

ARTICLE INFO

Received	10 March 2026
Revised	14 April 2026
Accepted	16 April 2026
Published	30 June 2026

NATURE-BASED RETROFIT SYSTEM

Sistema prefabbricato a base biologica per il retrofit energetico degli edifici

NATURE-BASED RETROFIT SYSTEM

Prefabricated bio-based system for the energy retrofit of buildings

Ingrid Maria Paoletti, Laura Elisabetta Malighetti, Francesco Pittau, Federica Pradella, Giorgio Castellano

ABSTRACT

La decarbonizzazione del Patrimonio edilizio richiede interventi di retrofit scalabili capaci di ridurre non solo i consumi operativi ma anche il carbonio incorporato lungo il ciclo di vita. Il contributo propone un quadro di supporto alle decisioni replicabile, che considera prefabbricazione leggera, scenari di fine vita e metriche temporali mediante la Dynamic Life Cycle Assessment (DLCA). Il metodo è applicato al Nature-based Retrofit System (NoRS), sistema di retrofit di facciata a base biologica assemblato a secco con pannelli in paglia di riso lavorabili a controllo numerico (CNC), e confrontato con un sistema in legno di pari prestazioni. I risultati mostrano che l'analisi temporale DLCA rende visibili compromessi che la LCA statica non intercetta: i benefici variano in funzione della rigenerazione della biomassa e degli scenari di fine vita, con una marcata sensibilità alle emissioni differite di metano in discarica.

The decarbonisation of the building stock requires scalable retrofit interventions that reduce not only operational energy consumption but also embodied carbon across the life cycle. This paper proposes a replicable decision-support framework that integrates light prefabrication, end-of-life scenarios, and temporal metrics through Dynamic Life Cycle Assessment (DLCA). The method is applied to the Nature-based Retrofit System (NoRS), a bio-based façade retrofit system assembled dry using CNC-machined rice straw panels, and compared with a timber-based system of equivalent performance. The results show that DLCA temporal analysis reveals trade-offs that static LCA does not capture: benefits vary with biomass regeneration and end-of-life scenarios. They are highly sensitive to delayed methane emissions under landfill conditions.

KEYWORDS

retrofit energetico, involucro edilizio, valutazione dinamica del ciclo vita, materiali a base biologica, fabbricazione digitale

energy retrofit, building envelope, dynamic life cycle assessment, bio-based materials, digital fabrication

Ingrid Maria Paoletti, Full Professor of Building Technology at the Politecnico di Milano (Italy), focuses her research on innovative technologies and materials to develop a new, responsible material culture. E-mail: ingrid.paoletti@polimi.it

Giorgio Castellano, Researcher at the Politecnico di Milano (Italy), is a member of the Material Balance research group. His research investigates innovative construction systems, bio-based materials, and digital fabrication. E-mail: giorgio.castellano@polimi.it

Federica Pradella, PhD Candidate at the Department of Architecture, Built Environment and Construction Engineering, Politecnico di Milano (Italy), focuses on processes and technologies for innovative production and construction. E-mail: federica.pradella@polimi.it

Laura Elisabetta Malighetti, Associate Professor of Architectural Technology at the ABC Department, Politecnico di Milano (Italy), works on the definition of strategies and tools for the design with a focus on bioclimatic technologies. E-mail: laura.malighetti@polimi.it

Francesco Pittau, Associate Professor at the Department of Architecture, Built Environment and Construction Engineering, Politecnico di Milano (Italy), conducts research on embodied carbon in buildings, circularity in the construction sector, and bio-based materials. E-mail: francesco.pittau@polimi.it



La decarbonizzazione del patrimonio edilizio è una priorità per le politiche climatiche e per i Sustainable Development Goals (SDG), in particolare per l'SDG 9 (UN, 2015), come rilevato dal recente report dell'UNEP (2025), secondo cui, per restare su traiettorie compatibili con gli obiettivi climatici, occorre accelerare gli interventi di riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente e ridurre le emissioni lungo l'intero ciclo di vita. In Europa la Renovation Wave e la revisione della direttiva Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) rafforzano questo orientamento (European Commission, 2020; European Union, 2024), introducendo strumenti la cui efficacia è rilevante per ridurre la povertà energetica, che in Italia interessa ancora una quota significativa di famiglie (OIPE, 2025). Come evidenziato da Clemente et alii (2024) la riqualificazione profonda degli edifici pubblici, per essere realmente attuabile e scalabile, richiede processi integrati che non riguardano soltanto la riduzione dei consumi operativi; infatti, il carbonio incorporato costituisce una criticità rilevante quando le strategie restano centrate sulla sola energia d'uso (Röck et alii, 2020; Habert et alii, 2020).

In questo quadro di riferimento l'involucro rappresenta un ambito privilegiato di intervento, poiché può ridurre tempi e variabilità di cantiere se supportato da regole di interfaccia e filiere di fornitura strutturate, come mostrano gli approcci legati alla prefabbricazione e alla modularità (Silva et alii, 2013; Pittau et alii, 2017; van Roosmalen, Herrmann and Kumar, 2021). In particolare, la modularità non è soltanto una scelta costruttiva, ma un dispositivo di gestione della complessità, utile a governare le interfacce e i cicli di sostituzione selettiva (Manni and Valzano, 2023).

È da registrare inoltre un interesse crescente per i materiali a base biologica rispetto al potenziale contributo che possono fornire alla riduzione delle emissioni incorporate e allo stoccaggio temporaneo del carbonio negli edifici (Peñaloza, Erlandsson and Falk, 2016; Pittau et alii, 2019). Tuttavia, tali benefici non sono automatici, poiché dipendono dalle assunzioni sul carbonio biogenico e dagli scenari di fine vita nei quali emissioni differite, come il metano, possono ridurre o annullare gli effetti dello stoccaggio temporaneo (Levasseur et alii, 2010; Göswein et alii, 2020). Studi recenti mostrano che il contributo dei materiali biogenici ai bilanci di carbonio nel settore edilizio dipende dall'effettiva capacità di stoccaggio e dalla coerenza tra scenari di nuova costruzione e di riqualificazione, confermando la necessità di valutazioni esplicite sul piano temporale e sistemico (Priore et alii, 2026). Un eventuale impiego di fibre naturali richiede quindi valutazioni integrate, capaci di affrontare la complessità degli impatti sulla biosfera e di superare letture limitate al solo carbonio incorporato (Sposito and De Giovanni, 2023; Capasso, 2025).

Esistono strategie legate alla prefabbricazione e strumenti di Life Cycle Assessment (LCA) / Dynamic Life Cycle Assessment (DLCA), ma è meno consolidata la loro integrazione in un processo replicabile capace di connettere circolarità e dimensione temporale degli impatti climatici (Lueddeckens, Saling and Guenther, 2020; Müller et alii, 2025). In questo contesto il contributo propone un quadro di supporto alla progettazione (Fig. 1) che si inserisce nel dibattito scientifico sul retrofit dell'involucro, prevedendo principi di Design for Manufacturing and Assembly (DfMA), Design for Disassem-

bly (DfD), fabbricazione digitale delocalizzata e DLCA, con particolare attenzione alla circolarità nel settore delle costruzioni. Il modello è applicato al Sistema di Riqualificazione basato sulla Natura (Nature-based Retrofit System – NoRS), costituito da componenti prefabbricati con pannelli in fibra di paglia di riso, e confrontato con un sistema di riferimento in legno (Bio-based Comparison System – BBCS).

La domanda di ricerca indaga in che misura l'integrazione della prefabbricazione leggera, dei principi DfMA e DfD, di materiali a base biologica e di metriche temporali DLCA consenta di costruire un supporto decisionale replicabile e metodologicamente trasparente per la valutazione comparativa di sistemi di retrofit. L'originalità del contributo rispetto allo stato dell'arte risiede proprio nella valutazione integrata di questi aspetti che la letteratura tende a trattare separatamente o in combinazioni parziali. A questo scopo, il contributo è articolato in una sezione di stato dell'arte sul retrofit off-site e sulla valutazione temporale degli impatti, in una sezione metodologica dedicata al sistema NoRS e alle sue interfacce, quindi nella presentazione dei risultati del confronto con il sistema di riferimento BBCS, seguita da una discussione critica sulle implicazioni, sui limiti, sulla trasferibilità e sulle relazioni con gli SDG.

Retrofit off-site e valutazione temporale degli impatti

La prefabbricazione e la fabbricazione digitale applicate al retrofit dell'involucro costituiscono traiettorie chiave per aumentare la capacità di intervento sul Patrimonio esistente, riducendo la variabilità di cantiere e i tempi di posa in opera e trasferendo parte del controllo qualitativo a processi esternalizzati e ripetibili (Silva et alii, 2013). Studi su moduli prefabbricati per retrofit finalizzati a edifici a energia quasi zero (NZEB) mostrano che l'approccio diventa realmente sistemico solo quando sono codificate regole di interfaccia, logistica e controllo prestazionale, evidenziando inoltre barriere ricorrenti di interoperabilità e implementazione (van Roosmalen, Herrmann and Kumar, 2021). La letteratura sulle strategie su larga scala conferma infine che i benefici in termini di tempi e qualità dipendono fortemente dalle procedure di approvvigionamento, dall'organizzazione della filiera e dalla standardizzazione, più che dal solo pacchetto tecnologico (Pittau et alii, 2017).

I casi richiamati nel presente contributo sono stati selezionati in quanto rappresentativi di differenti combinazioni tra grado di produzione off-site e predisposizione alla circolarità e in quanto comparabili rispetto a sei criteri: rilevanza per il retrofit di facciata, modularità del sistema, grado di prefabbricazione, integrazione di principi di DfD, scala e maturità dell'applicazione, disponibilità di informazioni tecnico-descrittive sufficienti per il confronto. In questa cornice la Figura 2 propone una mappatura concettuale delle principali traiettorie del retrofit off-site secondo due assi, 'off-site intensity' e 'circular readiness': il primo descrive il grado di industrializzazione e prefabbricazione del processo costruttivo; il secondo il livello con cui il sistema integra DfD, sostituzione selettiva, coordinamento modulare e pianificazione del fine vita.

Nella fascia inferiore si collocano quelle soluzioni già presenti sul mercato per le quali la replicabilità è trainata da modelli di servizio e dall'industrializzazione della posa in opera, come nel caso di

Energiesprong¹, senza che ciò coincida automaticamente con elevati livelli di reversibilità o di flessibilità architettonica, che dipendono da componenti, giunti e strategie di sostituzione (Manni and Valzano, 2023; Salama, 2017).

Nella fascia intermedia si collocano dimostratori sviluppati in programmi europei, quali EASEE², BERTIM³ e AdESA, che fa parte del progetto 4RinEU⁴: in questi casi si rendono esplicite metodologie progettuali, logiche economico-organizzative e strategie di integrazione dell'involucro, sebbene restino spesso legati a condizioni sperimentali e a filiere non ancora strutturate per una diffusione estesa. Nella fascia superiore si collocano infine le ricerche emergenti, caratterizzate da una maggiore intensità delle attività fuori dal cantiere e da una più elevata predisposizione alla circolarità; è in questo ambito che si inserisce NoRS, proposto come retrofit prefabbricato a base biologica, fondato sulla reversibilità, sulla modularità e sulla gestione selettiva del ciclo di vita.

Nel contesto europeo Energiesprong rappresenta il caso di maggiore maturità di mercato tra quelli esaminati: i suoi punti di forza risiedono nel modello di servizio industrializzato e nella capacità di scala, che hanno consentito interventi rapidi su numerose unità residenziali in Europa. La trasferibilità è elevata nelle filiere produttive strutturate, ma è condizionata dalla standardizzazione tipologica degli edifici destinatari. Il progetto EASEE ha invece sviluppato un approccio ibrido che integra prefabbricazione parziale e intervento in opera, con il merito di aver codificato metodologie di interfaccia e protocolli di verifica prestazionale; il limite è la dipendenza dalle condizioni sperimentali e la difficoltà di transizione verso filiere produttive diffuse.

BERTIM ha dimostrato la fattibilità tecnica di moduli prefabbricati in legno per il retrofit energetico, con buoni risultati in termini di riduzione dei tempi di cantiere; la criticità principale riguarda la limitata integrazione dei principi DfD e la dipendenza dalla disponibilità locale delle filiere del legno strutturale, che ne riduce la trasferibilità in contesti geografici diversi. AdESA ha infine il pregio di aver integrato logiche economico-organizzative e criteri di scalabilità nella progettazione del sistema; il limite risiede nella complessità di implementazione e nell'assenza di una metrica temporale degli impatti climatici che consenta confronti trasparenti con le alternative di mercato.

Nel complesso nessuno dei casi esaminati sembra integrare simultaneamente prefabbricazione leggera, materiali a base biologica, principi DfD e valutazione DLCA: questo divario è ciò che il sistema NoRS intende indagare.

Nel contesto italiano i casi di riqualificazione profonda e decarbonizzazione di edifici pubblici mostrano che la scalabilità e la trasferibilità dipendono soprattutto dalla gestione di processo e dalla verifica delle prestazioni in contesti reali, mentre politiche e strumenti pubblici condizionano direttamente la replicabilità attraverso gli appalti (Clemente et alii, 2024; Lauria et alii, 2025). A livello tecnico diversi studi sulle facciate modulari confermano che connettori e dettagli sono i punti critici per la qualità e le prestazioni, rappresentando il nodo in cui la standardizzazione incontra tolleranze e durabilità dell'edificio esistente (Tushar et alii, 2022; Callegaro et alii, 2023; Alvarez-Alava et alii, 2023). In questo quadro la modularità va intesa come dispositivo di gestione della complessità, perché go-

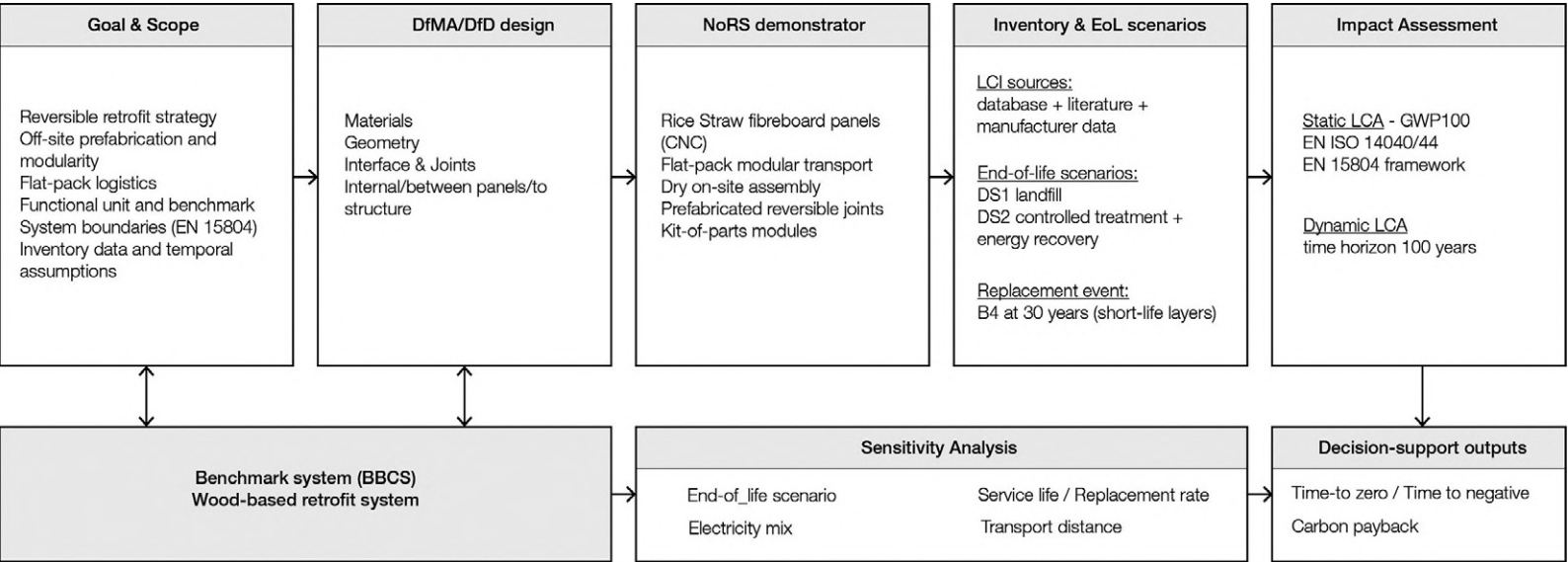


Fig. 1 | Conceptual framework of the contribution: integration of DfMA / DfD design principles, development of the NoRS demonstrator, LCA and DLCA modelling, and generation of decision-support indicators (credit: the Authors, 2026).

verna interfacce, dipendenze tra strati e cicli di sostituzione, condizioni necessarie per garantire la manutenibilità e l'adattabilità nel tempo (Manni and Valzano, 2023).

Quando si introducono obiettivi di circolarità la scalabilità di cantiere non coincide automaticamente con la sostenibilità del ciclo di vita: l'applicazione di metriche di economia circolare nel costruito richiede coerenza tra progettazione, filiera e fine vita (Pomponi and Moncaster, 2017). In tal senso il DfD emerge come prerequisito per abilitare sostituzioni selettive e logistica inversa (Salama, 2017), richiedendo sistemi di valutazione a supporto delle decisioni capaci di misurare il potenziale di riuso dei componenti fin dalla fase di progetto (Paganin et alii, 2024). Studi LCA su strategie DfD mostrano inoltre che i benefici dipendono da ipotesi su durata e scenari realistici, imponendo una trasparenza metodologica rigorosa (Roberts et alii, 2023; Rasmussen, Birkved and Birgisdóttir, 2019).

L'adozione di materiali a base biologica nei sistemi prefabbricati introduce un'ulteriore variabile critica: le prestazioni climatiche dipendono non solo dal contenuto biogenico, ma anche dalla distribuzione temporale dei flussi emissivi. La modellazione del retrofit come assorbitore di carbonio evidenzia che biomasse a rapida rigenerazione, come la paglia di riso, possono offrire vantaggi significativi, ma in modo condizionato da tempi e scenari di fine vita (Pittau et alii, 2019). In modo coerente Thiébat et alii (2025) sottolineano che la sostenibilità delle fibre naturali richiede valutazioni integrate; analogamente, approcci che combinano Environmental-LCA e Social-LCA mostrano che la progettazione a basse emissioni non può limitarsi alla sola riduzione della CO₂, ma deve considerare anche implicazioni sociali e di filiera, soprattutto quando innovazioni di prodotto e strategie di fine vita incidono sull'accessibilità, sui costi e sulla replicabilità delle soluzioni (Palumbo et alii, 2025).

Applicazioni di DLCA rendono inoltre esplicito che scenari di scarica possono generare emissioni differite di metano, mentre il recupero energetico modifica sensibilmente i risultati (Göswein et alii, 2020). Il nodo metodologico è che una LCA statica aggrega flussi emissivi distribuiti nel tempo,

mentre la DLCA consente di leggere i profili emissivi annuali (Levasseur et alii, 2010, 2013), integrando quadri analitici espliciti sul piano temporale capaci di affrontare la complessità degli impatti sulla biosfera (Lueddeckens, Saling and Guenther, 2020; Müller et alii, 2025; Sposito and De Giovanni, 2023). In sintesi, lo stato dell'arte evidenzia un divario operativo: la sfida non è soltanto sviluppare nuove tecnologie per la prefabbricazione fuori cantiere o a base biologica, ma integrarle in un quadro replicabile che colleghi processo, circolarità e metriche temporali per supportare decisioni progettuali comparabili e scalabili.

Metodologia | Il presente studio mira a valutare il profilo di impatto climatico lungo il ciclo di vita del NoRS, confrontandolo con quello di un sistema comparativo biogenico (BBCS) e lo fa perseguendo tre obiettivi: 1) rendere confrontabili e trasparenti le scelte progettuali attraverso l'esplicitazione delle assunzioni dei modelli; 2) verificare in che misura una lettura temporale dinamica modifichi l'interpretazione dei risultati rispetto a una LCA convenzionale; 3) identificare i fattori critici che incidono sulla robustezza dei risultati, con particolare attenzione a fine vita, mix elettrico, trasporti e frequenza di sostituzione. BBCS è assunto come sistema di riferimento a base di legno in quanto rappresenta una soluzione comparabile rispetto a funzione, configurazione non portante, prestazione termica, requisito di sicurezza antincendio e vita utile di riferimento; ciò consente di isolare con maggiore trasparenza gli effetti della diversa composizione materica e della diversa temporalità del carbonio biogenico, evitando che il confronto sia alterato da differenze prestazionali non pertinenti.

Per garantire un confronto coerente NoRS e BBCS sono stati equiparati in termini di prestazione termica, assumendo una trasmittanza stazionaria pari a $U = 0,19 \text{ W/m}^2\text{K}$, e resi comparabili rispetto ai requisiti di sicurezza antincendio mediante l'integrazione, per entrambi i sistemi, di uno strato protettivo esterno in classe A1 e di un livello prestazionale assunto equivalente ai fini del confronto. L'analisi si concentra sugli impatti incorporati del sistema di involucro, considerando le fasi di produ-

zione, logistica, sostituzione e fine vita (A1–A5, B4, C1–C4 e D), ed esclude l'energia operativa dell'edificio (B6) per isolare gli effetti delle strategie di filiera e della temporalità dello stoccaggio biogenico (Fig. 3).

Questa impostazione consente non solo la comparazione ambientale tra le alternative di retrofit, ma anche una lettura critica in termini di innovazione dei processi costruttivi, accessibilità degli interventi e gestione responsabile delle risorse lungo il ciclo di vita. In questo senso lo studio si colloca nel quadro di approcci integrati alla valutazione ambientale, capaci di superare una lettura esclusivamente statica del carbonio (Sposito and De Giovanni, 2023).

Fasi operative della ricerca | Le attività di ricerca sono state articolate in sei fasi operative, esplicitate al fine di rendere il procedimento replicabile: Fase 1) ricognizione dello stato dell'arte e selezione dei casi comparativi; Fase 2) definizione dell'Unità Funzionale (UF) e dei confini del sistema; Fase 3) costruzione dell'inventario comparativo dei due sistemi; Fase 4) modellazione LCA e DLCA; Fase 5) analisi di sensitività sui principali parametri critici; Fase 6) interpretazione comparativa dei risultati e verifica della trasferibilità del processo.

NoRS: sistema, processo e interfacce | Il sistema NoRS è configurato come un kit di componenti prefabbricati a base biologica e progettato secondo i principi di DfMA e DfD (Fig. 4). In questa impostazione la riduzione della variabilità in opera è affidata a un sistema basato su componenti e alla codifica delle interfacce. La posa in opera è quindi concepita come un processo ripetibile basato sull'assemblaggio a secco, compatibile con la produzione delocalizzata e con il trasporto di componenti piani. In tale cornice la modularità non agisce solo come criterio di semplificazione esecutiva, ma anche come dispositivo tecnico per governare la manutenibilità e i cicli di sostituzione differenziati dei livelli funzionali (Manni and Valzano, 2023).

Il modulo base NoRS è un elemento non portante la cui stratigrafia (Fig. 5) è stata sviluppata per integrare prestazioni termiche, prefabbricazione

leggera e potenziale di circolarità. Il sistema comprende: a) uno strato comprimibile di compensazione e livellamento a base paglia di (RH-50, Ricehouse S.r.l.) per assorbire le irregolarità del supporto murario esistente; b) pannelli in fibra di paglia di riso ad alta densità (RH700-s, Ricehouse S.r.l.), con funzione di irrigidimento e chiusura del box; c) membrane funzionali per il controllo della diffusione del vapore; d) isolamento primario in fibra di paglia sciolta (RH-L, Ricehouse S.r.l.); e) uno strato esterno di protezione meccanica e finitura di intonaco in classe di resistenza al fuoco A1 (RH210, Ricehouse S.r.l.). L'impiego di sottoprodotti agricoli valorizza inoltre una filiera corta, con potenziali benefici in termini di riduzione delle distanze di trasporto. NoRS adotta infatti una logica di semplificazione materica fondata sull'impiego prevalente di componenti derivati dagli scarti della filiera risicola. Pur non configurandosi come sistema monomateriale in senso stretto, questa impostazione riduce la complessità compositiva dell'involucro e ne rende più leggibili le implicazioni in termini di LCA, sostituzione selettiva e fine vita, in linea con studi recenti sugli involucri a ridotta eterogeneità materica (Bucklin et alii, 2023).

Il processo DfMA segue un flusso di lavoro strutturato dalla progettazione all'assemblaggio: definizione dei pannelli e delle tolleranze, generazione dei pezzi e preparazione delle interfacce, produzione CNC ed etichettatura dei componenti, logistica dei componenti piani e assemblaggio a secco in opera (Fig. 6). La fabbricazione digitale consente di ridurre gli errori, limitare gli sfridi e rendere verificabile la sequenza di montaggio. L'obiettivo non è una produzione di massa centralizzata, ma una prefabbricazione leggera, compatibile con reti di produzione distribuita, purché siano rispettati i requisiti dimensionali e i controlli di qualità.

Per rispondere alla variabilità morfologica del patrimonio edilizio esistente, NoRS adotta una strategia modulare parametrica articolata in tre scale (S, M ed L) e in tre famiglie funzionali (Fig. 7): moduli piani per superfici cieche, moduli ad angolo per la gestione degli spigoli e moduli integrati per serramenti e cavedi impiantistici.

Le regole di interfaccia del sistema, che costituiscono la base tecnica della reversibilità e della trasferibilità del kit, sono organizzate in tre livelli: 1) giunti interni al sistema box, legati alla precisione e alle tolleranze di taglio della fabbricazione CNC; 2) giunti tra moduli adiacenti, responsabili della continuità termo-igrometrica e della tenuta all'aria e all'acqua; 3) connessioni tra sistema ed esistente, realizzate tramite piastre metalliche, che consentono il trasferimento dei carichi e l'assorbimento delle tolleranze del supporto. In questa logica la manutenzione e le sostituzioni selettive sono considerate parte integrante del ciclo di vita del sistema.

L'elemento centrale dell'interfaccia è un connettore meccanico multifunzionale, sviluppato nell'ambito di una domanda di brevetto⁵, collocato lungo i giunti orizzontali e concepito per integrare assemblaggio, trasferimento dei carichi e compartimentazione antincendio, agendo anche come elemento tagliafuoco (Fig. 8). Questo componente media la transizione tra la precisione della fabbricazione digitale e le tolleranze del costruito esistente, consentendo la posa a secco, l'autoallineamento e la sostituzione selettiva dei moduli in coerenza con la logica DfD. NoRS è presentato come dimostratore di sistema e non come prodotto già certificato. Il processo identifica quindi i requisiti prestazionali da verificare nella transizione verso un'applicazione industriale: comportamento igrotermico dei nodi in regime dinamico, tenuta all'aria e all'acqua dei giunti meccanici, durabilità delle

fibre naturali in condizioni di umidità variabile, comportamento al fuoco dell'assemblato, prestazioni acustiche e affidabilità delle interfacce nel lungo periodo. Nel presente contributo tali aspetti non sono assunti come già conformi, ma identificati come condizioni di verifica necessarie al passaggio da dimostratore a prodotto, distinguendo tra la dimostrazione di fattibilità metodologico-comparativa e il percorso di conformità normativa.

Unità funzionale e confini del sistema | La comparazione è impostata su una UF definita come 1 metro quadrato di sistema di retrofit di facciata con una Reference Service Life (RSL) di 60 anni (Tab. 1). Il perimetro della valutazione segue la struttura modulare del kit NoRS e comprende: approvvigionamento delle materie prime e produzione (A1–A3), trasporto e installazione (A4–A5), sostituzione programmata dei componenti con vita utile inferiore (B4), processi di fine vita (C1–C4) e benefici netti oltre i confini del sistema (D). L'impostazione metodologica segue gli standard UNI EN ISO 14040:2021 (UNI, 2021b), UNI EN ISO 14044:2021 (UNI, 2021c), UNI EN 15804:2021 (UNI, 2021a) e UNI EN 15978:2011 (UNI, 2011). Gli strati non differenzianti tra le due soluzioni sono stati esclusi mediante una regola esplicita (massa < 1%), applicata in modo simmetrico.

Inventario, fonti dei dati e scenari | I processi relativi a materiali, energia e trasporti sono stati modellati integrando i database LCA standard (Ecoinvent 3.10) e dati di letteratura, mentre le schede tecniche fornite da Ricehouse S.r.l. sono state impiegate per definire le caratteristiche fisiche e prestazionali delle componenti in fibra di paglia di riso. Il confronto tra NoRS e BBCS si basa su un inventario dettagliato delle stratigrafie e delle masse per

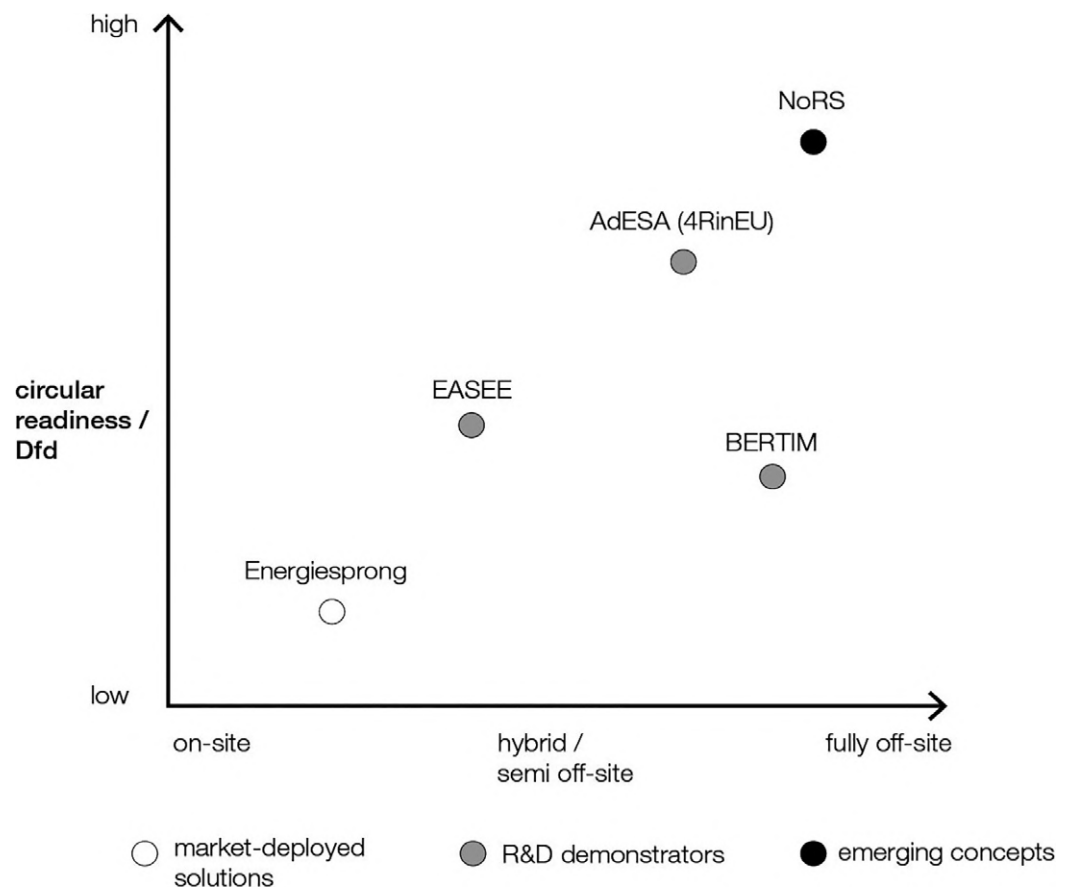


Fig. 2 | Conceptual mapping of off-site retrofit solutions according to off-site construction intensity and degree of circular readiness (DfD potential). The figure presents selected representative market cases, research demonstrators, and the NoRS system discussed in this contribution (credit: the Authors, 2026).

UF (Fig. 9; Tab. 2). In fase d'uso il modello prevede un evento di sostituzione al 30° anno per gli strati funzionali con vita utile inferiore alla RSL (B4), mentre i componenti principali mantengono un Estimated Service Life (ESL) di 60 anni. Per il fine vita sono stati adottati due scenari alternativi: DS1, caratterizzato dalla prevalenza del conferimento in discarica sanitaria, e DS2, orientato al recupero energetico e al trattamento controllato della biomassa (Tab. 3). L'obiettivo non è individuare uno scenario 'ottimale', ma rendere esplicita la dipendenza dei risultati dalle filiere di fine vita (EoL) e dalle emissioni differite di metano associate alla degradazione anaerobica dei materiali biogenici.

La costruzione degli scenari DS1 e DS2 è ancorata al contesto normativo italiano. I materiali biogenici da costruzione, come la paglia di riso e il legno, e le filiere di fine vita controllate (compostaggio, recupero energetico) non sono ancora sistematicamente strutturate, rendendo lo scenario DS1 (discarica sanitaria) il riferimento più realistico per la quota di biomassa non intercettata dalle filiere specializzate. Lo scenario DS2 rappresenta invece la traiettoria verso cui le politiche europee orientano il settore, in linea con la Direttiva 2008/98/EC (European Parliament and Council of the European Union, 2008) e con gli obiettivi dell'EPBD (European Union, 2024). I due scenari non hanno quindi natura probabilistica ma comparativa e normativa: DS1 descrive le condizioni attuali più conservative, DS2 le condizioni abilitanti per un beneficio climatico pieno.

DLCA e indicatori temporali | Accanto alla LCA convenzionale lo studio applica una metodologia DLCA (Fig. 10). La modellazione adotta un approccio esplicito sul piano temporale, basato sulla distribuzione annuale dei flussi emissivi e di assorbimento lungo un orizzonte di 100 anni, così da rendere leggibile la diversa tempistica tra emissioni iniziali, sostituzioni in esercizio e processi di rigenerazione

della biomassa. Le emissioni differite di metano associate agli scenari di fine vita sono trattate come flussi temporizzati, coerenti con le ipotesi di degradazione anaerobica o di recupero energetico adottate nei due scenari DS1 e DS2. Il modello combina dati di inventario derivati da database standard e dalla letteratura, organizzati in una procedura comparativa LCA / DLCA finalizzata a restituire profili emissivi istantanei e cumulativi, nonché indicatori sintetici utili al confronto tra alternative di retrofit. Nel caso di DS1 il metano biogenico rilasciato in discarica sanitaria è modellato come emissione differita associata alla degradazione anaerobica della biomassa; nel caso di DS2, il trattamento controllato della biomassa e il recupero energetico del legno sono modellati come scenari alternativi capaci di ridurre le emissioni nette e di generare crediti energetici nel Modulo D.

La modellazione LCA è stata sviluppata con PRé Consultants SimaPro 9.6.0.1. Il calcolo della DLCA è stato condotto mediante lo strumento DynCO₂ (CIRAIG, Università di Montréal), che restituisce i profili di forzante radiativa istantanea (GWI inst) e cumulativa (GWI cum) in W/m², nonché l'impatto relativo espresso in CO₂eq (GWP), seguendo la formulazione di Levasseur et alii (2010; 2013). I flussi di CO₂, CH₄, CO e N₂O sono trattati separatamente, distinguendo contributi fossili, biogenici e da trasformazione del suolo, coerentemente con l'approccio di Göswein et alii (2020). Nel modello i tempi di rigenerazione della biomassa sono assunti pari a 1 anno per la paglia di riso e a 90 anni per il legno. Oltre ai profili emissivi istantanei e cumulativi, sono calcolati indicatori sintetici quali 'time-to-zero' e 'time-to-negative', utili a descrivere rispettivamente il tempo di neutralizzazione degli impulsi iniziali e il momento in cui il sistema diventa un assorbitore netto di carbonio (Levasseur et alii, 2013; Müller et alii, 2025).

Analisi di sensitività e replicabilità | L'analisi di

sensibilità è strutturata in quattro driver fattori principali: 1) variazione degli scenari EoL (DS1 vs DS2); 2) influenza del mix elettrico sui calcoli dei crediti nel Modulo D; 3) impatto delle distanze di trasporto e della logistica; 4) variazione della vita utile e del ritmo di sostituzione dei componenti. Tale impostazione è coerente con il dibattito scientifico sulla sensibilità ai parametri temporali (Shimako et alii, 2018). La combinazione di processi tratti da banche dati standard e da dati primari consente di restituire un confronto metodologicamente trasparente e replicabile, fondato sulla sistematizzazione dell'inventario e sull'esplicitazione delle assunzioni dei modelli (Brandão et alii, 2013; Müller et alii, 2025).

Risultati | L'analisi dei risultati si articola in quattro livelli: inventario emissivo per moduli di ciclo di vita, profili di forzante radiativa istantanea, profili di forzante radiativa cumulativa e indicatori sintetici di impatto relativo. I risultati della DLCA mostrano che l'esplicitazione della dimensione temporale modifica in modo sostanziale l'interpretazione del retrofit a base biologica, rendendo visibili sia il processo di assorbimento e rigenerazione della biomassa sia gli effetti del fine vita, in particolare le emissioni differite di metano in discarica. Nel modello, i flussi emissivi e di assorbimento sono distribuiti su una timeline annuale e restituiti come profili di forzante radiativa istantanea e cumulativa su un orizzonte di 100 anni, includendo sostituzioni in esercizio (B4) e i due scenari di fine vita, DS1 e DS2 (Levasseur et alii, 2010, 2013). Le grandezze emissive e di assorbimento in ingresso sono riportate come inventario per i moduli di ciclo di vita e come parametri di assorbimento e di stoccaggio biogenico (Tab. 4).

L'inventario aggregato per moduli (Tab. 5) evidenzia che, in entrambe le alternative, DS1 (discarica) rappresenta uno dei contributi più impattanti: l'elevata incidenza è dovuta al rilascio di metano associato alla degradazione dei materiali biogenici in discarica sanitaria. La differenza tra i due sistemi

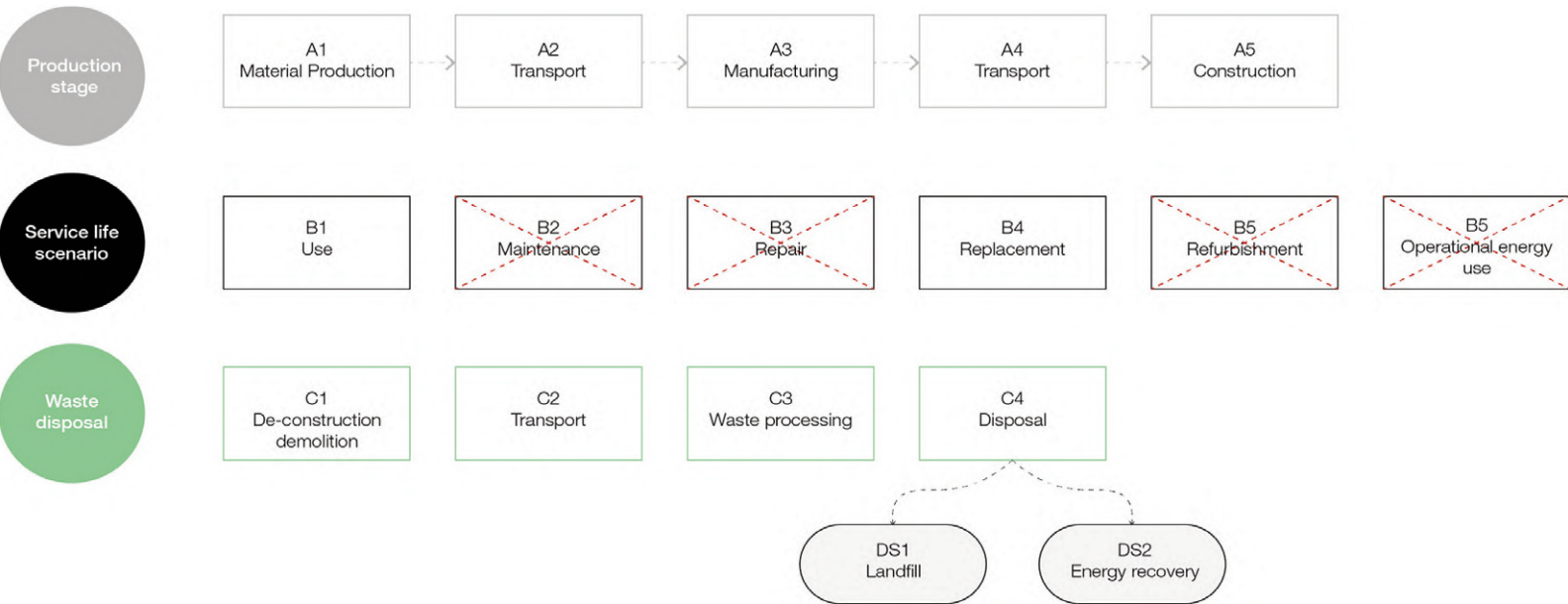
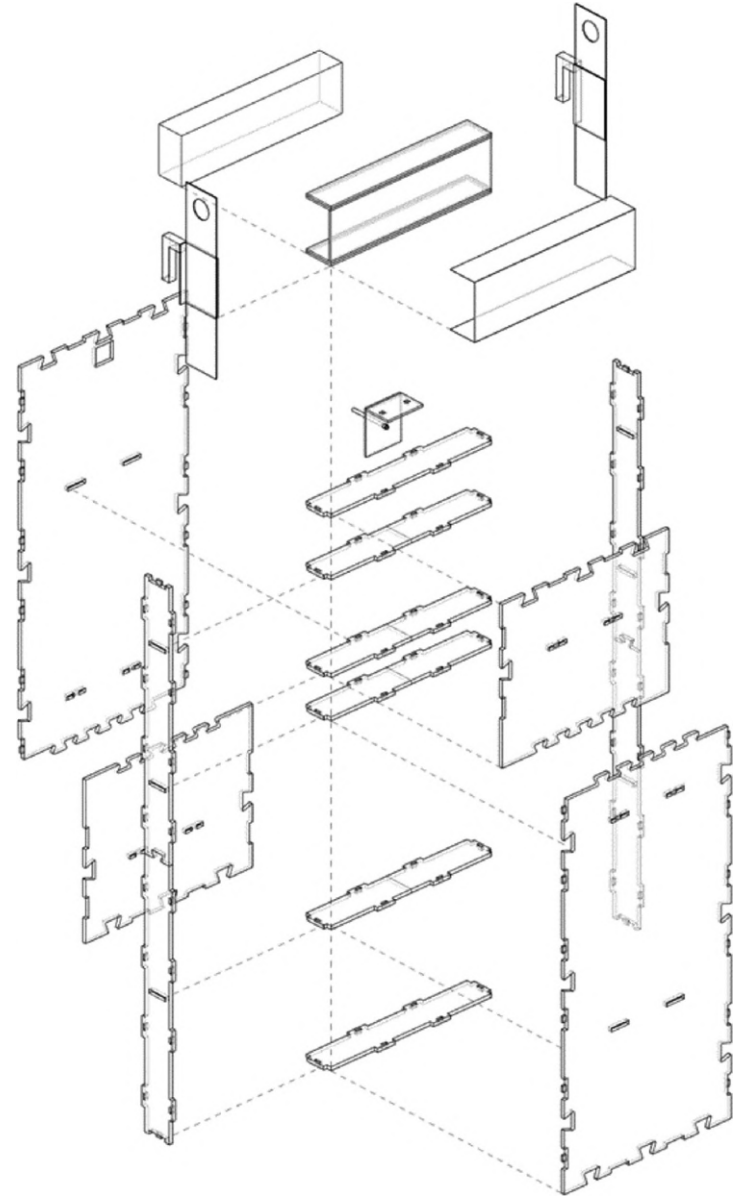


Fig. 3 | System boundaries and life cycle modules adopted in the study (UNI, 2021a). Modules excluded from the system boundary are crossed out; DS1 and DS2 represent alternative end-of-life scenarios (credit: the Authors, 2026).

Tab. 1 | Definition of the Functional Unit used for the comparative assessment (credit: the Authors, 2026).

Retrofit system	U-value	Type of system	Performance	Lifespan
1 m ²	0.19 W/m ² K	Non-load-bearing structure	Identical fire safety (A1 class for the extension layer)	60-years lifespan is assumed to be the same as residential buildings' Reference Service Life (RSL)

Fig. 4 | The NoRS base module with prefabricated component kit, stiffening elements, functional layers, and assembly devices (credit: the Authors, 2026).



è principalmente legata alla quantità e alla tipologia di biomassa impiegata: una maggiore quota di paglia di riso nel dimostratore riduce il contributo fossile complessivo in alcune fasi, ma aumenta la sensibilità al metano se il fine vita non è gestito in filiere controllate. In parallelo i parametri di assorbimento evidenziano la divergenza temporale tra biomasse a rapida rigenerazione (paglia con rotazione annuale) e biomasse a rigenerazione lenta (legno con rotazione 90 anni), condizione che incide direttamente sul profilo dinamico (Lueddeckens, Saling and Guenther, 2020).

Il profilo di forzante radiativa istantanea evidenzia una rapida riduzione dell'impatto già dopo il primo anno, associata alla rigenerazione delle colture. Nel caso NoRS la curva scende sotto lo zero: la maggiore quota di biomassa biogenica consente infatti di compensare più rapidamente le emissioni iniziali (Fig. 11). La sostituzione a 30 anni (B4) determina un incremento puntuale, coerente con il rinnovo degli strati a vita utile più breve; non è invece prevista la sostituzione programmata dei principali componenti biogenici. A fine vita, nello scenario DS1 si osserva un incremento marcato della forzante, dovuto alla decomposizione del biogenico in discarica sanitaria. Nel modello sono considerati circa 60 kg di paglia per NoRS, contro circa 20 kg di

paglia e 14 kg di legno per BBCS; il ritorno a valori prossimi allo zero richiede circa 30 anni dopo l'EoL. Tale dinamica è coerente con precedenti applicazioni DLCA su sistemi di retrofit in paglia (Göswein et alii, 2020).

Il profilo di forzante radiativa cumulativa (Fig. 12) conferma che DS1 genera gli impatti più elevati per entrambe le alternative: il rilascio di metano in discarica determina un rapido incremento della curva, riducendo o annullando parte del beneficio associato allo stoccaggio temporaneo del carbonio. In DS2 i profili migliorano sensibilmente e possono raggiungere valori negativi, evidenziando come la neutralità climatica non sia una proprietà intrinseca del materiale, ma dipenda da assunzioni modellistiche e dalla coerenza delle filiere di fine vita con la strategia progettuale (Brandão et alii, 2013; Müller et alii, 2025). Nel confronto tra NoRS e BBCS, la diversa tempistica di rigenerazione emerge come fattore discriminante.

Infine la lettura in termini di impatto relativo sintetizza ulteriormente i risultati: NoRS presenta l'impatto più contenuto e raggiunge condizioni negative prima del sistema di riferimento a base di legno; BBCS non può essere assunto automaticamente come climaticamente neutro, poiché lo stoccaggio nel legno non compensa di per sé le emissioni lun-

go la vita utile se la ricrescita è lenta e/o se il fine vita comporta emissioni significative (Fig. 13). Convertendo la forzante cumulativa in metriche equivalenti e analizzando indicatori temporali sintetici, nel modello il GWP diventa negativo dopo circa 25 anni per NoRS e dopo circa 58 anni per BBCS. Il differenziale evidenzia che un beneficio climatico significativo si ottiene solo quando il carbonio è rapidamente riassorbito dalla risorsa di biomassa e quando il fine vita limita le emissioni di metano. Nel complesso i risultati confermano la necessità di esplicitare scenari e di condurre analisi di sensitività su elementi critici, EoL, crediti in D, trasporti e sostituzioni (Shimako et alii, 2018).

Relazione con gli SDG: mappatura critica | Gli SDG direttamente pertinenti allo studio sono quattro. L'SDG 9 (Industria, innovazione e infrastrutture) è quello centrale: il modello proposto integra la fabbricazione digitale, la prefabbricazione leggera e le metriche temporali in un approccio industrializzabile per il retrofit dell'involucro, contribuendo all'innovazione dei processi costruttivi e alla scalabilità delle soluzioni. L'SDG 11 (Città e comunità sostenibili) è coinvolto dalla capacità del sistema di intervenire sugli edifici occupati, riducendo i tempi di cantiere e il disagio abitativo, con ricadute positive

Code	Typology	Material	Thickness [mm]	Density [kg/m³]	λ [W/mK]	Mass [kg/m²]	U [W/m²K]	Rt [m²K/W]	Lifespan [year]	Waste treatment category	Rotation period
BBCS											
	existing building	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	adaptation layer	RH-P50	80	50	0.039	4	-	2.05	60	no potential	1
2	inner layer	OSB	18	510	0.12	9.18	-	0.15	60	wood	-
3	insulation	RH-L	150	125	0.05	18.75	-	3	60	fast composting	1
4	structure	timber frame wood	-	500	0.12	13.5	-	-	60	wood	90
5	external layer A1 fireclass	fermacell firepanel	18	1200	0.38	21.6	-	0.05	30	no potential	1
stationary							0.19				
NoRS											
	existing building	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	adaptation layer	RH-P50	80	50	0.039	4	-	2.05	60	no potential	1
2	inner layer	RH700-S	18	700	0.12	12.6	-	0.15	60	no potential	-
3	insulation	RH-L	150	125	0.05	18.75	-	2.83	60	fast composting	1
4	external layer	RH700-S	18	700	0.12	12.6	-	0.15	60	no potential	1
5	external layer A1 fireclass	RH210	4	1150	0.38	4.6	-	0.01	30	no potential	1
stationary							0.19				

Tab. 2 | Detailed inventory: BBCS vs NoRS (credit: the Authors, 2026).

sulla resilienza delle comunità urbane vulnerabili. L' SDG 12 (Consumo e produzione responsabili) è perseguito attraverso la logica DfD e la filiera corta della paglia di riso, che orientano verso modelli di produzione e consumo a ridotto impatto e verso la sostituzione selettiva dei componenti anziché la demolizione. L' SDG 13 (Lotta contro il cambiamento climatico) è affrontato attraverso la riduzione del carbonio incorporato e la gestione temporale dei flussi climatici lungo il ciclo di vita, con l'obiettivo di contribuire alla decarbonizzazione del patrimonio edilizio.

Gli SDG indirettamente interessati comprendono l' SDG 7 (Energia pulita e accessibile), poiché il miglioramento dell'involucro riduce i consumi energetici operativi e può contribuire alla mitigazione della povertà energetica, e l' SDG 8 (Lavoro dignitoso e crescita economica), poiché il modello di produzione distribuita può generare occupazione qualificata locale. L' SDG 15 (Vita sulla terra) è indirettamente coinvolto dall'impiego di biomasse agricole a rapida rigenerazione come alternativa ai materiali estrattivi, con potenziali benefici sulla gestione del suolo agricolo.

Emergono tuttavia taluni compromessi. Con l' SDG 1 (Sconfiggere la povertà) e l' SDG 10 (Ridurre le disuguaglianze) il nodo principale riguarda i costi iniziali del sistema, che possono risultare inaccessibili per le fasce di popolazione più vulnerabili in assenza di politiche di incentivazione e governance della filiera. Con l' SDG 12 esiste un conflitto tra recupero energetico e riuso del materiale nel fine vita poiché lo scenario DS2 riduce le emissioni di metano attraverso l'incenerimento controllato, ma preclude il riuso dei componenti. Con l' SDG 13 il compromesso riguarda la dipendenza dei benefici climatici dalla coerenza delle filiere di fine vita: in assenza di infrastrutture controllate, lo scenario DS1 mostra che le emissioni differite di metano sono in grado di annullare i vantaggi dello stoccaggio biogenico.

Discussione e limiti dello studio | L'introduzione di metriche temporali mediante DLCA sposta la valutazione ambientale da una lettura retrospettiva a uno strumento di supporto alle decisioni: l'analisi non riguarda soltanto l'entità degli impatti, ma anche la loro distribuzione nel tempo. In tal modo la lettura dei risultati non valuta soltanto la robustezza del confronto ambientale, ma anche la possibilità di interpretare criticamente come diverse scelte di filiera e di fine vita producano sinergie o compromessi rispetto agli obiettivi di innovazione, equità, responsabilità materiale e mitigazione climatica.

La DLCA permette di leggere le traiettorie del cambiamento climatico lungo il ciclo di vita dell'edificio, rendendo espliciti profili emissivi e compensazioni temporali che la LCA convenzionale tende a comprimere in un unico indicatore (Negishi et alii, 2019). L'approccio qui presentato affronta le criticità temporali, riconosciute come limite strutturale della LCA statica e particolarmente rilevanti per materiali a base biologica (Lueddeckens, Saling and Guenther, 2020), in coerenza con i più recenti quadri analitici espliciti sul piano temporale (Müller et alii, 2025). La crescente disponibilità di procedure operative per la DLCA e la temporalizzazione dei processi di sfondo ne rendono più praticabile l'applicazione in contesti operativi (Cardellini et alii, 2018; Pigné et alii, 2020), come confermato dalla letteratura sul costruito (Su et alii, 2021).

L'applicazione della DLCA al sistema NoRS rende visibile ciò che la LCA statica tende ad appiattire: il differenziale di 33 anni nel raggiungimento del GWP negativo tra NoRS e BBCS non è un dettaglio tecnico, ma un dato con ricadute progettuali rilevanti. Una scelta di filiera, la paglia di riso con rigenerazione annuale contro il legno con rotazione novantennale, può determinare se un sistema contribuisce alla mitigazione climatica entro una finestra temporale coerente con gli obiettivi al 2050, oppure oltre tale finestra.

Se la trasferibilità metodologica del metodo risulta elevata, grazie alle unità funzionali, ai confini EN 15804, agli scenari e alle analisi di sensitività, la maturità del sistema NoRS come prodotto resta condizionata da verifiche prestazionali estese, in particolare sulla sicurezza antincendio, sul comportamento igrotermico dei nodi, sulla tenuta dei giunti e sulla durabilità. In questo senso i risultati costituiscono una dimostrazione di fattibilità metodologico-comparativa più che una certificazione di sistema.

La progettazione del connettore meccanico affronta il tema cruciale delle interfacce, che la letteratura identifica tra i principali ostacoli alla circolarità effettiva (Salama, 2017). Tuttavia, il disassemblaggio e la sostituzione selettiva presuppongono non solo la compatibilità geometrica, ma anche la logistica inversa e la gestione di fine vita. In questo quadro una delle evidenze principali della DLCA riguarda la sensibilità dei risultati alle emissioni differite di metano in discarica, capaci di ridurre o annullare i benefici dello stoccaggio temporaneo: scenari EoL controllati diventano quindi una condizione abilitante, non un dettaglio di modellazione.

Ai fini di una corretta interpretazione dei risultati è infine opportuno distinguere tre categorie di limiti. Sul piano dei dati, la caratterizzazione dei materiali a base di paglia di riso dipende in parte dalle schede tecniche fornite dal produttore, mentre i dati di base provengono da database standard (Ecoinvent 3.10) e potrebbero non riflettere appieno le specificità della filiera italiana. Sul piano della modellazione gli scenari di fine vita DS1 e DS2 restituiscono traiettorie plausibili ma non esaustive delle filiere reali e l'assenza di una valutazione S-LCA lascia inesplorata, in parte, la dimensione sociale degli impatti. L'integrazione di metriche S-LCA consentirebbe di rendere più esplicita la dimensione sociale del retrofit, collegando carbonio incorporato e indicatori di equità per le comunità vulnerabili (Palumbo et alii, 2025). La simulazione di scenari logistici su sca-

la distrettuale rappresenterebbe infine la frontiera operativa più prossima, in cui la coerenza tra progetto, filiera e politica pubblica può essere verificata empiricamente.

Sul piano prestazionale diversi aspetti del sistema NoRS non sono ancora stati verificati sperimentalmente: comportamento igrotermico dei nodi in regime dinamico, tenuta all'aria e all'acqua dei giunti meccanici, durabilità delle fibre naturali in condizioni di umidità variabile, comportamento al fuoco dell'assemblato e prestazioni acustiche.

Le barriere alla diffusione agiscono a diversi livelli. Quelle tecnico-normative riguardano l'assenza di classificazioni standardizzate per i rifiuti biogenici da costruzione e la mancanza di un certificato Environmental Product Declaration (EPD) per i materiali a base di paglia di riso, che ostacolano l'integrazione nei capitolati pubblici e nei processi di appalto. Quelle economiche includono i costi iniziali più elevati rispetto alle soluzioni convenzionali e la difficoltà di valorizzare economicamente i benefici differiti dello stoccaggio biogenico lungo l'arco del ciclo di vita. Quelle organizzative riguardano la necessità di coordinare filiere distribuite, in assenza di modelli di servizio consolidati, per il retrofit a base biologica su scala industriale. Quelle di fine vita sono tra le più critiche: la mancanza di infrastrutture per il compostaggio o per il recupero energetico controllato dei materiali biogenici da costruzione rischia di vanificare i benefici dello stoccaggio temporaneo del carbonio, come evidenziato dai risultati dello scenario DS1.

Sul piano della trasferibilità il quadro metodologico – unità funzionale normalizzata, confini EN 15804, scenari di fine vita comparativi e indicatori temporali sintetici – è applicabile a qualsiasi sistema di retrofit dell'involucro, indipendentemente dalla tecnologia, dal materiale e dal luogo di utilizzo, a condizione che siano disponibili dati di inventario adeguati e che gli scenari di fine vita siano esplicitati con analogia trasparenza. Il quadro è inoltre potenzialmente applicabile ad altri settori disciplinari che affrontano la valutazione di sistemi costruttivi a base biologica.

In sintesi, il caso NoRS mostra che i benefici climatici dei materiali a base biologica dipendono

da un insieme di condizioni che trascendono la scelta del materiale stesso, coinvolgendo la gestione della filiera, gli strumenti di valutazione e il quadro normativo di riferimento. Rendere queste condizioni esplicite e misurabili è una delle direzioni più produttive per la ricerca sul retrofit sostenibile nei prossimi anni.

The decarbonisation of the building stock is a priority for climate policies and for the Sustainable Development Goals (SDGs), particularly SDG 9 (UN, 2015), as highlighted in the recent UNEP (2025) report, which states that, to remain on trajectories compatible with climate targets, it is necessary to accelerate energy retrofit interventions in the existing building stock and reduce emissions across the entire life cycle. In Europe, the Renovation Wave and the revision of the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) reinforce this direction (European Commission, 2020; European Union, 2024), introducing instruments whose effectiveness is crucial for reducing energy poverty, which still affects a significant share of households in Italy (OIPE, 2025). As highlighted by Clemente et alii (2024), deep renovation of public buildings, to be truly feasible and scalable, requires integrated processes that go beyond mere reductions in operational energy consumption. Indeed, embodied carbon represents a major critical issue when strategies remain focused solely on use-phase energy (Röck et alii, 2020; Habert et alii, 2020).

Within this framework, the building envelope is a key area for intervention, as it can reduce construction time and site variability when supported by clear interface rules and structured supply chains, as demonstrated by approaches based on prefabrication and modularity (Silva et alii, 2013; Pittau et alii, 2017; van Roosmalen, Herrmann and Kumar, 2021). In particular, modularity is not merely a construction choice but a means of managing complexity, useful for controlling interfaces and enabling selective replacement cycles (Manni and Valzano, 2023). There is also growing interest in bio-based materials for their potential to reduce

embodied emissions and to temporarily store carbon in buildings (Peñaloza, Erlandsson and Falk, 2016; Pittau et alii, 2019). However, these benefits are not automatic, as they depend on assumptions about biogenic carbon and on end-of-life scenarios, in which delayed emissions, such as methane, may reduce or negate the effects of temporary storage (Levasseur et alii, 2010; Göswein et alii, 2020). Recent studies show that the contribution of biogenic materials to carbon balances in the construction sector depends on actual storage capacity and on consistency between new construction and retrofit scenarios, confirming the need for explicit evaluations at both temporal and systemic levels (Priore et alii, 2026). The potential use of natural fibres therefore requires integrated assessments capable of addressing the complexity of impacts on the biosphere and of overcoming interpretations limited solely to embodied carbon (Sposito and De Giovanni, 2023; Capasso, 2025).

Strategies for prefabrication and tools such as Life Cycle Assessment (LCA) and Dynamic Life Cycle Assessment (DLCA) already exist; however, their integration into a replicable process that links circularity with the temporal dimension of climate impacts remains less consolidated (Lueddeckens, Saling and Guenther, 2020; Müller et alii, 2025). Within this context, the contribution proposes a design support framework (Fig. 1) that engages with the scientific debate on building envelope retrofit, incorporating principles of Design for Manufacturing and Assembly (DfMA), Design for Disassembly (DfD), distributed digital fabrication, and DLCA, with particular attention to circularity in the construction sector. The model is applied to the Nature-based Retrofit System (NoRS), composed of prefabricated components made from rice straw fibre panels, and is compared with a timber-based reference system (Bio-based Comparison System – BBCS).

The research question investigates to what extent integrating light prefabrication, DfMA and DfD principles, bio-based materials, and DLCA temporal metrics enables the development of a replicable, methodologically transparent decision-sup-

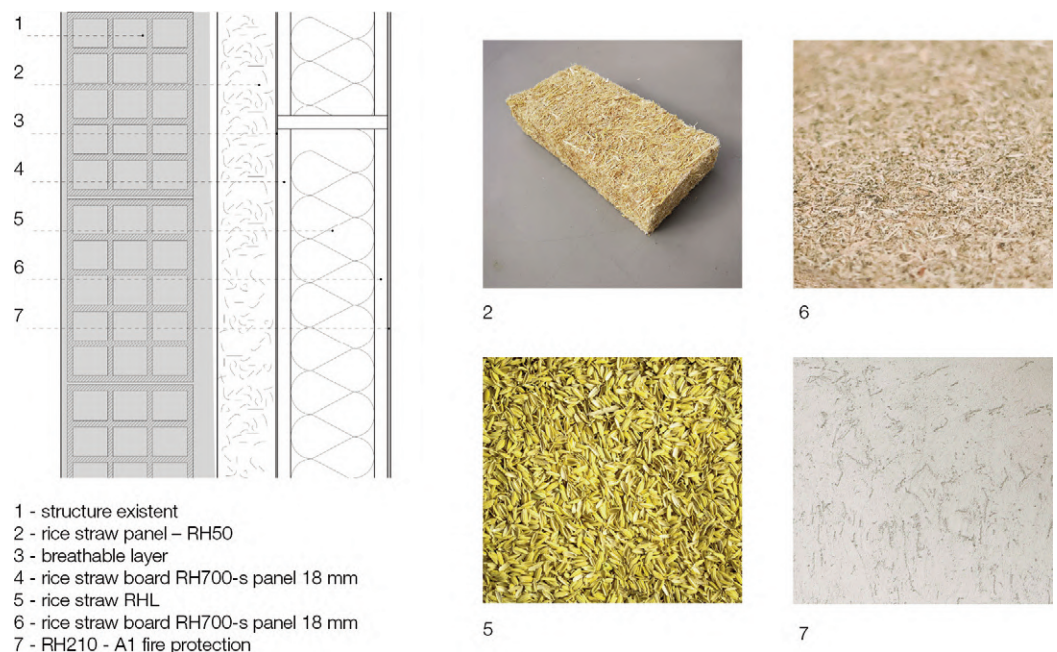


Fig. 5 | Stratigraphy of the NoRS module and components derived from rice cultivation by-products (credit: the Authors and Ricehouse S.r.l., 2026).

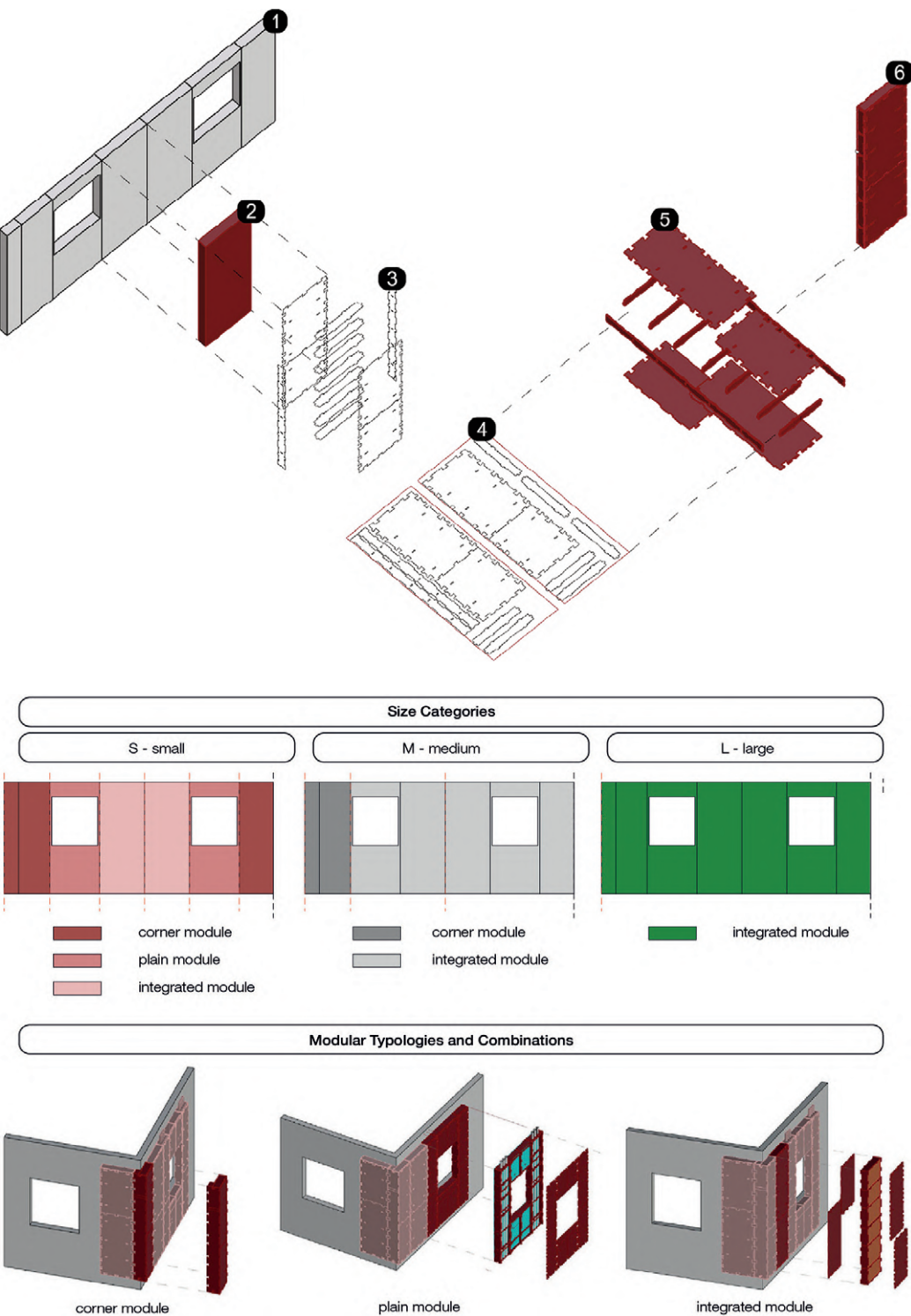


Fig. 6 | Digital fabrication process of the NoRS system (credit: the Authors, 2026).

Fig. 7 | Modular strategy of the NoRS system: S, M, and L (credit: the Authors, 2026).

2017). The case studies referenced in this contribution were selected as they are representative of different combinations between the degree of off-site production and readiness for circularity, and because they are comparable according to six criteria: relevance for façade retrofit, system modularity, degree of prefabrication, integration of DfD principles, scale and maturity of application, and availability of sufficient technical-descriptive information for comparison. Within this framework, Figure 2 presents a conceptual mapping of the main trajectories of off-site retrofit along two axes: off-site intensity and circular readiness. The former describes the degree of industrialisation and prefabrication of the construction process; the latter indicates the extent to which the system integrates DfD, selective replacement, modular coordination, and end-of-life planning.

In the lower range are solutions already available on the market, where replicability is driven by service models and the industrialisation of installation processes, as in the case of Energiesprong¹, without this necessarily corresponding to high levels of reversibility or architectural flexibility, which instead depend on components, joints, and replacement strategies (Manni and Valzano, 2023; Salama, 2017). In the intermediate range are demonstrators developed within European programmes, such as EASEE², BERTIM³, and AdESA, part of the 4RinEU⁴ project: in these cases, design methodologies, economic-organisational logics, and envelope integration strategies are made explicit, although they often remain linked to experimental conditions and to supply chains not yet structured for large-scale diffusion. In the upper range, finally, are emerging research approaches, characterised by a higher intensity of off-site activities and greater readiness for circularity; it is within this domain that NoRS is positioned, proposed as a bio-based prefabricated retrofit system founded on reversibility, modularity, and selective life-cycle management.

Within the European context, Energiesprong represents the most mature market case among

port tool for the comparative evaluation of retrofit systems. The originality of the contribution with respect to the state of the art lies in the integrated evaluation of these aspects, which the literature tends to address separately or in partial combinations. To this end, the contribution is structured as follows: a state-of-the-art section on off-site retrofit and the temporal assessment of impacts; a methodological section dedicated to the NoRS system and its interfaces; a presentation of the results of the comparison with the BBCS reference system; and finally, a critical discussion of implications, limitations, transferability, and relationships with the SDGs.

Off-site retrofit and temporal assessment of impacts | Prefabrication and digital fabrication ap-

plied to building envelope retrofit represent key trajectories for increasing intervention capacity within the existing building stock, reducing on-site variability and installation time, and shifting part of quality control to externalised and repeatable processes (Silva et alii, 2013). Studies on prefabricated retrofit modules for nearly zero-energy buildings (NZEB) show that the approach becomes truly systemic only when interface rules, logistics, and performance control are codified, while also highlighting recurring barriers to interoperability and implementation (van Roosmalen, Hermann and Kumar, 2021). The literature on large-scale strategies further confirms that benefits in terms of time and quality depend strongly on procurement procedures, supply chain organisation, and standardisation, rather than solely on the technological package (Pittau et alii,

those examined: its strengths lie in its industrialised service model and scalability, which have enabled rapid interventions across numerous residential units. Its transferability is high within structured production supply chains, but the typological standardisation of the target buildings conditions it. The EASEE project, on the other hand, developed a hybrid approach integrating partial prefabrication with on-site intervention, with the merit of codifying interface methodologies and performance verification protocols; its limitation lies in its reliance on experimental conditions and the difficulty of transitioning to widely established production chains.

BERTIM has demonstrated the technical feasibility of prefabricated timber modules for energy retrofit, achieving significant reductions in construction time; the main limitations concern limited integration of DfD principles and dependence on local structural timber supply chains, which limit transferability across different geographical contexts. Finally, AdESA has the merit of integrating economic-organisational logics and scalability criteria into system design; however, its limitation lies in the complexity of implementation and in the absence of a temporal metric of climate impacts that would enable transparent comparison with market alternatives.

Overall, none of the examined cases appears to simultaneously integrate light prefabrication, bio-based materials, DfD principles, and DLCA evaluation. This gap is precisely what the NoRS system seeks to investigate.

Within the Italian context, cases of deep renovation and decarbonisation of public buildings show that scalability and transferability depend primarily on process management and performance verification in real-world contexts, while public policies and instruments directly influence replicability through procurement mechanisms (Clemente et alii, 2024; Lauria et alii, 2025). At the technical level, several studies on modular façades confirm that connectors and detailing represent critical points for quality and performance, constituting the interface where standardisation meets tolerances and the durability of the existing building (Tushar et alii,

2022; Callegaro et alii, 2023; Alvarez-Alava et alii, 2023). Within this framework, modularity should be understood as a device for managing complexity, as it governs interfaces, interdependencies between layers, and replacement cycles – conditions necessary to ensure maintainability and adaptability over time (Manni and Valzano, 2023).

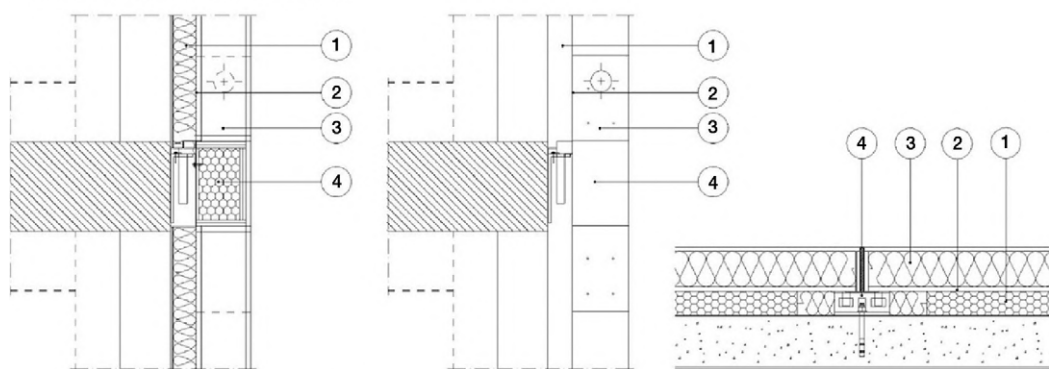
When circularity objectives are introduced, construction-site scalability does not automatically align with life-cycle sustainability: applying circular economy metrics in the built environment requires consistency across design, supply chain, and end-of-life scenarios (Pomponi and Moncaster, 2017). In this sense, DfD emerges as a prerequisite for enabling selective replacement and reverse logistics (Salama, 2017), requiring decision-support evaluation systems capable of measuring the reuse potential of components from the design phase (Paganin et alii, 2024). LCA studies on DfD strategies further show that benefits depend on assumptions regarding service life and realistic scenarios, imposing rigorous methodological transparency (Roberts et alii, 2023; Rasmussen, Birkved and Birgisdóttir, 2019).

The adoption of bio-based materials in prefabricated systems introduces an additional critical

variable: climate performance depends not only on the biogenic content but also on the temporal distribution of emissions. Modelling retrofit systems as carbon sinks highlights that rapidly renewable biomass, such as rice straw, can offer significant advantages. However, these are conditioned by timing and end-of-life scenarios (Pittau et alii, 2019). Consistently, Thiébat et alii (2025) emphasise that the sustainability of natural fibres requires integrated assessments; similarly, approaches combining Environmental LCA and Social LCA show that low-emission design cannot be limited to CO₂ reduction alone, but must also consider social and supply chain implications – especially when product innovations and end-of-life strategies affect accessibility, costs, and the replicability of solutions (Palumbo et alii, 2025).

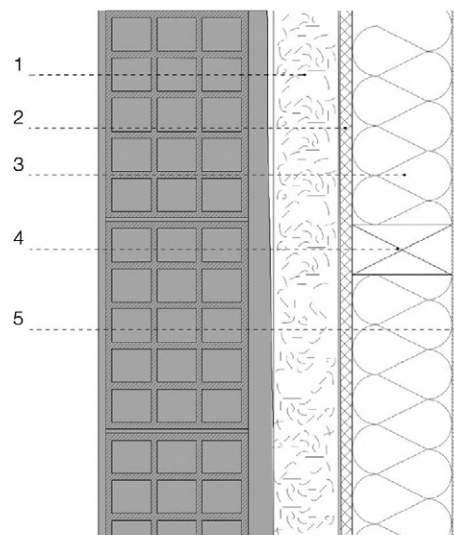
Applications of DLCA further make explicit that landfill scenarios may delay methane emissions, while energy recovery can significantly alter the results (Göswein et alii, 2020). The methodological issue is that a static LCA aggregates emission flows over time. In contrast, DLCA enables the interpretation of annual emission profiles (Levasseur et alii, 2010, 2013), integrating analytical frameworks that are explicit in temporal terms and capable of ad-

Connection module - concrete structure



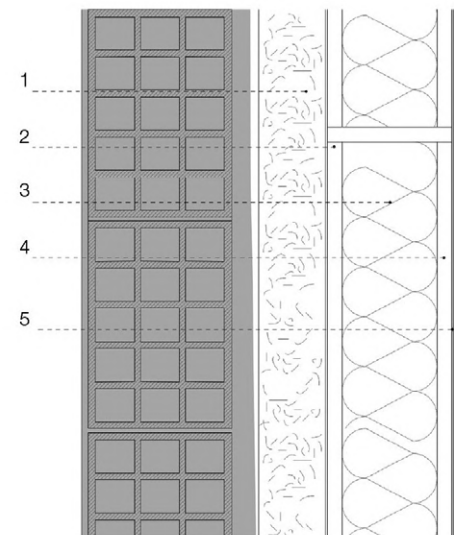
- 1 - levelling layer: back panel for the box system, RH700s binderless rice straw panel
- 2 - vapour barrier mounted on the bottom part of the panel
- 3 - structural box system
- 4 - metal connector: A1 fire protection

BBCS



- 1 - rice straw panel – RH50
- 2 - OSB board
- 3 - rice straw RHL
- 4 - timber frame softwood
- 5 - A1 board fire protection

NoRS



- 1 - rice straw panel – RH50
- 2 - rice straw board
- 3 - rice straw RHL
- 4 - rice straw board
- 5 - A1 rice straw plaster

Fig. 8 | Interfaces and joints of the system (credit: the Authors, 2026).

Fig. 9 | Comparative stratigraphy of the two retrofit systems: BBCS vs NoRS (credit: the Authors, 2026).

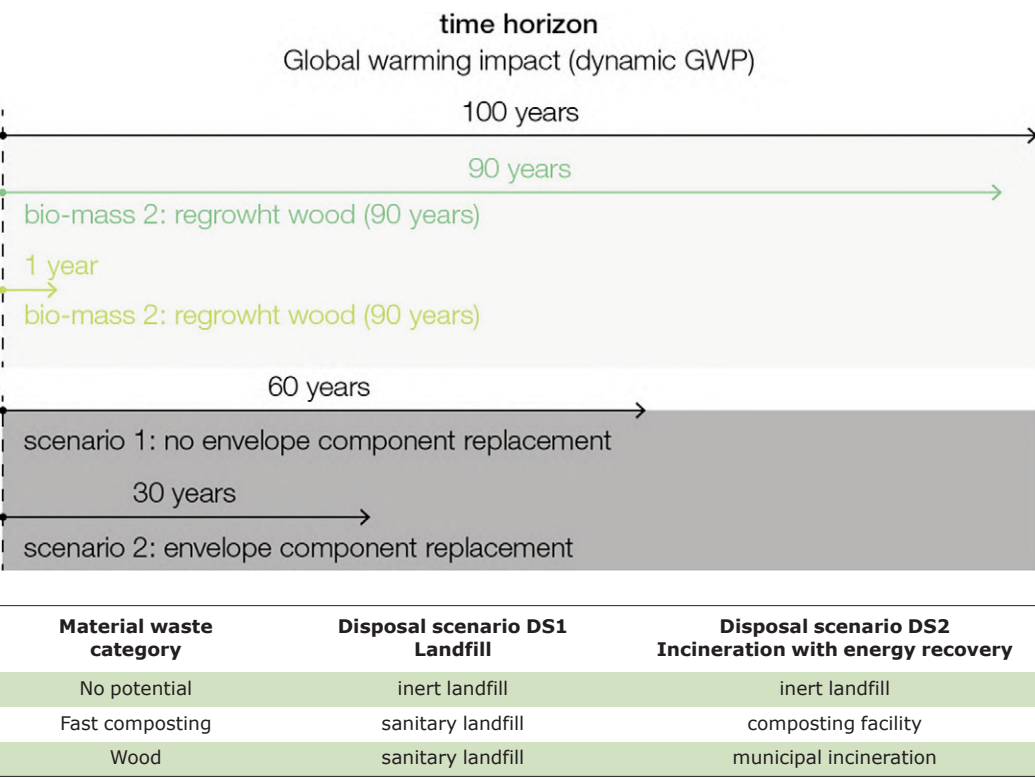


Fig. 10 | Temporal scheme of the DLCA: 100-year time horizon, biomass regeneration times (rice straw and timber), and envelope replacement scenarios (credit: the Authors, 2026).

addressing the complexity of impacts on the biosphere (Lueddeckens, Saling and Guenther, 2020; Müller et alii, 2025; Sposito and De Giovanni, 2023). In summary, the state of the art highlights an operational gap: the challenge is not only to develop new off-site prefabrication or bio-based technologies, but also to integrate them into a replicable framework that connects processes, circularity, and temporal metrics to support comparable, scalable design decisions.

Methodology | This study aims to assess the climate impact profile over the life cycle of the NoRS, comparing it with that of a biogenic reference system (BBCS), and does so by pursuing three objectives: 1) to ensure comparability and transparency of design choices through the explicit definition of model assumptions; 2) to verify to what extent a dynamic temporal interpretation modifies the understanding of results compared to a conventional LCA; 3) to identify the critical factors affecting the robustness of results, with particular attention to end-of-life scenarios, electricity mix, transport, and replacement frequency. The BBCS is adopted as a timber-based reference system, as it represents a solution comparable in terms of function, non-load-bearing configuration, thermal performance, fire safety requirements, and reference service life; this allows for a clearer isolation of the effects related to differences in material composition and in the temporal dynamics of biogenic carbon, avoiding distortions in comparison due to non-relevant performance differences.

To ensure consistent comparison, NoRS and BBCS were aligned on thermal performance by assuming a steady-state thermal transmittance of $U = 0.19 \text{ W/m}^2\text{K}$. They were made comparable with respect to fire safety requirements by integrating, for both systems, an external protective layer classified as A1, as well as an equivalent performance level for comparison purposes. The analysis focuses on the embodied impacts of the build-

ing envelope system, considering the phases of production, logistics, replacement, and end-of-life (A1–A5, B4, C1–C4, and D), and excludes the operational energy of the building (B6) in order to isolate the effects of supply chain strategies and the temporal dynamics of biogenic carbon storage (Fig. 3).

This approach enables not only environmental comparisons between retrofit alternatives but also a critical assessment of innovation in construction processes, accessibility of interventions, and responsible resource management across the life cycle. In this sense, the study is situated within the framework of integrated environmental assessment approaches, which can overcome a purely static interpretation of carbon (Sposito and De Giovanni, 2023).

Operational phases of the research | The research activities were structured into six operational phases, explicitly defined to ensure the replicability of the process: Phase 1) review of the state of the art and selection of comparative case studies; Phase 2) definition of the Functional Unit (FU) and system boundaries; Phase 3) development of the comparative inventory of the two systems; Phase 4) LCA and DLCA modelling; Phase 5) sensitivity analysis on the main critical parameters; Phase 6) comparative interpretation of results and verification of process transferability.

NoRS: system, process, and interfaces | The NoRS system is configured as a kit of prefabricated bio-based components designed according to DfMA and DfD principles (Fig. 4). Within this framework, on-site variability is reduced through a component-based system and the codification of interfaces. Installation is therefore conceived as a repeatable process based on dry assembly, compatible with distributed production and the transport of flat components. In this context, modularity does not act solely as a criterion for simplifying ex-

ecution, but also as a technical device for managing maintainability and differentiated replacement cycles of functional layers (Manni and Valzano, 2023).

The basic NoRS module is a non-load-bearing element whose stratigraphy (Fig. 5) has been developed to integrate thermal performance, light prefabrication, and circularity potential. The system includes: a) a compressible levelling and compensation layer based on straw (RH-50, Ricehouse S.r.l.) to absorb irregularities of the existing wall substrate; b) high-density rice straw fibre panels (RH700-s, Ricehouse S.r.l.), serving as stiffening elements and enclosure of the box; c) functional membranes for controlling vapour diffusion; d) primary insulation in loose straw fibre (RH-L, Ricehouse S.r.l.); e) an external layer for mechanical protection and finishing, consisting of plaster with fire resistance class A1 (RH210, Ricehouse S.r.l.).

The use of agricultural by-products further enhances a short supply chain, with potential benefits in terms of reducing transport distances. NoRS adopts a material simplification strategy based on the predominant use of components derived from rice production by-products. While not strictly a mono-material system, this approach reduces the envelope's compositional complexity. It makes its implications regarding LCA, selective replacement, and end-of-life more legible, in line with recent studies on low-material-heterogeneity envelopes (Bucklin et alii, 2023).

The DfMA process follows a structured workflow from design to assembly: definition of panels and tolerances; generation of components and preparation of interfaces; CNC production and component labelling; logistics of flat components; and dry on-site assembly (Fig. 6). Digital fabrication enables error reduction, minimisation of waste, and verification of the assembly sequence. The objective is not centralised mass production, but light prefabrication compatible with distributed production networks, provided that dimensional requirements and quality controls are met.

To respond to the morphological variability of the existing building stock, NoRS adopts a parametric modular strategy articulated across three scales (S, M, and L) and three functional families (Fig. 7): planar modules for opaque surfaces, corner modules for edge management, and integrated modules for windows and service cavities.

The system's interface rules, which constitute the technical foundation of the kits reversibility and transferability, are organised into three levels: 1) joints within the box system, related to the precision and cutting tolerances of CNC fabrication; 2) joints between adjacent modules, responsible for hygrothermal continuity and for ensuring airtightness and watertightness; 3) connections between the system and the existing structure, realised through metal plates that enable load transfer and the absorption of substrate tolerances. Within this framework, maintenance and selective replacement are considered integral parts of the system's life cycle. The central interface element is a multifunctional mechanical connector, developed within the scope of a patent application⁵, positioned along horizontal joints and designed to integrate assembly, load transfer, and fire compartmentation, also acting as a fire barrier (Fig. 8). This component mediates the transition between the precision of digital fabrication and the tolerances of the existing building, enabling dry installation, self-alignment, and selective replacement of modules in accordance with DfD principles.

NoRS is presented as a system demonstrator rather than as an already certified product. The process, therefore, identifies the performance requirements to be verified during the transition towards industrial application: hygrothermal behaviour of junctions under dynamic conditions; airtightness and watertightness of mechanical joints; durability of natural fibres under variable humidity conditions; fire performance of the assembly; aco-

ustic performance; and long-term reliability of interfaces. In this paper, these aspects are not assumed to be already compliant; rather, they are identified as verification conditions necessary for the transition from demonstrator to product, distinguishing between methodological-comparative feasibility and the pathway towards regulatory compliance.

Functional unit and system boundaries | The comparison is based on a Functional Unit (FU) defined as 1 square metre of façade retrofit system with a Reference Service Life (RSL) of 60 years (Tab. 1). The scope of the assessment follows the modular structure of the NoRS kit. It includes: raw material supply and production (A1–A3), transport and installation (A4–A5), scheduled replacement of components with shorter service life (B4), end-of-life processes (C1–C4), and net benefits beyond the system boundaries (D). The methodological framework follows the standards UNI EN ISO 14040:2021 (UNI, 2021b), UNI EN ISO 14044:2021 (UNI, 2021c), UNI EN 15804:2021 (UNI, 2021a), and UNI EN 15978:2011 (UNI, 2011). Layers that do not differentiate between the two solutions were excluded through an explicit rule (mass < 1%), applied symmetrically.

Inventory, data sources, and scenarios | The processes related to materials, energy, and transport were modelled by integrating standard LCA databases (Ecoinvent 3.10) with literature data. At the same time, technical datasheets provided by Ricehouse S.r.l. were used to define the physical and performance characteristics of the rice straw fibre components. The comparison between NoRS and BBCS is based on a detailed inventory of layer compositions and masses per Functional Unit (Fig. 9; Tab. 2). During the use phase, the model includes a replacement event at year 30 for functional layers with a service life shorter than

the RSL (B4). At the same time, the main components maintain an Estimated Service Life (ESL) of 60 years. For end-of-life, two alternative scenarios were defined: DS1, characterised by the predominance of disposal in sanitary landfill, and DS2, oriented towards energy recovery and controlled biomass treatment (Tab. 3). The objective is not to identify an 'optimal' scenario, but to make explicit the dependence of results on end-of-life (EoL) supply chains and on delayed methane emissions associated with the anaerobic degradation of biogenic materials.

The construction of scenarios DS1 and DS2 is anchored to the Italian regulatory context. Bio-based construction materials, such as rice straw and timber, and controlled end-of-life supply chains (e.g. composting and energy recovery) are not yet systematically established, making DS1 (sanitary landfill) the most realistic reference scenario for the share of biomass not intercepted by specialised treatment chains. Conversely, DS2 represents the trajectory towards which European policies are directing the sector, in line with Directive 2008/98/EC (European Parliament and Council of the European Union, 2008) and with the objectives of the EPBD (European Union, 2024). The two scenarios are therefore not probabilistic in nature, but comparative and normative: DS1 describes current, more conservative conditions, while DS2 represents enabling conditions for achieving full climate benefits.

DLCA and temporal indicators | Alongside conventional LCA, the study applies a DLCA methodology (Fig. 10). The modelling adopts an explicit temporal approach, based on the annual distribution of emission and uptake flows over a 100-year horizon, in order to make visible the different timing between initial emissions, in-use replacements, and biomass regeneration processes. Delayed methane emissions associated with end-of-life sce-

Samples	Materials	Density [kg/m ³]	s [m]	λ [W/mK]	U [W/m ² K]	Rt [m ² K/W]	ma [kg/m ²]	C-storage [kgC/kg]	CO ₂ bio [kgCO ₂ /kg]	[kgCO ₂ /m ²]	R [year]	CO ₂ uptake [kgCO ₂ /a]
BBCS	wood	500	0.03	0.04	0.2	5	13.50	0.404	1.48	20	90	-0.22
	ricestraw	150		0.051	0.2	5	18.75	0.368	1.35	25	1	-25.32
NoRS	ricestraw	150		0.051	0.2	5	64.55	0.368	1.35	87	1	-87.18

Tab. 4 | Biogenic CO₂ uptake: BBCS vs NoRS (credit: the Authors, 2026).

	BBCS				NoRS			
	[kgCO ₂]	[kgCO]	[kgCH ₄]	[kgNO ₂]	[kgCO ₂]	[kgCO]	[kgCH ₄]	[kgNO ₂]
A1-A2 Material production – Transport	26.16	0.14	0.14	0.0022	11.9	0.12	0.28	0.0012
A3 Manufacturing	2.72	0.0008	0.0041	0	2.3	0.0002	0.0043	0
A4-A5 Transport – Construction installation process	2.67	0.0067	0.14	0	2.3	0.0036	0.28	0
B1 Regrow biomass straw	–	–	–	–	-87.18	–	–	–
B1 Regrow biomass timber	-25.32	–	–	–	–	–	–	–
B4 Replacement	12.08	0.02	0.08	0.008	9.94	0.02	0.11	0.0045
DS1 Disposal scenario Landfill	28.63	0.25	8.57	0.0004	14.35	0.35	12.06	0.0004
DS2 Disposal scenario Incineration / Energy recovery	-2.41	-0.0019	-0.55	-0.0003	-4.45	-0.018	-1.12	-0.0004

Tab. 5 | Inventory of emissions and removals by life cycle module: BBCS vs NoRS (credit: the Authors, 2026).

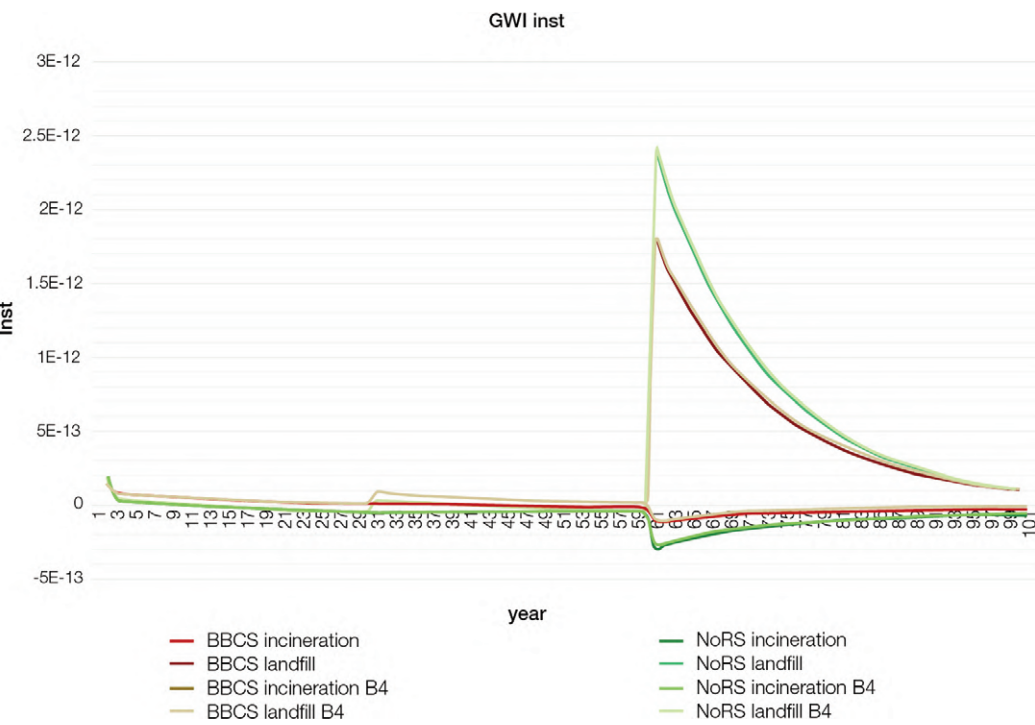


Fig. 11 | Instantaneous radiative forcing (GWI inst) in scenarios DS1 and DS2 for BBCS and NoRS, including phase B4 (credit: the Authors, 2026).

narios are treated as time-dependent flows, consistent with the assumptions of anaerobic degradation or energy recovery adopted in scenarios DS1 and DS2. The model combines inventory data from standard databases and the literature, structured within a comparative LCA/DLCA procedure to produce instantaneous and cumulative emission profiles, as well as synthetic indicators useful for comparing retrofit alternatives. In the DS1 scenario, biogenic methane released from a sanitary landfill is modelled as a delayed emission associated with the anaerobic degradation of biomass; in the DS2 scenario, controlled biomass treatment and energy recovery from timber are modelled as alternative pathways that can reduce net emissions and generate energy credits in Module D.

LCA modelling was carried out using PRé Consultants SimaPro 9.6.0.1. DLCA calculations were performed using the DynCO₂ tool (CIRAIG, Université de Montréal), which provides instantaneous (GWI inst) and cumulative (GWI cum) radiative forcing profiles in W/m², as well as relative impact expressed in CO₂eq (GWP), following the formulation of Levasseur et alii (2010; 2013). The flows of CO₂, CH₄, CO, and N₂O are treated separately, distinguishing fossil, biogenic, and land-use change contributions, in line with the approach of Gösswein et alii (2020). In the model, biomass regeneration times are assumed to be 1 year for rice straw and 90 years for timber. In addition to instantaneous and cumulative emission profiles, synthetic indicators such as time-to-zero and time-to-negative are calculated, useful respectively for describing the time required to neutralise initial emission impulses and the point at which the system becomes a net carbon sink (Levasseur et alii, 2013; Müller et alii, 2025).

Sensitivity analysis and replicability | The sensitivity analysis is structured around four main driving factors: 1) variation in end-of-life scenarios (DS1 vs DS2); 2) influence of the electricity mix on the calculation of credits in Module D; 3) impact of transport distances and logistics; 4) variation in service

life and replacement rates of components. This approach is consistent with the scientific debate on sensitivity to temporal parameters (Shimako et alii, 2018). The combination of processes derived from standard databases and primary data enables a methodologically transparent and replicable comparison, grounded in the systematisation of the inventory and the explicit definition of model assumptions (Brandão et alii, 2013; Müller et alii, 2025).

Results | The analysis of results is structured across four levels: emission inventories by life-cycle modules, instantaneous radiative forcing profiles, cumulative radiative forcing profiles, and synthetic indicators of relative impact. The DLCA results show that explicitly accounting for the temporal dimension substantially modifies the interpretation of bio-based retrofit, making visible both the processes of biomass uptake and regeneration and the effects of end-of-life, particularly delayed methane emissions in landfill scenarios. In the model, emission and uptake flows are distributed along an annual timeline and returned as instantaneous and cumulative radiative forcing profiles over a 100-year horizon, including in-use replacements (B4) and the two end-of-life scenarios, DS1 and DS2 (Levasseur et alii, 2010, 2013). Input emission and uptake quantities are reported by life cycle modules as inventory data and as parameters for biogenic absorption and storage (Tab. 4).

The aggregated inventory by modules (Tab. 5) shows that, in both alternatives, DS1 (landfill) is one of the most impactful contributors: this high impact is due to methane emissions associated with the degradation of biogenic materials in the sanitary landfill. The difference between the two systems is mainly related to the quantity and type of biomass used: a higher share of rice straw in the demonstrator reduces the overall fossil contribution in some phases, but increases sensitivity to methane emissions if end-of-life is not managed through controlled supply chains. At the same time, absorption parameters reveal the temporal divergence between rapidly regenerating biomass (straw with

annual rotation) and slowly regenerating biomass (timber with a 90-year rotation). This condition directly affects the dynamic profile (Lueddeckens, Saling and Guenther, 2020). The instantaneous radiative forcing profile shows a rapid reduction in impact as early as the first year, associated with crop regeneration. In the case of NoRS, the curve drops below zero: the higher share of biogenic biomass allows for faster compensation of initial emissions (Fig. 11). The replacement event at 30 years (B4) produces a punctual increase, consistent with the renewal of shorter-life layers; no scheduled replacement is assumed for the main biogenic components. At the end of life, under scenario DS1, a marked increase in radiative forcing is observed due to the decomposition of biogenic materials in a sanitary landfill. The model considers approximately 60 kg of straw for NoRS, compared to about 20 kg of straw and 14 kg of timber for BBCS; returning to near-zero values requires approximately 30 years after EoL. This dynamic is consistent with previous DLCA applications on straw-based retrofit systems (Gösswein et alii, 2020).

The cumulative radiative forcing profile (Fig. 12) confirms that DS1 has the greatest impact on both alternatives: methane release from landfills leads to a rapid increase in the curve, reducing or even cancelling part of the benefit associated with temporary carbon storage. In DS2, the profiles improve significantly and can reach negative values, highlighting that climate neutrality is not an intrinsic property of the material, but depends on modelling assumptions and on the consistency of end-of-life supply chains with the design strategy (Brandão et alii, 2013; Müller et alii, 2025). In the comparison between NoRS and BBCS, the different timing of biomass regeneration emerges as a key discriminating factor.

Finally, the interpretation in terms of relative impact further synthesises the results: NoRS shows the lowest impact and reaches negative conditions earlier than the timber-based reference system. BBCS cannot be automatically considered climate-neutral, as carbon storage in timber does not in it-

self offset emissions over the life cycle if regrowth is slow and/or if end-of-life leads to significant emissions (Fig. 13). By converting cumulative radiative forcing into equivalent metrics and analysing synthetic temporal indicators, the model shows that GWP becomes negative after approximately 25 years for NoRS and after approximately 58 years for BBCS. This difference highlights that a significant climate benefit is achieved only when biomass resources rapidly reabsorb carbon and when end-of-life processes limit methane emissions. Overall, the results confirm the need to make scenarios explicit and to conduct sensitivity analyses on critical factors, including end-of-life, Module D credits, transport, and replacement cycles (Shimako et alii, 2018).

Relationship with the SDGs: critical mapping

The four SDGs directly relevant to the study are: SDG 9 (Industry, Innovation and Infrastructure) is the central one: the proposed model integrates digital fabrication, light prefabrication, and temporal metrics into an industrialisable approach for building envelope retrofit, contributing to innovation in construction processes and to the scalability of solutions. SDG 11 (Sustainable Cities and Communities) is addressed through the system's ability to intervene on occupied buildings, reducing construction time and occupant disruption, with positive implications for the resilience of vulnerable urban communities. SDG 12 (Responsible Consumption and Production) is pursued through the DfD logic and the short supply chain for rice straw, which is oriented towards low-impact production and consumption models and towards selective component replacement rather than demolition. SDG 13 (Climate Action) is addressed through the reduction of embodied carbon and the temporal management of climate-related flows across the life cycle, to contribute to the decarbonisation of the building stock.

The indirectly affected SDGs include SDG 7 (Affordable and Clean Energy), as improvements to the building envelope reduce operational energy consumption and may help mitigate energy poverty, and SDG 8 (Decent Work and Economic Growth), as the distributed production model can generate qualified local employment. SDG 15 (Life on Land) is indirectly involved through the use of rapidly renewable agricultural biomass as an alternative to extractive materials, with potential benefits for soil management.

However, several trade-offs emerge. With SDG 1 (No Poverty) and SDG 10 (Reduced Inequalities), the main issue concerns the initial costs of the system, which may be unaffordable for more vulnerable population groups in the absence of incentive policies and supply chain governance. With SDG 12, a conflict exists between energy recovery and material reuse at end-of-life: scenario DS2 reduces methane emissions through controlled incineration but precludes component reuse. With SDG 13, the trade-off concerns the dependence of cli-

mate benefits on the consistency of end-of-life supply chains. In the absence of controlled infrastructures, scenario DS1 shows that delayed methane emissions may offset the advantages of biogenic carbon storage.

Discussion and limitations of the study | The introduction of temporal metrics through DLCA shifts environmental assessment from a retrospective reading to a decision-support tool, as the analysis concerns not only the magnitude of impacts but also their temporal distribution. In this way, the interpretation of results does not merely assess the robustness of environmental comparisons but also enables a critical understanding of how different supply chain and end-of-life choices generate synergies or trade-offs in relation to objectives of innovation, equity, material responsibility, and climate mitigation.

DLCA enables the interpretation of climate change trajectories throughout the building life cycle, making explicit emission profiles and temporal compensations that conventional LCA tends to compress into a single indicator (Negishi et alii, 2019). The approach presented here addresses temporal criticalities, recognised as a structural limitation of static LCA and particularly relevant for

bio-based materials (Lueddeckens, Saling and Guenther, 2020), in line with the most recent temporally explicit analytical frameworks (Müller et alii, 2025). The increasing availability of operational procedures for DLCA and the temporalisation of background processes make its application more feasible in operational contexts (Cardellini et alii, 2018; Pigné et alii, 2020), as confirmed by the literature in the built environment (Su et alii, 2021).

The application of DLCA to the NoRS system makes visible what static LCA tends to flatten: the 33-year difference in achieving negative GWP between NoRS and BBCS is not a mere technical detail, but a result with significant design implications. A supply chain choice – rice straw with annual regeneration versus timber with a 90-year rotation – can determine whether a system contributes to climate mitigation within a timeframe consistent with the 2050 targets, or beyond that horizon.

If the methodological transferability of the method is high – thanks to functional units, EN 15804 system boundaries, scenarios, and sensitivity analyses – the maturity of the NoRS system as a product remains constrained by the need for extensive performance verification, particularly regarding fire safety, the hygrothermal behaviour of junctions, joint tightness, and durability. In this sense, the re-

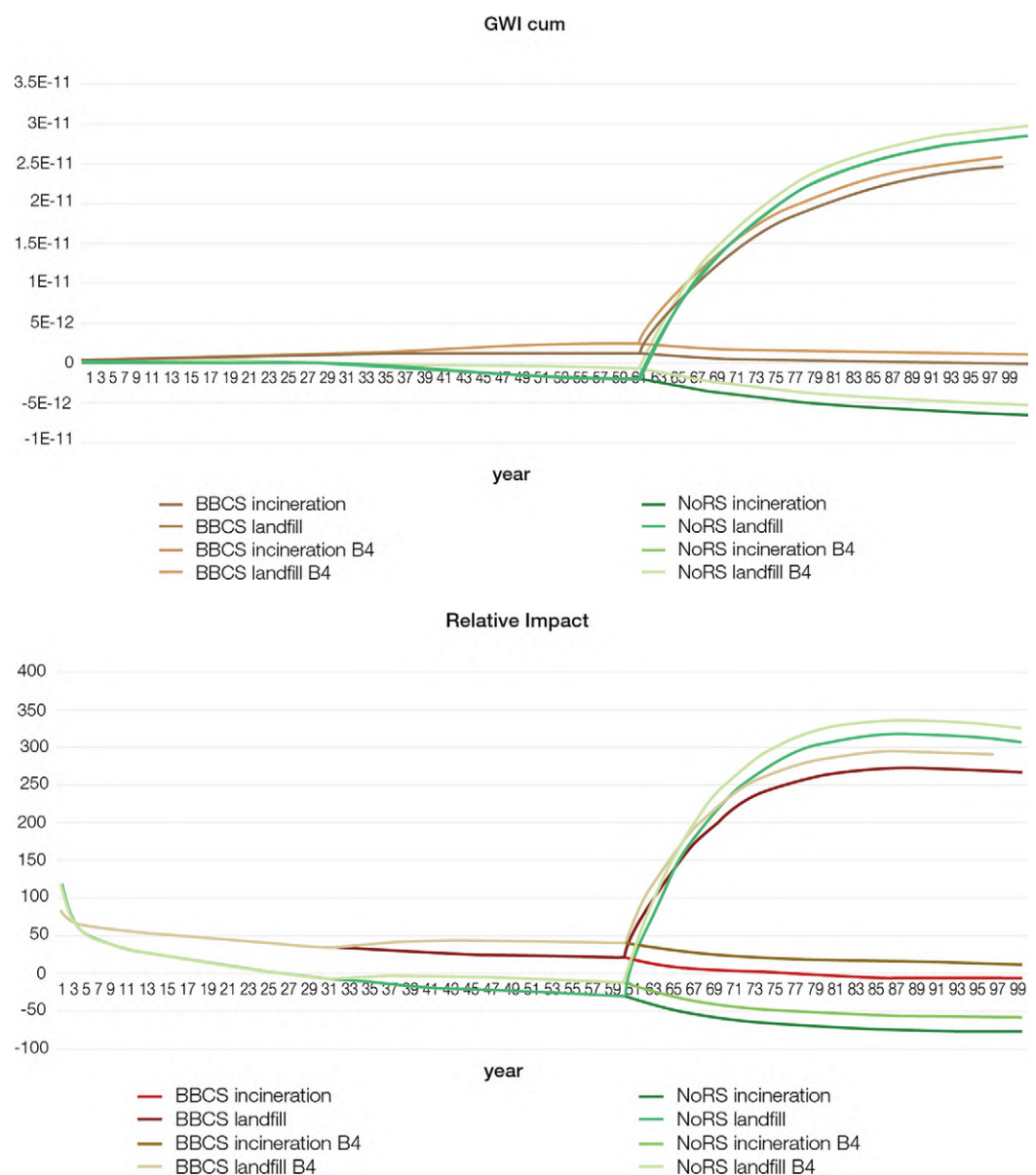


Fig. 12 | Cumulative radiative forcing (GWI cum) in scenarios DS1 and DS2 for BBCS and NoRS, including phase B4 (credit: the Authors, 2026).

Fig. 13 | Relative impact (GWI) in scenarios DS1 and DS2 for BBCS and NoRS, including phase B4 (credit: the Authors, 2026).

sults constitute a demonstration of methodological-comparative feasibility rather than a system certification. The design of the mechanical connector addresses the crucial issue of interfaces, which the literature identifies as a main barrier to effective circularity (Salama, 2017). However, disassembly and selective replacement require not only geometric compatibility, but also reverse logistics and end-of-life management. Within this framework, one of the key findings of the DLCA concerns the sensitivity of results to delayed methane emissions in landfills, which can reduce or even negate the benefits of temporary carbon storage: controlled end-of-life scenarios therefore become an enabling condition, not merely a modelling detail.

For a correct interpretation of the results, it is also necessary to distinguish three categories of limitations. At the data level, the characterisation of rice straw-based materials relies partly on technical datasheets provided by the manufacturer. At the same time, background data are sourced from standard databases (Ecoinvent 3.10) and may not fully reflect the specificities of the Italian supply chain. At the modelling level, the DS1 and DS2 end-of-life scenarios represent plausible but not exhaustive trajectories of real-world supply chains, and the absence of an S-LCA assessment leaves the social dimension of impacts only partially explored. The integration of S-LCA metrics would make the social dimension of retrofit more explicit, linking embodied carbon to equity indicators for vulnerable communities (Palumbo et alii, 2025). Finally, logistics simulation at the district scale rep-

resents the next operational frontier, where the coherence among design, supply chain, and public policy can be empirically tested.

From a performance perspective, several aspects of the NoRS system have not yet been experimentally verified: the hygrothermal behaviour of junctions under dynamic conditions; the air- and watertightness of mechanical joints; the durability of natural fibres under variable humidity conditions; the fire performance of the assembly; and the acoustic performance.

Barriers to diffusion operate at multiple levels. Technical and regulatory barriers include the lack of standardised classifications for biogenic construction waste and an Environmental Product Declaration (EPD) for rice straw-based materials, which hinder their integration into public specifications and procurement processes. Economic barriers include higher initial costs compared to conventional solutions and the difficulty of economically valuing the deferred benefits of biogenic carbon storage over the life cycle. Organisational barriers arise from the need to coordinate distributed supply chains in the absence of established service models for bio-based retrofit at an industrial scale. End-of-life barriers are among the most critical: the lack of infrastructure for composting or controlled energy recovery of biogenic construction materials risks undermining the benefits of temporary carbon storage, as highlighted by scenario DS1.

From the perspective of transferability, the methodological framework – normalised functional unit, EN 15804 system boundaries, comparative

end-of-life scenarios, and synthetic temporal indicators – applies to any building envelope retrofit system, regardless of technology, material, or place of use, provided that adequate inventory data are available and that end-of-life scenarios are defined with comparable transparency. The framework is also potentially applicable to other disciplinary fields addressing the assessment of bio-based construction systems.

In summary, the NoRS case shows that the climate benefits of bio-based materials depend on conditions beyond the material choice itself, including supply chain management, assessment tools, and the regulatory framework. Making these conditions explicit and measurable represents one of the most productive directions for research on sustainable retrofit in the coming years.

Acknowledgements

This contribution originates from the PhD research entitled ‘Built by nature: robotic additive manufacturing process for biobased component towards a carbon-neutral retrofit of the existing building stock’, conducted by G. Castellano at the Department of Architecture, Built Environment and Construction Engineering (ABCE), Politecnico di Milano (Italy), within the Material Balance research group. The PhD was funded by the National Operational Programme (PON) Research and Innovation 2014-2020, MUR Decree no. 1061 of 18/08/2021, on green and innovation topics (37th cycle, years 2021-2024); it has been completed.

Ricehouse S.r.l. provided the product technical datasheets used to define the inventory parameters; the LCA modelling data derive from standard databases and scientific literature sources. The company also supported the construction of the physical demonstrator. The patent for industrial invention no. 102025000008328 was filed on 15/04/2025 at the Italian Patent and Trademark Office.

Regarding the attribution of individual contributions: G. Castellano conducted the entire doctoral research and is responsible for the methodological work, the NoRS system, the LCA and DLCA modelling, and the comparative analysis; F. Pittau supervised the LCA and DLCA modelling and interpretation; I. M. Paoletti carried out overall scientific supervision; L. E. Malighetti contributed to retrofit-related topics and case studies; F. Pradella contributed to DfMA strategies and digital fabrication solutions. The Authors declare no conflicts of interest.

Notes

1) For further information, see: energiesprong.org [Accessed 6 April 2026].

2) For further information, see: cordis.europa.eu/project/id/723829 [Accessed 6 April 2026].

3) For further information, see: cordis.europa.eu/project/id/636984 [Accessed 6 April 2026].

4) For further information, see: cordis.europa.eu/project/id/285540 [Accessed 6 April 2026].

5) For further information, see: re.public.polimi.it/handle/11311/1289207 [Accessed 6 April 2026].

References

- Alvarez-Alava, I., Elguezal, P., Jorge, N., Armijos-Moya, T. and Konstantinou, T. (2023), “Definition and design of a prefabricated and modular façade system to incorporate solar harvesting technologies”, in *Journal of Facade Design and Engineering*, vol. 11, issue 2, pp. 1-8. [Online] Available at: doi.org/10.47982/jfde.2023.2.T1 [Accessed 6 April 2026].
- Brandão, M., Levasseur, A., Kirschbaum, M. U. F., Weidema, B. P., Cowie, A. L., Jørgensen, S. V., Hauschild, M. Z., Pennington, D. W. and Chomkamsri, K. (2013), “Key issues and options in accounting for carbon sequestration and temporary storage in life cycle assessment and carbon footprinting”, in *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 18, issue 1, pp. 230-240. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11367-012-0451-6 [Accessed 6 April 2026].
- Bucklin, O., Di Bari, R., Amtsberg, F. and Menges, A. (2023), “Environmental Impact of a Mono-Material Timber Building Envelope with Enhanced Energy Performance”, in *Sustainability*, vol. 15, issue 1, article 556, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su15010556 [Accessed 6 April 2026].
- Callegaro, N. and Albatici, R. (2023), “Energy retrofit with prefabricated timber-based façade modules – Pre- and post-comparison between two identical buildings”, in *Journal of Facade Design and Engineering*, vol. 11, issue 1, pp. 1-18. [Online] Available at: doi.org/10.47982/jfde.2023.1.01 [Accessed 6 April 2026].
- Capasso, M. C. (2025), “LCA e domanda energetica complessiva dei prodotti edili in canapa | LCA and cumulative energy demand of hemp buildings products”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 276-293. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/18162025 [Accessed 6 April 2026].
- Cardellini, G., Mutel, C. L., Vial, E. and Muys, B. (2018), “Temporalis, a generic method and tool for dynamic Life Cycle Assessment”, in *Science of the Total Environment*, vol. 645, pp. 585-595. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.044 [Accessed 6 April 2026].
- Clemente, C., Mancini, F., Mangiadori, A. and Zagaria, M. (2024), “Riqualificazione e decarbonizzazione di edifici scolastici – Il CIS Roma Scuole Verdi | Deep renovation and decarbonisation of school buildings – The CIS Roma Scuole Verdi”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 204-215. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15162024 [Accessed 6 April 2026].
- European Commission (2020), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – A Renovation Wave for Europe – Greening our buildings, creating jobs, improving lives*, document 52020DC0662, COM/2020/662 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2020:662:FIN [Accessed 6 April 2026].
- European Parliament and Council of the European Union (2008), *Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives (Text with EEA relevance)*, doc-

ument 32008L0098. [Online] Available at: data.europa.eu/eli/dir/2008/98/oj [Accessed 6 April 2026].

European Union (2024), *Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings*, document 32024L1275. [Online] Available at: data.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj [Accessed 6 April 2026].

Göswein, V., Pittau, F., Silvestre, J. D. D., Freire, F. and Habert, G. (2020), “Dynamic life cycle assessment of straw-based renovation – A case study from a Portuguese neighbourhood”, in *IOP Conference Series | Earth and Environmental Science*, vol. 588, issue 4, article 042054, pp. 1-8. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1755-1315/588/4/042054 [Accessed 6 April 2026].

Habert, G., Röck, M., Steininger, K., Lupisek, A., Birgisdóttir, H., Desing, H., Chandrakumar, C., Pittau, F., Passer, A., Rovers, R., Slavkovic, K., Hollberg, A., Hoxha, E., Jusselme, T., Nault, E., Allacker, K. and Lützkendorf, T. (2020), “Carbon budgets for buildings – Harmonizing temporal, spatial and sectoral dimensions”, in *Buildings and Cities*, vol. 1, issue 1, pp. 429-452. [Online] Available at: doi.org/10.5334/bc.47 [Accessed 6 April 2026].

Lauria, M., Azzalin, M., Giglio, F. and La Face, G. M. (2025), “Efficienza energetica e smartness degli edifici nelle politiche ambientali pubbliche | Energy efficiency and smart buildings in public environmental policies”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 264-275. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/18152025 [Accessed 6 April 2026].

Levasseur, A., Lesage, P., Margni, M. and Samson, R. (2013), “Biogenic Carbon and Temporary Storage Addressed with Dynamic Life Cycle Assessment”, in *Journal of Industrial Ecology*, vol. 17, issue 1, pp. 117-128. [Online] Available at: doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00503.x [Accessed 6 April 2026].

Levasseur, A., Lesage, P., Margni, M., Deschênes, L. and Samson, R. (2010), “Considering time in LCA – Dynamic LCA and its application to global warming impact assessments”, in *Environmental Science & Technology*, vol. 44, issue 8, pp. 3169-3174. [Online] Available at: doi.org/10.1021/es9030003 [Accessed 6 April 2026].

Lueddeckens, S., Saling, P. and Guenther, E. (2020), “Temporal issues in life cycle assessment – A systematic review”, in *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 25, issue 8, pp. 1385-1401. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11367-020-01757-1 [Accessed 6 April 2026].

Manni, V. and Valzano, L. S. (2023), “Modularità e architettura adattiva – Una strategia per la gestione di sistemi d'involucro complessi | Modularity and adaptive architecture – A strategy for managing complex envelope systems”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 134-151. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14112023 [Accessed 6 April 2026].

Müller, A., Diepers, T., Jakobs, A., Cardellini, G., von der Assen, N., Guinée, J. and Steubing, B. (2025), “Time-explicit life cycle assessment – A flexible framework for coherent consideration of temporal dynamics”, in *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 30, issue 10, pp. 3052-3071. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11367-025-02539-3 [Accessed 6 April 2026].

Negishi, K., Lebert, A., Almeida, D., Chevalier, J. and Tiruta-Barna, L. (2019), “Evaluating climate change pathways through a building's lifecycle based on Dynamic Life Cycle Assessment”, in *Building and Environment*, vol. 164, article 106377, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106377 [Accessed 6 April 2026].

Osservatorio Italiano Povertà Energetica (2025), *La povertà energetica in Italia nel 2024*. [Online] Available at: oipoosservatorio.it/wp-content/uploads/2025/12/2025_PE_ITA_2024.pdf [Accessed 6 April 2026].

Paganin, G., Talamo, C., Atta, N. and Tinelli, E. (2024), “Riuso di componenti edilizi – Sistema di valutazione a supporto delle decisioni negli interventi di redistribuzione interna | Reuse of building components – Assessment system to support decisions in indoor re-layout interventions”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and*

Design, vol. 15, pp. 266-275. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15212024 [Accessed 6 April 2026].

Palumbo, E., Mazzei, I., Perpetua, M. and Pomponi, F. (2025), “Impatti ambientali e sociali nel ciclo vita per una progettazione a basso carbonio | Environmental and social life cycle for low-carbon design”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 294-303. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/18172025 [Accessed 6 April 2026].

Peñaloza, D., Erlandsson, M. and Falk, A. (2016), “Exploring the climate impact effects of increased use of bio-based materials in buildings”, in *Construction and Building Materials*, vol. 125, pp. 219-226. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.041 [Accessed 6 April 2026].

Pigné, Y., Gutiérrez, T. N., Gibon, T., Schaubroeck, T., Popovici, E., Shimako, A. H., Benetto, E. and Tiruta-Barna, L. (2020), “A tool to operationalize dynamic LCA, including time differentiation on the complete background database”, in *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 25, issue 11, pp. 267-279. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11367-019-01696-6 [Accessed 6 April 2026].

Pittau, F., Lumia, G., Heeren, N., Iannaccone, G. and Habert, G. (2019), “Retrofit as a carbon sink – The carbon storage potentials of the EU housing stock”, in *Journal of Cleaner Production*, vol. 214, pp. 365-376. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.304 [Accessed 6 April 2026].

Pittau, F., Malighetti, L. E., Iannaccone, G. and Masera, G. (2017), “Prefabrication as Large-scale Efficient Strategy for the Energy Retrofit of the Housing Stock – An Italian Case Study”, in *Procedia Engineering*, vol. 180, pp. 1160-1169. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.276 [Accessed 6 April 2026].

Pomponi, F. and Moncaster, A. (2017), “Circular economy for the built environment – A research framework”, in *Journal of Cleaner Production*, vol. 143, pp. 710-718. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.055 [Accessed 6 April 2026].

Priore, Y. D., Delmenico, S., Rinquet, L., Habert, G. and Jusselme, T. (2026), “Potential contribution of biogenic materials in new and renovated buildings towards carbon budgets and storage in Switzerland”, in *Journal of Cleaner Production*, vol. 541, article 147558, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2026.147558 [Accessed 06 April 2026].

Rasmussen, F. N., Birkved, M. and Birgisdóttir, H. (2019), “Upcycling and Design for Disassembly – LCA of buildings employing circular design strategies”, in *IOP Conference Series | Earth and Environmental Science*, vol. 225, article 012040, pp. 1-8. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1755-1315/225/1/012040 [Accessed 6 April 2026].

Roberts, M., Allen, S., Clarke, J., Searle, J. and Coley, D. (2023), “Understanding the global warming potential of circular design strategies – Life cycle assessment of a design-for-disassembly building”, in *Sustainable Production and Consumption*, vol. 37, pp. 331-343. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.spc.2023.03.001 [Accessed 6 April 2026].

Röck, M., Saade, M. R. M., Balouktsi, M., Rasmussen, F. N., Birgisdóttir, H., Frischknecht, R., Habert, G., Lützkendorf, T. and Passer, A. (2020), “Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation”, in *Applied Energy*, vol. 258, article 114107, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114107 [Accessed 6 April 2026].

Salama, W. (2017), “Design of concrete buildings for disassembly – An explorative review”, in *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol. 6, issue 2, pp. 617-635. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ijsbe.2017.03.005 [Accessed 6 April 2026].

Shimako, A. H., Tiruta-Barna, L., Bisinella de Faria, A. B., Ahmadi, A. and Spérandio, M. (2018), “Sensitivity analysis of temporal parameters in a dynamic LCA framework”, in *Science of the Total Environment*, vol. 624, pp. 1250-1262. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.220 [Accessed 6 April 2026].

Silva, P. C. P., Almeida, M., Bragança, L. and Mesquita,

V. (2013), “Development of prefabricated retrofit module towards nearly zero energy buildings”, in *Energy and Buildings*, vol. 56, pp. 115-125. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.09.034 [Accessed 6 April 2026].

Sposito, C. and De Giovanni, G. (2023), “Affrontare la complessità – Integrare LCA, ERA ed ESA per valutare impatti e benefici antropici sulla biosfera | Dealing with complexity – Integrating LCA, ERA and ESA to assess human impacts and benefits on the biosphere”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 12-39. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1412023 [Accessed 6 April 2026].

Su, S., Li, X., Zhu, C., Lu, Y. and Lee, H. W. (2021), “Dynamic Life Cycle Assessment – A review of research for temporal variations in life cycle assessment studies”, in *Environmental Engineering Science*, vol. 38, issue 11, pp. 1013-1026. [Online] Available at: doi.org/10.1089/ees.2021.0052 [Accessed 6 April 2026].

Thiébat, F., Masoero, A., Morselli, F., Fregonara, E., Senatore, C., Muñoz Veloza, M. A. and Giordano, R. (2025), “Fibre naturali e circolarità in architettura – Sostenibilità ambientale, economica e sociale | Natural fibres and circularity in architecture – Environmental, economic, and social sustainability”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 316-331. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/18192025 [Accessed 6 April 2026].

Tushar, Q., Zhang, G., Bhuiyan, M. A., Navaratnam, S., Giustozzi, F. and Hou, L. (2022), “Retrofit of Building Façade Using Precast Sandwich Panel – An Integrated Thermal and Environmental Assessment on BIM-Based LCA”, in *Buildings*, vol. 12, issue 12, article 2098, pp. 1-22. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings12122098 [Accessed 6 April 2026].

UN – United Nations (2015), *Transforming our world – The 2030 Agenda for Sustainable Development – Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015*, document A/RES/70/1. [Online] Available at: docs.un.org/en/A/res/70/1 [Accessed 6 April 2026].

UNEP – United Nations Environment Programme (2025), *Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025 – Not just another brick in the wall – The solutions exist – Scaling them will build on progress and cut emissions fast*, UNEP, Paris. [Online] Available at: wedocs.unep.org/20.500.11822/47214 [Accessed 6 April 2026].

UNI (2021a), *UNI EN 15804:2021 – Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-en-15804-2021 [Accessed 6 April 2026].

UNI (2021b), *UNI EN ISO 14040:2021 – Environmental management – Life Cycle Assessment – Principles and framework*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-en-iso-14040-2021 [Accessed 6 April 2026].

UNI (2021c), *UNI EN ISO 14044:2021 – Environmental management – Life Cycle Assessment – Requirements and guidelines*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-en-iso-14044-2021 [Accessed 6 April 2026].

UNI (2011), *UNI EN 15978:2011 – Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-en-15978-2011 [Accessed 6 April 2026].

van Roosmalen, M., Herrmann, A. and Kumar, A. (2021), “A review of prefabricated self-sufficient facades with integrated decentralized HVAC and renewable energy generation and storage”, in *Energy and Buildings*, vol. 248, article 111107, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111107 [Accessed 6 April 2026].