

ARTICLE INFO

Received 10 March 2026
Revised 13 April 2026
Accepted 15 April 2026
Published 30 June 2026

TRANSIZIONI INTERCONNESSE PER LA SOSTENIBILITÀ INDUSTRIALE

Strumenti digitali, efficienza energetica e circolarità

INTERCONNECTED TRANSITIONS FOR INDUSTRIAL SUSTAINABILITY

Digital tools, energy efficiency, and circularity

Giuseppe Losco, Chiara Pasqualini, Mohammadjavad Khodaparast

ABSTRACT

Il percorso verso modelli industriali sostenibili si fonda sulle sinergie tra le tre transizioni circolare, energetica e digitale. In tale ottica il contributo propone un framework metodologico per la valutazione congiunta delle performance energetiche e di circolarità delle imprese del settore industriale, integrando la diagnosi energetica della serie EN 16247 e la metodologia di misurazione della circolarità definita dalla UNI/TS 11820:2022. Viene adottato un approccio guidato dai dati e basato su sistemi digitali di monitoraggio dei vettori energetici, strumenti di analisi dei dati e modelli di simulazione energetica dinamica. Il framework è applicato al caso studio di uno stabilimento di una grande azienda agroalimentare e i risultati evidenziano come interventi di efficientamento energetico e autoproduzione da fonti rinnovabili producano effetti positivi sia sulle prestazioni energetiche sia sugli indicatori di circolarità.

The path towards sustainable industrial models is based on the synergies between the circular, energy, and digital transitions. In this light, this paper proposes a methodological framework for the joint assessment of energy performance and corporate circularity in the industrial sector, integrating the energy audit set out in the EN 16247 series with the circularity measurement methodology defined by UNI/TS 11820:2022. A data-driven approach is adopted, based on digital monitoring systems for energy carriers, data analysis tools, and dynamic energy simulation models. The framework is applied to a case study of a plant operated by a large agri-food company; the results highlight how energy efficiency measures and self-generation from renewable sources improve both energy performance and circularity indicators.

KEYWORDS

economia circolare, diagnosi energetica, gemello digitale per il settore industriale, simulazione energetica dinamica, decarbonizzazione industriale

circular economy, energy audit, digital twin in the industrial sector, dynamic energy simulation, industrial decarbonisation

Giuseppe Losco, Architect and PhD, is a Full Professor of Industrial Design at the School of Architecture and Design, University of Camerino (Italy). His research focuses on experimental design for new models of sustainable environmental development and new product concepts, addressing issues related to the qualitative development of the built environment, with particular attention to eco-sustainable and energy-efficient materials, as well as energy-saving techniques and technologies. E-mail: giuseppe.losco@unicam.it

Chiara Pasqualini, Architect and PhD in Innovation Design at the SAAD, University of Camerino (Italy), researches energy efficiency in buildings, energy management, circular and renewable energy strategies for communities, digitalisation through BIM, and energy analysis via building modelling. E-mail: chiara.pasqualini@unicam.it

Mohammadjavad Khodaparast, Architect and PhD in Architecture, Design, and Planning at the University of Camerino (Italy), focuses his research primarily on urban sustainability, materials, urban heat island effects, technological innovation, and environmental design. E-mail: javad.khodaparast@unicam.it



Tra gli obiettivi dell'Agenda 2030 (UN, 2015) per lo sviluppo sostenibile emerge la necessità di trasformare i modelli economici e il settore industriale affinché crescita e sviluppo siano disaccoppiati da uno sfruttamento delle risorse che supera la loro capacità di rigenerazione e che limiti gli impatti ambientali in termini di emissioni e rifiuti (UNEP, 2011). Un tale sforzo innovativo dell'industria incide sull'Obiettivo di Sviluppo Sostenibile (SDG) n. 9 dell'Agenda e si dimostra in sinergia con l'SDG n. 7, poiché promuove l'efficienza energetica e l'utilizzo di fonti rinnovabili, con l'SDG n. 12, per l'approdo a modelli di circolarità e uso efficiente delle risorse, e con l'SDG n. 13, perché orientato alla decarbonizzazione e alla riduzione delle emissioni. Affiorano benefici indiretti e alcuni compromessi con l'SDG n. 10 sulla riduzione delle disuguaglianze, poiché se da un lato la transizione verso modelli di economia circolare stimola la domanda di nuove competenze e la revisione delle filiere di approvvigionamento di materiali ed energia a vantaggio dell'occupazione e delle realtà locali (Losco et alii, 2024), dall'altro la dotazione di tecnologie e di strumenti di controllo e gestione è ancora poco diffusa tra le piccole e medie imprese (PMI; Trevisan et alii, 2023).

In coerenza con tali obiettivi la Commissione Europea ha emanato il Green Deal (European Commission, 2019), finalizzato al raggiungimento della neutralità climatica, in cui transizione circolare, transizione energetica e transizione digitale si configurano come leve fondamentali (Fig. 1). La transizione circolare, orientata alla chiusura dei cicli (EMF, 2013), alla riduzione degli sprechi e alla conservazione del valore di prodotti, componenti e materiali (Paganin et alii, 2024), si integra con la transizione energetica, finalizzata alla decarbonizzazione attraverso l'efficienza energetica e l'affrancamento dalle fonti fossili. Le due traiettorie risultano complementari e spesso sostenute da politiche europee che promuovono azioni con impatti positivi su entrambi i fronti, poiché conducono a una minore dipendenza dalle risorse esterne e a una maggiore resilienza del sistema produttivo, con benefici sul piano ambientale e socioeconomico.

In questo contesto la transizione digitale svolge un ruolo abilitante, fornendo strumenti per il monitoraggio, la raccolta, l'analisi e la condivisione dei dati, nonché per la simulazione di scenari futuri, rendendo possibile il controllo delle performance e il supporto alle decisioni strategiche per la gestione sostenibile delle risorse (Rigillo, Galluccio and Paragliola, 2023). La transizione ecologica e quella digitale sono sempre più affrontate con approcci sistemici e processi di innovazione aperta tra diversi stakeholder (Barbero and Ferrulli, 2023).

L'attenzione dell'industria all'ambiente è stimolata da una crescente consapevolezza dei consumatori, dall'introduzione di obblighi normativi, da sistemi di incentivazione e dall'influenza delle politiche comunitarie sui mercati finanziari (European Commission, 2020).

Emerge pertanto con chiarezza l'utilità di costruire un quadro valutativo organico, capace di considerare simultaneamente indicatori energetici e di circolarità, affinché la pianificazione strategica aziendale degli interventi non si limiti alla riduzione dei consumi, ma si estenda alla quantificazione complessiva e sistemica delle performance ambientali dell'organizzazione. In tale ottica il presente studio apporta un contributo al filone di ricerca che indaga sulla combinazione delle metodologie esi-

stenti in materia ambientale, finalizzate a leggere in modo sistemico gli impatti delle attività antropiche (Sposito and De Giovanni, 2023). L'obiettivo è realizzare un framework integrato, tenendo conto della centralità degli strumenti digitali nella transizione verso un'industria più sostenibile.

In tale ottica il presente contributo presenta alcuni risultati di un progetto di ricerca dottorale PON finanziato dal Ministero con risorse FSE REACT-EU su tematiche dell'innovazione, durato tre anni dal 2022 al 2024 e affiancato da una grande azienda multinazionale del settore agroalimentare, che ha avuto un ruolo di supporto per la condivisione dei dati e la redazione di diagnosi energetiche. L'originalità della ricerca risiede nel superamento dell'attuale frammentazione tra gli strumenti di diagnosi energetica e di misurazione della circolarità, attraverso l'integrazione metodologica degli standard UNI CEI EN 16247-1:2022 e UNI/TS 11820:2022 (UNI, 2022a, 2022b), supportata da strumenti digitali e simulativi e nella definizione di un quadro sinottico degli indicatori chiave di prestazione capaci di esplicitare le interdipendenze tra transizione energetica e circolare.

Il contributo è rilevante da un punto di vista scientifico perché ottimizza e sistematizza il corredo di indicatori e metodologie a disposizione delle aziende, sperimenta i benefici dell'apporto di strumenti digitali avanzati e, dimostrando gli esiti positivi con l'applicazione sul caso studio di una Grande Impresa, può ispirare le politiche di incentivazione per la replicazione anche nelle PMI, contribuendo ulteriormente all'obiettivo di ridurre le disuguaglianze. Il paper si articola in una prima parte che introduce strategie e strumenti esistenti per la triplice transizione dell'industria, una seconda sezione che argomenta la metodologia adottata per la realizzazione del framework integrato di valutazione, una terza focalizzata sull'applicazione al caso studio, una quarta che riporta una discussione sugli strumenti digitali a supporto della metodologia e una sezione conclusiva che individua limiti e sviluppi futuri.

Strumenti per il controllo delle strategie integrate di decarbonizzazione delle aziende

La letteratura evidenzia che il raggiungimento dei target di decarbonizzazione industriale richiede l'adozione di strategie integrate, con particolare riferimento all'efficienza energetica, all'autoproduzione da fonti rinnovabili (per la maggior parte con sistemi fotovoltaici), alle pratiche di economia circolare e alle soluzioni digitali (The European House Ambrosetti, 2023; Fig. 2). Anche le analisi relative al settore agroalimentare confermano che la combinazione di interventi su approvvigionamento energetico, recupero di calore, innovazione tecnologica, elettrificazione e tecnologie digitali 4.0 produce risparmi energetici e riduzioni emissive più consistenti rispetto ad azioni isolate (Bazzocchi et alii, 2023; Realini et alii, 2017; Gobbi et alii, 2021).

Strumenti e metodologie, riferiti a specifici standard normativi, sono a disposizione delle imprese industriali nella duplice traiettoria di transizione circolare ed energetica e consentono valutazioni efficaci, ma operano in modo parallelo, pur dimostrando un rapporto di complementarità perché basati su un set di dati in parte comune, da cui ricavano i rispettivi KPI d'interesse: la UNI/TS 11820:2022 'Misurazione della circolarità – Metodi ed indicatori per la misurazione dei processi circolari nel-

le organizzazioni' (UNI, 2022b), in riferimento alla transizione circolare, e la diagnosi energetica disciplinata dal D.Lgs. 102/2014 (Presidente della Repubblica Italiana, 2014) e dalle norme della serie UNI CEI EN 16247:2022 (UNI, 2022a), funzionale alla transizione energetica e obbligatoria nei casi previsti dalla legge.

Tali metodologie, pur nate in ambiti distinti, possono convergere nella costruzione di un sistema integrato di misurazione delle performance energetico-ambientali delle aziende, che necessita di fondarsi su strumenti digitali avanzati capaci di effettuare operazioni accurate di raccolta dei dati su consumi, approvvigionamenti, autoproduzione energetica e produzione della fabbrica, di monitoraggio e, soprattutto, di analisi ed elaborazione. La normativa sulle diagnosi energetiche definisce infatti anche i criteri del monitoraggio, aspetto però non affrontato dalla UNI/TS 11820:2022 (Ministero dello Sviluppo Economico, 2016).

La UNI/TS 11820:2022 definisce un quadro metodologico per la misurazione della circolarità ispirato ai principi del Life Cycle Thinking. È applicabile alle aziende di prodotto, di servizio o miste ed è indipendente dai benchmark settoriali. In coerenza con i principi delle serie ISO 59000:2024 (ISO, 2024) e ISO 14067:2018 (ISO, 2018), essa integra le dimensioni ambientali, sociali ed economiche. Il sistema prevede indicatori suddivisi in sei ambiti, tra cui quello delle risorse energetiche e idriche, oggetto di interesse del presente studio.

Gli indicatori sono classificati in 'core', specifici e premianti, e si basano su KPI che includono, ad esempio, la quota di materie prime rinnovabili sul totale in ingresso, la percentuale di acqua recuperata sul fabbisogno, la frazione di rifiuti differenziati, l'energia elettrica e termica autoprodotta, la carbon footprint del prodotto ed elementi di simbiosi industriale. Il livello di circolarità è un valore percentuale calcolato come media ponderata degli indicatori applicabili all'azienda. Il calcolo può essere disaggregato per categoria, favorendo analisi mirate e rappresentazioni radar. La metodologia richiede preliminarmente la definizione del perimetro di valutazione e la verifica della qualità dei dati in termini di accuratezza, rappresentatività e riproducibilità.

La diagnosi energetica costituisce lo strumento cardine della transizione energetica. Introdotta dalla Direttiva 2012/27/UE (European Parliament and the Council of the European Union, 2012) e recepita dal citato D.Lgs. 102/2014, essa richiede un'analisi sistematica dei flussi energetici, l'individuazione delle inefficienze e la proposta di interventi tecnicamente ed economicamente sostenibili. La metodologia, conforme alla serie UNI CEI EN 16247:2022 (UNI, 2022a), prevede la clusterizzazione delle aziende multisito, la costruzione di uno schema energetico multilivello, la compilazione di una descrizione puntuale degli impianti presenti e delle loro caratteristiche tecniche, la modellazione dei vettori energetici al fine di individuare le aree prioritarie di intervento e il calcolo degli Indicatori di Prestazione Energetica.

I KPI principali sono gli Indici di Prestazione Energetica Generali (Ipg) e Specifici (Ips), espressi come consumi rispetto agli energy driver, quali ad esempio il rapporto tra le tonnellate equivalenti di petrolio (tep) riferito a un certo vettore energetico e le tonnellate di prodotto finito (Fig. 3). Viene inoltre richiesto di individuare gli interventi di efficientamento da effettuare nell'arco di un triennio, individuando

do gli indicatori economico-finanziari quali il tempo di ritorno dell'investimento, il VAN (Valore Attuale Netto) e TIR (Tasso Interno di Rendimento); inoltre viene richiesto di rendicontare i risultati in termini di risparmio energetico e di costi relativamente alle azioni dichiarate in precedenza e implementate (ENEA, 2021).

I sistemi digitali di monitoraggio rappresentano l'infrastruttura abilitante della transizione digitale e il presupposto per l'affidabilità delle valutazioni delle altre transizioni. Indicatori come lo Smart Readiness Indicator consentono inoltre di valutare il grado di integrazione delle tecnologie digitali negli edifici e il loro contributo alla transizione energetica (Az-zalin, 2024), costituendo un supporto strategico allo sviluppo di policy ambientali (Lauria et alii, 2025).

Le Linee Guida ENEA richiedono Piani di monitoraggio permanenti per tutti i vettori energetici utilizzati in azienda e misurazioni capillari delle attività principali e dei servizi ausiliari e generali, con una copertura proporzionata ai consumi di ciascuna area funzionale. Può essere efficace l'adozione di architetture multilivello con 'smart meter' che utilizzano protocolli industriali, quali Profibus e Profinet, comunicanti con sistemi di Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA) che consentono l'analisi in tempo reale dei fattori di potenza e dei profili di carico degli impianti, nonché dei superamenti di soglia, e permettono l'archiviazione dei dati con dettaglio anche a livello quartorario. Le possibilità offerte da questi sistemi sono notevoli ai fini gestionali e per gli audit energetici (Fig. 4). Un livello ancora più raffinato di controllo digitale degli

asset e dei vettori energetici in tempo reale è costituito dalle piattaforme per il Facility Management BIM-oriented che rendono disponibili in un unico ambiente condiviso tutte le informazioni utili, integrando i diversi sistemi presenti in fabbrica e superandone la gestione 'a silos' separati, in coerenza con il paradigma dell'Industria 4.0, fondato su interconnessione, virtualizzazione e gestione dei processi guidata dai dati (Ministero dello Sviluppo Economico, 2017). Si tratta di piattaforme collaborative che raccolgono dati provenienti da sensori, sistemi SCADA, ERP e MES, quali i flussi energetici, i flussi produttivi, le caratteristiche e lo stato manutentivo degli impianti presenti, nonché gli interventi programmati e svolti, realizzando una federazione di database aggiornati a supporto degli stakeholder operativi e manageriali.

L'integrazione con un modello BIM consente di associare le informazioni agli oggetti virtuali visualizzabili, mentre l'informazione geometrica degli spazi facilita le operazioni di misura nella progettazione di nuovi interventi (Russo Ermolli, 2019). Un tale sistema avanzato di controllo e gestione viene definito 'gemello digitale', e si configura come un modello cyber-fisico della fabbrica dotato di un apparato informativo strutturato e costantemente aggiornato (Green Building Council Italia, 2024; Fig. 5). Si specifica che un'altra parte della letteratura individua con il nome di 'gemello digitale' i modelli geometrici semplificati utilizzati per eseguire simulazioni energetiche dinamiche, poiché sono capaci di connettersi ai sensori e ai sistemi di monitoraggio energetico e ambientale degli spazi fisici

cui si riferiscono e, opportunamente calibrati, dimostrano un comportamento energetico coerente con quello dell'edificio reale (Fig. 6).

Nel loro insieme questi strumenti dal forte potenziale sinergico, configurano un sistema che, opportunamente integrato, è capace di misurare in modo oggettivo il grado di maturità di un'organizzazione industriale rispetto alle sfide ambientali, fornendo basi quantitative per il miglioramento continuo e per la rendicontazione ESG. Alla luce delle potenzialità integrative offerte da tali strumenti, il contributo presenta un framework per la realizzazione di un tool avanzato di controllo delle prestazioni energetico-ambientali, a supporto di processi decisionali aziendali complessi e consapevoli, capace di mettere in relazione le performance energetiche e di circolarità, di individuare KPI coerenti, di superare gli approcci settorializzati e di consentire una valutazione sistemica delle interdipendenze tra le due transizioni.

Parte della letteratura affronta il tema della valutazione integrata tra transizione energetica e circolare per gli edifici industriali sotto il profilo del recupero edilizio, utilizzando gli indicatori energetici della UNI/TS 11820:2022 (UNI, 2022b) e citando il digitale come sistema di tracciamento dei flussi materici nell'attività edilizia (Baiani et alii, 2024). Altri autori si sono concentrati sulla realizzazione di gemelli digitali per la realizzazione di percorsi di decarbonizzazione sia alla scala dell'edificio che alla scala del distretto urbano (Longo and Roversi, 2025); altri ancora ne hanno esaminato le applicazioni ai fini dell'efficienza energetica (Ba et alii, 2025), senza introdurre alcun focus sul piano della circolarità. Il presente studio supera l'approccio settoriale dello stato dell'arte e fornisce supporto alla gestione operativa della fabbrica.

Metodologia per la valutazione delle sinergie attraverso il supporto del digitale | La metodologia elaborata per la valutazione combinata delle prestazioni di efficienza energetica e di circolarità e il relativo andamento nel tempo si fonda su un approccio guidato dai dati assicurato da strumenti digitali di diversa tipologia: 1) un sistema di monitoraggio e raccolta dati sui vettori energetici in campo a diversi livelli di dettaglio, dalle utenze finali ai contatori generali dell'energia entrante in stabilimento; 2) un software di analisi ed elaborazione dei dati raccolti; 3) un software di simulazione energetica dinamica per la modellazione della fabbrica e la quantificazione dei fabbisogni energetici e delle relative emissioni climateranti conseguenti a ipotetici interventi futuri. Di seguito è riportata la metodologia di valutazione adottata. Le prime tre fasi sono state ripetute in due annualità diverse, al fine di effettuare analisi comparative a partire dalla quarta fase.

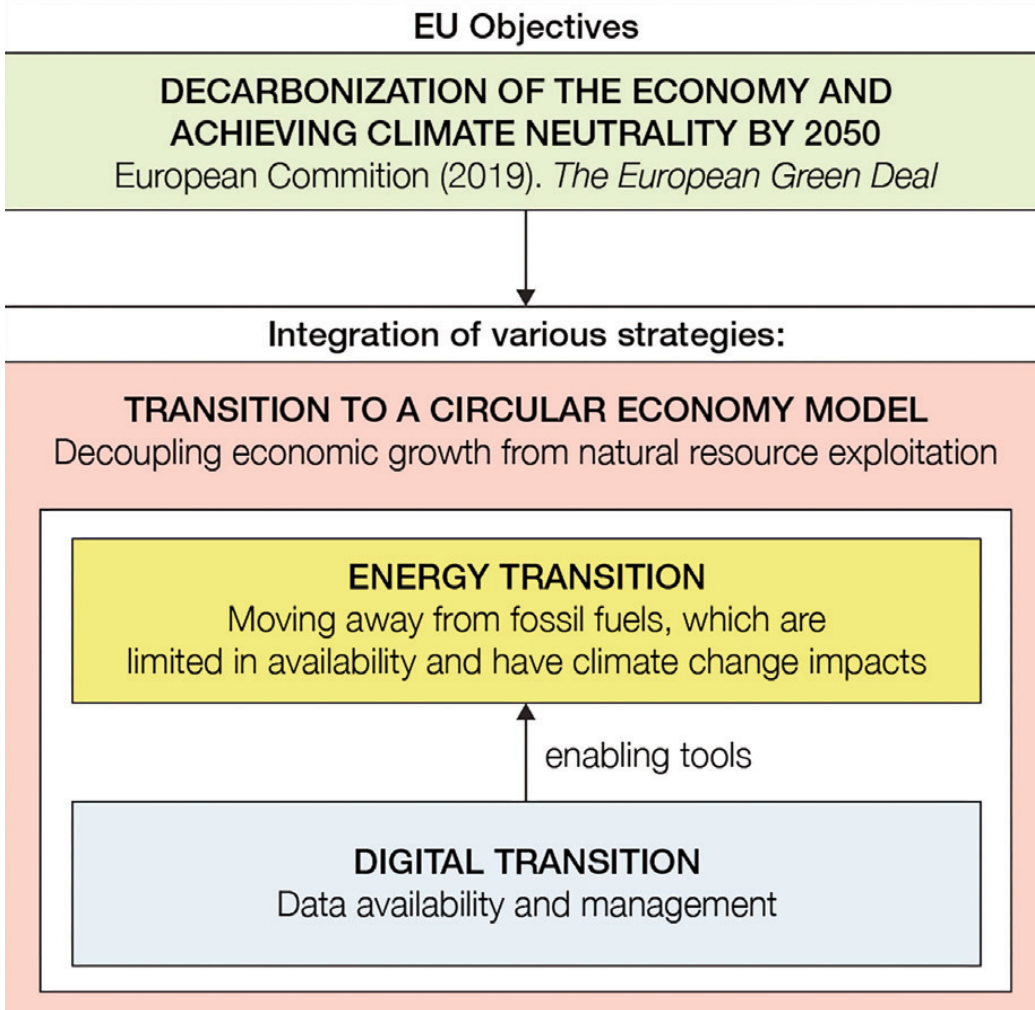


Fig. 1 | Conceptual diagram illustrating the synergies between the circular transition, the energy transition and the digital transition (credit: the Authors, 2025).

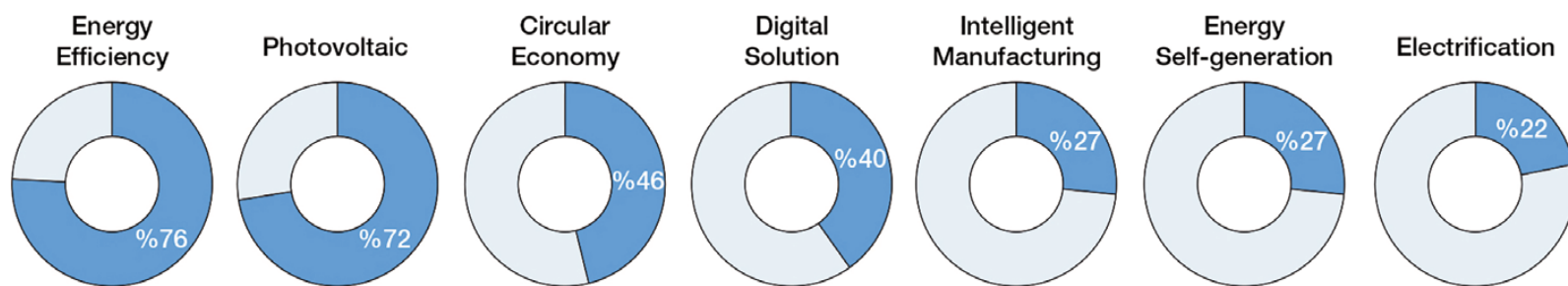


Fig. 2 | Level of awareness among businesses regarding decarbonisation strategies and the energy solutions required to enable them (source: The European House Ambrosetti, 2023).

La prima fase prevede la ricognizione dei dati da raccogliere sui vettori energetici, come previsto dalla normativa sulle diagnosi energetiche, e la loro estrazione dai sistemi digitali di monitoraggio in campo, ai diversi livelli di dettaglio definiti dalla UNI CEI EN 16247:2022 (UNI, 2022a), relativi alla struttura energetica aziendale (ENEA, 2021). Ai fini della replicabilità della metodologia è necessario individuare il confine del sistema, corrispondente al perimetro intero dello stabilimento; i dati da raccogliere per le elaborazioni delle fasi successive riguardano i consumi orari elettrici e termici delle singole linee di produzione, degli impianti appartenenti alla categoria dei servizi ausiliari e di quelli appartenenti ai servizi generali; vanno raccolti anche i dati sull'eventuale autoproduzione energetica e sulla produzione dei beni relativi all'attività aziendale.

La seconda fase prevede la redazione della diagnosi energetica, tramite l'utilizzo di software di analisi per l'aggregazione dei dati e l'individuazione degli indicatori di prestazione, la verifica rispetto ai benchmark indicati dalle Best Available Techniques (Giner Santonja et al., 2019), l'elaborazione del modello energetico (termico ed elettrico); vanno effettuati anche l'inventario e la descrizione delle caratteristiche tecniche degli impianti, utili nella fase di modellazione e di simulazione energetica dinamica.

È importante quantificare, per ogni vettore energetico, l'energia acquistata da fonti rinnovabili e da fonti fossili, l'eventuale quota acquistata e utilizzata per la trasformazione interna (ad esempio nel caso di cogenerazione), l'energia autoprodotta, la quota autoprodotta consumata internamente (al netto delle eventuali esportazioni) e l'energia consumata rilevata dai contatori "intelligenti" che, a un livello di aggregazione più alto, deve essere coerente con le letture dei contatori generali. In questa fase si elabora il calcolo dell'efficienza energetica, basato sul KPI relativo al rapporto tra i consumi espressi in tep (tonnellate equivalenti di petrolio) e le tonnellate di prodotto finito. Si specifica che i tep vengono ricavati dalle unità di misura dei vettori energetici, mediante appositi fattori di conversione riportati in letteratura (ENEA, 2021).

La terza fase prevede l'utilizzo dei dati quantitativi, ottenuti con la metodologia di diagnosi energetica, per il calcolo del livello di circolarità dell'azienda, relativo agli indicatori connessi alle risorse energetiche e idriche, secondo la UNI/TS 11820:2022 (UNI, 2022b). Gli indicatori di prestazione richiesti riguardano le strategie di approvvigionamento energetico: autoproduzione, recupero energetico e acquisto da fonti rinnovabili. In particolare vanno calcolati il rapporto tra l'energia elettrica e termica autoprodotta da fonti rinnovabili e/o da processi di recupero rispetto al totale consumato e il rapporto tra l'energia elettrica e termica acquistata

da fonti rinnovabili rispetto al totale acquistato. Il livello di circolarità si basa sulla combinazione degli indicatori chiave di prestazione ed è espresso in percentuale (Fig. 7).

La quarta fase si caratterizza per il trasferimento e la lettura dei risultati ottenuti nelle due annualità in una tavola sinottica che, illustrando i risultati delle strategie energetiche, consente di apprezzarne l'andamento nel tempo e di valutare le interconnessioni tra la transizione energetica e circolare, osservando come l'integrazione degli interventi di efficientamento e di approvvigionamento incida sul livello di circolarità.

La quinta fase prevede l'utilizzo di software di simulazione energetica dinamica e la realizzazione di un modello della fabbrica calibrato sui dati energetici orari reali monitorati e raccolti, ai fini della valutazione degli interventi migliorativi. Tale fase è possibile realizzarla previa disponibilità delle informazioni sulle caratteristiche geometriche e costruttive dell'edificio, del layout e delle caratteristiche tecniche degli impianti, riportate nel report di diagnosi energetica (sui dati reali sui consumi energetici raccolti in campo dal sistema di monitoraggio e su file climatici accurati e adeguati).

La sesta fase consiste nell'importare i risultati della simulazione energetica nella tavola sinottica, per valutare i benefici degli interventi ipotizzati su entrambi i fronti della transizione energetica e della transizione circolare.

Il caso di studio di una grande azienda multinazionale del settore agroalimentare | Il caso di studio riguarda uno stabilimento di una grande azienda multisito del settore agroalimentare, dotata di un sistema di monitoraggio robusto che raggiunge il dettaglio quartorario.

I vettori energetici utilizzati sono l'elettricità, che l'azienda acquista per la copertura totale dei fabbisogni attraverso contratti di fornitura con certificazione di Garanzia di Origine da fonti rinnovabili, in particolare quella idroelettrica, e il gas naturale. Non sono ancora stati installati impianti di autoproduzione. Il sistema di monitoraggio è stato oggetto di un recente aggiornamento ed è molto accurato, raggiungendo il livello delle utenze finali e consentendo l'aggregazione dei dati a livello di aree funzionali (linee di produzione, centrale termica, centrale frigorifera, centrale per l'aria compressa, sistema di climatizzazione, magazzino delle materie prime, magazzini dei prodotti finiti e uffici) e di macrocategorie (attività principali, servizi ausiliari e servizi generali).

I dati raccolti hanno riguardato sia i consumi elettrici sia quelli termici; dal software sono stati estratti i quantitativi mensili, effettuando controlli di verifica incrociati con le letture dei contatori in loco

e con le bollette. Per alcuni giorni particolari è stato estratto il dettaglio orario, al fine di effettuare successivamente le simulazioni energetiche; inoltre sono stati raccolti, tramite altri software di controllo aziendale della produzione, i dati sui prodotti realizzati, basati su intervalli temporali coerenti con i dati energetici.

È stata condotta una diagnosi energetica completa, inviata in seguito ad ENEA attraverso il portale dedicato, compilando un apposito file di riepilogo in cui sono stati riportati per l'intera annualità i dati dei diversi vettori energetici: 1) i consumi in kWh elettrici e Smc di gas di tutte le aree funzionali e i corrispondenti valori in tep, ricavati con gli appositi fattori di conversione; 2) gli acquisti di energia in kWh elettrici e Smc di gas e i corrispondenti valori in tep; 3) le tonnellate di prodotti realizzati. Non è stata compilata la parte relativa all'autoproduzione, poiché non esistente; gli indicatori delle prestazioni energetiche sono stati espressi in tep/ton (Fig. 8) e nella sezione relativa alla rendicontazione degli interventi di efficientamento energetico svolti sono stati riportati i valori del recupero di energia termica e del risparmio elettrico.

Utilizzando i dati energetici ricavati con la diagnosi sono stati calcolati gli indicatori di circolarità e il livello complessivo dell'azienda, seguendo la metodologia della UNI/TS 11820:2022 (Fig. 9). Avendo a disposizione anche i dati delle precedenti diagnosi energetiche è stato elaborato il quadro sinottico comparativo degli andamenti delle strategie integrate di decarbonizzazione, in particolare delle categorie dell'autoproduzione energetica, dell'efficientamento energetico e delle soluzioni di economia circolare, riportate dalla letteratura (The European House Ambrosetti, 2023).

In seguito si è utilizzato un software di modellazione energetica per la valutazione di due interventi: l'efficientamento energetico del sistema di climatizzazione nell'area della fabbrica relativa al confezionamento e l'autoproduzione di energia elettrica tramite un impianto fotovoltaico (Fig. 10). Ai fini della corretta modellazione sono state utilizzate le informazioni sugli impianti raccolte attraverso l'audit di diagnosi energetica, mentre per la calibrazione sono stati presi in esame i profili orari dei consumi reali in alcune giornate d'interesse, oltre ai dati aggregati a livello mensile. È quindi realizzata la simulazione energetica del modello ex ante sulle ipotesi di intervento, per verificare la calibrazione attraverso un processo iterativo di comparazione dei risultati con i dati reali (CIBSE, 2020), ed ex post (Figg. 11-14; Tab. 1). I dati sui consumi e sull'autoproduzione energetica simulati sono stati successivamente sottoposti alle stesse procedure di trasformazione in KPI e riportati nel quadro sinottico per la valutazione comparativa con lo stato

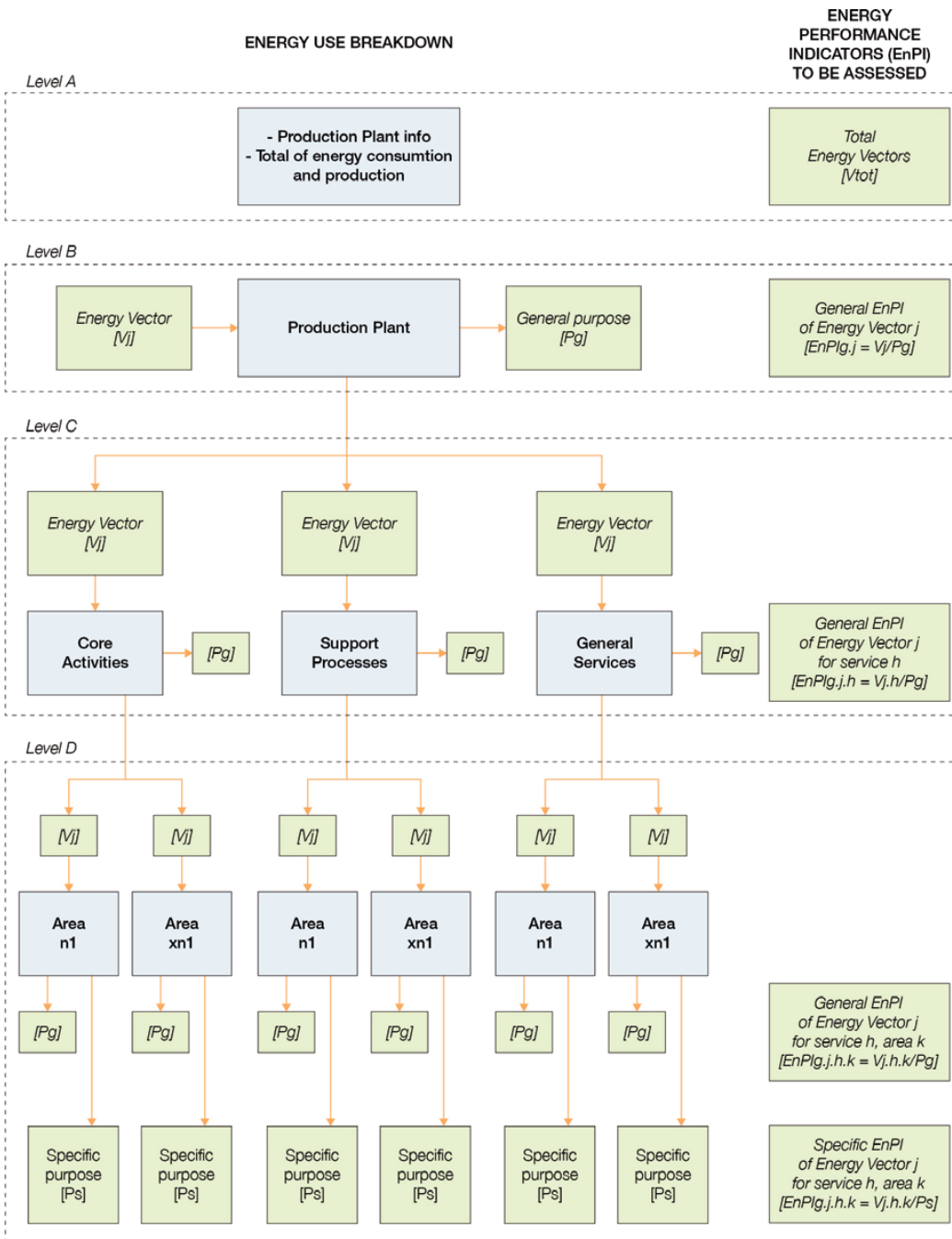


Fig. 3 | Diagram of the corporate energy structure, consumption analysis levels and performance indices to be assessed in accordance with Standard EN 16247 (source: ENEA, 2021).

dell'arte registrato in precedenza (Tab. 2). I risultati dimostrano che la combinazione dei due interventi di transizione energetica ipotizzati, efficientamento e autoproduzione, ha implicazioni dirette anche sulle performance di circolarità.

Il gemello digitale della fabbrica per il miglioramento delle prestazioni energetiche e di circolarità in Azienda | La diagnosi energetica, oltre a rappresentare un adempimento normativo, può essere concepita come dispositivo conoscitivo propedeutico alla valutazione della circolarità aziendale, in quanto implica la raccolta e la strutturazione sistematiche dei dati relativi ai consumi energetici, ai flussi di approvvigionamento e ai sistemi di autoproduzione. L'analisi dei vettori energetici in ingresso e delle modalità di utilizzo nei processi costituisce una base informativa essenziale per la definizione delle strategie circolari di ottimizzazione delle risorse e di riduzione degli impatti ambientali. Gli strumenti digitali a disposizione svolgono un efficace lavoro di monitoraggio puntuale e affidabile.

Tuttavia l'attuale workflow di redazione delle diagnosi evidenzia significative criticità poiché basato sullo scambio manuale di file 'agnostici', statici e non interconnessi, custoditi in sistemi eterogenei e trasmessi tra gli addetti tramite corrispondenza elettronica. Tale frammentazione comporta ridondanze, rischio di errore umano, assenza di aggiornamento in tempo reale e mancata interoperabilità tra sistemi IT e OT, rendendo il processo prevalentemente compilativo e poco integrato nella routine operativa quotidiana.

Il gemello digitale della fabbrica si configura dunque come strumento abilitante per l'evoluzione metodologica della diagnosi energetica, poiché può rendere la raccolta dei dati attività tutt'altro che straordinaria e discontinua. Sviluppi futuri del gemello digitale dovrebbero prevedere un'apposita sezione che organizza le informazioni già presenti nei database federati, agevolandone la lettura a vantaggio degli audit. Allo stesso modo, attraverso apposite interfacce, il gemello digitale può fornire i quadri sinottici per il controllo integrato delle tran-

sazioni energetica e circolare, previa selezione di KPI coerenti con le prescrizioni normative della diagnosi energetica e della UNI/TS 11820:2022 (UNI, 2022b), come dimostrato dalla metodologia adottata nel presente studio. Indicatori quali i consumi specifici per unità di prodotto, la quota di energia autoprodotta, i tassi di recupero e di riutilizzo delle risorse possono essere monitorati in tempo reale e riferiti a specifici asset o aree funzionali, consentendo valutazioni comparative in intervalli temporali precisi.

Un ulteriore elemento qualificante, come dimostrato dal caso di studio analizzato, riguarda infine la capacità previsionale. La metodologia della diagnosi energetica richiede l'individuazione e la valutazione economica di interventi futuri; ciò rende strategica la possibilità di simulare scenari di efficientamento, consentendo eventualmente anche l'elaborazione di percorsi di decarbonizzazione, come già avviene alla scala urbana (Longo et alii, 2024). È pertanto necessario superare il dualismo tra i gemelli digitali meramente informativi, orientati al Facility Management, e quelli simulativi, dotati di capacità di analisi energetica.

Il Common Data Environment (CDE) è la piattaforma collaborativa più utilizzata in fase di progettazione; tuttavia negli ultimi anni ha suscitato crescente interesse anche per la sua integrazione nei gemelli digitali orientati al facility management, in quanto in grado di supportare processi e attori lungo l'intero ciclo di vita dell'opera e di contribuire al miglioramento delle prestazioni degli edifici nella fase operativa (D'Amore, 2025). Il CDE dovrebbe mettere a disposizione il modello sempre aggiornato allo stato di fatto, mentre ulteriori sviluppi delle piattaforme dei gemelli digitali dovrebbero curarne l'integrazione con i software di simulazione energetica, sfruttando l'interoperabilità dei modelli BIM, per consentire di elaborare scenari previsionali più raffinati, valutando ex ante gli effetti combinati su consumi, costi, emissioni e potenziali ricadute sulla circolarità dei processi (Fig. 15). In letteratura è dimostrato che i flussi informativi BIM-to-BEM possono supportare i processi decisionali e l'ottimizzazione delle prestazioni energetiche dei sistemi

produttivi (Osello et alii, 2024). In questa prospettiva il gemello digitale aziendale diventerebbe una piattaforma integrata di conoscenza, controllo e simulazione, capace di supportare processi decisionali complessi basati sulla valutazione congiunta delle interdipendenze tra le performance energetiche e quelle circolari, superando definitivamente approcci settorializzati e frammentari.

Conclusioni | Lo studio ha analizzato le possibili sinergie tra le diverse strategie di decarbonizzazione industriale e ha proposto un framework metodologico integrato per la valutazione congiunta delle prestazioni energetiche e di circolarità delle imprese produttive. L'analisi ha evidenziato che gli strumenti e le metodologie già disponibili nel quadro normativo nazionale ed europeo, quali la diagnosi energetica disciplinata dalla serie UNI CEI EN 16247:2022 (UNI, 2022a) e la metodologia di misurazione della circolarità definita dalla UNI/TS 11820:2022 (UNI, 2022b), possono essere utilizzati in modo complementare, valorizzando una base informativa in larga parte comune.

Il contributo principale del presente studio consiste nell'aver strutturato una procedura operativa che consente di mettere in relazione gli indicatori energetici e di circolarità, superando l'approccio tradizionalmente settoriale con cui tali dimensioni vengono analizzate nelle pratiche aziendali. L'integrazione dei dati provenienti dai sistemi di monitoraggio dei consumi e degli approvvigionamenti energetici con le informazioni relative alla produzione consente infatti di costruire un quadro sinot-

tico delle strategie, evidenziandone l'andamento nel tempo e le reciproche interdipendenze.

Il caso studio analizzato, relativo a uno stabilimento di una grande azienda multinazionale del settore agroalimentare, ha dimostrato la fattibilità operativa della metodologia proposta. L'elaborazione della diagnosi energetica, il calcolo degli indicatori di circolarità e la simulazione energetica dinamica degli interventi migliorativi hanno consentito di valutare in modo integrato gli effetti di strategie quali l'efficientamento energetico e l'autoproduzione da fonti rinnovabili. I risultati mostrano che gli interventi finalizzati alla transizione energetica generano benefici misurabili anche in termini di circo-

larità delle risorse, confermando l'esistenza di sinergie rilevanti tra le due traiettorie di transizione.

Un ruolo fondamentale in questo processo è svolto dalle tecnologie digitali: sistemi di monitoraggio avanzati, le piattaforme di gestione dei dati e i gemelli digitali costituiscono infatti l'infrastruttura abilitante per la raccolta, l'integrazione e l'analisi dei dati necessari alla valutazione delle prestazioni ambientali. In prospettiva l'evoluzione dei gemelli digitali verso piattaforme integrate di controllo e simulazione potrà rendere possibile un supporto decisionale sempre più efficace, consentendo di valutare ex ante gli effetti di strategie energetiche e circolari su consumi, emissioni, costi e utilizzo delle

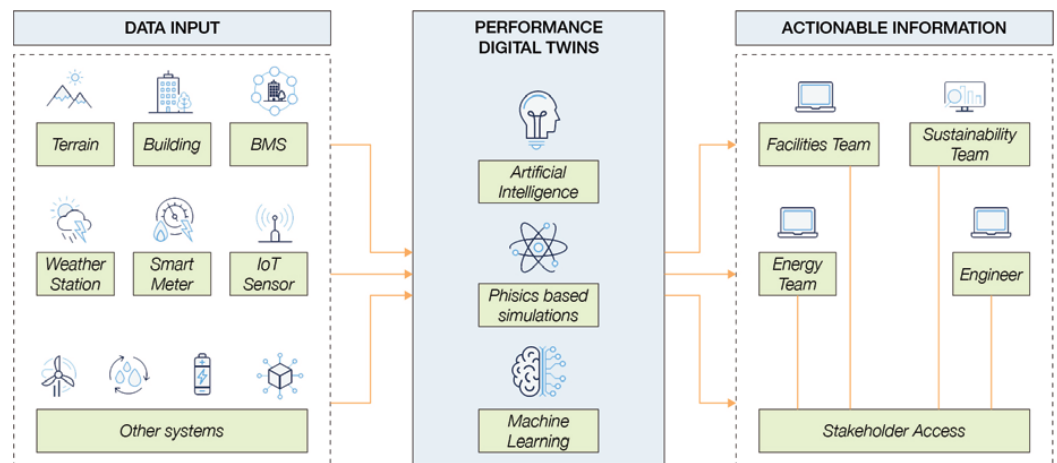
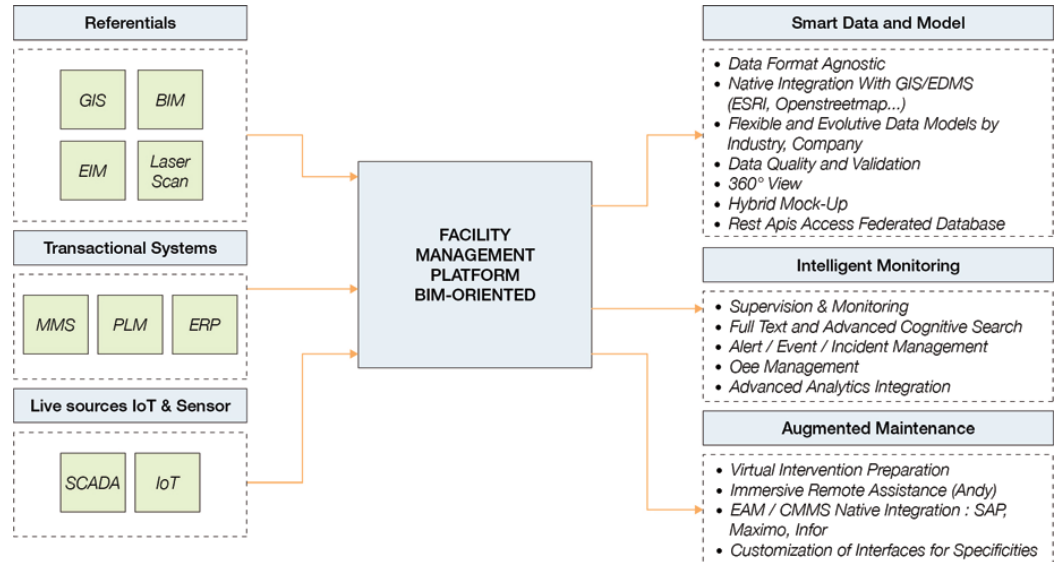
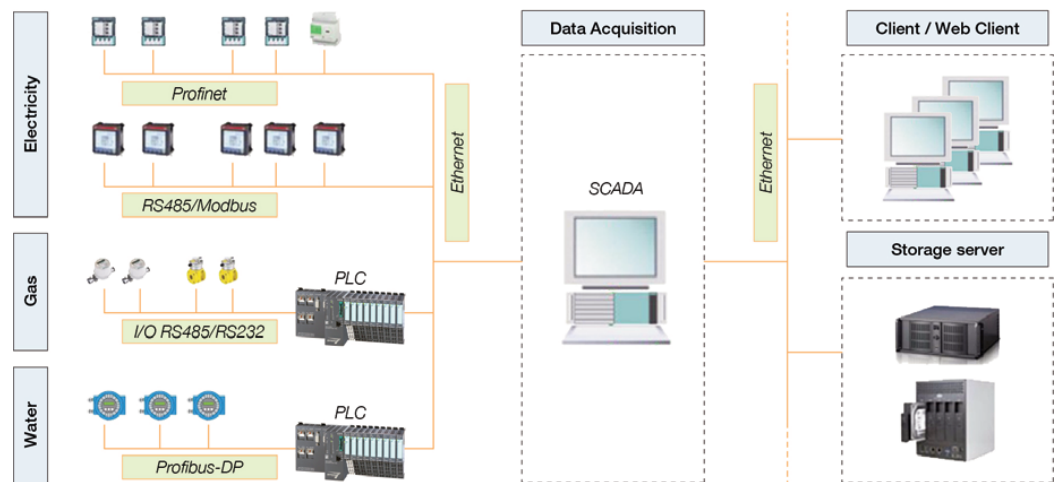


Fig. 4 | Diagram of the architecture of a digitalised energy monitoring system (credit: the Authors, 2025).

Fig. 5 | Diagram of the potential of a BIM-oriented Digital Twin platform for Facility Management and the integration and federation of heterogeneous data present in the various factory systems and enabled functions (credit: the Authors, 2025).

Fig. 6 | Diagram of the potential of a Digital Twin oriented towards energy simulation (credit: IES, 2024).

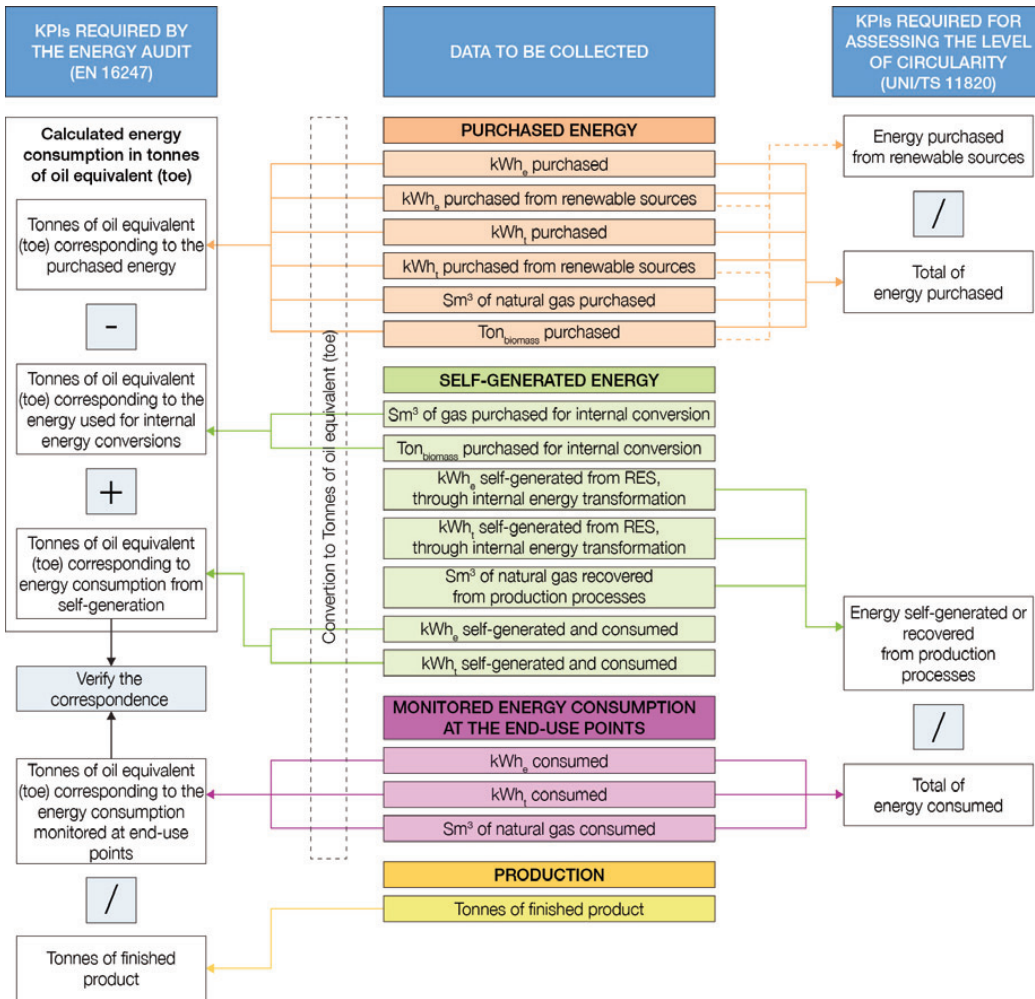


Fig. 7 | Data to be collected and KPIs to be calculated in the methodology for energy audit and measurement of the circularity level (credit: the Authors, 2025).

risorse. I limiti dello studio riguardano la circoscrizione della valutazione di circolarità all'ambito energetico in fase operativa; ulteriori sviluppi dovrebbero estendere il calcolo almeno a tutti gli indicatori legati alle emissioni lungo l'intero ciclo di vita della fabbrica, incluso il carbonio incorporato, mirando quindi all'arricchimento informativo del gemello digitale. In merito alla trasferibilità del lavoro in altri stabilimenti si segnala la necessità di dotarsi di un sistema di monitoraggio energetico accurato e capillare, nonché della disponibilità e della completezza di tutti i dati relativi alle caratteristiche costruttive, impiantistiche e di utilizzo dell'edificio, ai fini di una modellazione coerente nella fase di simulazione. Le barriere alla diffusione della metodologia proposta riguardano la dotazione di competenze, soprattutto nelle realtà meno strutturate come le PMI, e i costi di implementazione dell'infrastruttura digitale.

Il framework proposto contribuisce non solo al miglioramento delle performance ambientali delle aziende, ma anche agli obiettivi dell'Agenda 2030 in tema di energia pulita, innovazione industriale, produzione responsabile e azione per il clima. Inoltre rende evidente la necessità di superare l'attuale compromesso con l'obiettivo di ridurre le disuguaglianze, dovuto al gap tecnologico e di competenze tra grandi imprese e PMI, incentivando un accesso più ampio all'innovazione digitale. I soggetti interessati allo studio vanno dai manager responsabili della transizione sostenibile delle aziende (Zannoni et alii, 2024) ai decisori politici. Ulteriori sviluppi della ricerca potranno riguardare l'applicazione della metodologia a un numero più ampio di casi studio e l'integrazione dei gemelli digitali con strumen-

ti avanzati di simulazione e analisi predittiva, al fine di rafforzare il ruolo dei dati nei processi decisionali orientati alla sostenibilità.

Among the goals of the 2030 Agenda (UN, 2015) for sustainable development is the need to transform economic models and the industrial sector so that growth and development are decoupled from forms of resource exploitation that exceed regenerative capacity and generate environmental impacts in terms of emissions and waste (UNEP, 2011). Such industrial innovation contributes to Sustainable Development Goal (SDG) 9 of the Agenda and is shown to be in synergy with SDG 7, as it promotes energy efficiency and the use of renewable sources; with SDG 12, for the transition to circular models and the efficient use of resources; and with SDG 13, because it is geared towards decarbonisation and the reduction of emissions. Indirect benefits and certain trade-offs with SDG 10 on reducing inequalities are emerging, since whilst on the one hand the transition towards circular economy models stimulates demand for new skills and the overhaul of material and energy supply chains to the benefit of employment and local communities (Losco et alii, 2024), on the other, the adoption of technologies and control and management tools remains limited among small and medium-sized enterprises (SMEs; Trevisan et alii, 2023).

In line with these goals, the European Commission (2019) launched the Green Deal to achieve

climate neutrality. It identifies the circular, energy, and digital transitions as key drivers (Fig. 1). The circular transition aims to close cycles (EMF, 2013), reduce waste, and preserve the value of products, components, and materials (Paganin et alii, 2024). It is integrated with the energy transition, which aims to decarbonise through energy efficiency and transition away from fossil fuels. The two paths are complementary, often supported by European policies that promote actions benefiting both. This leads to less dependence on external resources and greater resilience of the production system, with environmental and socio-economic benefits.

In this context, the digital transition plays an enabling role, providing tools for monitoring, collecting, analysing and sharing data. It also supports the simulation of future scenarios, facilitates performance monitoring, and aids strategic decision-making for sustainable resource management (Rigillo, Galluccio and Paragliola, 2023). Ecological and digital transitions are increasingly addressed through systemic approaches and open innovation processes that involve various stakeholders (Barbero and Ferrulli, 2023).

Industry's environmental commitment is encouraged by growing consumer awareness, the introduction of regulatory requirements, incentive schemes and the influence of EU policies on financial markets (European Commission, 2020).

It is therefore clear that there is a need to develop a comprehensive assessment framework capable of simultaneously considering energy and circularity indicators, so that strategic corporate planning is not limited to reducing consumption but extends to the overall and systemic assessment of the organisation's environmental performance. In this context, this research contributes to the body of research investigating the combination of existing methodologies in the environmental field, aiming to provide a systemic understanding of the impacts of human activities (Sposito and De Giovanni, 2023). The goal is to develop an integrated framework that considers the central role of digital tools in the transition towards a more sustainable industry.

In this light, this paper presents some results from a PON PhD Fellowship project funded by the Italian Ministry through ESF REACT-EU resources on innovation-related topics lasted from 2022 to 2024. A major multinational company in the agri-

food sector supported the research, contributing to data sharing and the preparation of energy audits. The innovation of this research lies in overcoming the current fragmentation between energy audit tools and circularity measurement tools, through the methodological integration of the UNI CEI EN 16247-1:2022 and UNI/TS 11820:2022 standards (UNI, 2022a, 2022b), supported by digital and simulation tools. This research also defines a synoptic framework of KPIs capable of clarifying the interdependencies between the energy and circular transitions.

The paper is scientifically relevant because it optimises and systematises indicators and methodologies available to companies, demonstrates the benefits of advanced digital tools, and, through a case study involving a large enterprise, can inform incentive policies for transferring these results to SMEs, thereby contributing to the reduction of inequalities. The paper is structured as follows: the first section introduces existing strategies and tools for the industry's triple transition; the second outlines the methodology used to develop the integrated assessment framework; the third focuses on its application to the case study; the fourth discusses the digital tools supporting the methodology; and the concluding section identifies limitations and future developments.

Tools for monitoring companies' integrated decarbonisation strategies

The literature highlights that achieving industrial decarbonisation targets requires the adoption of integrated strategies, with particular reference to energy efficiency, self-generation from renewable sources (primarily through photovoltaic systems), circular economy practices and digital solutions (The European House Ambrosetti, 2023; Fig. 2). Analyses specifically relating to the agri-food sector also confirm that the combination of measures concerning energy supply, heat recovery, technological innovation, electrification and Industry 4.0 digital technologies yields more substantial energy savings and emission reductions than isolated actions (Bazzocchi et alii, 2023; Realini et alii, 2017; Gobbi et alii, 2021).

Tools and methodologies, based on specific regulatory standards, are available to industrial companies as they navigate the dual transition towards circularity and energy sustainability; they enable effective assessments but operate in parallel, whilst demonstrating a complementary relationship because they are based on a partly shared

dataset, from which they derive their respective key performance indicators (KPIs): UNI/TS 11820:2022 'Measurement of circularity – Methods and indicators for measuring circular processes in organisations' (UNI, 2022b), with regard to the circular transition, and the energy audit governed by Italian Legislative Decree 102/2014 (Presidente della Repubblica Italiana, 2014) and the standards of the UNI CEI EN 16247:2022 series (UNI, 2022a), which is instrumental to the energy transition and mandatory in the cases provided for by law.

Although these methodologies originated in distinct fields, they can converge in the creation of an integrated system for measuring companies' energy and environmental performance, which must be based on advanced digital tools capable of accurately collecting data on consumption, procurement, self-generated energy and factory output, as well as monitoring and, above all, analysing and processing this data. The legislation on energy audits also defines the criteria for monitoring; however, this aspect is not addressed by UNI/TS

PLANT						PERFORMANCE COMPARISON
Production Volumes 2018 - 2022						Increase in production volumes
Production Volumes 2018 [Ton]			Production Volumes 2022 [Ton]			
36,585			37,836			3%
Total electricity consumption 2018 - 2022						Reduction of electricity consumption general KPI
Electricity consumption 2018 [kWh]	KPI 2018 [kWh/Ton]	Electricity consumption 2022 [kWh]	KPI 2022 [kWh/Ton]			
12,796,000	2,393	349.8	11,790,053	2,205	311.6	-11%
Total natural gas consumption 2018 - 2022						Reduction of natural gas consumption general KPI
Natural gas consumption 2018 [Sm3]	KPI 2018 [Sm3/Ton]	Natural gas consumption 2022 [Sm3]	KPI 2022 [Sm3/Ton]			
2,614,038	2,185	71.5	2,227,818	1,862	58.8	-18%

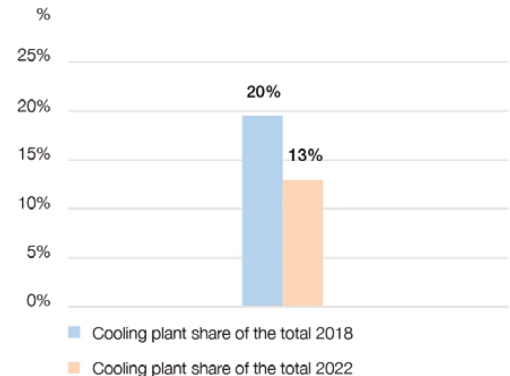
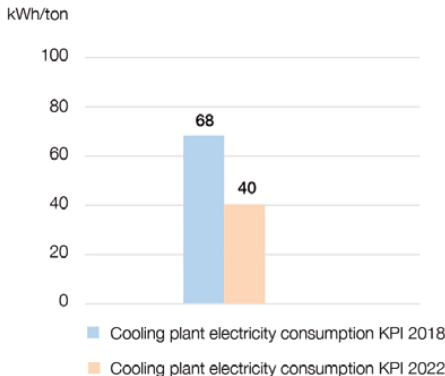
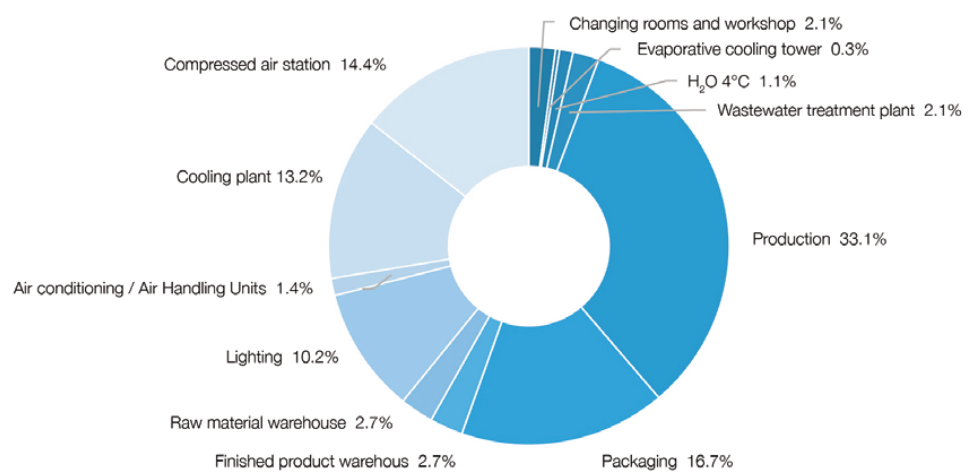
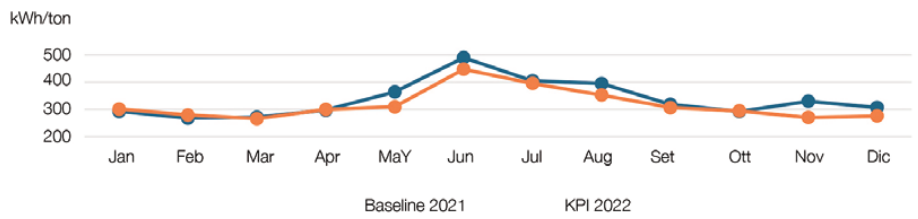


Fig. 8 | Some results of the energy audit conducted for the case study (credit: the Authors, 2025).

	N. Indicator	Type of evaluation	Type of indicator	Weight	Indicator value	Indicator weighted value
Energy and water resources	11	Product/Service	Specific	1	0,000	0.000
	12	Product/Service	Specific	1	0,076	0.076
	13	Product/Service	Specific	1	1,000	1.000
	14	Product/Service	Specific	1	0,000	0.000
	15	Product/Service	Specific	1	0,034	0.034

Self-generated electricity from RES	0.000
Thermal energy from recovery processes	0.076
Electricity purchased from RES	1.000
Thermal energy purchased from RES	0.000
Water from recycling	0.034
LEVEL OF CIRCULARITY	

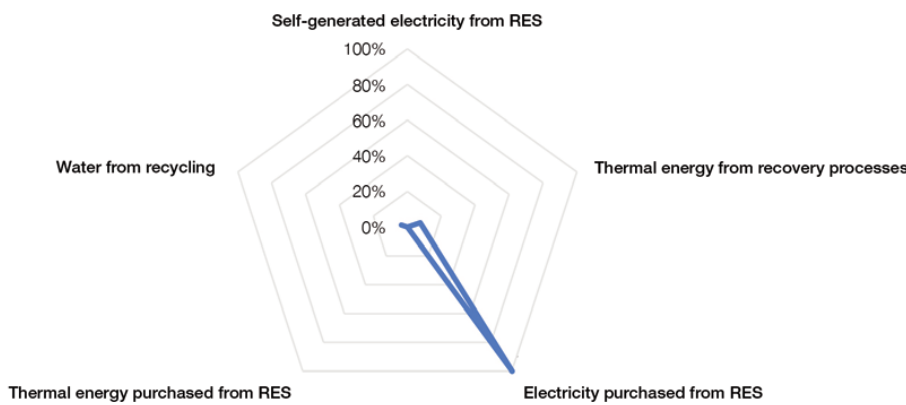


Fig. 9 | Calculation of the circularity level relating to energy and water resources in the case study (credit: the Authors, 2025).

11820:2022 (Ministero dello Sviluppo Economico, 2016). UNI/TS 11820:2022 defines a methodological framework for measuring circularity, inspired by the principles of Life Cycle Thinking. It is applicable to product, service or mixed-business organisations and is independent of sector-specific benchmarks. In line with the principles of ISO 59000:2024 (ISO, 2024) and ISO 14067:2018 (ISO, 2018), it integrates environmental, social, and economic dimensions. The system provides indicators organised into six areas, including energy and water resources, the focus of this study.

The indicators are classified as ‘core’, ‘specific’ and ‘rewarding’, and are based on KPIs that include, for example, the proportion of renewable raw materials out of total inputs, the percentage of water recovered relative to total demand, the proportion of waste sorted for recycling, self-generated electricity and heat, the product’s carbon footprint, and elements of industrial symbiosis. The circularity level is a percentage value calculated as the weighted average of the indicators applicable to the company. The calculation can be broken down by category, supporting targeted analyses and radar-chart representations. The methodology requires, as a preliminary step, defining the scope of assessment and verifying data quality in terms of accuracy, representativeness, and reproducibility.

The energy audit is a key tool in the energy transition. Introduced by Directive 2012/27/EU (European Parliament and the Council of the European Union, 2012) and transposed by the aforementioned Legislative Decree 102/2014, it requires a systematic analysis of energy flows, the identification of inefficiencies and the proposal of technically and economically viable measures. In accordance with

the UNI CEI EN 16247:2022 (UNI, 2022a), the methodology involves the clustering of multi-site companies, the construction of a multi-level energy diagram, the compilation of a detailed description of the existing systems and their technical characteristics, the modelling of energy carriers in order to identify priority areas for intervention, and the calculation of Energy Performance Indicators.

The main KPIs are the General Energy Performance Index (EPI) and the Specific Energy Performance Index (EnPI), expressed as consumption relative to energy drivers, such as the ratio between tonnes of oil equivalent (toe) for a given energy carrier and tonnes of finished product (Fig. 3). The methodology also requires the identification of efficiency measures to be implemented over a three-year period, specifying economic and financial indicators such as the payback period, NPV (Net Present Value), and IRR (Internal Rate of Return); furthermore, organisations are required to report the results in terms of energy and cost savings relating to the measures previously declared and implemented (ENEA, 2021).

Digital monitoring systems form the enabling infrastructure for the digital transition and are a prerequisite for the reliability of assessments of other transitions. Indicators such as the Smart Readiness Indicator also enable the assessment of the degree of integration of digital technologies in buildings and their contribution to the energy transition (Azzalin, 2024), providing strategic support for the development of environmental policies (Lauria et alii, 2025).

The ENEA (Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development) Guidelines require permanent mon-

itoring plans for all energy carriers used within the company, as well as comprehensive measurements of core activities and auxiliary and general services, with coverage proportional to consumption in each functional area. It can be effective to adopt multi-level architectures with ‘smart meters’ using industrial protocols, such as Profibus and Profinet, communicating with Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) systems, which enable real-time analysis of power factors and load profiles of the installations, as well as threshold exceedances, and allow data to be archived in detail down to the quarter-hourly level. The capabilities of these systems are significant for management and energy audits (Fig. 4).

BIM-oriented facility management platforms provide advanced real-time digital control over assets and energy carriers. These platforms make all relevant information available in a single shared environment. They integrate various factory systems and eliminate ‘siloed management’ in line with the Industry 4.0 paradigm, which is based on interconnection, virtualisation, and data-driven process management (Ministero dello Sviluppo Economico, 2017). The collaborative platforms collect data from sensors, SCADA systems, ERP, and MES systems. These include energy and production flows, plant characteristics, maintenance status, and planned and completed maintenance work. They create a federation of up-to-date databases to support operational and managerial stakeholders. Integration with a BIM model enables information to be linked to viewable virtual objects, whilst geometric data on spaces facilitates measurement tasks during the design of new projects (Russo Ermolli, 2019). Such an advanced control and management system is referred to as a ‘digital twin’, and takes the form of a cyber-physical model of the factory equipped with a structured, constantly updated information system (Green Building Council Italia, 2024; Fig. 5). It should be noted that another strand of the literature uses the term ‘digital twin’ to refer to simplified geometric models used to perform dynamic energy simulations, as they are capable of connecting to the sensors and energy and environmental monitoring systems of the physical spaces to which they relate. When suitably calibrated, they demonstrate energy behaviour consistent with that of the actual building (Fig. 6).

Taken together, these tools – which offer significant potential for synergy – form a system which, when properly integrated, is capable of objectively measuring an industrial organisation’s level of maturity in relation to environmental challenges, pro-

viding a quantitative basis for continuous improvement and ESG reporting. In light of the integrative potential of these tools, this paper presents a framework for developing an advanced tool to monitor energy and environmental performance, designed to support complex, informed corporate decision-making. This tool can correlate energy and circularity performance, identify consistent KPIs, move beyond sector-specific approaches, and enable a systemic assessment of the interdependencies between the two transitions.

Part of the literature addresses the issue of integrated assessment of the energy and circular transitions for industrial buildings from the perspective of building refurbishment, using the energy-related indicators set out in UNI/TS 11820:2022 (UNI, 2022b) and citing digital technology as a system for tracking material flows in construction activities (Baiani et alii, 2024). Other authors have focused on the creation of digital twins for the implementation of decarbonisation pathways at both the building and urban district scales (Longo and Roversi, 2025); still others have examined their applications for energy efficiency (Ba et alii, 2025), without focusing on circularity. This study goes beyond the sectoral approach of the current state of the art and provides support for the operational management of the factory.

Methodology for assessing synergies through the use of digital tools

The methodology developed for the combined assessment of energy efficiency and circularity performance, and their trends over time, is based on a data-driven approach facilitated by various types of digital tools: 1) a system for monitoring and collecting data on energy carriers in the field at various levels of detail, from final energy uses to the main incoming energy meters of the plant; 2) software for analysing and processing the collected data; 3) dynamic energy simulation software for modelling the factory and quantifying energy demand and the associated greenhouse gas emissions resulting from hypothetical future interventions. The assessment methodology adopted is set out below. The first three phases were repeated in two different years to conduct a comparative analysis from the fourth phase onward.

The first phase involves identifying the data to be collected on energy carriers, as required by the regulations on energy audits, and extracting this data from on-site digital monitoring systems, at

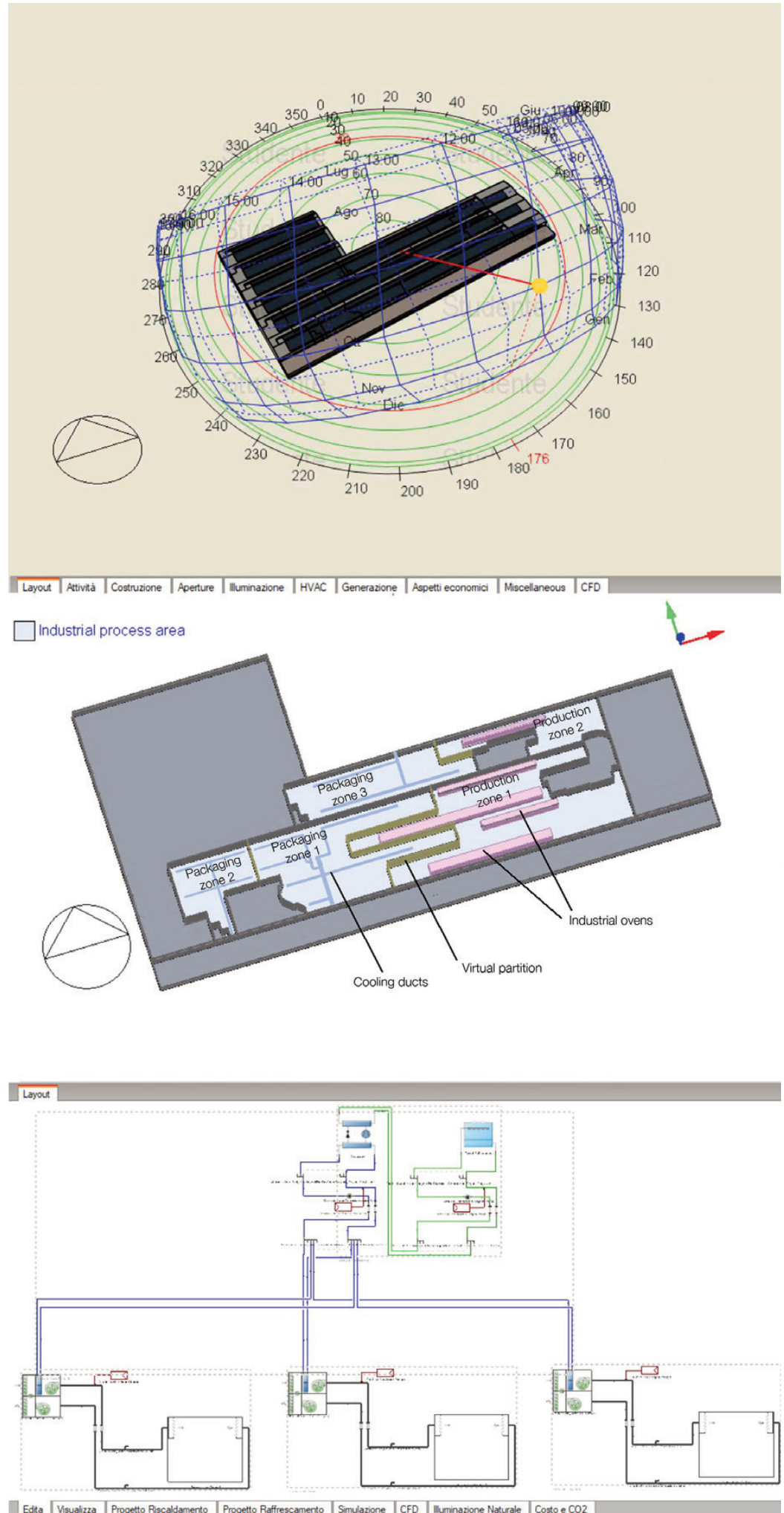


Fig. 10 | Views of the digital model created for energy simulation, relating to the proposed installation of the rooftop photovoltaic system, the distribution of the thermal zones under analysis, and the layout of the cooling system subject to energy efficiency improvements (credit: the Authors, 2025).

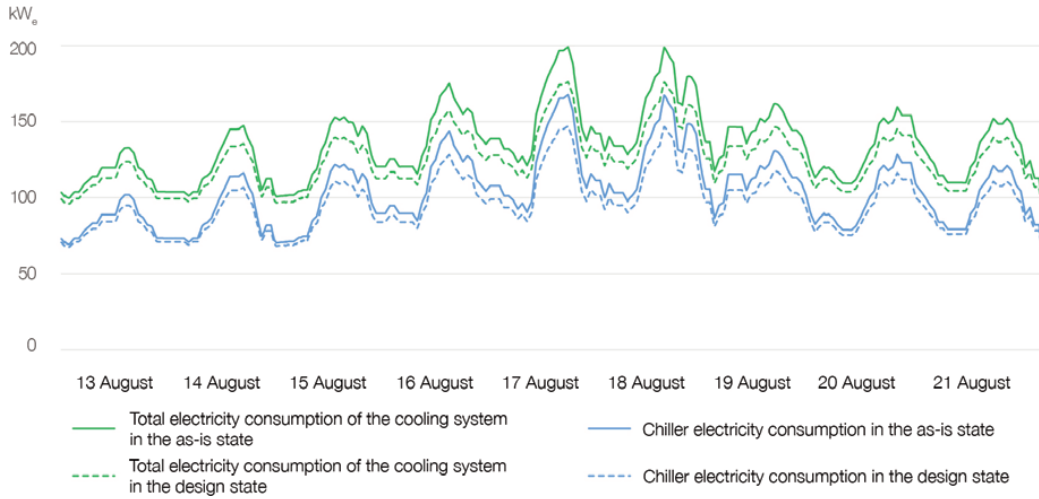


Fig. 11 | Graph analysing the energy savings achieved following the energy efficiency improvement of the cooling system via dynamic simulation: comparison of the hourly electricity consumption of the cooling system and the chiller plant, in the current state and in the design state, during the period from 13 to 21 August (credit: the Authors, 2025).

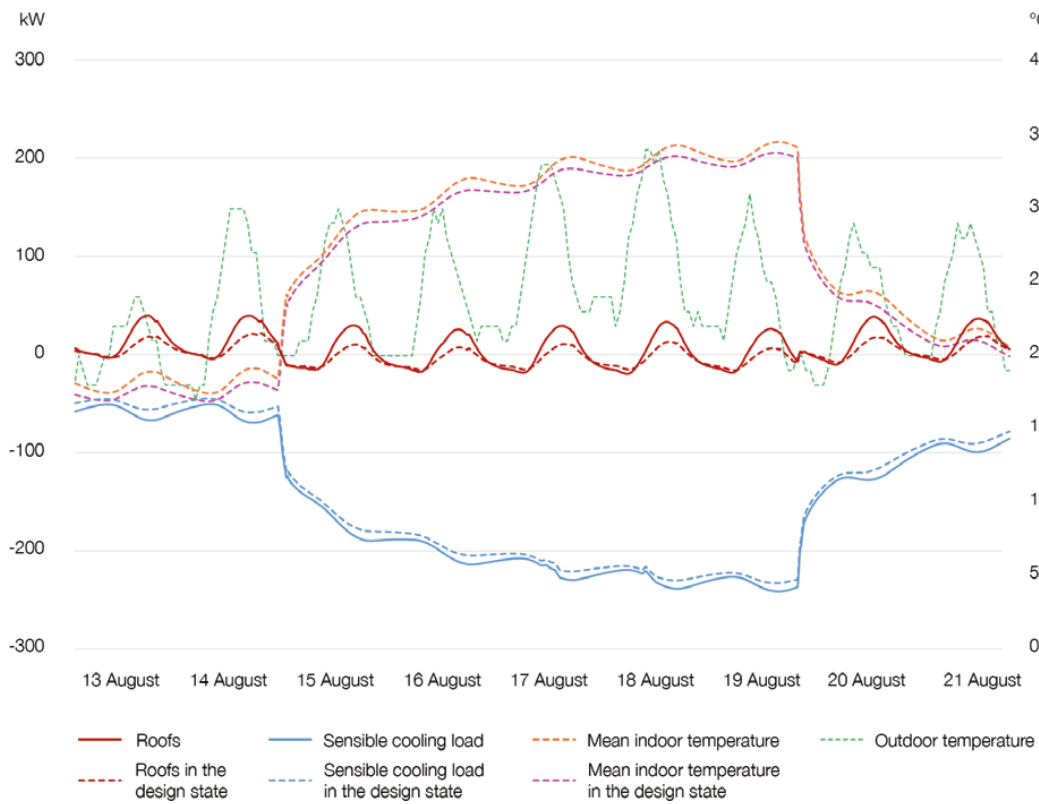


Fig. 12 | Graph analysing the reduction in internal heat gains associated with the installation of the photovoltaic system: comparison between the current state and the design state of internal heat gains through the roof, hourly cooling demand and room temperatures (credit: the Authors, 2025).

the various levels of detail defined by UNI CEI EN 16247:2022 (UNI, 2022a), relating to the company's energy structure (ENEA, 2021). To ensure the methodology is replicable, it is necessary to identify the system boundary, which corresponds to the entire perimeter of the plant; the data to be collected for processing in subsequent phases concern the hourly electricity and heat consumption of individual production lines, of plants belonging to the auxiliary services category, and of those belonging to general services. Data must also be collected on any self-generated energy and on the production of goods related to the company's activities. The second phase involves carrying out an energy audit, using analysis software to aggregate data and identify KPIs, comparing performance against benchmarks defined in the Best Available Techniques (Giner Santonja et alii, 2019), and developing the energy model (thermal and electrical). An inventory and description of the technical characteristics of the systems must also be carried out, as they are useful during the modelling and dynamic energy simulation phases.

It is important to quantify, for each energy source, the energy purchased from renewable and fossil sources, any portion purchased that is used for internal conversion (for example, in the case of cogeneration), self-generated energy, the self-generated portion consumed internally (net of any exports), and the energy consumption recorded by 'smart' meters which, at a higher level of aggregation, must be consistent with the readings of the main meters. At this stage, the energy efficiency calculation is based on the KPI relating to the ratio of consumption, expressed in toe (tonnes of oil equivalent), to tonnes of finished product. It should be noted that toe values are derived from the units of measurement of energy carriers, using specific conversion factors reported in the literature (ENEA, 2021).

The third phase involves using the quantitative data obtained through the energy audit methodology to calculate the company's circularity level, based on indicators for energy and water resources, in accordance with UNI/TS 11820:2022 (UNI, 2022b). The required KPIs concern energy

procurement strategies: self-generation, energy recovery and purchase from renewable sources. In particular, the ratios of electricity and self-generated thermal energy from renewable sources and/or recovery processes to total consumption, and the ratio of electricity and heat purchased from renewable sources to total purchases, must be calculated. The level of circularity is based on the combination of key performance indicators and is expressed as a percentage (Fig. 7).

The fourth phase involves compiling and analysing the results obtained over the two years under review in a summary table. This table illustrates the outcomes of the energy strategies, enabling trends over time to be assessed. It also supports the evaluation of the interconnections between the energy transition and the circular economy, examining how integrating energy efficiency and supply measures affects circularity.

The fifth phase involves using dynamic energy simulation software and creating a factory model calibrated against actual hourly energy data collected and monitored to evaluate improvement

measures. This phase can be carried out provided that information is available on the building's geometric and construction characteristics, the layout and technical specifications of the systems as detailed in the energy audit report, actual energy consumption data collected on site by the monitoring system, and accurate, appropriate climate data.

The sixth phase involves importing the energy simulation results into the summary table to assess the benefits of the proposed measures in both the energy and circular transitions.

A case study of a large multinational company in the agri-food sector

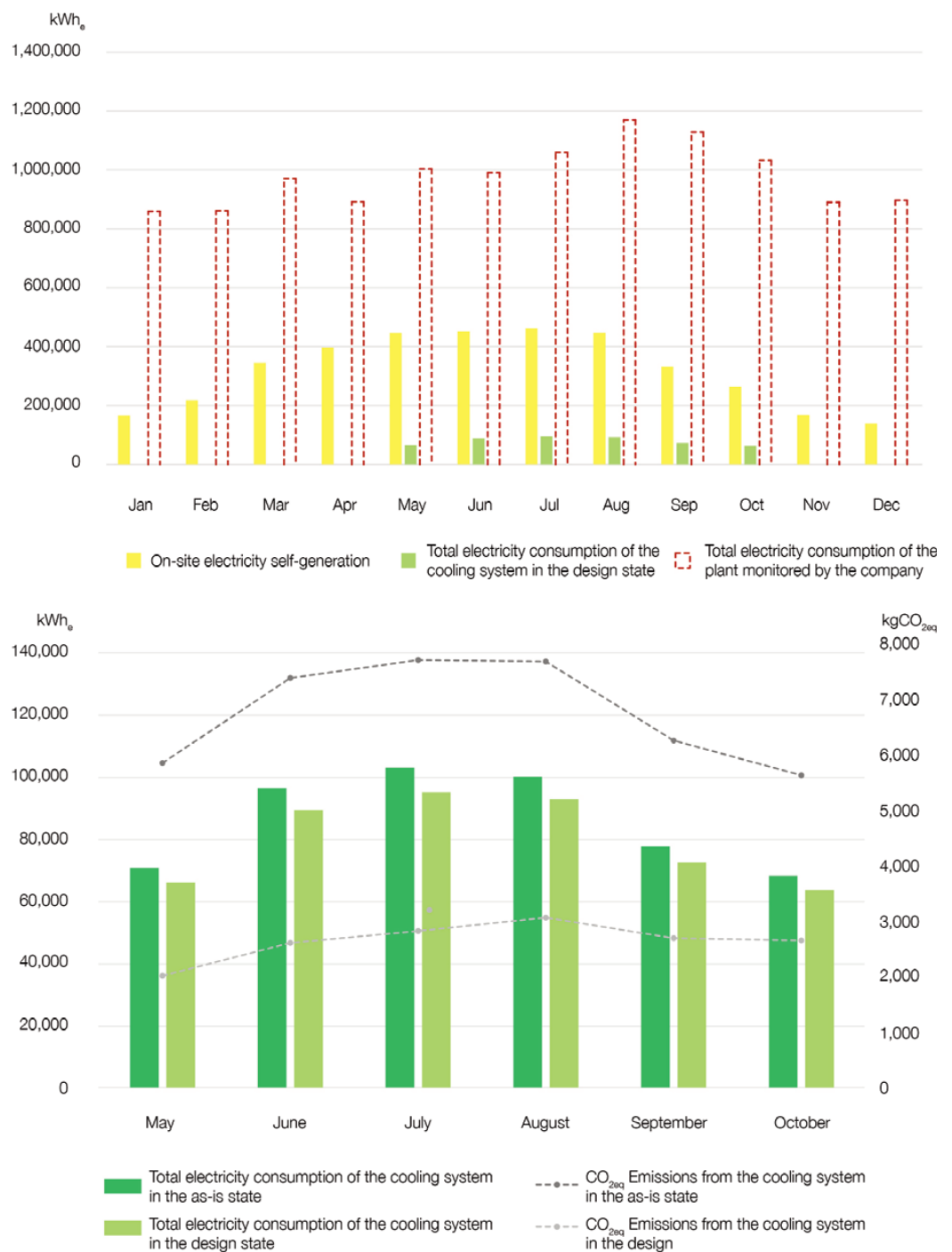
The case study focuses on a plant belonging to a large, multi-site agri-food company, equipped with a robust monitoring system that provides data at quarter-hourly intervals.

The energy sources used are electricity, which the company purchases to meet all its requirements through supply contracts certified with a Guarantee of Origin from renewable sources, particularly from hydroelectric power, and natural gas. No on-site generation facilities have yet been installed. The monitoring system has recently been updated and is highly accurate, extending down to the end-use level and enabling data aggregation at the level of functional areas (production lines, boiler plant, chiller plant, compressed air plant, air-conditioning system, raw materials warehouse, finished-goods warehouses, and offices) and by macro-categories (core activities, auxiliary services and general services).

The data collected covered both electricity and heat consumption; monthly figures were extracted from the software and cross-checked against on-site meter readings and utility bills. For certain days, hourly breakdowns were extracted to run energy simulations; furthermore, data on manufactured products were collected via the company's production control software, using time intervals consistent with the energy data. A comprehensive energy audit was carried out and subsequently submitted to ENEA via the dedicated portal, with a summary file completed that set out the data for the various energy carriers for the entire year: 1) consumption in kWh of electricity and standard cubic metres (Smc) of gas for all functional areas, and the corresponding values in toe, calculated using the appropriate conversion

factors; 2) energy purchases in kWh of electricity and Smc of gas and the corresponding values in toe; 3) the tonnage of products manufactured. The section relating to self-generation was not completed, as it does not exist; the energy performance KPIs were expressed in toe/tonne (Fig. 8). In the section on reporting energy efficiency measures carried out, the values for thermal energy recovery and electricity savings were reported. Using the energy data obtained from the assessment, circularity indicators and the company's overall level were calculated in accordance with the UNI/TS 11820: 2022 methodology (Fig. 9). As data from previous energy audits were also available, a comparative overview of the trends in integrated decarbonisation strategies was drawn up, focusing in particular on the categories of self-generated energy, energy efficiency and circular economy solutions, as reported in the literature (The European House Ambrosetti, 2023).

Energy modelling software was then used to evaluate two measures: improving the energy efficiency of the air-conditioning system in the factory's packaging area and generating electricity on-site via a photovoltaic system (Fig. 10). For the purposes of accurate modelling, information on the systems gathered through the energy audit was used, whilst for calibration, hourly profiles of actual consumption on selected days of interest were examined, in addition to monthly aggregated data. An ex-ante energy simulation of the model was then carried out for the intervention scenarios; calibration was verified through an iterative comparison of the simulation results with actual data (CIBSE, 2020), followed by the ex-post assessment (Fig. 11-14; Tab. 1). The simulated consumption and self-generation data were subsequently subjected to the same procedures for conversion into KPIs and reported in the summary table for comparative assessment against previously recorded



Comparison of monthly electricity consumption between the current state and the design scenario

Month	Cooling consumption in the as-is state [kWh _e]	Cooling consumption in the design state [kWh _e]	Consumption delta between the as-is and design scenario [%]	Emissions from the cooling system in the as-is state [kgCO _{2eq}]	Emissions from the cooling system in the design state [kgCO _{2eq}]	Emissions delta between the as-is and design scenario [%]
January	0	0	0%	0	0	0%
February	0	0	0%	0	0	0%
March	0	0	0%	0	0	0%
April	0	0	0%	0	0	0%
May	70,585	65,961	-6.6%	5,871	2,020	-65.6%
June	96,300	89,249	-7.3%	7,408	2,615	-64.7%
July	102,879	94,995	-7.7%	7,733	2,831	-63.4%
August	100,066	92,802	-7.3%	7,708	3,074	-60.1%
September	77,513	72,336	-6.7%	6,280	2,702	-57.0%
October	68,098	63,483	-6.8%	5,650	2,661	-52.9%
November	0	0	0%	0	0	0%
December	0	0	0%	0	0	0%
	515,441	478,826	-7.1%	40,650	15,905	-60.9%

Tab. 1 | Comparison table of the simulation results for the project interventions in terms of reduction in monthly electricity consumption and decarbonisation (credit: the Authors, 2025).

Assessment of Key Integrated Decarbonisation Strategies		2019	2023	2030
Energy self-generation	Indicator	Self-generated kWh / total energy consumed	Self-generated kWh / total energy consumed	Simulated self-generated kWh / 2022 total energy consumed
	Methodology	Data collection and measurement according to UNI CEI EN 16247 – energy audits	Data collection and measurement according to UNI CEI EN 16247 – energy audits	Design of a photovoltaic system using energy simulation software
	Data source	Digital energy monitoring systems	Digital energy monitoring systems	Real monitored data for digital-model calibration and climate files for future scenarios
	Results	0	0	33%
Energy efficiency	Indicator	Tonnes of oil equivalent / tonnes of finished product	Tonnes of oil equivalent / tonnes of finished product	Tonnes of oil equivalent for simulated energy consumption / tonnes of finished product in 2022
	Methodology	Data collection and measurement according to UNI CEI EN 16247 – energy audits	Data collection and measurement according to UNI CEI EN 16247 – energy audits	Efficiency project for the air-conditioning system in the packaging area using simulation software
	Data source	Digital energy monitoring systems	Digital energy monitoring systems	Real monitored data for digital-model calibration and climate files for future scenarios
	Results	0.1251 toe/ton	0.1075 toe/ton: -14.1% compared to 2019, of which 0.0026 toe/ton is related to cooling	0.1073 toe/ton: -0.2% compared to 2023, of which 0.0024 toe/ton is related to cooling: -7.7% compared to 2023
Circular economy	Indicator	Circularity %	Circularity %	Circularity %
	Methodology	Measurement according to UNI/TS 11820:2022	Measurement according to UNI/TS 11820:2022	Measurement according to UNI/TS 11820:2022
	Data source	energy audit	energy audit	Simulation output data
	Results	20.7%	22.2%: +7.4% compared to 2019	28.8%: +29.4% compared to 2023

Tab. 2 | Comparative overview of the trends in integrated decarbonisation strategies, specifically in the categories of energy self-generation, energy efficiency and circular economy solutions (credit: the Authors, 2025).

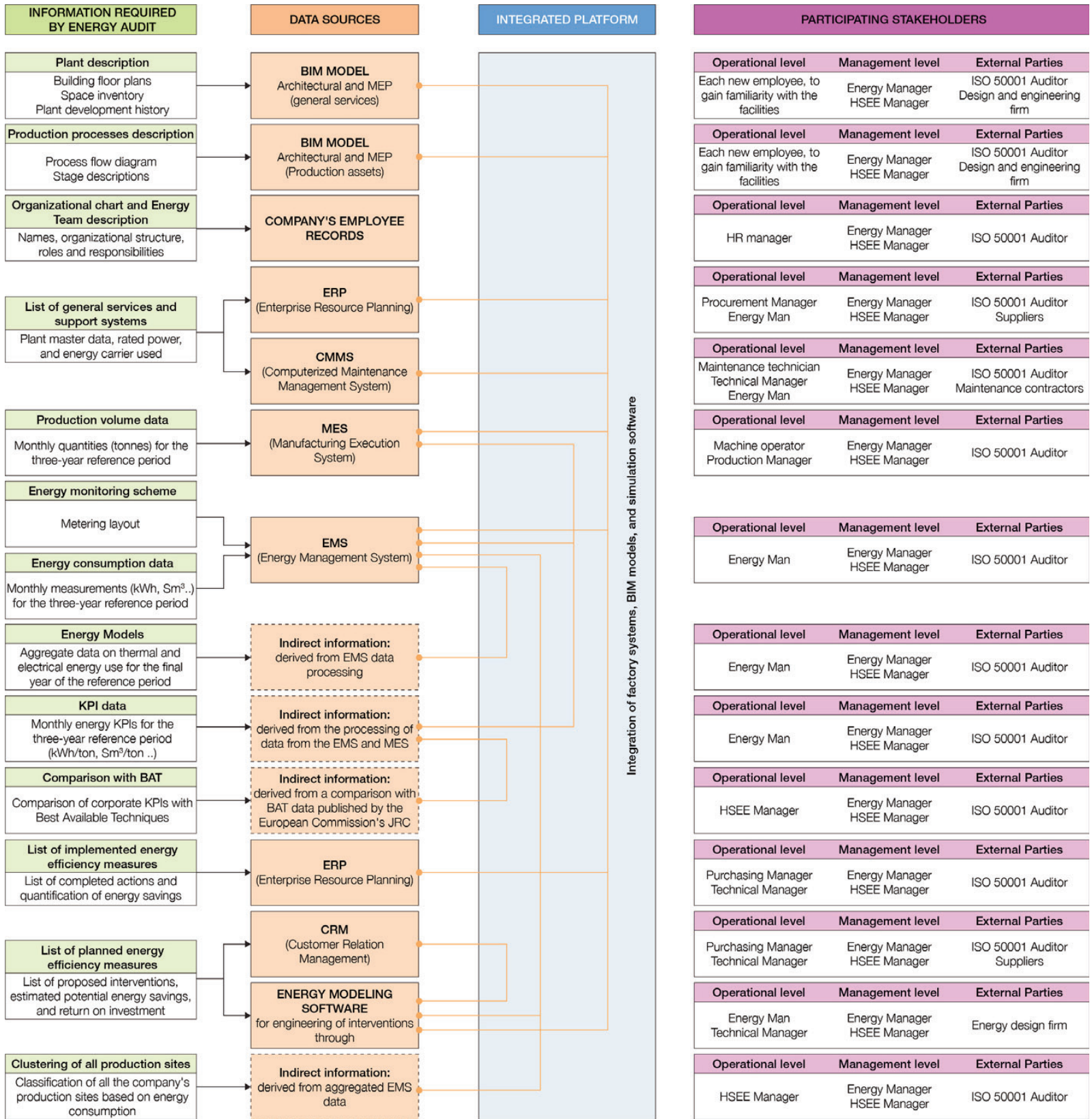


Fig. 15 | Diagram of a collaborative platform for the integration of the factory's management systems and the plant's BIM model, for the optimisation of facility management and energy audits, highlighting relevant information and the stakeholders involved (credit: the Authors, 2025).

baseline (Tab. 2). The results demonstrate that the combination of the two hypothesised energy transition measures – efficiency improvements and self-generation – also has direct implications for circularity performance.

The factory digital twin for improving energy performance and corporate circularity | An energy audit, whilst fulfilling regulatory requirements,

can also be seen as a diagnostic tool that lays the groundwork for assessing a company's circularity, as it involves the systematic collection and organisation of data relating to energy consumption, supply chains and self-generation systems. The analysis of incoming energy sources and their use in processes provides essential information for defining circular strategies to optimise resource use and reduce environmental impacts. The digital

tools available perform effective, timely and reliable monitoring. However, the current workflow for compiling diagnoses presents significant challenges, as it relies on the manual transfer of isolated, static, and disconnected files, stored in disparate systems and sent between staff via email. This fragmentation creates duplication, increases the risk of error, prevents real-time updates, and hinders interoperability between IT and OT systems,

reducing the process to data entry and poorly integrating it into daily operations. The digital twin of the factory thus serves as an enabling tool for the methodological evolution of energy audits, making data collection routine rather than occasional. Future developments of the digital twin should include a dedicated section that organises the information already available in federated databases, making it easier to interpret for audit purposes.

Similarly, through dedicated interfaces, the digital twin can provide dashboards for the integrated management of the energy and circular transitions, following the selection of KPIs consistent with the regulatory requirements for energy audits and UNI/TS 11820:2022 (UNI, 2022b), as demonstrated by the methodology adopted in this study. Indicators such as specific consumption per unit of product, the share of self-generated energy, and resource recovery and reuse rates can be monitored in real time and linked to specific assets or functional areas, enabling comparative assessments over precise time intervals.

Finally, as demonstrated by the case study analysed, another key factor concerns forecasting capability. The energy audit methodology requires the identification and economic assessment of future interventions; this makes the ability to simulate energy-efficiency scenarios a strategic asset, potentially enabling the development of decarbonisation pathways, as already occurs at the urban scale (Longo et alii, 2024). It is therefore necessary to overcome the dichotomy between purely informational digital twins oriented towards facility management and those capable of simulation and equipped with energy analysis capabilities.

The Common Data Environment (CDE) is the main collaborative platform during the design phase. Recently, it has gained attention for its integration into digital twins oriented towards facility management. The CDE can support processes and stakeholders throughout the life cycle of a building and help improve performance during operations (D'Amore, 2025). The CDE should provide a model that is continuously aligned with the current state. Future digital twin platforms must integrate with energy simulation software. This integration should exploit BIM model interoperability to produce more refined predictive scenarios and assess, ex ante, the combined effects on consumption, costs, emissions, and the circularity of processes (Fig. 15). Studies show that BIM-to-BEM information flows support decision-making and optimise energy performance in production systems (Osello et alii, 2024).

From this perspective, the corporate digital twin would become an integrated platform for knowledge, monitoring, and simulation, capable of supporting complex decision-making processes based on a joint assessment of the interdependencies between energy and circular performance, thereby definitively moving beyond sector-specific, fragmented approaches.

Conclusions | The study analysed the potential synergies between various industrial decarbonisation strategies and proposed an integrated methodological framework for the joint assessment of energy performance and circularity in manufacturing companies. The analysis highlighted how the tools and methodologies already available within the national and European regulatory framework – such as the energy audit governed by the UNI CEI EN 16247:2022 (UNI, 2022a) and the circularity measurement methodology defined by UNI/TS 11820:2022 (UNI, 2022b) – can be used in a complementary manner, drawing on a largely shared information base.

The main contribution of this study lies in the development of an operational procedure that enables energy and circularity indicators to be linked, moving beyond the traditionally sector-based approach typically used to analyse these aspects in business practice. The integration of data from energy consumption and procurement monitoring systems with production-related information enables a comprehensive overview of strategies, highlighting their trends over time and interdependencies. The case study analysed, concerning a plant belonging to a large multinational agri-food company, demonstrated the operational feasibility of the proposed methodology. The preparation of the energy audit, the calculation of circularity indicators, and the dynamic energy simulation of improvement measures enabled an integrated assessment of the effects of strategies such as energy efficiency improvements and self-generation from renewable sources. The results show that measures aimed at the energy transition can also generate measurable benefits in terms of resource circularity, confirming the existence of significant synergies between the two transition paths.

Digital technologies play a key role in this process. Advanced monitoring systems, data management platforms, and digital twins provide the enabling infrastructure for collecting, integrating, and analysing data to assess environmental performance. In the longer term, the evolution of digital twins into integrated control and simulation platforms could enable increasingly effective decision

support, enabling ex ante assessment of the effects of energy and circular strategies on consumption, emissions, costs, and resource use.

The limitations of the study relate to the fact that the circularity assessment is restricted to the energy sector during the operational phase; further developments should extend the calculation to include, at the very least, all indicators relating to emissions throughout the factory's entire life cycle, including embodied carbon, thereby aiming to enhance the information contained in the digital twin. With regard to the transferability of the work to other plants, it is worth noting the need for an accurate and comprehensive energy monitoring system, as well as the availability and completeness of all data relating to the building's construction, plant, and usage characteristics, to ensure consistent modelling during the simulation phase. The barriers to the widespread adoption of the proposed methodology relate to the availability of expertise, particularly in less structured organisations such as SMEs, and to the costs of implementing the digital infrastructure.

The proposed framework contributes not only to improving companies' environmental performance but also to the 2030 Agenda's objectives regarding clean energy, industrial innovation, responsible production, and climate action; it also highlights the need to move beyond the current trade-off with the aim of reducing inequalities – arising from the technological and skills gap between large enterprises and SMEs – by promoting wider access to digital innovation. The stakeholders of interest in this study range from managers responsible for companies' sustainable transition (Zannoni et alii, 2024) to policymakers. Further research could involve applying the methodology to a broader range of case studies and integrating digital twins with advanced simulation and predictive-analysis tools to strengthen the role of data in sustainability-oriented decision-making.

References

- Azzalin, M. (2024), "Indicatore Smart Readiness per l'edilizia – Asset digitali per la transizione energetica | Smart Readiness for buildings – Digital asset for energy transition", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 148-159. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15112024 [Accessed 4 April 2026].
- Ba, L., Tangour, F., El Abbassi, I. and Absi, R. (2025), "Analysis of Digital Twin Applications in Energy Efficiency – A Systematic Review", in *Sustainability*, vol. 17, issue 8, article 3560, pp. 1-33. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su17083560 [Accessed 4 April 2026].
- Baiani, S., Altamura, P., Turchetti, G. and Romano, G. (2024), "Transizione energetica e circolare del patrimonio industriale – Il caso dell'ex SNIA a Roma | Energy and circular transition of the industrial heritage – The Ex SNIA case in Rome", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 190-203. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15152024 [Accessed 4 April 2026].
- Barbero, S. and Ferrulli, E. (2023), "Transizione ecologica e digitale – Il Design Sistemico nei processi di innovazione aperta delle PMI | Ecological and digital transition

– Systemic Design in SMEs open innovation processes”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 269-280. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13232023 [Accessed 4 April 2026].

Bazzocchi, F., Moscarelli, S., Bellini, G., Borgarello, M., Zagano, C., Maggiore, S., Meroni, F. M. and Bernante, R. (2023), *Le opportunità della decarbonizzazione nel settore manifatturiero e agroalimentare*. [Online] Available at: rse-web.it/rapporti/le-opportunita-della-decarbonizzazione-nel-settore-manifatturiero-e-agroalimentare/ [Accessed 4 April 2026].

CIBSE – Chartered Institution of Building Services Engineers (2020), *TM63 – Operational performance: Building performance modelling and calibration for evaluation of energy in-use*. [Online] Available at: cibse.org/knowledge-research/knowledge-portal/operational-performance-building-performance-modelling-and-calibration-for-evaluation-of-energy-in-use-tm63 [Accessed 4 April 2026].

D’Amore, A. E. (2025), “Gemello digitale e processo edilizio – Riflessioni su produttività, energia e salute | The digital twin and the building process – Reflections on productivity, energy, and health”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 144-161. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1872025 [Accessed 4 April 2026].

EMF – Ellen MacArthur Foundation (2013), *Towards the circular economy – Vol. 1 – An economic and business rationale for an accelerated transition*. [Online] Available at: ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an [Accessed 4 April 2026].

ENEA – Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l’energia e lo sviluppo economico sostenibile (2021), *La Diagnosi Energetica ai sensi dell’Art. 8 del D.Lgs. 102/2014 e s.m.i. – Linee Guida e Manuale Operativo – La clusterizzazione dei siti, il rapporto di diagnosi ed il piano di monitoraggio*. ENEA, Roma. [Online] Available at: efficienzaenergetica.enea.it/download/category/41-diagnosi-energetiche.html [Accessed 4 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 new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe*, document 52020DC0098, COM/2020/98 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0098 [Accessed 4 April 2026].

European Commission (2019), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – The European Green Deal*, document 52019DC0640, COM/2019/640 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52019DC0640&qid=1768067091625 [Accessed 4 April 2026].

European Parliament and the 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 Text with EEA relevance*, document 32012L0027. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/eli/dir/2012/27/oj/eng [Accessed 4 April 2026].

Giner Santonja, G., Panagiotis, K., Stubdrup, K. R., Brinkmann, T. and Roudier, S. (2019), *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Food, Drink and Milk Industries – Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control)*, Publications Office of the European Union, Luxembourg. [Online] Available at: data.europa.eu/doi/10.2760/243911 [Accessed 4 April 2026].

Gobbi, M. E., Maggiore, S., Realini, A. and Zagano, C. (2021), *L’industria efficiente – Le opportunità delle imprese nella transizione energetica*. Editrice Alkes, Milano. [Online] Available at: rse-web.it/prodotti_editoriali/rse-m-efficienza-industria/ [Accessed 4 April 2026].

Green Building Council Italia (2024), *Smart Building – La digitalizzazione per il Net Zero*. [Online] Available at: gbccitalia.org/public_documents/GBCItalia_PositionPaper_BACS-BEMS_WEB.pdf [Accessed 4 April 2026].

ISO – International Organization for Standardization (2024), *ISO 59004:2024 – Circular economy – Vocabulary, principles and guidance for implementation*. [Online] Available at: iso.org/standard/80648.html [Accessed 4 April 2026].

ISO – International Organization for Standardization (2018), *ISO 14067:2018 – Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification*. [Online] Available at: iso.org/standard/71206.html [Accessed 4 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 4 April 2026].

Longo, D. and Roversi, R. (2025), “La modellazione energetica della città e il Gemello Digitale Urbano – City Energy Modelling and Urban Digital Twins”, in Boulanger, S. O., Longo, D. and Massari, M. (eds), *Energia e città – Pratiche e traiettorie per la decarbonizzazione*, FrancoAngeli, Milano, pp. 153-166. [Online] Available at: hdl.handle.net/11585/1040984 [Accessed 4 April 2026].

Longo, D., Turillazzi, B., Roversi, R., Lilla, L., Nucci, C. A., Piccinini, A. and Costa, A. (2024), “Gemello digitale urbano e modellazione energetica – Esperienze e analisi di casi d’uso | Urban Digital Twin and Energy Modeling – Experiences and case study analyses”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 160-169. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15122024 [Accessed 4 April 2026].

Losco, G., Pasqualini, C. and Khodaparast, M. J. (2024), “Rivitalizzare le comunità rurali – Autosufficienza energetica e valorizzazione delle risorse boschive locali | Revitalising rural communities – Energy self-sufficiency and valorisation of local forest resources”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 174-185. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16142024 [Accessed 4 April 2026].

Ministero dello Sviluppo Economico (2017), *Circolare n.4/E del 30/03/2017*. [Online] Available at: agenziaentrate.gov.it/portale/documents/20143/297931/Circolare+n.4+del+30032017_CIRCOLARE+n.4_E+del+30-03-2017.pdf/787f819a-d9aa-6a16-a03f-056a31a8edb1?t=1490899075261 [Accessed 4 April 2026].

Ministero dello Sviluppo Economico (2016), *Chiarimenti in materia di diagnosi energetica nelle imprese ai sensi dell’articolo 8 del decreto legislativo n. 102 del 2014*. [Online] Available at: mase.gov.it/portale/documents/d/guest/chiarimenti-diagnosi-14-nov-2016-pdf [Accessed 4 April 2026].

Osello, A., Del Giudice, M., Donato, A. J. and Fratto, A. (2024), “Verso la Neutralità Climatica – Il ruolo chiave del Digital Twin nell’Industria 5.0 | Towards Climate Neutrality – The key role of the Digital Twin in Industry 5.0”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 276-285. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15222024 [Accessed 4 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 4 April 2026].

Realini, A., Nsangwe, C., Businge, F., Bazzocchi, M., Borgarello, M., Gobbi, M. and Maggiore, S. (2017), *L’efficienza energetica nell’industria – Potenzialità di risparmio energetico e impatto sulle performance e sulla competitività delle imprese*. [Online] Available at: rse-web.it/rapporti/18001189/ [Accessed 4 April 2026].

Presidente della Repubblica Italiana (2014), “Decreto le-

gislativo 4 luglio 2014, n. 102 – Attuazione della direttiva 2012/27/UE sull’efficienza energetica”, in *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, Serie Generale n. 165 del 18/07/2014. [Online] Available at: gazzettaufficiale.it/eli/id/2014/07/18/14G00113/sg [Accessed 4 April 2026].

Rigillo, M., Galluccio, G. and Paragliola, F. (2023), “Digitale e circolarità in edilizia – Le KETs per la gestione degli scarti in UE | Digital and circularity in building – KETs for waste management in the European Union”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 247-258. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13212023 [Accessed 4 April 2026].

Russo Ermolli, S. (2019), “La digitalizzazione dei flussi informativi per la fase operativa – Il caso della Apple Developer Academy | Digital flows of information for the operational phase – The Facility Management of Apple Developer Academy”, in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 18, pp. 235-245. [Online] Available at: doi.org/10.13128/techne-7535 [Accessed 4 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 4 April 2026].

The European House Ambrosetti (2023), *Il ruolo delle soluzioni energetiche integrate per la competitività delle imprese italiane*. [Online] Available at: ambrosetti.eu/scenario-energia/soluzioni-energetiche-competitivita-imprese/ [Accessed 4 April 2026].

Trevisan, A. H., Lobo, A., Guzzo, D., de Vasconcelos Gomes, L. A. and Mascarenhas, J. (2023), “Barriers to employing digital technologies for a circular economy – A multi-level perspective”, in *Journal of Environmental Management*, vol. 332, article 117437, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117437 [Accessed 4 April 2026].

UN – United Nations (2015), *Transforming our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development*, document A/RES/70/1. [Online] Available at: sustainabledevelopment.un.org/index.php?page=viewandtype=111andnr=8496andmenu=35 [Accessed 4 April 2026].

UNEP – United Nations Environment Programme (2011), *Decoupling Natural Resource Use and Environmental Impacts from Economic Growth*, UNEP, Nairobi. [Online] Available at: wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/9816 [Accessed 4 April 2026].

UNI – Ente Italiano di Normazione (2022a), *UNI CEI EN 16247-1:2022 – Energy audits – Part 1 – General requirements*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-cei-en-16247-1-2022 [Accessed 4 April 2026].

UNI – Ente Italiano di Normazione (2022b), *UNI/TS 11820:2022 – Measuring circularity – Methods and indicators for measuring circular processes in organizations*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-ts-11820-2022 [Accessed 4 April 2026].

Zannoni, M., Succini, L., Rosato, L. and Pasini, V. (2024), “Transitional industrial designer – La responsabilità di progettisti e imprese per una transizione sostenibile | Transitional industrial designer – The responsibility of designers and companies for a sustainable transition”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 332-343. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15282024 [Accessed 4 April 2026].