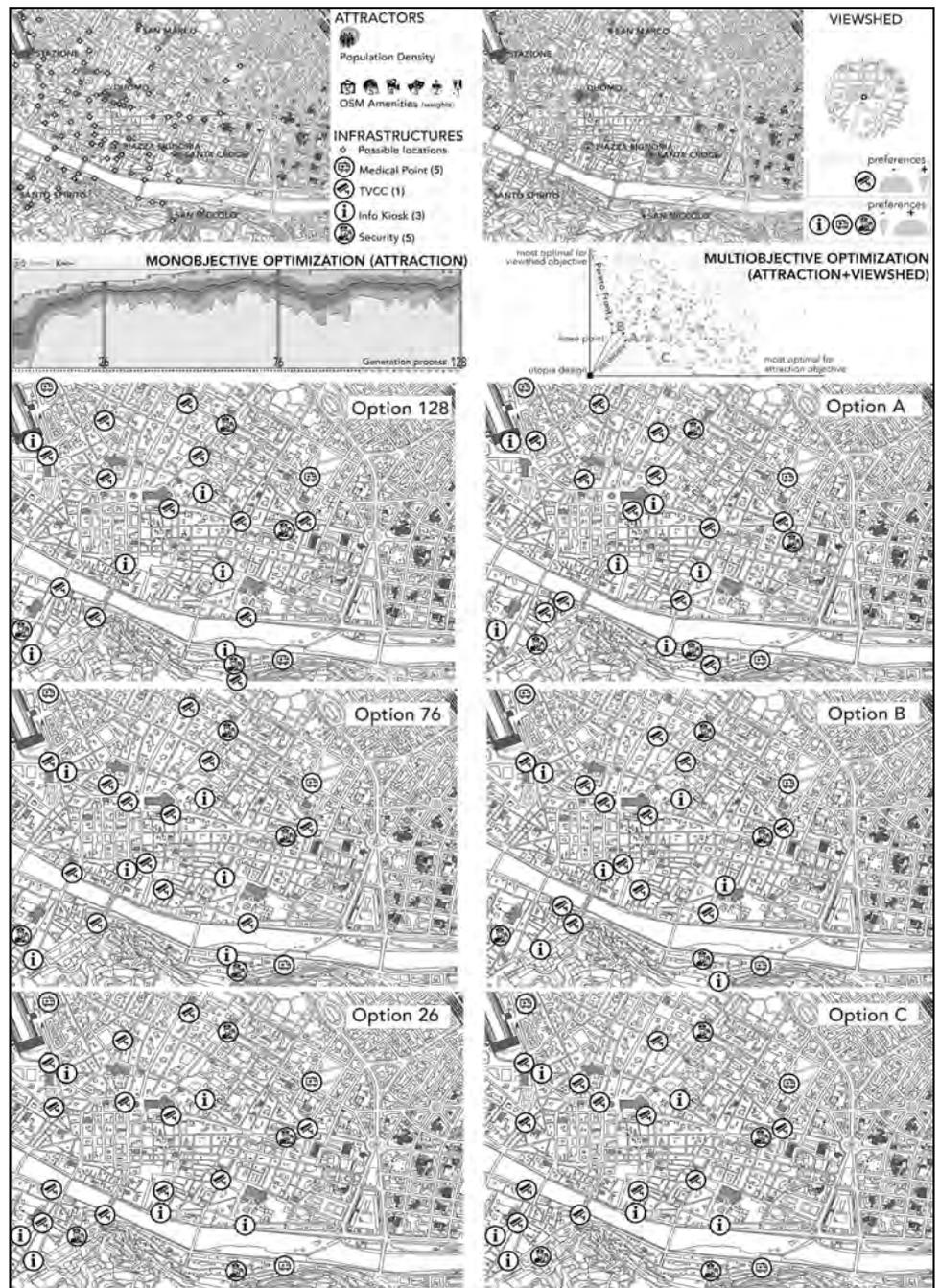
²⁴ As defined by V. Pareto, the optimization, according to the dominance criterion, consists in discarding all those alternatives that are less efficient in all the objectives compared to all the other ones; hence the term *dominated*. The alternatives that survive constitute the so-called Pareto Optimal Front representable, in a n-dimensional diagram, as a connection line/space of optimal alternatives where there is no solution that is simultaneously better for all the objectives considered; hence the term *not dominated*.

Figure 4 - Security & Friendly City using Evolutionary Generative Algorithm (excerpt from Doctoral Thesis of A. Saberi, Ancillary Interface, excerpt prof. Giuseppe Ridolfi) Preliminary research for the definition of a procedure aimed at identifying the most effective location of some urban infrastructures in order to increase the degree of comfort and safety of the city.

The test includes surveillance stations, CCTV stations, info points, medical rescue points and refers to a touristically significant portion of the historic center of Florence defined around the main tourist attractions (S. Spirito, S. Croce, S. Marco, Duomo, Stazione, San Niccolò, Palazzo Vecchio).

ALGORTMO 1 The first optimized prefigurations were carried out using a single-objective generative algorithm aimed at maximizing the degree of global proximity of infrastructures to be inserted in alternative positions previously identified. The algorithm carries out a process of genetic optimization according to the Walkscore principles using information extracted from the Open Street Map and other online information resources related to population density, and night and daytime "attractors" having different degrees of importance.

ALGORTMO 2 Further optimized alternatives were produced using a multi-objective optimization algorithm where the location of the individual infrastructures is defined in relation to the degree of global proximity and their viewshed values: minimum for CCTV cameras and maximum for the remaining infrastructures.



establish some minimum levels to respect (standard) or, as in the C. Alexander's methodologies, exclusion parameters based on conflicts among which the feasibility is one of the most employed selecting conflict. Further techniques to the study, when the explicit explanation of preferences is not allowed, are those aimed at identifying the *knee point*: an inflection point of the Pareto Front where the algorithmic calculation can converge in order to delimit optimized solutions²⁵.

Nonetheless, the heuristic nature of the resolution processes combined with the physical limits of computation makes it impossible to arrive at a univocal solution. In its place

and as seen, the evolutionary algorithms accept the reasonable compromise between processing times and minimization of the distance from the optimal by producing a

²⁵ For a brief introduction to the use of generative algorithms to solve complex single or multi-objective problems and to the "acceleration" techniques, see Nagy D. (2017). For a more in-depth overview of the various techniques under study, see Mane S. U. and Rao M.R.N. (2017). For a discussion of the application of the knee point, see Zhang X., Tian Y., Jin Y., (2015) and Branke J., Deb K., Dierolf H., Osswald M. (2004).

series of solutions that are “approximately” responsive to the design problem and capable of allowing rational and shareable decisions (Fig. 4).

3.5 The advent of Artificial Intelligence in constructions and comprehensive project organizations

One of the main merits of these tools is the redefinition of design as a practice of “building” dynamic models, or more precisely according to the Stephan Haertmann’s distinction, as a *practice of simulation* on which to formulate hypotheses and conduct multidisciplinary investigations thanks to their interoperability or, in other words, the possibility of establishing a dialog between different actors through the digital “marking”²⁶. A further reinforcement towards this direction is represented by the progressive delocalization of the model in cloud computing environment capable of offering a calculation power previously unthinkable and, consequently, making indispensable to share common forms of communication.

These transformations are laying the groundwork for an availability of information of significant importance already in the Early Design Stage, when this information is of strategic importance for choosing and modifying the project, rather than downstream when the information framework is detailed and abundant, but any choices and variations would be contractual misfortunes.

In the simplified forms of Conceptual Massing, the Performative Bim and the Generative Design are now able to bring in modeling and simulation an abundant quantity of information of various natures coming from different specialist sectors, post-occupancy knowledge data-base, benchmarking and real time dataloggers (see Internet of Things) which all manifest themselves in the form of digital data. As a direct consequence, this rich informative heritage combined with modeling tools and easy-to-use algorithmic solvers are radically changing the production scenario of the project revealing the advent of Artificial Intelligence in the construction sector²⁷. It is reasonable to think that

these transformations can reverberate more in the initial phases of the project concerning the optimization of the proposal and consequently on the organizational models as well being updated in the form of the *Comprehensive Project Organizations* (Ridolfi, 2004): organizations able to keep together multiple points of view and, at the same time, able to share a growing number of data in order to inform decision-making and management processes for a competitiveness based on value generation rather than price discounts.

An exemplary case of these scenarios is the British context which, on the basis of a cultural tradition oriented to the Multidisciplinary Design Collaboration and starting from two seminal reports *Constructing the Team* (Latham, 1994) and *Rethinking Construction* (Egan, 1998), indicates the digitalization of the project and the use of performance-based approaches as the key drivers²⁸ to realize effectiveness, efficiency, reliability, horizontal integration (Integrated Project Delivery) and the involvement of the various operators from the initial phases of the process (Early Contractor Involvement).

In other contexts, another successful example, in which the *Performative BIM* has been applied since the early stages, is the realization of the New Karolinska Solna in Stockholm, the first Swedish hospital of over 300,000 gross square meters built in Private Public Partnership where the contractor Skanska²⁹ has used digital environment from the feasibility study implementing a progressive program specification/verification (*Dynamic Briefing*)³⁰ and the *Optioneering* through different types of simulations also informed by Facility Management in order to obtain a sustainable and profitable project.

It may be contested that these examples with amounts of tens of millions of euros are outside the current reality of the Italian market which is still mainly linked to traditional procurement formulas where, in the first four-month period

²⁶ For a dissertation on digital marking and its effect on design and society see G. Ridolfi, 2019b.

²⁷ An area of absolute topical research in the Information Technologies is Big Data, which refers to procedures capable of inferring from mountains of data of different nature and size, measurable in Zettabyte (billions of Terabytes), forms of Artificial Intelligence. In the construction sector, the frightening increase in the recent years of the digitalization represents a fundamental starting point, although the recognition and detection algorithms are developing relatively slowly due to the size and multiform nature of the information produced in this sector. The first commercial solutions include applications for the monitoring and prediction of the critical tasks in the construction phase and for assisting facility management. In the design phases experimental researches are underway aimed at integrating Generative Design with Machine Learning and Deep Mind algorithms.

²⁸ In the experiments that followed (Movement for Innovation, 1998; Construction Best Practice Program, 1998, up to the Design Procurement/Lean Client Task Group, 2011) new procurement models were developed and tested. The progressive integration of the BIM technologies in the project organizations that followed these new contracting approaches has had as their culminating point in Heathrow T5 and Crossrail: projects of significant financial dimension and technical-managerial complexity, however, not without problems in their management and final results.

²⁹ Skanska is a Swedish multinational contractor with integrated and concurrent design experiences consolidated in numerous infrastructural engineering projects, buildings for the tertiary sector, educational and hospital care.

³⁰ Although the commercial diffusion for these kinds of applications is still in an embryonic stage and limited to the integration of spreadsheets and scheduling automation in the BIM environment, tools for a dynamic space programming capable of defining and adapting themselves, even parametrically, to the evolution of the project are to be considered among the most interesting tools for the initial phases and the contractual monitoring of the project.

[of 2019, the average total value of public procurement for engineering and architecture services has been, although growing, of around 250,000 euros³¹. In the medium and long term, however, it must be considered that the regulations already require the gradual introduction of computational modeling, and above all, the adoption of selection criteria increasingly oriented to value. Such value is not only referring to the product itself, but also to the so-called social, occupational and environmental externalities (*prezzo/efficacia*) extending, with the introduction of the *qualità/prezzo* criterion, its effect on the quality of the design team as well as overcoming the previous rules that required the separation between quality of the offer and quality of the bidder: the first one to be used as a product selection criterion; the second one as a criterion of eligibility for the assignment of service contracting.

In the light of these considerations, and how it has already been understood in different contexts³², the entry of computational intelligences in Design and especially in the conceptual phases can no longer be considered as an alternative option, but a “categorical imperative” to compete with excellent competences on the large, now globalized, construction market and to bring back the productivity of a sector that has been constantly declining since the realization of the Empire State Building (Sacks and Partouche, 2011). It is an obligatory choice for all the designers and, above all, for the public commissions whose “intelligence” represents the other important requisite that the British reforms had included among the fundamental key drivers of change.

4. CONCLUSIONS

The article outlined the reference framework established by the rules of Italian public contracts for the preliminary phases of the planning, identifying the assessment of design alternatives as its most critical moment and indicating the choice of performance-based methodologies as the most effective solution for the final quality of the works and to implement process models actually based on rational approaches subject to cycles of step-by-step control.

Thereafter, the article pointed out how the regulations promote the gradual use of specific electronic and information modelling tools³³ as a strategic action which, through interoperable platforms and digital management of the infor-

mation content of the projects, could actually increase performances in the construction sector in terms of innovation, operational optimisation, value generation, error reduction and waste.

From these premises, the attention focused on the use of these tools in the programming phase, in virtue of the fact that this part of the process is shown to be highly delicate, and that the assessment/selection of the alternatives, a main activity in this phase, represents a fundamental element for the feasibility of the work and an opportunity to initiate participatory processes.

In this regard, the analysis of information technologies in the construction sector and in particular of the gradual dissemination of the Parametric Simulation and Generative Design, in addition to other ‘embryonic’ forms of Artificial Intelligence, highlighted the opportunities found in the programming phases of the process as a solution to the critical aspects highlighted and optimisation of the end product but, also and above all, of renewal of its organisational models starting with the qualification of the public client.

In view of these prospects, a summary description of the functionalities of the aforementioned tools and reference to some experiences in the most advanced contexts have demonstrated the feasibility and actual possibility of implementing these opportunities, offering real occasions to increase the value of the design as well as its reliability and productivity in the sector. An analysis of the functionalities showed how the possibility of generating groupings of optimised solutions, in addition to those representing the wealth of experience of the design team or the “normality” of the compliant solutions, can reinforce the pursuit of quality just as Performance-Based Simulation can encourage collaborative organisational models as early as the initial stages of the planning, where the greatest opportunities for increasing the value of the design lie.

Having demonstrated the impacts that the aforementioned tools can actually and feasibly bring about in the refurbishment of the constructions and in the operational/management models, the article concludes by highlighting how change can fully occur only to the extent that the public client understands and wants to adopt them: a hypothesis today strongly challenged by the gradual erosion of skills caused by underinvestment and consequently by the widespread use of assignment to other operators which creates management and public control deficits.

The acquisition of these “intelligences” by administrations therefore represents an essential element without which each opportunity to increase the reliability and quality of the investments, not only public ones, would remain a mere possibility, or worse still, would certainly increase the handicap in a construction market that is at this point global.

³¹ Source: Oice, Osservatorio mensile sui bandi di gara pubblici per servizi di ingegneria e architettura, *project financing* e appalti di progettazione e lavori.

³² These contexts include, in addition to the North America, the Great Britain, Finland, and Sweden, the Republic of Singapore, that since 1999 started a digitalization program in construction entitled “To be a World Class Builder in the Knowledge Age” standing out for the importance conferred on university education. Since that date, Singapore has undertaken a profound restructuring of the curricula on a multidisciplinary basis and aimed at establishing a mutual relationship with the business world.

³³ Art. 23, paragraph 13 of Code 50/2016 and Decree of the Ministry of Infrastructure and Transport no. 560 of 1 December 2017 on the compulsory use of modelling methods and tools in public works.

* **Alessandra Cucurnia**, Architect, PhD in Architecture Technology; University Researcher in the ICAR/12 Disciplinary Scientific Sector, Professor of Project Management and Technology, Master in Architecture, School of Architecture, Florence University, Italy
e-mail: alessandra.cucurnia@unifi.it

** **Giuseppe Ridolfi**, Architect, PhD in Architecture Technology; Associate Professor in the ICAR/12 Disciplinary Scientific Sector, Professor of Environmental Design, Master in Architecture and Icad – International Course on Architectural Design, School of Architecture, Florence University. Director of the Joint Venture Laboratory Mailab – Multimedia Architecture Interaction, Italy
e-mail: giuseppe.ridolfi@unifi.it

Bibliography

AA.VV., *Normativa tecnica e industrializzazione dell'edilizia*, Parma Edizioni, Bologna, 1990.

ACAMPA G., *European Guidelines on quality requirements and evaluation in architecture*, Valori e Valutazioni, n. 23, SIEV, Roma, 2019, pp. 47-56.

ACAMPA G., ORDÓÑEZ GARCÍA J., GRASSO M., DÍAZ LÓPEZ C., *Project Sustainability: criteria to be introduced in BIM*, Valori e Valutazioni, n. 23, SIEV, Roma, 2019, pp. 119-128.

A.I.A-AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS, *An Architect's Guide to Integrate Energy Modeling in the Design Process*, 2012, (download: <https://www.aia.org/resources/8056-architects-guide-to-integrating-energy-modeling.cfm>, consulted in January 2014).

ANDIA A., SPIEGELHALTER, T., *Post-Parametric Automation in Design and Construction*, Artech House, Boston, 2015.

AUGENBROE G., "Trend in Building simulation" in Malkawi A., Augenbroe G. (eds), *Advanced Building Simulation*, Spon Press, New York, 2003, pp. 4-24.

AUSTIN J.L., *How to do things with words. The William James Lectures delivered at Harvard University in 1955*, Oxford University Press, London, 1962.

BANSAL J. C., SINGH P. K., PAL N. R. (eds), *Evolutionary and Swarm Intelligence Algorithms*, Springer, Cham, 2019.

BASSI A., OTTONE C., DELL'OVO M., *Minimum Environmental Criteria in the architectural project. Trade-off between environmental, economic and social sustainability*, Valori e Valutazioni, n. 22, SIEV, Roma, 2019, pp. 35-45.

BENTIVEGNA V., *The quality of the architectural works: the relational aspects*, Valori e Valutazioni, n. 23, SIEV, Roma, 2019, pp. 23-29.

BRANKE J., DEB K., DIEROLF H., OSSWALD M., "Finding Knees in Multi-objective Optimization" in Conference: 8th International Conference on *Parallel Problem Solving from Nature - PPSN VIII*, Birmingham, 2004, (download: https://www.researchgate.net/publication/225109103_Finding_Knees_in_Multi-objective_Optimization, consulted in June 2019).

BROWN D. C., CHANDRASEKARAN B., "Expert Systems for Class of Mechanical Design Activity, Knowledge Engineering" in Gero, J.S. (ed.) *Computer-Aided Design*, North Holland, 1985, pp. 259-282.

CONGRESSO DEGLI STATI UNITI D'AMERICA, *Flood Control Act*, Pub.L. 74-738, issued on August 22, 1936 from 74th USA Congress, 1936 (download: <http://www.legisworks.org/congress/74/publaw-738.pdf>, consulted in June 2019).

CROSS N., *Designerly Ways of Knowing*, Springer-Verlag London Limited, Cham, 2006.

DE WIT S., "Uncertainty in building simulation", in Malkawi A., Augenbroe G. (eds.), *Advanced Building Simulation*, Spon Press, New York, 2003, pp. 25-58.

DUPUIT J., *De la mesure de l'utilité des travaux publics (1844)*, in *Annales des Ponts et Chaussées*, II, 2nd semester pp. 332 – 375, 1995 (download: https://www.persee.fr/doc/rfec0_0769-0479_1995_num_10_2_978, consulted in June 2019).

EASTMANN C., TEICHILZ P., SACKS R., LISTON K., *BIM Handbook. A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors*, John Wiley & Sons, Hoboken, 2008.

EGAN J. (ed.), *Rethinking Construction. The report of the Construction Task Force to the Deputy Prime Minister*, Department of Trade and Industry, London, 1998.

GARBER R., (ed.), *Bim Design. Realising the creative potential of Building Information Modeling*, John Wiley & Sons, Chichester, 2014.

GERO J.S., *Design Prototypes: A Knowledge Representation Schema for Design*, AI Magazine, Vol. 11, n. 4, 1990, pp. 26-36.

HAERTMANN S., *The world as a process: simulations in the natural and social sciences*, in R. Hegselmann, U. Mueller and K. Troitzsch (eds.), *Modelling and Simulation in the Social Sciences from the Philosophy of Science Point of View*, Kluwer, Dordrecht, 1996, pp. 77-100.

HOLZER D., HOUGH R., BURRY M., *Parametric Design and Structural Optimization for Early Design Exploration*, International Journal of Architectural Computing, Vol. 5, n. 4, 2007, pp. 625-643.

KENNEDY J., EBERHART R. C., SHI Y., *Swarm Intelligence*, Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, 2001.

KOLAREVIC B., *Performance Base Design*, International Journal of Architectural Computing, issue 01, Vol. 2, 2002, pp. 43-50.

KOLAREVIC B., MALKAWI M. A., (eds.), *Performative Architecture Beyond Instrumentality*, Spon Press, New York, NYC, 2005.

LASEAU P., *Graphic Thinking for Architects and designers*, Van Nostrand Reinhold, New York, NYC, 1989.

LATHAM M. (ed.), *Constructing the Team: Final Report of the Government/Industry Review of Procurement and Contractual Arrangements in the UK Construction Industry*, Her Majesty's Stationery Office, London, 1994.

LOIERO R., MAIOLO S., *La valutazione degli investimenti pubblici. Strumenti di programmazione e ACB: l'esperienza italiana*, Analysis document n. 3, Impact Assessment Office, July, 2017.

MAC LEAMY P., «Effort/Effect Curve», in Construction Users Roundtable's, *Collaboration, Integrated Information, and the Project Life-*

cycle in *Building Design and Construction and Operation*, WP-1202 August, 2004, Cincinnati (download: <https://kcuc.org/wp-content/uploads/2013/11/Collaboration-Integrated-Information-and-the-Project-Lifecycle.pdf>, consulted in February 2016).

MALDONADO T., *Reale e virtuale*, (V^a ed. 1993), Feltrinelli, Milan, 1992.

MALKAWI M. A., *Perfomance Simulation: Research and Tools*, in Kolarevic Branko, Malkawi M. Ali, (eds.), *Performative Architecture Beyond Instrumentality*, Spon Press, New York, NYC, 2005, pp. 85-96.

MANE S. U., RAO M.R.N., *Many-Objective Optimization: Problems and Evolutionary Algorithms – A Short Review*, International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 12, n. 20, 2017.

MANGANELLI B., *A proposal for a synopsis in real estate appraisal between the Italian doctrine and international valuation standards*, Valori e Valutazioni, n. 18, SIEV, Roma, 2017, pp. 9-16.

MARSH A., *Generative and Performative design: A challenging New role for Modern Architects*, The Oxford Conference 2008, Witt Press, Oxford, 2008, (download: http://companyshed.com/downloads/documents/2008_OxfConf.pdf, consulted in March 2015).

MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI, in collaboration with: ERNEST & YOUNG and POLITECNICO DI MILANO, *Comparative study on International ex-ante assessment methods for public works*, Dipartimento per le Infrastrutture, gli Affari Generali ed il Personale, Nucleo di Valutazione e Verifica degli Investimenti Pubblici, Rome, 2011.

MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI, *Linee guida per la valutazione degli investimenti in Opere Pubbliche nei settori di competenza del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti - D.lgs. 228/2011*, June 2017.

NAGY D., *Evolving Design*, in *Generative Design*, Columbia University's Graduate School of Architecture, Planning, and Preservation, New York, NYC, 2017 (download: <https://medium.com/generative-design/evolving-design-b0941a17b759>, consulted in September 2018).

NKB, *Structure for Building Regulations*, The Nordic Committee on Building Regulations, Report No. 34, Stockholm, 1978.

PAULSON B. C., *Designing to reduce construction Costs*, Journal of the construction division, Vol. 102, Issue 4, 1976, pp. 587-592.

PENNISI G., SCANDIZZO P.L., *Valutare l'Incertezza. L'Analisi Costi Bene-fici nel XXI secolo*, Giappichelli, Turin, 2003.

REIS A. R., *The Empire State Building*, Chelsea House, New York,

NYC, 2009.

RIDOLFI G., *Progetto e saperi comprensivi*, in Missori A. (a cura di) *Tecnologia, progetto, manutenzione. Scritti sulla Produzione Edilizia in ricordo di Giovanni Ferracuti*, Franco Angeli, Milan, 2004, pp. 203-217.

RIDOLFI G., *Progetto e procurement per costruire. Gestire progetti di pubblica utilità tra tradizione e innovazione digitale*, Aracne editrice, Rome, 2016.

RIDOLFI G., SABERI A., *Learning Design Through Designerly Thinking: Holistic Digital Modeling in a graduate program in Architecture*, in Slyk, J. And Bezerra, L. (eds.), *Education for research. Research for Creativity*, Wydział Architektury Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2016, pp. 62-67.

RIDOLFI G., *Bim e simulazione ambientale nelle fasi iniziali del progetto*, in Ceccherini Nelli L., *Soluzioni innovative di risparmio energetico per edifici Nearly Zero Energy*, Didapress, Florence, 2018, pp. 46-57.

RIDOLFI G., SABERI A., *Intelligenze computazionali nel progetto post-ambientale. Esempi da Mailab*, Agathón. International Journal of Architecture, Art and Design, n. 5, Demetra Ce.Ri.Med, Palermo, 2019, pp. 45-58.

RIDOLFI G., *The contemporary condition of design. A report on Digital Mathema*, in Mussinelli E., Lauria M., Tucci F., *La PROduzione del PROgetto*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, 2019b.

SACKS R., PARTOUCHE R., *Empire State Building Project: Archetype of Mass Construction*, Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 36, n. 6, 2011, pp. 702-710.

SAGGIO A., *La rivoluzione informatica*, Carroci, Rome, 2007.

SCHUMACHER P. (ed.), *Parametricism 2.0: Rethinking Architecture's Agenda for the 21st Century*, Architectural Design, Vol. 86, 2016, pp. 18-23.

SHANNON C. E., *A Mathematical Theory of Communication*, Bell System Technical Journal, Vol. 27, (jul.), 623-656 (oct.), 1948, pp. 379-423.

SHEA K., GOURTOVAIA M., *Towards integrated-performance-driven generative design tools*, Automation in Construction, Vol.14, n. 2, 2005, pp. 253-264.

ZHANG X., TIAN Y., JIN Y., *A Knee Point-Driven Evolutionary Algorithm for Many-Objective Optimization*, in *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 19, n. 6, Dec. 2015 (download: <http://www.soft-computing.de/KnEA.pdf>, consulted in September 2018).

Valutare e decidere nella fase di programmazione: l'impatto delle intelligenze computazionali

Alessandra Cucurnia*, Giuseppe Ridolfi**

parole chiave: optioneering, performative BIM, progettazione generativa, simulazione performativa, valutazione

Abstract

L'articolo si focalizza sulle verifiche di fattibilità preliminari delle alternative progettuali contemplate dai sistemi di realizzazione delle opere pubbliche italiane, che alla luce della norma costituiscono condizione indispensabile per avviare qualsiasi intervento finanziabile con risorse pubbliche.

In relazione a quanto sopra, vengono descritti i contenuti informativi dei dispositivi preposti alla gestione razionale e sostenibile delle iniziative (Quadro Esigenziale, Documento di Fattibilità delle Alternative Progettuali, Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica) che, attivando formalizzazioni a differente grado di connotazione e intensità, calibrate in funzione della specificità dei progetti, sono finalizzati ad attenuare l'ineludibilità degli scenari di incertezza che caratterizzano gli interventi.

A partire dal quadro normativo e più in generale con riferimento agli obiettivi di efficienza ed efficacia del progetto, il contributo approfondisce la fase di elaborazione delle alternative, quale momento di giustificazione circa la razionalità dell'investimento pubblico, ponendo l'attenzione sulle opportunità offerte dalle nuove tecnologie digitali di progettazione. In particolare, tale approfondi-

mento si rivolge alla simulazione parametrica nelle sue diverse declinazioni e avanzamenti in atto poiché specificatamente indirizzata a supportare l'azione decisionale su basi prestazionali e il confronto di alternative in maniera oggettiva e condivisibile. Più estesamente e oltre alle ricadute sul valore e sull'affidabilità dei risultati, la trattazione indica come tali strumenti si pongano quali nuove forme d'intelligenza collettiva aprendo alla definitiva affermazione di modelli organizzativi capaci di operare, sin dalle fasi iniziali del processo, in maniera trasparente e collaborativa piuttosto che nelle odierne forme di antagonismo che competono sul prezzo.

A tal proposito, viene introdotto l'Optioneering, quale ambito delle discipline dell'ingegneria deputato alla selezione per confronto di alternative progettuali e, sulla base di una originale interpretazione del BIM (Performative BIM), viene illustrata l'attualizzazione della progettazione prestazionale nelle tecnologie computazionali oggi ricomprese in specifici ambiti teorico-operativi quali la progettazione parametrica, il Performance-Based Building Simulation, il Generative Design, sino all'affacciarsi dell'intelligenza artificiale nella progettazione e gestione dell'ambiente costruito.

1. INTRODUZIONE

Per effetto della connotazione di "circolarità" che caratte-

rizza il processo edilizio, le ricadute indotte sull'intero iter realizzativo da posizioni decisionali assunte nelle fasi iniziali,

come altresì ricognizioni su prassi attuative pregresse asse-
riscono, si mostrano determinanti in rapporto al livello qua-
littativo riscontrabile nei prodotti finali.

Conseguentemente, ai fini dell'efficacia dei sistemi di rea-
lizzazione delle Opere Pubbliche, gli strumenti di program-
mazione, quali documenti propedeutici alla progettazione,
e il progetto di fattibilità tecnica ed economica, primo livello
di approfondimento tecnico della progettazione, costitui-
scono dispositivi strategici, tesi a eludere margini di discre-
zionalità interpretativa e, nel contempo, a contrastare il
manifestarsi di disfunzioni nei procedimenti attuativi, tute-
lando i valori ideativi dell'architettura.

A questo proposito le regole per gli appalti, al fine di qua-
lificare l'intero processo, prevedono il progressivo impiego
di strumenti elettronici di modellazione per l'edilizia e le
infrastrutture con i quali garantire l'attendibilità prima, e
l'inequivocabilità poi, delle evoluzioni da associare agli
elaborati progettuali di tipo grafico, descrittivo, prestazio-
nale ed economico, contemplando altresì processi di miti-
gazione di potenziali minacce che potrebbero pregiudicare
la realizzabilità degli interventi.

Tali strumenti, contemplando apporti interdisciplinari, con-
sentono di prevedere in anticipo eventuali difficoltà attuative
verificando le scelte circa la loro fattibilità, sostenibilità, com-
patibilità, rapporto costi/benefici e gestione nel ciclo di vita¹.
Gli stessi coadiuvano nel contempo le pratiche di verifica e
di validazione finalizzate, in fase progettuale, a rilevare e a
correggere difetti e, in fase realizzativa, ad attestare la coe-
renza delle lavorazioni in termini prestazionali, temporali
ed economici, rispetto alle previsioni di progetto.

2. LA VALUTAZIONE DEI PIÙ OPPORTUNI SCENARI DI INTERVENTO NELLA PROGRAMMAZIONE DELLE OPERE PUBBLICHE

2.1 Il procedimento attuativo delle Opere Pubbliche

Indipendentemente dai differenti modelli d'intervento, il
processo di realizzazione delle Opere Pubbliche si articola
in quattro segmenti cardine che ricorrono quali elementi
invarianti, a cui corrispondono le fasi di Programmazione,
Progettazione, Costruzione e Gestione, caratterizzate da
specifiche attribuzioni in termini di attività, ruoli e respon-
sabilità (Fig. 1).

¹ "Tutte le fasi consecutive o interconnesse, compresi la ricerca
e lo sviluppo da realizzare, la produzione, gli scambi e le relative
condizioni, il trasporto, l'utilizzazione e la manutenzione, della
vita del prodotto o del lavoro o della prestazione del servizio, dal-
l'acquisizione della materia prima o dalla generazione delle risorse
fino allo smaltimento, allo smantellamento e alla fine del servizio
o all'utilizzazione". art.3, c.1, lett hhhh), D.Lgs. n. 50/2016 s.m.i.:
Codice dei Contratti Pubblici (di seguito Codice).

La Programmazione, finalizzata a rendere univoche le richie-
ste del committente, sulla base delle esigenze da soddisfare
in rapporto alla specifica tipologia di utenza, produce un'idea
di massima dell'opera; indica eventuali alternative progettuali
da analizzare, specifica le modalità di realizzazione e fornisce
notizie attendibili sulle risorse temporali e finanziarie, defi-
nendo un pacchetto informativo propedeutico a tutti gli svi-
luppi successivi del procedimento.

La Progettazione, mediante l'acquisizione e l'elaborazione
dei dati derivanti dal momento programmatico, definisce
l'intervento in misura circostanziata in modo tale che il rap-
porto tra committente ed esecutore risulti completamente
definito, valorizzando le soluzioni sotto il profilo tecnico-
costruttivo, funzionale, estetico ed economico, al fine di
garantire la massima qualità, attraverso una risposta pro-
gettuale coerente con il quadro esigenziale delineato in
fase precedente.

La Costruzione rappresenta la sintesi fra volontà progettuale
e realtà produttiva. In questa sede vengono implementate
le procedure di affidamento dei lavori, gestita l'attuazione
dell'intervento e verificato che quanto realizzato sia conforme
alle istruzioni del progetto.

Infine, la Gestione è dedicata a supportare l'esercizio del-
l'opera, provvedendo a conservarne nel tempo la funzio-
nalità degli elementi costitutivi.

Ciascuna fase interpreta sequenze identificabili di eventi,
costituite da attività coerenti, orientate a produrre risultati
prefissati che presuppongono forme di trasferimento tec-
nico o passaggi di consegne, e in quanto tali, nei momenti
di transizione che precedono il passaggio tra i differenti
segmenti, devono essere verificati mediante continuo con-
fronto² con le indicazioni del programma e approvati allo
scopo di assicurarne completezza e idoneità.

Tale impostazione, sancendo una inevitabile interdipen-
denza tra i vari segmenti del processo, di cui i precedenti
costituiscono presupposto e input per quelli successivi,
conferisce alla programmazione la connotazione di con-
dizione indispensabile per avviare qualunque tipo di pro-
cedimento attuativo finanziabile con risorse pubbliche.

Preliminarmente al momento programmatico vero e pro-
prio, prima dell'avvio dei processi realizzativi le Ammini-
strazioni elaborano e pubblicano sui propri siti istituzionali
il *Quadro Esigenziale* -QE-³ al fine di assicurare la rispon-
denza degli interventi alle esigenze della collettività, alle
necessità della committenza e alle aspettative degli utenti

² Che giunge a compimento mediante l'azione di collaudo a garan-
zia dell'affidabilità dell'esito finale in termini di conformità rispetto
a quanto pianificato in ambito programmatico, definito in fase
progettuale e materialmente realizzato in sede esecutiva.

³ "Il documento che viene redatto ed approvato dall'amministra-
zione in fase antecedente alla programmazione dell'intervento e
che individua, sulla base dei dati disponibili, in relazione alla tipolo-
gia dell'opera o dell'intervento da realizzare gli obiettivi generali
da perseguire attraverso la realizzazione dell'intervento, i fabbi-
sogni della collettività posti a base dell'intervento, le specifiche

finali. Nella medesima sede vengono individuati gli obiettivi generali da perseguire.

Il QE rappresenta la sintesi dell'analisi dei fabbisogni e uniformandosi al principio fondamentale secondo il quale non esiste un unico modo per risolvere un problema ma un variegato repertorio di possibili soluzioni definisce, qualora ne sussistano le condizioni, gli interventi concorrenti che saranno analizzati successivamente.

A tutela dell'efficacia delle strategie di sviluppo e dell'affidabilità dei progetti, le stesse Amministrazioni redigono, in seguito, il *Documento di Indirizzo alla Progettazione - DIP*⁴, finalizzato a trasferire agli operatori del processo le loro richieste. Si tratta di un documento, costituito da elaborati di tipo grafico, descrittivo, analitico e procedurale, che, specificando e sistematizzando i contenuti del QE, sintetizza tutte le attività, le programma nei dettagli rispetto a durata, sequenza, responsabilità, risorse e risultati e le rappresenta in termini di istruzioni per il programma attuativo.

L'esame e la valutazione, sotto il profilo tecnico, qualitativo, ambientale ed economico delle modalità alternative prefigurate nel QE, avviene in sede di redazione del *Documento di Fattibilità delle Alternative Progettuali -DOCFAP*⁵, elaborazione precedente l'avvio della Progettazione, sviluppata con un livello di approfondimento differenziato in relazione alla tipologia e alla dimensione dello specifico intervento.

Il DOCFAP, anche mediante valutazione preventiva della sostenibilità territoriale ed ambientale delle alternative esaminate, individua la soluzione caratterizzata dal miglior rapporto costi/benefici per la collettività e per l'ambiente che l'amministrazione aggiudicatrice con propria determina approva, giustificando l'investimento (Loiero e Maiolo, 2017) e decretandone l'inserimento nel programma triennale degli interventi che la stessa intende condurre a compimento⁶.

I prodotti programmatori si configurano quali documenti

esigenze qualitative e quantitative che devono essere soddisfatte attraverso la realizzazione dell'intervento, anche in relazione alla specifica tipologia di utenza alla quale gli interventi stessi sono destinati", art. 3, c. 1, lett. ggggg-nonies), Codice, i cui contenuti sono maggiormente specificati all'art. 14 comma 2 dello Schema di Regolamento di esecuzione, attuazione e integrazione (di seguito Regolamento) di cui all'articolo 216, comma 27-octies del Codice.

⁴ Art.14, cc. 3, 4, 5 Regolamento.

⁵ "Il documento in cui sono individuate ed analizzate le possibili soluzioni progettuali alternative ed in cui si dà conto della valutazione di ciascuna alternativa, sotto il profilo qualitativo, anche in termini ambientali, nonché sotto il profilo tecnico ed economico", art 3, c. 1, lett. ggggg-quater), Codice.

⁶ L'amministrazione valuta il DOCFAP e può richiedere chiarimenti e integrazioni in merito alla soluzione progettuale proposta e alle alternative esaminate. L'istruttoria si conclude con l'approvazione e la disposizione da parte della stazione appaltante di elaborazione della seconda fase del progetto di fattibilità tecnica ed economica (art.18, c.8, Regolamento).

propedeutici alla successiva fase progettuale che si articola in: *Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica; Progetto Definitivo; Progetto Esecutivo*.

Interpretando l'esigenza di anticipare l'attività investigativa, il Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica⁷, che sostituisce il precedente Progetto Preliminare e, se sviluppato in due momenti successivi, incorpora nella sua prima fase di elaborazione il processo di verifica di fattibilità delle alternative⁸, viene prodotto sulla base dell'avvenuto svolgimento di indagini, studi e verifiche preventive⁹ che costituiscono suo presupposto essenziale di input. Sulla base delle indicazioni contenute nel QE e nel rispetto di quanto determinato nel DOCFAP approvato, il progetto di fattibilità determina le caratteristiche prestazionali, dimensionali, tipologiche ed economiche; le specifiche funzionali e le esigenze di compensazione e mitigazione di impatto ambientale della soluzione, fornendo precise informazioni, tendenzialmente, non modificabili nelle fasi successive.

Il Progetto Definitivo¹⁰ corrisponde al perfezionamento tecnico-economico dell'opera finalizzato a valorizzare ulteriormente il rapporto costi/benefici atteso nel ciclo di vita. In tale sede vengono identificati compiutamente i lavori da realizzare coerentemente con le indicazioni espresse nel livello progettuale precedente e nel rispetto dei documenti propedeutici alla progettazione e precisati tutti quegli aspetti connessi con l'acquisizione di pareri, assensi, autorizzazioni e nulla osta ai fini dell'ottenimento del Permesso di Costruire.

Sviluppato in conformità al Definitivo, il Progetto Esecutivo¹¹, corredato da un piano di manutenzione dell'opera e delle sue parti in fase di esercizio, definisce in maniera puntuale ed esaustiva ogni elemento in termini formali, tipologici, qualitativi, dimensionali ed economici. Condizione indispensabile ad assicurare l'effettiva realizzabilità dell'opera.

La progettazione, sede di recepimento e sintesi di scelte di ordine ambientale, funzionale, tecnologico ed economico che concorrono al soddisfacimento delle necessità delineate nel QE, sulla base delle indicazioni del DIP e degli esiti delle verifiche di fattibilità che scaturiscono dalla Programmazione, arriva a rappresentare l'oggetto in maniera inequivocabile, comunicando precise istruzioni a tutti gli operatori coinvolti nell'esecuzione.

⁷ Art.23, cc. 5, 6, Codice.

⁸ Il progetto di fattibilità tecnica ed economica, di regola, viene redatto in due fasi successive. La prima fase consiste nell'elaborazione del documento di fattibilità delle alternative progettuali (art. 17, cc. 1, 2, Regolamento).

⁹ Indagini geologiche, idrogeologiche, idrologiche, idrauliche, geotecniche, sismiche, storiche, paesaggistiche, urbanistiche; studi di fattibilità ambientale e paesaggistica; verifiche preventive dell'interesse archeologico e sulla possibilità di riuso del patrimonio immobiliare esistente e di rigenerazione delle aree dismesse (art. 23, c. 6, Codice).

¹⁰ Art. 23, c. 7, Codice.

¹¹ Art. 23, c. 8, Codice.

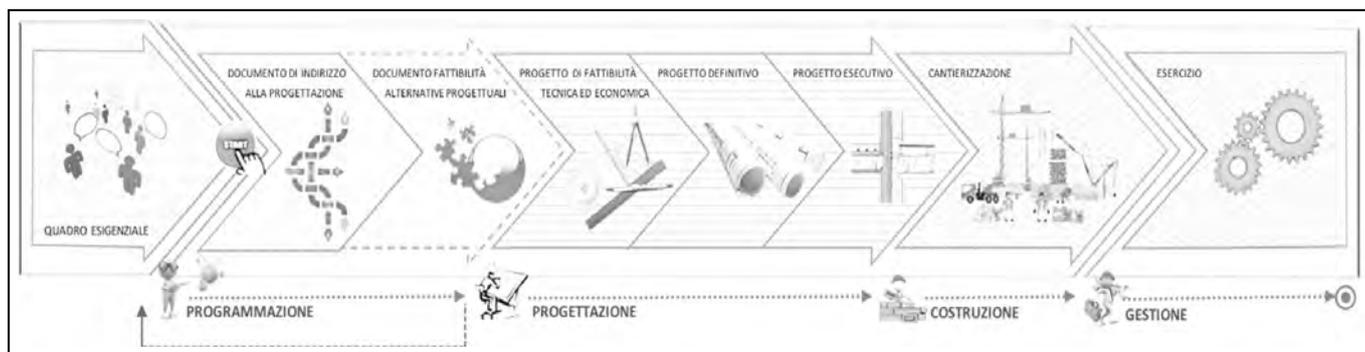


Figura 1 - Struttura del processo attuativo.

Per effetto dei meccanismi di consequenzialità stabiliti fra le varie fasi del processo e del rapporto di interdipendenza sussistente fra i suoi stessi livelli di approfondimento tecnico, la progettazione costituisce il tramite che, all'interno del processo attuativo, consente di passare dalla fase programmatica a quella costruttiva.

2.2 Analisi degli scenari alternativi nelle fasi iniziali del processo

La realizzazione dei lavori pubblici si svolge sulla base di una programmazione triennale che sintetizza e coordina gli interventi edilizi cantierabili volti a soddisfare le esigenze della collettività.

Un'opera viene considerata cantierabile quando è assicurata la sua totale copertura in termini di risorse necessarie a realizzarla. A garanzia di questo principio, la norma prevede che ciascun intervento, per poter essere ufficialmente abilitato al processo attuativo, debba essere corredato da un DOCFAP. Quest'ultimo, redatto nel rispetto dei contenuti del QE e del DIP, sulla base di valutazioni di natura tecnico territoriale, economico finanziaria e amministrativa gestionale, riflette e legittima gli investimenti della Pubblica Amministrazione.

Il DOCFAP – o prima fase di elaborazione del Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica – mediante formalizzazioni con livello di caratterizzazione e approfondimento differenziato, circostanziate in funzione della specificità dei contesti, esplora sotto il profilo dei costi/benefici conseguibile i più opportuni scenari alternativi prefigurabili mediante i quali le iniziative possono essere attuate (Pennisi e Scandizzo, 2003), valorizzandone potenzialità e vantaggi e ponendoli altresì a confronto con la situazione senza intervento. Con riferimento a dislocazione territoriale, compatibilità ambientale e paesaggistica, rapporto con le infrastrutture, dimensionamento, soluzioni tipologiche, tecnologiche e impiantistiche, modalità attuative, rispetto delle norme, consistenza economica e temporale, individua la migliore opzione concorrente che può anche coincidere con la scelta del 'non procedere', inibendo l'avvio del percorso realizzativo.

Le verifiche di fattibilità, elementi cardine del processo di

dispiegamento delle iniziative che animano il Programma Triennale e giustificano le politiche delle amministrazioni, intese come iter di definizione e valutazione di opportunità, rappresentano lo strumento essenziale a supporto degli operatori decisionali per la gestione razionale, efficiente ed economicamente sostenibile degli investimenti pubblici (Acampa, 2019).

Il Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica, condizione indispensabile ai fini del finanziamento delle opere¹², raccoglie e codifica le informazioni del DOCFAP e, mediante l'implementazione di studi, indagini e rilievi che evolvono il quadro conoscitivo, ne valida gli esiti in un'ottica valutativa e di prefigurazione degli effettivi profili di fattibilità ancora più realistica, conferendo maggiore attendibilità alla stima economica e accreditando l'opportunità della soluzione da consolidare nei successivi livelli del progetto (definitivo ed esecutivo).

Come è noto¹³, gli strumenti di ausilio alle decisioni *ex ante* risultano particolarmente importanti per la progettazione, intesa come veicolo in grado di produrre sviluppo socio-economico, competitività e valorizzazione delle risorse (Bassi et al., 2019). Similmente le strategie di intervento che nelle fasi iniziali contemplano valutazioni inclusive di parametri e fattori multidimensionali, se correttamente gestite nelle interazioni, costituiscono garanzia formale di perseguimento della qualità (Manganelli, 2017; Bentivegna, 2019). Infatti, poiché qualunque tipo di modificazione implica connotazioni a più dimensioni, è certamente innegabile che una maggiore attenzione verso i necessari apporti multidisciplinari, mitigando i rischi ascrivibili a quegli effetti e relazioni che connotano gli esiti complessivi, consegua riverberazioni positive.

¹² "Per i lavori di importo pari o superiore a 1.000.000 euro, ai fini dell'inserimento nell'elenco annuale, le amministrazioni aggiudicatrici approvano preventivamente il progetto di fattibilità tecnica ed economica". (art 21, c. 3, Codice).

¹³ MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI, Studio comparato sui metodi internazionali di valutazione preventiva delle opere pubbliche dal punto di vista della fattibilità tecnico-economica, Nucleo di Valutazione e Verifica degli Investimenti Pubblici, Roma, 2011.

L'esplorazione delle alternative progettuali, atteggiamento prevalentemente mirato al soddisfacimento di esigenze, implicando un ingente impegno di risorse nelle fasi iniziali del processo a vantaggio delle elaborazioni successive, presuppone un approccio integrato al processo di progettazione. Tuttavia, spesso, nelle pratiche consuetudinarie, permane nei fatti un'accezione riduzionista di qualità, scervra da quelle connotazioni multidimensionali oggi sempre più decisive a fronte degli attuali scenari del progetto. Diversamente, i meccanismi di virtualizzazione e collaborazione digitale, sottesi dall'impiego degli strumenti elettronici evoluti di modellazione, contemplano i necessari apporti multidisciplinari come parametri significativi delle procedure di valutazione consentendo di prefigurare in maniera sensibilmente più attenta, attendibile e consapevole le prestazioni globali delle soluzioni competitive relative alle esigenze della committenza nel ciclo di vita. Gli strumenti sopracitati, se coerentemente assunti e resi operativi, attualizzano i modelli tradizionali garantendo la concreta realizzabilità delle opere, la loro plausibilità rispetto alle aspettative, oltre a ridurre i rischi connessi con le necessità di introdurre varianti. Procedendo per progressivi affinamenti di assetti orientati a perseguimenti ottimali di finalità, si configurano processi virtuosi e concretamente tangibili che, mediante assunzioni multidimensionali e interdisciplinari, assicurano raggiungimenti di *steps* via via qualitativamente perfezionabili.

Tali approcci evoluti che sviluppano e simulano soluzioni coinvolgendo tutte le fasi del processo edilizio, si rapportano all'intero ciclo di vita degli edifici e dei loro componenti e si confrontano con i sistemi produttivi e le tecniche di realizzazione e gestione dei manufatti edilizi, postulano *formalmente* il raggiungimento del massimo rendimento nell'utilizzo delle risorse.

3. OPTIONEERING E GENERATIVE DESIGN PER IL VALORE DEL PROGETTO E DELLE SUE ORGANIZZAZIONI NELLE FASI PRELIMINARI DEL PROCESSO

3.1 Generare e valutare alternative in maniera trasparente

Il progetto di trasformazione dell'ambiente è atto decisionale (Cross, 2006) che, per la sua natura innovativa (Brown e Chandrasekaran, 1985; Gero, 1990), contempla la formulazione e il confronto d'ipotesi multiscalari e pluridimensionali cioè di differente grandezza e natura a prescindere dalle discipline coinvolte. Più o meno consapevolmente è ciò che ogni progettista svolge nel suo processo ideativo poeticamente raccontato come atto creativo laddove s'affida all'esperienza e a conoscenze tacite (Laseau, 1989) di cui lo schizzo, che progredisce per approssimazioni successive verso la soluzione cercata, è emblema e strumento privilegiato (Maldonado, 1992: 102). Infatti, anche in una visione autoriale, la scelta discende da un processo generativo e da comparazione di alternative concorrenti che,

in questo caso, resta però opaco e non pienamente comprensibile nella sua genesi. A fronte dell'infinità di alternative potenzialmente considerabili e dell'aleatorietà degli effetti, il carattere "intuitivo" di tale approccio può presentare un'indiscutibile validità per la sua intrinseca efficienza in termini di tempi d'esecuzione. Le cose si complicano quando la scelta deve però essere condotta insieme con altri soggetti portatori di punti di vista differenziati e talvolta antagonisti, o peggio, in rappresentanza di qualcun altro che è lo scenario in cui si realizzano le decisioni pubbliche. In questo tipo di decisioni un requisito importante è la trasparenza, dove chiarezza di forma, formalizzazione dell'oggetto e procedure di scelta basate sul confronto di esplicite alternative sono essenziali.

Come discusso in precedenza e coerentemente, la disciplina delle opere pubbliche italiane dispone l'obbligo della redazione di una specifica elaborazione che è appunto il DOC-FAP. Tali alternative possono riguardare non solo aspetti alla grande scala, ma anche e soprattutto alla scala edilizia interessando la sua morfologia, il suo comportamento energetico, le opzioni strutturali, costruttive e tecnologiche, gli assetti funzionali, le ricadute manutentive e gestionali: aspetti che nella prassi corrente sono scarsamente – se non totalmente – obliterati in fase di programmazione.

3.2 Optioneering e progettazione concorrente nell'Early Design Stage

La razionalizzazione dei processi decisionali pubblici attraverso l'adozione di metodologie formalizzate prese il via nel settore dell'ingegneria infrastrutturale (Dupuit, 1844; Congresso degli Stati Uniti d'America, 1936) trovando poi le prime sistematizzazioni nell'ambito del pensiero economico marginalista¹⁴ sino a svilupparsi nel secondo dopoguerra con impiego di apposite tecniche di "misurazione" tra cui la più nota è la cosiddetta costi-benefici¹⁵.

¹⁴ Corrente del pensiero economico che interpreta il valore dei prodotti in rapporto alla loro desiderabilità/convenienza da parte del consumatore di cui l'utilità marginale, che decresce con il progredire della disponibilità e il consumo, ne rappresenta il concetto fondamentale. In tale prospettiva la decisione si definisce come atto razionale che, in un mercato a concorrenza perfetta, alloca efficientemente le risorse in relazione all'utilità marginale (produttività marginale) perseguendo un equilibrio piuttosto che la pura crescita economica o l'equità: in altre parole, secondo la classica definizione Paretoiana, migliorando le condizioni degli uni senza recare pregiudizio agli altri.

¹⁵ Sono metodologie e tecniche finalizzate ad analizzare il "rendimento" degli investimenti pubblici attraverso valutazioni d'efficacia che, dagli anni '70, si diffusero come strumenti di validazione di progetti per organizzazioni internazionali quali l'OCSE, l'UNIDO e la World Bank. In Italia le prime significative esperienze di analisi del valore nel settore delle OO.PP. cominciano ad apparire nel 1982 con la *Legge Finanziaria* di quell'anno che istituiva l'obbligo di studi di fattibilità e l'uso dell'analisi costi-benefici all'interno della *Segreteria Generale della Programmazione* come strumenti per la valutazione dei progetti d'investimento pubblico. Un

Successivamente, negli anni '90 queste metodologie progredirono nella valutazione multicriteriale¹⁶ per estendersi, come ambito di ricerca operativa, anche nelle discipline del Project Management e più specificatamente del Value Management e Value Engineering con il termine di *Optioneering*: processo strutturato di *problem-solving* basato sulla comparazione, su base prestazionale, di soluzioni in alternativa elaborate per concorso multidisciplinare. L'adozione di queste metodologie nel settore delle costruzioni comportò un radicale impatto sull'organizzazione di progetto segnando il distacco dai modi di procedere gerarchico-sequenziali e a competenze separate. Ingegneria concorrente, simultanea, o parallela sono alcuni dei termini che identificano questi nuovi approcci sviluppatisi prevalentemente all'interno di modelli d'intervento manageriali ove l'elemento comune è, appunto, contrassegnato dall'azione federata dei diversi attori del processo e da cui deriva l'anticipazione dei differenti contributi già nelle fasi iniziali ove, come mostrato dalla famosa *Mac Leamy's Curve* (The Construction Users Roundtable, 2004: 4), da diagrammi antecedenti (Paulson, 1976) e da altri studi (A.I.A., 2012), è maggiore il *leverage* delle decisioni sul valore del progetto.

Va comunque sottolineato che questa modalità organizzativa non è inedita nella storia delle costruzioni. L'esempio forse più noto e indagato è quello della costruzione dell'Empire State Building in un periodo in cui, alle soglie della Grande depressione, a Manhattan andava in scena *the race for the sky*, ovvero la forsennata corsa alla realizzazione del grattacielo più alto del mondo. Sfide che consentirono, in meno di due anni di progettare e costruire edifici Art Déco di settanta sino a cento piani che avrebbero cambiato e connotato lo skyline di New York e che richiesero l'impiego di modalità gestionali imprestate dall'industria automobilistica oggi note con i termini di *Fast-track*, *Integrated Delivery Project*, *Lean Production*, *Project Management*. Le cronache riferiscono che lo *Scheme K* del progetto preliminare dell'Empire State Building fu licenziato nella notte del 3 ottobre del 1929 dopo aver esaminato, in meno di un mese dall'incarico, ben sedici alternative mettendo intorno al tavolo architetti, ingegneri strutturali, meccanici, elettrici, fornitori e sub-contractor, oltre a finanziatori e agenti immobiliari incaricati della commercializzazione che «were in constant consultation with both of the others» (Reis, 2009: 57).

uso più sistematico dello studio di fattibilità avverrà nel 1988 con l'obbligo d'impiego nella valutazione degli interventi previsti nel *Fondo Investimenti Occupazione* e quasi contemporaneamente entrerà nel settore delle costruzioni con il *Piano straordinario d'investimenti per l'edilizia sanitaria* che, nei suoi regolamenti di attuazione, lo dichiarerà "momento indispensabile e separato dal momento progettuale" per accedere all'erogazione dei finanziamenti.

¹⁶ I modelli multicriteriali sono una famiglia di tecniche e strumenti di valutazione con maggior grado di complessità ove il primo elemento di criticità è rappresentato dalla selezione, in un numero necessariamente limitato, dei punti di vista e, a discendere da questi, i criteri attraverso cui valutare i differenti attributi di ogni alternativa in concorso.

3.3 Modellazione parametrica delle informazioni e simulazione prestazionale: il Performative BIM

Rispetto a questo precedente, va però rilevato che le odierne tecniche di *Optioneering* marcano significative differenze. Tali differenze sono dovute alla teoria dell'informazione che, al volgere degli anni '50 (Shannon, 1948), si sviluppò con forti influenze in ogni ambito di ricerca teorica e operativa ponendo le basi per un trattamento oggettivo, misurabile e operabile dei contenuti informativi: in sintesi, per una formalizzazione dei fenomeni nel linguaggio delle matematiche di cui la cibernetica ne rappresentò la nuova disciplina. Quasi contemporaneamente le ricadute nel settore delle costruzioni e specificatamente nella prassi progettuale condussero a visioni secondo cui il progetto poteva governarsi attraverso metodi razionali che scoprivano nella cibernetica – appunto – e nei sistemi di autoregolazione i loro riferimenti operativi¹⁷; nella misurabilità oggettiva degli attributi i criteri per la scelta che inaugurarono il cosiddetto *Performance Based Design*¹⁸.

Negli anni più recenti il rapido sviluppo delle tecnologie informatiche e delle telecomunicazioni e le accresciute capacità computazionali hanno indotto ulteriori e significative modificazioni nel mondo delle costruzioni sino a produrre una sostanziale sovrapposizione/identificazione tra *Project Management* e *Information Management*; tra modellazione del problema e modellazione delle informazioni. Un cambiamento che s'identifica oggi con il *Building*

¹⁷ Anticipazioni storiche di questo mutamento "cibernetico" del progetto furono i programmi pubblici scolastici promossi negli Stati Uniti tra la fine degli anni '50 e inizi degli anni '60 su idee seminali di Ezra Ehrenkrantz, Chris Arnold e Jonathan King e avviati da un primo test condotto a Cupertino nel 1960 come applicazione pilota di una ricerca sviluppata a New York su finanziamento della Ford. In seguito questa sperimentazione fu estesa per la realizzazione di tredici plessi scolastici californiani e per altri interventi di diversa destinazione e localizzazione. «È da queste esperienze che la progettazione evolve verso una formalizzazione logico-matematica, cibernetica, la cui natura profonda è quella del flusso informativo messo al centro di rivoluzionarie ricerche per opera dei vari Christopher Alexander, S.A. Gregory, Abraham A. Moles, Christopher Jones, Morris Asimov e in Italia da Giuseppe Ciribini, su tutti, e da Alberto Rosselli divulgatore delle nuove teorie che venivano dall'altra parte dell'oceano» (Ridolfi, 2016: 39).

¹⁸ Dopo l'introduzione negli anni Trenta di alcune norme di tipo prestazionale ad opera del *National Bureau of Standards* statunitense e delle sperimentazioni alla nota precedente, l'impiego sistematico del *Performance Based Design* nel settore delle costruzioni si diffonde negli anni Ottanta sulla scorta dell'approccio esigenza-prestazionale e di conseguenti orientamenti normativi volti a liberare il mercato, l'innovazione e la qualità (AA.VV., 1990). Tale impostazione normativa, di cui la Svezia fornì la prima sistematizzazione (NKB, 1978), ebbe effetti sulla progettazione imponendo la definizione dell'oggetto edilizio in relazione a specifici obiettivi, esigenze e condizioni d'uso oggettivamente specificabili in termini di requisiti e da valutare nella sua effettiva corrispondenza attraverso metodi e strumenti di prova/misura validati.

Information Modeling (BIM): modello informativo – appunto – indicizzato dalla geometria dell'edificio e abilitante operabilità concorrenti (Eastmann et al., 2008: 26-43; Acampa et al., 2019).

Allo stato attuale e prendendo in prestito la divisione bipartita del linguaggio stabilita da J.L. Austin (1962), è possibile riconoscere due differenti filoni applicativi: il primo definibile come *Informative (constative) BIM*¹⁹, dove il modello informativo è prevalentemente relazionato all'automazione della produzione progettuale e alla gestione del contratto; il secondo identificabile come *Performative BIM* dove il modello informativo è orientato a sollecitare azioni. Tali azioni possono essere ascritte alle attività esplorative e di simulazione tipiche delle fasi ideative con effetti sulla efficacia delle scelte e sulla qualità dell'opera poiché, come tra i primi ha fatto notare l'inventore di Ecotect Andrew Marsh (2008), attuabili con maggior disponibilità delle informazioni ovvero con un maggior *context awareness*.

La declinazione a fini esplorativi del BIM, come esemplificata dalle scelte commerciali di Autodesk sulla piattaforma Revit²⁰, discende da potenzialità prima sconosciute ai precedenti strumenti di disegno assistito. Esse riguardano la propagazione dinamica e interattiva degli aggiornamenti dei vari attributi a tutte le componenti del progetto (*instancing*) e la generazione di varianti da modelli sorgenti (*versioning*) consentendo lo studio di alternative in modo esteso ed economico e la loro valutazione su base performativa in rapporto a determinate condizioni al contorno, specifici comportamenti e benchmark misurabili degli impatti²¹.

Sin dagli anni '70 tali funzionalità hanno rappresentato due

distinti e specialistici settori: il *Solid Modeling* e il *Performance-Based Building Simulation* che, grazie ai progressi delle tecnologie informatiche, hanno poi visto una rapida convergenza per diventare potenti strumenti a disposizione della gran parte dei progettisti (Fig. 2). Infatti, software, *plug-in* e *add-on* sono oggi strumenti di larga diffusione capaci di modellare i fenomeni attraverso complessi sistemi di equazioni algebriche differenziali (Augenbroe, 2003).

A questo processo di convergenza si è accompagnato un altro significativo cambiamento che ha interessato la semplificazione *user friendly* delle interfacce comportando, da una parte, la restituzione delle elaborazioni in forma prevalentemente grafica in *high-fidelity*, quindi in grado di facilitare la comunicabilità delle scelte anche ai non addetti (Malkawi, 2005); dall'altra, l'introduzione di ambienti di programmazione visuale che ha allargato, a un considerevole numero di utenti, la personalizzazione degli strumenti di simulazione prima riservata agli iniziati dello *scripting* (Fig. 3). Ne è conseguito che sin dalle fasi iniziali è oggi maggiormente possibile condurre simulazioni in grado di estendersi all'intero ciclo di vita utile, di intersecare ambiti disciplinari differenti e coinvolgere nelle scelte soggetti tradizionalmente non-esperti della specifica disciplina.

Tra i principali vantaggi di tali metodologie, costituitesi come ambito specifico dell'ingegneria con il nome di *Multi-disciplinary Design Optimization*, si segnala la capacità di condurre l'*Optioneering* attraverso ottimizzazioni numerico-computazionali su base parametrico-prestazionale (Shea e Gourtovaia, 2005; Holzer, 2007) e di aumentarne il valore creativo grazie all'accelerazione del processo che consente l'esplorazione di un considerevole numero di alternative oltre i limiti della norma e dell'esperienza che, come detto in precedenza, è essenziale nelle fasi iniziali del progetto.

3.4 Generative Design e ottimizzazione del progetto di programma

Nella progettazione architettonica le metodologie sopra descritte hanno inaugurato un nuovo paradigma identificato dai neologismi *Parametricism 2.0* (Schumacher, 2016) già e meglio definite con *Post-Parametric Automation* (Andia e Spiegelhalter, 2015) che, «a fronte di problemi complessi e non riconducibili a solver lineari, riscoprono il vecchio metodo di procedere "per prova ed errore", ma con la possibilità di generare automaticamente un numero sconfinato di tentativi da cui far emergere soluzioni, talvolta inaspettate» (Ridolfi, 2019: 48).

Più comunemente, l'impiego della modellazione parametrica per la generazione automatica delle soluzioni si definisce in una famiglia di prodotti applicativi ricompresi nel termine di *Generative Design* ove la ricerca delle soluzioni ottimizzate impiega algoritmi di risoluzione che "mimano", nelle declinazioni dell'*Evolutionary Design*, le logiche naturali di selezione del darwinismo classico (Bansal et al., 2019) e, nella *Swarm Intelligences*, quelle collaborative delle teo-

¹⁹ Il termine *performative* viene qui impiegato per distinguere, più generalmente, dispositivi informativi finalizzati a produrre un'azione a differenza dell'uso corrente che nella progettazione riferisce all'approccio prestazionale. Questa seconda interpretazione del *Performative Architecture* è rintracciabile, per la prima volta, nel titolo scelto per il simposio tenuto nell'ottobre del 2003 all'*University of Pennsylvania* (Kolarevic e Malkawi, 2005). Alla medesima interpretazione si ricollega *Performative Design Studio*, speciale unità di lavoro dello studio Skidmore, Owings and Merrill LLP dedicata alla simulazione computazionale applicata a diversi ambiti disciplinari.

²⁰ Dal suo acquisto dalla Revit Technologies Inc. del 2002 e anche attraverso una aggressiva politica di acquisizioni e integrazioni, Autodesk ha notevolmente ampliato le funzionalità di Revit. Tra queste, molte delle nuove funzionalità, hanno riguardato quelle della simulazione prestazionale e la semplificazione dell'interfaccia.

²¹ Il *Building Performance Simulation* (BPS) nasce negli anni '70 come ambito specialistico del *Parametric Modeling* (PM) e del *Performance-Based Design* (PBD) consentendo di basare la progettazione non più su «what the building will look like» (Garber, 2014: 184), ma su misurazioni prestazionali (Kolarevic, 2002) o, come meglio ha fatto notare A. Saggio, di passare da approcci del tipo *if then* a quelli del *what if* (Saggio 2007: 36) sino ad includere valutazioni in condizioni funzionali e/o ambientali estreme (De Wit, 2003: 25).

rie coevolutioniste (Kennedy et al., 2001). Tali strumenti materializzano forme d'intelligenza inizialmente utilizzate per l'ottimizzazione topologica strutturale che si sono poi estese, in forma più compiuta, a differenti problemi progettuali grazie – come già detto – alla diffusione di ambienti di programmazione visiva inaugurata da Grasshopper,

plug in di Rhinoceros, cui sono seguiti Dynamo di Autodesk e Marionette di Nemetschek Group.

In particolare, nell'*Evolutionary Design*, forma più diffusa del *Generative Design*, la valutazione delle alternative si basa su una programmazione algoritmica di tipo genetico che sfrutta forme d'intelligenza per l'ottimizzazione prestazionale in

maniera automatizzata. Sulla base di specifiche caratteristiche (genotipi), il processo automatizzato provvede alla generazione stocastica di alternative (fenotipi) ricombinando le soluzioni delle generazioni precedenti (crossover), alla misurazione della performance e, a seguito di selezioni basate sul criterio di *fitness*, all'individuazione di soluzioni soddisfacenti il problema dato sino a informare, nell'ingegnerizzazione dei prodotti, la prototipazione rapida dell'oggetto da cui ripartire per eventuali e ulteriori fasi di ottimizzazione. Come recita uno degli slogan di Autodesk, il *Generative Design* è un nuovo modo di progettare in cui l'oggetto co-progetta se stesso²². Va sottolineato che da queste metodologie non scaturisce però una soluzione univoca, ma una famiglia di soluzioni che chiamano in causa il progettista e/o i decisori per la scelta e/o negoziazione tra quelle maggiormente desiderabili²³. Riferendosi a valutazioni multidisciplinari, gli algoritmi di ottimizzazione possono, infatti, implementare funzioni finalizzate alla ricerca del *Fron-*

²² È lo slogan lanciato da Autodesk nella promozione di Dreamcatcher, nuovo ambiente di lavoro che impiega il *Generative Design* per l'ottimizzazione topologica strutturale. Altro ambizioso progetto di Autodesk verso l'implementazione dell'intelligenza artificiale nel settore delle costruzioni è Refinery in cui *Generative Design* e l'ottimizzazione evolutiva sono estese ad altri aspetti della progettazione.

²³ È il cosiddetto metodo di *ottimizzazione a posteriori* in cui gli ottimi di Pareto sono successivamente sottoposti alla negoziazione dei decisori. A esso si oppongono altri metodi maggiormente "deterministici" che, sulla base di preferenze già espresse (*ottimizzazione a priori*), individuano soluzioni univoche attraverso apposite funzioni matematiche tra cui quella della *massima curvatura* rappresenta la più intuibile e utilizzata.

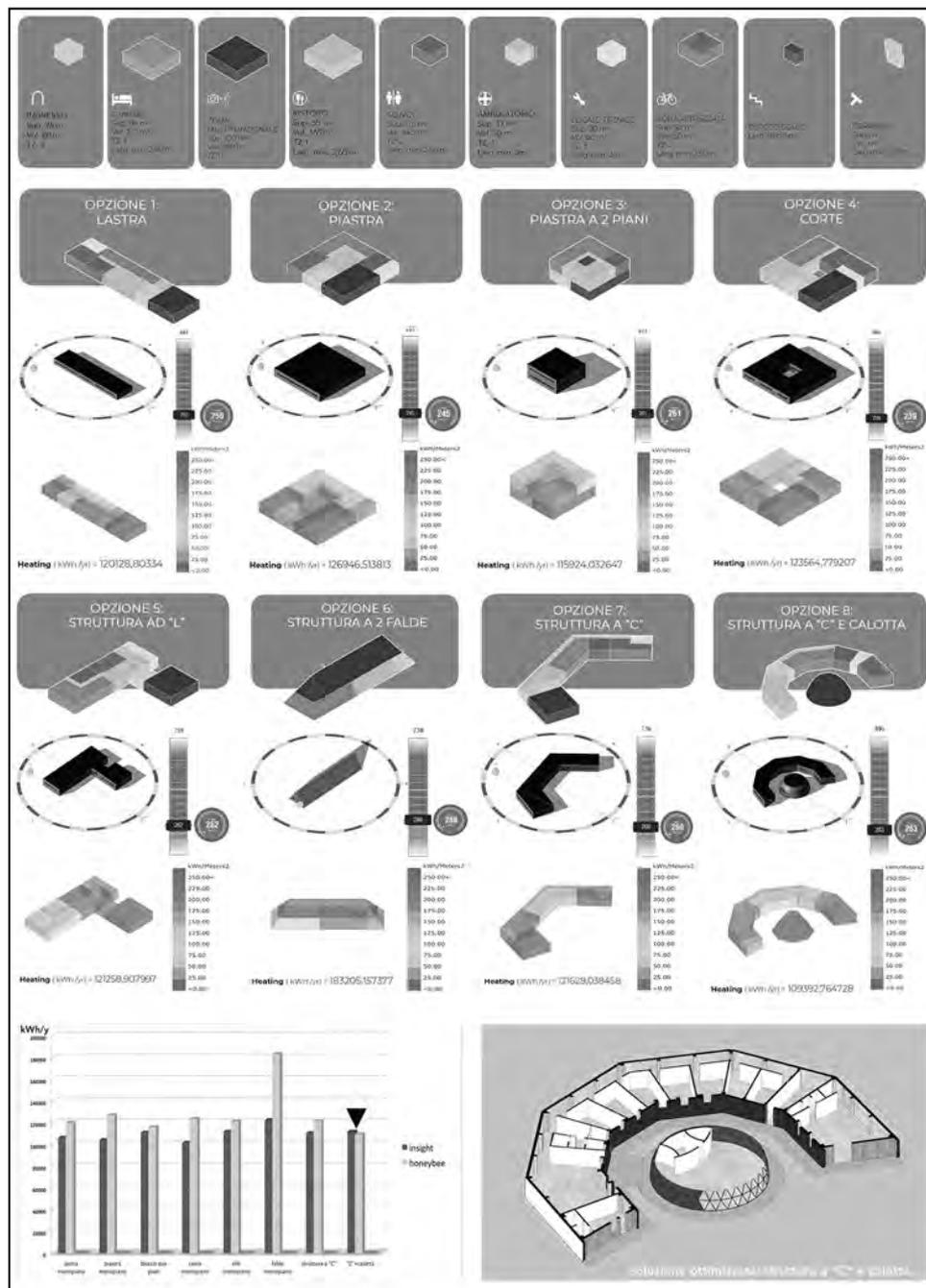


Figura 2 - Conceptual Mass Energy Optioneering (A. Carmignani, L. Pizzo, A. Purcareata, Ljòs Center, estratto dal Laboratorio di Progettazione Ambientale Prof. G. Ridolfi)

Definizione preliminare di progetto attraverso il confronto dei consumi energetici annui di soluzioni elaborate a livello di massa concettuale. Modellazione e simulazione computazionale svolta con Revit-Insight e Rhino-Grassopper-HoneyBee.

Figura 3 - Generazione e valutazione di alternative progettuali di uno stadio attraverso strumenti computazionali su base performativa.

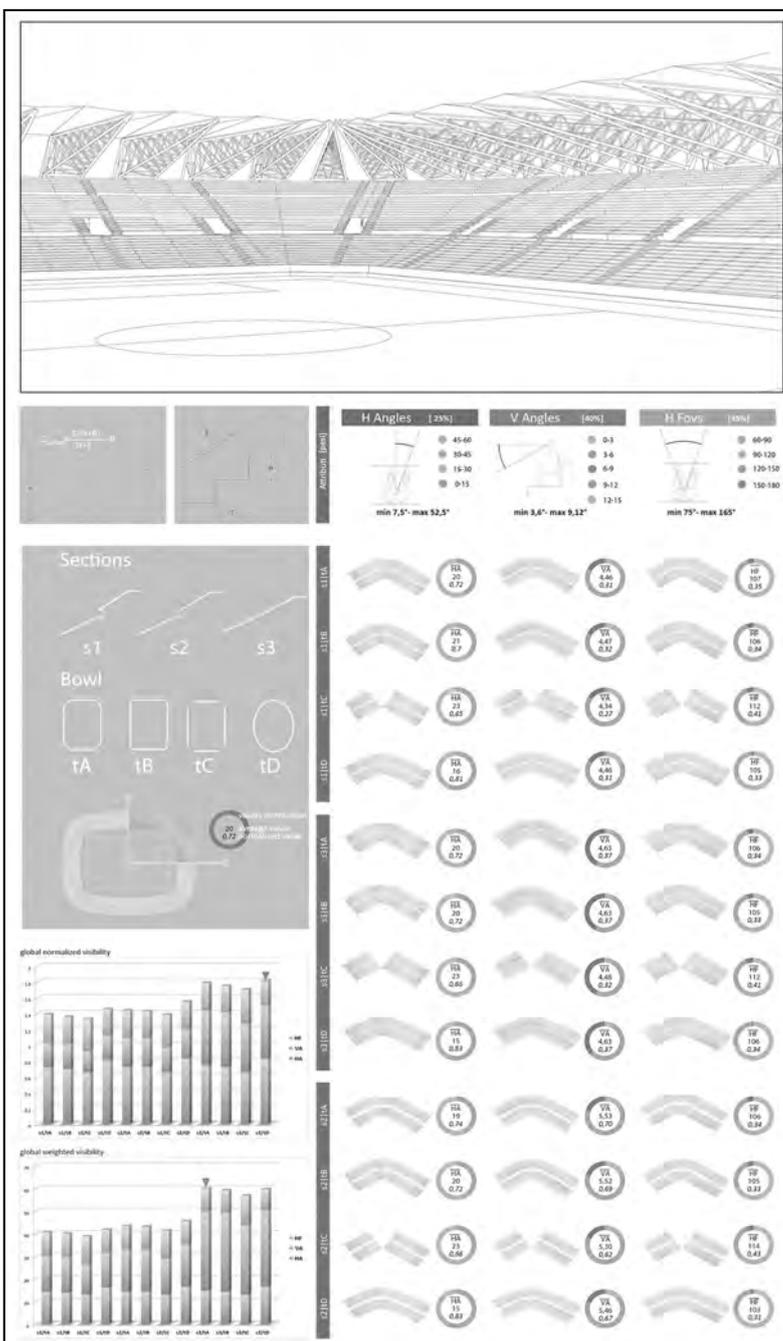
(Tesi di Laurea di M.Tedesco AA 2019-20, relatore prof. Giuseppe Ridolfi)

La definizione preliminare del progetto risulta dall'ottimizzazione del comfort visivo. In questo esempio di ottimizzazione parametrica il processo progettuale è stato condotto in ambiente di programmazione visuale Grasshopper con impiego della libreria Bowl Builder svolgendo i seguenti passaggi:

- 1) generazione dei profili degli spalti basate su tre tipologie di sezioni usuali (s1,s2,s3) nel rispetto dei valori minimi di C-Value come definiti in UEFA Guide to Quality Stadiums (2011) (punto 5 sezione C2-D Designing the stadium bowl); rispetto dei 30 cm quale distanza minima della seduta dallo schienale come da raccomandazione UEFA Stadium infrastructure regulations, 2010); osservanza dei limiti di capienza da programma;
- 2) definizione degli attributi e assegnazione dei relativi pesi d'importanza con riferimento a tre coefficienti di qualità visiva (H Angles, V Angles, H Focus) che riferiscono a condizioni ergonomiche dello spettatore relativamente alle torsioni orizzontali, verticali e ampiezza del campo visivo offerto;
- 3) generazione di dodici soluzioni risultanti dall'impiego delle sezioni ottimizzate su quattro tipologie di layout degli stadi (tA,tB,t3,tC);
- 4) calcolo in automatico degli scostamenti normalizzati dai valori ottimali e confronto delle sommatorie ponderate per identificazione delle soluzioni finali.

te di Pareto e quindi in grado di selezionare una famiglia di soluzioni ottimizzate, cosiddette *non-dominante*²⁴.

La scelta di perseguire una famiglia di soluzioni ottimizzate piuttosto che "la soluzione", oltre che coerente alla natura del problema (perseguire molteplici obiettivi anche conflittuali) e alla metodologie di scelta (salvaguardare la facoltà negoziale dei decisori), risponde a requisiti specifici degli odierni strumenti di calcolo in cui il tempo di elaborazione resta comunque un limite che si risolve soltanto nell'accettazione dell'"approssimazione". A tale scopo sono allo studio diversi tipi di algoritmi genetici basati sulla *scalarizzazione* e su altre tecniche che introducono criteri di selezione in inte-



grazione a quello della dominanza paretiana con l'obiettivo di accelerare i processi di convergenza verso la soluzione.

In questo contesto la *scalarizzazione* sottintende la riduzione dei molteplici obiettivi a un solo obiettivo, comunemente realizzata attraverso l'introduzione di preferenze "pesate" in modo da ottenere un solo valore da confrontare oppure convertendo in vincoli tutte le funzioni ad eccezione di una. Negli algoritmi evolutivi questa tecnica ha però il difetto di limitare l'ampiezza nella ricerca delle alternative poiché vincola le generazioni successive intorno a un punto specifico del Fronte di Pareto generalmente individuato già nei primi cicli di calcolo. Oltre al metodo del *ranking* basato sulla "dominanza degli

²⁴ Come definito da V. Pareto, l'ottimizzazione secondo il *criterio di dominanza* consiste nello scartare tutte quelle alternative che risultano meno performanti in tutti gli obiettivi rispetto alle soluzioni concorrenti; da qui il termine *dominate*. Le alternative che sopravvivono costituiscono il cosiddetto *Fronte di Pareto* rappresentabile, in un diagramma a n-dimensioni, come linea/spazio di connessione delle alternative ottime per le quali non esiste alcuna soluzione che sia migliore contemporaneamente per tutti gli obiettivi considerati; da qui il termine *non dominate*.

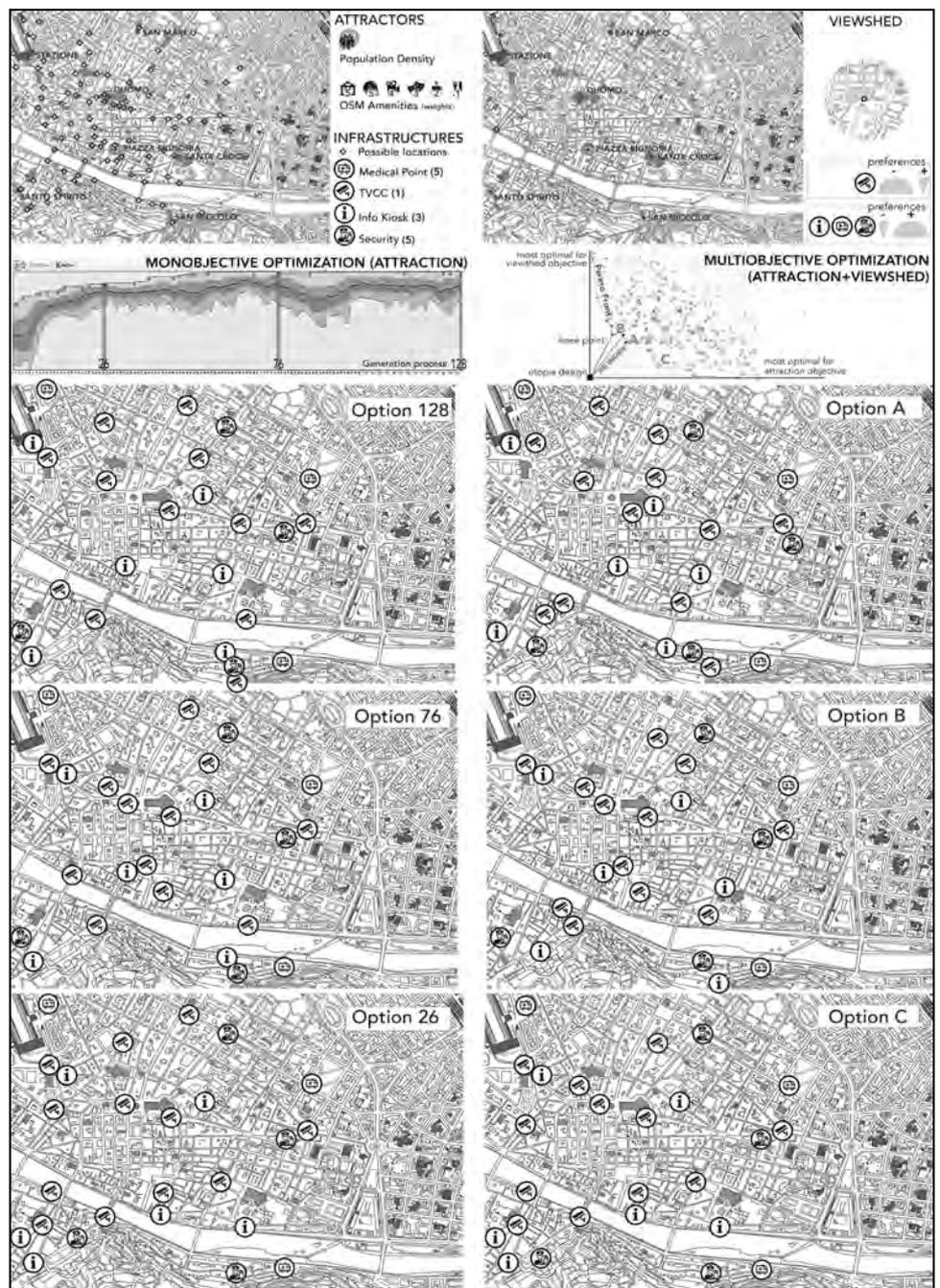
Figura 4 - Security & Friendly City con il ricorso ad algoritmi generativi di tipo evolutivo.

(estratto dalla Tesi di Dottorato di A. Saberi, *Ancillary Interface*, tutor prof. Giuseppe Ridolfi)

Ricerca preliminare per la definizione di una procedura finalizzata a individuare la collocazione più efficace di alcune infrastrutture allo scopo di incrementare il grado di comfort e sicurezza della città. Il test include stazioni di vigilanza, postazioni di TVCC, info point, punti di soccorso medico e si riferisce a una porzione turisticamente significativa del centro storico della città di Firenze definita intorno ai principali punti d'attrazione (S. Spirito, S. Croce, S. Marco, Duomo, Stazione, San Niccolò, Palazzo Vecchio).

SOLVER 1. Le prime prefigurazioni ottimizzate sono state condotte mediante un algoritmo generativo monobiettivo finalizzato a massimizzare il grado di prossimità globale delle infrastrutture da inserire in posizioni alternative precedentemente individuate. L'algoritmo svolge un processo di ottimizzazione genetica secondo i principi del Walkscore impiegando informazioni estratte da Open street map e altre risorse informative on line relative al diverso grado della popolazione e "attrattori" notturni e diurni cui sono stati assegnati diversi gradi d'importanza.

SOLVER 2 Ulteriori alternative ottimizzate sono state prodotte impiegando un algoritmo di ottimizzazione multiobiettivo ove la localizzazione delle singole infrastrutture si definisce in rapporto al grado di prossimità globale e ai valori di viewshed: minimi per le telecamere a circuito chiuso e massime per le restanti infrastrutture.



obiettivi", altre tecniche per la semplificazione delle funzioni obiettivo, e per salvaguardare l'efficacia e l'ampiezza delle esplorazioni, riguardano processi di crossover informativo e di selezione basati sul *crowding*, e/o *constrains* ove il primo consiste nella selezione di quelle soluzioni che registrano il minimo scarto dall'ottimo e il secondo dove vengono stabiliti livelli minimi di ammissibilità (standard) ovvero, come nelle metodologie di C. Alexander, parametri di esclusione *per conflitto* tra cui la fattibilità è uno dei più impiegati. Ulteriori tecniche allo studio, quando non è ammessa l'esplicitazione delle preferenze, sono quelle indirizzate all'individuazione del *knee point*: punto di flesso del fronte paretiano ove far convergere

il calcolo algoritmico per la delimitazione delle soluzioni ottimizzate²⁵.

Ciò nonostante, la natura euristica dei processi di risolu-

²⁵ Per una breve introduzione all'uso degli algoritmi generativi per risolvere problemi complessi mono o multi obiettivo e alle tecniche di "accelerazione" vedi Nagy D. (2017). Per una panoramica più approfondita delle varie tecniche allo studio vedi Mane S. U. e Rao M.R.N. (2017). Per una trattazione dell'applicazione del knee point vedi Zhang X., Tian Y., Jin Y., (2015) e tra i primi Branke J., Deb K., Dierolf H., Osswald M., (2004).

zione unita ai limiti fisici delle potenzialità di calcolo rende comunque impossibile approdare a una soluzione univoca. Al suo posto e come visto gli algoritmi evolutivi accettano il ragionevole compromesso tra tempi di elaborazione e minimizzazione della distanza dall'ottimo producendo una serie di soluzioni "approssimativamente" rispondenti al problema progettuale e in grado di supportare scelte razionali e condivisibili (Fig. 4).

3.5 L'avvento dell'Intelligenza Artificiale nelle costruzioni e organizzazioni di progetto comprensive

Uno dei principali meriti di questi strumenti è la ridefinizione della progettazione come pratica di "costruzione" di modelli dinamici, o più precisamente secondo la distinzione di Stephan Haertmann (1996), come *pratica di simulazione* con cui formulare ipotesi e condurre indagini multidisciplinari grazie alla loro interoperabilità o, in altre parole, alla possibilità di far dialogare differenti attori attraverso la "marcatura" digitale²⁶. Un ulteriore rafforzamento verso questa direzione è rappresentato dalla progressiva delocalizzazione del modello in ambienti di *cloud computing* capaci di offrire potenzialità di calcolo prima impensabili con la conseguenza di rendere imprescindibile la condivisione delle forme di comunicazione.

Questi mutamenti stanno ponendo le basi per una disponibilità d'informazioni di significativa rilevanza già nelle fasi di avvio della progettazione, quando queste rivestono un'importanza strategica per scegliere e modificare il progetto, piuttosto che a valle quando il quadro informativo è dettagliato e abbondante, ma eventuali scelte e varianti si rivelerebbero come disgrazie contrattuali.

Nelle forme semplificate del *Conceptual Massing*, il *Performative Bim* e il *Generative Design* sono oggi in grado di far convergere nella costruzione del modello e nelle simulazioni una quantità di informazioni di varia natura provenienti dai diversi settori specialistici, da data-base post-occupativi, *benchmarking* e *datalogger*

in tempo reale (vedi *Internet of Things*) che si manifestano tutti nella forma del dato digitale. Come dirette conseguenze questo ricco patrimonio informativo unito a strumenti di modellazione e a solver algoritmici di facile impiego stanno modificando radicalmente lo scenario di produzione del progetto lasciando intravedere l'avvento dell'Intelligenza Artificiale nel settore delle costruzioni²⁷. È ragionevole pensare che tali trasformazioni potranno in futuro maggiormente riverberarsi nelle fasi iniziali del progetto concernenti l'ottimizzazione della proposta e conseguentemente sugli stessi modelli organizzativi nella forma aggiornata delle *Organizzazioni di Progetto Comprensive* (Ridolfi, 2004): organizzazioni capaci di accogliere punti di vista molteplici e al tempo stesso condividere un crescente numero di dati per informare scelte e condotte per una competitività basata sulla generazione di valore esteso alla qualità piuttosto che sugli sconti di prezzo.

Caso esemplare di questi scenari è il panorama britannico che, sulla base di una tradizione culturale orientata al *Multidisciplinary Design Collaboration* e a partire da due rapporti "seminali" *Constructing the Team* (Latham, 1994) e *Rethinking Construction* (Egan, 1998), già indicava come *key driver* per l'innalzamento d'efficacia, efficienza e affidabilità: l'integrazione orizzontale (*Integrated Project Delivery*) e l'ingresso dei vari operatori sin dalle fasi iniziali del processo (*Early Contractor Involvement*) da sostenere attraverso la digitalizzazione del progetto e l'impiego di approcci *performance-based*²⁸.

In altri contesti, altro esempio di successo, che ha visto l'applicazione del *Performative BIM* sin dalle fasi iniziali, è la realizzazione dei New Karolinska Solna di Stoccolma, primo ospedale svedese di oltre 300.000 mq lordi realizzato in partenariato pubblico privato ove il contraente Skanska²⁹ ha applicato ambienti digitali di lavoro sin dallo studio di fattibilità implementando la specificazione/verifica del programma in maniera progressiva (*Dynamic Briefing*)³⁰ e l'*Optioneering* attraverso diversi tipi di simulazioni anche infor-

²⁶ Una trattazione sulla marcatura digitale e i suoi effetti sulla progettazione e sulla società vedi Ridolfi, 2019b.

²⁷ Un'area di ricerca di assoluta attualità nelle discipline dell'Informazione Technology è il Big Data che riferisce a procedure capaci di inferire da montagne di dati di differente natura e dimensioni, misurabili in Zettabyte (miliardi di Terabyte), forme di intelligenza artificiale. Nel settore delle costruzioni lo spaventoso aumento degli ultimi anni della digitalizzazione rappresenta un punto di partenza fondamentale sebbene gli algoritmi di *recognition & detection* si stanno sviluppando con relativa lentezza causa la dimensione e la multiforme natura delle informazioni che si producono in questo settore. Tra le prime soluzioni commerciali si segnalano applicazioni indirizzate al monitoraggio predittivo della sicurezza e degli errori in fase di realizzazione, e per l'assistenza al facility management. Nelle fasi progettuali sono in corso ricerche sperimentali tese ad integrare *Generative Design* con algoritmi di *Machine learning* e *Deep mind*.

²⁸ Nelle sperimentazioni che seguirono (*Movement for Innovation*, 1998; *Construction Best Practice Programme*, 1998, sino al *Design Procurement/Lean Client Task Group*, 2011) vengono messi a punto e testati nuovi modelli d'intervento. La progressiva integrazione di questi nuovi modelli d'appalto con le tecnologie BIM ha avuto come loro punto culminante Heathrow T5 e Crossrail: interventi di rilevante dimensione finanziaria e complessità tecnico-gestionale comunque non esenti da problemi nella loro gestione e risultati finali.

²⁹ Skanska è un contractor multinazionale svedese con esperienze di progettazione integrata e concorrente consolidate in numerose opere complesse d'ingegneria infrastrutturale, edifici destinati al terziario, all'educazione e alle cure ospedaliere.

³⁰ Sebbene la diffusione di applicativi commerciali sia ancora in fase embrionale prevedendo l'integrazione di fogli di calcolo e l'automazione degli abachi in ambiente BIM, gli strumenti di *space programme* dinamici capaci di definirsi e adattarsi, anche parametricamente, all'evolvere del progetto sono da considerarsi tra gli strumenti più interessanti per le fasi iniziali e il monitoraggio contrattuale del progetto.

mate dal *Facility Management* con cui rendere sostenibile e proficua la gestione.

Si potrà obiettare che tali esempi con importi di decine di milioni di euro esulano dalla realtà corrente del mercato italiano che è ancora prevalentemente legato a formule di appalto tradizionale ove, nel primo quadrimestre del 2019, il valore medio degli appalti pubblici per i servizi di ingegneria e architettura è stato, seppure in crescita, di circa 250.000 euro³¹. Nel medio e lungo termine va però considerato che le disposizioni normative già impongono la graduale introduzione della modellazione computazionale, e soprattutto l'adozione di criteri di selezione sempre più orientati al valore, non solo del prodotto in sé ma anche ai suoi effetti sulle cosiddette esternalità sociali, occupative e ambientali (*prezzo/efficacia*) per estendersi altresì, con l'introduzione del criterio *qualità/prezzo*, alle capacità del team di progetto superando i precedenti orientamenti che volevano distinte qualità dell'offerta e qualità dell'offerente: la prima da impiegare come criterio di selezione di prodotto; la seconda come criterio di idoneità per l'affidamento.

Anche alla luce di queste considerazioni e come è stato già compreso in diversi contesti attuativi³², l'ingresso delle intelligenze computazionali nella progettazione e segnatamente nelle fasi ideative non può più quindi considerarsi un'opzione in alternativa, ma un 'imperativo categorico' per competere con competenze d'eccellenza sul grande mercato, ormai globalizzato, delle costruzioni e per riportare la produttività del settore che è andata costantemente declinando dalla realizzazione dell'Empire State Building (Sacks e Partouche, 2011). Una scelta obbligatoria per tutte le figure della progettazione e a maggior ragione per le committenze pubbliche la cui "intelligenza" rappresenta l'altro importante requisito che le riforme britanniche avevano incluso tra i fondamentali *key driver* di cambiamento.

4. CONCLUSIONI

L'articolo ha delineato il quadro di riferimento sancito dalla disciplina dei contratti pubblici italiani per le fasi preliminari della progettazione identificando la valutazione delle alternative progettuali come suo momento di maggior criticità e indicando nelle metodologie di scelta su base performa-

tiva la soluzione più efficace per la qualità finale delle opere e per implementare modelli di processo effettivamente improntati su approcci razionali sottoposti a cicli di controllo *step by step*.

Di seguito il contribuente ha evidenziato come la normativa promuova il progressivo utilizzo di strumenti specifici di modellazione elettronica e informativa³³ quale azione strategica che, attraverso piattaforme interoperabili e la gestione digitale dei contenuti informativi dei progetti, potrà consentire un effettivo incremento delle performance del settore delle costruzioni in termini di innovazione, ottimizzazione operativa, generazione di valore, riduzione di errori e sprechi.

Da queste premesse l'attenzione si è concentrata sull'impiego di detti strumenti nella fase programmatoria, in virtù del fatto che tale segmento del processo si evidenzia come massimamente delicato, e che la valutazione/selezione delle alternative, attività precipua di questa fase, rappresenta un elemento fondamentale per la fattibilità dell'opera e occasione per avviare processi partecipativi.

A questo proposito, l'analisi delle tecnologie delle informazioni nel settore delle costruzioni e in particolare della progressiva diffusione del *Parametric Simulation* e del *Generative Design*, oltre ad altre forme 'embrionali' di Intelligenza Artificiale, ha evidenziato le opportunità presenti nelle fasi programmatiche del processo come soluzione delle criticità evidenziate e di ottimizzazione del prodotto finale ma, anche e soprattutto, di rinnovamento dei suoi modelli organizzativi a partire dalla qualificazione della committenza pubblica.

A fronte di tali prospettive una sommaria descrizione delle funzionalità dei sopra citati strumenti e il richiamo ad alcune esperienze nei contesti più avanzati hanno dimostrato la fattibilità e la reale possibilità di implementare queste opportunità offrendo concrete occasioni per incrementare il valore del progetto oltre che la sua affidabilità e produttività del settore. Dall'analisi delle funzionalità è emerso come la possibilità di generare famiglie di soluzioni ottimizzate, oltre quelle che costituiscono il bagaglio di esperienze del team di progettazione o la "normalità" delle soluzioni conformi, può rafforzare il perseguimento della qualità così come il *Performance Based Simulation* può favorire modelli organizzativi collaborativi già nelle fasi iniziali della progettazione, ove risiedono le maggiori opportunità per l'innalzamento di valore del progetto.

Dimostrati gli impatti che i richiamati strumenti potranno effettivamente e fattibilmente indurre nel rinnovamento delle costruzioni e nei suoi modelli operativi/gestionali, l'articolo si conclude evidenziando come il mutamento potrà pienamente realizzarsi solo nella misura in cui la committenza pubblica saprà e vorrà adottarli: ipotesi oggi

³¹ Fonte Oice, Osservatorio mensile sui bandi di gara pubblici per servizi d'ingegneria e architettura, *project financing* e appalti di progettazione e lavori.

³² Tra questi si citano, oltre a quello nordamericano e britannico, i contesti finlandese, svedese e della Repubblica di Singapore che già dal 1999 avviò un programma di digitalizzazione delle costruzioni dal titolo "To be a World Class Builder in the Knowledge Age" ove era distintiva l'importanza conferita alla formazione universitaria. Da quella data infatti, Singapore ha intrapreso una profonda ristrutturazione dei curricula e dell'offerta formativa su basi multidisciplinari e finalizzate a stabilire un vicendevole rapporto col mondo dell'impresa.

³³ Art. 23 c. 13 Codice e DM delle Infrastrutture e dei Trasporti n. 560 del 1 dicembre 2017 inerente l'obbligatorietà dei metodi e strumenti di modellazione nelle opere pubbliche.

fortemente contrastata da una progressiva erosione di competenze indotta da scarsità di investimenti e conseguentemente da un diffuso ricorso alla delega verso altri operatori che genera deficit di gestione e di controllo pubblico.

L'acquisizione da parte delle amministrazioni di tali "intel-

ligenze" rappresenta quindi un elemento imprescindibile senza il quale ogni opportunità di innalzare affidabilità e qualità degli investimenti, non solo pubblici, resterà solo una possibilità o, ancor peggio, certezza di incrementare l'handicap in un mercato delle costruzioni ormai globale.

* **Alessandra Cucurnia**, Architetto, Dottore di Ricerca in Tecnologia dell'Architettura; Ricercatore Universitario SSD ICAR/12, docente del corso di Gestione e Tecnologia del Progetto, corso di Laurea Magistrale quinquennale in Architettura, Scuola di Architettura, Università di Firenze, Italia
e-mail: alessandra.cucurnia@unifi.it

** **Giuseppe Ridolfi**, Architetto, Dottore di Ricerca in Tecnologia dell'Architettura; Professore Associato SSD ICAR/12, docente del Laboratorio di Progettazione Ambientale, corso di Laurea Magistrale quinquennale in Architettura e del modulo Environmental Design nell'ambito di Architecture and Environment Lab, corso di Laurea Magistrale in Architettura, curriculum Architectural Design, Scuola di Architettura, Università di Firenze. Direttore Laboratorio congiunto Università-Imprese Mailab – Multimedia Architecture Interaction, Italia
e-mail: giuseppe.ridolfi@unifi.it

Bibliografia

AA.VV., *Normativa tecnica e industrializzazione dell'edilizia*, Parma edizioni, Bologna, 1990.

ACAMPA G., *Linee guida delle politiche europee: requisiti qualitativi e criteri di valutazione dell'architettura*, Valori e Valutazioni, n. 23, SIEV, Roma, 2019, pp. 47-56.

ACAMPA G., ORDÓÑEZ GARCÍA J., GRASSO M., DÍAZ LÓPEZ C., *Progettazione Sostenibile: criteri da integrare al BIM*, Valori e Valutazioni, n. 23, SIEV, Roma, 2019, pp. 119-128.

A.I.A.-AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS, *An Architect's Guide to Integrate Energy Modeling in the Design Process, 2012*, (scaricabile dal sito: <https://www.aia.org/resources/8056-architects-guide-to-integrating-energy-modeling.cfm>, consultato in gennaio 2014).

ANDIA A., SPIEGELHALTER, T., *Post-Parametric Automation in Design and Construction*, Artech House, Boston, 2015.

AUGENBROE G., "Trend in Building simulation" in Malkawi A., Augenbroe G. (eds), *Advanced Building Simulation*, Spon Press, New York, 2003, pp. 4-24.

AUSTIN J.L., *How to do things with words. The William James Lectures delivered at Harvard University in 1955*, Oxford University Press, London, 1962.

BANSAL J. C., SINGH P. K., PAL N. R. (eds), *Evolutionary and Swarm Intelligence Algorithms*, Springer, Cham, 2019.

BASSI A., OTTONE C., DELL'OVO M., *I Criteri Ambientali Minimi nel progetto di architettura. Trade-off tra sostenibilità ambientale, economica e sociale*, Valori e Valutazioni, n. 22, SIEV, Roma, 2019, pp. 35-45.

BENTIVEGNA V., *Gli aspetti relazionali della qualità dell'opera di architettura*, Valori e Valutazioni, n. 23, SIEV, Roma, 2019, pp. 23-29.

BRANKE J., DEB K., DIEROLF H., OSSWALD M., "Finding Knees in Multi-objective Optimization" in Conference: 8th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature-

PPSN VIII, Birmingham, 2004, (scaricabile dal sito: https://www.researchgate.net/publication/225109103_Finding_Knees_in_Multi-objective_Optimization, consultato in giugno 2019).

BROWN D.C., CHANDRASEKARAN B., "Expert Systems for Class of Mechanical Design Activity, Knowledge Engineering" In Gero, J.S. (ed.) *Computer-Aided Design*, North Holland, 1985, pp. 259-282.

CONGRESSO DEGLI STATI UNITI D'AMERICA, *Flood Control Act*, Pub.L. 74-738, emanato il 22 agosto del 1936 dal 74-esimo Congresso degli Stati Uniti d'America, 1936, (scaricabile dal sito: <http://www.legisworks.org/congress/74/publaw-738.pdf>, consultato in giugno 2019).

CROSS N., *Designerly Ways of Knowing*, Springer-Verlag London Limited, Cham, 2006.

DE WIT S., "Uncertainty in building simulation", in Malkawi A., Augenbroe G. (eds.), *Advanced Building Simulation*, Spon Press, New York, 2003, pp. 25-58.

DUPUIT J., *De la mesure de l'utilité des travaux publics (1844)*, in *Annales des Ponts et Chaussées*, II, 2nd semester pp. 332 – 375, 1995 (scaricabile dal sito: https://www.persee.fr/doc/rfeco_0769-0479_1995_num_10_2_978, consultato in giugno 2019).

EASTMANN C., TEICHILZ P., SACKS R., LISTON K., *BIM Handbook. A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors*, John Wiley & Sons, Hoboken, 2008.

EGAN J. (ed.), *Rethinking Construction. The report of the Construction Task Force to the Deputy Prime Minister*, Department of Trade and Industry, London, 1998.

GARBER R., (ed.), *Bim Design. Realising the creative potential of Building Information Modeling*, John Wiley & Sons, Chichester, 2014.

GERO J.S., *Design Prototypes: A Knowledge Representation Schema for Design*, AI Magazine, Vol. 11, n. 4, 1990, pp. 26-

- 36.
- HAERTMANN S., *The world as a process: simulations in the natural and social sciences*, in R. Hegselmann, U. Mueller, and K. Troitzsch (eds.), *Modelling and Simulation in the Social Sciences from the Philosophy of Science Point of View*, Kluwer, Dordrecht, 1996, pp. 77-100.
- HOLZER D., HOUGH R., BURRY M., *Parametric Design and Structural Optimization for Early Design Exploration*, in *International Journal of Architectural Computing*, Vol. 5, n. 4, 2007, pp. 625-643.
- KENNEDY J., EBERHART R. C., SHI Y., *Swarm Intelligence*, Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, 2001.
- KOLAREVIC B., *Performance Base Design*, *International Journal of Architectural Computing*, issue 01, Vol. 2, 2002, pp. 43-50.
- KOLAREVIC B., MALKAWI M. A., (eds.), *Performative Architecture Beyond Instrumentality*, Spon Press, New York, NYC, 2005.
- LASEAU P., *Graphic Thinking for Architects and designers*, Van Nostrand Reinhold, New York, NYC, 1989.
- LATHAM M. (ed.), *Constructing the Team: Final Report of the Government/Industry Review of Procurement and Contractual Arrangements in the UK Construction Industry*, Her Majesty's Stationery Office, London, 1994.
- LOIERO R., MAIOLO S., *La valutazione degli investimenti pubblici. Strumenti di programmazione e ACB: l'esperienza italiana*, Documento di analisi n. 3, Impact Assessment Office, Luglio, 2017.
- MAC LEAMY P., «Effort/Effect Curve», in *Construction Users Roundtable's, Collaboration, Integrated Information, and the Project Lifecycle in Building Design and Construction and Operation*, WP-1202 August, 2004, Cincinnati (scaricabile on line: <https://kcuc.org/wp-content/uploads/2013/11/Collaboration-Integrated-Information-and-the-Project-Lifecycle.pdf>, visitato in febbraio 2016).
- MALDONADO T., *Reale e virtuale*, (V^a ed. 1993), Feltrinelli, Milano, 1992.
- MALKAWI M. A., *Performance Simulation: Research and Tools*, in Kolarevic Branko, Malkawi M. Ali, (eds.), *Performative Architecture Beyond Instrumentality*, Spon Press, New York, NYC, 2005, pp. 85-96.
- MANE S. U., RAO M.R.N., *Many-Objective Optimization: Problems and Evolutionary Algorithms – A Short Review*, *International Journal of Applied Engineering Research*, Vol. 12, n. 20, 2017.
- MANGANELLI B., *Una proposta di sintesi tra tradizione estetica italiana e standard internazionali di valutazione*, *Valori e Valutazioni*, n. 18, SIEV, Roma, 2017, pp. 9-16.
- MARSH A., *Generative and Performative design: A challenging New role for Modern Architects*, in *The Oxford Conference 2008*, Witt Press, Oxford, 2008, (scaricabile dal sito: http://companyshed.com/downloads/documents/2008_Oxf-Conf.pdf, visitato in marzo 2015).
- MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI, in collabora-
zione con ERNEST & YOUNG e POLITECNICO DI MILANO, *Studio comparato sui metodi internazionali di valutazione preventiva delle opere pubbliche dal punto di vista della fattibilità tecnico-economica*, Dipartimento per le Infrastrutture, gli Affari Generali ed il Personale, Nucleo di Valutazione e Verifica degli Investimenti Pubblici, Roma, 2011.
- MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI, *Linee guida per la valutazione degli investimenti in Opere Pubbliche nei settori di competenza del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti - D. lgs. 228/2011*, Giugno, 2017.
- NAGY D., *Evolving Design*, in *Generative Design*, Columbia University's Graduate School of Architecture, Planning, and Preservation, New York, NYC, 2017 (scaricabile online: <https://medium.com/generative-design/evolving-design-b0941a17b759>, visitato il settembre 2018).
- NKB, *Structure for Building Regulations*, The Nordic Committee on Building Regulations, Report No. 34, Stockholm, 1978.
- PAULSON B.C., *Designing to reduce construction Costs*, *Journal of the construction division*, Vol. 102, Issue 4, 1976, pp. 587-592.
- PENNISI G., SCANDIZZO P.L., *Valutare l'Incertezza. L'Analisi Co-sti Benefici nel XXI secolo*, Giappichelli, Torino, 2003.
- REIS A. R., *The Empire State Building*, Chelsea House, New York, NYC, 2009.
- RIDOLFI G., *Progetto e saperi comprensivi*, in Missori A. (a cura di) *Tecnologia, progetto, manutenzione. Scritti sulla Produzione Edilizia in ricordo di Giovanni Ferracuti*, Franco Angeli, Milan, 2004, pp. 203-217.
- RIDOLFI G., *Progetto e procurement per costruire. Gestire progetti di pubblica utilità tra tradizione e innovazione digitale*, Aracne editrice, Rome, 2016.
- RIDOLFI G., SABERI A., *Learning Design Through Designerly Thinking: Holistic Digital Modeling in a graduate program in Architecture*, in Styk, J. And Bezerra, L. (eds.), *Education for research. Research for Creativity*, Wydżaf Architektura Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2016, pp. 62-67.
- RIDOLFI G., *Bim e simulazione ambientale nelle fasi iniziali del progetto*, in Ceccherini Nelli L., *Soluzioni innovative di risparmio energetico per edifici Nearly Zero Energy*, Didapress, Florence, 2018, pp. 46-57.
- RIDOLFI G., SABERI A., *Intelligenze computazionali nel progetto post-ambientale. Esempi da Mailab*, Agathón. *International Journal of Architecture, Art and Design*, n. 5, Demetra Ce.Ri.Med, Palermo, 2019, pp. 45-58.
- RIDOLFI G., *The contemporary condition of design. A report on Digital Mathema*, in Mussinelli E., Lauria M., Tucci F., *La PROduzione del PROgetto*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, 2019b.
- SACKS R., PARTOUCHE R., *Empire State Building Project: Archetype of Mass Construction*, *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 36, n. 6, 2011, pp. 702-710.
- SAGGIO A., *La rivoluzione informatica*, Carroci, Roma,

2007.

SCHUMACHER P. (ed.), *Parametricism 2.0: Rethinking Architecture's Agenda for the 21st Century*, Architectural Design, Vol. 86, 2016, pp. 18-23.

SHANNON C. E., *A Mathematical Theory of Communication*, Bell System Technical Journal, Vol. 27, (jul.), 623-656 (oct.), 1948, pp. 379-423.

SHEA K., GOURTOVAIA M., *Towards integrated-performance-*

driven generative design tools, Automation in Construction, Vol. 14, n. 2, 2005, pp. 253-264.

ZHANG X., TIAN Y., JIN Y., *A Knee Point-Driven Evolutionary Algorithm for Many-Objective Optimization*, in *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 19, n. 6, Dec. 2015 (scaricabile dal sito:

<http://www.soft-computing.de/KnEA.pdf>, visitato in settembre 2018).