

Giacomo Chiesa, <https://orcid.org/0000-0003-3783-5143>  
Francesca Fasano,  
Paolo Grasso,  
Dipartimento di Architettura e Design, Politecnico di Torino, Italia

giacomo.chiesa@polito.it  
francesca.fasano@polito.it  
paolo.grasso@polito.it

**Abstract.** Il paper descrive alcuni scenari d'uso di un'innovativa piattaforma (utente-monitoraggio-simulazioni) per la simulazione energetica degli edifici e il calcolo di indicatori di performance per coadiuvare, in un'ottica interoperabile e aperta, le scelte progettuali e operative sfruttando la capacità abilitante delle ICT in ambito architettonico. La modularità della soluzione permette lo sviluppo di applicazioni precostituite a supporto dei professionisti: impatto delle variazioni nelle scelte tecnologico-progettuali, calibrazione di modelli, performance-gap tra edificio simulato-monitorato. Il paper affronta alcune nuove potenzialità architettoniche del tool in ottica capacitante, focalizzandosi sulle componenti sviluppate e testate nell'ambito del progetto EU H2020 EDYCE.

**Parole chiave:** Tecnologie abilitanti; Progetto e ICT; Efficienza energetica; Dimensione interattiva; Piattaforme multidisciplinari.

## Introduzione

Il ruolo abilitante delle Tecnologie di Informazione e Comunicazione (ICT) per la gestione e il progetto degli edifici è tuttora un complesso ambito di ricerca che affronta numerose sfide. Da un lato il rischio di estinzione della figura dell'architetto tradizionale (Celanto, 2007) sostituendo la dimensione bio-culturale del progetto (Girardet, 2008) con approcci tecnocratici, perdendo la necessaria dimensione culturale e sentimentale degli spazi abitativi (Ghirri, 2021), e producendo spazi serializzati (Sennett, 2008) che si deprezzano come automobili (Droege, 2006). Dall'altro lato il rischio di ridurre le innovazioni digitali a semplici sostitute di strumenti tradizionali. Come evidenziato da Oxman (Oxman, 2006), l'applicazione di strategie di progetto digitali è iniziata con una semplice sostituzione delle operazioni manuali tramite strumenti digitali, seguita da una crescita di consapevolezza delle potenzialità offerte, superando l'uso dei CAD come tecnografi. L'approccio esigenziale-prestazionale

proprio della tecnologia dell'architettura può trovare facile applicazione nei nuovi strumenti digitali, supportando analisi e ottimizzazioni delle soluzioni progettuali e operative (Chiesa, 2020). Tale approccio prestazionale, standardizzato nel metodo esigenziale-prestazionale – si veda (Cavaglià *et al.*, 1975) e gli standard UNI –, trova connessioni con l'informatica già nella metà del XX secolo nell'opera di Giuseppe Ciribini (Bosia, 2013), includendo sistemi esperti (Ciribini, 1968) e l'approccio cibernetic di Wiener (Wiener, 1988). La visione prestazionale del progetto, tuttavia, affronta oggi una nuova era, come sottolineato da numerose ricerche – (de Wilde, 2018) e (Esposito and Bosi, 2021). Nuove potenzialità emergono dalla progressiva adozione di metodologie di programmazione atte a permettere analisi in tempo reale e combinare fonti di dati multiple e produzioni massive degli stessi tramite tecnologie IoT, monitoraggi cloud, approcci massivi alle simulazioni (Chiesa *et al.*, 2019; Besuievsky *et al.*, 2021). Tale nuova dimensione richiede un approccio multi-disciplinare per supportare l'azione progettuale con nuovi strumenti le cui potenzialità processuali non sostituiscano il ruolo primario del progettista. Tali strumenti sono attualmente gestiti da piattaforme interoperabili, capaci di gestire fonti di dati disomogenee e diversi linguaggi di programmazione, supportando co-simulazioni e predizioni secondo una visione di co-progettazione e co-gestione degli edifici (Shahinmoghadam *et al.*, 2021). Focalizzandosi sui comportamenti energetici degli edifici, per quanto siano disponibili numerosi *software* di simulazione energetico-dinamica che permettono di quantificare gli impatti energetici e di comfort dovuti alle diverse scelte di progetto, il

## Energy simulation platform supporting building design and management

**Abstract.** The paper describes specific usage scenarios of an innovative platform, interfacing users, monitoring, and simulations for building energy simulations and the computation of key performance indicators to support, in an interoperable and open vision, design and management choices exploiting the enabling capabilities of ICT in architecture. The modularity of the proposed solution allows the development of pre-defined usage scenarios for professionals: impact of modifications in technological design choices, model calibration, and performance gap between simulated and monitored building data. The paper faces some new architectural usage scenarios of the tool, considering its enabling capabilities, and focuses on the tool's components developed and tested in the EU H2020 E-DYCE project.  
**Keywords:** enabling technologies; design and ICT; building energy efficiency; interactive dimension; multidisciplinary platforms.

## Introduction

The enabling role of Information and Communication Technologies (ICT) in building management and design is still a complex research field with numerous open challenges. On the one hand, the risk of extinction of typical architectural figures (Celanto, 2007) by replacing the bio-cultural dimension of building design and management (Girardet, 2008) with technocratic-driven approaches, thus losing the needed correlation with the cultural and sentimental aspects of the living space (Ghirri, 2021), producing un-liveable CAD-mass-produced spaces (Sennett, 2008) that depreciate like cars (Droege, 2006). On the other hand, the risk of reducing digital-driven innovations to simple substitutes for traditional instruments. As highlighted by Oxman (Oxman 2006), the application of digital design strategies started with a sim-

ple substitution of manual operations with digital devices, and was followed by a growing consciousness of the potential offered by computer-aided tools, underscoring the simple possibility of using CADs as drafting machines. The architectural technology performance-driven approach may be adapted to support the informed use of innovative tools to underpin advanced functionalities and support design and operation analyses, and to optimise various solutions (Chiesa, 2020). This performance-based approach, standardised into the need-performance methodology – see (Cavaglià *et al.*, 1975) and UNI standards – has already been supported since the mid-20<sup>th</sup> century by Giuseppe Ciribini (Bosia, 2013), taking into account expert systems (Ciribini, 1968) and the Wiener cybernetic approach (Wiener, 1988). Nevertheless, the performative design

loro uso richiede conoscenze specifiche che ne limitano l'applicabilità nell'azione progettuale. Tra questi EnergyPlus è uno dei software più diffusi (Brackney *et al.*, 2018) ed è dotato di interfacce grafiche a supporto del suo uso architettonico, tra cui Open Studio, DesignBuilder e Ladybug Tools. Tali interfacce CAD/BIM di front-end permettono all'utente di generare un modello di un edificio e di modificare gli *input* (es. rimuovere un muro o cambiare i materiali), mentre il software compila in *back-end* (funzionalità non visibili all'utente) i file di input di EnergyPlus (IDF) che sono estremamente specialistici (file ASCII). Tali *software*, tuttavia, presentano limitazioni nell'uso parametrico per supportare scelte progettuali e, senza scrivere appositi codici, non permettono di comparare l'uso monitorato e l'uso simulato di un edificio (*performance-gap*) aiutando i professionisti a comprendere eventuali problematiche di esercizio. Si evidenzia, inoltre, una crescente domanda di tool basati su interfacce a riga di comando capaci di esplorare le istanze dei modelli EnergyPlus senza la necessità di agire manualmente sugli input tramite interfacce CAD o BIM. I principali vantaggi sono: un accesso più semplice (e massivo) alle modifiche nei modelli per studi parametrici per testare scenari progettuali e operativi complessi; l'uso di linguaggi di programmazione emergenti (es. Python) aprendo a maggiori connessioni tra i saperi informatici e l'architettura; l'elevata flessibilità nel testare nuove procedure metodologiche (es. integrando *machine learning*, reti neurali, modelli surrogati); un facile sviluppo di indicatori di performance (KPI) personalizzati per la progettazione tecnologico-ambientale; e l'integrabilità con sistemi di monitoraggio IoT (*Internet of Things*). Tra i progetti esistenti, si possono citare: Eppy, libreria per l'editing di modelli IDF, Geomeppy,

vision is now envisaging a new era, as underlined by several researchers (de Wilde, 2018; Esposito and Bosi, 2021). New advanced potentialities are emerging thanks to the progressive adoption of a coding-based methodology, which allows real-time analysis by combining multiple data sources and massive data production via IoT, Cloud monitoring and massive simulation approaches (Chiesa *et al.*, 2019; Besuievsky *et al.*, 2021). This new dimension requires a multidisciplinary approach to support the design process with new instruments, whose potentialities do not substitute the primary role of the architects. These tools are, nowadays, managed by interoperable platforms that manage multi-data sources and interrelate different coding languages, supporting co-simulations and forecasting thanks to a co-design and co-building man-

agement vision (Shahinmoghadam, Natephra and Motamedi, 2021). They focus on building energy behaviours, despite the many building dynamic energy simulation software available, which allow to quantify both energy and comfort impact of different design choices. Their use requires specific knowledge that limits their applicability in the design action. Among them, EnergyPlus is one of the most widely used software (Brackney *et al.*, 2018), including numerous graphical interfaces, such as OpenStudio, DesignBuilder and Ladybug Tools. These graphical CAD/BIM front-end interfaces are essential to create an initial building model that integrates geometry, and to actuate geometry changes (e.g. removing a wall or changing materials). At the same time, the tool compiles in the back-end (functions hidden to the user) the

BESOS e JEPlus. Tali *software*, tuttavia, richiedono un'avanzata conoscenza dei linguaggi di programmazione e delle complesse strutture logiche degli input file di EnergyPlus. Diversamente, il tool proposto in questo articolo supporta tali vantaggi senza richiedere al progettista conoscenze informatiche o della struttura del codice di EnergyPlus.

L'articolo introduce una nuova piattaforma a supporto del progetto e dell'analisi operativa di edifici abilitando il progettista a prefigurare e studiare i potenziali impatti che diversi parametri di progetto e gestione degli edifici hanno su indicatori energetici e di *comfort*, analizzando l'efficienza di numerosi scenari. Tale strumento è stato sviluppato dagli autori nell'ambito di due attività finanziate da progetti EU H2020. La prima attività ("DYCE") comprende la definizione teorica dell'architettura software della piattaforma e co-supporta lo sviluppo di alcuni scenari di uso relativi ad analisi di sensitività e calibrazione dei modelli, cui si aggiunge il calcolo automatico del *performance gap*, comparando l'uso standardizzato degli edifici – es. UNI EN 16798-1 – con i comportamenti monitorati reali. La seconda attività ("PRE") introduce ulteriori potenzialità progettuali, includendo ulteriori tecnologie e indicatori di performance bioclimatici al fine di supportare il professionista ad analizzare la resilienza climatica di scelte e scenari progettuali e operativi e l'applicabilità di soluzioni passive per il raffrescamento e il riscaldamento degli edifici. Tale seconda attività aggiunge al tool nuovi scenari di uso predittivi per l'ottimizzazione degli attuatori negli edifici suggerendo in anticipo agli utenti le configurazioni degli elementi attivi dell'involucro (es. schermature solari mobili, ventilazione naturale). L'articolo si focalizza sugli usi architettonici relativi all'attività "DYCE".

EnergyPlus input files (IDF) that are highly specialised (ASCII files). However, these tools show high limits in their parametric usability to support design choices. Additionally, without specific coding development, they do not allow to compare monitored and simulated building behaviours (*performance gap*), which is necessary to help professionals understand building operational problems.

There is also an increasing demand for coding-based tools that automatically explore EnergyPlus model instances without manually changing model inputs via CAD/BIM interfaces. The main advantages of coding tools are: easier (and massive) access to minor model modification for parametric analysis testing of complex design and operational scenarios; use of emerging programming languages (e.g. Python), allowing to better connect IT devel-

opers to the architectural scene; the flexibility to test new methodological procedures (e.g. integrating machine learning, neural networks, surrogate modelling); easy development of personalised key performance indicators (KPIs) for environmental-technological design; and integration with IoT monitoring systems (*Internet of Things*). Among the existing projects, it is possible to mention: Eppy, an IDF editing library, Geomeppy, BESOS, and JEPlus. Nevertheless, these tools require advanced knowledge of specific coding languages and the complex structure of EnergyPlus input files. Conversely, the tool proposed in this paper supports these advantages without needing the architect to know IT languages or the EnergyPlus input structure. This paper introduces a new platform supporting building design and opera-

**Introduzione al nuovo tool** Il tool PREDYCE (Python Realtime Energy Dynamics and Climate Evaluation) si basa sull'integrazione di tre moduli indipendenti sviluppati dagli autori, che consentono:

1. la modifica automatica di modelli energetici degli edifici (involucro, attività, tecnologie, ...),
2. l'esecuzione parallelizzata massiva di simulazioni energetiche in EnergyPlus,
3. il calcolo organizzato di numerosi indicatori di performance, con la possibilità di integrare dati monitorati.

Il tool è capace di integrare competenze ICT in una chiave abilitante per il professionista (progetto e gestione degli edifici) agendo come strumento tecnologico di mediazione tra il codice informatico, la conoscenza di specifici tecnicismi, quale ad esempio la gestione avanzata di simulazioni energetico-dinamiche in EnergyPlus, e un'interfaccia idonea all'uso nell'ambito architettonico degli stessi. Tale approccio supporta la convergenza di specialismi verso una visione aperta e corale per l'ottimizzazione efficace di soluzioni progettuali e di gestione degli edifici in fase operativa. L'utente si interfaccia con semplici strumenti di definizione delle scelte progettuali, mentre il tool elabora in *back-end* codice e simulazioni per restituire in *front-end* direttamente le performance espresse tramite indicatori noti. Sfruttando queste potenzialità è stato possibile lo sviluppo di diversi scenari d'uso orientati a supportare azioni specifiche progettuali-operative. La facile interoperatività, la struttura aperta, espandibile e integrabile della libreria, permettono alla stessa di essere impiegata come tecnologia capace di prefigurare e supportare decisioni in diversi ambiti: dallo studio degli impianti energetici di possibili azioni di retrofit, alla cali-

brazione del modello, all'analisi *real-time* del comportamento operativo reale di un edificio rispetto allo standard previsto. La stessa è strutturata per supportare, tramite API (*Application Programming Interface*), il suo utilizzo remoto, permettendone l'integrazione in piattaforme decisionali o di smart building management. Il tool è pensato come ausilio al progettista e non come sua sostituzione, lasciando allo stesso la possibilità di controllare i parametri e identificare gli indicatori da restituire supportando e non proponendo scelte progettuali. Alcune specifiche applicazioni sono, inoltre, reiterate automaticamente dalla piattaforma, ad esempio per restituire ai gestori energetici degli edifici eventuali discrepanze di performance aiutandoli a definire quando intervenire.

La Figura 1 mostra il flusso dati input/output semplificato di un generico scenario d'uso di PREDYCE. Il flusso di calcolo interno e la gestione della simulazione risultano nascoste all'utente finale a cui sono restituiti gli output contenenti gli indicatori richiesti. Le personalizzazioni di ogni esecuzione, considerando gli output e gli input desiderati, sono specificate all'interno di un file di gestione del software in formato JSON gestito dal progettista. Attualmente la compilazione di tale file richiede la conoscenza (tramite manuale) delle funzioni disponibili all'interno del tool (es. aggiungi cappotto termico). Scenari d'uso precompilati e la futura integrazione in una interfaccia possono ulteriormente semplificare tale procedura. Per quanto riguarda i file meteorologici, è stato sviluppato un ulteriore modulo per la creazione automatica di file climatici a partire da dati monitorati, es. da una stazione meteorologica. I risultati ottenuti per ogni simulazione vengono salvati in due file strutturati: uno contenente risultati aggregati sul periodo

tional management choices. It enables designers to prefigure and study the potential impact of design and building management decisions on energy and comfort indicators to check the efficiency of several scenarios. The authors developed this tool thanks to two actions funded by two EU H2020 projects. The first developing action ("DYCE") refers to the theoretical definition of the tool's architecture, and jointly supports the development of some usage scenarios related to sensitivity analyses and model calibration, also defining a performance gap scenario by comparing standard building uses – e.g. EN 16798-1 – with monitored actual behaviours. The second developing action ("PRE") introduces new design potentialities, including other low-energy technologies and bioclimatic design key performance indicators to support professionals in an-

alysing the climate resilience of design and operational scenarios, and the local applicability of passive heating and cooling solutions. The latter activity enhances the tool with new predictive usage scenarios to optimise actuators in the buildings by suggesting to the users the configurations of active envelope systems (e.g. movable shading and natural ventilation). This paper focuses on architectural usage scenarios related to the first developing action.

#### **Introduction to the new tool**

The PREDYCE (Python Realtime Energy Dynamics and Climate Evaluation) tool is based on three interconnected but independent modules developed by the authors, which allow the following:

1. Automatically modify building energy models (envelope, activities, technologies, ...),

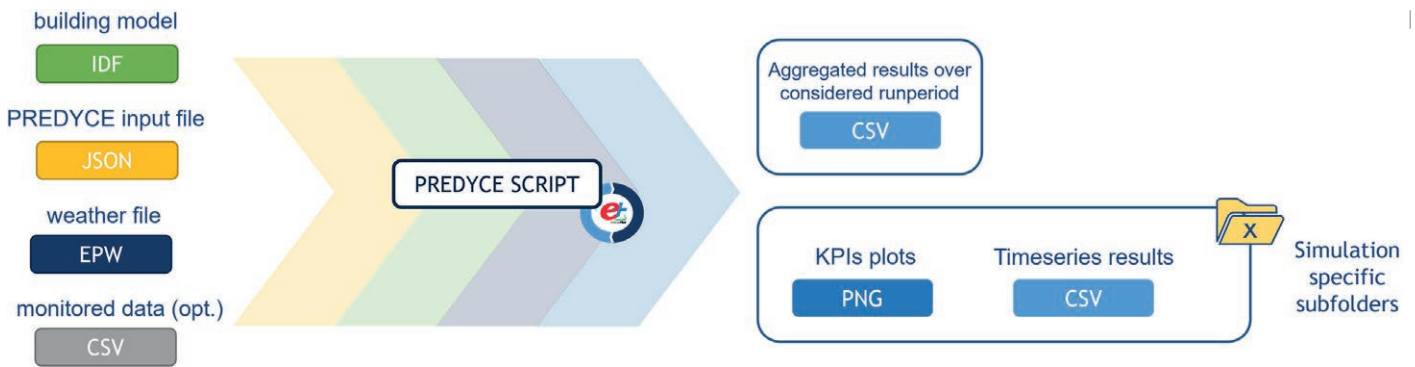
2. Run a massive number of simulations in parallel,
3. Compute several KPIs, with the possibility of integrating monitored data.

The tool can integrate ICT competencies to support professionals (both in building design and management phases), acting as a technological medium between coding, technical specialist knowledge, including advanced management of the dynamic energy simulation process in EnergyPlus, and a graphic interface devoted to support their architectural usages. This approach combines field-specific knowledge in a choral vision to optimise building design and management phases. The user interfaces with simple instruments to define design choices, while the tool processes in the back-end the needed code and simulations to return to the front-end performanc-

es expressed using known indicators. By exploiting these potentialities, different usage scenarios were developed to help specific design and operative actions. The proposed Python library's interoperability, flexibility, and modularity allow its use in other application cases, supporting decision-making processes. It can be controlled to analyse the impact of retrofit solutions on energy indicators, to calibrate the model, and to compare simulated standard building behaviours with actual ones in almost real-time. A developed API (Application Programming Interface) also allows for remote use of the library, allowing the integration with platforms supporting decision-making or smart building management and design choices. The tool is conceived as a support to architects without substituting them, allowing the professionals to control parametri-

01 | Flusso logico dei dati di input/output di uno scenario PREDYCE in cui il tool compara l'andamento simulato e monitorato di un edificio nelle stesse condizioni di contorno – file input possono essere caricati dal progettista usando l'interfaccia web del tool

The PREDYCE input/output workflow for a scenario comparing simulated and monitored building data under the same boundary conditions – input files may be attached by the professional using the web tool interface



temporale considerato, l'altro contenente serie temporali con risoluzione personalizzabile (es. oraria). Grazie alla struttura del file finale, eventuali correlazioni possono essere facilmente individuate dal progettista tramite azioni di post-analisi, e grafici personalizzati generati in modo semplice e automatizzato. Tale possibilità permette al professionista di valutare i risultati secondo strumenti e indicatori propri del proprio sapere disciplinare (es. diagrammi bioclimatici, ore di *discomfort*, fabbisogni energetici).

La soluzione proposta è fortemente innovativa e originale supportando la convergenza e l'integrabilità di competenze multidisciplinari (progettuali, tecnologiche, informatiche, ICT) in fase di progettazione e gestione degli edifici senza aumentare la dimensione strumentale o la complessità di uso da parte dell'utente finale. Il tool è un nuovo strumento tecnologico interattivo a servizio degli esperti di settore per una valutazione energetica e bioclimatica degli edifici studiato per l'integrazione in piattaforme commerciali a supporto della gestione smart degli edifici, come evidenziato dai test in corso in diversi paesi europei e in numerosi casi studio.

cal input variations and to identify the required output indicators. The library supports and does not propose design choices. Some specific applications are automatically reiterated by the platform, e.g. to return to energy managers potential energy discrepancies, supporting them in defining when an intervention is needed.

Fig. 1 shows a generic usage scenario input/output workflow of PREDYCE. Internal computations and the management of simulations are hidden from final users, who receive as output the desired KPIs. An input JSON file managed by the professional contains all details to personalise the request, from selected KPIs to parametric inputs modifying the building model. It is currently compiled by exploiting a user manual to know the tool's available functions, e.g. *adding wall thermal insulation*. Still, predefined use cases

and integrating the JSON compiling in a graphic interface could simplify the procedure. An extra module has been designed to generate EPW files (simulation weather files) from monitored data, e.g. by weather stations. Results of each simulation are saved in two structured CSV files: one containing aggregate KPIs over the considered run period, and the other containing time-series results with defined resolution (e.g. hourly). Thanks to the tabular output structure, correlations can be easily found with post-analysis, while graphical plots are automatically generated. Hence, professionals can interpret results according to KPIs and instruments of their field-specific background, e.g. bioclimatic charts, number of discomfort hours, and energy needs.

The proposed solution is highly innovative in integrating multidisciplinary

### Potenziali ambiti di applicazione

*Scenari d'uso per il progetto E-DYCE*

Il primo scenario di applicazione consente di semplificare e velocizzare l'analisi d'impatto che la variazione di parametri progettuali ha su indicatori di performance definibili dall'utente. Ad esempio, la Figura 2 mostra sottoforma di *heatmap* la correlazione che intercorre, per uno specifico edificio in regime passivo (giugno-settembre), tra azioni di retrofitting (es. aggiunta di isolante) e modifiche delle strategie di controllo (schermi solari, ventilazione) e le conseguenti performance definite da indicatori di comfort termico (modelli di comfort adattivo – UNI EN 16798-1).

Tra le principali applicazioni di tale scenario vi è l'analisi d'impatto delle diverse scelte di retrofit e di progetto sul comfort termico e sui fabbisogni energetici, supportata dalla possibilità di visualizzare, per ogni simulazione, indicatori grafici come la firma energetica (EN ISO 13790) (Fig. 3).

Il secondo scenario di uso supporta la verifica del modello rispetto a dati monitorati. Nel processo di calibrazione l'esperienza umana sulla scelta dei parametri da variare è difficilmente

competencies (architectural, technological, computer-based, and ICT) in building design and management phases without increasing the instrumental dimension or the complexity of use. The proposed tool is a new interactive technological instrument available for professionals allowing a bioclimatic and energy evaluation of buildings. It can be integrated with commercial platforms devoted to smart building management, in line with current tests in numerous case studies in several European countries.

### Potential application domains

*Usage scenarios for the E-DYCE project*

The first-use scenario allows to facilitate and speed up the study of how variations in different model parameters impact KPIs defined by the user. For example, Fig. 2 shows the heatmap correlations for a specific building op-

erated in free-running (June-September), showing the interrelations that retrofitting actions (e.g. addition of thermal insulation), and control strategy variations (e.g. solar shading and ventilation) have with thermal comfort performance (adaptive thermal comfort – UNI EN 16798-1).

Among the main applications of this scenario, there is the analysis of the impact that different retrofit and design solutions have on consumption and thermal comfort, thanks to the possibility of plotting for each simulation graphical KPI visualisations, such as the energy signature (EN ISO 13790) (Fig. 3).

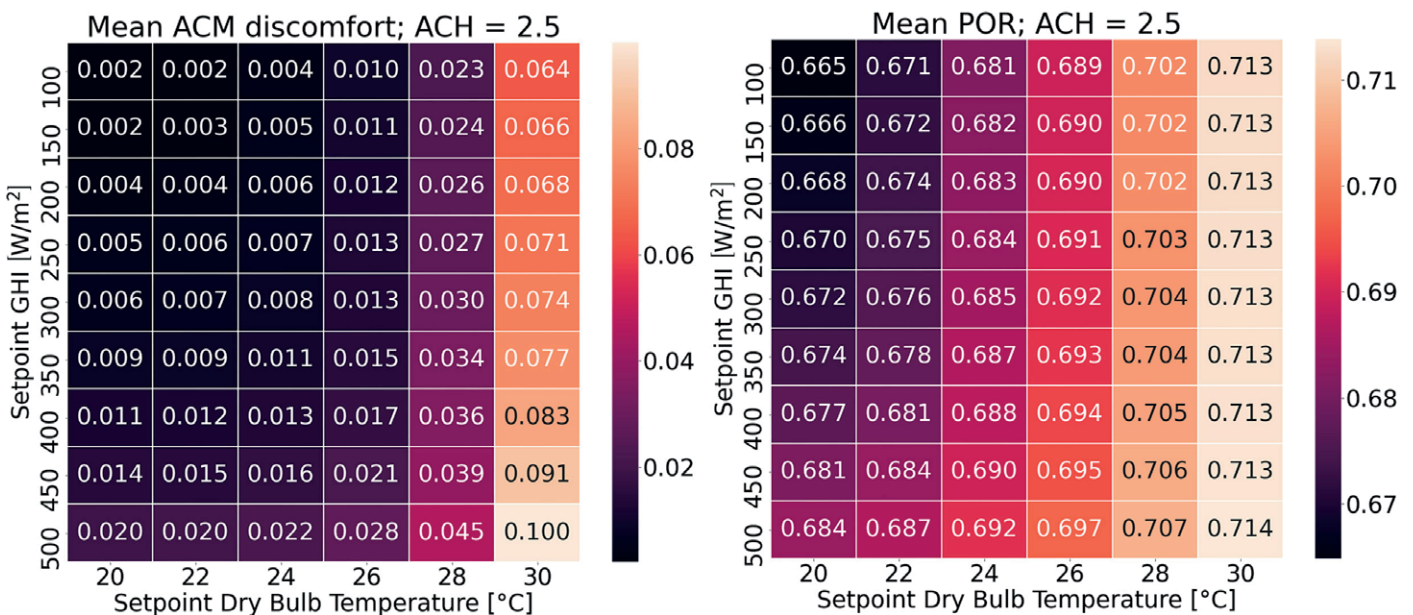
The second usage scenario supports building model verification against monitored data. The human experience of choosing the parameters to be varied is still hard to substitute with automated actions during the calibra-

- 02] Applicazione di PREDYCE a supporto del progettista confrontando l'effetto di azioni di retrofitting (isolamento termico, sostituzione serramenti) e soglie di controllo (schermi solari, raffrescamento ventilativo) su indicatori di comfort termico. Regime di free-running estivo (giu-set). I numeri sono coefficienti di correlazione [+1;-1].  
*PREDYCE's application supports designers in comparing the effect that retrofitting actions (thermal insulation, window change) and control thresholds (solar shading, ventilative cooling) have on thermal comfort indicators. Summer free-running mode (Jun-Sep). Numbers are correlation factors [+1;-1]*
- 03] Firme energetiche I-D e 2-D (EN 15603, UNITS I 1300) con dati aggregati settimanalmente ottenute applicando PREDYCE ad uno degli edifici demo di progetto  
*I-D and 2-D energy signatures (EN 15603, UNITS I 1300) with weekly data aggregation calculated by PREDYCE on an actual demo building*

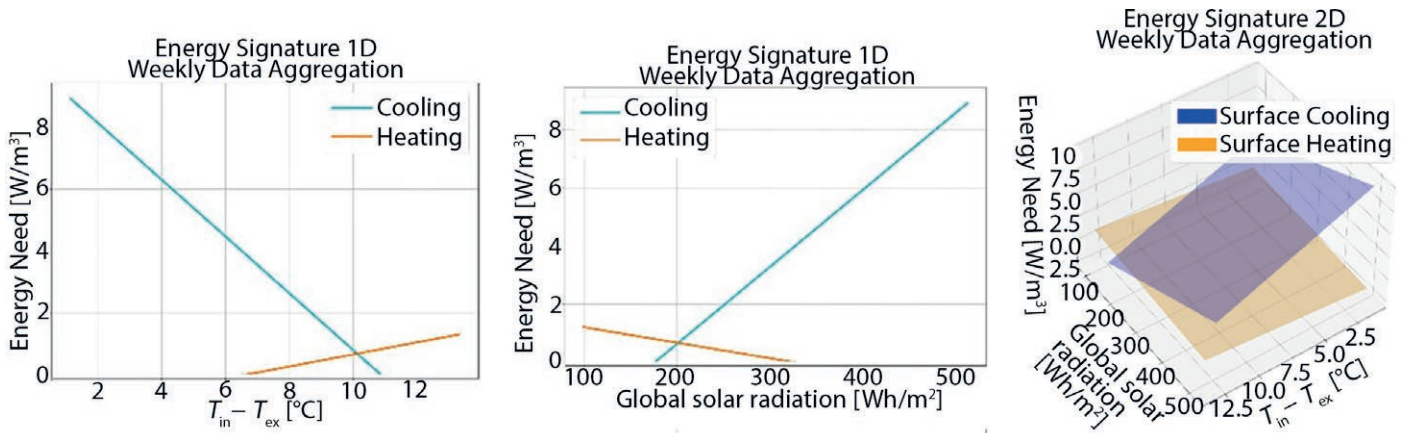
sostituibile da un processo automatizzato, ma strumenti capaci di modificare automaticamente i parametri di simulazione e di restituirne l'errore può aiutare a velocizzare tale azione. La procedura utilizzata dal tool consiste nella minimizzazione delle differenze statistiche tra il database monitorato e quello simulato nelle stesse condizioni di contorno al variare di parametri di modellazione definiti dall'utente. I risultati sono restituiti tramite visualizzazioni grafiche, quale ad esempio la firma di calibrazione, in linea con metodologie definite dall'IBSA (Hensen and Lamberts, 2019). I modelli calibrati sono fondamentali per poter supportare il professionista nelle decisioni riguardanti il retrofit energetico degli edifici e la loro gestione operativa. Infine, è stato sviluppato uno scenario di uso per analizzare il

divario nei risultati di performance di un edificio, confrontando automaticamente dati reali misurati e simulazioni effettuate in condizioni meteorologiche reali, ma considerando condizioni d'uso standard o adattate a specifici profili d'uso (*digital twin*). Lo scenario è stato sviluppato considerando la sua potenziale utilità a supporto sia dei professionisti nella gestione degli edifici, sia degli abitanti, permettendo di ricevere *feedback* più frequenti e realistici di quanto non sia possibile tramite gli attuali strumenti di diagnostica e certificazione energetica. Diversi indicatori di performance possono essere calcolati sia sui dati monitorati, sia sui risultati di simulazione, restituendo un differenziale prestazionale tra i due ambiti. Lo scenario è stato pensato per permettere la simulazione dell'edificio conside-

02 |



03 |



rando diverse modalità d'uso e scenari di ottimizzazione. Tale strumento permette di modificare profili di utilizzo (es. occupazione, impianti, servizi) e rispettivi parametri di controllo (es. utilizzo dei termostati) al fine di evidenziare eventuali discrepanze tra l'aspettativa di progetto basata su utenze e climi standard e un uso realistico degli edifici. Tra gli usi in corso di test si ricorda il supporto informato a gestori energetici e abitanti per ottimizzare strategie e suggerimenti comportamentali atti a ridurre i consumi nel tempo e a migliorare il comfort nelle unità spaziali.

#### Esempi di indicatori di performance

Il tool sviluppato consente il calcolo di indicatori di performance applicabili a dati monitorati e simulati. Tali indicatori sono restituiti sia numericamente, sia tramite specifici grafici, integrando, in accordo con le normative europee, indicatori non calcolabili in modo diretto tramite EnergyPlus, quali ad esempio la firma energetica degli edifici, che consente di correlare i consumi con variabili ambientali, e il calcolo dell'energia primaria globale in linea con le UNI/TS 11300. Sono stati inclusi nel nuovo tool numerosi indicatori di comfort termico, incluso il modello di Fanger (Fanger, 1972) – UNI EN ISO 7730 – e il comfort adattivo (Humphreys, Nicol and Roaf, 2020) – UNI EN 16798-1 (Fig. 4).

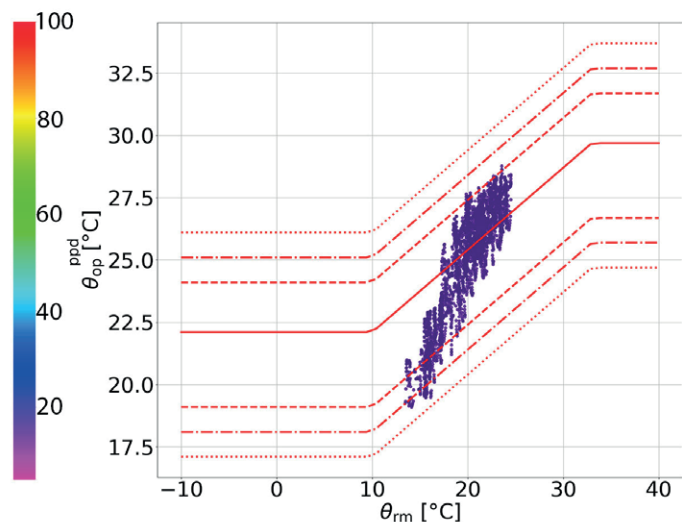
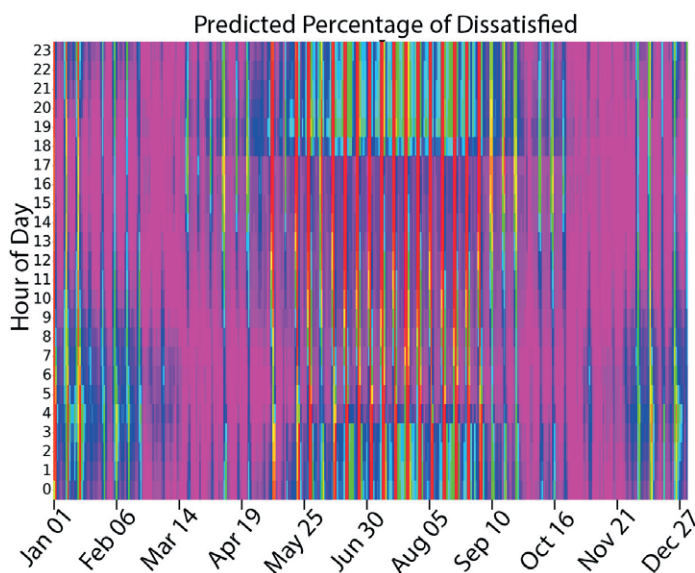
Lo scenario "PRE" permette inoltre la restituzione dei risultati su diagrammi bioclimatici.

Infine, sono stati introdotti nuovi indicatori, quali ad esempio il consumo fittizio di riscaldamento/raffrescamento, che intende tradurre il *discomfort* termico degli edifici in regime passivo in

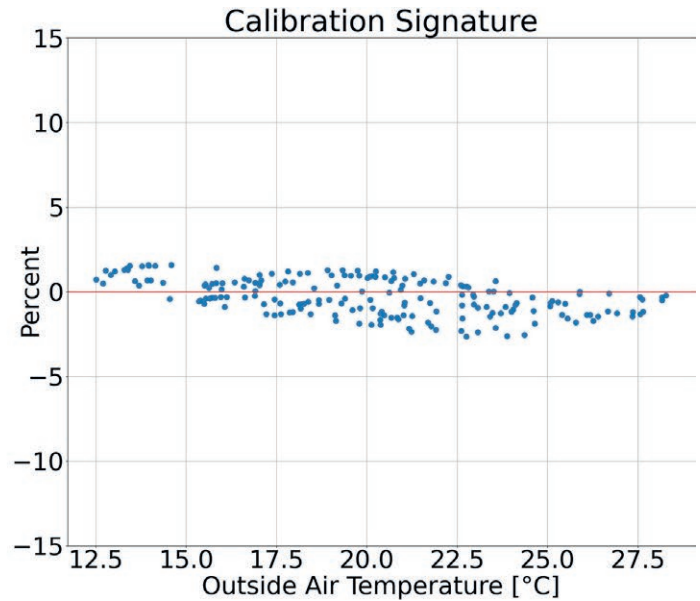
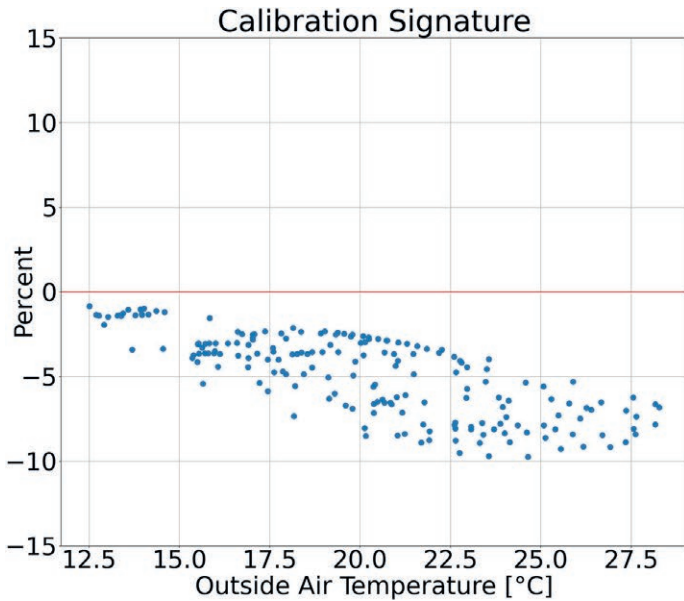
termini di fabbisogno energetico equivalente per valorizzare la corretta progettazione dell'involucro e l'adozione di strategie bioclimatiche. Per quanto concerne gli indicatori riferiti alla qualità dell'aria, sono presi in considerazione, ad esempio, il numero di ore occupate in cui la concentrazione di CO<sub>2</sub> è superiore a determinate soglie di *discomfort* (es. 1000 ppm) o inferiore a determinate soglie di accettabilità (es. 600 ppm) al fine di limitare la sovra-ventilazione invernale.

#### Applicazioni in casi studio europei

Gli scenari d'uso presentati sono in fase di test nell'ambito del progetto europeo H2020 E-DYCE su diverse tipologie di edificio (residenziali – casa singola, casa a schiera, multi-appartamento – e terziari – edifici scolastici) integrando la ricerca di senso e visione propria della tecnologia dell'architettura con l'ambito normativo, la certificazione energetica, gli smart building e le nuove dimensioni prestazionali. Tra gli utenti coinvolti si citano abitanti, gestori degli edifici, progettisti, amministratori e società informatiche. Risultati promettenti sono stati ottenuti nei diversi scenari di uso nel corso dei primi due anni di monitoraggio e test della piattaforma, ad esempio per la valutazione in tempo reale del performance gap rispetto ad un uso standard dell'edificio. Lo scenario di supporto alla calibrazione è stato ampiamente testato su numerosi edifici, prendendo in esame diverse variabili obiettivo di calibrazione (temperatura, concentrazione di CO<sub>2</sub>, consumi energetici), ottenendo ottimi risultati anche in termini di tenuta nel tempo dei modelli calibrati. Tali test hanno permesso di sottolineare la capacità del tool di semplificare il pro-



05 |



cesso di studio e utilizzo dei modelli per la simulazione energetica da parte delle diverse figure progettuali e gestionali degli edifici. La Figura 5 mostra l'applicazione di tale strumento su un edificio residenziale sito in un comune pedemontano del Piemonte riportando i risultati raggiunti in termini di firma di calibrazione.

Similmente, la Figura 6 dimostra la capacità del modello calibrato di replicare l'andamento dell'edificio reale (dati monitorati) nel tempo permettendo al progettista di simulare l'impatto

di scenari progettuali e operativi su un modello di edificio allineato al suo reale funzionamento.

### Conclusioni e futuri sviluppi

Test sono condotti in edifici monitorati posizionati in diversi paesi europei resi disponibili da enti locali, grandi e piccole medie imprese, ed altri enti di ricerca. È anche in corso di test l'integra-

La piattaforma PREDYCE qui introdotta è in corso di continuo sviluppo da parte degli autori.

tion process. Still, the possibility of speeding up the analysis of parameter impact on errors by automatically comparing simulated and monitored data can improve the process. The adopted procedure minimises statistical differences between monitored and simulated data under the same environmental conditions by varying model parameters defined by the user. Results are returned through graphical visualisations, such as the calibration signature, in line with methodologies suggested HVAC by IBSA (Hensen and Lamberts, 2019). Calibrated models are essential to support architects in energy retrofitting and building management choices correctly.

Finally, a usage scenario devoted to analysing the performance gap between simulated and monitored building behaviour under the same weather conditions has been developed, consider-

ing both standard model inputs and adapted user profiles (digital twin). This scenario has been developed considering its potential to support both building management professionals and final users in receiving more frequent and realistic feedback than possible with existing energy certification and diagnostic tools. Many KPIs can be computed on monitored data and simulation results, returning a performance differential between the two environments. This scenario has been developed to simulate the building by considering different usage profiles (e.g. occupancy, HVAC, activities) and their control parameters (e.g. thermostats) to highlight discrepancies between attended design behaviour based on standard usage and weather, and actual uses. This allows to develop new strategies, and suggests behavioural patterns to companies and ten-

ants to reduce consumption over time and improve indoor comfort.

#### Sample performance indicators

The tool proposed allows the computation of several KPIs on both simulated and monitored data. Performance indicators are returned numerically and through plots, adding, in line with European regulations, additional KPIs not directly available in EnergyPlus, e.g. the energy signature, which correlates environmental variables with consumption, and the primary energy, in line with UNI/TS 11300. Several thermal comfort KPIs are available – e.g. the Fanger model (Fanger, 1972) – UNI EN ISO 7730 – and the adaptive comfort model (Humphreys, Nicol and Roaf, 2020) – UNI EN 16798-1 (Fig. 4). The “PRE” action also includes bioclimatic charts.

New KPIs have been introduced, such

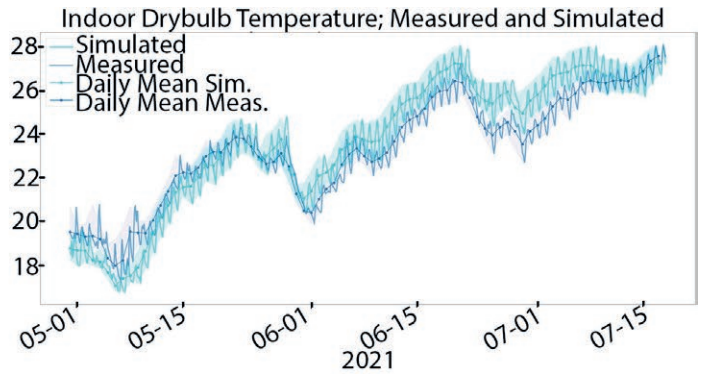
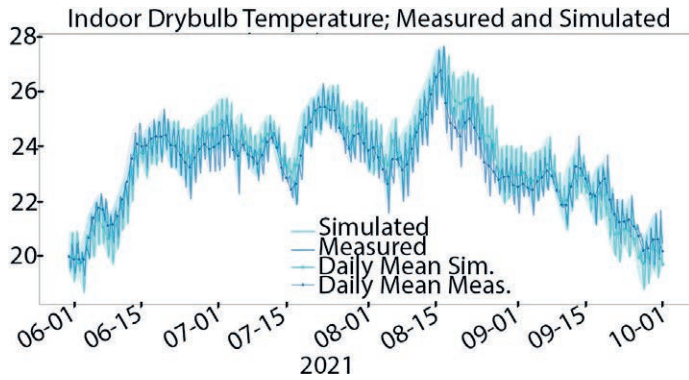
as fictitious heating/cooling, which intends to correlate the thermal discomfort of free-running buildings to equivalent energy needs, enhancing the importance of correctly designing building envelopes and bioclimatic strategies. Indoor air quality KPIs can also be retrieved, e.g. the number of occupied hours in which CO<sub>2</sub> concentration is above discomfort thresholds (e.g. 1000 ppm) or below defined values (e.g. 600 ppm) to avoid over ventilation in wintertime.

#### Sample applications on EU demo cases

Described usage scenarios are being tested in the EU project H2020 E-DYCE by considering different building typologies (residential – detached houses, terraced-house, multi-apartment – and tertiary buildings – schools), and by integrating

06] Esempio di utilizzo di PREDYCE in fase operativa confrontando automaticamente le temperature interne medie dell'edificio ottenute dal modello calibrato di Fig. 05 e dai dati monitorati considerando (a) il periodo 01/06-30/09 2021 e (b) il periodo 01/05-15/07 2022

Sample use of PREDYCE during the operative phase to automatically compare average indoor temperatures obtained by the calibrated model of Fig. 05 and by monitored data considering (a) the 01/06-30/09 2021 period and (b) the 01/05-15/07 2022 period



zione del tool in piattaforme di interscambio dati proprietarie, capaci di gestire in remoto, tramite intelligenza artificiale, sistemi avanzati di smart building. Il tool è soggetto a limitazioni e rischi propri delle simulazioni energetico dinamiche, necessitando di una buona esperienza, da parte dell'utilizzatore, per costruire correttamente i modelli iniziali degli edifici. In aggiunta, il tool è attualmente gestito da un file di controllo delle simulazioni che, per quanto compilabile dai progettisti senza dover conoscere linguaggi di programmazione, non è ancora dotato di un'interfaccia utente semplificata o integrata con la modellazione geometrica iniziale. Infine, è necessario da parte dell'utilizzatore mantenere una forte capacità di analisi critica dei risultati in base agli input definiti di progetto per evitare usi impropri dello strumento o errori nella fase di predisposizione del modello.

Tra i diversi ambiti di sviluppo relativi al progetto E-DYCE di sottolineano: 1. la futura generazione di strumenti e metodi per implementare e valorizzare il tema della certificazione energetica degli edifici integrando soluzioni ICT, design/asset/tailored rating e la valorizzazione del potenziale passivo/bioclimatico degli edifici; 2. il mercato degli smart building e lo sviluppo di soluzioni di ottimizzazione predittive degli edifici. Tra i futuri sviluppi del tool, si sottolinea la necessità di arricchire l'interfaccia utente, ad esempio integrandola in ambienti CAD (es. Rhinoceros), e di includere la possibilità di supportare lo sviluppo di modellazioni *black box*, *reinforcement learning*, nuove librerie di ottimizzazione multi-variabile e ulteriori scenari di uso.

the definition of significance and visions of architectural technology with regulations, energy certification, smart buildings, and the new performance-driven dimensions. Tenants, building managers, designers, administrators, and ICT companies can be mentioned among involved end-users. Promising results have been obtained for the different usage scenarios during the first two years of monitoring and testing the platform, e.g. to evaluate the real time performance gap between actual building use and simulated standard use. The calibration scenario was also tested considering numerous buildings, using several measured variables as calibration target (temperature, CO<sub>2</sub> concentration, heating needs), obtaining excellent results, and considering long-term correspondence between monitored and simulated data. Such tests demonstrated the tool's ability

to significantly facilitate analyses and usage of energy simulation models by various building design and management professionals. Fig. 5 shows the calibration scenario applied to a building in a mountain municipality in Piedmont (North Italy), reporting the calibration signature for a residential case study. Fig. 6, instead, shows the long-term correspondence between the calibrated model and measured data allowing architects to simulate the impact of design and operative scenarios on a building model aligned with the actual building behaviour.

**Conclusions and further research**  
The proposed PREDYCE tool is under constant development by the authors. Tests are performed in monitored buildings in various European countries in collaboration with local societies, small and medium enterprises,

and research centres. Moreover, the tool integrates with a proprietary middleware platform, and is being tested for remote handling through artificial intelligence algorithms and advanced smart building systems. The tool is subject to limitations and risks connected to adopting dynamic energy simulations, needing a good user experience to define the initial simulation model correctly. Currently, the tool is managed by an input file that, despite being easy to compile by design professionals without requiring programming knowledge, is not currently linked to a graphical interface connected to the initial geometrical definition of the model. Finally, the user needs to maintain a high critical capability of analysing results, considering the defined design inputs to avoid bad usage of the instrument or wrong initial considerations.

The main future development paths of the tool for E-DYCE are: 1. the future generation of tools and methods to update and enhance the applicability of building energy certifications, integrating ICT solutions, design/asset/tailored rating, and passive/bioclimate potential; 2. Smart building market and developing predictive optimisation solutions. Future developments need to enhance user interface options, e.g. integrating already existing CAD tools (e.g. Rhinoceros), including black box modelling algorithms, reinforcement learning, multi-objective optimisation libraries, and new usage scenarios.

ATTRIBUTION, ACKNOWLEDGEMENTS, COPYRIGHTS  
This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation pro-



#### ATTRIBUZIONE, RICONOSCIMENTI, DIRITTI D'AUTORE

La ricerca è finanziata dall'Unione Europea, grant agreement No 893945, EU H2020 research and innovation programme H2020-LC-EE-2019 (azione DYCE), P.I. unità locale prof. Chiesa. Contributi: Concettualizzazione, cura dei dati, elaborazioni software e validazione (tutti), supervisione e acquisizione fondi (GC).

#### REFERENCES

- Besuevsky, G. et al. (2021), "Procedural modeling buildings for finite element method simulation", *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 2042, n. 1, p. 012074.
- Bosia, D. (Ed) (2013), *L'opera di Giuseppe Ciribini*, FrancoAngeli, Milano.
- Brackney, L. et al. (2018), *Building energy modeling with openstudio*, Springer, New York.
- Cavaglià, G. et al. (1975), *Industrializzazione per programmi. Strumenti e procedure per la definizione dei sistemi di edilizia abitativa*, RDB, Piacenza.
- Celanto, D. (2007) "Innovate or Perish: New Technologies and Architecture's Future", *Harvard Design Magazine*, Vol. 26, available at: <http://www.harvarddesignmagazine.org/issues/26/innovate-or-perish-new-technologies-and-architectures-future> (accessed on 5/09/2022).
- Chiesa, G. et al. (2019), "Parametric Optimization of Window-to-Wall Ratio for Passive Buildings Adopting A Scripting Methodology to Dynamic-Energy Simulation", *Sustainability*, Vol. 11, n. 11, p. 3078.
- Chiesa, G. (2020), *Technological paradigms and digital eras: data-driven visions for building design*, Springer, Cham.
- Ciribini, G. (1968), *Brevi note di metodologia della progettazione architettonica*, Edizioni Quaderni di Studio, Torino.
- Droege, P. (2006), "The Renewable City: Dawn of an Urban Revolution", *Bulletin of Science, Technology & Society*, Vol. 26, n. 2, pp. 141-150.
- Esposito, M.A. and Bosi, F. (2021), "The Green Design Approach Digital Innovation Facility: BIM and New Industrial Processes", in Chiesa, G. (Ed) *Bioclimatic Approaches in Urban and Building Design*, Springer, Cham, pp. 439-485.
- Fanger, P. (1972), *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*, McGraw-Hill, New York.
- Ghirri, L. (2021), *Niente di antico sotto il sole. Scritti e interviste*, Quodlibet, Macerata.
- Girardet, H. (2008), *Cities people planet: urban development and climate change*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Chichester.
- Hensen, J. and Lamberts, R. (Eds) (2019), *Building performance simulation for design and operation*, 2nd ed., Routledge, Abingdon.
- Humphreys, M.A., Nicol, F. and Roaf, S. (2020), *Adaptive thermal comfort: foundations and analysis*, Routledge, Abingdon.
- Oxman, R. (2006), "Theory and design in the first digital age", *Design Studies*, Vol. 27, n. 3, pp. 229-265.
- Sennett, R. (2008), *The craftsman*, Yale University Press, New Haven.
- Shahinmoghdam, M., Natephra, W. and Motamedi, A. (2021), "BIM- and IoT-based virtual reality tool for real-time thermal comfort assessment in building enclosures", *Building and Environment*, Vol. 199, p. 107905.
- Wiener, N. (1988), *The human use of human beings: cybernetics and society*, Da Capo Press, New York.
- de Wilde, P. (2018), *Building Performance Analysis*, John Wiley & Sons, Chichester.
- gramme H2020-LC-EE-2019, under grant agreement No 893945 (E-DYCE) ("DYCE" action), local unit P.I. prof. Chiesa. Contributors: Conceptualisation, data management, software, validation (all), supervision and funding acquisition (GC).