

ARTICLE INFO

Received 08 September 2023
Revised 23 October 2023
Accepted 05 November 2023
Published 31 December 2023

MODULI NEARLY ZERO ENERGY

Modelli abitativi a basso impatto ambientale per la città del futuro

NEARLY ZERO ENERGY MODULES

Low-impact modular housing models for the city of the future

Rosa Romano, Eleonora Di Monte

ABSTRACT

Il paper presenta alcuni degli esiti della ricerca nZEM (nearly Zero Energy Module), finalizzata a promuovere lo sviluppo e la prototipazione di elementi costruttivi modulari e flessibili in platform frame caratterizzati dall'integrazione di soluzioni tecnologiche d'involucro e d'impianto innovative, e realizzati per rispondere a varie esigenze funzionali e tecnico-normative (risparmio ed efficienza energetica, comfort indoor, accessibilità, sicurezza strutturale) nel rispetto della compatibilità ambientale. Il progetto – finanziato dalla regione Toscana nell'ambito dei bandi POR CREO 2020-2024 – è stato sviluppato da un consorzio costituito da organismi di ricerca e aziende, che hanno lavorato in sinergia per promuovere l'ottimizzazione di processo connessa al concetto di Industria 4.0 e al tema dell'economia circolare attraverso l'adozione di processi di 'innovazione aperta'.

This paper presents some of the outcomes of the nZEM (nearly Zero Energy Module) research, aimed at promoting the development and prototyping of modular and flexible building elements in platform frames characterised by the integration of innovative building envelope and system solutions. These modules are designed to address various functional and technical-regulatory needs, including energy savings, energy efficiency, indoor comfort, accessibility, and structural safety while adhering to environmental compatibility. The project, funded by the Tuscany region under the calls for POR CREO 2020-2024, was developed by a consortium comprising research institutions and companies. They collaborated synergistically to promote process optimisation related to the concept of Industry 4.0 and the circular economy theme by adopting open innovation processes.

KEYWORDS

moduli nearly zero energy, platform frame, finestre intelligenti, prefabbricazione, industria 4.0

nZEM, platform frame building system, smart windows, prefabrication, industry 4.0

Rosa Romano, Architect and PhD, is an Associate Professor at the Department of Architecture, University of Florence (Italy). She is a Member of the Scientific Committee of the ABITA Centre and an Independent Expert for the European Community on the topics of bioecological architecture and innovative environmental technologies, with a focus on managing complex building processes and designing innovative envelope components. E-mail: rosa.romano@unifi.it

Eleonora Di Monte, Research Fellow at the University of Florence (Italy), holds a Master's Degree in Bioecological Architecture and Technological Innovation for the Environment from the ABITA Centre. Her research activities and professional practice focus on sustainability in architecture, energy efficiency of buildings, bioclimatics and dynamic energy simulation to evaluate design choices. E-mail: eleonora.dimonte@unifi.it



Il concetto di modularità contraddistingue l'architettura dalle sue origini ai giorni nostri e ne determina le caratteristiche compositive, estetiche e formali, creando una relazione biunivoca tra l'insieme e le sue parti, definibili per l'appunto come moduli e intese come sotto-unità aventi proprietà costruttive comuni, dimensioni uguali o multiple, e progettate per essere accostate con grande varietà e libertà allo scopo di adattarsi alle più diverse esigenze. Declinabile in infinite scale applicative, 'dal cucchiaino alla città' per dirla alla E. N. Rogers, la modularità riemerge con forza nell'era post-industriale e, in anni recenti, diventa paradigma implicito di sostenibilità, spesso associato ai temi della reversibilità, dell'adattabilità e della funzionalità.

Il modulo, in tal senso è identificabile sia con l'intero edificio, considerato parte fondamentale del metabolismo urbano delle città del futuro, sia come insieme energeticamente efficiente, costituito esso stesso da sotto unità modulari identificabili in elementi più o meno complessi e ulteriormente scomponibili in rapporto alle funzioni specifiche che essi devono svolgere. In entrambi i casi si tratta di sistemi aperti che devono avere un basso impatto ambientale, realizzabili attraverso processi di prefabbricazione, e spesso gestiti mediante strumenti digitali che permettono di monitorare le prestazioni del sistema lungo il suo intero ciclo di vita, ottimizzando le fasi di gestione, dismissione e riciclo (Kamali, Hewage and Sadiq, 2019; Grosso and Chiesa, 2014).

Il modulo diventa così l'unità elementare embrionale a cui possono essere ricondotte le proprietà intrinseche di materiali, sistemi tecnologici ed edilizi, e a cui si può far ricorso per realizzare edifici a diversi gradi di complessità. Negli ultimi anni, ad esempio, particolare attenzione è stata rivolta nella progettazione di unità abitative modulari utilizzabili per rispondere rapidamente alla domanda del settore edilizio legata sia alle nuove costruzioni sia agli interventi di riqualificazione e di ricostruzione post-emergenza (Bologna, 2018).

In questo contesto è interessante evidenziare come l'uso di elementi prefabbricati in legno abbia favorito nel tempo lo sviluppo di soluzioni tecnologiche modulari e facilmente assemblabili che sono diventate una costante costruttiva nei paesi occidentali (Ibañez, Guallart and Salka, 2022; Baiari and Altamura, 2019). È ormai noto infatti che l'uso del legno in architettura permette una considerevole riduzione dell'impatto ambientale degli edifici, recuperando nel bilancio energetico del manufatto edilizio l'anidride carbonica che l'albero ha assorbito durante la sua vita utile (Sathre and Gonzalez-Garcia, 2014; Sposito and Scalisi, 2019).

Il legno inoltre si presta più di altri materiali a essere utilizzato nel settore della prefabbricazione e della costruzione modulare, grazie alla sua lavorabilità (che consente di effettuare tagli e fessature off-site) e al suo peso specifico, che risulta essere inferiore a quello di altri materiali da costruzione, facilitando le fasi di trasporto e di messa in opera (Bhandari et alii, 2023). Non a caso, il balloon frame (brevettato nel 1833 da G. W. Show) e il platform frame possono considerarsi due tra i sistemi costruttivi modulari e assemblabili a secco che si sono diffusi per primi e con maggiore rapidità a scala globale.

Un edificio realizzato con il sistema platform frame è infatti formato da pareti e solai costituiti

da intelaiature di elementi modulari di piccola sezione (generalmente 4 x 9 o 5 x 10 cm) posti a interasse costante (40-60 cm), facilmente assemblabili con pannelli di tamponamento (compensato o OSB) e con strati di diverso spessore di materiale isolante. Le pareti e i solai così realizzati possono essere collegati fra loro e alle fondazioni con piastre metalliche angolari, tirafondi, viti e chiodi, garantendo buona stabilità meccanica e ottime prestazioni energetiche.

Grazie a queste peculiarità, negli ultimi anni, la tecnologia platform frame è stata oggetto di numerose sperimentazioni, a cui può essere ricondotta anche la ricerca nZEM sviluppata dal DIDA di UniFI insieme a un gruppo di quattro aziende toscane e finalizzata a realizzare un prototipo modulare abitativo a energia zero mediante l'utilizzo di processi e materiali innovativi. Nel dettaglio, l'articolo, partendo da una riflessione sullo stato dell'arte delle tipologie modulari abitative, descriverà l'approccio metodologico adottato nell'ambito della ricerca e presenterà alcuni dei risultati delle simulazioni condotte nella fase di validazione e prototipazione del modulo nZEM.

La ricerca nZEM | Finanziata dalla Regione Toscana nell'ambito del POR CREO FESR 2014-2020, la ricerca nZEM è stata sviluppata per rispondere in modo innovativo alle sfide lanciate dai programmi europei New European Bauhaus (European Commission, 2021) e Horizon Europe (European Commission, 2023), finalizzati a promuovere la transizione energetica nel settore dell'edilizia legata alla filiera del legno attraverso la sperimentazione e la collaborazione sinergica tra accademia e mondo industriale, con particolare attenzione ai temi del cambiamento climatico e della salute umana.

Il progetto di ricerca si inserisce, infatti, nel panorama internazionale degli studi scientifici che affrontano il tema dell'innovazione tecnologica, ricorrendo all'ibridazione di processo in un'ottica di sostenibilità ambientale (Global Alliance for Buildings and Construction, International Energy Agency and the United Nations Environment Programme, 2019, 2022). L'ambizione è realizzare unità abitative a energia zero, totalmente prefabbricate, facilmente trasportabili, assemblabili e reversibili che, grazie alla possibilità di customizzare gli elementi di chiusura esterna, si prestano a essere utilizzate in fasce geografiche con caratteristiche climatiche diverse.

Per questo motivo, l'approccio metodologico adottato, articolato in 4 Obiettivi Operativi (coincidenti con le fasi di lavoro della ricerca), promuove l'adozione di strumenti predittivi di controllo in tutti gli stadi del progetto e del processo realizzativo (Smith and Quale, 2017) e punta all'ottimizzazione delle prestazioni di tutti i sottocomponenti (elementi opachi e trasparenti di chiusura verticale e orizzontale, impianti per la produzione di RES e la gestione e il monitoraggio energetico) progettati come unità indipendenti per realizzare un modulo abitativo in platform frame, identificabile come il risultato finale del progetto.

L'idea alla base di nZEM è, infatti, quella di rendere il più efficiente possibile lo spazio compatto e minimo di un modulo adattabile e assemblabile per esigenze diverse, che variano dalla residenza per l'emergenza e il turismo (Radogna, 2018). Per questo motivo il prototipo nZEM è stato pensato

per rispondere ai requisiti di prefabbricabilità, trasportabilità, adattabilità, oltre che a quelli necessari a garantire un'elevata efficienza energetica e un basso impatto ambientale, attraverso il raggiungimento delle seguenti prestazioni: 1) riduzione dei consumi energetici e delle emissioni di CO₂; 2) benessere e salute; 3) produzione di energia rinnovabile; 4) Controllo integrato delle prestazioni energetiche.

Per raggiungere quest'obiettivo nella prima fase della ricerca è stata condotta un'analisi approfondita dello stato dell'arte, finalizzata a individuare le caratteristiche funzionali, tecnologiche e ambientali da trasporre nel nuovo modulo abitativo, il cui progetto – sviluppato in sinergia con il gruppo di aziende coinvolte – ha previsto l'impiego di materiali innovativi (in particolare i pannelli isolanti riflettenti) simulati nella fase di design e testati in opera nella fase di prototipazione.

Prefabbricazione e modularità: dagli archetipi bioclimatici alle sperimentazioni contemporanee

L'analisi dello stato dell'arte, sviluppata nell'ambito dell'Obiettivo Operativo 1, ha evidenziato come in urbanistica, in architettura, nell'arredamento e nel disegno industriale sia il concetto di modularità che quello di prefabbricazione possono essere fatti risalire alla 'notte dei tempi'. Già le comunità nomadi primitive facevano uso di componenti edilizi modulari (spesso tronchi di legno e tessuti) che potevano essere montati e smontati per realizzare villaggi temporanei (Balducci and Camilli, 2022); ne sono un esempio le capanne aurignaziane, risalenti al paleolitico (Cascone, Russo and Tomasello, 2018) o le tende indiane dei pellerossa americani.

Con l'avvento della rivoluzione industriale la necessità di creare contesti abitativi salubri e funzionali in tempi ridotti ha portato alla sperimentazione di soluzioni tecnologiche assemblabili a secco più complesse, realizzate mediante l'utilizzo di componenti da costruzione standardizzati in acciaio o in legno, che si sono diffusi rapidamente a partire dal XX secolo. Tra le realizzazioni maggiormente interessanti di questo periodo non si possono dimenticare: la Copper House (1929) di W. Gropius, ampliabile in funzione delle esigenze della committenza grazie alla presenza di un particolare giunto perimetrale (Herbert, 1984); la Jacobs House (1929) di F. L. Wright, pensata per costare solo 5.000 dollari e realizzata in platform frame con pannelli trasportabili in cantiere completi degli elementi di finitura interna (Dahlin, 2015).

A partire dagli anni '40 e dopo il conflitto bellico si è assistito a un incremento delle sperimentazioni finalizzate a produrre unità abitative modulari, trasportabili e facilmente adattabili alle diverse morfologie dei luoghi di costruzione. Mentre in Italia il CNR bandiva un concorso per la realizzazione di baracche in legno destinate all'uso militare totalmente smontabili e trasportabili (in cui ogni sottocomponente era dotato di codice biunivoco di identificazione finalizzato a facilitarne il montaggio), negli Stati Uniti R. Buckminster Fuller progettava la Mechanical Wing (1940), un'abitazione modulare, integrata con bagno e cucina, realizzabile attraverso un processo di produzione industriale desunto dal settore automobilistico e trasportabile con un semplice auto-rimorchio (Gorman, 2005). Nel 1940 Le Corbusier realizzava Les Maisons Murondins, progettate per essere auto-

costruite facendo uso di materiali poveri, come il legno e la terra cruda, reperibili sul luogo di costruzione (Czub, Kizilkaya and Souilamas, 2017). L'unità base di questa tipologia era dimensionata secondo i principi dello spazio minimo necessario, con una larghezza di 3 metri e una lunghezza variabile tra 7, 8 e 10 metri, in cui le singole celle venivano poi giustapposte e, se necessario, unite sotto un unico tetto a doppia falda che si differenziava dalla classica tipologia a capanna attraverso uno sfalsamento di una delle due falde al fine di ottenere un'apertura su di un fronte che permettesse l'illuminazione degli spazi interni.

Tuttavia è nell'immediato secondo dopoguerra che, grazie alla ripresa economica e all'introduzione di importanti soluzioni tecnologiche, pensate proprio per accelerare i processi di prefabbricazione (come l'aggancio Packaged House System brevettato nel 1946 da C. Wachmann e W. Gropius), che i moduli abitativi preassemblati diventano tra le soluzioni più efficaci a sostenere la ricostruzione, influenzando nuove correnti progettuali attente a ridurre i tempi e i costi di produzione senza rinunciare al comfort e all'efficienza energetica. Sono questi gli anni nei quali negli Stati Uniti iniziano a proliferare aziende che forniscono kit per la 'costruzione fai da te' di unità abitative unifamiliari, comodamente ordinabili tramite un catalogo di componenti standardizzati (Knaack, Chung-Klatte and Hasselbach, 2012).

Alcune tra le sperimentazioni maggiormente interessanti di questi anni sono la casa pieghevole Acorn House (1945) di K. Koch, prodotta interamente in officina come un unico elemento costituito da parti mobili facilmente dispiegabili (Alter, 2022), e i prototipi abitativi di J. Prouvé, pensati come alloggi economici, confortevoli, funzionali e resistenti, tra i quali si ricordano: i moduli abitativi costituiti da elementi prefabbricati in legno commissionati dal Ministero per la Ricostruzione francese (1945) e pensati per ospitare persone rifugiate, profughi e senza tetto (Vitra Design Museum, 2007).

E ancora, le quattordici Maisons Industrielles (1950-52) a Meudon, montabili da sole quattro persone senza bisogno di alcun mezzo meccanico (Pelletier, 2012); la Maison Prouvé (1954), ideata come una struttura leggera e flessibile grazie all'assemblaggio di elementi standardizzati, articolati in pianta su principi puramente funzionali (Tapias Monné, 2013); la Maison des Jours Meilleurs realizzata nel 1954 a seguito dell'appello di A. Pierre per fornire alloggi di emergenza alle persone in difficoltà (Serafin, 2012); la Maison du Sahara (1958), moderno prototipo di casa villaggio per climi estremi, sviluppata attorno a un tetto in lamiera di alluminio che ricorda una tenda rigida sotto la quale si articola lo spazio domestico (Irace, 2020).

Negli anni '70 si assiste, anche grazie al contributo di R. Buckminster Fuller, alla diffusione di sistemi abitativi basati sul modello del container che consentono l'adozione di soluzioni tecnologiche estendibili, scomponibili e integrabili. Tra le sperimentazioni più interessanti del periodo non si può fare a meno di citare la Casa Mobile di Rossellini e Hosoe, creata in collaborazione con la FIAT per la mostra dal titolo Italy – The New Domestic Landscape tenuta al Museum of Modern Art di New York nel 1972: si tratta di un modulo con un'unità di base, contenuta in 10 mq, estensibile

grazie alla presenza di particolari pareti a soffietto fino alla dimensione massima di 28 mq (Rossellini, 1974).

Contemporaneamente vengono condotte nuove ricerche sul tema della ricostruzione post disastro, tra le quali si ricordano: la Tilted Box (1970) di K. Kurokawa (Sottosanti, 2018); la Mobile House di Zanuso e Sapper che nel 1971 sviluppano un prototipo abitativo autosufficiente (dotato di un sistema di recupero e scarico delle acque) trasportabile in un container di circa 6 metri (Irace, 2008); il Sistema Abitativo di Pronto Intervento (SAPI) e la sua versione abitativa MAPI che tra il 1982 e il 1984 vengono sviluppati da Pierluigi Spadolini (con G. Fagnoni e G. Spadolini) come moduli pluriuso di pronto intervento, totalmente attrezzati, prefabbricabili, recuperabili, agevolmente trasportabili e collocabili in qualsiasi sito (Canepa, 2017). E ancora, le sperimentazioni di Shigeru Ban tra cui le Paper Log Houses del 1995 e del 2001 (Jodidio, 2015), la Paper Emergency Shelters for UNHCR del 1999 (Latka, 2017) e la Container Temporary Housing del 2011 (Hikone and Tokubuchi, 2014); le residenze Elemental di A. Aravena realizzate con gli innovativi pannelli di tamponamento Tecnopanel (Aravena, 2012); le 5 tipologie abitative progettate nel 2007 da MVRDV per la ricostruzione post uragano Katrina a New Orleans, ispirate alla morfologia e alle caratteristiche tecnologiche delle shotgun houses e realizzate assemblando lungo l'asse orizzontale 3 moduli cubici di 3,5 metri di lato (Feireiss and Pitt, 2009).

In anni recenti la ricerca sulle unità abitative modulari si sposta verso il tema delle micro-houses nZEB, ordinabili da cataloghi multimediali online, facilmente personalizzabili e assemblabili dalla committenza per essere collocate in aree geografiche con climi diversi, non necessariamente servite da infrastrutture e servizi. Tra gli esempi più noti sono da citare: la WikiHouse¹, brevettata nel 2011 dagli architetti A. Parvin e N. Ierodiaco-nou come un sistema costruttivo open source, il cui progetto esecutivo può essere scaricato da un sito internet dedicato così da facilitarne la realizzazione attraverso processi di autocostruzione; il prototipo abitativo BiosPHera 2.0, ideato nel 2012 da ZEPHIR per essere totalmente indipendente dal punto di vista energetico (Pepe, 2016); la LEAP Home a firma della torinese LeapFactory, sviluppata nel 2015 come un kit di elementi modulari assemblabili in configurazioni diverse e attrezzabili con le più moderne tecnologie impiantistiche (Scalco, 2020).

E ancora, la WikkellHouse progettata nel 2017 da Fiction Factory come un sistema modulare caratterizzato da una scocca metallica attorno alla quale viene avvolto cartone a 24 strati, assemblabile in 24 ore e la cui durata è garantita per mezzo secolo (Vinci, 2018); la M.A.D.I. Home, creata nel 2017 da R. Vidal Mezzovico come un modulo abitativo base di due piani realizzato con pannelli dispiegabili (caratteristica questa che la rende facilmente trasportabile con mezzi carrabili ordinari) e personalizzabile con elementi di finitura e arredi scelti rispetto alle esigenze della committenza (Borgobello, 2017); le case prefabbricate Minimal (2021) dello studio spagnolo Metro 7, ispirate dal modello passivhaus e costituite da sotto-unità modulari facilmente assemblabili e utilizzabili anche in progetti di sopraelevazione o ampliamento di edifici esistenti (Escartín, 2023).

Infine è importante notare come il tema dell'abitazione temporanea e dei sistemi abitativi modulari abbia richiamato, anche nell'ultimo secolo, l'attenzione di architetti di fama internazionale tra i quali si ricordano Renzo Piano, con il prototipo Diogene (2009) di casa minima (2,40 x 2,96 m) in legno realizzata nel 2013 in collaborazione con Matthias Schuler e Maurizio Milan per il Vitra Campus (Di Marzo, 2013) e Richard Rogers, che nel 2015 realizza la Prouve House (Winston, 2015) e negli anni successivi brevetta degli innovativi moduli abitativi prefabbricati in platform frame, 'plug and play', assemblabili in cantiere e utilizzati per costruire nel 2015 il quartiere di edilizia sociale Y:Cube (Wainwright, 2015) e nel 2017 il complesso di abitazione temporanee PLACE / Ladywell (Harris, Brickell and Nowicki, 2019) a Londra.

E ancora, lo Studio danese BIG, che nel 2019 propone il modello abitativo delle Beach Huts per la costruzione di 21 piccoli alloggi residenziali (21 mq) realizzati in platform frame e rivestiti in legno bruciato (Hofmeister, 2022), e Norman Foster che, in occasione della Biennale di Architettura di Venezia del 2023, ha presentato il prototipo di una tiny dwelling realizzata con un innovativo involucro portante, costituito da un doppio strato di tessuto avvolgibile che impregnato di cemento low-carbon e posato su casseforme leggere si solidifica in 24 ore (Benetti, 2013).

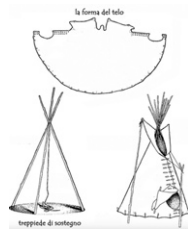
Le realizzazioni descritte hanno contribuito all'analisi dell'evoluzione dei processi di progettazione e costruzione di sistemi abitativi modulari condotta nella fase preliminare del progetto nZEM e sono state restituite in un quadro sinottico (Fig. 1) dello stato dell'arte dal quale sono emerse alcune ricorrenze interessanti utilizzate nella fase propositiva per sviluppare il progetto del prototipo abitativo oggetto della ricerca. L'exkursus storico evidenzia come la progettazione e la realizzazione di questa tipologia edilizia sia stata da sempre ispirata dalla necessità di dare risposta in tempi celeri, e con costi contenuti, all'emergenza abitativa senza tuttavia rinunciare a condizioni di comfort indoor basilari.

Tutti gli esempi scelti come caso studio: sono stati realizzati assemblando unità modulari elementari o kit di componenti standardizzati; risultano integrati con arredi e impianti; sono sviluppati facendo ricorso a processi costruttivi ispirati dal settore industriale dell'automotiv e del design di interni, gestibili attraverso la creazione di modelli virtuali adattabili alle esigenze della committenza; possono essere facilmente trasportati sul luogo di costruzione e assemblati senza ricorrere a manodopera specializzata; prediligono il ricorso a sottostrutture prefabbricate, che risultano leggere e facilmente integrabili con materiali isolanti e di finitura in grado di garantire durabilità e prestazioni meccaniche e termiche adeguate; presentano una distribuzione planimetrica lineare, nella quale l'ingresso è posto sul lato corto del prefabbricato mentre le aperture dei vari ambienti sul lato lungo.

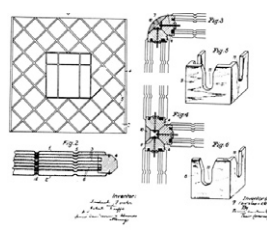
Inoltre è evidente come nel tempo l'attenzione dei progettisti si sia spostata dall'adozione di soluzioni tecnologiche di tipo analogico verso lo sviluppo di sistemi gestibili da strumenti digitali che, attraverso l'innovazione di prodotto e di processo, permettessero di accelerare i processi di prefabbricazione e assemblaggio, dando spazio alle sperimentazioni ispirate dalle transizioni digitale ed ecologica e finalizzate a migliorare la qualità dell'am-



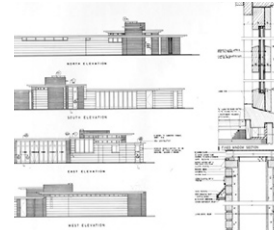
1) Prehistoric Hut (10.000 b. C.)



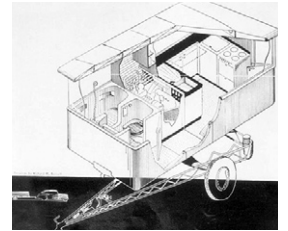
2) Red Indian Tent (1800)



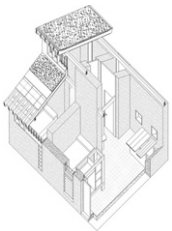
3) Copper House by W. Gropius (1929)



4) Jacobs House by F. L. Wright (1929)



5) Mechanical Wing by R. Buckminster Fuller (1940)



6) Les Maisons Murondins by Le Corbusier (1940)



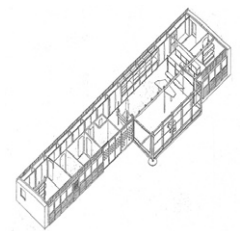
7) Acorn House by K. Koch (1945)



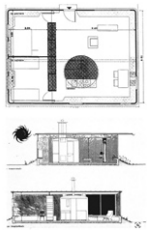
8) Packaged House System by C. Wachsmann and W.Gropius (1946)



9) Maisons Industrialisées by J. Prouvé (1950-1952)



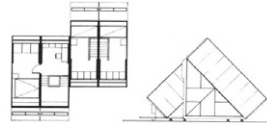
10) Maison Prouvé by J. Prouvé (1954)



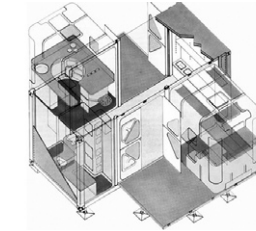
11) Maison des Jours Meilleurs by J. Prouvé (1954)



12) Maison du Sahara by J. Prouvé (1958)



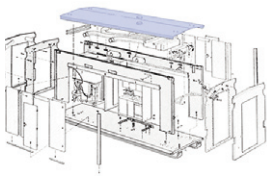
13) Tilted Box by K. Kurokawa (1970)



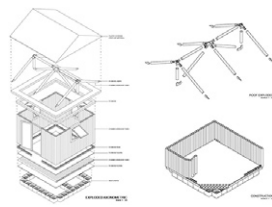
14) Mobile House by M. Zanuso and R. Sapper (1971)



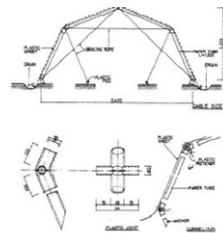
15) Casa Mobile by A. Rossellini and I. Hosoe (1972)



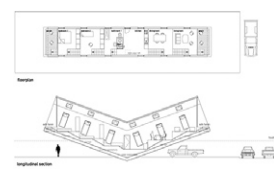
16) Sistema Abitativo di Pronto Intervento by P. Spadolini (1982)



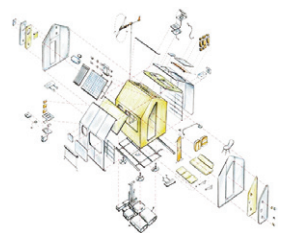
17) Paper Log Houses by S. Ban (1995)



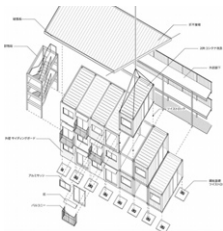
18) Paper Emergency Shelters by S. Ban (1999)



19) Shotgun House by MVRDV (2007)



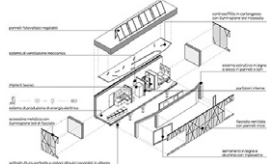
20) Diogene by R. Piano (2009)



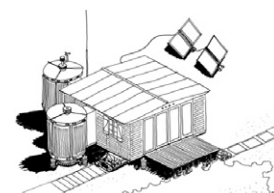
21) Container Temporary Housing by S. Ban (2011)



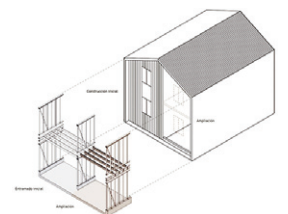
22) WikiHouse by A. Parvin and N. Ierodiaconou (2011)



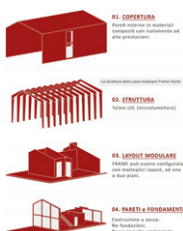
23) BiosPHERa 2.0 by ZEPHIR (2012)



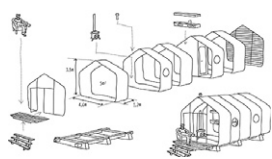
24) Prouvé House by R. Rogers (2013)



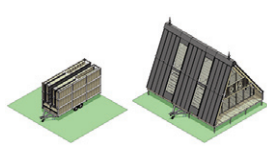
25) Elemental Houses by A. Aravena (2014)



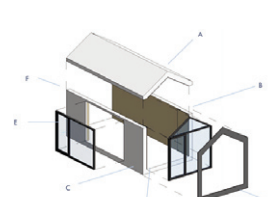
26) LEAP Home by LeapFactory (2015)



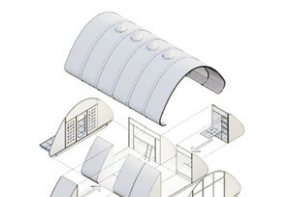
27) WikkelHouse by Fiction Factory (2017)



28) M.A.D.I. Home by R. Vidal (2017)



29) Minimal House by Metro 7 (2021)



30) Tiny Dwelling by N. Foster (2023)

Fig. 1 | Synoptic summary table of the case studies analysed in the preliminary phase of the research nZEM (credit: R. Romano 2023).

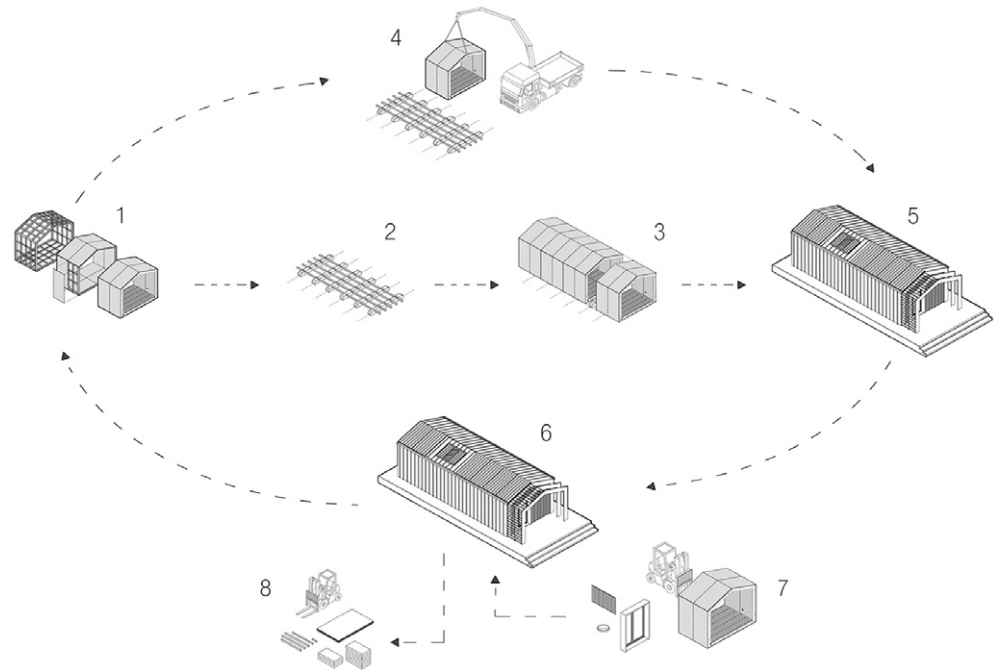
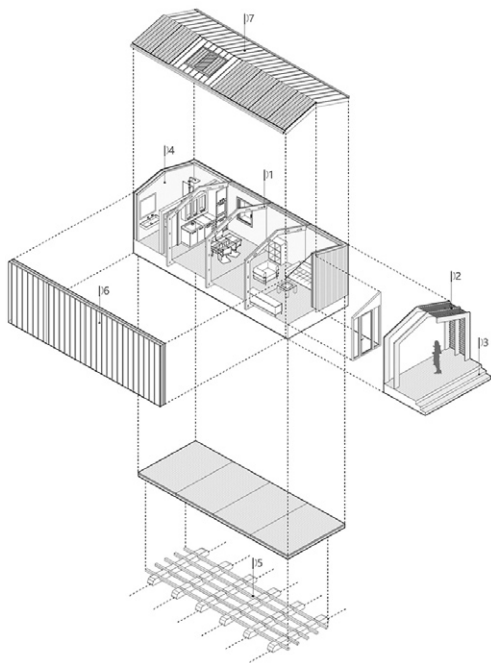


Fig. 2 | Analysis of the modular sub-components that make up the nZEM housing unit: 1) Connections between platform frame building components; 2) Solar shielding; 3) Vertical connections; 4) Module with plant cell; 5) Ground connection; 6) Vertical closures; 7) Roof elements (credit: L. Bernini, 2023).

Fig. 3 | Outline of the assembly and commissioning stages of the nZEM prototype: 1) Fabrication of components and assembly of elementary units at the factory; 2) Laying of foundations made of precast reinforced concrete blocks; 3) Assembly of elementary units at the construction site; 4) Transportation and commissioning of elementary units; 5) Assembled nZEM housing unit; 6) The finished housing system can easily be expanded and managed over time; 7) Commissioning of precast components for expansions and/or replacements; 8) Commissioning of new elementary units for expansions and/or replacements (credit: L. Bernini, 2023).

biente costruito in un'ottica di sostenibilità, salvaguardia delle risorse, ottimizzazione prestazionale e personalizzazione (Pone, 2022).

Il modulo abitativo nZEM | Ispirandosi agli esempi esaminati nella fase di analisi dello stato dell'arte, l'unità abitativa nZEM (32,00 mq) è stata progettata per essere realizzata affiancando orizzontalmente 4 moduli base (di 8,00 mq ciascuno, uno dei quali è destinato a ospitare una cella impiantistica) costruiti assemblando materiali a basso impatto ambientale (legno, isolanti in lana di roccia, ecc.) e innovativi (isolante riflettente, pannelli fotovoltaici, ecc.) in componenti di involucro opaco realizzati in platform frame e integrati con elementi trasparenti ad alte prestazioni e tecnologie per la produzione di energia rinnovabile (Fig. 2). Nel dettaglio il sistema costruttivo scelto presenta le caratteristiche elencate di seguito.

Le chiusure verticali opache sono realizzate assemblando i seguenti materiali dall'esterno verso l'interno: rivestimento in doghe di alluminio di 0,4 cm; intercapedine ventilata di 4 cm; pannello in cemento legno di 2,2 cm; pannello in fibra di legno di 10 cm; pannello OSB di 1,5 cm; pannello di isolante riflettente di 4 cm; camera d'aria di 7 cm; pannello in cemento legno 2,2 cm con rasatura esterna in intonaco bianco (U: 0,18 W/mqK; Y: 0,05 W/mqK).

La chiusura orizzontale superiore opaca è costituita da due falde inclinate con la seguente stratigrafia dall'esterno verso l'interno: rivestimento in doghe di alluminio di 0,4 cm; intercapedine ventilata di 4 cm; pannello in cemento legno di 2,2 cm; pannello in fibra di legno di 10 cm; pannello OSB di 1,5 cm; pannello di isolante riflettente di 4 cm; camera d'aria di 2,5 cm; pannello in cemento legno 2,2 cm con rasatura esterna in intonaco bianco (U: 0,18 W/mqK; Y: 0,05 W/mqK).

La chiusura orizzontale inferiore è progettata come un solaio sopraelevato che poggia su travi lamellari ancorate al terreno e presenta la seguente stratigrafia dal basso verso l'alto: lastra di cemento rinforzato Aquapanel di 1,3 cm; pannello isolante in vetro cellulare di 10 cm; pannello OSB di 1,5 cm; pannello isolante in vetro cellulare di 5 cm; lastra in gessofibra con fresatura per tubi pavimento radiante di 2,5 cm; tappetino termo-conduttivo di 0,2 cm; pavimento in legno flottante di 1 cm (U: 0,21 W/mqK; Y: 0,10 W/mqK).

Le chiusure verticali trasparenti sono realizzate con infissi in alluminio a taglio termico e doppio vetro basso emissivo con una trasmittanza U_w pari a 1,2 W/mqK, mentre quella superiore è realizzata con infissi in alluminio a taglio termico e tripla partizione tamponata al centro con doppio vetro basso emissivo e ai lati con innovativi pannelli fotovoltaici integrati da tubi di rame per la produzione dell'acqua calda sanitaria (U_w : 1,2 W/mqK).

Seguendo il modello di alcuni degli esempi studiati, il modulo base nZEM è stato concepito per essere totalmente prefabbricato in officina rispetto a due opzioni volumetriche (mono o doppia falda) con dimensioni pari a 410 cm di larghezza, 240 cm di profondità e 350 cm di altezza. Dimensioni e peso (5.000 Kg) sono stati calibrati rispetto alla necessità di trasportare facilmente uno o più moduli sul luogo di costruzione senza far ricorso a mezzi straordinari (Fig. 3). Assemblando i moduli base attraverso connessioni hold-down è possibile generare spazi e layout insediativi sempre diversi, personalizzabili in relazione alle esigenze degli utenti e alle caratteristiche climatiche del luogo, senza variare le prestazioni energetiche e strutturali generali. Il ricorso a soluzioni assemblate a secco garantisce la totale reversibilità delle sotto-unità elementari e il conseguente riciclo di tutti i materiali utilizzati.

Come precedentemente ricordato la scelta di realizzare un'unità abitativa modulare e personalizzabile ha determinato la necessità di controllare tutte le fasi di progettazione attraverso la costruzione di un modello BIM, gestito mediante il software Autodesk REVIT, attraverso la realizzazione di famiglie parametriche 3D contenenti le informazioni tecniche, fisiche ed economiche di ciascuno dei materiali e dei componenti utilizzati. Al fine di rendere il processo in linea con i principi previsti dalla mass customization, all'interno del modello Revit, ogni famiglia-modulo può essere integrata con elementi o sistemi compatibili, analizzando in tempo reale come variano i consumi energetici, i costi, l'impatto ambientale, ecc. al variare delle scelte progettuali.

Inoltre, con l'idea di creare un configuratore accessibile anche a utenti esterni, è stata elaborata una scheda prodotto che permette di configurare in modo variabile sia il modulo base sia l'unità abitativa in relazione al luogo di costruzione. La scheda contiene campi precompilati e permette di scegliere tra alcune opzioni preimpostate e pensate per garantire il raggiungimento delle prestazioni energetiche e ambientali previste dalla normativa italiana. Il modulo base, ad esempio, può essere realizzato secondo due tipologie, classico a doppia falda o mono-falda; in aggiunta è possibile scegliere quale tipo di pacchetto stratigrafico è più idoneo alla condizione climatica d'insediamento cambiando la tipologia di isolamento e di rivestimento esterno. Inoltre, all'interno del modello Revit, ogni famiglia-modulo può essere integrata con elementi o sistemi compatibili quali finestre, porte, abbaini, impianto fotovoltaico, ecc. (Fig. 4).

L'interoperabilità del configuratore consente all'utente finale, tramite l'esportazione di file in formato .ifc, di utilizzare, in prima battuta, il software

Termus BIM di ACCA per valutare le prestazioni termoigrometriche degli elementi di involucro scelti e determinare la classe energetica raggiungibile sulla base delle scelte volumetriche e tecnologiche adottate. Infine, il modello generato dal configuratore può essere esportato su altri software gratuiti dedicati alle simulazioni di Daylight per calcolare in tempo reale anche il fattore medio di luce diurna, scegliendo di conseguenza il corretto posizionamento degli elementi trasparenti.

Simulazioni energetiche e validazione del sistema tecnologico | Parallelamente alla modellazione con il software REVIT, la validazione del progetto è stata condotta attraverso il ricorso a simulazioni energetiche condotte a regime dinamico e sviluppate con il software Energy Plus, con l'obiettivo di verificare il comportamento termo-fisico dell'unità abitativa elementare durante tutto l'arco dell'anno, controllando le numerose variabili presenti nel sistema edificio-impianto progettato e facendo una stima precisa dei consumi e delle prestazioni. L'obiettivo era supportare le scelte progettuali e analizzare il comportamento energetico-ambientale del modulo rispetto a tre condizioni climatiche (clima temperato, caldo e freddo) caratterizzanti il territorio italiano, così da supportare in modo adeguato sia la fase di prototipazione che quella di diffusione dei risultati. È stato quindi deciso di simulare il modulo abitativo base rispetto a 18 configurazioni (Fig. 5) scaturite dall'incrocio dei seguenti parametri: 1) localizzazione geografica e tipo di clima; 2) orientamento del modulo rispetto all'asse longitudinale; 3) stratigrafie di involucro, confrontando le prestazioni termoigrometriche della soluzione tecnologica abitualmente utilizzata da LAM (EPS e lana minerale), rispetto a una soluzione coibentata con isolante riflettente e fibre di legno (Fig. 6).

Le simulazioni sono state condotte dividendo l'unità abitativa elementare in 2 zone termiche, soggiorno / cucina e bagno. Per entrambe è stato ipotizzato un ricambio d'aria pari a 0,5 vol/h, incrementato a 4 vol/h per i mesi estivi nelle località di Firenze e Palermo, dove si suppone che nelle ore notturne delle giornate più calde vengano aperte le finestre per smaltire il calore accumulato. Inoltre, con l'obiettivo di valutare i parametri di comfort indoor secondo il modello di Fanger (PMV e PPD), è stato assunto che la zona 1 fosse abitata durante tutto l'arco dell'anno da un'unica persona, con un carico di calore (sensibile e latente) pari a 150 W/persona per le ore diurne e di 100 W/persona per le ore notturne, con un valore metabolico per utente pari a 0,1, creando un calendario annuale dei parametri di resistenza termica del vestiario (clo): la velocità dell'aria in tutti gli ambienti è stata impostata pari a 0,2 m/s.

La simulazione ha poi tenuto conto della presenza dei corpi illuminanti, inserendo i dati relativi alle potenze elettriche installate (pari a 15 W/mq) e individuando i profili di accensione sulla base dei livelli di occupazione delle due zone termiche. Per le apparecchiature elettriche è stata, invece, ipotizzata la presenza nella zona 1 di un frigorifero da 200 W, di un forno a microonde da 900 W e di un piano a induzione da 6.000 W, per una potenza complessiva di 7.100 W e secondo un profilo di utilizzo impostato su fascia oraria. Al fine di stimare il fabbisogno di energia necessario a mantenere la temperatura interna nel range di comfort

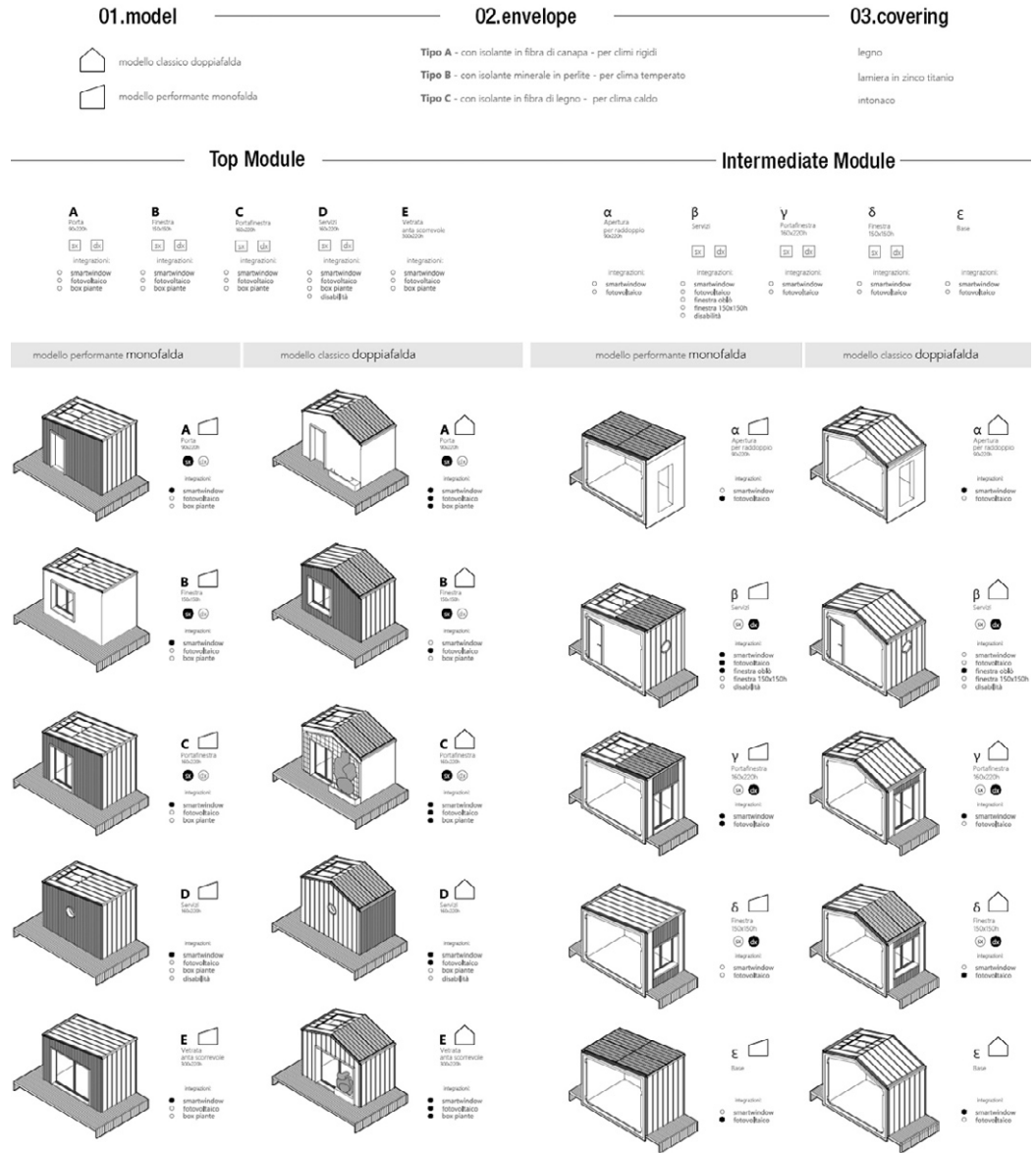


Fig. 4 | Diagram of the customisations that can be made on the base module with the nZEM configurator (credit: L. Bernini, 2023)

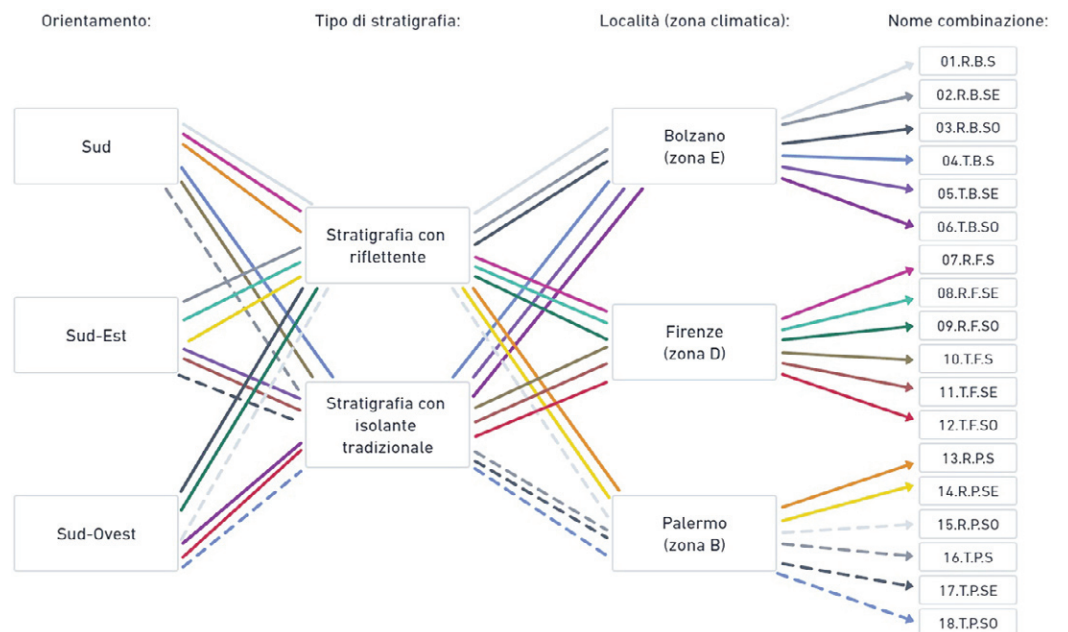


Fig. 5 | Schematic of the 18 configurations analysed with the dynamic regime simulations (credit: R. Romano and E. Di Monte, 2023).

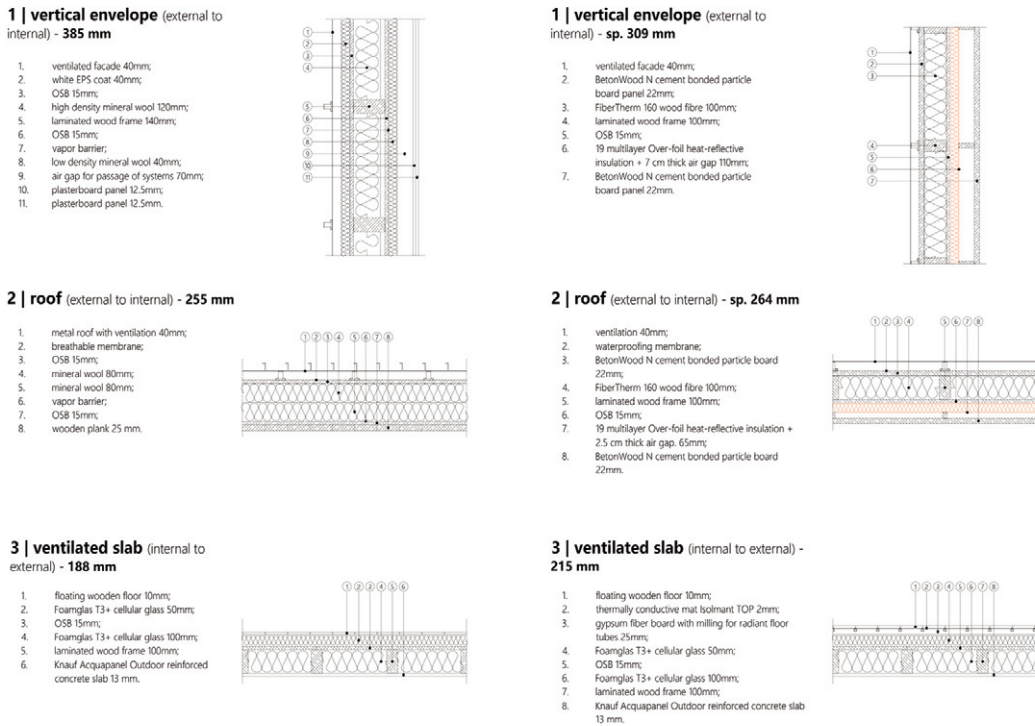


Fig. 6 | Comparison of the two stratigraphies analysed with dynamic simulations: LAM stratigraphy with traditional insulation; nZEM stratigraphy with reflective insulation (credit: R. Romano and E. Di Monte, 2023).

durante tutto l'arco dell'anno è stato modellato un impianto ideale, pensato come un sistema HVAC per riscaldamento e raffrescamento, integrato da un termostato a due livelli limite, uno per l'inverno (pari a 20 °C) e uno per l'estate (pari a 26 °C). Infine, con l'obiettivo di analizzare nel calcolo generale il contributo delle tecnologie integrate per produrre energia rinnovabile, il modello è stato implementato inserendo nelle falde di copertura un impianto fotovoltaico in silicio monocristallino di 3,4 kWp.

Risultati delle simulazioni | Le simulazioni a regime dinamico condotte per il modello abitativo modulare prima descritto hanno permesso di ottenere i seguenti risultati:

- in relazione alla scelta del migliore orientamento del modulo nelle tre località geografiche, si evidenzia come l'orientamento non incida in modo rilevante sull'andamento delle temperature interne (Fig. 7);
- per quanto riguarda il confronto delle prestazioni raggiungibili utilizzando le due stratigrafie di involucro si riscontra, in tutte le località geografiche e rispetto a tutti gli orientamenti, che con la soluzione di chiusura nZEM, contenente l'isolante riflettente, la temperatura interna di entrambe le zone termiche ha un'oscillazione minore rispetto alla soluzione LAM, sia in inverno che in estate; pertanto, la chiusura nZEM risente meno della variazione della temperatura esterna (Fig. 8);
- nella comparazione tra la temperatura superficiale interna ed esterna del solaio di copertura, si riscontra che la stratigrafia nZEM permette di ridurre la trasmissione di calore tra l'ambiente esterno e quello interno, con differenze delle temperature superficiali dei due layer di chiusura (interno ed esterno) che, in estate, nella località di Palermo possono raggiungere anche i 40 °C (Fig. 9);
- rispetto all'efficacia di installare schermature mobili all'esterno delle chiusure trasparenti (attivabili

in modo automatico quando la radiazione solare incidente sulle finestre raggiunge i 100 W/mq), le simulazioni hanno dimostrato che in tutte le configurazioni modellate, questa soluzione permette di ridurre i carichi termici nei mesi estivi senza limitare i contributi solari passivi nei mesi invernali (Fig. 10);

- nel confronto tra il fabbisogno annuale per riscaldamento (Fig. 11) si evidenzia, in generale, come il modulo abitativo abbia delle prestazioni migliori a Palermo (con consumi stimati intorno ai 30 kWh) rispetto a Firenze (1.200 kWh) e Bolzano (580 kWh);
- analizzando quanto avviene, invece, rispetto al fabbisogno annuale per raffrescamento (espresso in kWh) si evince che seppur ci siano differenze sostanziali tra le tre località (con un minor fabbisogno a Bolzano dove le temperature sono in generale più basse nei mesi estivi rispetto a quelle di Firenze e Palermo), la stratigrafia nZEM con isolante riflettente permette in tutte e tre le località e per ciascun orientamento di ridurre i consumi globali (Fig. 12);
- rispetto all'analisi dei valori di PMV mediati sull'intero anno, con e senza l'impianto di climatizzazione attivo, le analisi predittive (Fig. 13) dimostrano come utilizzando entrambe le stratigrafie di involucro, se per la località di Bolzano la sensazione di comfort rimane pressoché invariata sia con che senza impianto (attestandosi al limite inferiore del range di comfort pari a -0,5), per la località di Palermo è evidente come senza impianto non si riescano a garantire condizioni di comfort adeguate (raggiungendo un valore di 1: leggermente caldo).

Conclusioni | La ricerca nZEM si inserisce nel novero delle sperimentazioni in atto nel panorama internazionale in termini di progettazione e realizzazione di sistemi abitativi a basso impatto ambientale per rispondere sia a situazioni di emergenza

determinate da calamità naturali sia alla necessità di realizzare abitazioni confortevoli in tempi brevi e a costi ridotti. In questo contesto di indagine il tema della modularità e della scalabilità dei sistemi costruttivi diventa cruciale per trovare e sviluppare proposte innovative suggerite dall'adozione di soluzioni tecnologiche di prodotto e di processo che permettano di ottimizzare e controllare tutte le fasi realizzative secondo un approccio sistemico di matrice Life Cycle Assessment.

Per rispondere a questa esigenza la progettazione del modulo abitativo nZEM è stata supportata dalla creazione di un modello BIM e di un configuratore digitale che hanno permesso di controllare le prestazioni raggiungibili assemblando in modo variegato le unità elementari e i sottocomponenti che costituiscono il sistema costruttivo. La fase di simulazione energetica ha permesso di testare le prestazioni termoisometriche della stratigrafia di involucro proposta, caratterizzata dall'utilizzo di pannelli di isolante riflettente scelti per ridurre lo spessore dei sistemi di chiusura, contribuendo alle ricerche internazionali in corso per la validazione di questo innovativo materiale isolante.

Purtroppo non è stato possibile condurre un'analisi puntuale dell'impatto ambientale del modulo abitativo, studiando con attenzione le fasi di approvvigionamento dei materiali e delle filiere di produzione, assemblaggio e dismissione dei componenti utilizzati. In attesa di reperire le risorse per condurre questi necessari approfondimenti e avviare il processo di brevettazione del modulo base e dei suoi sottocomponenti, nei prossimi mesi il prototipo, attualmente in costruzione (Fig. 14), sarà monitorato in ambiente reale per valutare se le prestazioni desunte dalla fase di simulazione siano realmente raggiungibili.

In ogni caso i risultati raggiunti supportano la metodologia adottata, che già in questa fase della ricerca può considerarsi efficace nel promuovere un processo di trasferimento della conoscenza tra il settore accademico e quello industriale, supportando l'innovazione tecnologica di processo e di prodotto nel settore della prefabbricazione e della produzione di unità abitative modulari, in linea con i precetti del Reversible Building Design (Durmisevic, 2018) e del Circular Economy Action Plan emanato dall'Unione Europea nel 2020 (European Commission and Directorate-General for Communication, 2020).

The concept of modularity has characterised architecture from its origins to the present day, influencing its compositional, aesthetic, and formal features. It establishes a biunivocal relationship between the whole and its parts, defined as modules-subunits with common construction properties, equal or multiple dimensions, designed to be combined with great variety and freedom to adapt to diverse needs. Applicable at various scales, "from the spoon to the city" in the words of E. N. Rogers, modularity resurges strongly in the post-industrial era and, in recent years, becomes an implicit paradigm of sustainability, often associated with reversibility, adaptability, and functionality. In this context, the living module can be identified both with the entire building, considered a fundamental part of the urban metabolism of future cities, and as an energetically efficient assembly itself,

consisting of modular subunits identifiable as more or less complex elements. These elements can be further decomposed based on their specific functions. In both cases, these are open systems designed to have a low environmental impact, achievable through prefabrication processes and often managed through digital tools that monitor the system's performance throughout its life cycle. This optimisation extends to the management, decommissioning, and recycling phases (Kamali, Hewage and Sadiq, 2019; Grosso and Chiesa, 2014). Furthermore, the living module thus becomes the embryonic elementary unit to which the intrinsic properties of materials, technological and building systems can be traced, and which can be used to create buildings of varying degrees of complexity. In recent years, for example, particular attention has been paid to the design of modular housing units that can be used to quickly respond to the demand from the building sector related to both new construction and post-emergency redevelopment and reconstruction (Bologna, 2018).

In this context, it is interesting to highlight how the use of prefabricated wood elements has, over time, facilitated the development of modular and easily assembled technological solutions that have become a consistent construction method in Western countries (Ibañez, Guallart and Salka, 2022; Baiani and Altamura, 2019). It is now known that the use of wood in architecture makes it possible to reduce the environmental impact of buildings considerably, reclaiming the carbon dioxide absorbed by trees during their lifespan in the energy balance of the building (Sathre and González-García, 2014; Sposito and Scalisi, 2019).

In addition, wood is more suitable than other materials for use in prefabrication and modular construction because of its workability (which allows for off-site cutting and milling) and its specific weight, which is lower than that of other construction materials, facilitating transportation and construction (Bhandari et alii, 2023). Not surprisingly, the balloon frame (patented in 1833 by G. W. Show) and the platform frame can be considered two of the modular, dry-assembly building systems that spread first and most rapidly on a global scale.

A building constructed with the platform frame system is made up of walls and floors consisting of frameworks of small-section modular elements (usually 4 x 9 or 5 x 10 cm) placed at constant spacing (40-60 cm), easily assembled with infill panels (plywood or OSB) and with layers of different thicknesses of insulation material. Walls and floors made in this way can be connected to each other and foundations with angle metal plates, anchor bolts, screws and nails, ensuring good mechanical stability and excellent energy performance.

Thanks to these peculiarities, in recent years, platform frame technology has been the subject of numerous scientific projects, to which the nZEM research developed by the DIDA of UniFI in collaboration with a group of four Tuscan companies can also be traced and aimed at creating a zero-energy modular housing prototype through the use of innovative processes and materials. In detail, the paper, starting with a short description of the state of the art of modular housing typologies, will describe the methodological approach adopted in the research and present some of the results of the simulations conducted in the validation and prototyping phase of the nZEM module.

The nZEM Research | Funded by the Tuscany Region under the POR CREO FESR 2014-2020, the nZEM research was developed to innovatively address the challenges posed by the European programs New European Bauhaus (European Commission, 2021) and Horizon Europe (European Commission, 2023). These programs aim to promote energy transition in the construction sector through experimentation and synergistic collaboration between academia and the industrial sector, with a particular focus on climate change and human health.

Indeed, the research project is part of the international panorama of scientific studies that address the issue of technological innovation, resorting to process hybridisation with a view to environmental sustainability (Global Alliance for Buildings and Construction, International Energy Agency and the United Nations Environment Programme, 2019, 2022). The ambition is to create zero-energy, prefabricated, easily transportable, assembled and reversible housing units that, thanks to the

possibility of customising the external closure elements, lend themselves to use in geographic area belts with different climatic characteristics.

For this reason, the methodological approach adopted is divided into 4 Operational Objectives (coinciding with the work phases of the research), promoting the adoption of predictive control tools at all stages of the design and implementation process (Smith and Quale, 2017) and aiming at optimising the performance of all subcomponents (opaque and transparent vertical and horizontal closure elements, RES production facilities, and energy management and monitoring) designed as independent units to realise a platform frame housing module, identifiable as the outcome of the project. The idea behind nZEM is to make the compact and minimal space of a living module as efficient as possible that can be adapted and assembled for different needs, ranging from residence to emergency and tourism (Radogna, 2018). For this reason, the nZEM prototype has been designed to meet the requirements of prefabrication, trans-

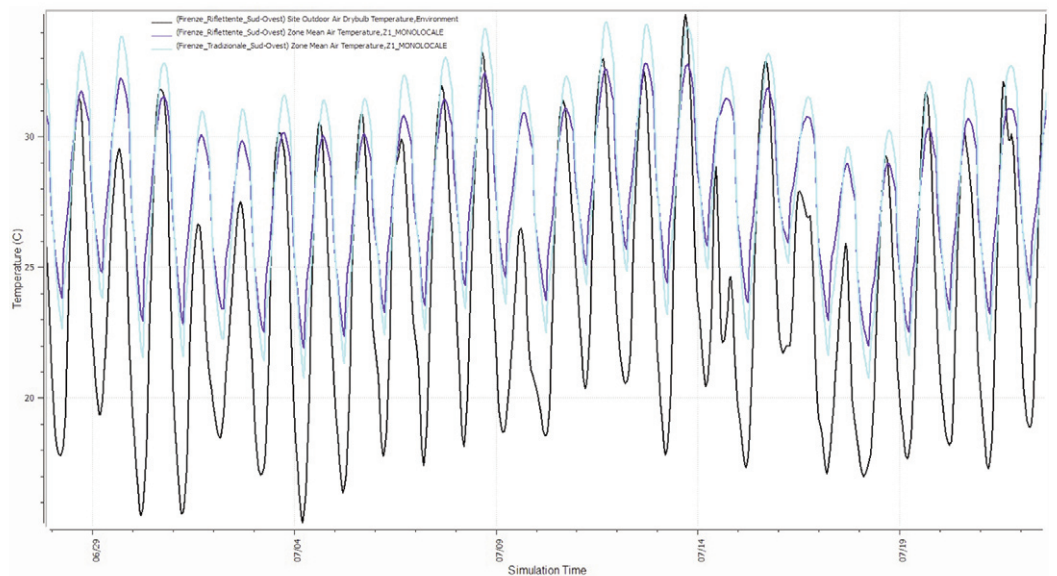
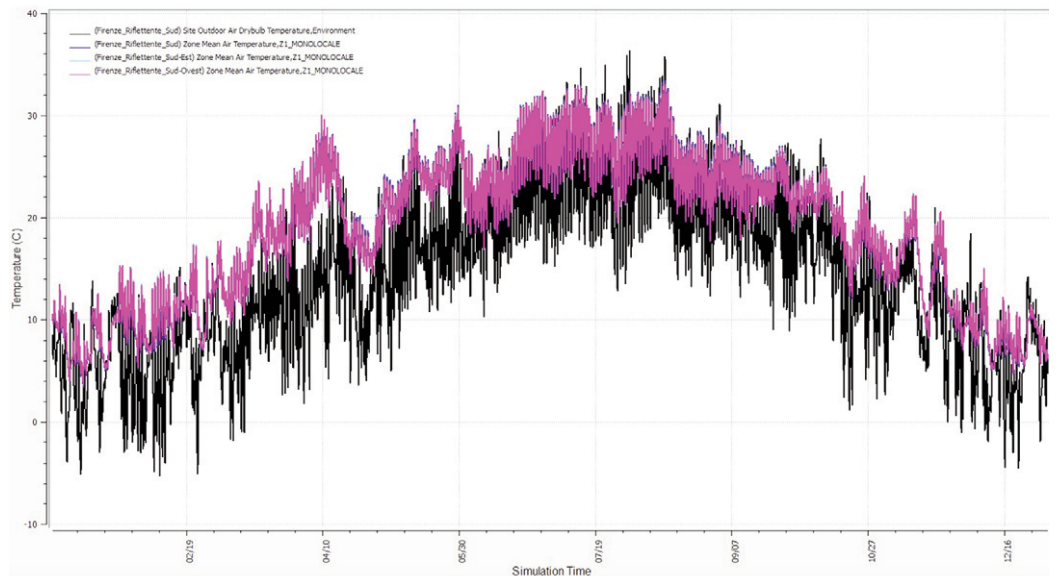


Fig. 7 | Analysis of indoor temperatures with respect to the three orientations chosen at the Florence location (credit: R. Romano and E. Di Monte, 2023).

Fig. 8 | Analysis of the oscillation of indoor temperatures at the Florence location (credit: R. Romano and E. Di Monte, 2023).

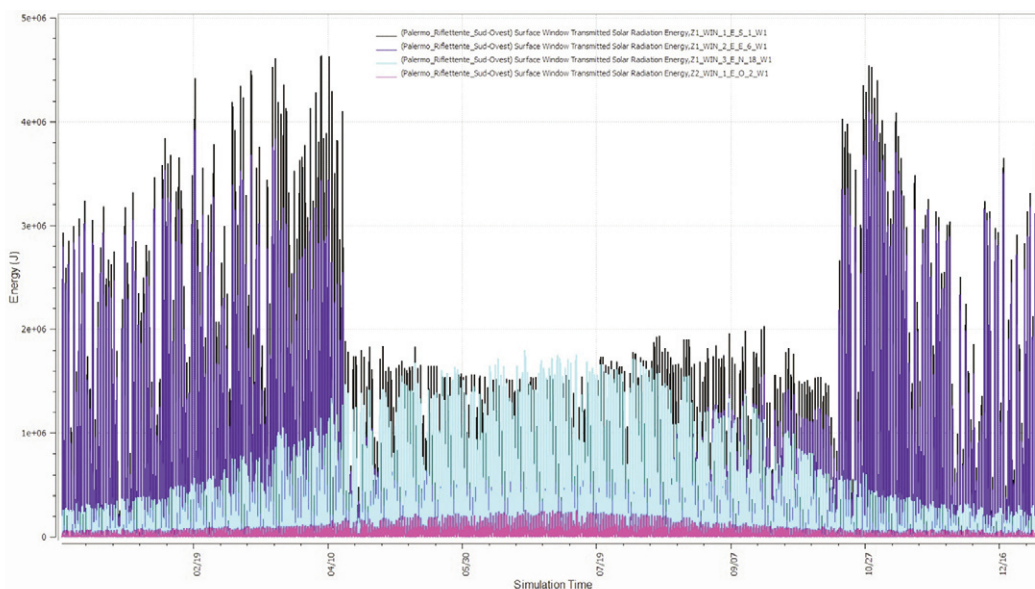
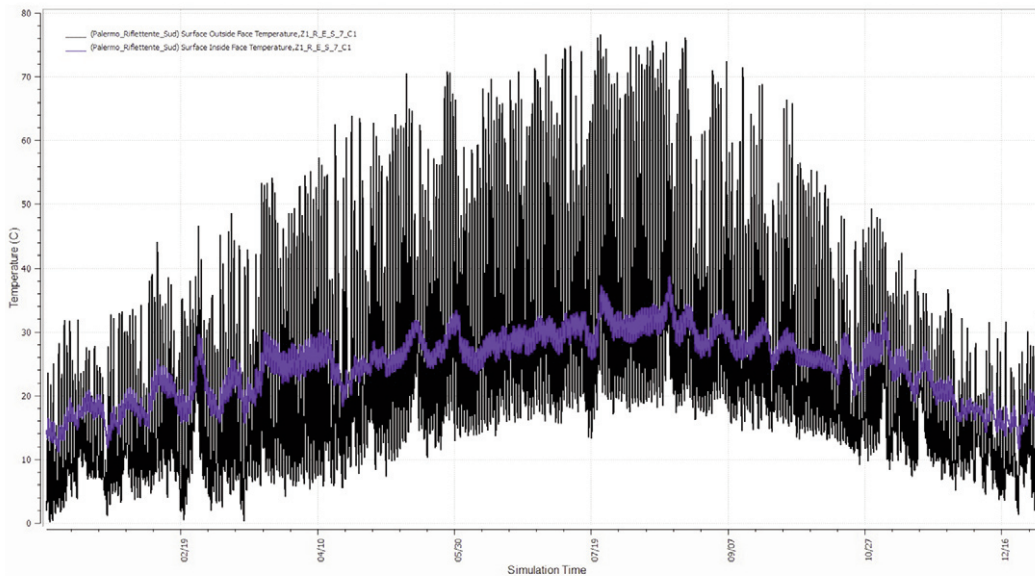


Fig. 9 | Simulation in Palermo, with reflective insulation: comparison of the internal (blue) and external (black) surface temperature of the south-facing roof pitch (credit: R. Romano and E. Di Monte, 2023).

Fig. 10 | Simulation in Palermo, with reflective insulation: energy transmitted through windows, facing southwest, with active shading (credit: R. Romano and E. Di Monte, 2023).

portability, and adaptability, as well as those necessary to ensure high energy efficiency and low environmental impact, through the achievement of the following performances: 1) Reduction of energy consumption and CO₂; 2) Wellness and health; 3) Renewable energy production; and 4) Integrated control of energy performance.

To achieve this goal, an in-depth analysis of the state of the art was conducted in the first phase of the research, aimed at identifying the functional, technological and environmental features to be transposed into the new housing module, the design of which – developed in synergy with the group of companies involved – predicted the use of innovative materials (particularly reflective insulation panels) simulated in the design phase and tested in situ in the prototyping phase.

Prefabrication and modularity: from bioclimatic archetypes to contemporary experiments | The analysis of the state of the art, developed as

part of Operational Objective 1, showed how in urban planning, architecture, furniture and industrial design both the concepts of modularity and prefabrication can be traced back to the ancient times. Even primitive nomadic communities made use of modular building components (often wooden logs and textiles) that could be assembled and disassembled to make temporary villages (Balducci and Camilli, 2022): examples are the Aurignacian huts dating back to the Palaeolithic period (Cascone, Russo and Tomasello, 2018) or the Indian tents of Native Americans.

With the advent of the Industrial Revolution, the need to create healthy and functional living contexts in a short period led to the experimentation of more complex dry-assembled technological solutions, realised through the use of standardised steel or wood construction components, which became rapidly popular from the 20th century onward. Notable examples from this period include W. Gropius's Copper House (1929), ex-

pandable according to the client's needs thanks to a special perimeter joint (Herbert, 1984), and F. L. Wright's Jacobs House (1929), designed to cost only \$5,000 and constructed in a platform frame with transportable panels complete with interior finishing elements (Dahlin, 2015).

From the 1940s onwards, following the war, there was an increase in experiments aimed at producing modular, transportable housing units easily adaptable to different construction site morphologies. While in Italy, the National Research Council (CNR) announced a competition for the construction of wooden shacks for military use that were completely dismantlable and transportable (each subcomponent had a unique identification code to facilitate assembly), in the United States, R. Buckminster Fuller designed the Mechanical Wing (1940), a modular residence integrated with a bathroom and kitchen, achievable through an industrial production process inspired by the automotive sector and transportable with a simple trailer (Gorman, 2005).

In 1940, Le Corbusier built Les Maisons Murrondins, designed to be self-built by making use of poor materials, such as wood and unfired earth, available at the construction site (Czub, Kizilkaya and Souilamas, 2017). The basic unit of this typology was sized according to the principles of minimum space requirements, with a width of 3 meters and a length varying between 7, 8, and 10 meters, in which individual cells were then juxtaposed and, if necessary, joined together under a single double-pitched roof that differed from the classic gabled typology through an offset of one of the two pitches in order to obtain an opening on one front that would allow the interior spaces to be illuminated.

However, it was in the immediate post-World War II period that, thanks to economic recovery and the introduction of critical technological solutions designed precisely to speed up prefabrication processes (such as the Packaged House System coupling patented in 1946 by C. Wachmann and W. Gropius), that pre-assembled housing modules are counted among the most effective solutions to support reconstruction, influencing new design currents careful to reduce production time and costs without sacrificing comfort and energy efficiency. These are the years in which building companies are beginning to proliferate in the United States that provide kits for the 'do-it-yourself' construction of single-family housing units, conveniently ordered through a catalogue of standardised components (Knaack, Chung-Klatte and Hasselbach, 2012).

Some of the most interesting experiments of these years are K. Koch's folding Acorn House (1945), produced entirely in the workshop as a single element consisting of easily deployable moving parts (Alter, 2022), and J. Prouvé, conceived as inexpensive, comfortable, functional and durable housing, among which are: the housing modules consisting of prefabricated wooden elements commissioned by the French Ministry of Reconstruction (1945) and designed to house refugees, displaced persons, and the homeless (Vitra Design Museum, 2007).

And again, the fourteen Maisons Industrialisées (1950-52) in Meudon, mountable by only four people without the need for any mechanical means (Pelletier, 2012); the Maison Prouvé (1954), con-

ceived as a lightweight and flexible structure thanks to the assembly of standardised elements, articulated in plan on purely functional principles (Tapias Monné, 2013); the Maison des Jours Meilleurs built in 1954 following the appeal of A. Pierre to provide emergency housing for people with hardships (Serafin, 2012); the Maison du Sahara (1958), a modern prototype of a village house for extreme climates, developed around an aluminium sheet roof reminiscent of a rigid tent under which domestic space is articulated (Irace, 2020).

The 1970s witnessed, thanks in part to the contribution of R. Buckminster Fuller, the spread of housing systems based on the container model that allowed for the adoption of extendable, decomposable and integrable technological solutions. Among the most interesting experiments of the period, one cannot fail to mention Rossellini and Hosoe's Mobile Home, created in collaboration with FIAT for the exhibition entitled Italy – The New Domestic Landscape held at the Museum of Modern Art in New York in 1972: it is a module with a basic unit, contained in 10 square meters, extendable thanks to the presence of special folding walls up to the maximum size of 28 square meters (Rossellini, 1974).

At the same time, new research is conducted on the topic of post-disaster reconstruction, including: the Tilted Box (1970) by K. Kurokawa (Sottosanti, 2018); the Mobile House by Zanuso and Sapper, who in 1971 developed a self-sufficient housing prototype (equipped with a water recovery and drainage system) transportable in a container of about 6 meters (Irace, 2008); the Emergency Shelter System (lit. Sistema Abitativo di Pronto Intervento – SAPI) and its housing version MAPI that between 1982 and 1984 were developed by Pierluigi Spadolini (with G. Fagnoni and G. Spadolini) as multi-purpose, fully equipped, emergency-response modules that are totally prefabricated, salvageable, easily transportable and placeable at any site (Canepa, 2017).

And again, Shigeru Ban's experiments, including the 1995 and 2001 Paper Log Houses (Jodidio, 2015), the 1999 Paper Emergency Shelters for UNHCR (Latka, 2017) and the 2011 Container Temporary Housing (Hikone and Tokubuchi, 2014); A. Aravena made with the innovative Tecnopanel infill panels (Aravena, 2012); the five housing typologies designed in 2007 by MVRDV for the post-Hurricane Katrina reconstruction in New Orleans, inspired by the morphology and technological characteristics of shotgun houses, and made by assembling along the horizontal axis three cubic modules of 3.5 meters side (Feireiss and Pitt, 2009).

In recent years, research on modular housing units has shifted toward the theme of nZEB micro-houses, which can be ordered from online multimedia catalogues, easily customised and assembled by the client to be located in geographic areas with different climates, not necessarily served by infrastructure and services. Notable examples include: the WikiHouse¹, patented in 2011 by architects A. Parvin and N. Ierodiaconou as an open-source building system, the executive design of which can be downloaded from a dedicated website to facilitate its realisation through self-construction processes; the housing prototype BiosPHera 2.0, conceived in 2012 by ZEPHIR to be totally energy independent (Pepe, 2016); the LEAP Home by the Turin-based LeapFactory, de-

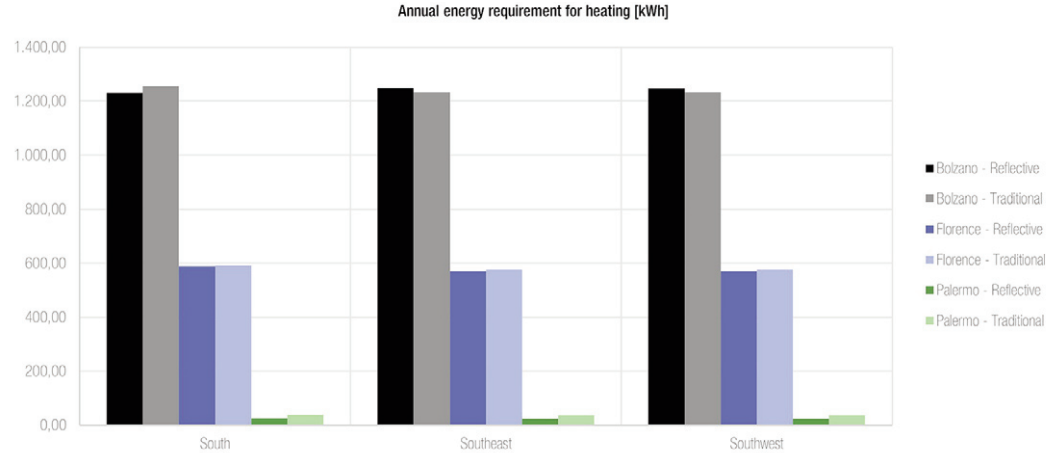


Fig. 11 | Analysis of heating demand (kWh) at the three selected locations (credit: R. Romano and E. Di Monte, 2023).

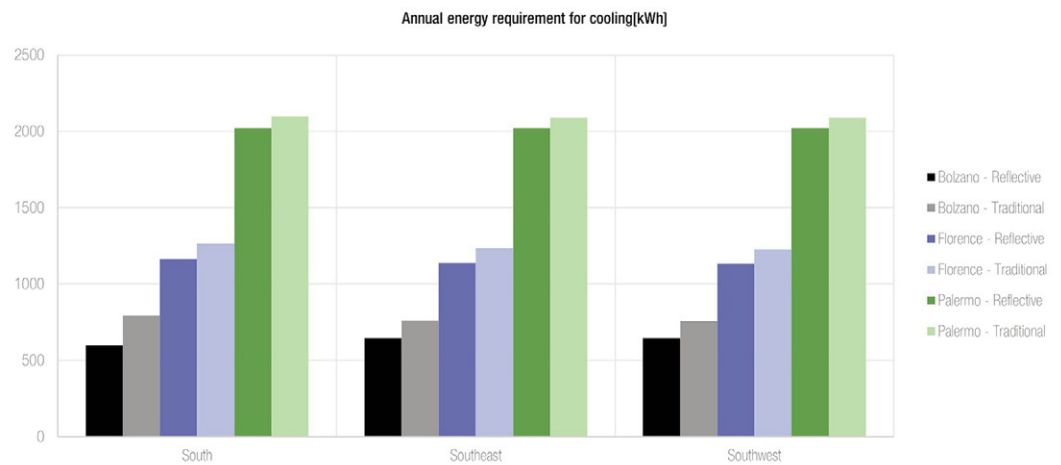


Fig. 12 | Analysis of cooling demand (kWh) at the three selected locations (credit: R. Romano and E. Di Monte, 2023).

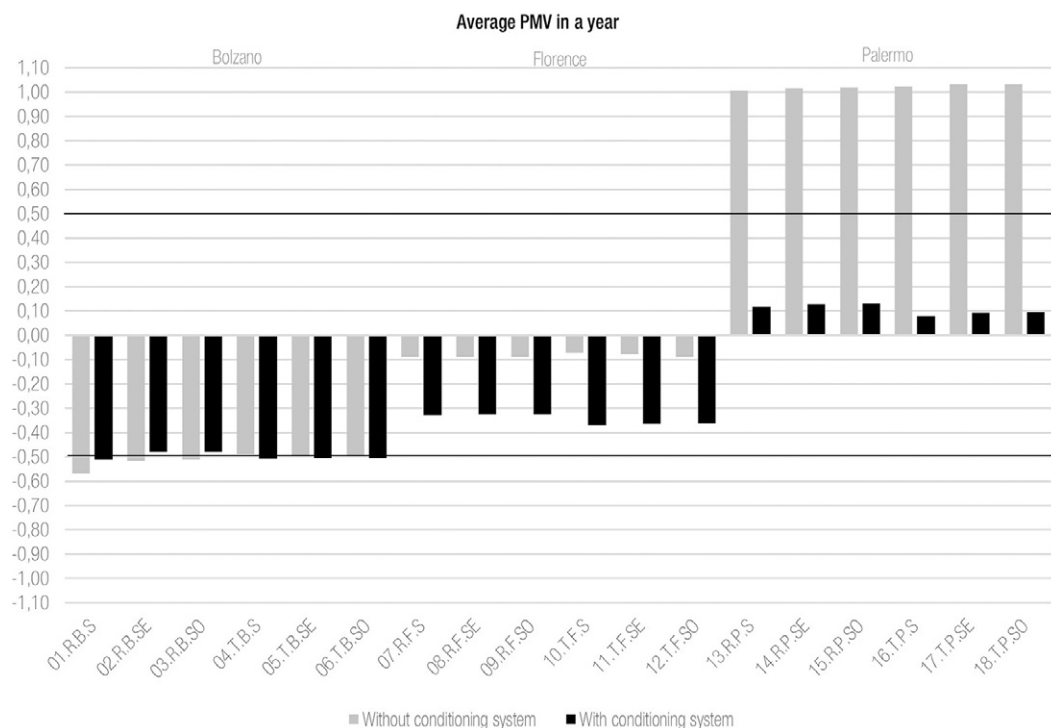


Fig. 13 | Analysis of PMV values averaged over the entire year (credit: R. Romano and E. Di Monte, 2023).



Fig. 14 | Assembly stages of the nZEM Prototype (credit: R. Romano, 2023).

veloped in 2015 as a kit of modular elements that can be assembled in different configurations and equipped with the latest plant engineering technologies (Scalco, 2020).

And again, the WikkellHouse designed in 2017 by Fiction Factory as a modular system characterised by a metal shell around which 24-layer cardboard is wrapped, assembled in 24 hours and whose durability is guaranteed for half a century (Vinci, 2018); the M.A.D.I. Home, created in 2017 by R. Vidal Mezzovico as a basic two-story housing module made of folding panels (a feature that makes it easily transportable by ordinary vehicular vehicles) and customisable with finishing elements and furnishings chosen with respect to the client's needs (Borgobello, 2017); the Minimal prefabricated houses (2021) by Spanish studio Metro 7, inspired by the Passivhaus model and consisting of modular sub-units that can be easily assembled and also used in projects of elevation or extension of existing buildings (Escartín, 2023).

Finally, it is important to note how the theme of temporary housing and modular living systems has attracted the attention of internationally architects in the last century. Notable figures include Renzo Piano, who, in collaboration with Matthias Schuler and Maurizio Milan, created the Diogene prototype (2009), a minimal wooden dwelling measuring 2.40 x 2.96 meters; this innovative housing solution was realised in 2013 on the Vitra Campus (Di Marzo, 2013). Additionally, Richard Rogers made significant contributions in 2015 with the

Prouve House (Winston, 2015) and subsequent patents for innovative prefabricated housing modules in a platform frame. These 'plug and play' modules, designed for on-site assembly with low environmental impact, were employed to construct the Y:Cube social housing neighbourhood in 2015 (Wainwright, 2015) and in 2017 the PLACE / Ladywell temporary housing complex (Harris, Brickell and Nowicki, 2019) in London.

Furthermore, the Danish studio BIG proposed the housing model of the Beach Huts in 2019 for the construction of 21 small residential units (21 sqm) made of platform frame and clad in burnt wood (Hofmeister, 2022). Also, Norman Foster, during the 2023 Venice Architecture Biennale, presented the prototype of a tiny dwelling made with an innovative load-bearing envelope consisting of a double layer of roll-up fabric impregnated with low-carbon cement and laid on lightweight formwork which solidifies in 24 hours (Benetti, 2013).

The achievements described contributed to the analysis of the evolution of the design and construction processes of modular housing systems conducted in the preliminary phase of the nZEM project and were returned in a synoptic picture (Fig. 1) of the state of the art from which some interesting recurrences emerged that were used in the proposal phase to develop the design of the housing prototype that is the subject of the nZEM research. The historical excursus highlights how the design and implementation of this building typology has always been inspired by the need to respond

quickly and inexpensively to the housing emergency without sacrificing primary indoor comfort conditions. All examples chosen as case studies are realised by assembling elementary modular units or kits of standardised components. They are integrated with furniture and systems, developed using construction processes inspired by the automotive and interior design industries, and manageable by creating easily adaptable virtual models to the client's needs. These living units can be easily transported to the construction site and assembled without the need for skilled labour; they prefer the use of prefabricated substructures, which are lightweight and easily integrated with insulation and finishing materials that can guarantee durability and adequate mechanical and thermal performance; they present a linear planimetric distribution, in which the entrance is placed on the short side of the prefab while the openings of the various rooms on the long side.

Moreover, it is evident how, over time, the attention of designers has shifted from the adoption of analogue technological solutions to the development of systems manageable by digital tools that, through product and process innovation, would allow for the acceleration of prefabrication and assembly processes, making room for experiments inspired by digital and ecological transitions and aimed at improving the quality of the built environment with a view to environmental sustainability, resource optimisation, performance predictability and customisation (Pone, 2022).

The nZEM housing module | Inspired by the examples examined in the state-of-the-art analysis phase, the nZEM housing unit (32.00 sq. m.) was designed to be built by horizontally flanking four basic modules (each 8.00 sqm in size, one of which is intended to house a plant cell) constructed by assembling low-impact (wood, rock wool insulation, etc.) and innovative (reflective insulation, PV, etc.) materials into opaque envelope components made of platform frames and integrated with high-performance transparent elements and renewable energy generation technologies (Fig. 2). In detail, the chosen building system has the features listed below.

The opaque vertical enclosures are constructed by assembling the following materials from the exterior to the interior: a covering of 0.4 cm aluminium slats; a 4 cm ventilated cavity; a 2.2 cm wood-cement panel; a 10 cm wood fibre panel; a 1.5 cm OSB panel; a 4 cm reflective insulation panel; a 7 cm air gap; a 2.2 cm wood-cement panel with an external white plaster finish (U: 0.18 W/sqmK; Y: 0.05 W/sqmK).

The upper opaque horizontal closure consists of two inclined slopes with the following stratigraphy from the outside to the inside: a covering of 0.4 cm aluminium slats; a 4 cm ventilated cavity; a 2.2 cm wood-cement panel; a 10 cm wood fibre panel; a 1.5 cm OSB panel; a 4 cm reflective insulation panel; a 2.5 cm air gap; a 2.2 cm wood-cement panel with an external white plaster finish (U: 0.18 W/sqmK; Y: 0.05 W/sqmK).

The lower horizontal closure is designed as a raised floor resting on lamellar beams anchored to the ground and presents the following stratigraphy from bottom to top: a 1.3 cm reinforced cement Aquapanel slab; a 10 cm cellular glass insulation panel; a 1.5 cm OSB panel; a 5 cm cellular glass insulation panel; a 2.5 cm gypsum fibre slab with milling for radiant floor heating pipes; a 0.2 cm thermo-conductive mat; a 1 cm floating wood floor (U: 0.21 W/sqmK; Y: 0.10 W/sqmK).

The vertical transparent closures are made with thermal break aluminium frames and low-emissivity double glazing with a U_w transmittance of 1.2 W/sqmK, while the upper one is made with thermal break aluminium frames and triple partitioning infilled in the centre with low-emissivity double glazing and on the sides with innovative photovoltaic panels integrated with copper pipes for domestic hot water production (U_w : 1.2 W/sqmK).

Following the pattern of some examples studied, the basic nZEM module was designed to be totally prefabricated on the shop floor with respect to two volumetric options (single or double pitch) with dimensions of 410 cm wide, 240 cm deep, and 350 cm high. Size and weight (5,000 kg) were calibrated against the need to easily transport one or more modules to the construction site without resorting to extraordinary means (Fig. 3). By assembling the basic modules through hold-down connections, it is possible to generate ever-changing settlement spaces and layouts that can be customised to the needs of users and the climatic characteristics of the site, without changing the overall energy and structural performance. The use of totally dry-assembled solutions guarantees the total reversibility of the elementary sub-units and the consequent recycling of all materials used.

As previously mentioned, the decision to build a modular and customisable housing unit resulted

in the need to control all the design phases through the construction of a BIM model, managed using Autodesk REVIT software, through the creation of parametric 3D families containing the technical, physical and economic information of each of the materials and components used. In order to bring the process in line with the principles envisaged by mass customisation, within the Revit model, each family module can be integrated with compatible elements or systems, analysing in real time how energy consumption, costs, environmental impact, etc., vary as design choices change.

In addition, with the idea of creating a configurator accessible to external users, a product sheet has been developed that allows for variable configuration of both the basic module and the housing unit in relation to the construction site. The tab contains pre-filled fields and allows users to choose from a number of preset options designed to ensure that the energy and environmental performance required by Italian regulations is achieved. For example, the basic module can be built according to two types: 1) classic double-pitch module; or 2) single-pitch performance module. In addition, it is possible to choose which type of stratigraphic package is most suitable for the climatic condition of insertion and what happens by changing the type of external cladding. In addition, within the Revit model, each family module can be integrated with compatible elements or systems such as windows, doors, dormers, photovoltaic systems, etc. (Fig. 4).

The interoperability of the configurator allows the end user, through the export of files in .ifc format, to use, in the first instance, a BIM software to evaluate the thermo-hygrometric performance of the chosen envelope elements and determine the achievable energy class based on the volumetric and technological choices made. Finally, the model generated by the configurator can be exported to other free software Daylight Visualizer software to calculate the average daylight factor in real-time, choosing the correct positioning of the transparent elements accordingly.

Energy simulations and validation of the technological system

Parallel to the modelling with REVIT software, the validation of the project was conducted through the use of energy simulations conducted in a dynamic regime and developed with Energy Plus software to verify the thermo-physical behaviour of the elementary housing unit throughout the year, controlling the numerous variables present in the designed building-plant system and making an accurate estimate of consumption and performance.

The objective was to support the design choices and analyse the energy-environmental behaviour of the module with respect to three climatic conditions (temperate, hot and cold climate) characterising the Italian territory, to adequately support both the prototyping and the dissemination phase of the results. Therefore, it was decided to simulate the basic housing module with respect to 18 configurations (Fig. 5) arising from the intersection of the following parameters: 1) geographical location and climate type; 2) orientation of the module with respect to the longitudinal axis; and 3) envelope stratifications, comparing the thermo-hygrometric performance of the technological solution habitually used by LAM (EPS and mineral wool),

compared to a solution insulated with reflective insulation and wood fibres (Fig. 6).

Simulations were conducted by dividing the elementary dwelling unit into two thermal zones: 1) living room / kitchen; and 2) bathroom area. For both, an air exchange rate of 0.5 vol/h was assumed, increased to 4 vol/h for the summer months in the locations of Florence and Palermo, where windows are assumed to be opened during the night hours of the hottest days to dissipate accumulated heat. Furthermore, to evaluate indoor comfort parameters according to Fanger's model (PMV and PPD), it was assumed that zone 1 was inhabited throughout the year by a single person, with a colour (sensible and latent) equal to 150 W/person for daytime hours and 100 W/person for nighttime hours, with a metabolic value per user of 0.1, creating an annual schedule of clothing thermal resistance parameters (clo). The air velocity in all rooms was set equal to 0.2 m/s.

The simulation then took into account the presence of lighting fixtures, entering data on the installed electrical wattages (equal to 15 W/sqm) and identifying the lighting profiles based on the occupancy levels of the two thermal zones. For electrical equipment, the presence in zone 1 of a 200 W refrigerator, a 900 W microwave oven, and a 6,000 W induction cooktop was assumed, for a total power output of 7,100 W and according to a usage profile set on an hourly basis. In order to estimate the energy requirements needed to maintain the indoor temperature in the comfort range throughout the year, an ideal system was modelled, designed as an HVAC system for heating and cooling, supplemented by a thermostat with two limit levels, one for winter (equal to 20 °C) and one for summer (equal to 26 °C). Finally, to analyse the contribution of integrated technologies to produce renewable energy, the model was implemented by inserting a 3.4 kWp monocrystalline silicon photovoltaic system in the roof pitches.

Simulation results | Dynamic regime simulations conducted for the modular housing model described earlier yielded the following results:

- in relation to the choice of the best orientation of the module in the three geographical locations, it is shown that orientation does not significantly affect the trend of indoor temperatures (Fig. 7);
- regarding the comparison of the achievable performance using the two envelope stratifications, it is found, in all geographic locations and with respect to all orientations, that with the nZEM closure solution, containing the reflective insulation, the internal temperature of both thermal zones has less fluctuation than with the LAM solution, both in winter and summer; therefore, the nZEM closure is less affected by the variation of the external temperature (Fig. 8);
- in comparing the internal and external surface temperature of the roofing slab, it is found that the nZEM stratigraphy makes it possible to reduce heat transmission between the external and internal environments, with differences in the surface temperatures of the two closure layers (internal and external) reaching as high as 40 °C in summer at the Palermo location (Fig. 9);
- with respect to the effectiveness of installing movable screens on the outside of the transparent closures (which can be automatically activated when the incident solar radiation on the win-

dows reaches 100 W/sqm), simulations have shown that in all modelled configurations, this solution makes it possible to reduce thermal loads in the summer months without limiting passive solar contributions in the winter months (Fig. 10);

- when comparing annual heating requirements (Fig. 11), it is generally shown that the housing module performs better in Palermo (with estimated consumption of around 30 kWh) than in Florence (1,200 kWh) and Bolzano (580 kWh);
- analysing what happens, however, with respect to annual cooling demand (expressed in kWh) shows that although there are substantial differences among the three locations (with lower demand in Bolzano, where temperatures are generally lower in the summer months than in Florence and Palermo), the nZEM stratigraphy with reflective insulation allows in all three locations and for each orientation to reduce overall consumption (Fig. 12);
- with respect to the analysis of PMV values averaged over the entire year, with and without the air conditioning system active, the predictive analyses (Fig. 13) show how using both envelope stratigraphies, if for the Bolzano location the comfort sensation remains almost unchanged both with and without the system (staying at the lower limit of the comfort range of - 0.5), for the Palermo location it is evident how without the system adequate comfort conditions are not achieved (reaching a value of 1: slightly warm).

Conclusions | The nZEM research is part of the ongoing experimentation in the international scene in terms of the design and implementation of low-impact housing systems to respond both to emergencies brought about by natural disasters and to the need to build comfortable homes in a short time and at a reduced cost. In this context of investigation, the theme of modularity and scalability of building systems becomes crucial in order to

find and develop innovative proposals inspired by the adoption of product and process technological solutions that allow to optimise and control all the construction phases according to a systemic approach of Life Cycle Assessment matrix.

To meet this requirement, the design of the nZEM housing module was supported by creating a BIM model and a digital configurator that allowed to check the achievable performance by assembling in a varied way the elementary units and subcomponents that constitute the building system. The energy simulation phase made it possible to test the thermohygrometric performance of the proposed envelope stratigraphy, which is characterised by the use of reflective insulation panels chosen to reduce the thickness of the closure systems; to date, there is no evidence of studies that support their adoption in pre-assembled drywall hotels such as those proposed as part of this research.

Unfortunately, it was impossible to conduct a more in-depth analysis of the environmental impact of the housing module by carefully studying the stages of material procurement and the production, assembly and decommissioning supply chains of the components used. While waiting to find the resources to conduct these necessary in-depth investigations and start the process of patenting the basic module and its subcomponents, the prototype, currently under construction (Fig. 14), will be monitored in the coming months in a real environment to assess whether the performance inferred from the simulation phase is achievable.

In any case, the results achieved support the methodology adopted, which already at this stage of the research can be considered effective in promoting a process of knowledge transfer between the academic and industrial sectors, supporting process and product technological innovation in

the field of prefabrication and production of modular housing units, in line with the precepts of Reversible Building Design (Durmisevic, 2018) and the Circular Economy Action Plan issued by the European Union in 2020 (European Commission and Directorate-General for Communication, 2020).

Acknowledgements

The nZEM project was funded by the Tuscany Region under the POR CREO FESR 2014/2020 – Action 1.1.5. sub-action a1) – Call for tenders 2 ‘Progetti di ricerca e sviluppo delle MPMI’ (lit. ‘Research and Development Projects for SMEs’). We would like to express our gratitude to all the companies involved in the research activities (LAM Ambiente; Vigiani Srl; Vetreria Vitrum; Verdiani & Linari Srl; BRT Consulting); the TAM Laboratory of DIDA and the Interuniversity Center ABITA of UniFI for their instrumental support during the analysis phases; and Dr. L. Bernini for contributing to the design and implementation of the prototype. The contribution reflects the collective thinking of the authors. Nevertheless, the introductory paragraphs, ‘The nZEM Research’, ‘Prefabrication and modularity: from bioclimatic archetypes to contemporary experiments’, ‘The nZEM housing module’, and ‘Conclusions’ should be attributed to R. Romano, while the paragraphs ‘Energy Simulations and Validation of the Technological System’ and ‘Simulation results’ to E. Di Monte.

Notes

1) For more information, see the webpage: wikihouse.cc/design/what-is-wikihouse [Accessed 31 October 2023].

References

- Alter, L. (2022), “Boxabl Launches \$50K Foldable House”, in *Treehugger Sustainability for All*, 25/11/2022. [Online] Available at: treehugger.com/boxabl-reinvents-the-foldable-house-5197170 [Accessed 31 October 2023].
- Aravena, A. (2012), *Elemental – Manual de vivienda incremental y diseño participativo*, Hatje Cantz.
- Baiani, S. and Altamura, P. (2019), “Il Processo del Progetto per la Resource Productivity – Un Caso Studio | The Design Process towards Resource Productivity – A Case Study”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 5, pp. 83-92. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/592019 [Accessed 11 October 2023].
- Balducci, B. and Camilli, F. (2022), “Progettare l’ecologia – Il vegetale come paradigma possibile di un’architettura sostenibile e resiliente | Designing ecology – The organic as a possible paradigm of a sustainable and resilient architecture”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 11, pp. 84-93. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1172022 [Accessed 11 October 2023].
- Benetti, A. (2023), “Norman Foster’s tiny dwelling as the evolution of the minimal house”, in *Domusweb*, 13/06/2023. [Online] Available at: [domusweb.it/it/citta-sostenibili/gallery/2023/06/09/norman-foster-foundation-e-holcim-presentano-](https://domusweb.it/it/citta-sostenibili/gallery/2023/06/09/norman-foster-foundation-e-holcim-presentano-essential-home.html)

[essential-home.html](https://domusweb.it/it/citta-sostenibili/gallery/2023/06/09/norman-foster-foundation-e-holcim-presentano-essential-home.html) [Accessed 31 October 2023].

Bhandari, S., Riggio, M., Jahedi, S., Fischer, E., Muszynski, L. and Luo, Z. (2023), “A review of modular cross laminated timber construction – Implications for temporary housing in seismic areas”, in *Journal of Building Engineering*, vol. 63, part A, article 105485, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.job.2022.105485 [Accessed 8 October 2023].

Bologna, R. (2018), “Complementarietà fra permanente e temporaneo | Complementarity between permanent and temporary”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 4, pp. 81-88. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/4102018 [Accessed 11 October 2023].

Borgobello, B. (2017), “Flatpack M.A.Di house pops up in a matter of hours”, in *Newatlas*, 11/11/2017. [Online] Available at: newatlas.com/madi/52139/ [Accessed 31 October 2023].

Canepa, S. (2017), “Living mobile for emergency – Lessons from big architects”, in Vaudetti, M., Minucciani, V., Canepa, S., Onay S. N. (eds), *Suspended Living in Temporary Space – Emergencies in the Mediterranean Region | International Conference Proceedings, 9 October 2017, Politecnico di Torino, Turin, Italy*, Lettera Ventidue Edizioni, Siracusa, pp. 25-32.

Cascone, S., Russo, G. and Tomasello, N. (2018), “An historical study on temporary and emergency post-disaster

- housing”, in *TEMA | Technologies Engineering Materials Architecture*, vol. 4, issue 2, pp. 47-58. [Online] Available at: doi.org/10.17410/tema.v4i2.193 [Accessed 11 October 2023].
- Czub, M., Kizilkaya, A. and Souilamas, M. (2017), “Le Corbusier, Maison Murodins, France, 1940”, in *Atlas of Interiors*, 04/11/2017. [Online] Available at: atlasofinteriors.polimi.it/2017/11/14/le-corbusier-maison-murodins-1940/ [Accessed 31 October 2023].
- Dahlin, K. (2015), *The Jacobs I House – Wright’s Prescription for Modest Cost Housing*. [Online] Available at: issuu.com/kendahlin/docs/jacobsfinal-dahlin [Accessed 31 October 2023].
- Di Marzo, C. (2013), “Renzo Piano firma Diogene – Il più piccolo edificio del Vitra Campus”, in *Archiportale*, 17/06/2013. [Online] Available at: archiportale.com/news/2013/06/case-interni/renzo-piano-firma-diogene-il-pi%C3%B9-piccolo-edificio-del-vitra-campus_34102_53.html [Accessed 31 October 2023].
- Durmisevic, E. (2018), *WP3 – Reversible Building Design Guidelines*, BAMB. [Online] Available at: bamb2020.eu/wp-content/uploads/2018/12/Reversible-Building-Design-guidelines-and-protocol.pdf [Accessed 31 October 2023].
- European Commission (2023), *Horizon Europe – Work Programme 2023-2024 – General Introduction*. [Online] Available at: ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/docs/2021-2027/horizon/wp-call/2023-2024/wp-1-general-introduction_horizon-2023-2024_en.pdf [Accessed 11 October 2023].
- European Commission (2021), *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – A New European Bauhaus – Beautiful, Sustainable, Together*, document 520 21DC0573, 573 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2021%3A573%3AFIN [Accessed 11 October 2023].
- European Commission and Directorate-General for Communication (2020), *Circular Economy Action Plan – For a cleaner and more competitive Europe*, Publications Office of the European Union. [Online] Available at: data.europa.eu/doi/10.2779/05068 [Accessed 11 October 2023].
- Escartín, J. (2023), “La forma más rápida de hacer una vivienda en el pueblo o en un terreno – Casas modulares”, in *Heraldo*, 14/04/2023. [Online] Available at: heraldo.es/noticias/economia/2023/04/13/casas-modulares-zaragoza-mas-rapidas-1644693.html [Accessed 31 October 2023].
- Feireiss, K. and Pitt, B. (2009), *Architecture in Times of Need – Make It Right – Rebuilding New Orleans’ Lower Ninth Ward*, Prestel.
- Global Alliance for Buildings and Construction, International Energy Agency and the United Nations Environment Programme (2022), *2022 Global Status Report for Buildings and Construction – Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector*. [Online] Available at: unep.org/resources/publication/2022-global-status-report-buildings-and-construction [Accessed 11 October 2023].
- Global Alliance for Buildings and Construction, International Energy Agency and the United Nations Environment Programme (2019), *2019 Global Status Report for Buildings and Construction – Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector*. [Online] Available at: IEA.org/reports/global-status-report-for-buildings-and-construction-2019 [Accessed 11 October 2023].
- Gorman, M. J. (2005), *Buckminster Fuller – Architettura in movimento*, Skira, Milano.
- Grosso, M. and Chiesa, G. (2014), “PR.I.M.E3. – Procedure Innovative per Moduli Edilizi Energeticamente Efficienti ed Eco-compatibili | PR.I.M.E3. – Procedure for Innovative building Modules Energy Efficient and Eco-compatible”, in *Techné | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 7, pp. 210-216. [Online] Available at: doi.org/10.13128/Techné-14552 [Accessed 11 October 2023].
- Harris, E., Brickell, K. and Nowicki, M. (2019), *Temporary Homes, Permanent Progress? Resident Experiences of PLACE/Ladywell*, Royal Holloway, University of London. [Online] Available at: pure.royalholloway.ac.uk/ws/portalfiles/portal/34520821/LewishamReport_FINAL_Sep_2019.pdf [Accessed 31 October 2023].
- Herbert, G. (1984), *The Dream of the Factory-Made House – Walter Gropius and Konrad Wachsmann*, The MIT Press. [Online] Available at: doi.org/10.7551/mitpress/2494.001.0001 [Accessed 31 October 2023].
- Hikone, S. and Tokubuchi, M. (2014), “Temporary Multi-storey Container House after Earthquake and Tsunami Disaster on March 11, 2011”, in *LABSE Symposium Report*, vol. 102, pp. 1699-1706. [Online] Available at: doi.org/10.2749/222137814814067950 [Accessed 31 October 2023].
- Hofmeister, S. (2022), *BIG – Architecture and Construction Details*, Edition Detail.
- Ibañez, D., Guallart, V. and Salka, M. (2022), “La prototipizzazione pedagogica di edifici ecologici avanzati e biocittà presso il Valldaura Labs | On pedagogical prototyping of advanced ecological buildings and biocities at Valldaura Labs”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 11, pp. 136-149. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/11122022 [Accessed 11 October 2023].
- Irace, F. (2020), “From the archive – Jean Prouvé’s designs for prefab shelters”, in *Domusweb*, 07/05/2023. [Online] Available at: domusweb.it/it/dall-archivio/2020/05/07/i-progetti-di-jean-prouve-per-strutture-domestiche-prefabbricate-di-metallo.html [Accessed 31 October 2023].
- Irace, F. (ed.) (2008), *Casa per tutti – Abitare la città globale*, Triennale Electa, Milano.
- Jodidio, P. (2015), *Shigeru Ban – Complete Works 1985-2015*, Taschen, Köln.
- Kamali, M., Hewage, K. and Sadiq, R. (2019), “Conventional versus modular construction methods – A comparative cradle-to-gate LCA for residential buildings”, in *Energy and Buildings*, vol. 204, article 109479, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109479 [Accessed 11 October 2023].
- Knaack, U., Chung-Klatte, S. and Hasselbach, R. (2012), *Prefabricated Systems – Principles of Construction*, Birkhäuser Architecture.
- Latka, J. F. (ed.) (2017), “Introduction”, in *A+BE | Architecture and the Built Environment*, pp. 33-46. [Online] Available at: doi.org/10.7480/abe.2017.19 [Accessed 31 October 2023].
- Pelletier, G. (2012), *La victoire du prototype – L’utopie de la maison prefabrique chez les architectes du Mouvement moderne – Le Corbusier, Walter Gropius, Jan Prouvé (1932-1952)*, PhD Tesis, Ecole Nationale Supérieure d’Architecture de Paris La Villette. [Online] Available at: issuu.com/gracepelletier/docs/masterthesis-gpelletier [Accessed 31 October 2023].
- Pepe, D. (2016), “L’esperienza dell’abitazione BiosPHERa 2.0 – Energy Revolution – Il progetto dimostrativo della validità e fattibilità del concetto di edificio off grid”, in *L’Ufficio Tecnico*, n. 5, pp. 24-31. [Online] Available at: researchgate.net/publication/335961697_L%27esperienza_dell%27abitazione_BiosPHERa_20_Energy_Revolution_Il_progetto_dimostrativo_della_validita_e_fattibilita_del_concetto_d_i_edificio_off_grid [Accessed 31 October 2023].
- Pone, S. (2022), “Maker – Il ritorno dei costruttori – Una possibile transizione digitale per l’Architettura | Maker – The return of the builders – A possible digital transition for Architecture”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 12, pp. 14-23. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1212022 [Accessed 11 October 2023].
- Radogna, D. (2018), “Emergenza e turismo in Abruzzo – Un sistema per alloggi temporanei | Emergency and tourism in Abruzzo – A temporary house system”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 4, pp. 177-186. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/4222018 [Accessed 11 October 2023].
- Rossellini, A. (1974), *Lo spazio aperto – Ricerca e progettazione tra design e architettura*, Pizzi, Cinisello Balsamo.
- Sathre, R. and González-García, S. (2014), “Life cycle assessment (LCA) of wood-based building materials”, in Pacheco-Torgal, F., Cabeza, L. F., Labrincha, J. and de Magalhães, A. (eds), *Eco-efficient Construction and Building Materials*, Woodhead Publishing Limited, pp. 311-337. [Online] Available at: doi.org/10.1533/9780857097729.2.311 [Accessed 11 October 2023].
- Scalco, C. (2020), “Leap Home – Case modulari reversibili e performanti”, in *Arketipo*, 04/05/2020. [Online] Available at: arketipomagazine.it/leap-home-case-modulari-reversibili-e-performanti/ [Accessed 31 October 2023].
- Serafin, A. (2012), “Patrick Seguin restores Jean Prouvé’s Maison des Jours Meilleurs”, in *Wallpaper*, 16/10/2022. [Online] Available at: wallpaper.com/architecture/patrick-seguin-restores-jean-prouvvs-maison-des-jours-meilleurs [Accessed 31 October 2023].
- Smith, R. E. and Quale, J. D. (2017), *Offsite Architecture – Constructing the Future*, Routledge.
- Sottosanti, L. A. S. (2018), *Smartbox – Reused container for a student dormitory in the city of Hamburg*, Master Thesis, Architecture for the Sustainability Design, Politecnico di Torino. [Online] Available at: webthesis.biblio.polito.it/8613/ [Accessed 31 October 2023].
- Sposito, C. and Scalisi F. (2019), “High-rise timber architecture – An opportunity for the sustainability of the built environment”, in De Giovanni, G. and Scalisi, F. (eds), *Pro-Innovation – Process Production Product*, Palermo University Press, Palermo, pp. 93-122. [Online] Available at: doi.org/10.19229/978-88-5509-055-1/272019 [Accessed 11 October 2023].
- Tapias Monné, D. (2013), *La maison Prouvé en Nancy*, Universitat Politècnica de Catalunya. Departament de Projectes Arquitectònics. [Online] Available at: tdx.cat/handle/10803/117024?locale-attribute=es#page=2 [Accessed 31 October 2023].
- Vinci, R. (2018), “La casa di cartone che si costruisce in 24 ore – Riciclabile, antisismica e modulare – La Wikkellhouse sta per sbarcare in Italia”, in *Archiportale*, 19/12/2018. [Online] Available at: archiportale.com/news/2018/12/architettura/la-casa-di-cartone-che-si-costruisce-in-24-ore_67658_3.html [Accessed 31 October 2023].
- Vitra Design Museum (2007), *Jean Prouvé – The poetics of the technical object*, Skira, Milano.
- Wainwright, O. (2015), “Return of the prefabs – Inside Richard Rogers’ Y:Cube homes for homeless people”, in *The Guardian*, 08/09/2015. [Online] Available at: theguardian.com/artanddesign/architecture-design-blog/2015/sep/08/inside-richard-rogers-ycube-homes-for-homeless-people [Accessed 31 October 2023].
- Winston, A. (2015), “Richard Rogers updates Jean Prouvé’s 6x6 Demountable House for Design Miami/Basel”, in *Dezen*, 11/06/2015. [Online] Available at: dezen.com/2015/06/11/richard-rogers-updates-jean-prouve-6x6-demountable-house-design-miami-basel-2015-galerie-patrick-seguin/ [Accessed 31 October 2023].