

Resource circularity, solar energy and bioclimatics for the Climate Neutral historic building

Serena Baiani¹, <https://orcid.org/0000-0002-1975-3251>

Paola Altamura¹, <https://orcid.org/0000-0001-7317-1036>

Giada Romano¹, <https://orcid.org/0000-0003-0344-8153>

¹ Department of Planning Design Technology of Architecture, “Sapienza” University of Rome, Italy

Primary Contact: Serena Baiani, serena.baiani@uniroma1.it

This article has been accepted for publication and undergone full peer review but has not been through the copyediting, typesetting, pagination and proofreading process, which may lead to differences between this version and the Version of Record.

Published: Dec 20, 2024
10.36253/techne-16923

Abstract

The contribution reports the results of research activities on the redevelopment of the historic built heritage in the urban context, a strategic and challenging field of investigation to achieve climate neutrality, sustainability and long-term resource conservation. The objective of the research is the development of a replicable and adaptable intervention model aimed specifically at historic buildings, which combines, according to the Cradle to Cradle approach, innovative circular and environmentally friendly technologies and systems, including passive bioclimatic systems and active integrated solar systems for energy production from RES. Among the research pilot cases, the contribution describes the experimentation for scenarios and gradients of integration and transformation of the existing building on the Ex Filanda in Rome.

Keywords: resource circularity; solar energy; bioclimatic passive systems; heritage buildings; climate neutral.

Please cite this article as: Baiani, S., Altamura, P., Romano, G. (2024). Resource circularity, solar energy and bioclimatics for the Climate Neutral historic building. *Techne. Journal of Technology for Architecture and Environment*, Just Accepted.

Introduction

Achieving the 'Fit for 55' (EC, 2021) target of cutting climate-changing emissions by 55% by 2030 compared to 1990 levels, and even more so reaching climate neutrality by 2050, necessarily requires that energy systems in the EU are converted to renewable sources, that the efficiency of the building stock contributes to the reduction of consumption and emissions, and that the level of resource efficiency is increased (EC, 2019 & 2020). The achievement of climate neutrality of the built environment in urban areas therefore depends on the one hand on innovation in the energy field and on the other hand on a concrete application of the circular paradigm to the different resource flows, through environmental-technological design. In this context, the historical built heritage represents for research a strategic and challenging field of investigation to achieve climate neutrality, sustainability and long-term resource conservation, considering that buildings constructed before 1960 represent about 37% of the total in Mediterranean Europe¹, whose analysis of energy behaviour shows a condition of high energy demand, with reference to current regulations (Lucchi et al., 2023).

Initiatives such as the drafting of a specific LEED protocol for historic buildings (GBC Historic Building, 2018), a point of operational convergence between the environmental sustainability principles of the LEED standard and those of restoration, have highlighted the need for interdisciplinary intervention to achieve and evaluate high levels of sustainability of conservation, rehabilitation, recovery and energy improvement interventions in historic buildings. More recently, the explicit reference to restoration works as a field of application of the Italian Minimum Environmental Criteria of the Green Public Procurement for Buildings (updated with Ministerial Decree 23/06/2022) has sanctioned the obligatory implementation of the envisaged Circular Design criteria (recovered materials, recycled materials, disassemblability) and energy and ecological ones also to historic buildings, although with the possibility of derogation on individual environmental criteria that are not compatible with conservation. Reflections on targeted and compatible intervention strategies, methods and technologies towards the Climate Neutral historic building therefore appear increasingly strategic.

State of the Art and Research Objectives

The improvement of energy efficiency in historic buildings must take into account the need to preserve the material integrity of these structures, while integrating new requirements to achieve climate neutrality (Ambrogio & Zuppiroli, 2013). In the early 1990s, the focus was on integrating mechanical systems within historic buildings by using typological structures such as ducts, chimneys and other existing spaces to limit the invasiveness of the interventions. However, the transition to renewable energy sources (RES) has shifted the approach toward architectural, energy and technological integration (Lucchi et al., 2023). The concept of renewable energy integration has thus progressively been applied to protected heritage buildings (Baiani et al., 2023). The specific nature of historic buildings requires that the primary criteria guiding the project be the protection and understanding of the asset. In developing technological and construction solutions, the key aspects concern the compatibility and reversibility of the intervention, as well as its durability over time and actual energy production. These principles fully align with the goals of circularity and resource

efficiency, ensuring the potential for subsequent usage cycles of the building and its components (Foster, 2020), while progressively increasing the value of the asset through an upcycling perspective.

The integration of solar technologies represents a strategy that not only reduces the infrastructural demands on the historic building but also improves its interactions with the environment, consistent with the Cradle to Cradle approach. In this regard, the key term for interventions in historic buildings is “improvement” rather than “adaptation” (Pracchi & Lucchi, 2017). It is essential to avoid aiming for efficiency targets designed for conventional building stock, and instead carefully study the material and structural nature of each case to define the most appropriate solutions to reduce the building's fossil fuel energy demand and, where possible, enable energy production without altering its distinctive features. This approach may eventually allow the building to be integrated into a broader network through renewable energy communities (Petraroria & Sessa, 2023; Buda, 2023).

The objective of this research is to develop an intervention model—replicable in urban contexts—specifically aimed at the rehabilitation of historic buildings. This model, based on the Cradle to Cradle approach, envisions the combination of innovative circular technologies and systems oriented toward the zero-energy, zero-emissions, and zero-waste paradigm, while enhancing the potential integration of active and passive solar systems. To positively influence the building-environment system's behavior, it is necessary to study the thermal distribution behavior of the historic building and to develop, evaluate, and apply high-performance passive systems for heating, passive cooling, and natural ventilation (Hastings, 2013; Cillari, 2021). These bioclimatic systems must then be integrated with active technologies and systems aimed at reducing carbon emissions, improving efficiency, and lowering energy consumption (Jonasson, J., 2024). The integration of these systems and technologies, together with solutions that increase resilience and promote the circularity of natural and material resources in architecture, helps to reduce energy demand and carbon emissions while increasing energy efficiency and flexibility in final energy uses (Knuutila, 2022; Azouz, 2023).

Research methodology

The analysis of international reporting and scientific literature has allowed for the definition of an integrated framework of intervention strategies for the Climate Neutral historic building, with the aim of establishing a replicable model. This model leverages, in an interconnected manner, the passive bioclimatic behaviors of consolidated building typologies, while integrating innovative active systems to achieve environmental, social, and economic benefits.

The research, starting from the Cradle to Cradle approach, has explored strategies and technical solutions aimed at improving the resilience and enhancing the adaptability of the historic built environment. This has been achieved by optimizing natural and material resource flows, ensuring the reduction of carbon emissions, improving environmental quality, and enhancing thermo-hygrometric comfort. These goals are reached through increased efficiency and flexibility in the final energy uses, along with a reduction in energy demand.

The selection of intervention solutions, compatible with the existing structure, stems from the application of criteria, some of which are already introduced and consolidated in experimental studies (Baiani et al., 2024), to evaluate environmental impacts from a life cycle perspective. This involves quantifying material components (secondary raw materials, reusable components, embodied energy and carbon in materials), energy components (accumulation, storage, and energy reuse, renewable

energy production), and ecological components (accumulation, storage, and reuse of rainwater, organic waste, and wastewater). The evaluation phase of the passive behaviors of the historic envelope, aimed at achieving climate neutrality by reducing CO₂ emissions, focuses on the measurement of: the thermal transmittance of the original construction system for the selection of technical insulation systems; solar and light reflectance, to mitigate potential overheating and improve visual comfort while reducing energy demand for artificial lighting, related to the Daylight Factor parameter; thermal loads, both winter and summer, to assess the effectiveness of passive solutions (shading, direct and indirect solar gain systems, thermal insulation, and natural ventilation) in reducing energy consumption, both seasonally and globally; and the calculation of CO₂ emissions determined by energy consumption to estimate the reduction in the carbon footprint.

Technical choices are therefore evaluated in relation to the gradient of morphological integration, recognizability of the intervention, and reversibility of the energy system (Baiani et al., 2023), in accordance with morpho-typological characteristics: new volumes, placed in adjacency or separated, inserted internally as 'box in the box' or added on the roof (Baiani et al., 2024).

The following section presents the experimental results from the Ex Filanda building in Rome, located in a complex urban context and selected among the pilot cases of the research. This was done to evaluate solutions that, measured and calibrated according to site-specific criteria, may form a framework oriented towards circularity, sustainability, and resilience, with significant impacts on the surrounding environment.

Results and discussion: intervention scenarios on the Ex Filanda building in Rome

The case of the Ex-Filanda: framework, context and analysis of material and climatic aspects

The Ex Filanda in Rome, built in 1926, is located along Viale Castrense in an urban area compressed between the Aurelian Walls and the blocks of Via La Spezia, on the remains of the Sessorium. The building, constructed with masonry walls and single-story wooden floors, featuring two lateral wings with two levels, was originally intended to house an educational institute for disadvantaged children. It was later converted into a craft institute, but suffered significant damage due to three fires in 2015 (Fig. 1). The inclusion of the site in the international competition *Reinventing Cities*, to which Rome adhered as a member of the C40, enabled the development of a complex project for the redevelopment of the existing structure. This included the reconstruction of the roof and a permitted 30% increase in usable surface area, achieved through the addition of a complete second level, closely integrated with Viale Castrense and the Carlo Felice Gardens (Barbieri, 2020).

A detailed climatic-environmental analysis, conducted through direct surveys and 3D modeling, revealed good solar exposure during the summer months, although the site is affected by the urban heat island phenomenon (Ahmed et al., 2024), exacerbated by the significant thermal mass of the Aurelian Walls. During the winter months (December–March), minimal solar exposure was observed, with permanent shadows on the south and southwest sides (Fig. 2). Computational fluid dynamics simulations highlighted the channelling effect along Viale Castrense, which could be exploited for microclimate control in the summer and for energy production through the integration of micro wind turbines.

Based on this analysis, several climate-neutral redevelopment approaches have been identified to reduce the building's environmental impact, focusing both on the circularity of material and natural

resources and the optimization of the building's energy performance, with particular emphasis on the active and passive performance of the building envelope.

A thorough reflection on material aspects led to the prioritization of wood (often laminated wood, X-LAM, or LVL) for structural and other additions, ensuring the full reversibility and disassemblability of the systems, while reducing embodied carbon.

Ecological considerations prioritized the recovery, storage, and reuse of rainwater from rooftops and nearby green areas, and the reuse of gray water, with part of the purified water being repurposed for non-potable uses and part for technical systems. After an initial filtration, specific systems equipped with heat exchangers, connected to the centralized heating system or to evaporative cooling towers, recover a portion of the energy, reducing both winter and summer climate control consumption.

The optimization of energy performance, combined with the integration of both passive and active solutions tailored to each scenario and approach, stems from the type of solar installation, favoring integrated photovoltaics in roofs or façades. To further reduce the embodied carbon of photovoltaic panels and increase their productivity, innovative photovoltaic systems are experimented with.

Intervention scenarios and technological-environmental design choices

Intervention Scenario 1 introduces additional volumes on the roof, extracted from the existing level. Although it achieves a low level of morphological integration and high recognizability of the intervention, it allows for increased exposure to sunlight throughout the year. The upper floor, completely hollowed out, features a pilotis system made of laminated wood, allowing access to the second level via connections enclosed in a bioclimatic atrium. This atrium facilitates natural cross-ventilation of the spaces, moving air upward to the top, enhancing passive cooling and natural ventilation, and reducing both thermal loads and active system inputs. The building is powered by a new generation photovoltaic system integrated into the roof through ceramic photovoltaic tiles, supplemented by kinetic flooring and a micro-wind system in external areas. The renewable energy systems generate 46,339.51 kWh/year, covering the building's total consumption of 46,157.00 kWh/year, with 11,871.60 kg of CO₂ emissions avoided annually (Fig. 3).

Intervention Scenario 2 introduces volumes within the structure of the existing building, alongside the removal of portions of the structure and preservation of the façade, which is restored to its original state. This approach achieves a medium level of morphological integration and recognizability, derived from maintaining the existing façade while recessing new blocks made of X-LAM and structural glass. This maximizes energy performance by optimizing solar incidence, exposure, and the orientation of integrated photovoltaic systems on the inclined roofs, designed through daylighting and thermodynamic modeling. The roof includes an air gap for natural ventilation and passive cooling through upward air movement. The photovoltaic system, made of colored glass photovoltaic tiles on the inclined roof facing south (azimuth 2 degrees, tilt 15 degrees), produces 65,460.32 kWh/year, covering the building's total consumption of 54,054.00 kWh/year. The 21% surplus is fed into the grid and used for powering the surrounding park and buildings. The avoided CO₂ emissions total 13,902.70 kg of CO₂/year.

Intervention Scenario 3 proposes new volumes added to the roof while maintaining the existing building structure, creating a superimposed layer that alters the original configuration. The low level of morphological integration and corresponding high level of recognizability make the intervention stand out by introducing material contrasts to highlight the modernization and adaptation to

contemporary needs. The building's passive and active behaviors are optimized through the analysis of solar and luminous reflectance factors and the daylight factor (Fig. 4). A glazed, openable buffer zone ensures year-round natural ventilation. From a technical perspective, the south-facing sloped roofs are equipped with new generation ceramic photovoltaic tiles, producing 88,704.46 kWh/year, covering 80% of the building's total consumption of 110,782.00 kWh/year. Avoided CO₂ emissions amount to 22,814.79 kg of CO₂/year.

Intervention Scenario 4 integrates new volumes on the roof and façade, altering the configuration of the pre-existing building. This scenario achieves a low level of morphological integration and a high level of recognizability due to modifications in roof type and façade morphology. A bioclimatic atrium is introduced, promoting natural cross-ventilation in adjacent spaces and moving the air upward, utilizing the chimney effect to improve thermo-hygrometric comfort and reduce summer thermal loads and active system inputs. The original collapsed roof has been converted into a green roof, interrupted at the bioclimatic atrium. Active systems include opaque colored glass photovoltaic panels integrated into the green roof. Based on energy simulations, additional transparent photovoltaic tiles were installed on the inclined roof of the atrium, alongside a textile façade at the second level, which, on favorable sides, is experimentally replaced by a DSSC (dye-sensitized solar cell) photovoltaic covering. The combination of three different solar photovoltaic technologies produces 52,004.36 kWh/year, covering 62% of the building's total consumption of 83,878.00 kWh/year. Avoided CO₂ emissions total 13,375.52 kg of CO₂/year.

Intervention Scenario 5 adds new internal volumes as a 'box in the box,' combining new surfaces on the façade that alter the original configuration. This scenario has a low level of morphological integration and high recognizability due to the alternating use of wooden elements and glass surfaces. Here, wood is used not only structurally but also as a façade cladding for the second level. Following the 'box in the box' logic, each space is disconnected from the others and covered by an inverted glazed pyramid prism, channeling rainwater and natural light into small central patios. The prism covers are made of integrated transparent photovoltaic panels, producing 37,707.38 kWh/year, covering 53% of the building's total consumption of 71,146.00 kWh/year. Avoided CO₂ emissions amount to 9,698.34 kg of CO₂/year (Fig. 5).

Discussion of the results

The five intervention scenarios for the renovation of the Ex Filanda building each present a specific approach to improving energy efficiency and environmental performance. These are compared below based on gradients of morphological integration, recognizability, energy performance, and CO₂ savings, with a focus on climate neutrality (Tab. 01, Tab. 02, Fig. 6).

The scenarios differ according to the design approaches chosen for integration with the historical context and the solutions adopted to enhance energy performance. Scenario 2 stands out for its excellent balance between integration and performance, generating an energy surplus. Scenario 3 excels in achieving the highest CO₂ savings, while Scenario 1 is energy self-sufficient. Scenario 4 combines innovative solutions with a significant impact on morphology, whereas Scenario 5 opts for a strongly modern renovation but is less efficient in terms of energy performance.

Conclusions

The implications of the research are multiple and significant, from socio-cultural, to scientific - thanks to the advancement of knowledge and strong technological innovation -, and environmental, in relation to the opportunity of upgrading historic buildings to Nearly Zero Energy Historic Buildings (nZEHB), with the goal of Carbon Neutrality. Research beneficiaries, from architects to policy makers, can benefit from new knowledge, technologies and approaches for the climate neutrality of historic buildings in urban contexts.

The research interprets the built heritage as a strategic resource for the synergetic integration of passive behaviour and active systems, for the control of indoor and outdoor thermo-hygrometric comfort and the production of renewable energy, through a circular use of materials and water resources. However, the implementation of such strategies is a challenge in light of outdated regulations. Furthermore, the combination of multiple passive and active strategies requires a complex level of planning and management. Therefore, future research development is expected to use advanced predictive models and digital simulations to optimize passive and active strategies by predicting building performance under different climate scenarios and operating conditions.

Notes

¹ Source: BPIE - Buildings Performance Institute Europe, www.bpie.eu.

² See the Competition website with the winning project by IT'S Studio: <https://www.c40reinventingcities.org/en/professionals/winning-projects/ex-filanda-1375.html>.

References

- Ahmed, N.M., Altamura, P., Giampaolletti, M., Fahd, A. H., Abdelaziz Farouk, A. M. (2024). Optimizing human thermal comfort and mitigating the urban heat island effect on public open spaces in Rome, Italy through sustainable design strategies. *Sci Rep* 14, 19931. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-65794-8>
- Ambrogio, K., Zuppiroli, M. (2013), *Energia e restauro. Il miglioramento dell'efficienza energetica in sistemi aggregati di edilizia pre-industriale, tra istanze conservative e prestazionali*, FrancoAngeli, Milano.
- Azouz, M., Elariane, S. (2023). Towards energy efficiency: retrofitting existing office buildings using smart technologies. *J. Eng. Appl. Sci.* 70, 147. <https://doi.org/10.1186/s44147-023-00327-0>
- Baiani S., Altamura P., Lucchi E., Romano G. (2023), "Integration of solar technologies in historical buildings: construction of an evolutionary framework of good practices", in *Mediterranean Architecture and the Green-Digital Transition. Selected Papers from the World Renewable Energy Congress Med Green Forum 2022*, Springer Nature, London.
- Baiani S., Altamura P., Turchetti G., Romano G. (2024), "Energy transition e circular adaptive reuse del patrimonio industriale. Il caso dell'Ex Snia a Roma | Energy transition and circular adaptive reuse of industrial heritage. The case of the Ex Snia in Rome", in AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design, Volume 15, pp. 190-203.
- Baiani, S., Altamura, P., Turchetti, G. (2024), "Circular Contemporary Heritage. Design Experimentations on Conservation and Reuse Aiming at Material Resource Efficiency and Decarbonization", in Bartolomei, C., Ippolito, A., Vizioli, S.H.T. (eds) *Contemporary Heritage Lexicon*, PP. 435-478. Springer Tracts in Civil Engineering. Springer, Cham.
- Barbieri, P. (2020), Il significato delle città, in *Eco Web Town. Journal of Sustainable Design*, Volume 22, ISSN 2039-2656.
- Buda, A. (2023), *Conservazione ed efficienza energetica dell'edilizia storica. Uno strumento operativo per le scelte di progetto*, Firenze, Nardini Editore.
- Cillari, G., Fantozzi, F., Franco, A. (2021), *Passive Solar Solutions for Buildings: Criteria and*

- Guidelines for a Synergistic Design. *Appl. Sci.*, 11, 376. <https://doi.org/10.3390/app11010376>
- European Commission (2019), Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions 'A *Renovation Wave for Europe – Greening our buildings, creating jobs, improving lives*', document 52020DC0662, 662 final.
- European Commission (2020), Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions 'A *new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe*', document 52020DC0098, 98 final.
- European Commission (2021), Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions 'Fit for 55 – *delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality*', document 52021DC0550, 550 final.
- Foster, G. (2020), Circular economy strategies for adaptive reuse of cultural heritage buildings to reduce environmental impacts, Resources, in *Conservation & Recycling*, 152, doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104507. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61245-9_20
- Hastings, R. (2013). Passive Solar Heating in Built Environment. In: Loftness, V., Haase, D. (eds) *Sustainable Built Environments*. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5828-9_372
- Jonasson, J., Faith-Ell, C., Carlman, I. *et al.* The environmental performance of zero-emission buildings in a fossil-free energy system. *Energy Efficiency* 17, 75 (2024). <https://doi.org/10.1007/s12053-024-10253-6>
- Knuutila, M., Kosonen, A., Jaatinen-Värri, A. *et al.* Profitability comparison of active and passive energy efficiency improvements in public buildings. *Energy Efficiency* 15, 38 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12053-022-10046-9>
- Lucchi E., Baiani S., Altamura, P. (2023), "Design criteria for the integration of active solar technologies in the historic built environment: Taxonomy of international recommendations", In *Energy and Buildings*, Volume 278, pp. 112651- 112667, ISSN 0378-7788.
- Petraroia, P., Sessa, V. M. (2023), Miglioramento energetico e conservazione del patrimonio culturale, in *Aedon*, n. 3.
- Polo López, C.S., Lucchi, E., Leonardi, E., Durante, A., Schmidt, A., Curtis, R. (2021), Risk benefit assessment scheme for renewable solar solutions in traditional and historic buildings, in *Sustainability*, 13, 5246.
- Pracchi, V., Lucchi, E. (2017), *Efficienza energetica e patrimonio costruito*, Maggioli, Sant'Arcangelo di Romagna, pp. 70-72.

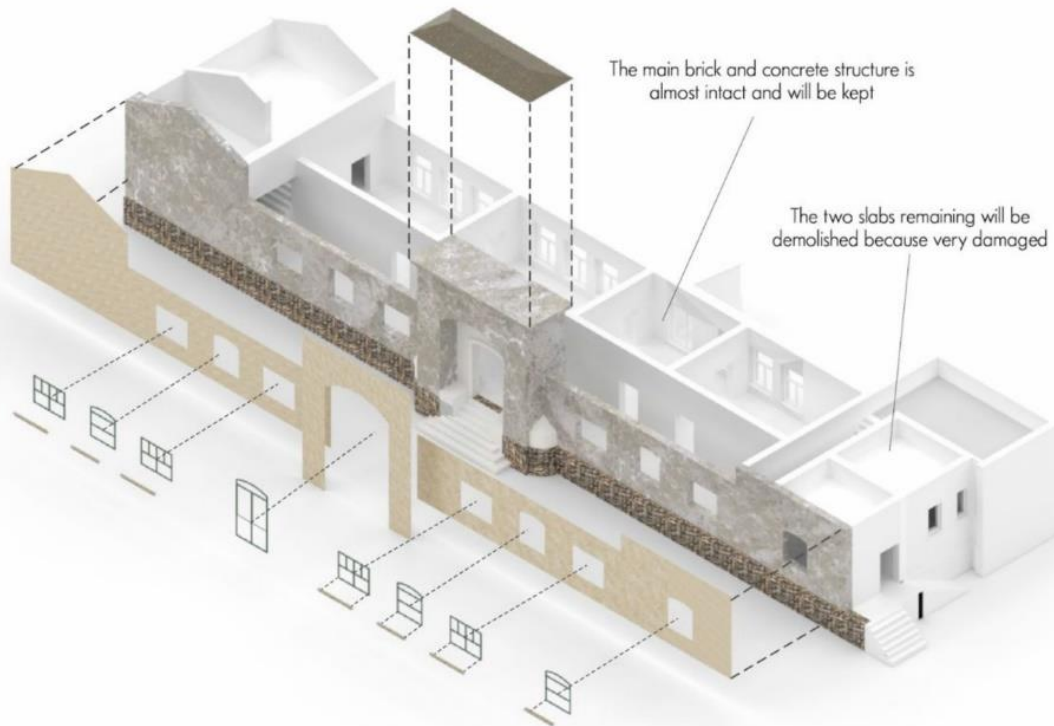
Images

Fig. 1

MAIN FACADE OF THE EX FILANDA



AXONOMETRIC VIEW OF THE CURRENT STATUS OF THE BUILDING



STREET VIEW BEFORE FIRES IN 2014



AERIAL PHOTO POST FIRES

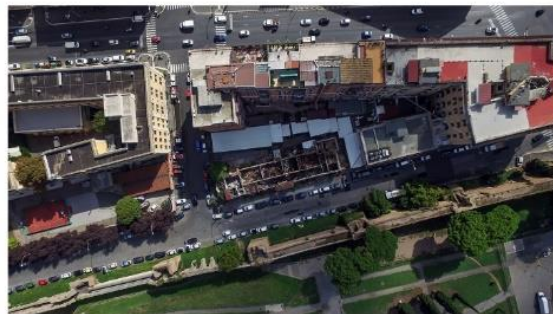


Fig. 2

Bioclimatic System

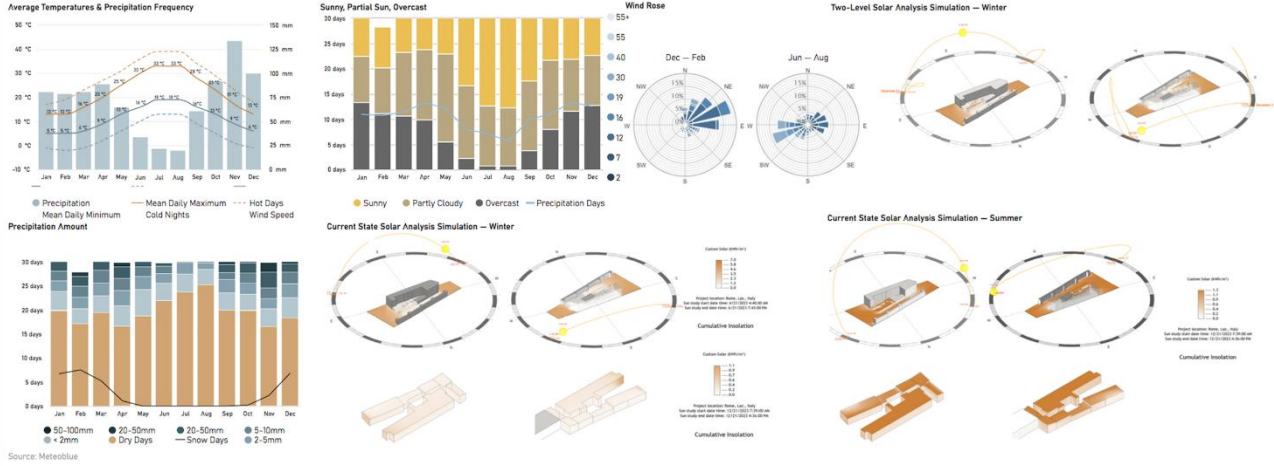


Fig. 3

ENVIRONMENTAL SECTION A-A'

Legend

- ⊕ Barrier for External Noise Pollution
- ⊖ Non-potable Distribution
- ⚡ Energy Collection
- ☔ Rainwater Collection
- 🔥 Heat Pump System
- Connection to Reservoir
- Connection to Battery/Device
- ➔ Passive Ventilation

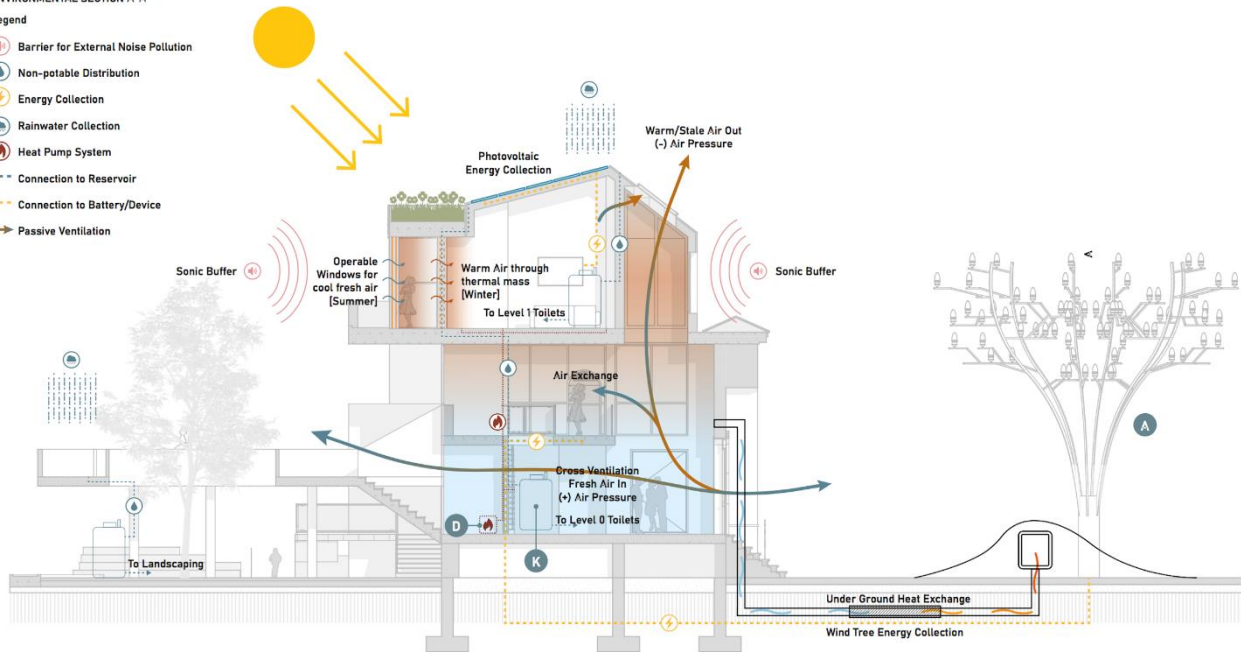
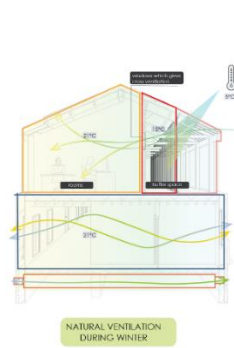
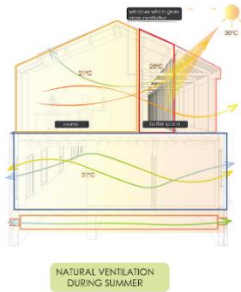
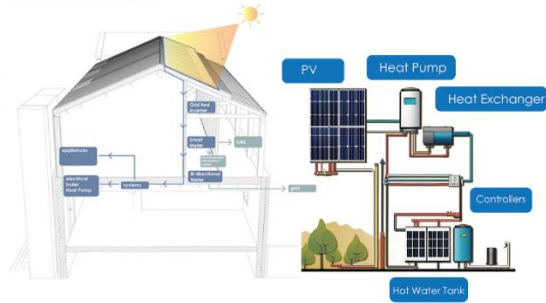


Fig. 4

PASSIVE TECHNOLOGIES



ACTIVE SYSTEMS



DAYLIGHT FACTOR ANALYSIS

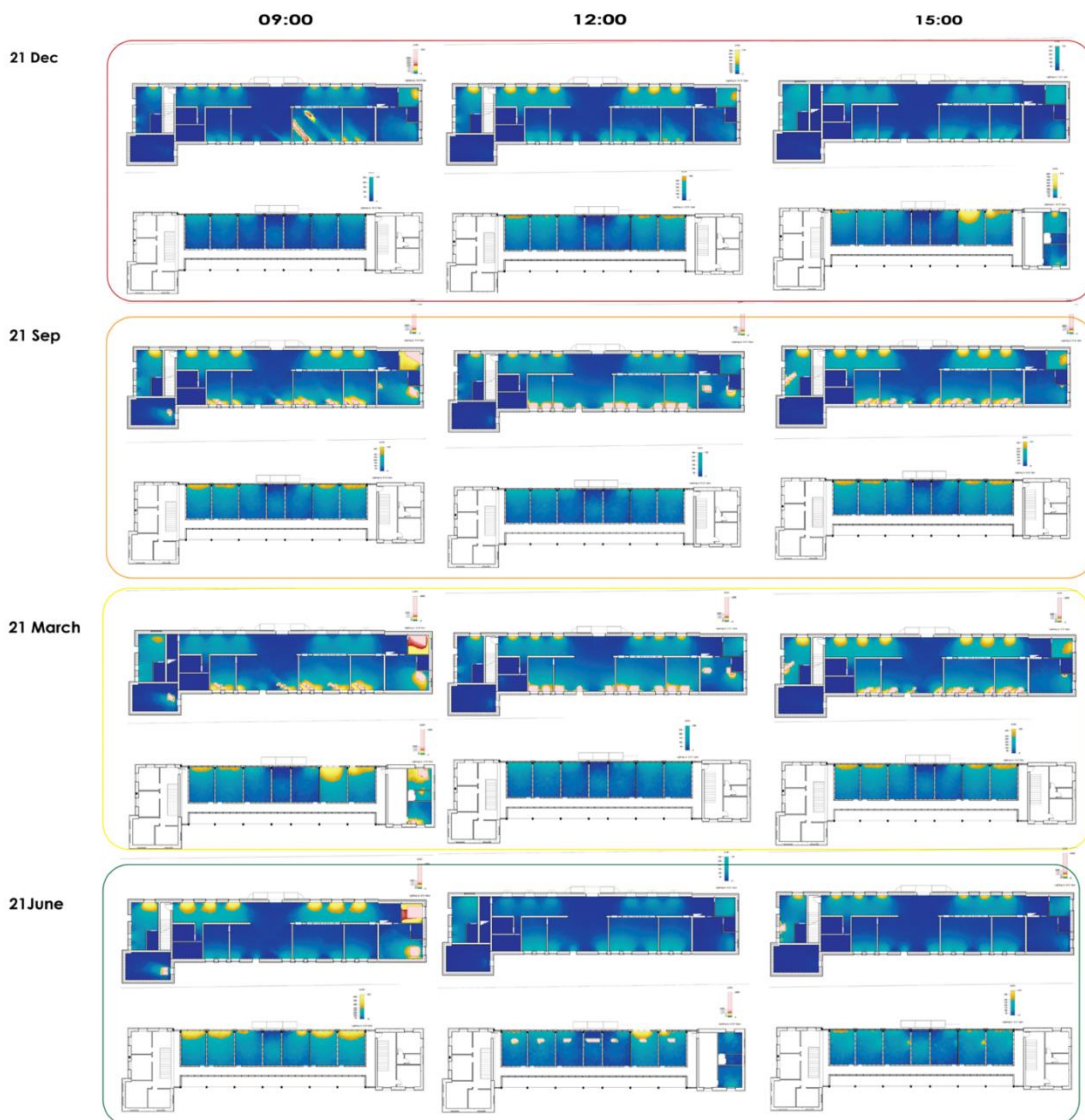


Fig. 5

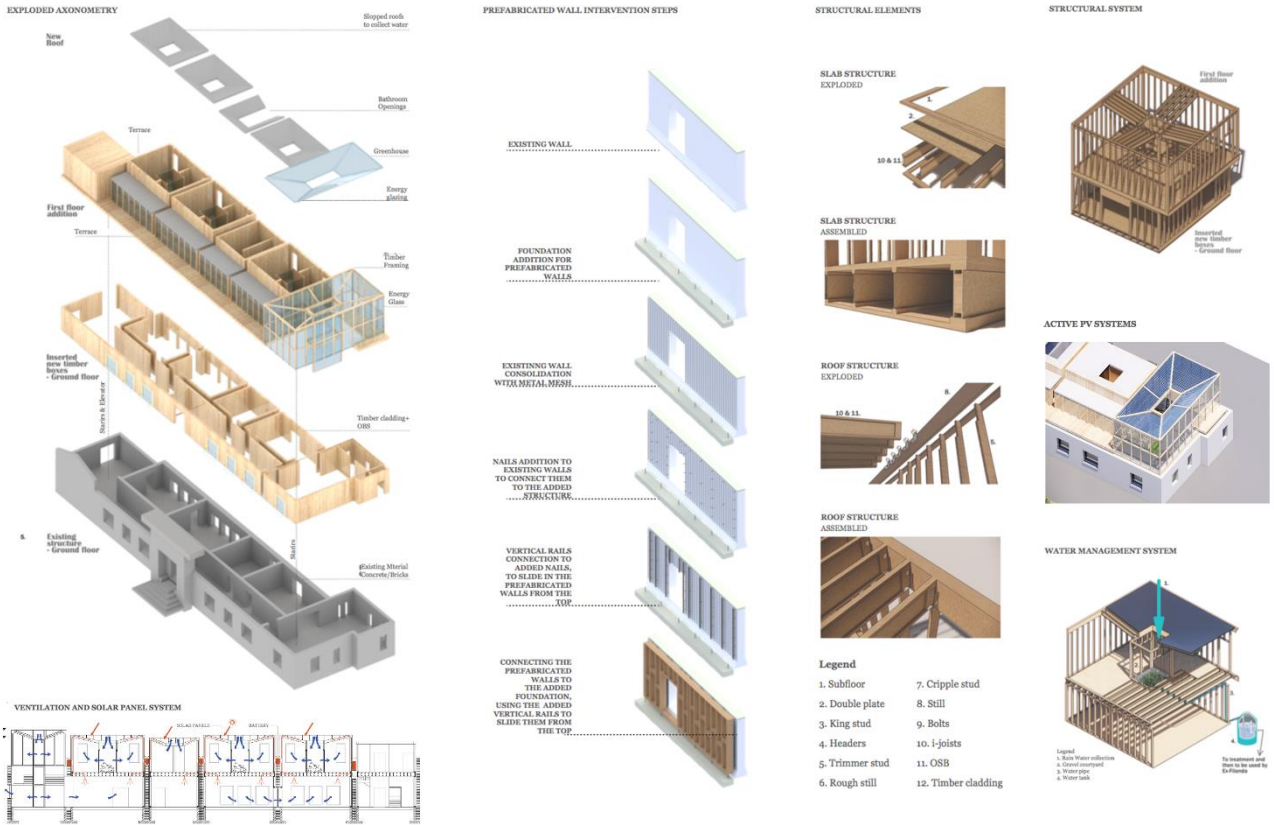


Table 1

	Level of morphological integration	Level of recognisability of the intervention	Level of integration of solar technologies
Scenario 1	low	high	high
Scenario 2	medium	medium	high

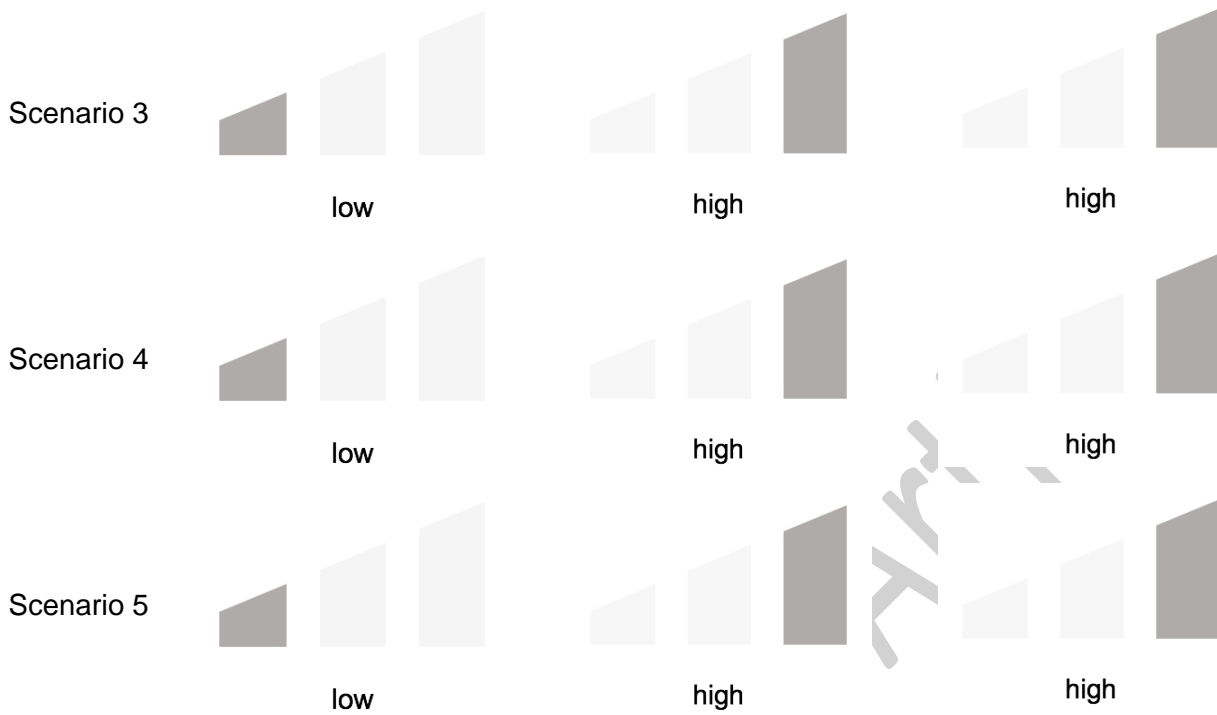
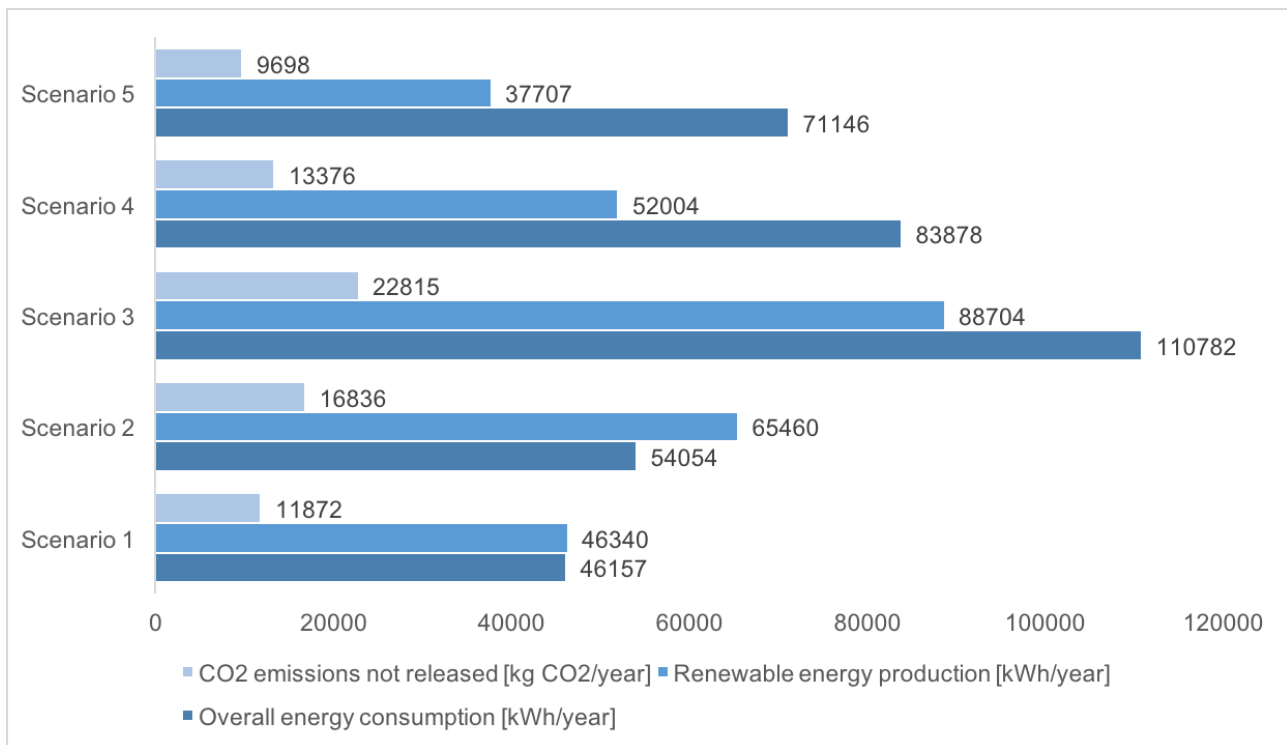


Table 2

	Overall energy consumption [kWh/year]	Renewable energy production [kWh/year]	Energy consumption covered by RES [%]	CO ₂ emissions not released [kg CO ₂ /year]
Scenario 1	46,157.00	46,339.51	100	11,871.60
Scenario 2	54,054.00	65,460.32	121	16,836.31
Scenario 3	110,782.00	88,704.46	80	22,814.79
Scenario 4	83,878.00	52,004.36	62	13,375.52
Scenario 5	71,146.00	37,707.38	53	9,698.34

Fig. 6



Captions

Fig. 1 - Current state of the Ex Filanda building: main façade, axonometric view and photographic survey of conditions before and after the 2014 fire (credits: RG with S. Win Pe, Y. Becquart, B. Tojiboev, P. Henning).

Fig. 2 - Analysis of climate data and simulation of sun path and shadows (credits: RG with M. R. Abiri, W. Demiss, C. Moretti, S. Moyano)

Fig. 3 - Environmental section summarising passive bioclimatic design actions and active intervention strategies on the Ex Filanda building (credits: RG with M. R. Abiri, W. Demiss, C. Moretti, S. Moyano)

Fig. 4 - Synthesis of passive bioclimatic technologies of natural ventilation and active systems and Daylight Factor Analysis (credits: RG with A. Karavolia)

Fig. 5 - Design solution for the redevelopment of the Ex Filanda building in a technological-environmental perspective according to the 'box in the box' addition design approach (credits: RG with M. Abdulghani)

Fig. 6 – Comparative chart in terms of overall energy consumption, energy production from RES and CO₂ emissions not released into the atmosphere for each scenario.

Tab. 01 - Comparison of integration and recognisability gradients for each scenario.

Tab. 02 - Comparative table of results in terms of overall energy consumption, energy production from RES, percentage of energy consumption covered by RES and CO₂ emissions not released into the atmosphere for each scenario.

Acknowledgments

The contribution presents the outcomes of research and experimentation activities carried out in continuity by the RG in particular in the following projects: University Research 'NZEHB. The historical building in the scenario of the ecological and energy transition. Circular approach, energy improvement, adaptive reuse', 2022-24, P.I. S. Baiani; GoR P. Altamura, G. Turchetti, G. Romano; PNRR research 'NEST', PE 2, 2. a 'Energy Scenarios of the Future - Green Energy of the Future', SPOKE 8 'Final use optimisation, sustainability & resilience in Energy supply chain', P.I. Prof. F. Tucci, 'Sapienza' University of Rome, GdR S. Baiani; D. D'Olimpio; G. Romano (RTDA PNRR).

Just Accepted Article

Circolarità delle risorse, energia solare e bioclimatica per l'edificio storico Climate Neutral

Serena Baiani¹, <https://orcid.org/0000-0002-1975-3251>

Paola Altamura¹, <https://orcid.org/0000-0001-7317-1036>

Giada Romano¹, <https://orcid.org/0000-0003-0344-8153>

¹ Dipartimento di Pianificazione Design Tecnologia dell'Architettura, "Sapienza" Università di Roma, Italia

Primary Contact: Serena Baiani, serena.baiani@uniroma1.it

Abstract

Il contributo riporta gli esiti di attività di ricerca sulla riqualificazione del patrimonio costruito storico in contesto urbano, ambito di indagine strategico e sfidante per conseguire neutralità climatica, sostenibilità e salvaguardia delle risorse a lungo termine. Obiettivo della ricerca è la messa a punto di un modello di intervento replicabile e adattabile rivolto specificatamente all'edificio storico, che combini, secondo l'approccio Cradle to Cradle, tecnologie e sistemi innovativi circolari ed ecocompatibili, tra cui sistemi bioclimatici passivi e integrati attivi per la produzione energetica da fonte solare. Tra i casi pilota della ricerca, il contributo descrive la sperimentazione per scenari e gradienti di integrazione e trasformazione dell'esistente sull'Ex Filanda a Roma.

Parole chiave: resource circularity; solar energy; bioclimatic passive systems; heritage buildings; climate neutral.

Introduzione

Il raggiungimento dell'obiettivo di 'Fit for 55' (EC, 2021) del taglio delle emissioni climalteranti del 55% entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990, e ancor più di quello della neutralità climatica al 2050, richiedono necessariamente che i sistemi energetici nell'EU siano convertiti su fonti rinnovabili, che l'efficientamento del patrimonio edilizio contribuisca alla riduzione di consumi ed emissioni e che si incrementi il livello di *resource efficiency* (EC, 2019 & 2020). Il conseguimento della neutralità climatica dell'ambiente costruito in ambito urbano dipende quindi da un lato dall'innovazione in ambito energetico e dall'altro da una concreta applicazione del paradigma circolare ai diversi flussi di risorse, attraverso il progetto tecnologico-ambientale. In questo contesto, il patrimonio costruito storico rappresenta per la ricerca un ambito di indagine strategico e sfidante per conseguire

neutralità climatica, sostenibilità e salvaguardia delle risorse a lungo termine, considerando che gli edifici costruiti prima del 1960 rappresentano circa il 37% del totale dell'Europa mediterranea¹, la cui analisi del comportamento energetico dimostra una condizione di elevata richiesta energetica, in riferimento alle attuali normative (Lucchi et al., 2023).

Iniziative quali la stesura del protocollo LEED specifico per il Patrimonio storico (GBC Historic Building, 2018), punto di convergenza operativa tra i principi della sostenibilità ambientale dello standard LEED e quelli del restauro, hanno evidenziato l'esigenza di un intervento interdisciplinare per raggiungere e valutare elevati livelli di sostenibilità degli interventi di conservazione, riqualificazione, recupero e miglioramento energetico di edifici storici. Più di recente, il riferimento esplicito agli interventi di restauro come ambito di applicazione dei Criteri Ambientali Minimi del Green Public Procurement per l'Edilizia (aggiornati con DM 23/06/2022) ha sancito l'obbligatorietà di implementazione dei previsti criteri di Circular Design (materiali di recupero, riciclati, disassemblabilità), e di quelli energetici ed ecologici anche all'edificio storico, sebbene con possibilità di deroga sui singoli criteri ambientali non compatibili con gli interventi di conservazione. Appare sempre più strategica quindi la riflessione sulle strategie, modalità e tecnologie di intervento mirate e compatibili, verso l'edificio storico Climate Neutral.

Stato dell'arte e obiettivi della ricerca

Il miglioramento dell'efficienza energetica nell'edilizia storica non può prescindere da un'attenzione alle finalità di tutela del processo di conservazione degli assetti materiali, integrando le nuove esigenze per il raggiungimento della neutralità climatica (Ambrogio & Zuppiroli, 2013). Se in una prima fase, negli anni '90, è emersa l'esigenza di integrazione impiantistica nell'edificio storico sulla base della struttura tipologica dello stesso, integrando gli impianti in cavedi, camini ed altri spazi esistenti per limitare l'invasività degli interventi, il passaggio alle FER ha modificato l'approccio, prevedendo l'integrazione architettonica, energetica e tecnologica (Lucchi et al. 2023). Il concetto di integrazione di energie rinnovabili è stato così progressivamente declinato sui beni vincolati (Baiani et al., 2023). La specificità dell'edificio storico richiede infatti che i criteri principali che orientano il progetto siano tutela e conoscenza del bene. Nello sviluppare poi le soluzioni tecnologico-costruttive, gli aspetti chiave riguardano la compatibilità e reversibilità dell'intervento, oltre alla sua durabilità nel tempo e all'effettiva produzione energetica. Principi che rispondono pienamente anche agli obiettivi di circolarità e *resource efficiency*, nel garantire la possibilità di successivi cicli d'uso dell'edificio e dei suoi componenti (Foster, 2020), con progressivo aumento del valore del bene, in ottica di *upcycling*. L'integrazione delle tecnologie solari rappresenta al contempo una strategia che consente di ridurre l'infrastrutturazione nel contesto dell'edificio storico, e permette di migliorarne le interazioni con l'ambiente, in linea con l'approccio Cradle to Cradle.

In questo senso, la parola chiave per l'intervento sull'*historic building* è proprio "miglioramento", in luogo di "adeguamento" (Pracchi & Lucchi, 2017): è necessario evitare di mirare a target di efficientamento pensati per il patrimonio edilizio comune, e studiare attentamente la natura materica e strutturale, caso per caso, per definire le soluzioni più appropriate per ridurre il fabbisogno energetico da fonti fossili dell'edificio e, laddove possibile, renderlo in grado di produrre energia, senza alterarne le caratteristiche peculiari, arrivando potenzialmente ad inserirlo in un più ampio network attraverso comunità energetiche rinnovabili (Petraroria & Sessa, 2023; Buda, 2023).

Obiettivo della ricerca è dunque la messa a punto di un modello di intervento - replicabile in contesto urbano - rivolto specificatamente alla riqualificazione dell'edificio storico, che preveda la combinazione, secondo l'approccio Cradle to Cradle, di tecnologie e sistemi innovativi circolari orientati al paradigma zero energia, emissioni e rifiuti, valorizzando le potenzialità di integrazione dei sistemi solari attivi e passivi. Per indirizzare positivamente il comportamento del sistema edificio-ambiente, è necessario studiare il comportamento in termini di distribuzione del calore dell'edificio storico, sviluppare, valutare e applicare modelli di sistemi passivi ad alte prestazioni per il riscaldamento, il raffrescamento passivo e la ventilazione naturale (Hastings, 2013; Cillari, 2021), integrando quindi i sistemi bioclimatici con tecnologie e sistemi attivi volti a ridurre le emissioni di carbonio e a migliorare l'efficienza e ridurre i consumi energetici (Jonasson, J., 2024). L'integrazione di questi sistemi e tecnologie, insieme a soluzioni che aumentino la resilienza e promuovano la circolarità delle risorse naturali e materiali nell'architettura, contribuisce a ridurre l'*energy demand* e le emissioni di carbonio e ad aumentare l'efficienza energetica e la flessibilità nei consumi finali (Knuutila, 2022; Azouz, 2023).

Metodologia della ricerca

L'analisi della reportistica internazionale e della letteratura scientifica ha permesso di definire un quadro integrato di strategie di intervento per l'edificio storico Climate Neutral in modo da definire un modello replicabile, che utilizzi in modo interrelato i comportamenti bioclimatici passivi delle tipologie edilizie consolidate ed integri sistemi attivi innovativi per il perseguimento di benefici ambientali, sociali ed economici.

La ricerca ha indagato, a partire dall'approccio Cradle to Cradle, strategie e soluzioni tecniche per il miglioramento della resilienza e l'aumento dell'adattabilità del costruito storico, valorizzando i flussi di risorse naturali e materiche, garantendo la riduzione delle emissioni di carbonio, il miglioramento della qualità ambientale e del comfort termoisometrico, attraverso l'aumento di efficienza e flessibilità negli usi finali dell'energia, con la riduzione dell'*energy demand*.

La selezione delle soluzioni di intervento, compatibili con l'esistente, deriva dall'applicazione di criteri, in parte già introdotti e consolidati nella sperimentazione (Baiani et al., 2024), per valutare gli effetti ambientali in ottica di ciclo di vita, quantificando le componenti materiali (materie prime seconde, componenti di riuso, energia e carbonio incorporati nei materiali), energetiche (accumulo, stoccaggio e riuso energetico, produzione energetica da fonte rinnovabile) ed ecologiche (accumulo, stoccaggio e riuso di acque meteoriche, scarti organici, reflui). La fase di valutazione dei comportamenti passivi dell'involucro storico per il raggiungimento dell'obiettivo di *climate neutrality*, attraverso la riduzione delle emissioni di CO₂, si incentra sulla misura: della trasmittanza termica del sistema costruttivo originario per la selezione dei sistemi tecnici di isolamento; della riflettanza solare e luminosa, per la riduzione dell'eventuale surriscaldamento e il miglioramento del comfort visivo, riducendo il fabbisogno energetico per l'illuminazione artificiale, correlato al parametro del Daylight Factor; dei carichi termici, invernali ed estivi, per valutare l'efficacia delle soluzioni passive (schermature, sistemi a guadagno solare diretto e indiretto, isolamento termico e ventilazione naturale) nel ridurre i consumi energetici, stagionalmente e globalmente; del calcolo delle emissioni di CO₂ determinate dai consumi energetici, per stimare la riduzione dell'impronta carbonica. Le scelte tecniche sono, quindi, valutate in riferimento al gradiente di integrazione morfologica, di riconoscibilità dell'intervento e di reversibilità del sistema energetico (Baiani et al., 2023),

coerentemente alle caratteristiche morfotipologiche: nuove volumetrie, poste in aderenza o separate, inserite internamente come 'box in the box' o aggiunte in copertura (Baiani et al., 2024). Nel paragrafo successivo si riportano i risultati della sperimentazione sull'edificio della Ex Filanda a Roma, sito in un contesto urbano complesso, selezionato tra i casi pilota della ricerca, al fine di valutare soluzioni che, misurate e calibrate secondo criteri *site-specific*, possono costituire un quadro orientato a circolarità, sostenibilità e resilienza, con significative ricadute sull'intorno.

Risultati e discussione: scenari di intervento sull'edificio dell'Ex Filanda a Roma

Il caso dell'Ex Filanda: inquadramento, contesto e analisi degli aspetti materici e climatici

L'Ex Filanda a, a Roma, realizzata nel 1926, si sviluppa lungo Viale Castrense, in un ambito urbano compreso tra le Mura Aureliane e gli isolati di via La Spezia, sui resti del Sessorium. L'edificio, in muratura con solai in legno monopiano e con due ali laterali a doppio livello, originariamente destinata ad ospitare un istituto educativo per bambini svantaggiati, è successivamente trasformato in istituto di artigianato, i cui resti sono l'effetto di tre incendi del 2015 (Fig. 1). L'inserimento dell'area tra i siti del Concorso internazionale Reinventing Cities² a cui Roma ha aderito come membro del C40, ha permesso la definizione di un complesso progetto di riqualificazione dell'esistente, con la ricostruzione della copertura e un consentito incremento di superficie utile del 30%, ovvero di un secondo livello completo, in stretta integrazione con Viale Castrense e i Giardini Carlo Felice (Barbieri, 2020).

Un'attenta analisi climatico-ambientale svolta mediante indagine diretta e modellazione tridimensionale, ha fatto emergere la buona esposizione solare durante i mesi estivi, pur in condizione sfavorevole per il fenomeno dell'isola urbana di calore (Ahmed et al., 2024) anche a causa della notevole massa termica delle Mura Aureliane e l'esposizione solare minima durante i mesi invernali (dicembre-marzo) con ombre perenni sul lato sud e sud-ovest (Fig. 2). Dalle simulazioni fluido-dinamiche è evidente l'effetto *channelling* su Viale Castrense, che può essere sfruttato per il controllo microclimatico in fase estiva e per la produzione energetica, integrando dispositivi microeolici.

Dal quadro delineato deriva la definizione di diversi approcci, in ottica di riqualificazione *climate neutral*, per la riduzione dell'impatto ambientale dell'edificio sia attraverso la circolarità delle risorse materiali e naturali che attraverso l'ottimizzazione delle performance energetiche dell'edificio, con particolare riferimento alle prestazioni attive e passive dell'involucro edilizio.

La riflessione sugli aspetti materici ha permesso di valutare come prioritaria e compatibile la scelta del legno (talvolta in legno lamellare, in X-LAM o in LVL) per le aggiunte, anche strutturali, in modo da garantire la completa reversibilità e disassemblabilità dei sistemi e ridurre l'*embodied carbon*.

Gli aspetti ecologici hanno focalizzato le priorità sul recupero, stoccaggio e riuso delle acque meteoriche dalle coperture e dalle aree verdi limitrofe; sulla componente grigia dei reflui per il reimpiego dell'acqua depurata in parte per usi non sanitari e in parte per usi impiantistici. Dopo una prima filtrazione, specifici impianti dotati di scambiatori di calore, collegati con il sistema centralizzato di riscaldamento o con torri evaporative per il raffrescamento, riescono a recuperare parte dell'energia diminuendo i consumi della climatizzazione invernale ed estiva.

L'ottimizzazione delle performance energetiche, in aggiunta all'integrazione delle soluzioni passive e attive differenziate, scenario per scenario, in base ai differenti approcci, deriva dalla tipologia di impianto solare, che privilegia il fotovoltaico integrato nelle coperture o in facciata, e – per ridurre

l'*embodied carbon* dei pannelli fotovoltaici ed aumentarne la produttività, sperimenta sistemi di fotovoltaico innovativi.

Scenari di intervento e scelte tecnologico-ambientali

Lo scenario di intervento 1 inserisce volumetrie, sottratte dal livello esistente, in copertura: pur con un livello basso di integrazione morfologica e alta riconoscibilità dell'intervento, permette di incrementare l'esposizione all'irraggiamento durante tutte le stagioni. Il piano superiore, completamente svuotato, con un piano pilotis realizzato in legno lamellare, permette di accedere al secondo livello tramite collegamenti racchiusi in un atrio bioclimatico, che convoglia la ventilazione naturale incrociata degli ambienti e la sposta, con moto ascendente, in sommità, migliorando le condizioni di raffrescamento passivo e di ventilazione naturale, riducendo i carichi termici gli apporti impiantistici attivi. L'edificio è alimentato da impianto fotovoltaico di nuova generazione, integrato in copertura mediante tegole fotovoltaiche in ceramica, supportato dalle pavimentazioni cinetiche e da impianto micro-eolico nelle aree esterne. Le soluzioni impiantistiche da fonte rinnovabile producono 46.339,51 kWh/anno, a fronte di un consumo di 46.157,00 kWh/anno, che viene coperto totalmente, e le conseguenti emissioni di CO₂ risparmiate ammontano a 11.871,60 kg di CO₂/anno (Fig. 3).

Lo scenario di intervento 2 inserisce volumetrie nella struttura dell'edificio preesistente, al quale si affianca una sottrazione per separazione e il mantenimento della superficie di facciata, che viene riportata allo stadio originario. Raggiunge un livello medio di integrazione morfologica e riconoscibilità dell'intervento, che deriva dal mantenimento della facciata esistente con l'arretramento dei nuovi blocchi in X-LAM e vetro strutturale, massimizzando le prestazioni energetiche per l'ottimizzazione dei parametri di incidenza solare, esposizione e orientamento del fotovoltaico integrato nelle falde inclinate, progettate attraverso la modellazione dell'illuminazione diurna e della termodinamica. La copertura ha una intercapedine aerata per la ventilazione naturale e il raffrescamento passivo per moto ascendente dell'aria. L'impianto fotovoltaico realizzato con tegole fotovoltaiche di vetro colorato di nuova generazione, integrato nella copertura inclinata rivolta a sud (azimuth 2 gradi - tilt 15 gradi), produce 65.460,32 kWh/anno a fronte di un consumo di 54.054,00 kWh/anno, che viene coperto totalmente. Il surplus del 21% viene inserito in rete e utilizzato per l'approvvigionamento elettrico delle aree a parco e degli edifici circostanti. Le emissioni di CO₂ non emesse in atmosfera ammontano a 13.902,70 kg di CO₂/anno.

Lo scenario di intervento 3 propone nuove volumetrie, mantenendo la struttura dell'edificio, aggiunte in copertura, realizzando una sovrapposizione che modifica la configurazione originaria. Il basso livello di integrazione morfologica e il corrispondente alto livello di riconoscibilità dell'intervento, permette di mantenere invariata la morfologia originaria inserendo contrasti materici per rendere riconoscibile l'intervento di riqualificazione e di adattamento alle esigenze contemporanee.

I comportamenti passivi ed attivi dell'edificio sono valorizzati attraverso l'analisi dei fattori di riflettanza solare e luminosa e del fattore di luce diurna (Fig. 4). L'inserimento di una *buffer zone*, vetrata e apribile, garantisce la ventilazione naturale durante l'anno. Dal punto di vista impiantistico, sulle falde a sud delle coperture inclinate sono integrate tegole fotovoltaiche di ceramica di nuova generazione che garantiscono una produzione pari a 88.704,46 kWh/anno a fronte di un consumo dell'edificio di 110.782,00 kWh/anno, che viene coperto per l'80%. Le emissioni di CO₂ non emesse in atmosfera ammontano a 22.814,79 kg di CO₂/anno.

Lo scenario di intervento 4 integra nuove volumetrie in copertura e in facciata, modificando la configurazione dell'edificio preesistente. Si raggiunge un basso livello di integrazione morfologica, un alto livello di riconoscibilità dell'intervento, per la modifica della tipologia e della morfologia di copertura e delle facciate. È inserito un atrio bioclimatico che favorisce la ventilazione naturale incrociata degli ambienti che vi si affacciano e la muove ascensionalmente, per effetto camino, in sommità, migliorando le condizioni di comfort termo-igrometrico negli ambienti e riducendo i carichi termici estivi e i conseguenti apporti attivi impiantistici. La copertura dell'esistente, quasi totalmente crollata, è stata trasformata in tetto verde, interrotto in corrispondenza dell'atrio bioclimatico vetrato. In combinazione con i sistemi passivi, dal punto di vista attivo, in una prima fase sono stati inseriti pannelli fotovoltaici in vetro opaco colorato integrati nella copertura verde, ma, sulla base delle simulazioni energetiche, sono state inserite ulteriori tegole fotovoltaiche vetrate trasparenti in corrispondenza della copertura opportunamente inclinata dell'atrio bioclimatico ed inserito un rivestimento tessile in facciata al secondo livello che, nel lato favorevole, a carattere sperimentale, viene sostituito con un rivestimento fotovoltaico in DSSC (dye-sensitized solar cell).

L'insieme delle tre differenti tipologie solari fotovoltaiche garantiscono una produzione pari a 52.004,36 kWh/anno a fronte di un consumo dell'edificio di 83.878,00 kWh/anno, che viene coperto per il 62%. Le emissioni di CO₂ risparmiate ammontano a 13.375,52 kg di CO₂/anno.

Lo scenario di intervento 5 aggiunge nuove volumetrie internamente, come 'box in the box', combinando nuove superfici in facciata che modificano la configurazione originaria. Il basso livello di integrazione morfologica e un alto livello di riconoscibilità dell'intervento per la scelta di elementi lignei alternati alle superfici vetrate. In questo scenario il legno, oltre ad essere strutturale, è utilizzato anche come rivestimento di facciata del secondo livello. Seguendo la logica del 'box in the box', ciascun ambiente è sconnesso dagli altri e coperto da un prisma piramidale rovesciato vetrato che convoglia le acque meteoriche e la luce naturale all'interno di piccoli patii centrali. La copertura dei prismi è realizzata con pannelli fotovoltaici trasparenti integrati che producono 37.707,38 kWh/anno a fronte di un consumo di 71.146,00 kWh/anno, che viene coperto per il 53%. Le emissioni di CO₂ risparmiate ammontano a 9.698,34 kg di CO₂/anno (Fig. 5).

Discussione dei risultati

I cinque scenari di intervento per la riqualificazione dell'edificio dell'Ex Filanda mostrano ciascuno con un approccio specifico per migliorare l'efficienza energetica e le prestazioni ambientali. Di seguito vengono confrontati in base ai gradienti di integrazione morfologica, riconoscibilità, prestazioni energetiche e risparmio di CO₂, in ottica di neutralità climatica (Tab. 01, Tab. 02, Fig. 6). Gli scenari variano in base agli approcci progettuali scelti per l'integrazione con il contesto storico e alle soluzioni adottate per migliorare le prestazioni energetiche. Lo Scenario 2 si distingue per un ottimo equilibrio tra integrazione e prestazioni, generando un surplus energetico. Lo Scenario 3 risalta per il più alto risparmio di CO₂, mentre lo Scenario 1 è energeticamente autosufficiente. Lo Scenario 4 combina soluzioni innovative con un impatto significativo sulla morfologia, mentre lo Scenario 5 opta per una riqualificazione fortemente moderna ma meno efficiente dal punto di vista energetico.

Conclusioni

Le implicazioni della ricerca sono molteplici e significative, da quelle socio-culturali, a quelle scientifiche - grazie all'avanzamento delle conoscenze e alla forte innovazione tecnologica -, e ambientali, in relazione all'opportunità di riqualificazione degli edifici storici in nearly Zero Energy Historic Buildings (*nZEHB*), con l'obiettivo Carbon Neutral. I destinatari, dai tecnici progettisti ai policy makers, possono beneficiare di nuove conoscenze, tecnologie e approcci per la neutralità climatica del patrimonio storico in ambito urbano.

La ricerca intende il patrimonio storico come risorsa strategica per l'integrazione sinergica di comportamento passivo e sistemi attivi, per il controllo del comfort termo-igrometrico indoor e outdoor e la produzione di energia rinnovabile, attraverso un uso circolare dei materiali e della risorsa idrica. Tuttavia, l'implementazione di tali strategie rappresenta una sfida alla luce di normative non aggiornate. Inoltre, la combinazione di molteplici strategie passive e attive richiede un livello pianificatorio e gestionale complesso. Si prevede quindi, per lo sviluppo futuro della ricerca, l'uso di modelli predittivi avanzati e simulazioni digitali per ottimizzare le strategie passive e attive, prevedendo le prestazioni degli edifici in diversi scenari climatici e condizioni operative.

Notes

¹ Fonte: BPIE - Buildings Performance Institute Europe, www.bpie.eu.

² Cfr. sito web del Concorso con il progetto vincitore dello studio IT'S: <https://www.c40reinventingcities.org/en/professionals/winning-projects/ex-filanda-1375.html>.

References

- Ahmed, N.M., Altamura, P., Giampaolletti, M., Fahd, A. H., Abdelaziz Farouk, A. M. (2024). Optimizing human thermal comfort and mitigating the urban heat island effect on public open spaces in Rome, Italy through sustainable design strategies. *Sci Rep* 14, 19931. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-65794-8>
- Ambrogio, K., Zuppiroli, M. (2013), *Energia e restauro. Il miglioramento dell'efficienza energetica in sistemi aggregati di edilizia pre-industriale, tra istanze conservative e prestazionali*, FrancoAngeli, Milano.
- Azouz, M., Elariane, S. (2023). Towards energy efficiency: retrofitting existing office buildings using smart technologies. *J. Eng. Appl. Sci.* 70, 147. <https://doi.org/10.1186/s44147-023-00327-0>
- Baiani S., Altamura P., Lucchi E., Romano G. (2023), "Integration of solar technologies in historical buildings: construction of an evolutionary framework of good practices", in *Mediterranean Architecture and the Green-Digital Transition. Selected Papers from the World Renewable Energy Congress Med Green Forum 2022*, Springer Nature, London.
- Baiani S., Altamura P., Turchetti G., Romano G. (2024), "Energy transition e circular adaptive reuse del patrimonio industriale. Il caso dell'Ex Snia a Roma | Energy transition and circular adaptive reuse of industrial heritage. The case of the Ex Snia in Rome", in AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design, Volume 15, pp. 190-203.
- Baiani, S., Altamura, P., Turchetti, G. (2024), "Circular Contemporary Heritage. Design Experimentations on Conservation and Reuse Aiming at Material Resource Efficiency and Decarbonization", in Bartolomei, C., Ippolito, A., Vizioli, S.H.T. (eds) *Contemporary Heritage Lexicon*, PP. 435-478. Springer Tracts in Civil Engineering. Springer, Cham.
- Barbieri, P. (2020), Il significato delle città, in *Eco Web Town. Journal of Sustainable Design*, Volume 22, ISSN 2039-2656.

- Buda, A. (2023), *Conservazione ed efficienza energetica dell'edilizia storica. Uno strumento operativo per le scelte di progetto*, Firenze, Nardini Editore.
- Cillari, G., Fantozzi, F., Franco, A. (2021), Passive Solar Solutions for Buildings: Criteria and Guidelines for a Synergistic Design. *Appl. Sci.*, 11, 376. <https://doi.org/10.3390/app11010376>
- European Commission (2019), Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions 'A Renovation Wave for Europe – Greening our buildings, creating jobs, improving lives', document 52020DC0662, 662 final.
- European Commission (2020), Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions 'A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe', document 52020DC0098, 98 final.
- European Commission (2021), Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions 'Fit for 55 – delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality', document 52021DC0550, 550 final.
- Foster, G. (2020), Circular economy strategies for adaptive reuse of cultural heritage buildings to reduce environmental impacts, Resources, in *Conservation & Recycling*, 152, doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104507. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61245-9_20
- Hastings, R. (2013). Passive Solar Heating in Built Environment. In: Loftness, V., Haase, D. (eds) Sustainable Built Environments. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5828-9_372
- Jonasson, J., Faith-Ell, C., Carlman, I. *et al.* The environmental performance of zero-emission buildings in a fossil-free energy system. *Energy Efficiency* 17, 75 (2024). <https://doi.org/10.1007/s12053-024-10253-6>
- Knuutila, M., Kosonen, A., Jaatinen-Värri, A. *et al.* Profitability comparison of active and passive energy efficiency improvements in public buildings. *Energy Efficiency* 15, 38 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12053-022-10046-9>
- Lucchi E., Baiani S., Altamura, P. (2023), "Design criteria for the integration of active solar technologies in the historic built environment: Taxonomy of international recommendations", In *Energy and Buildings*, Volume 278, pp. 112651- 112667, ISSN 0378-7788.
- Petraroia, P., Sessa, V. M. (2023), Miglioramento energetico e conservazione del patrimonio culturale, in *Aedon*, n. 3.
- Polo López, C.S., Lucchi, E., Leonardi, E., Durante, A., Schmidt, A., Curtis, R. (2021), Risk benefit assessment scheme for renewable solar solutions in traditional and historic buildings, in *Sustainability*, 13, 5246.
- Pracchi, V., Lucchi, E. (2017), *Efficienza energetica e patrimonio costruito*, Maggioli, Sant'Arcangelo di Romagna, pp. 70-72.

Didascalie

Fig. 1 - Stato attuale dell'edificio dell'Ex Filanda: facciata principale, vista assonometrica e rilievo fotografico delle condizioni prima e dopo l'incendio del 2014 (credits: GdR con S. Win Pe, Y. Becquart, B. Tojiboev, P. Henning)

Fig. 2 - Analisi dei dati climatici e simulazione del soleggiamento dell'edificio (credits: GdR con M. R. Abiri, W. Demiss, C. Moretti, S. Moyano)

Fig. 3 - Sezione ambientale che sintetizza le azioni progettuali bioclimatiche passive e le strategie di intervento attive sull'Ex Filanda (credits: GdR con M. R. Abiri, W. Demiss, C. Moretti, S. Moyano)

Fig. 4 - Sintesi delle tecnologie bioclimatiche passive di ventilazione naturale e dei sistemi attivi e analisi del fattore di luce diurna (credits: GdR con A. Karavolia)

Fig. 5 - Soluzione progettuale di riqualificazione dell'edificio dell'ex Filanda in chiave tecnologica-ambientale secondo l'approccio progettuale di aggiunta volumetrica 'box in the box' (credits: GdR con M. Abdulghani)

Fig. 6 – Grafico comparativo in termini di consumo energetico complessivo, produzione di energia da FER ed emissioni di CO₂ non rilasciate in atmosfera per ogni scenario.

Tab. 01 - Confronto dei gradienti di integrazione e riconoscibilità per ogni scenario.

Tab. 02 - Tabella comparativa dei risultati in termini di consumo energetico complessivo, produzione di energia da FER, percentuale di consumo energetico coperto da FER ed emissioni di CO₂ non rilasciate in atmosfera per ogni scenario.

Acknowledgement

Il contributo sintetizza gli esiti di attività di ricerca e sperimentazione svolte in continuità dal GdR in particolare nei seguenti progetti: Ricerca di Ateneo 'NZEHB. L'edificio storico nello scenario della transizione ecologica ed energetica. Approccio circolare, miglioramento energetico, riuso adattivo', 2022-24, P.I. S. Baiani; GdR P. Altamura, G. Turchetti, G. Romano; Ricerca PNRR 'NEST', PE 2, 2.a "Scenari Energetici del Futuro – Energie verdi del futuro", SPOKE 8 "Final use optimization, sustainability & resilience in Energy supply chain", P.I. Prof. F. Tucci, "Sapienza" Università di Roma, GdR S. Baiani; D. D'Olimpio; G. Romano (RTDA PNRR).