

ARTICLE INFO

Received	02 April 2024
Revised	29 April 2024
Accepted	19 May 2024
Published	30 June 2024

INDICATORE SMART READINESS PER L'EDILIZIA

Asset digitali per la transizione energetica

SMART READINESS INDICATOR FOR BUILDINGS

Digital asset for energy transition

Maria Azzalin

ABSTRACT

Obiettivo prioritario del Green Deal Europeo è lo sviluppo di un mercato dell'energia pienamente integrato, interconnesso e digitalizzato, basato sull'uso di fonti rinnovabili e sul raggiungimento dell'efficienza energetica degli edifici. Condizioni attuabili grazie alle opportunità offerte dagli asset digitali, dalla digitalizzazione dei processi e dall'adozione delle tecnologie smart e di quelle emergenti. In questo scenario il contributo introduce una panoramica critica dei principi e degli aspetti metodologici che hanno istruito la definizione dello Smart Readiness Indicator (SRI) all'interno del processo di transizione energetica. Il position paper sul tema apre ad approfondimenti relativi all'analisi delle relazioni tra obiettivi dello SRI e potenzialità offerte dagli asset digitali e dagli approcci basati sul gemello digitale.

The priority objective of the European Green Deal is the development of a fully integrated, interconnected and digitised energy market based on the use of renewable sources and the achievement of energy efficiency of buildings. Digital assets, digitalisation of processes and the adoption of smart and emerging technologies support the achievement of these conditions. In this scenario, the contribution introduces a critical overview of the principles and methodological aspects that have taught the definition of the Smart Readiness Indicator (SRI) within the energy transition process. The position paper opens to insights into the relationship between SRI objectives and the potential offered by digital assets and approaches based on the digital twin.

KEYWORDS

efficienza energetica, valutazione delle prestazioni degli edifici, decarbonizzazione, edifici intelligenti, gemello digitale

energy efficiency, building performance assessment, decarbonisation, smart buildings, digital twin



Maria Azzalin, Architect and PhD, is a Researcher in Architecture Technology at the Department of Architecture and Territory of the 'Mediterranean' University of Reggio Calabria (Italy). Research activities concern building construction with specific interests in the Maintenance and Life Cycle Assessment of buildings and components. These themes are today developed within the scenario of the green and digital transition of the construction sector concerning the application of emerging technologies and the digital twin approaches. She is a Founding Partner of BIG srl, an academic spin-off, and the Head of its Research and Development Section. Mob. + 39 338/992.35.98 | E-mail: maria.azzalin@unirc.it

La questione climatica, quella della decarbonizzazione, dell'energia e dell'efficienza energetica, nel sollecitare la concreta attuazione dei processi connessi alla transizione energetica dell'ambiente costruito, assume come elementi propulsori le opportunità che gli indirizzi e gli strumenti della più generale transizione ecologica e digitale introducono (Fokaides et alii, 2020; Ma et alii, 2023). Parimenti le politiche europee, nell'esprimere l'assoluta ineluttabilità, ne evidenziano l'urgenza ponendo l'attenzione sulla necessità di strategie e prassi operative di possibili soluzioni all'interno di altrettanto auspicabili scenari di sviluppo sostenibile (UN – General Assembly, 2015; UNEP, 2016; Hussin, Rahman and Memon, 2013; Huang et alii, 2018).

Su tali questioni il Green Deal Europeo, con le strategie per il clima e la neutralità climatica, individua obiettivi, indirizzi e azioni, ponendo l'accento sull'importanza di uno sviluppo energetico pulito e sostenibile e puntando con particolare enfasi proprio sull'efficienza energetica e sull'adozione di fonti energetiche rinnovabili (European Commission, 2019). Due aspetti, questi ultimi, ai quali anche il settore delle costruzioni riconosce da tempo assoluta centralità, accostandone loro un terzo – quello della decarbonizzazione – con il quale riguardano la definizione di catene di approvvigionamento a basse emissioni di carbonio, sempre più climaticamente neutre, riferite all'intero ciclo di vita di edifici e infrastrutture (El jaouhari et alii, 2023; Ravikumar et alii, 2024).

Il settore delle costruzioni è infatti responsabile, da solo, del 36% delle emissioni globali di CO₂ e di circa il 40% del consumo energetico complessivo; di queste grandezze, una parte significativa è imputata al patrimonio edilizio, al quale tuttavia si riconosce, al tempo stesso, un enorme potenziale in termini sia di risparmio energetico che di riduzione delle emissioni (IEA, 2017; IEA, 2020; Khan et alii, 2014). Questo potenziale è esprimibile grazie anche alle opportunità offerte in generale dagli asset digitali, dalla digitalizzazione dei processi e dall'adozione di tecnologie intelligenti in particolare (Apanavičienė and Shahrabani, 2023). Una necessità, quella della transizione energetica del settore, perseguita dunque dalle politiche europee (European Commission, 2020a) e ampiamente supportata sia dalla letteratura scientifica (Castro et alii, 2015; Silva et alii, 2023) che dalle diverse analisi condotte da Istituti di ricerca e Organizzazioni internazionali (UNEP and IEA, 2017; GABC, IEA and UNEP, 2019; Corte dei Conti Europea, 2020).

In questo scenario generale la definizione della Direttiva Europea sull'Efficienza Energetica degli Edifici 844/2018 EPBD (Energy Performance of Buildings Directive; European Parliament and Council of the European Union, 2018) rappresenta un passaggio chiave (European Parliament and Council of the European Union, 2002, 2012, 2023, 2024); altrettanto strategica appare la definizione e contestuale introduzione nella medesima EPBD dello Smart Readiness Indicator (SRI), uno strumento di valutazione e di promozione della sostenibilità e dell'efficienza degli edifici che consente di individuare i possibili ambiti di intervento migliorativo attraverso l'integrazione di processi e tecnologie digitali (European Commission, 2020b, 2020c; European Commission et alii, 2020).

Nell'assumere come riferimento il quadro sin-

teticamente tratteggiato il contributo integra la lettura degli aspetti connessi alla questione della transizione energetica con i principi e gli aspetti metodologici che hanno istruito la definizione dello SRI; attraverso la lettura critica delle potenzialità e criticità metodologiche e applicative introduce una panoramica critica sul tema, configurandosi come potenziale position paper. In particolare il paper apre a specifici approfondimenti connessi alle attività di ricerca attualmente condotte dall'autore in tema di governance innovativa del patrimonio edilizio secondo approcci 'digital twin' in uno scenario a prova di clima, assumendo come chiave di lettura originale l'interazione tra gemello digitale e decarbonizzazione.

Contesto scientifico e normativo | Il Green Deal Europeo, fin dal suo avvio nel 2019, si configura come strategia ambiziosa e globale per trasformare l'Unione Europea in un'economia neutrale dal punto di vista climatico entro il 2050. La transizione energetica è al centro di questa strategia: obiettivo prioritario è lo sviluppo di un mercato dell'energia pienamente integrato, interconnesso e digitalizzato, basato in larga misura sulle fonti rinnovabili e il raggiungimento dell'efficienza energetica attraverso il miglioramento del comportamento energetico degli edifici (European Commission, 2019), finalità quest'ultima posta al centro della Renovation Wave Strategy (European Commission, 2020d) e al tempo stesso trasversale in molteplici altri documenti comunitari (IPCC, 2018; IPCC, 2023) e nelle politiche riferite in generale a clima ed energia, anche in ambito nazionale. Questi documenti, unanimemente, pongono quale questione centrale la necessaria sinergia tra tre ambiti strategici: energia-clima-costruito introducono il primo dei tre aspetti considerati per la definizione nel contesto scientifico e normativo in cui lo SRI si colloca, ovvero la transizione energetica.

Molteplici sono gli aspetti generali che, già assunti come prioritari dall'European Green Deal, vengono ripresi ed espressi in ambiti differenti: dalla riduzione delle emissioni di gas serra – almeno il 55% entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990 – attraverso l'adozione di fonti energetiche rinnovabili e l'efficienza energetica negli edifici e nei trasporti (GABC, IEA and UNEP, 2019) fino alla promozione delle energie rinnovabili – con l'obiettivo di aumentare la quota di energie rinnovabili al 32% del consumo energetico totale entro il 2030 – favorendo la transizione verso un approvvigionamento energetico completamente sostenibile e pulito (EPRS, 2020); e ancora la disponibilità di incentivi finanziari e di investimenti attraverso strumenti economici chiave come il Fondo per una Transizione Giusta e il Next Generation EU, finalizzati a sostenere la transizione verso un'economia a basse emissioni di carbonio, promuovendo la crescita economica sostenibile e prevedendo ingenti investimenti nell'energia pulita e nelle tecnologie a basso impatto ambientale (European Commission, 2020a).

A questi si aggiunge il sostegno a innovazione e ricerca finalizzato a promuovere lo sviluppo di tecnologie avanzate e soluzioni sostenibili nel settore dell'energia pulita attraverso i fondi finanziari e infrastrutturali di Programmi come Horizon Europe¹ (Moseley, 2017) e l'European Innovation Council², oppure la definizione di efficaci riforme

normative volte a favorire la transizione verso un'economia circolare e a basse emissioni di carbonio (Ravikumar et alii, 2024), tutte misure che, in parte mutate da quelle di ordine più generale sopra richiamate, esprimono direttamente la relazione tra transizione energetica e patrimonio edilizio, anch'essa espressa e supportata da studi e report puntuali (UNEP and IEA, 2017; IPCC, 2018, 2023; IEA, 2020).

Emergono da questi documenti, e dalla letteratura scientifica sul tema, alcune considerazioni chiave di ordine generale che, nel perimetrare specifici ambiti di azione riferiti al settore delle costruzioni, non solo confermano la già richiamata sinergia tra clima-energia-costruito, ma anche le potenzialità e il contributo che il patrimonio edilizio può offrire sia in termini di riduzione del consumo di energia che di emissioni di CO₂; nello specifico:

– Strategie e Politiche pubbliche che, orientate, possono svolgere un ruolo fondamentale nel promuovere la transizione verso l'efficienza edilizia attraverso normative, incentivi finanziari, standard di prestazione energetica e Programmi di sensibilizzazione (European Parliament and Council of the European Union, 2012; De Fátima Castro, 2020; Mlecnik et alii, 2020);

– Impatto Ambientale degli Edifici, in quanto il patrimonio edilizio rappresenta una parte significativa del consumo energetico globale (circa il 28%) ed è responsabile di circa il 17% delle emissioni globali di CO₂ (IEA, 2017; Khan et alii, 2014; Huang et alii, 2018);

– Efficienza Energetica degli Edifici che rappresenta un enorme potenziale di risparmio energetico; si stima che l'implementazione di tecnologie edilizie di efficientamento energetico potrebbe ridurre il consumo energetico globale degli edifici del 50% entro il 2050 (IEA, 2020; Fokaides et alii, 2020);

– Approccio Sistemico per una mutua combinazione di tecnologie avanzate e gestione integrata in grado di ottimizzare l'efficienza energetica e l'uso delle risorse adattandosi al tempo stesso alle esigenze degli occupanti e alle condizioni ambientali degli edifici (UNEP, 2016; European Commission, 2020d; Benavente-Peces, 2019);

– Qualità e Benessere Indoor, in quanto gli interventi di efficientamento energetico degli edifici da un lato contribuiscono alla riduzione dell'inquinamento atmosferico, dall'altro possono influire sul miglioramento della qualità dell'aria interna, con benefici diretti sulla salute umana (UNEP, 2016; WHO and IPCS, 2021);

– Resilienza Climatica, espressa intrinsecamente dagli edifici che, energeticamente efficienti, riducono la dipendenza dalle fonti energetiche fossili mitigando gli effetti del cambiamento climatico (IEA, 2020; Dale et alii, 2023);

– Risparmio Economico a lungo termine prodotto, secondo alcuni studi condotti dall'Unione Europea, da investimenti nell'efficienza energetica degli edifici (Corte dei Conti Europea, 2020; Banfi et alii, 2022).

Ulteriori ambiti di natura più operativa assumono l'innovazione tecnologica come elemento centrale per la gestione degli edifici (Sovacool and Furszyfer Del Rio, 2020):

– Adozione di Tecnologie Avanzate quali l'uso e l'implementazione di sistemi di riscaldamento e raffreddamento ad alta efficienza, l'isolamento termico migliorato, le finestre ad alto rendimento ener-

getico e l'integrazione dei sistemi intelligenti per la gestione dell'energia e il monitoraggio – quali sensori, controlli automatizzati, dispositivi di domotica e Internet of Things (IoT) – che, secondo l'Agenzia Internazionale dell'Energia, potrebbero far diminuire significativamente il consumo di energia e ridurre le emissioni di CO₂ del settore edilizio di oltre un terzo entro il 2030 e di oltre il 40% entro il 2050 (IEA, 2020; Yan, Zhou and Yang, 2023);

– Utilizzo di Fonti Energetiche Rinnovabili, quali sistemi fotovoltaici, solare termico e pompe di calore, che possono ridurre la dipendenza dalle fonti energetiche fossili e contribuire a una significativa riduzione delle emissioni di CO₂; l'elettrificazione degli edifici con fonti rinnovabili può contribuire a ridurre le emissioni di CO₂ nel settore edilizio fino al 95% entro il 2050 (IEA, 2020; Arteconi, Mugnini and Polonara, 2019);

– Uso di Materiali da costruzione a Basso Impatto Ambientale, alcuni dei quali (materiali riciclati, legno proveniente da foreste gestite in modo sostenibile e materiali a basse emissioni di carbonio) secondo un'analisi condotta dalla Global Alliance for Buildings and Construction potrebbero ridurre le emissioni globali di CO₂ associate alla produzione e alla costruzione degli edifici del 10% entro il 2050 (GABC, IEA and UNEP, 2019).

Questa evidente relazione tra transizione energetica e patrimonio costruito, nel coinvolgere risparmio energetico e riduzione delle emissioni, si pone in modo trasversale rispetto ai temi dell'innovazione tecnologica e della gestione smart del ciclo di vita degli edifici, delineando scenari in cui gli edifici divengono smart buildings, nodi all'interno di smart city e smart grid; essi sono in grado di integrare tecnologie avanzate e soluzioni digitali per migliorare l'efficienza energetica, la sostenibilità e le prestazioni globali (Energy & Strategy Group, 2021; Apanavičienė, Vanagas and Fokaidis, 2020; Yitmen et alii, 2021).

Si configura in tal modo il secondo aspetto da considerare nella definizione del contesto scientifico e normativo di riferimento, dopo quello della transizione energetica: il tema degli asset digitali e del ruolo delle tecnologie emergenti (Fig. 1).

L'intelligenza artificiale (AI), l'Internet delle cose (IoT), la Realtà Aumentata (AR), la Realtà Virtuale (VR) la blockchain e la stampa 3D sono solo alcune delle tecnologie emergenti che stanno rivoluzionando modalità e processi di trasformazione e gestione del patrimonio costruito; esse offrono soluzioni innovative per la raccolta e l'analisi dei dati, nuove opportunità per ottimizzare l'efficienza energetica, migliorare la sicurezza e la qualità degli edifici, nonché per semplificare i processi decisionali e la gestione delle risorse, individuando specifici ambiti di operatività:

– il monitoraggio e manutenzione predittiva; l'uso di sensori IoT consente la raccolta di dati e il monitoraggio in tempo reale delle prestazioni e condizioni d'uso degli edifici e dei sistemi (Hassebo and Tealab, 2023);

– le decisioni basate sui dati; l'intelligenza artificiale può essere impiegata per analizzare grandi dataset e identificare pattern, modelli e tendenze, supportando decisioni informate (Dell'Isola et alii, 2019);

– il coinvolgimento degli utenti; AR e VR possono essere utilizzate per coinvolgere gli utenti, migliorando la partecipazione pubblica e la comprensione delle decisioni di gestione (Böhm et alii, 2021);

– una maggiore trasparenza e sicurezza; la blockchain può essere impiegata per garantire la trasparenza e l'integrità dei dati, nonché la loro sicurezza e governance (Rodrigo et alii, 2020).

Molteplici altresì sono i contributi che nel fornire una panoramica specifica riferita al settore edilizio evidenziano in particolare i potenziali impatti di tali tecnologie sull'efficienza energetica e sulla sostenibilità (Xu et alii, 2023), sulla governance collaborativa dei sistemi energetici degli edifici, offrendo un'analisi dettagliata riferita alle opportunità e alle sfide (Zhao et alii, 2023) sulla gestione energetica degli edifici, con focus sulle applicazioni pratiche (Bortolini et alii, 2021).

In questo scenario si inserisce il terzo e ultimo aspetto considerato per la definizione del contesto scientifico e normativo di riferimento dello Smart Readiness Indicator: la EPBD (European Parliament and Council of the European Union, 2018). La Direttiva fin dalla sua prima versione aveva già posto l'accento sull'importanza generale di trasformare il settore delle costruzioni in un'industria più sostenibile, efficiente e resiliente, promuovendo un diverso approccio all'efficienza energetica degli edifici attraverso l'introduzione del concetto di gestione 'intelligente' e di una serie di misure per il miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici in un'ottica di smart building. L'attuale (nuova) versione ha confermato e rafforzato gli aspetti precedenti, riaffermando che proprio gli edifici intelligenti svolgeranno un ruolo cruciale nei futuri sistemi energetici e nei processi di decarbonizzazione e riduzione delle emissioni di gas a effetto serra entro il 2050 (European Parliament and Council of the European Union, 2002, 2012, 2023, 2024).

Il testo ribadisce l'importanza delle funzionalità non solo connesse ai requisiti di prestazione energetica – da nZEB a ZEB – ma anche alla capacità dell'edificio di interagire attivamente con gli operatori, gli utenti finali e le reti energetiche, impiantistiche e di gestione, con l'obiettivo di aumentare la consapevolezza sui benefici delle tecnologie intelligenti negli edifici e incentivare l'integrazione (Zangheri and Castellazzi, 2016; Dell'Isola et alii, 2019; Benavente-Peces, 2019).

La Direttiva introduce inoltre come aspetto chiave lo Smart Readiness Indicator (SRI) per valutare la predisposizione tecnologica degli edifici, l'interazione con gli occupanti e le reti energetiche; introdotto dalla prima versione della EPBD, esso si configura quale strumento standardizzato per valutare e promuovere costruzioni intelligenti (European Commission, 2020b, 2020c; European Commission et alii, 2020; European Parliament and Council of the European Union, 2018). Appaiono espliciti due indirizzi tra loro complementari: da un lato la EPBD mira a promuovere l'efficienza energetica degli edifici attraverso una serie di misure, tra cui il miglioramento della loro prestazione energetica e la promozione dell'uso di tecnologie intelligenti, dall'altro lo SRI introduce un metodo standardizzato per orientare e promuovere l'uso di tali tecnologie la cui adozione generalizzata potrebbe portare a risparmi energetici significativi entro il 2030. Insieme assumono un ruolo di supporto al raggiungimento degli obiettivi di efficienza energetica fissati dalla UE, di riduzione delle emissioni di gas serra e di miglioramento della sostenibilità ambientale (Fokaidis, Panteli and Panayidou, 2019).

Smart Readiness Indicator: principi, aspetti me-

todologici, applicazioni | L'introduzione dello SRI attraverso la Direttiva EPBD 2018/844 rappresenta, dunque, un passaggio fondamentale (European Parliament and Council of the European Union, 2018; European Commission et alii, 2020). Il background appena delineato fornisce e ne evidenzia gli elementi chiave: promozione e adozione di soluzioni avanzate e tecnologie intelligenti; riduzione dell'impatto ambientale degli edifici e delle emissioni di gas serra; raggiungimento degli obiettivi di efficienza energetica; miglioramento della qualità della vita degli occupanti; accelerazione dei processi di innovazione digitale del settore (Fig. 2).

Punto di partenza è la definizione di 'smartness' – introdotta dalla Commissione Europea di Normazione (CEN), attraverso i lavori del Comitato Tecnico CEN/TC247³ (UNI EN 15232-1:2017; UNI EN ISO 52120-1:2022) – come la capacità di un edificio di integrare tecnologie avanzate e soluzioni digitali per migliorare le sue prestazioni in termini di efficienza energetica, comfort degli occupanti e interazione con l'ambiente esterno e di facilitare la transizione verso edifici intelligenti e sostenibili (Al Dakheel et alii, 2020).

Parallelamente al lavoro di normazione condotto dal CEN/TC247 e in linea con il metodo proposto per la classificazione della smartness dei sistemi di automazione e controllo degli edifici (BACS; UNI EN 15232-1:2017; UNI EN ISO 52120-1:2022), la Commissione Europea, in coerenza con la nuova versione della EPBD, ha avviato un articolato piano di definizione e testing per supportare lo sviluppo dello SRI attraverso due studi tecnici supportati da una fase di applicazione sperimentale, la cui chiusura è prevista per la fine del 2024 (Plienaitis et alii, 2023; European Commission, 2020b, 2020c; European Commission et alii, 2020).

Il primo studio condotto da un consorzio composto da VITO, Waide Strategic Efficiency, Ecofys e OFFIS, ha posto l'attenzione sulla definizione della struttura di uno strumento di valutazione europeo armonizzato (Verbeke et alii, 2018); il secondo, condotto in continuità con il precedente, ha riguardato l'implementazione di input tecnici (European Commission et alii, 2020). I due studi hanno previsto una collaborazione attiva con gli stakeholder, attraverso consultazioni, incontri, sondaggi e raccolta di feedback. Sono stati esaminati i documenti tecnici, i risultati dei test beta e le valutazioni degli impatti dell'implementazione dello SRI (Fig. 3). In questo scenario lo SRI si configura dunque come Key Performance Indicator (KPI).

I principi che ne istruiscono e configurano l'impalcato metodologico e operativo fanno riferimento a tre ambiti: 'criteri di funzionalità chiave', 'criteri di impatto' e 'ambiti tecnici'; declinati rispettivamente in tre criteri principali il primo, in sette criteri d'impatto il secondo e in nove ambiti tecnici il terzo, insieme esprimono le diverse dimensioni della prontezza intelligente di un edificio. In particolare: – criteri di funzionalità chiave; efficienza energetica e funzionamento, risposta alle esigenze degli occupanti e flessibilità energetica esprimono la capacità dell'edificio di regolare autonomamente il proprio consumo energetico in modo efficiente (utilizzando anche fonti rinnovabili), di adattarsi alle esigenze degli utenti e partecipare alla gestione della domanda energetica, ad esempio attraverso la possibilità di immagazzinare energia; – criteri d'impatto; efficienza energetica, manuten-

zione e previsione dei guasti, comfort, comodità, salute, benessere e accessibilità, informazioni agli occupanti e flessibilità energetica e stoccaggio dell'energia valutano gli effetti diretti e indiretti delle tecnologie smart sull'edificio e sugli utenti (Fig. 4); – ambiti tecnici; riscaldamento, raffrescamento, acqua calda per uso domestico, ventilazione, illuminazione, involucro edilizio dinamico, energia elettrica, ricarica dei veicoli elettrici e monitoraggio e controllo rappresentano le diverse aree in cui le tecnologie smart possono essere implementate per migliorare la prestazione degli edifici (Fig. 5).

Inoltre lo SRI si caratterizza per:
 – la metodologia di calcolo, che introduce l'esame dei cosiddetti 'servizi smart ready' presenti e/o previsti nell'edificio; tali servizi sono definiti in modo neutrale rispetto alla tecnologia specifica e sono valutati su una scala che riflette il loro livello di 'intelligenza' e gli impatti previsti sugli utenti e sulla rete energetica, ciò attraverso due cataloghi di servizi (un metodo dettagliato e un metodo semplificato), ciascuno dei quali elenca sia i servizi pertinenti che la descrizione degli impatti attesi (Figg. 6, 7);
 – i punteggi di smart readiness, che consentono di valutare i servizi in base a livelli di funzionalità che riflettono l'implementazione intelligente delle tecnologie; per ogni servizio smart vengono definiti diversi livelli di funzionalità e attribuiti punteggi di impatto che, a loro volta, sono assegnati a ciascun livello di funzionalità e aggregati per calcolare il punteggio di smart readiness dell'edificio espresso in termini di percentuale;
 – gli aggiornamenti e il monitoraggio, che rappresentano infine uno step fondamentale per verificare applicabilità ed efficacia dello SRI.

La fase di applicazione sperimentale ha coinvolto, su base volontaria, alcuni Stati membri (Austria, Croazia, Repubblica Ceca, Danimarca, Finlandia e Francia) che si sono impegnati nell'applicazione del processo di valutazione a edifici residenziali e commerciali campione, nel monitoraggio delle fasi di applicazione e dei relativi feedback e nella loro trasmissione alla Commissione Europea⁴. Non sono state redatte specifiche linee guida per l'applicazione dello SRI (European Commission, 2020c) e ciò ha consentito ai singoli Stati di implementarne l'applicazione rispetto ai propri contesti specifici (Plienaitis et alii, 2023; Janhunen et alii, 2019; Tab. 1).

L'Italia, pur non aderendo all'iniziativa europea, ha condotto anche attraverso l'Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile (ENEA) diverse sperimentazioni: dalla valutazione 'smartness' del costruito esistente, per valutarne il potenziale di miglioramento, all'applicazione della metodologia di calcolo dello SRI a diverse categorie di edifici con differenti livelli di automatismo e di intelligenza impiantistica (Vigna et alii, 2020; Canale et alii, 2021).

I test beta della sperimentazione europea hanno confermato la fattibilità dell'approccio proposto e hanno portato a ulteriori perfezionamenti metodologici; le valutazioni degli impatti hanno evidenziato significativi benefici netti derivanti dall'implementazione dello SRI in tutta l'Unione Europea, la cui adozione generalizzata potrebbe portare a risparmi energetici fino al 10% nei settori residenziale e commerciale entro il 2030 (Plienaitis et alii, 2023; Tab. 2, 3). Ulteriori applicazioni riguardano la possibile integrazione dello SRI direttamente nei sistemi di certificazione energetica nazionali

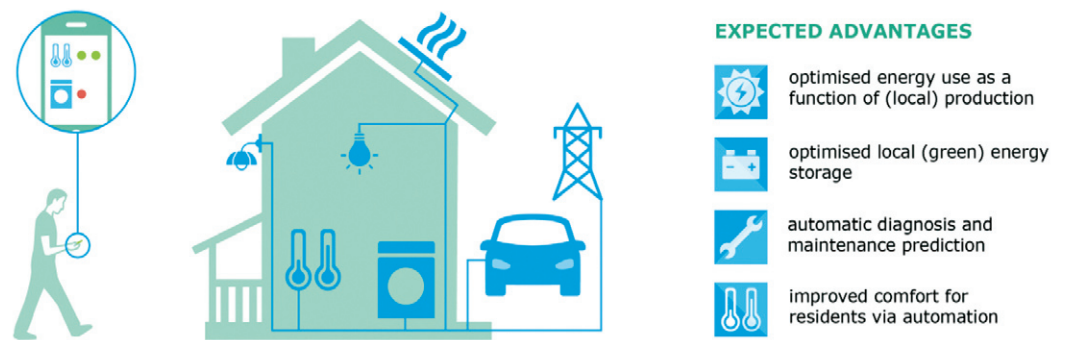


Fig. 1 | Expected advantages of smart technologies in buildings (source: European Commission et alii, 2020).



Fig. 2 | Three key functionalities of smart readiness in buildings (source: European Commission et alii, 2020).

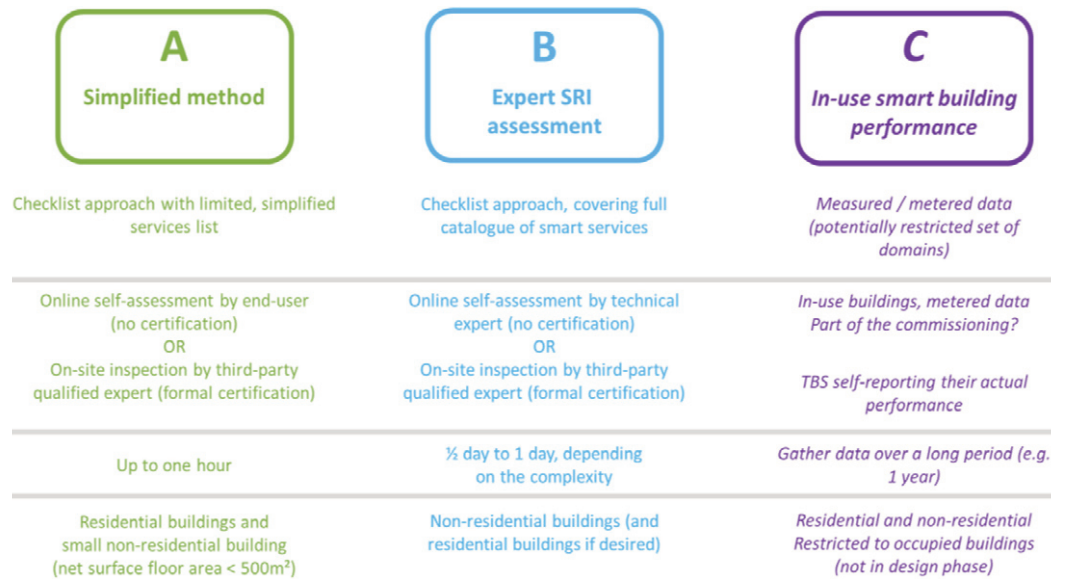


Fig. 3 | Three potential assessment methods (source: European Commission et alii, 2020).

La fase di sperimentazione del SRI, la cui conclusione è prevista entro la fine del 2024, la sua implementazione normativa con la nuova versione delle EPBD e la letteratura scientifica sul tema consentono già di evidenziare potenzialità e criticità connesse alla sua applicabilità metodologica: di entrambe si riporta una prima sintesi che apre a possibili scenari di approfondimenti futuri. Tra le principali potenzialità:

- la valutazione integrata delle prestazioni energetiche; lo SRI offre un metodo standardizzato per valutare non solo l'efficienza energetica, ma anche la capacità degli edifici di adottare tecnologie intelligenti per ottimizzare l'uso dell'energia e migliorare il comfort degli occupanti, svolgendo, inoltre, un ruolo chiave nella promozione della pianificazione urbana sostenibile (Chatzikonstantinidis et alii, 2024; Fig. 8);
- l'ottimizzazione del comportamento energetico; gli indicatori forniti dallo SRI possono aiutare proprietari e operatori a identificare le aree di intervento prioritario e a pianificare opportune strategie

consentendo interventi mirati a migliorare l'efficienza energetica e ridurre i consumi (Fokaides, Panteli and Panayidou, 2019);

- la promozione dell'innovazione tecnologica; lo SRI può agire da acceleratore per l'adozione di tecnologie intelligenti negli edifici, promuovendo l'innovazione nel settore delle costruzioni e dell'energia; di particolare rilievo in questa direzione è l'integrazione di Digital Twin e Building Information Modeling (BIM) per la simulazione delle prestazioni degli edifici, evidenziando come questa sinergia possa influenzare positivamente l'efficienza energetica e il comfort degli occupanti (Nguyen and Adhikari, 2022).

Parallelamente tra le principali criticità si segnalano:

- la complessità di implementazione; l'implementazione dello SRI è complessa sia per la varietà di tecnologie e sistemi da considerare nella valutazione sia per la necessità di standardizzare i metodi di misurazione e valutazione; quest'ultimo aspetto insieme alla definizione di criteri e parametri

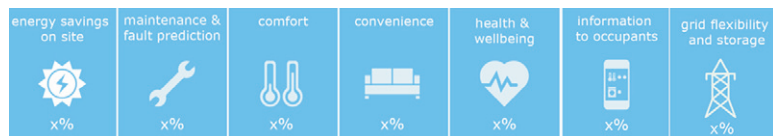


Fig. 4 | Smart Service impact criteria (source: European Commission et alii, 2020).



Fig. 5 | Domains structuring the SRI catalogue (source: European Commission et alii, 2020).

coerenti e affidabili rappresenta la sfida per garantire una valutazione accurata e comparabile degli edifici (Pan et alii, 2023).

– i costi e le risorse necessarie; valutare lo SRI richiede risorse finanziarie e umane connesse sia alla formazione che ad aspetti tecnici e strumentali, relativi sia all’acquisizione e installazione di dispositivi di monitoraggio e controllo che per la successiva analisi e interpretazione dei dati raccolti; tali costi possono rappresentare un ostacolo per la diffusione e l’adozione dello SRI (Plienaitis et alii, 2023).

– l’interpretazione dei risultati; interpretare correttamente i risultati ottenuti tramite lo SRI non è semplice; trattandosi di dati complessi è importante fornire linee guida chiare e supporto tecnico a garanzia non solo di una corretta interpretazione degli indicatori, ma anche per la successiva definizione di strategie di miglioramento (Piras, Agostinelli and Muzi, 2024).

Da questa sintesi emergono chiare le sfide relative alla standardizzazione, alla valutazione e alla comunicazione dei risultati dello SRI, nonché quelle relative alla sua integrazione nei regolamenti edilizi e nelle politiche energetiche. Altrettanto evidenti sono anche le sfide connesse all’implementazione dello SRI con gli asset digitali e le relative tecnologie abilitanti (tra cui BIM, IoT e approcci basati sul modello digitale) che, nel consentire un monitoraggio costante del comportamento degli edifici in termini di consumi e comfort e una gestione più intelligente del ciclo di vita delle costruzioni, migliorano contemporaneamente l’efficacia stessa dell’applicazione dello SRI (Cespedes Cubides and Jradi, 2024).

Conclusioni e prospettive future | Lo Smart Readiness Indicator rappresenta uno step importante per la promozione della sostenibilità degli edifici e la transizione verso un’economia a basse emissioni di carbonio. Tuttavia dall’analisi della letteratura scientifica emerge con chiarezza la necessità di ulteriori ricerche per affrontare le sfide e massimizzarne il potenziale nell’ambito della transizione energetica nel settore delle costruzioni, ciò con particolare riguardo all’integrazione con le tecnologie smart e gli approcci Digital Twin in un’ottica di decarbonizzazione e neutralità climatica del patrimonio costruito (Apanavičienė, Vanagas and Fokaides, 2020; Omrany et alii, 2023).

Le interazioni tra lo SRI, le tecnologie smart building e gli approcci Digital Twin rappresentano oggi una questione aperta e ancora poco indagata: la loro integrazione sembra esser però in grado di massimizzare i benefici in termini di sostenibilità, efficienza e comfort degli occupanti nell’ambito degli scenari richiamati (Zhao et alii, 2023; Kineber et alii, 2023).

Lo SRI valuta le caratteristiche fisiche degli edifici, i sistemi di gestione e le infrastrutture digitali presenti, fornendo un quadro complessivo del loro potenziale di adattamento alle tecnologie smart

alle quali è riconosciuta la capacità di semplificare la gestione degli edifici, ottimizzare l’efficienza energetica, ridurre i consumi attraverso sistemi di gestione energetica avanzati e controllare e monitorare le prestazioni nel ciclo di vita attraverso sistemi IoT.

Gli approcci Digital Twin, infine, riflettono in modo accurato le caratteristiche fisiche e funzionali degli edifici reali: la replica digitale integra dati provenienti da sensori, dispositivi IoT e altri sistemi di monitoraggio, consentendo di simulare il comportamento degli edifici in diverse condizioni e di ottimizzarne le prestazioni attraverso l’analisi dei dati in tempo reale (UNEP and IEA, 2017; Botin Sanabria et alii, 2021; Aliero et alii, 2022; Piras, Agostinelli and Muzi, 2024; Lauria and Azzalin, 2024).

L’integrazione di SRI e tecnologie smart building consente di identificare e implementare soluzioni per raggiungere livelli più elevati di smartness e conformità agli standard di efficienza energetica; parallelamente, l’integrazione di SRI e Digital Twin può supportare processi decisionali basati sui dati per migliorare l’efficienza operativa, il miglioramento dell’affidabilità dei sistemi energetici (Pan et alii, 2023), l’ottimizzazione delle risorse e il comfort degli occupanti degli edifici (Desogus et alii, 2023). La raccomandazione già espressa nei documenti europei invita a implementare lo SRI nelle politiche nazionali degli Stati membri; parallelamente sono oltremodo necessari ulteriori studi per monitorare gli impatti nel lungo termine e adattare la metodologia all’evoluzione delle tecnologie e delle esigenze degli utenti degli edifici.

Climate change, decarbonisation, energy, and energy efficiency highlight the need for the actual implementation of the energy transition processes concerning the built environment, assuming as driving forces the opportunities that the more general ecological and digital transition introduces (Fokaides et alii, 2020; Ma et alii, 2023). Similarly, European policies highlight this urgency, focusing on the need for strategies and operational practices for sustainable development scenarios (UN – General Assembly, 2015; UNEP, 2016; Hussin, Rahman and Memon, 2013; Huang et alii, 2018). With carbon and climate neutrality strategies, the European Green Deal identifies objectives, directions and actions aimed at clean and sustainable energy, emphasising energy efficiency and adopting renewable energy sources (European Commission, 2019). These two aspects, which the construction sector has long recognised as absolutely central, alongside a third – decarbonisation – aim to establish increasingly climate-neutral and low-carbon supply chains in the entire life cycle of buildings and infrastructure (El jaouhari et alii, 2023; Ravikumar et alii, 2024).

In this scenario, the definition of the European

Directive on the Energy Efficiency of Buildings 844/2018 EPBD (Energy Performance of Buildings Directive; European Parliament and Council of the European Union, 2018) represents a key step (European Parliament and Council of the European Union, 2002, 2012, 2023, 2024); equally strategic is the definition and simultaneous introduction in the EPBD of the Smart Readiness Indicator (SRI). It is both an assessment tool and an instrument for promoting the sustainability and efficiency of buildings, highlighting a predisposition to adopt intelligent technologies for energy saving and/or for using different energy resources. Furthermore, it also pinpoints possible areas of improvement through the integration of digital processes and technologies (European Commission, 2020b, 2020c; European Commission et alii, 2020).

Using the outlined framework, the paper discusses and integrates the issues connected to energy transition with the principles and methodological aspects that guided the definition of the SRI. It defines a position paper providing an overview through critically analysing methodological and applicative potentials and criticisms. The paper opens specific insights related to research activities currently conducted by the author on innovative governance of the building stock according to digital twin approaches in a climate-proof scenario. It considers the interaction between Digital Twin and decarbonisation as its original reading key.

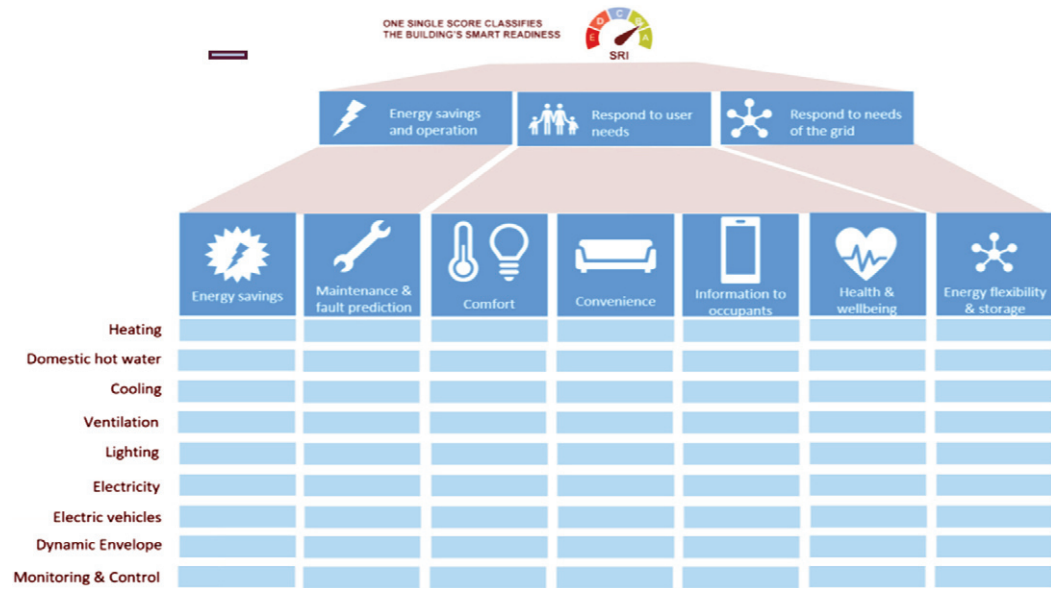
Scientific and regulatory scenario | Since its launch in 2019, the European Green Deal looks like an ambitious and comprehensive strategy for transforming the European Union into a climate-neutral economy by 2050. Energy transition lies at the heart of this strategy: one pivotal objective is the development of a fully integrated, interconnected, and digitised energy market, largely based on renewable sources, energy efficiency and improving the energy performance of buildings (European Commission, 2019). This goal is central to the Renovation Wave Strategy (European Commission, 2020d) and pervasive in numerous other EU documents (IPCC, 2018; IPCC, 2023) and policies related to climate and energy, also at the national level. These documents unanimously emphasise the synergy between three strategic areas (energy-climate-built environment) and introduce the first aspect defining the scientific and regulatory context in which the SRI definition is placed: energetic transition.

Several general aspects, already identified as priorities by the European Green Deal, are reiterated and expressed across other different domains: from reducing greenhouse gas emissions – at least by 55% by 2030 compared to 1990 levels – through the adoption of renewable energy sources and energy efficiency in buildings and transportation (GABC, IEA and UNEP, 2019), pro-

promoting renewable energies – to increase the share of renewable energies to 32% of total energy consumption by 2030 – facilitating the transition to a completely sustainable and clean energy supply (EPRS, 2020). Moreover, financial incentives and investments are available through key economic instruments such as the Just Transition Fund and the Next Generation EU, aimed at supporting the transition to a low-carbon economy, promoting sustainable economic growth, and providing substantial investments in clean energy and low-impact environmental technologies (European Commission, 2020a).

Additionally, support for innovation and research aims to promote the development of advanced technologies and sustainable solutions in the clean energy sector through financial and infrastructural funds from programs like Horizon Europe¹ (Mosely, 2017) and the European Innovation Council², or the definition of effective regulatory reforms to facilitate the transition to a circular and low-carbon economy (Ravikumar et alii, 2024). These measures, partly derived from the general orders, directly express the relationship between energy transition and building stock, as supported by studies and reports (UNEP and IEA, 2017; IPCC, 2018, 2023; IEA, 2020). Key considerations emerge from these documents, delineating some specific areas of action closely related to the construction sector, confirming the synergy between climate, energy and built environment and the potentials and contributions that the building stock can offer for both energy consumption and reduction in CO₂ emissions:

- Strategies and Public Policies, properly oriented, can play a fundamental role in promoting the transition to building efficiency through regulations, financial incentives, energy performance standards, and awareness Programs (European Parliament and Council of the European Union, 2012; De Fátima Castro, 2020; Mlecnik et alii, 2020);
- Environmental Impact of buildings as the building stock accounts for a significant portion of global energy consumption (about 28%) and is responsible for approximately 17% of global CO₂ emissions (IEA, 2017; Khan et alii, 2014; Huang et alii, 2018);
- Energy Efficiency of buildings represents a huge potential for energy savings; it is estimated that the implementation of energy-efficient building technologies could reduce global building energy consumption by 50% by 2050 (IEA, 2020; Fokkides et alii, 2020);
- Systemic Approach for a mutual combination of advanced technologies and integrated management capable of optimising resource use, adapting to the needs of occupants and environmental conditions (UNEP, 2016; European Commission, 2020d; Benavente-Peces, 2019);
- Indoor Quality and Well-being because the Energy Efficiency Interventions in buildings, in contributing to the reduction of atmospheric pollution, can impact the improvement of indoor air quality, with direct benefits for human health (UNEP, 2016; WHO and IPCS, 2021);
- Climate Resilience is intrinsically expressed by energy-efficient buildings that reduce dependence on fossil energy sources by mitigating the effects of climate change (IEA, 2020; Dale et alii, 2023);
- Long-term Economic Savings produced, according to some studies from the European Union, by



SRI - CALCULATION METHODOLOGY

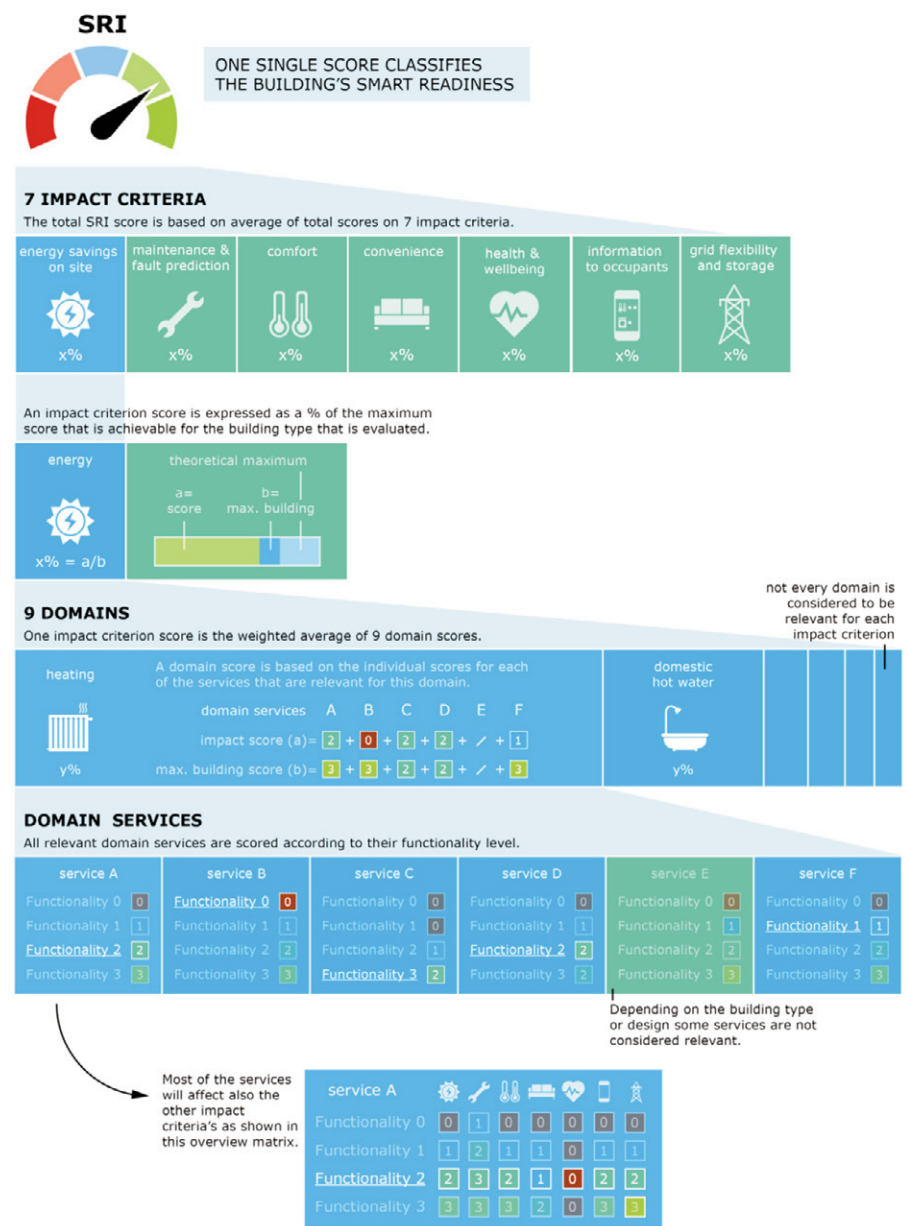


Fig. 6 | Structure of domains and impacts criteria (source: European Commission et alii, 2020).

Fig. 7 | Summary of the calculation methodology (source: European Commission et alii, 2020).

Year	Site	Type of buildings	Reference
2018	Helsinki (Finland)	No. 3 non residential buildings	Janhunen, E., Pulkka, L., Säynäjoki, A. and Junnila, S. (2019), "Applicability of the Smart Readiness Indicator for Cold Climate Countries", in <i>Buildings</i> , vol. 9, issue 4, article 102, pp. 1-18
2018	Cyprus	No. 1 building of mixed use	Fokaides, P. A., Panteli, C. and Panayidou, A. (2019), "How are the Smart Readiness Indicators expected to affect the energy performance of buildings – First evidence and perspectives", in <i>Sustainability</i> , vol. 12, issue 22, article 9496, pp. 1-12
2019	Bolzano (Italy)	No. 1 nearly zero-energy building (nZEB) The Black Monolith	Vigna, I., Perneti, R., Pernigotto, G. and Gasparella, A. (2020), "Analysis of the Building Smart Readiness Indicator Calculation – A comparative case-study with two Panels of Experts", in <i>Energies</i> , vol. 13, issue 11, article 2796, pp. 1-18
2019	Bolzano (Italy)	No. 1 nearly zero-energy building (nZEB) The Black Monolith	Vigna, I., Perneti, R., Pernigotto, G. and Gasparella, A. (2020), "Analysis of the Building Smart Readiness Indicator Calculation – A comparative case-study with two Panels of Experts", in <i>Energies</i> , vol. 13, issue 11, article 2796, pp. 1-18
2020	Thessaloniki (Greece)	No. 1 typical office building at Frederick University	Chatzikonstantinidis, K., Giama, E., Fokaides, P. A. and Papadopoulos, A. M. (2024), "Smart Readiness Indicator (SRI) as a Decision-Making Tool for Low Carbon Buildings", in <i>Energies</i> , vol. 17, issue 6, article 1406, pp. 1-23
2021	Kaunas (Lithuania)	No. 1 building at Kaunas University of Technology	Plienaitis, G., Daukšys, M., Demetriou, E., Ioannou, B., Fokaides, P. A. and Seduikyte, L. (2023), "Evaluation of the Smart Readiness Indicator for Educational Buildings", in <i>Buildings</i> , vol. 13, issue 4, article 888, pp. 1-13

Tab. 1 | Overview of some SRI applications in case studies from scientific literature (credit: by the Author, 2024).

Barriers to adoption	Potential benefits	Barriers to adoption	Potential benefits
Align the different coin-faced actors in the adoption process of the SRI	Stimulating investment in smart (digital) building technology	Poor knowledge of the directive and limited effective applicability	Promote the use of energy efficiency solutions in buildings
Consider the technological constraints (different types of installations, buildings, protocols used, etc.) and gain access to the necessary data	Promoting technological innovation in buildings	Limited awareness of the actors involved	Promoting technological innovation in buildings
There is a risk of a process with a high level of bureaucracy and a very long time frame	Promote the use of energy efficiency solutions in buildings	Ageing of the building stock and poor development of the real estate sector	Stimulating investment in smart (digital) building technology
	Allow a reduction in energy consumption	Introduction of higher costs for non-quantifiable savings	Allow a reduction in energy consumption
		Introduction of a process characterised by a strong bureaucratic component with a very long time	

Tab. 2 | Smart Readiness Indicator Survey (SRI) in Europe: barriers and potential benefits (source: Energy & Strategy Group, 2021; adapted by the Author, 2024).

Tab. 3 | Smart Readiness Indicator Survey (SRI) in Italy: barriers and potential benefits (source: Energy & Strategy Group, 2021; adapted by the Author, 2024).

investments in the energy efficiency of buildings (Corte dei Conti Europea, 2020; Banfi et alii, 2022).

Further areas of a more operational nature take technological innovation as a central element in building management (Sovacool and Furszyfer Del Rio, 2020):

- Adoption of Advanced Technologies like the use and implementation of high-efficiency heating and cooling systems, improved thermal insulation, high-performance windows, and the integration of intelligent energy management and monitoring systems, such as sensors, automated controls, home automation devices, and the Internet of Things

(IoT), according to the International Energy Agency, could significantly decrease energy consumption and reduce CO₂ emissions from the building sector by over one-third by 2030 and over 40% by 2050 (IEA, 2020; Yan, Zhou and Yang, 2023);

- Use of Renewable Energy Sources like photovoltaic systems, solar thermal, and heat pumps can reduce dependence on fossil energy sources and contribute to a significant reduction in CO₂ emissions (IEA, 2020); electrification of buildings with renewable sources could contribute to reducing CO₂ emissions in the building sector by up to 95% by 2050 (IEA, 2020; Arteconi, Mugnini and

Polonara, 2019);

- Use of Low-impact Building Materials, for example, of recycled materials, such as wood from sustainably managed forests and/or low-carbon emission materials, which, according to an analysis from the Global Alliance for Buildings and Construction, could reduce global CO₂ emissions associated with building production and construction by 10% by 2050 (GABC, IEA and UNEP, 2019).

The relationship between energy transition and built heritage, between energy savings and emission reduction, intersects with technological innovation and smart management of building life cy-

cles, outlining scenarios in which buildings become smart buildings, nodes within smart cities and smart grids. These buildings can integrate advanced technologies and digital solutions to improve energy efficiency, sustainability, and overall performance (Energy & Strategy Group, 2021; Apanavičienė, Vanagas and Fokaides, 2020; Yitmen et alii, 2021).

It identifies the second aspect introducing the scientific and regulatory context in which the SRI definition is placed: the digital asset and the role of emerging technologies (Fig. 1).

Artificial intelligence (AI), Internet of Things (IoT), Augmented Reality (AR), Virtual Reality (VR), blockchain, and 3D printing are just some of the emerging technologies revolutionising the modes and processes of transformation and management of the built heritage. They offer innovative solutions for data collection and analysis, new opportunities to optimise energy efficiency, improve building safety and quality, as well as simplifying decision-making processes and resource management:

- Monitoring and Predictive Maintenance; the use of IoT sensors allows for real-time data collection and monitoring of building and system performance and conditions (Hassebo and Tealab, 2023);
- Data-driven Decision-making; artificial intelligence can be employed to analyse large datasets and identify patterns, models, and trends, supporting informed decisions (Dell'Isola et alii, 2019);
- User Engagement; AR and VR can be used to engage users, enhancing public participation and understanding of management decisions (Böhm et alii, 2021);
- Increased Transparency and Security; blockchain can be employed to ensure data transparency and integrity, as well as their security and governance (Rodrigo et alii, 2020).

Multiple contributions also highlight the potential impact of such technologies on energy efficiency and sustainability (Xu et alii, 2023) and collaborative governance of building energy systems; they offer a detailed analysis of opportunities and challenges for building energy management (Zhao et alii, 2023), with a focus on practical applications (Bortolini et alii, 2021).

This scenario also outlines the third and final aspect defining the scientific and regulatory context of the Smart Readiness Indicator. It is the EPBD (European Parliament and Council of the European Union, 2018). The Directive, since its first version, had already emphasised the general importance of transforming the construction sector into a more sustainable, efficient, and resilient industry, promoting a different approach to building energy efficiency through the introduction of the concept of 'smart' management and a series of measures to improve building energy performance with a view to smart building. The current (new) version has confirmed and strengthened the previous assumptions, reaffirming the nodal role of smart buildings in the decarbonisation processes and greenhouse gas emissions reduction by 2050 (European Parliament and Council of the European Union, 2002, 2012, 2023, 2024).

The document reiterates the importance of functionalities related to energy performance requirements (from nZEB to ZEB) and the building's ability to actively interact with operators, end users, and energy, plant, and management networks; it aims to raise awareness of the benefits of smart technologies in buildings and encourage their in-

tegration (Zangheri and Castellazzi, 2016; Dell'Isola et alii, 2019; Benavente-Peces, 2019).

Furthermore, the Directive introduces, as a key aspect, the Smart Readiness Indicator (SRI) to assess the technological readiness of buildings, their interaction with occupants, and energy networks; it has been introduced since the first version of the EPBD and serves as a standardised tool to assess and promote smart constructions (European Parliament and Council of the European Union, 2018; European Commission, 2020b, 2020c; European Commission et alii, 2020).

Therefore, complementary objectives emerge: first, the EPBD aims to promote the energy efficiency of buildings through a series of measures, including improving their energy performance and promoting the use of smart technologies; second, the SRI proposes a standardised method to orienting and promoting the use of smart technologies that could lead to significant energy savings by 2030. Together, they play a strategic role in achieving the energy efficiency goals set by the European Union, reducing greenhouse gas emissions, and improving environmental sustainability (Fokaides, Panteli and Panayidou, 2019).

Smart Readiness Indicator: principles, methodological aspects, applications

The introduction of the SRI by the EPBD 2018/844 Directive represents a fundamental step (European Parliament and Council of the European Union, 2018; European Commission et alii, 2020). The outlined background provides and highlights its key elements: promotion and adoption of advanced solutions and smart technologies; reduction of the environmental impact of buildings and greenhouse gas emissions; achievement of energy efficiency goals; improvement of occupants' life quality; acceleration of the digital innovation processes in the sector (Fig. 2).

The starting point is the definition of 'smartness' introduced by the European Commission of Standardization – CEN, by Technical Committee CEN/TC247³ (UNI EN 15232-1:2017; UNI EN ISO 52120-1:2022) – namely the ability of a building to integrate advanced technologies and digital solutions for improving performance in terms of energy efficiency and occupants' comfort and to facilitate the transition to smart and sustainable buildings (Al Dakheel et alii, 2020).

Parallel to the standardisation work conducted by CEN/TC247 and in line with the proposed method for classifying the smartness of building automation and control systems (BACS; UNI EN 15232-1:2017; UNI EN ISO 52120-1:2022), the European Commission, coherently with the new version of the EPBD, plans an elaborate plan to support the development of the SRI through two technical studies supported by an experimental phase that is expected to be closed at the end of 2024 (European Commission, 2020b, 2020c; European Commission et alii, 2020; Plienaitis et alii, 2023).

The first study, conducted by a consortium composed of VITO, Waide Strategic Efficiency, Ecofys and OFFIS, focused on defining the structure of a harmonised European assessment tool (Verbeke et alii, 2018); the second, conducted in continuity with the previous one, concerns the implementation of technical inputs (European Commission et alii, 2020). The two studies have provided

for active collaboration with stakeholders through consultations, meetings, surveys, and feedback collection. (Fig. 3). Technical documents, beta test results and impact assessments of the SRI implementation were examined. In this scenario, the SRI is thus configured as a Key Performance Indicator (KPI).

The principles that instruct and configure its methodological and operational framework refer to three areas: 'key functionality criteria', 'impact criteria', and 'technical domains'. The first is declined into three main criteria, the second into seven impact criteria, and the third into nine technical domains. Together, they express the dimensions of the building's smart readiness:

- key functionality criteria; energy efficiency and operation, response to occupants' needs and energy flexibility express the building's ability to autonomously and efficiently regulate its energy consumption (also using renewable sources), to adapt to users' needs, and to participate in energy demand management, for example, through energy storage;
- impact criteria; energy efficiency, maintenance and fault prediction, comfort, convenience, health, well-being, accessibility, information to occupants, and energy flexibility and storage and evaluate the direct and indirect effects of smart technologies on the building and its users (Fig. 4);
- technical domains; heating, cooling, domestic hot water, ventilation, lighting, dynamic building envelope, electricity, electric vehicle charging, and monitoring and control represent the different areas, fixed by SRI, where smart technologies can be implemented to improve building performance (Fig. 5).

For the effective operability of the SRI, the following aspects are added to the listed principles: – the calculation methodology introduces the examination of the so-called 'smart ready services' that are present and/or planned in the building; these services are defined neutrally concerning specific technology; they are evaluated through two service catalogues (a detailed method and a simplified method), each listing both relevant services and their level of 'intelligence' and the description of expected impacts on users and the energy network (Figg. 6, 7);

- smart readiness scores allow the evaluation of services based on functionality levels reflecting intelligent technology implementation. Different functionality levels are defined for each smart service, and then impact scores are assigned to each functionality level and aggregated to calculate the building's smart readiness score expressed as a percentage;
- updates and monitoring represent a fundamental step in verifying the applicability and effectiveness of the SRI.

The experimental phase involved some Member States (Austria, Croatia, the Czech Republic, Denmark, Finland and France) committed to applying the assessment process to residential and commercial building samples voluntarily. It deals with some steps: monitoring the application phases, analysing related feedback and transmitting results to the European Commission⁴. No specific guidelines have been drawn up for applying the SRI (European Commission, 2020c); this has allowed individual States to implement its application concerning their contexts (Plienaitis et alii, 2023;

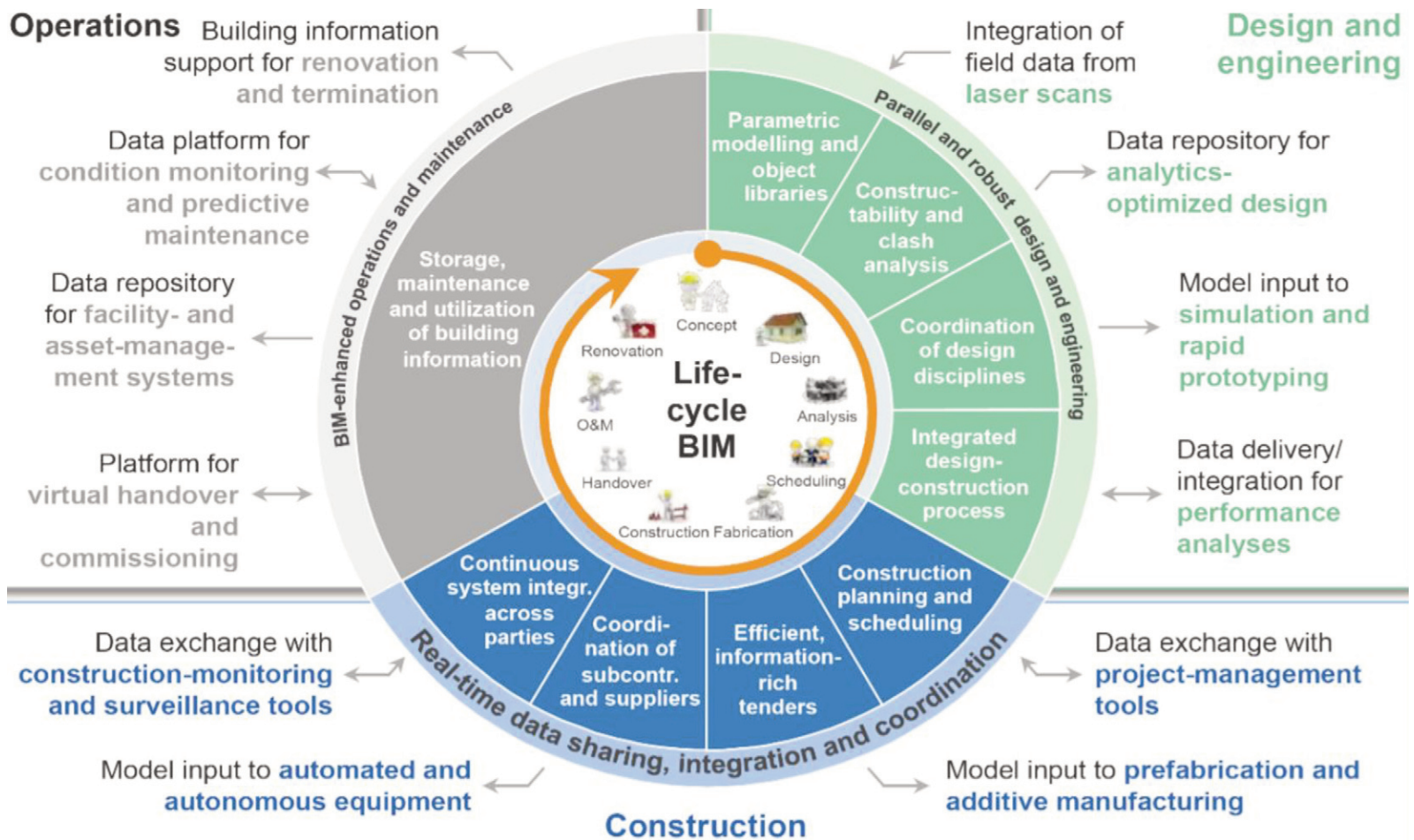


Fig. 8 | Applications of BIM along the engineering and construction value chain (source: WEF, 2016).

Janhunen et alii, 2019; Tab. 1).

Italy, while not adhering to the European initiative, has also conducted several experiments through the National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development (ENEA): from the ‘smartness’ assessment of the existing buildings to evaluate their potential for improvement to the application of the SRI calculation methodology to different categories of buildings with various levels of automation and smart equipment (Vigna et alii, 2020; Canale et alii, 2021).

Beta tests of the European experimentation have confirmed the feasibility of the proposed approach and led to further methodological refinements. Impact assessments have highlighted significant net benefits from SRI implementation throughout the European Union. Its widespread adoption could lead to energy savings of up to 10% in the residential and commercial sectors by 2030 (Plienaitis et alii, 2023; Tab. 2, 3). Further applications concern the possible integration of SRI directly into national energy certification systems.

The testing phase of the SRI, which is expected to be completed by the end of 2024, its regulatory implementation with the new version of the EPBDs and the scientific literature on the subject already make it possible to highlight potential and critical issues related to its methodological applicability: an initial summary of both is given here, which opens up possible scenarios for future in-depth studies. Among the main potentials:

- integrated evaluation of energy performance;

the SRI provides a standardised method to assess both energy efficiency and the ability of buildings to adopt intelligent technologies optimising energy use and improve occupant comfort; it also plays a key role in promoting sustainable urban planning (Chatzikonstantinidis et alii, 2024).

- optimisation of energy behaviour; indicators provided by the SRI can help owners and operators in identifying priority intervention areas, planning appropriate strategies, and enabling targeted interventions to improve energy efficiency and reduce consumption (Fokaides, Panteli and Panayidou, 2019).

- promotion of technological innovation; the SRI can act as an accelerator for the adoption of smart technologies in buildings, promoting innovation in the construction and energy sectors; it is relevant its possible integration with Digital Twin and Building Information Modeling (BIM) for building performance simulation, energy efficiency, and occupant comfort (Nguyen and Adhikari, 2022).

Furthermore, some other criticalities emerge:

- complexity; implementing the SRI is complex due to the variety of technologies and systems that have to be considered in the evaluation and the need to standardise measurement and evaluation methods; the latter aspect and the definition of coherent and reliable criteria and parameters represent the most critical challenge to ensure accurate and comparable building assessment (Pan et alii, 2023);

- costs and required resources; assessing the SRI requires financial and human resources connected to training and technical aspects; it also deals

with instrumental considerations related to the acquisition and installation of devices for control and monitoring and subsequent data analysis and interpretation; these costs are now a barrier to the dissemination and adoption of the SRI (Plienaitis et alii, 2023);

- interpretation of results; properly interpreting the results obtained through the SRI is not straightforward; complex data is involved, so it is important to provide clear guidelines and technical support to ensure, at first, a correct interpretation of the indicators and then the appropriate definition of improvement strategies (Piras, Agostinelli and Muzi, 2024).

The challenges relating to standardising, evaluating and communicating the SRI’s results and its integration into building regulations and energy policies are clear. Equally evident are also the challenges related to the implementation of SRI with digital assets and related enabling technologies – including BIM, IoT, and Digital Twin approaches – that allow constant monitoring of the behaviour of buildings in terms of consumption and comfort and more intelligent management of the life cycle of buildings; at the same time they improve the effectiveness of the application of SRI (Cespedes Cubides and Jradi, 2024).

Conclusions and future prospects | The Smart Readiness Indicator represents a pivotal step in promoting building sustainability and transitioning towards a low-carbon economy. However, the scientific literature clearly shows the need to address the challenges and maximise its potential in

achieving decarbonisation and climate neutrality in the built environment (Apanavičienė, Vanagas, and Fokaidis, 2020; Omrany et alii, 2023).

The interaction among SRI, smart building technologies, and Digital Twin approaches represents a key issue that is still unexplored. Despite this, it appears capable of maximising benefits concerning sustainability, efficiency, and occupant comfort within energy transition scenarios (Zhao et alii, 2023; Kineber et alii, 2023).

The SRI evaluates the physical characteristics of buildings, management systems, and existing digital infrastructures, providing an overall picture of their potential for adaptation to smart technologies implementation. These latest are recognised for the capability to simplify building management, reduce energy consumption through advanced energy management systems, and control and monitor building performance through IoT solutions.

Digital Twin approaches, finally, are based on creating digital models of buildings that accurately reflect their physical and functional characteristics: the digital replica integrates data from sensors, IoT devices, and other monitoring systems, allowing the simulation of building behaviour under different conditions and optimising performance through real-time data analysis (UNEP and IEA, 2017; Botin Sanabria et alii, 2021; Aliero et alii, 2022; Piras, Agostinelli and Muzi, 2024; Lauria and Azzalin, 2024).

Integrating SRI, smart building, and Digital Twin technologies allows advanced solutions to achieve higher levels of smartness and compliance with energy efficiency standards. It can support data-driven decision-making processes to enhance operational efficiency, improve the reliability of energy systems (Pan et alii, 2023), optimise resources, and enhance occupant comfort in buildings (Desogus et alii, 2023). The recommendation, already

expressed in European documents, calls for implementing SRI and integrating it into the national policies of Member States; further studies are also required to monitor long-term impacts and adapt the methodology according to the evolution of technologies and the needs of building users.

Notes

1) For more information, see the webpage: research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe_en [Accessed 30 March 2024].

2) For more information, see the webpage: ec.europa.eu/index_en [Accessed 30 March 2024].

3) The definition of smartness is introduced from the work of the Technical Committee CEN/TC 247 of the European Committee for Standardisation, CEN. Reference standards are EN 15232:2008, which presents for the first time a method for classifying the smartness of building automation systems (BACS) and control systems; the standard remains in force until 2017, when it was replaced by EN ISO 52120 in 2022.

4) For more information, see the webpage: ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/smart-readiness-indicator_en [Accessed 30 March 2024].

References

Al Dakheel, J., Del Pero, C., Aste, N. and Leonforte, F. (2020), “Smart buildings features and key performance indicators – A review”, in *Sustainable Cities and Society*, vol. 61, article 102328, pp.1-19 [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scs.2020.102328 [Accessed 30 March 2024].

Aliero, M. S., Asif, M., Ghani, I., Pasha, M. F. and Jeong, S. R. (2022), “Systematic Review Analysis on Smart Building – Challenges and Opportunities”, in *Sustainability*, vol. 14, issue 5, article 3009, pp. 1-28. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su14053009 [Accessed 30 March 2024].

Apanavičienė, R. and Shahrabani, M. M. (2023), “Key Factors Affecting Smart Building Integration into Smart City – Technological Aspects”, in *Smart Cities*, vol. 6, issue 4, article 85, pp. 1832-1857. [Online] Available at: doi.org/10.3390/smartcities6040085 [Accessed 30 March 2024].

Apanavičienė, R., Vanagas, A. and Fokaidis, P. A. (2020), “Smart Building Integration into a Smart City (SBISC) – Development of a New Evaluation Framework”, in *Ener-*

gies, vol. 13, issue 9, article 2190, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en13092190. [Accessed 30 March 2024].

Arteconi, A., Mugnini, A. and Polonara, F. (2019), “Energy flexible buildings – A methodology for rating the flexibility performance of buildings with electric heating and cooling systems”, in *Applied Energy*, vol. 251, article 113387, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113387 [Accessed 30 March 2024].

Banfi, F., Brumana, R., Salvalai, G. and Previtali, M. (2022), “Digital Twin and Cloud BIM-XR Platform Development – From Scan-to-BIM-to-DT Process to a 4D Multi-User Live App to Improve Building Comfort, Efficiency and Costs”, in *Energies*, vol. 15, article 4497, pp. 1-26. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en15124497 [Accessed 30 March 2024].

Benavente-Peces, C. (2019), “On the Energy Efficiency in the Next Generation of Smart Buildings – Supporting Technologies and Techniques”, in *Energies*, vol. 12, issue 22, article 4399, pp. 1-25. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en12224399 [Accessed 30 March 2024].

Böhm, F., Dietz, M., Preindl, T. and Pernul, G. (2021), “Augmented Reality and the Digital Twin – State of the art and perspectives for Cybersecurity”, in *Journal of Cybersecurity and Privacy*, vol. 1, issue 3, article 26, pp. 519-538. [Online] Available at: doi.org/10.3390/jcp1030026 [Accessed 30 March 2024].

Bortolini, R., Rodrigues, R., Alavi, H., Vecchia, L. F. and Forcada, N. (2021), “Digital Twins’ Applications for Building Energy Efficiency – A Review”, in *Energies*, vol. 15, issue 19, article 7002, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en15197002 [Accessed 30 March 2024].

Botin Sanabria, M. D., Mihaita, A., Peimbert Garcia, R. E., Ramirez Moreno, M. A., Ramirez Mendoza, R. A. and Lozoya Santos, J. de J. (2021), “Digital Twin Technology Challenges and Applications – A comprehensive review”, in *Remote Sensing*, vol. 14, issue 6, article 1335, pp. 1-25. [Online] Available at: doi.org/10.3390/rs14061335 [Accessed 30 March 2024].

Canale, L., De Monaco, M., Di Pietra, B., Puglisi, G., Ficco, G., Bertini, I. and Dell’Isola, M. (2021), “Estimating the Smart Readiness Indicator in the Italian residential

building stock in different Scenarios”, in *Energies*, vol. 14, issue 20, article 6442, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en14206442 [Accessed 30 March 2024].

Castro, M. D. F., Mateus, R., Serôdio, F. and Bragança, L. (2015), “Development of benchmarks for operating costs and resources consumption to be used in Healthcare Building Sustainability Assessment Methods”, in *Sustainability*, vol. 7, issue 10, pp. 13222-13248. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su71013222 [Accessed 30 March 2024].

Cespedes Cubides, A. S. and Jradi, M. (2024), “A review of building digital twins to improve energy efficiency in the building operational stage”, in *Energy Informatics*, vol. 7, article 11, pp. 1-31. [Online] Available at: doi.org/10.1186/s42162-024-00313-7 [Accessed 30 March 2024].

Chatzikonstantinidis, K., Giama, E., Fokaidis, P. A. and Papadopoulos, A. M. (2024), “Smart Readiness Indicator (SRI) as a Decision-Making Tool for Low Carbon Buildings”, in *Energies*, vol. 17, issue 6, article 1406, pp. 1-23. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en17061406 [Accessed 30 March 2024].

Corte dei Conti Europea (2020), *Efficienza energetica degli edifici – Permane la necessità di una maggiore attenzione al rapporto costi-benefici*, Relazione speciale 11/2020. [Online] Available at: eca.europa.eu/it/publications?did=53483 [Accessed 30 March 2024].

Dale, K. I., Pope, E. C. D., Hopkinson, A. R., McCaie, T. and Lowe, J. A. (2023), “Environment Aware Digital Twins – Incorporating Weather and Climate Information to Support Risk-Based Decision-Making”, in *Artificial Intelligence for the Earth Systems*, vol. 2, issue 4, pp. 1-6. [Online] Available at: doi.org/10.1175/AIES-D-23-0023.1 [Accessed 30 March 2024].

De Fátima Castro, M., Colclough, S., Machado, B., Andrade, J. and Bragança, L. (2020), “European legislation and incentives programmes for demand Side management”, in *Solar Energy*, vol. 200, pp. 114-124. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.solener.2019.12.004 [Accessed 30 March 2024].

Dell’Isola, M., Ficco, G., Canale, L., Palella, B. I. and Puglisi, G. (2019), “An IoT Integrated Tool to enhance user awareness on energy consumption in Residential Buildings”, in *Atmosphere*, vol. 10, issue 12, article 743, pp. 1-

18. [Online] Available at: doi.org/10.3390/atmos10120743 [Accessed 30 March 2024].

Desogus, G., Frau, C., Quaquero, E. and Rubiu, G. (2023), “From Building Information Model to Digital Twin – A Framework for Building Thermal Comfort Monitoring, Visualizing, and Assessment”, in *Buildings*, vol. 13, issue 8, article 1971, pp. 1-22. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings13081971 [Accessed 30 March 2024].

El jaouhari, A., Arif, J., Samadhiya, A. and Kumar, A. (2023), “Net zero supply chain performance and industry 4.0 technologies – Past review and present introspective analysis for future research directions”, in *Heliyon*, vol. 9, issue 11, article e21525, pp. 1-29. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21525 [Accessed 30 March 2024].

Energy & Strategy Group (2021), *Smart Building Report 2021 – Efficienza energetica e tecnologie digitali per innovare il settore degli edifici*, Politecnico di Milano. [Online] Available at: ecquologia.com/smart-building-report-2021/ [Accessed 30 March 2024].

EPRS – European Parliamentary Research Service (2020), *European Green Deal Investment Plan – Main elements and possible impact of the coronavirus pandemic*. [Online] Available at: europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2020/649371/EPRS_BRI(2020)649371_EN.pdf [Accessed 30 March 2024].

European Commission (2020a), *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – Stepping up Europe’s 2030 climate ambition Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people*, document 52020DC0562, 562 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0562it [Accessed 30 March 2024].

European Commission, (2020b), *Commission Delegated Regulation (EU) 2020/2155 of 14 October 2020 supplementing Directive (EU) 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council by establishing an optional common European Union scheme for rating the smart readiness of buildings*, document 32020R2155, C/2020/6930. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2020/2155/oj [Accessed 30 March 2024].

European Commission, (2020c), *Commission Implementing Regulation (EU) 2020/2156 of 14 October 2020 detailing the technical modalities for the effective implementation of an optional common Union scheme for rating the smart readiness of buildings*, document 32020R2156, C/2020/6929. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2020/2156/oj [Accessed 30 March 2024].

European Commission (2020d), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – A Renovation Wave for Europe – Greening our buildings, creating jobs, improving lives*, document 52020DC0662, 662 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1603122220757&uri=CELEX:52020DC0662 [Accessed 30 March 2024].

European Commission (2019), *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – The European Green Deal*, document 52019DC0640, 640 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN [Accessed 30 March 2024].

European Commission – Directorate-General for Energy, Verbeke, S., Aerts, D., Reynders, G., Ma, Y. and Waide, P. (2020), *Final report on the technical support to the development of a smart readiness indicator for buildings*. [Online] Available at: op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/f9e6d89d-fbb1-11ea-b44f-01aa75ed71a1 [Accessed 30 March 2024].

European Parliament and Council of the European Union (2024), *Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy per-*

formance of buildings (recast), document 32024L1275, PE/102/2023/REV/1. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj?uri=OJ:L_202401275 [Accessed 27 April 2024].

European Parliament and Council of the European Union (2023), *Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on energy efficiency and amending Regulation (EU) 2023/955 (recast)*, document 32023L1791, PE/15/2023/INIT. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/1791/oj [Accessed 30 March 2024].

European Parliament and Council of the European Union (2018), *Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 Amending Directive 2010/31/EU on the Energy Performance of Buildings and Directive 2012/27/EU on Energy Efficiency*, document 32018L0844, PE/4/2018/REV/1. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX:32018L0844 [Accessed 30 March 2024].

European Parliament and Council of the European Union (2012), *Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC*, document 32012L0027. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/eli/dir/2012/27/oj [Accessed 30 March 2024].

European Parliament and Council of the European Union (2002), *Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the Energy Performance of Buildings*, document 32002L0091, no longer in force, date of end of validity 31/01/2012, repealed by Directive 2010/31/EU (recast), document 32010L0031. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/eli/dir/2002/91/oj [Accessed 30 March 2024].

Fokaides, P. A., Apanaviciene, R., Cerneckiene, J., Jurelionis, A., Klumbyte, E., Kriauciuniute-Neklejonoviene, V., Pupeikis, D., Rekus, D., Sadauskiene, J., Seduikyte, L., Stasiulienė, L., Vaiciunas, J., Valancius, R. and Ždankus, T. (2020), “Research challenges and advancements in the field of sustainable energy technologies in the built environment”, in *Sustainability*, vol. 12, issue 20, article 8417, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su12208417 [Accessed 30 March 2024].

Fokaides, P. A., Panteli, C. and Panayidou, A. (2019), “How are the Smart Readiness Indicators expected to affect the energy performance of buildings – First evidence and perspectives”, in *Sustainability*, vol. 12, issue 22, article 9496, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su12229496 [Accessed 30 March 2024].

GABC – Global Alliance for Buildings and Construction, IEA – International Energy Agency and UNEP – United Nations Environment Programme (2019), *2019 Global Status Report for buildings and construction – Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector*. [Online] Available at: iea.org/reports/global-status-report-for-buildings-and-construction-2019 [Accessed 30 March 2024].

Hassebo, A. and Tealab, M. (2023), “Global Models of Smart Cities and potential IoT applications – A Review”, in *IoT*, vol. 4, issue 3, article 17, pp. 366-411. [Online] Available at: doi.org/10.3390/iot4030017 [Accessed 30 March 2024].

Huang, L., Krigsvoll, G., Johansen, F., Liu, Y. and Zhang, X. (2018), “Carbon emission of global construction sector”, in *Renewable and Sustainable Energy*, vol. 81, part 2, pp. 1906-1916. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.001 [Accessed 30 March 2024].

Hussin, J. M., Rahman, I. A. and Memon, A. H. (2013), “The way forward in sustainable construction – Issues and challenges”, in *International Journal of Advances in Applied Sciences (IJAAS)*, vol. 2, issue 1, pp. 15-24. [Online] Available at: ijaas.iaescore.com/index.php/IJAAS/article/view/790 [Accessed 30 March 2024].

IEA – International Energy Agency (2020), *Energy Technology Perspectives 2020*. [Online] Available at: iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020 [Accessed 30 March 2024].

IEA – International Energy Agency (2017), *Digitalization and Energy Report*. [Online] Available at: iea.org/reports/digitalisation-and-energy.pdf [Accessed 30 March 2024].

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2023), *Climate Change 2023 – Synthesis Report – Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Online] Available at: ipcc.ch/report/ar6/syr/ [Accessed 30 March 2024].

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2018), *Global warming of 1.5 °C – An IPCC Special Report*. [Online] Available at: ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_Low_Res.pdf [Accessed 30 March 2024].

Janhunen, E., Pulkka, L., Säynäjoki, A. and Junnila, S. (2019), “Applicability of the Smart Readiness Indicator for Cold Climate Countries”, in *Buildings*, vol. 9, issue 4, article 102, pp. 1-18. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings9040102 [Accessed 30 March 2024].

Khan, M. A., Khan, M. Z., Zaman, K. and Naz, L. (2014), “Global estimates of energy consumption and greenhouse gas emissions”, in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, pp. 336-344. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.091 [Accessed 30 March 2024].

Kineber, A. F., Singh, A. K., Fazeli, A., Mohandes, S. R., Cheung, C., Arashpour, M., Ejuhwo, O. and Zayed, T. (2023), “Modelling the relationship between digital twins implementation barriers and sustainability pillars – Insights from building and construction sector”, in *Sustainable Cities and Society*, vol. 99, article 104930, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scs.2023.104930 [Accessed 30 March 2024].

Lauria, M. and Azzalin, M. (2024), “Digital Twin approach in Buildings – Future challenges via a critical literature review”, in *Buildings*, vol. 14, issue 2, article 376, pp. 1-18. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings14020376 [Accessed 30 March 2024].

Ma, Z., Awan, M. B., Lu, M., Li, S., Aziz, M. S., Zhou, X., Du, H., Sha, X. and Li, Y. (2023), “An overview of emerging and sustainable technologies for increased energy efficiency and carbon emission mitigation in Buildings”, in *Buildings*, vol. 13, issue 10, article 2658, pp. 1-26. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings13102658 [Accessed 30 March 2024].

Mlecnik, E., Parker, J., Ma, Z., Corchero, C., Knotzer, A. and Perneti, R. (2020), “Policy challenges for the development of energy flexibility services”, in *Energy Policy*, vol. 137, article 111147, pp. 1-8. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111147 [Accessed 30 March 2024].

Moseley, P. (2017), “EU Support for Innovation and Market Uptake in Smart Buildings under the Horizon 2020 Framework Programme”, in *Buildings*, vol. 7, issue 4, article 105, pp. 1-24. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings7040105 [Accessed 30 March 2024].

Nguyen, T. D. and Adhikari, S. (2022), “The role of BIM in integrating Digital Twin in Building Construction – A literature review”, in *Sustainability*, vol. 15, issue 13, article 10462, pp. 1-26. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su151310462 [Accessed 30 March 2024].

Omrany, H., Al-Obaidi, K. M., Husain, A. and Ghaffarianhoseini, A. (2023), “Digital twins in the construction industry – A comprehensive review of current implementations, enabling technologies, and future directions”, in *Sustainability*, vol. 15, issue 14, article 10908, pp. 1-26. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su151410908 [Accessed 30 March 2024].

Pan, Y., Zhu, M., Lv, Y., Yang, Y., Liang, Y., Yin, R., Yang, Y., Jia, X., Wang, X., Zeng, F., Huang, S., Hou, D., Xu, L., Yin, R. and Yuan, X. (2023), “Building energy simulation and its application for building performance optimization – A review of methods, tools, and case studies”, in *Advances in Applied Energy*, vol. 10, article 100135, pp. 1-24. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.adapen.2023.100135 [Accessed 30 March 2024].

Piras, G., Agostinelli, S. and Muzi, F. (2024), “Digital

Twin Framework for Built Environment – A review of Key Enablers”, in *Energies*, vol. 17, issue 2, article 436, pp. 1-27. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en17020436 [Accessed 10 February 2024]

Plienaitis, G., Daukšys, M., Demetriou, E., Ioannou, B., Fokaides, P. A. and Seduikyte, L. (2023), “Evaluation of the Smart Readiness Indicator for Educational Buildings”, in *Buildings*, vol. 13, issue 4, article 888, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings13040888 [Accessed 30 March 2024].

Ravikumar, D., Keoleian, G. A., Walzberg, J., Heath, G. and Heller, M. C. (2024), “Advancing environmental assessment of the circular economy – Challenges and opportunities”, in *Resources, Conservation and Recycling Advances*, vol. 21, article 200203, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rcradv.2024.200203 [Accessed 30 March 2024].

Rodrigo, M. N. N., Perera, S., Senaratne, S. and Jin, X. (2020), “Potential application of blockchain technology for embodied carbon estimating in construction supply chains”, in *Buildings*, vol. 10, issue 8, article 140, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings10080140 [Accessed 30 March 2024].

Silva, B. V., Holm-Nielsen, J. B., Sadrizadeh, S., Teles, M. P. R., Kiani-Moghaddam, M. and Arabkoohsar, A. (2023), “Sustainable, green, or smart? Pathways for energy-efficient healthcare buildings”, in *Sustainable Cities and Society*, vol. 100, article 105013, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scs.2023.105013 [Accessed 30 March 2024].

Sovacool, B. K. and Furszyfer Del Rio, D. D. (2020), “Smart home technologies in Europe – A critical review of concepts, benefits, risks and policies”, in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 120, article 109663, pp. 1-44. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rser.2019.109663 [Accessed 30 March 2024]

UN – General Assembly (2015), *Transforming our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development*, document A/RES/70/1. [Online] Available at: sdgs.un.org/2030agenda [Accessed 30 March 2024].

UNEP – United Nations Environment Programme (2016), *2016 Annual Report – Empowering People to Protect the Planet*. [Online] Available at: wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/19529/UN%20Environment%202016%20Annual%20Report.pdf?sequence=1&isAllowed=y [Accessed 30 March 2024].

UNEP – United Nations Environment Programme and IEA – International Energy Agency (2017), *Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector – Global Status Report*. [Online] Available at: globalabc.org/sites/default/files/2020-09/2017%20Global-ABC%20GSR%20.pdf [Accessed 30 March 2024].

UNI EN 15232-1:2017, *Energy performance of buildings – Part 1 – Impact of Building Automation, Controls and Building Management – Modules M10-4,5,6,7,8,9,10*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-en-15232-1-2017 [Accessed 30 March 2024].

UNI EN ISO 52120-1:2022, *Energy performance of buildings – Contribution of building automation, controls and building management – Part 1 – General framework and procedures*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-en-iso-52120-1-2022 [Accessed 30 March 2024].

Verbeke, S., Ma, Y., Van Tichelen, P., Bogaert, S., Waide, P., Uslar, M., Schulte, J., Bettgenhäuser, K., Ashok, J., Hermelink, A., Offermann, M. and Groezinger, J. (2018), *Support for Setting up a Smart Readiness Indicator for Buildings and Related Impact Assessment*, Second Progress Report – Study accomplished under the Authority of the European Commission DG Energy – 2017/SEB/R/1610684. [Online] Available at: beama.org.uk/static/93c20364-5056-4563-bda836993213f76a/Smart-Readiness-Indicator-Second-Progress-report.pdf [Accessed 30 March 2024].

Vigna, I., Perneti, R., Pernigotto, G. and Gasparella, A. (2020), “Analysis of the Building Smart Readiness Indicator Calculation – A comparative case-study with two Panels of Experts”, in *Energies*, vol. 13, issue 11, article 2796, pp. 1-18. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en13112796

[Accessed 30 March 2024].

WEF – World Economic Forum (2016), *Shaping the Future of Construction – A Breakthrough in Mindset and Technology*. [Online] Available at: weforum.org/publications/shaping-the-future-of-construction-a-breakthrough-in-mindset-and-technology/ [Accessed 30 March 2024].

WHO – World Health Organization and IPCS – International Programme on Chemical Safety (2021), *WHO human health risk assessment toolkit – Chemical Hazards – Second edition*, IPCS harmonization project document, no. 8, Geneva. [Online] Available at: who.int/publications/i/item/9789240035720 [Accessed 30 March 2024].

Xu, S., Wang, J., Liu, Y. and Yu, F. (2023), “Application of emerging technologies to improve construction performance”, in *Buildings*, vol. 13, issue 5, article 1147, pp. 1-4. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings13051147 [Accessed 30 March 2024].

Yan, K., Zhou, X. and Yang, B. (2023), “Editorial – AI and IoT applications of smart buildings and smart environment design, construction and maintenance”, in *Building and Environment*, vol. 229, article 109968, pp. 1-5. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109968 [Accessed 30 March 2024]

Yitmen, I., Alizadehsalehi, S., Akiner, I. and Akiner, M. E. (2021), “An adapted model of cognitive digital twins for building lifecycle Management”, in *Applied Sciences*, vol. 11, issue 9, article 4276, pp. 1-22. [Online] Available at: doi.org/10.3390/app11094276 [Accessed 30 March 2024].

Zangheri, P. and Castellazzi, L. (2016), “Towards Nearly Zero Energy Buildings in Europe – A Focus on Retrofit in Non-Residential Buildings”, in *Energies*, vol. 10, issue 1, article 117, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en10010117 [Accessed 30 March 2024].

Zhao, N., Zhang, H., Yang, X., Yan, J. and You, F. (2023), “Emerging information and communication technologies for smart energy systems and renewable transition”, in *Advances in Applied Energy*, vol. 9, article 100125, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.adapen.2023.100125 [Accessed 30 March 2024].