

PIANO TRIENNALE DI REALIZZAZIONE 2025-2027 DELLA RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO NAZIONALE

Presentazione dei progetti di ricerca di cui all'art. 10 comma 2, lettera a) del decreto 26 gennaio 2000

Tema di ricerca 1.6

Titolo del progetto

Efficienza energetica dei prodotti e dei processi industriali

- Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile [ENEA]
- Dipartimento di Chimica, Sapienza Università di Roma [UNIROMA1_DC]
- Dipartimento di Economia – Università degli Studi Roma Tre [UNIROMA3_DIPECO]
- Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica dell'Università di Trento [UNITN_DICAM]
- Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale Università degli Studi di Napoli Federico II [UNINA_DICEA]
- Dipartimento di Ingegneria dell'Impresa “Mario Lucertini” Università degli Studi di Roma “Tor Vergata” [UNIROMA2_DII]
- Dipartimento di Ingegneria Industriale [UNIBO_DIN]
- Dipartimento di Ingegneria Industriale – Università degli Studi di Firenze [UNIFI_DIEF]
- Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Salerno [UNISA_DIIN]
- Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi della Basilicata [UNIBAS_DIING]
- Dipartimento di Scienze del Suolo, della Pianta e degli Alimenti, Università degli Studi di Bari Aldo Moro [UNIBA_DISAAT]
- Dipartimento Ingegneria Chimica Materiali Ambiente Università degli Studi di Roma Sapienza [UNIROMA1_DICMA]

- Dipartimento Ingegneria Chimica Materiali Ambiente Università degli Studi di Roma Sapienza [UNIROMA1_DICMA2]
- Politecnico di Milano [POLIMI_DABC]
- Politecnico di Milano Dipartimento di Ingegneria Gestionale [POLIMI_DIG]
- Politecnico di Milano Dipartimento di Ingegneria Gestionale [POLIMI_DIG2]
- Politecnico di Torino [POLITO_DENERG]
- Università degli Studi de L'Aquila [UNIVAQ_DIIIE]
- Università degli Studi di Firenze [UNIFI_DCUS]
- Università degli Studi di Roma Tor Vergata – Dipartimento di Ingegneria Industriale [UNIROMA2_DIIND]
- Università di Bologna [UNIBO_DA]
- Università Tor Vergata [UNIROMA2_DCST]

Durata del progetto: 36 mesi

Costo proposto: 8.000.000,00 €

2. DATI GENERALI DEL PROGETTO

2.1 Dati progetto

Titolo del progetto

Efficienza energetica dei prodotti e dei processi industriali

Durata del progetto

36 mesi

2.2 Descrizione progetto

Abstract del progetto

Questo progetto si concentra sulla transizione verso modelli di produzione e gestione più efficienti dal punto di vista energetico, integrando soluzioni tecnologiche avanzate per ottimizzare l'uso dell'energia in diversi settori. L'approccio combina innovazione energetica, ottimizzazione dei processi e strategie di decarbonizzazione per ridurre i consumi energetici, migliorare l'efficienza e ottimizzare l'utilizzo delle risorse.

Uno degli obiettivi principali è migliorare le prestazioni energetiche attraverso la valorizzazione delle risorse esistenti e l'adozione di tecnologie avanzate, come sistemi di cattura e riuso della CO₂, produzione di syngas da materiali residuali, e soluzioni innovative per l'energia rinnovabile. Queste tecnologie sono integrate in processi mirati a ridurre le emissioni di gas serra e a ottimizzare il ciclo di vita delle risorse. Particolare attenzione è rivolta alla riqualificazione energetica degli edifici e al miglioramento dei settori industriali strategici, inclusi quelli alimentare e vitivinicolo, con strumenti e metodologie che supportano decisioni basate su analisi dei dati e buone pratiche.

Il progetto affronta inoltre il divario di efficienza energetica nelle PMI italiane, fornendo strumenti personalizzati e strategie per facilitare l'adozione di misure di risparmio energetico. Audit energetici di alta qualità, uniti alla diffusione di buone pratiche e tecniche di Lean Production, consentono alle imprese di identificare inefficienze, ottimizzare i consumi e rafforzare la competitività riducendo i costi energetici.

Nel settore idrico, l'attenzione è rivolta al raggiungimento della neutralità energetica nei processi di trattamento, integrando energie rinnovabili e tecnologie avanzate. Il progetto mira a ridurre significativamente i consumi energetici di questi processi, garantendo al contempo una gestione ottimale delle risorse e l'allineamento agli obiettivi europei di sostenibilità.

Attraverso un approccio integrato e una collaborazione attiva con gli stakeholder, il progetto offre soluzioni innovative per migliorare l'efficienza energetica, ridurre i consumi e sostenere la transizione verso un'economia più sostenibile e resiliente dal punto di vista energetico.

Abstract del progetto ENG

This project focuses on the transition towards more energy-efficient production and management models by integrating advanced technological solutions to optimize energy use across various sectors. The approach combines energy innovation, process optimization, and decarbonization strategies to reduce energy consumption, enhance efficiency, and optimize resource utilization.

One of the main objectives is to improve energy performance by leveraging existing resources and adopting advanced technologies, such as CO₂ capture and reuse systems, syngas production from residual materials, and innovative renewable energy solutions. These technologies are integrated into processes aimed at reducing greenhouse gas emissions and optimizing the resource lifecycle. Particular attention is given to energy retrofitting of buildings and enhancing strategic industrial sectors, including the food and wine industries, through tools and methodologies that support data-driven decisions and best practices.

The project also addresses the energy efficiency gap in Italian SMEs by providing tailored tools and strategies to facilitate the adoption of energy-saving measures. High-quality energy audits, combined with the dissemination of best practices and Lean Production techniques, enable businesses to identify inefficiencies, optimize consumption, and strengthen their competitiveness by reducing energy costs.

In the water sector, the focus is on achieving energy neutrality in treatment processes by integrating renewable energy and advanced technologies. The project aims to significantly reduce the energy consumption of these processes while ensuring optimal resource management and alignment with European sustainability goals.

Through an integrated approach and active collaboration with stakeholders, the project delivers innovative solutions to improve energy efficiency, reduce consumption, and support the transition towards a more sustainable and energy-resilient economy.

2.3 TRL progetto

TRL iniziale: 5

TRL finale: 7

Il TRL complessivo di progetto va da un valore iniziale di 5 ("Tecnologia convalidata in ambiente (industrialmente) rilevante") ad un valore finale di 7 ("Dimostrazione di un prototipo di sistema in ambiente operativo"). Si sottolinea come il progetto si compone di attività più sperimentali a livello di TRL mediamente più basso e attività più applicative a livello di TRL mediamente più elevato.

2.4 Inquadramento del progetto nello stato dell'arte

a) Stato dell'arte nazionale e internazionale relativamente alle attività previste nel progetto

Il tema dell'efficienza energetica e più in generale della sostenibilità ambientale dei consumi energetici negli ultimi anni ha assunto un ruolo sempre più rilevante. Nel 2019 con l'avvio del "Green Deal europeo", l'UE ha deciso di puntare in maniera decisa una "transizione verde" avente come obiettivo il raggiungimento della neutralità climatica entro il 2050. Con il pacchetto "Pronti per il 55%", si assiste ad una accelerazione ulteriore da parte dell'UE; infatti, l'aggiornamento normativo ha reso un obbligo giuridico la riduzione delle emissioni serra Europee di almeno il 55% entro il 2030.

Le risultanze delle politiche nazionali a supporto dell'efficientamento energetico del settore industriale forniscono un quadro esaustivo delle soluzioni e degli interventi possibili per efficientare i processi produttivi nel nostro Paese ed evidenzia il potenziale di investimenti attivabili nel settore delle costruzioni e della produzione di componenti e impianti ad alta efficienza, prevalentemente fornita da industrie nazionali. Per intensificare tali investimenti, soprattutto per le PMI, è necessario promuovere attività di ricerca e sviluppo per favorire l'adozione di metodologie di analisi, controllo e gestione più efficienti e innovative che privilegino il tema del costo/efficacia (euro/energia risparmiata o €/CO₂ risparmiata), anche attraverso l'emanazione di nuove politiche di supporto.

Il progetto si inserisce in tale contesto, andando ad arricchire un filone di ricerca nazionale e internazionale molto prolifico negli ultimi anni, come testimoniato dalla grande attenzione rivolta a questi argomenti dalle più recenti call for proposal a livello europeo (Horizon Europe - HEU).

In particolare, i temi di interesse riguarderanno: lo sviluppo di metodologie e strumenti per l'efficientamento di settori e industriali (con uno specifico focus sulle PMI), lo sviluppo di metodi e standard per la progettazione ecocompatibile e la valutazione dell'impatto energetico e funzionale dei prodotti connessi all'energia, lo sviluppo di tecnologie per l'elettrificazione dei processi, il recupero e riuso del calore di scarto, la gassificazione con cattura di emissioni CO₂, prevalentemente per i settori hard to abate e l'efficientamento della filiera del riutilizzo idrico.

Nell'ambito del WP1 ci si occuperà di efficienza energetica per i prodotti connessi all'energia nei settori industriale, professionale e domestico (LA 1.1), principalmente etichettatura energetica [1] ed ecodesign [2], tematiche che sono considerate prioritarie per la realizzazione degli obiettivi dell'economia circolare e della decarbonizzazione. La sorveglianza del mercato a livello nazionale ed europeo è necessaria per garantire l'applicazione delle misure politiche definite per i diversi prodotti, il risparmio di energia & altre risorse e la conformità agli specifici requisiti di compatibilità ambientale previsti dai Regolamenti dei singoli prodotti. Parallelamente la predisposizione di nuovi standard mondiali, europei e nazionali è fondamentale per poter misurare con la necessaria accuratezza l'efficienza energetica, le prestazioni funzionali e le prestazioni ambientali di questi stessi prodotti.

Il nuovo Regolamento quadro (UE) 2014/1781 del Parlamento europeo e del Consiglio [3] è in vigore dal luglio 2024. Esso definisce le condizioni specifiche per la progettazione ecosostenibile dei prodotti immessi nel mercato interno o messi in servizio, l'introduzione del passaporto digitale dei prodotti, criteri obbligatori per gli appalti pubblici verdi, l'abolizione della distruzione dei beni invenduti e il rafforzamento della vigilanza del mercato e dei controlli doganali. Tuttavia, l'Articolo 79 [4] stabilisce che la Direttiva ecodesign 2009/125/CE rimanga in vigore fino alla fine del 2026 per alcuni apparecchi [4] in termini di procedure, modalità operative e scopo del Consultation Forum, e voto degli Stati Membri nell'ambito del Regulatory Committee. In questo ambito si situa la continuazione e l'estensione del supporto tecnico di ENEA al MASE e al MiMiT sui tavoli negoziali a Bruxelles per la definizione della nuova legislazione comunitaria, e a livello nazionale per il monitoraggio della sua applicazione e la verifica della conformità dei prodotti.

In particolare, le attività sono focalizzate (i) sullo studio e sviluppo di metodi e strumenti legislativi - Atti delegati e atti di implementazione nella forma di Regolamenti immediatamente applicabili sul territorio dell'UE - per la valutazione dell'impatto ambientale, energetico e funzionale dei prodotti connessi all'energia e dei nuovi prodotti ecosostenibili, (ii) sul monitoraggio e controllo dell'applicazione di atti per i prodotti sul mercato nazionale ed europeo e (iii) sulla preparazione di nuovi standard mondiali, europei e nazionali per poter misurare in modo accurato i parametri eco-prestazionali considerati nella legislazione comunitaria. Le attività si sviluppano sulla base di quanto realizzato nel triennio 2022-2024, andando promuovere l'evoluzione tecnologica necessaria per il rispetto dei requisiti di ecodesign e di etichettatura energetica.

Le attività previste comprendono sia la revisione di Regolamenti di prodotto esistenti nell'ambito della Direttiva 2009/125/CE per i prodotti del settore domestico, professionale e commerciale per i prodotti elencati nell'Articolo 79 del Regolamento 2024/1781 (pannelli fotovoltaici, apparecchi per il riscaldamento ambiente e apparecchi per il riscaldamento misti, scaldacqua, apparecchi per il riscaldamento ambiente locale a combustibile solido, condizionatori d'aria e le pompe di calore aria-aria, ventilatori, caldaie a combustibile solido,

prodotti di riscaldamento e raffrescamento dell'aria, unità di ventilazione, aspirapolvere, apparecchi di cottura, pompe ad acqua, ventilatori industriali, circolatori, alimentatori esterni, computer, server e prodotti di archiviazione dati, trasformatori di potenza, apparecchiature per la refrigerazione professionale, apparecchiature per il trattamento delle immagini) con requisiti più stringenti dal punto di vista energetico, delle prestazioni funzionali, e all'efficienza delle risorse a cui si aggiungono nuovi requisiti relativi all'efficienza dei materiali e all'economia circolare. Il miglioramento dell'efficienza energetica si traduce nel risparmio di energia per il funzionamento dei diversi apparecchi senza diminuirne le prestazioni funzionali, mentre il prolungamento della vita dei nuovi apparecchi più durabili, affidabili e riparabili comporta la riduzione dell'energia necessaria per la loro produzione a scopo di sostituzione, una minore quantità di rifiuti da avviare allo smaltimento finale e la riduzione dell'estrazione, trasporto e uso delle materie prime (fra cui le materie prime critiche). In parallelo il supporto alla sorveglianza del mercato cerca di limitare i prodotti non-conformi immessi sul mercato, garantendo così di raggiungere il risparmio di energia/risorse e la compatibilità ambientale ipotizzate dalla legislazione, mentre la preparazione di nuovi standard mondiali, europei e nazionali è cruciale per poter misurare – e quindi verificare e migliorare – i parametri eco-prestazionali considerati.

Si tratta di azioni per il miglioramento continuo dell'efficienza energetica e delle prestazioni funzionali di prodotti comunque maturi e di largo consumo nei settori domestico, professionale e industriale, da cui un TRL iniziale medio di 6 considerando un TRL iniziale di 5 per i prodotti per i quali viene per la prima volta definito un regolamento di ecodesign e/o di etichettatura energetica e di 7 per i prodotti già oggetto di precedenti regolamenti per esempio definiti nel triennio 2022-2024. L'applicazione della legislazione porterà ad un TRL medio finale di 7, considerando un TRL di 6 per i nuovi prodotti e un TRL di 8 per gli apparecchi già oggetto di precedenti regolamenti i cui criteri esistenti sono rivisti in modo restrittivo e a cui si aggiungono nuovi criteri rispondenti ai principi dell'economia circolare quali durabilità, affidabilità, smontabilità, riusabilità, riparabilità (per es. attraverso l' "indice di riparabilità" che sarà obbligatorio dal giugno 2025 per smartphone e tablet ed è in corso di definizione per le asciugatrici domestiche e i computer.

All'interno del WP ci si occuperà tra le altre cose di calore industriale (LA 1.2 – 1.4), in quanto questo svolge un ruolo fondamentale per il corretto svolgimento di numerosi processi produttivi, tra cui in particolare il riscaldamento di fluidi, i trattamenti termici, la distillazione, l'essiccamento e le reazioni chimiche. A causa della loro notevole eterogeneità, i processi industriali richiedono calore secondo diverse modalità (utilizzo del calore diretto o indiretto) e con temperature operative che vanno da circa 30°C a valori superiori ai 1000°C. A differenza di quanto accade per la produzione di energia elettrica, la generazione del calore di processo è ancora oggi quasi interamente basata sull'uso di combustibili fossili (5), contribuendo così a circa un terzo delle emissioni di CO₂ del settore industriale (6). Pertanto, la decarbonizzazione del calore di processo può offrire un contributo decisivo al raggiungimento degli obiettivi di neutralità climatica e determinare al tempo stesso un rafforzamento della competitività del settore. Sebbene siano attualmente disponibili numerose tecnologie di decarbonizzazione (7), queste vengono raramente impiegate, a causa di una scarsa propensione agli investimenti, nell'attuale contesto di incertezza economica, e alla mancanza di meccanismi di incentivazione (8).

Esiste, inoltre, ancora una limitata consapevolezza delle potenzialità di integrazione delle tecnologie di decarbonizzazione in relazione alle caratteristiche dei processi produttivi, aspetto che rappresenta un prerequisito fondamentale per la loro implementazione su larga scala (9). Tale barriera conoscitiva risulta ancora più sentita per le tecnologie emergenti o le soluzioni basate sulla produzione e l'accumulo di energia termica tramite strategie di flessibilità energetica.

Altro aspetto non trascurabile riguarda la difficoltà per le aziende di identificare le soluzioni e le condizioni operative ottimali per la decarbonizzazione dei fabbisogni termici di processo, in un contesto tecnologico, normativo e di mercato in continua evoluzione. In particolare per le LA 1.2 e 1.3, l'analisi della letteratura ha evidenziato la necessità di approfondire lo studio delle soluzioni di decarbonizzazione del calore industriale, al fine di acquisire una maggiore consapevolezza circa le loro potenzialità tecnico-economiche, in relazione alle applicazioni indagate, e di promuoverne l'effettiva implementazione. Tale necessità è particolarmente sentita per le tecnologie emergenti e per le soluzioni che prevedono la produzione e l'accumulo di energia termica tramite strategie di flessibilità energetica.

I modelli esistenti in letteratura, infatti, si focalizzano molto spesso sullo studio di processi industriali specifici o sull'applicazione di una determinata tipologia di soluzione di decarbonizzazione, risultando quindi poco flessibili e inadatti a realizzare un confronto al variare delle caratteristiche del calore richiesto dal processo indagato o al variare del tipo di tecnologia adottata e dei relativi parametri prestazionali.

Con l'obiettivo di superare le barriere conoscitive che ancora oggi limitano la pratica implementazione di soluzioni di decarbonizzazione del calore industriale, le LA 1.2 ed 1.3 si propongono di sviluppare dei modelli in grado di indagare un insieme di soluzioni e strategie di decarbonizzazione, tra cui quelle basate sull'impiego di tecnologie rinnovabili e sull'elettrificazione diretta o indiretta del calore. Inoltre, tali modelli consentiranno anche di indagare le opportunità offerte dall'interazione con la rete elettrica, attraverso l'uso di strategie di demand response, in combinazione con sistemi di accumulo termico.

Rispetto ai modelli esistenti in letteratura, i modelli sviluppati nell'ambito delle LA 1.2 e 1.3 saranno caratterizzati da maggiore flessibilità e generalità, e potranno quindi essere applicati a contesti industriali diversi per localizzazione, condizioni economiche e caratteristiche dei processi produttivi. per la 1.4 si evidenzia che nell'evoluzione dell'integrazione delle fonti rinnovabili all'interno dei processi industriali, i primi studi si sono focalizzati principalmente sull'ambito elettrico, con particolare attenzione all'ottimizzazione dei flussi di potenza e allo sfruttamento di sistemi di accumulo. Sul fronte termico, le ricerche iniziali si sono invece concentrate sull'impiego di solare

termico e sul soddisfacimento diretto del fabbisogno di calore di processo. In questo contesto, l'obiettivo è stato spesso quello di ridurre i consumi di combustibili fossili, senza però prendere pienamente in considerazione la flessibilità necessaria per supportare l'integrazione su larga scala di rinnovabili variabili.

Storicamente, la parte termica è stata affrontata soprattutto in ottica di recupero e di efficienza energetica, attraverso l'impiego di tecniche di recupero del calore di scarto (Waste Heat Recovery) e l'ottimizzazione dei bilanci termici, piuttosto che per fornire modulazione o accumulo che potessero adattarsi alla disponibilità intermittente delle rinnovabili. Negli ultimi anni, è emerso il concetto di ottimizzazione multisettoriale (o sector coupling), che mira a unire in un'unica strategia l'elettricità, il calore e altri vettori energetici, così da valorizzare sinergie e aumentare la flessibilità complessiva dei siti industriali.

Il progetto qui descritto si propone pertanto di sviluppare un tool capace di effettuare un'ottimizzazione dinamica intrasettoriale all'avanguardia, in avanzamento con quanto già sviluppato nei precedenti PTR, per massimizzare l'integrazione delle fonti rinnovabili e migliorare l'uso efficiente dell'energia nei contesti industriali.

La recente riformulazione della Direttiva sull'efficienza energetica identifica il settore delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione (TIC) come un settore di crescente importanza nel contesto della riduzione dei consumi energetici della UE [10,11,12]. Nel 2018, il consumo energetico dei data center nell'UE era di 76,8 TWh. Si prevede che aumenterà in modo significativo entro il 2030: nel 2018 era previsto un aumento del 28%; con lo sviluppo dell'Intelligenza Artificiale, è previsto un aumento di 2 o addirittura 3 volte per alcuni paesi. Questo aumento in termini assoluti della sua impronta energetica può essere visto anche in termini relativi: all'interno dell'Unione, i data center hanno rappresentato il 2,7% della domanda di elettricità nel 2018 e raggiungeranno almeno il 3,2% entro il 2030 se lo sviluppo continua con l'attuale traiettoria. Si ritiene che queste cifre siano inferiori a quanto accadrà nella realtà, data la forte crescita di servizi e tecnologie emergenti come intelligenza artificiale, streaming, cloud gaming, blockchain, apprendimento automatico e realtà virtuale. Ciò potrebbe comportare costi operativi significativi, impatti sulla sicurezza dell'alimentazione nell'ecosistema energetico e minacce ambientali. L'ottimizzazione di un Data Center (DC), in particolare la classe di cluster di Supercalcolo (High-Performance Computing, HPC), rappresenta pertanto una preoccupazione significativa. L'integrazione di IoT, sensori e dispositivi intelligenti ha contribuito in modo significativo alla generazione di vasti dati di gestione operativa da vari aspetti (energetica, termica e computazionale) del settore DC. Pertanto, il monitoraggio, la modellazione e l'elaborazione efficaci di questi dati potrebbero migliorare l'efficienza energetica, garantire l'affidabilità, ridurre i costi operativi e gestire in modo sostenibile i DC (LA 1.5). In tale contesto il panorama delle metriche e Key Performance Indicators (KPIs) per valutare i consumi energetici, ed allo stesso tempo per incrementarne l'efficienza senza alterare le prestazioni dal punto di vista computazionale è ancora in via di sviluppo. Anche lo sfruttamento efficiente delle risorse di calcolo da parte del software rappresenta una preoccupazione e una opportunità di efficientamento energetico di processo [13]. Per quanto riguarda la profilazione energetica di software, infatti, sono già disponibili librerie del sistema operativo che si appoggiano su contatori nativamente presenti nello hardware che ne registrano in tempo reale i consumi di alcune porzioni. Alcune metodiche prevedono la modifica (manuale o automatica) del codice sorgente con chiamate alle suddette librerie (e che quindi deve essere ricompilato); altre metodiche prevedono l'utilizzo automatico di "wrapper" che modificano o intercettano l'esecuzione del codice eseguibile per dirottarlo verso le suddette librerie (e che quindi non deve essere ricompilato). In alternativa, se il sistema di monitoraggio dell'infrastruttura è sufficientemente fine e lo consente, questo può essere utilizzato per profilare in maniera trasparente il software. Queste metodiche alterano l'esecuzione del software o effettuano misurazioni con diverse granularità e affidabilità e forniscono, in linea di principio, stime dei consumi non perfettamente sovrapponibili.

Inoltre, Le tecniche utilizzate per il monitoraggio dei cluster HPC-ENEA, CRESCO 7 e CRESCO 8, la raccolta dei consumi reali (energetici, termici, computazionali) e la loro modellazione ed elaborazione rappresentano un importante avanzamento in termini di stato dell'arte considerando che la letteratura presenta pochi, se non nulli, casi studio reali con le relative analisi. Pertanto, tale caso studio ENEA permetterà di fare notevoli passi avanti in termini di efficienza energetica e sostenibilità nell'ambito dei Data Center attraverso la riduzione dei costi energetici, termici ed operativi, la loro gestione e l'aumento grazie all'analisi dati della loro affidabilità. In tale contesto il panorama delle metriche e Key Performance Indicators (KPIs) per valutare i consumi energetici, ed allo stesso tempo per incrementarne l'efficienza senza alterare le prestazioni dal punto di vista computazionale è ancora in via di sviluppo.

La profilazione energetica di alcuni casi studio potrà dare indicazioni operative per efficientare software esistente. Tutto ciò inciderà su quelle che sono le sfide in ambito della transizione energetica e digitale.

L'industria alimentare (LA 1.6 - 1.8) rappresenta uno dei principali consumatori di energia a livello globale, con una forte dipendenza dai combustibili fossili. I costi energetici rappresentano una percentuale significativa dei costi totali di produzione, tra il 20-50% [14]. Si stima che le attività industriali nel settore alimentare contribuiscono per circa 0.5 GtCO₂ equivalenti all'anno, pari al 3.6% delle emissioni globali [15]. In Italia, il settore alimentare si posiziona al primo posto in termini di valore del fatturato, raggiungendo nel 2022 un totale di 179 miliardi di euro. Inoltre, si colloca al secondo posto per il numero di imprese, che supera le 60000 unità, e per il numero di addetti, con circa mezzo milione di lavoratori (Rapporto Federalimentare-Censis 2023). Secondo il Rapporto Annuale sull'Efficienza Energetica 2022 redatto dall'Enea e basato su dati Eurostat, l'industria agro-alimentare italiana ha assorbito complessivamente l'11.6% dei consumi finali dell'industria nel 2020, pari a 2.8 Mtep. Negli ultimi anni sono state sviluppate tecnologie non termiche in sostituzione ai processi termici più energivori. Tra questi, i campi elettrici pulsati, la luce pulsata, ultrasuoni ma anche trattamenti termici innovativi quali il riscaldamento

ohmico e quello alle microonde possono essere una valida alternativa [16,17]. Essi consentono una riduzione dei consumi energetici, ridotte emissioni ed elevata qualità degli alimenti trattati. Tuttavia, tali soluzioni sono poco diffuse a causa della mancanza di conoscenza ed informazione sui costi e sui benefici energetici, economici e di prodotto da parte degli operatori del settore alimentare. Attualmente, il materiale informativo utile a supportare l'adozione delle tecnologie innovative è scarso.

Le Linee di Attività 1.6 e 1.7 del PTR 2025–2027 si pongono in continuità diretta con le attività sviluppate nel triennio PTR 2022–2024, proponendo un'evoluzione significativa sotto il profilo sia metodologico sia applicativo. Nel precedente triennio era stata condotta un'analisi preliminare, basata su letteratura e primi casi studio, di tecnologie non termiche – come i Campi Elettrici Pulsati (PEF, Pulsed Electric Fields), gli Ultrasuoni (US) e l'Alta Pressione Idrostatica (HHP, High Hydrostatic Pressure) – e di trattamenti termici innovativi – come il Riscaldamento Ohmico (OH, Ohmic Heating) e la Radiazione Infrarossa (IR, Infrared Radiation) – in sostituzione dei trattamenti convenzionali ad alta intensità energetica. Contestualmente, era stata introdotta la metodologia MVEE (Metodologia di Valutazione Energetica ed Economica), applicata in forma semplificata e validata su scenari specifici.

Nel PTR 25–27, la LA 1.6 amplia l'ambito di analisi a nuove categorie alimentari (prodotti solidi, liquidi e viscosi), consolidando e affinando l'insieme degli indicatori tecnici, economici e ambientali già introdotti, e aggiornando la raccolta di buone pratiche a partire da fonti industriali e dati reali. Viene inoltre potenziata la componente di confronto tra tecnologie alternative e tradizionali tramite l'integrazione di nuovi indicatori (es. impatto sulla qualità nutrizionale, consumo idrico, resa produttiva) e l'estensione dell'analisi alla valorizzazione di biomasse e sottoprodotti (es. scarti da vinificazione e carciofi), in collaborazione con UNISA_DIIN1 (LA 1.8). Un ulteriore rafforzamento rispetto al triennio precedente è rappresentato dall'uso esteso dei dati ENEA sulle diagnosi energetiche del settore alimentare, che consente di consolidare il legame tra l'analisi scientifica e il contesto operativo reale, integrando informazioni aggiornate per supportare decisioni più informate e accurate.

La LA 1.7 sviluppa e rende operativa la metodologia MVEE tramite la realizzazione di un software di supporto alle decisioni aziendali, che rappresenta un'evoluzione sostanziale rispetto al PTR 22–24, dove la metodologia era disponibile solo in forma tabellare. Il software sarà progettato per confrontare scenari tecnologici alternativi, eseguire bilanci di massa ed energia, valutare indicatori prestazionali e generare analisi costi-benefici su casi di studio specifici. Sarà inoltre corredato da strumenti divulgativi (guide, infografiche, tabelle comparative) pensati per il trasferimento tecnologico verso le imprese agro-alimentari.

Nel complesso, il progetto amplia e rafforza le conoscenze acquisite nel precedente triennio, contribuendo in modo originale all'avanzamento dello stato dell'arte attraverso la sistematizzazione dei dati, la standardizzazione degli strumenti di analisi, e lo sviluppo di soluzioni concrete a supporto della transizione energetica e ambientale del comparto alimentare. La Linea di Attività 1.8 del PTR 25-27 prosegue in continuità con le attività avviate nel triennio precedente (PTR 22-24), con l'obiettivo di consolidare e ampliare l'approccio integrato e innovativo già adottato per l'analisi dei processi di trasformazione del pomodoro. Nel precedente triennio, questo approccio ha dimostrato, in condizioni operative specifiche, come l'impiego di tecnologie innovative – sia termiche (riscaldamento ohmico - OH, radiazione infrarossa - IR) che non termiche (campi elettrici pulsati - PEF, ultrasuoni - US, trattamenti ad alta pressione - HPP) – possa migliorare la sostenibilità dei processi produttivi, con applicazioni significative sia nella pelatura del pomodoro sia nell'estrazione di composti ad alto valore aggiunto dai sottoprodotti della lavorazione.

Nel PTR 25-27, lo stesso approccio verrà esteso ad altri processi dell'industria alimentare caratterizzati da elevato consumo energetico e impatto ambientale, in particolare quelli legati all'essiccamento. Inoltre, l'analisi dei residui di lavorazione sarà applicata anche a scarti agroalimentari diversi dal pomodoro, come, per esempio, quelli derivanti dalla vinificazione o dalla trasformazione del carciofo.

L'efficacia dei processi innovativi sarà valutata in modo comparativo rispetto a quelli tradizionali, attraverso l'impiego di specifici indicatori energetici, economici e ambientali, aggiornati e integrati con quelli già definiti nel PTR 22-24. Saranno utilizzati simulatori di processo e condotte analisi del ciclo di vita (LCA) su casi di studio già analizzati nel triennio precedente (PTR 22-24) e su quelli in fase di sviluppo (PTR 25-27), per approfondire l'impatto ambientale delle tecnologie esaminate.

I dati raccolti saranno messi a disposizione delle Linee di Attività 1.6 e 1.7 di ENEA, per supportare l'ottimizzazione della Metodologia di Valutazione Energetica ed Economica (MVEE), contribuendo al suo perfezionamento e alla sua applicazione in contesti reali, in particolare nei processi di essiccazione e nella valorizzazione degli scarti agroalimentari.

Nel suo complesso, il progetto estende e consolida i risultati ottenuti nel triennio precedente, apportando un contributo originale al progresso dello stato dell'arte. Ciò avviene attraverso l'applicazione dell'approccio sviluppato a nuovi processi e matrici alimentari, la definizione di strumenti analitici standardizzati, l'impiego di simulatori di processo, l'integrazione dell'analisi del ciclo di vita (LCA) e la messa a punto di soluzioni operative a sostegno della transizione energetica e ambientale del settore agroalimentare.

Le filiere di produzione del vino e dell'olio di oliva (LA 1.9 – 1.11) possono contribuire alla transizione energetica attraverso l'adozione di pratiche sostenibili e il miglioramento dell'efficienza energetica. La combinazione di politiche agricole come la nuova Politica Agricola Comune (PAC 2023-2027), che introduce gli eco-schemi, e iniziative specifiche di efficientamento energetico, come quelle promosse da ENEA, contribuiscono a ridurre l'impatto ambientale delle filiere agricole e al contempo contribuiscono a promuovere la competitività delle aziende sui mercati globali. Le soluzioni tecnologiche già presenti sul mercato includono, tra l'altro, sistemi di cogenerazione basati su biomassa e tecnologie di refrigerazione avanzate per ridurre i costi operativi e le emissioni di CO₂. In entrambi i settori, l'automazione dei processi produttivi, il monitoraggio dei consumi e l'adozione di energie rinnovabili sono metodologie consolidate per migliorare la competitività e la sostenibilità ambientale. Tuttavia, mancano studi sistematici e completi relativi alla classificazione degli indicatori di prestazione energetica dei settori considerati, in funzione della tipologia e delle caratteristiche specifiche dei processi di produzione, per

individuare benchmark utili a impostare confronti corretti. È necessario fornire strumenti e soluzioni efficaci in grado di colmare il divario tra le attuali pratiche di efficientamento energetico e le migliori soluzioni disponibili nei settori considerati.

L'Unione Europea detiene circa la metà della superficie olivicola, la Spagna la produzione mondiale di olio d'oliva seguita da Italia e Grecia [17]. Il settore olivicolo-oleario ha un'importanza economica, ambientale, sociale e culturale fondamentale per l'Italia. Esistono diverse tipologie di organizzazione della produzione di olio: grandi aziende che operano su larga scala con standard qualitativi elevati, grazie a una filiera integrata, e piccole e medie imprese che si concentrano su produzioni di alta gamma, destinate a consumatori attenti alla qualità e con reddito più alto. Attualmente, la produzione di olio di oliva in Italia avviene in circa 4.500 frantoi, con una produzione media annua che si assesta intorno alle 300 mila tonnellate (media degli ultimi quattro anni). La maggior parte degli impianti, circa il 70%, si trova nelle regioni del sud Italia, dove si concentra oltre l'80% della produzione di olio extravergine nazionale [18]. I frantoi stanno subendo un rapido ammodernamento tecnologico e hanno un ruolo importante nella sostenibilità della filiera attraverso il recupero dei sottoprodotti di lavorazione e l'attenzione al risparmio energetico e idrico. L'energia elettrica è il principale vettore energetico (anche oltre il 90% dei consumi) utilizzato principalmente per le fasi di separazione e preparazione della pasta d'olio. L'energia termica è prevalente nelle fasi di molitura e preparazione della pasta d'olio, fasi in cui si possono utilizzare i noccioli d'oliva per alimentare caldaie a biomassa [19]. L'industria vinicola è un settore ad alta intensità energetica. Il progetto europeo TESLA ha fornito una panoramica sull'efficienza energetica nel settore vitivinicolo europeo, evidenziando come circa il 50% del consumo energetico sia legato ai processi di raffreddamento per la fermentazione e l'energia elettrica rappresenti circa il 90% dei consumi totali [20, 21].

Studi e ricerche evidenziano che la sostituzione dei refrigeratori con altri più efficienti, l'installazione di azionamenti a velocità variabile sulle pompe e l'implementazione di sistemi di monitoraggio e tecnologie IoT sono misure con il maggiore impatto quantitativo sull'efficienza energetica nelle aziende vitivinicole. Altri studi hanno evidenziato differenze significative nei consumi energetici di cantine simili indicando ampi margini di miglioramento dell'efficienza energetica [22, 23].

In particolare per le LA 1.9 e LA 1.10, si evidenzia che Nel triennio PTR 2022-24 l'ENEA si è concentrata sull'analisi dell'efficienza energetica nel settore vitivinicolo siciliano. L'attività ha comportato un censimento delle aziende vitivinicole siciliane in collaborazione con l'IRVO, la distribuzione di questionari per raccogliere dati sui consumi energetici e i processi produttivi, l'analisi dei dati raccolti, la selezione di "aziende tipo" per analisi più approfondite, il calcolo dell'Indice di Prestazione Energetica (IPE), e interviste in loco per identificare le fasi più energivore. Un risultato significativo è stata la redazione di una "Guida per l'efficientamento energetico delle aziende vitivinicole" focalizzata sulla Sicilia, contenente un catalogo di Best Practice e tecnologie efficienti, analisi di fattibilità tecnico-economica e casi studio.

Nel triennio 2025-27 l'obiettivo è quello di estendere la metodologia di analisi sviluppata in Sicilia all'intero territorio nazionale sia per il settore vitivinicolo che per la filiera olivicolo-olearia italiana. Questo rappresenta un avanzamento significativo rispetto allo stato dell'arte, in quanto si passerà da uno studio regionale ad una caratterizzazione energetica su scala nazionale di due importanti settori agro-industriali italiani. Le attività prevedono un censimento e una classificazione preliminare delle aziende a livello nazionale in entrambi i settori, la creazione di questionari energetici specifici per il settore vitivinicolo e olivicolo-oleario, l'identificazione e l'analisi di casi studio a livello nazionale, il monitoraggio dei consumi energetici in aziende selezionate e lo sviluppo di benchmark energetici consistenti e modelli di efficientamento replicabili validi su scala nazionale. Il risultato più tangibile sarà l'aggiornamento ed estensione della "Guida per l'efficientamento energetico", che comprenderà ora l'intero settore vitivinicolo nazionale e una nuova sezione dedicata all'efficienza energetica dei frantoi oleari. Rispetto agli studi precedenti, che ha una portata geografica o settoriale più limitata, questo progetto mira a fornire una comprensione più completa e comparativa della gestione energetica a livello dei processi produttivi in due filiere chiave dell'agro-industria italiana, offrendo un supporto più efficace per la scelta e la replicazione delle migliori pratiche. La definizione di benchmark a livello nazionale e la disponibilità di una guida aggiornata per entrambi i settori intende costituire un riferimento per gli stakeholder, in particolar modo tecnici, aziende e decisori. Nel triennio 2025-27 l'attività della LA 1.11 si concentrerà sull'analisi dettagliata dei consumi energetici negli oleifici e sulla definizione di criteri di progettazione e gestione per sistemi di autoconsumo di energia da fonti rinnovabili specificamente per questo settore. Questo include l'esplorazione di diverse tecnologie rinnovabili come il solare termico e fotovoltaico, le pompe di calore geotermiche e le caldaie a biomassa alimentate con sottoprodotti della lavorazione delle olive, come il nocciolino. Un aspetto innovativo è rappresentato dall'analisi di casi studio concreti di implementazione di tali sistemi, incluso un caso gestito congiuntamente dall'Università di Bari e dall'ENEA (l'impianto di poligenerazione). L'obiettivo finale è la produzione di un rapporto tecnico dettagliato che descriva le attività condotte e i risultati ottenuti, fornendo criteri progettuali e gestionali specifici per l'autoconsumo da FER negli oleifici. Questo rappresenta un avanzamento rispetto allo stato dell'arte in quanto si focalizza sulla fornitura di indicazioni operative e personalizzate per un settore specifico, contribuendo alla sua transizione verso una maggiore autonomia energetica e sostenibilità. La definizione di criteri progettuali basati su analisi di casi reali e la considerazione di diverse tecnologie rinnovabili offrono un valore aggiunto significativo per gli operatori del settore olivicolo-oleario. Il TRL è previsto aumentare da 5 a 7, indicando la validazione dei criteri progettuali attraverso l'analisi di casi studio e la preparazione di linee guida pratiche.

L'Off-Site Construction (OSC) è un nuovo approccio alla costruzione e alla riqualificazione dell'ambiente costruito (LA 1.12 - 1.16), che riduce l'intensità delle attività svolte in cantiere e le localizza per lo più in fabbrica, un ambiente controllato in cui è possibile raggiungere standard più elevati di efficienza dei processi, qualità e sicurezza [24]. Sebbene l'OSC sia ancora in una fase relativamente precoce di implementazione in molti Paesi, negli ultimi anni questa tecnica di costruzione ha sempre più attirato l'attenzione di accademici e

professionisti, grazie al suo potenziale nel raggiungere migliori prestazioni di progetto [25]. In particolare, è stato osservato che l'OSC consente di ridurre la durata del progetto e gli scarti di costruzione, e di facilitare il processo di costruzione anche laddove è necessario adottare misure organizzative specifiche [26]. Diversi studi hanno confrontato le prestazioni dell'OSC e dei metodi costruttivi convenzionali in termini di costi [27], di prestazioni energetiche [26] e di sostenibilità complessiva del processo [28, 29], fattore decisionale sempre più cruciale [30]: appare evidente che l'OSC può essere un potente strumento nella sfida di riqualificazione che l'Europa dovrà affrontare nei prossimi anni [31]. Pertanto, la riqualificazione degli edifici è un obiettivo chiave e l'attivazione e il sostegno è fondamentale per almeno triplicare l'attuale tasso di ristrutturazione [32].

L'OSC si basa fortemente sulla modularità dei prodotti, prefabbricati e poi assemblati in loco e la sua fattibilità dipende da un cambio di paradigma nella progettazione, nella produzione, nell'ottimizzazione della catena di fornitura e nella valutazione del ciclo di vita [33]. Pertanto, è necessaria una strategia integrata per la pianificazione e l'ottimizzazione della produzione lungo l'intera catena di fornitura [34]. Tuttavia, ci sono ancora grandi difficoltà nello sviluppo di catene del valore dell'OSC legati alla mancanza di: (i) conoscenza da parte della manodopera e in generale degli stakeholder coinvolti nel settore delle costruzioni; (ii) predisposizione e preparazione al cambiamento; (iii) modelli di approvvigionamento adeguati; (iv) visibilità end-to-end della catena di fornitura per identificare le incertezze; e (v) mancanza di standard nazionali o governativi [35-40]. L'implementazione dell'OSC nel contesto italiano presenta ulteriori sfide. In primo luogo, il patrimonio italiano è costituito da oltre 12 milioni di edifici, di cui il 65% risale a prima del 1976 e il 62% presenta una bassa prestazione energetica (etichette energetiche E, F e G). In secondo luogo, molti italiani sono proprietari di case e il patrimonio immobiliare è quindi molto frammentato, il che comporta un'ulteriore barriera per organizzare le grandi riqualificazioni. Inoltre, la filiera nazionale delle costruzioni e delle ristrutturazioni edilizie presenta una notevole frammentazione, ed una limitata capacità produttiva industriale di soluzioni.

In particolare, per le LA 1.12 e LA 1.13 Nel triennio 2025-2027, le attività si concentreranno sul rafforzamento e sull'ulteriore sviluppo delle attività avviate nel triennio 2022-2024, i cui risultati costituiscono lo stato dell'arte e il punto di partenza per l'attività. Durante il triennio precedente, sono stati raggiunti importanti traguardi, tra cui la mappatura delle filiere OSC, l'analisi energetica dei processi produttivi, l'identificazione di buone pratiche e l'avvio dell'Osservatorio Nazionale OFFICIO. Partendo da questi risultati, il nuovo triennio prevede il potenziamento dell'Osservatorio, con un focus sul coinvolgimento trasversale degli stakeholder e sull'ampliamento della raccolta dati. Saranno poi sviluppate e perfezionate linee guida pratiche per l'implementazione delle soluzioni OSC a livello nazionale, arricchite dalla collaborazione continua con partner universitari e stakeholder. Inoltre, l'analisi delle buone pratiche proseguirà con l'approfondimento di casi studio focalizzati su aziende rappresentative del mercato OSC, al fine di identificare modelli di business sostenibili e soluzioni per l'efficienza energetica. Infine, sarà potenziato il sito web del progetto, trasformandolo in uno strumento interattivo per favorire la comunicazione bilaterale e lo scambio di informazioni tra i vari attori del settore. Queste attività contribuiranno all'integrazione e ottimizzazione delle soluzioni OSC, promuovendo la loro adozione nel mercato italiano. Per la LA 1.14 lo stato dell'arte è stato finora concentrato sulle filiere di legno ed acciaio, attualmente più sviluppate, con un'analisi qualitativa della viabilità tecnica delle soluzioni OSC. L'attività di questo triennio presenta due novità sullo stato dell'arte. Da un lato, l'analisi si concentrerà nella estensione oltre queste filiere a tutte le soluzioni potenzialmente disponibili sul mercato, includendo altri materiali e, soprattutto, soluzioni multimateriale. Quindi si realizzerà la prima mappatura italiana dei principali casi di riqualificazione energetica conclusi, o in stato di esecuzione, distinguendone alcuni principali macro-caratteristiche, come per esempio, la distinzione tra edilizia pubblica e privata, il principale sistema tecnologico utilizzato nella prefabbricazione, ecc. Da l'altro lato, si svilupperà per la prima volta, un'analisi tecnico-economico quantitativo delle soluzioni commerciali o pre-commerciali del mercato OSC nazionale. Per sviluppare quest'analisi si approfondiranno in dettaglio, dai punti di vista architettonico e di processo, una selezione delle migliori pratiche mappate. Quest'analisi tecnico-economica verrà implementata su un modello di edificio rappresentativo e condiviso al fine di evidenziare le situazioni in cui è auspicabile l'utilizzo di soluzioni prefabbricate. Tale attività si baserà sulla raccolta di informazioni basate su esperienze reali e si svolgerà coinvolgendo almeno due aziende già operanti nel settore OSC e che intendono condividere dal punto di vista operativo l'esperienza acquisita nell'esecuzione di casi di studio reali. Per la LA 1.15 si evidenzia che rispetto alla filiera del costruito tradizionale, un efficace e corretto funzionamento delle filiere OSC richiede una strategia integrata di pianificazione e ottimizzazione della filiera di produzione e fornitura, con una maggiore interazione degli attori coinvolti, dalla fabbrica al cantiere. In base alle evidenze raccolte (stato dell'arte a livello italiano), tale strategia integrata non è stata riscontrata nel contesto italiano, che risulta ancora lontano da una ben istituita filiera. Pertanto, lo scopo della nuova linea di attività è dunque di supportare al meglio la creazione di tale comparto, facendo leva sull'analisi di casi studio ritenuti emblematici, dai quali sarà possibile derivare delle lesson learnt per una appropriata organizzazione e strutturazione del settore OSC da un punto di vista produttivo, manageriale e di filiera. Quest'attività si svilupperà d'accordo ad una nuova metodologia olistica che integra tanto la filiera come il processo produttivo, partendo da casi di successo identificati in una prima fase del progetto. L'analisi di filiera includerà l'intera catena del valore relativa al progetto, per studiare in maniera approfondita ruoli, attività responsabilità e necessità dei differenti attori coinvolti. Particolare attenzione verrà posta sul processo decisionale del singolo progetto per a livello di filiera. L'analisi di processi produttivi focalizzerà sul capire il ruolo che le tecnologie digitali e le pratiche lean possono giocare nel supportare il processo produttivo di soluzioni OSC, e se e in che modo il paradigma di economia circolare risultano integrati all'interno del processo produttivo ed eventualmente della gestione lifecycle del prodotto. Rispetto al triennio precedente, nel corso del quale l'Unità di Ricerca del Dipartimento di Architettura dell'Università di Bologna (UNIBO_DA) si è occupata di mappare la disponibilità sul territorio italiano di materiali di scarto da utilizzare per la produzione di materiali termoisolanti a basso impatto, per questo triennio nella LA 1.16 si

è deciso di estendere l'osservazione all'intero ciclo di vita dei manufatti per il retrofitting energetico, dalle fasi di produzione dei componenti a quelle d'uso, al fine vita (e oltre, incluso il riciclaggio/recupero), poiché solo così si può considerare la sostenibilità di una soluzione in maniera completa. UNIBO_DA si occuperà di restituire una panoramica sul livello di sostenibilità e potenziale circolarità delle soluzioni OSC per la riqualificazione energetica degli edifici attualmente reperibili e di supportare le aziende nel miglioramento delle soluzioni già offerte sul mercato, secondo livelli incrementali di sostenibilità e circolarità. In particolar modo, lo studio si concentrerà sulla vita utile (service life) delle soluzioni OSC per l'isolamento termico di facciata, indagandone la durabilità, e le prospettive di smontaggio, recupero o riuso dei materiali e componenti costituenti.

La tecnologia separativa basata sull'induzione magnetica (Magnetic Induction Swing Adsorption) (LA 1.17 - 1.19) ha attratto negli ultimi anni l'interesse di diversi gruppi di ricerca che l'hanno sperimentata con materiali compositi a base di adsorbenti tradizionali quali carboni attivi, zeoliti e metal-organic frameworks [41-45]. L'elettificazione dei processi separativi infatti è al centro di un rinnovato interesse quale metodo di intensificazione dei processi produttivi [46].

In particolare per le LA 1.17, LA 1.18, LA 1.19, LA 1.20, LA 1.21, LA 1.22, si evidenzia che Nei precedenti trienni sono state dimostrate le potenzialità economiche della tecnologia MISA (Magnetic Induction Swing Adsorption) per la separazione di miscele CO₂/N₂ da post-combustione. Quale banco di prova per la tecnologia è stato scelto questo processo in quanto in Italia i processi di combustione per la produzione di energia contribuiscono per circa il 30% alle emissioni di CO₂. Tuttavia, l'utilizzo efficiente delle risorse energetiche applicato alle operazioni di separazione è di grande interesse per tutto il settore industriale chimico ed energetico in quanto le separazioni sono operazioni particolarmente energivore e presenti in tutti i processi produttivi. La tecnologia MISA è applicabile alla separazione di qualsiasi miscela gassosa e sono in corso sforzi di ricerca e sviluppo per esplorare ulteriormente e ottimizzare le capacità e le potenziali applicazioni della MISA in vari settori. Nell'ambito del PTR2022-2024 ENEA in collaborazione con UNIROMA1_DC e UNIFI_DCUS ha sviluppato un materiale composito (CALF-20-Fe₃O₄) stabile in acqua che è stato testato nella separazione di miscele CO₂/N₂ nella composizione tipica in CO₂ e N₂ di un gas post-combustione che contiene 15-16% vol di CO₂ e 73-77% vol di N₂. Per i materiali sviluppati nell'ambito del PTR2022-2024 la quantità di energia necessaria alla rigenerazione è pari a 1.22 MJ/KgCO₂ (i dettagli del calcolo sono riportati nel Report finale PTR 22-24). Con il nuovo materiale sviluppato (CALF-20-Fe₃O₄) si è ottenuta una diminuzione di circa l'80% dell'energia di rigenerazione rispetto ai materiali prodotti nel precedente triennio (tra 4 e 5.5 MJ/KgCO₂ per i materiali sviluppati nel PTR 19-21). Questi valori sono anche inferiori rispetto a quelli stimati per i processi di rigenerazione mediante monoetanolamina (MEA) pari a circa 3MJ/Kg. Inoltre, la rigenerazione dei sorbenti mediante induzione magnetica (Magnetic Induction Swing Adsorption) ha garantito una drastica riduzione dei tempi di desorbimento rispetto al riscaldamento convenzionale (Temperature Swing Adsorption).

L'attività proposta per il triennio 2025-2027 ha come obiettivo lo studio funzionale dei materiali individuati e sviluppati nel precedente triennio sperimentando l'effetto della presenza di altri gas (ad es. acqua) nella miscela CO₂/N₂ da separare. Infatti, nelle condizioni sperimentali tipiche dei processi separativi post-combustione il vapore è presente in miscela in quantità 4-7% vol e ha un adsorbimento competitivo con la CO₂. Il materiale individuato nel precedente triennio (MOF CALF-20) è stabile in acqua, mostra buone proprietà separative per la CO₂ in presenza di acqua ma le performance diminuiscono in funzione della quantità d'acqua presente. Pertanto, le proprietà funzionali dovranno essere studiate con miscele CO₂/N₂ a diverse umidità relative. Sulla base dei risultati ottenuti, in collaborazione con UNIROMA1_DC e UNIFI_DCUS il materiale sarà chimicamente modificato per l'ottenimento di un sorbente che mostri le migliori performance separative della miscela CO₂/N₂ in presenza di una quantità d'acqua pari a 4-7% vol. Altri nuovi MOF stabili in acqua potranno essere sperimentati per raggiungere l'obiettivo proposto. Questo risultato migliorerebbe l'efficienza della tecnologia separativa proposta in quanto permetterebbe di utilizzare il materiale senza dover effettuare una preliminare separazione dell'acqua che aumenterebbe i costi complessivi del processo.

Nel WP2 per affrontare il tema dell'efficienza energetica all'interno dei settori produttivi, in continuità con gli anni precedenti, si partirà dall'analisi settoriale dei dati sia energetici che di processo/prodotto/servizio presenti nel Database ENEA relativamente alle diagnosi energetiche obbligatorie [47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54] per sviluppare modelli e tool che possano essere di supporto alle imprese, in particolare alle PMI per realizzare diagnosi energetiche di qualità, che permettano cioè di individuare le criticità (ad esempio attraverso confronti con il mercato, benchmarking) e soprattutto le soluzioni di efficientamento energetico, sia tecnologiche che gestionali. Non si può parlare di efficienza energetica e di valutazioni di sostenibilità se le prestazioni, energetiche e non solo, non vengono misurate e confrontate: pertanto, un fondamentale campo di studi nell'ambito delle metodologie per l'efficienza energetica nei settori produttivi è quello del benchmarking[55, 56]. Sebbene, infatti, siano state sviluppate diverse metodologie per confrontare le prestazioni energetiche di processi produttivi simili [57, 58, 59], la maggior parte è basata su dati teorici e su simulazioni, data la grande difficoltà spesso manifestata da ricercatori, ma anche dalle stesse aziende, nel raccogliere dati che siano affidabili e allo stesso tempo significativi [60]. I dati disponibili sono spesso esigui o non sufficientemente rappresentativi e i benchmark risultanti presentano dei campi di esistenza troppo ampi per risultare utilizzabili da parte delle aziende. Parlando poi di efficienza energetica spesso si pone maggiore attenzione a settori o aziende che presentano consumi specifici elevati [61], ma che numericamente sono minoritari rispetto al tessuto produttivo sia italiano che europeo, caratterizzato quasi totalmente da PMI [62]. Lo sviluppo di strumenti e politiche per l'efficientamento energetico delle PMI presenta molteplici sfide dovute alla eterogeneità delle imprese in termini di attività economica, capacità finanziarie e di personale, e processi decisionali [63]. La maggioranza della letteratura scientifica si è concentrata nell'analisi di barriere e driver per

l'efficienza energetica [64] e nell'analisi qualitativa di politiche [65]. Le poche analisi quantitative in dettaglio riguardano solo pochissimi paesi europei, sono limitate ad alcune regioni e principalmente sono relative al settore manifatturiero [66, 67, 68, 69]. Pertanto, un focus sul mondo delle PMI risulta essere determinate, relativamente sia alla diffusione di buone pratiche generali, che allo sviluppo di strumenti pensati ad-hoc per un più consapevole approccio alla gestione dell'energia e alle opportunità ad essa connesse.

Per quanto riguarda l'analisi di benchmarking svolte in passato sempre all'interno dei PTR si è osservata una popolazione di aziende – piccole medie imprese (PMI) del settore manifatturiero – che presenta un'elevata specializzazione dei suoi processi produttivi e copre ristretti segmenti di mercato che richiedono produzioni non-lineari ed a commessa. In questo caso diventa difficilmente possibile l'individuazione di IPE confrontabili [70]. Per questi settori nel WP2 si vuole introdurre l'utilizzo della metodologia di gestione Lean, la quale prevede l'organizzazione della produzione secondo criteri fondamentali quali la riduzione degli sprechi e l'ottimizzazione della produzione ai fini di conferire al cliente il prodotto della massima qualità possibile. Lo strumento cardine di una gestione Lean è la mappatura dei flussi di valore all'interno del ciclo produttivo (value stream mapping, VSM) [71]; questa procedura mappa i flussi di prodotti fisici ed informazioni fra i vari processi di produzione e distingue le attività che i) aggiungono valore al prodotto, ii) che NON aggiungono valore al prodotto ma sono necessarie alla produzione, iii) che NON ricadono nelle precedenti due categorie e quindi sono sprechi. Successive applicazioni [72,73,74,75,76] hanno specializzato la VSM sull'efficientamento energetico (i.e., energy value stream mapping, EVSM) distinguendo i consumi di energia che aggiungono valore al prodotto finale dagli sprechi e fornendo sulla base delle informazioni raccolte indicazioni sulla scelta delle soluzioni di efficientamento a maggior beneficio. Ulteriori soluzioni hanno integrato l'efficientamento energetico alla sostenibilità ambientale e digitalizzazione: il TVSM [77] integra l'analisi dei consumi di energia con le emissioni di CO₂, il modello LCAVSM [78] integra la VSM con analisi LCA degli impatti ambientali ed il modello proposto da [79] aggiorna in tempo reale la EVSM tramite il sistema di monitoraggio.

Come visto le diagnosi energetiche sono diventate un importante strumento di policy nazionale [47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54] per conseguire gli obiettivi di Europei di "efficienza energetica" ed erogare sussidi alle imprese con lo scopo di mitigare i costi energetici. L'obiettivo è quindi quello di permettere a una platea sempre più ampia di utilizzare questo strumento, che attualmente vede importanti barriere al suo utilizzo all'interno delle PMI, che vanno dalla mancanza di capitale a quella di personale addetto agli aspetti energetici, passando per poca consapevolezza dell'impatto dell'energia nei suoi processi o degli strumenti a disposizione [80]. Nonostante l'interesse e l'alto potenziale di disposizione, in termini di efficientamento energetico, nelle PMI, lo sviluppo di politiche per il suo supporto e l'informazione quantitativa a disposizione sono scarse [81]. L'idea è quella di sfruttare il Tool PMI sviluppato nel precedente PTR per prendere spunto dall'esperienza fatta negli Stati Uniti dentro al programma del DOE "Industrial Assessment Centers" (IACs), fornendo uno strumento semplice, sviluppato in collaborazione con le Università ed i principali stakeholder all'interno di un tavolo aperto per effettuare assessment energetici semplificati all'interno delle PMI.

In particolare, come richiesto in fase di integrazione della proposta progettuale di evidenza che l'attività ENEA prevista nelle LA2.1 ed LA2.2 ha lo scopo di fornire informazioni, strumenti e metodologie per guidare le imprese verso un percorso continuo di efficientamento energetico.

In quest'ottica nel WP anche in continuità con il precedente PTR si è individuato nell'analisi settoriale il mezzo per fornire alle imprese degli strumenti adatti alle loro esigenze. Tra questi l'individuazione di indici di benchmark risulta essere fondamentale. Avere a disposizione indici di prestazione energetica di riferimento per il proprio processo produttivo risulta un elemento fondamentale per misurare le proprie prestazioni energetiche e individuare le possibili inefficienze e/o opportunità di efficientamento energetico. In letteratura trovare indici di prestazione energetica affidabili calcolati su un campione statistico rappresentativo risulta estremamente difficile. Spesso li dove vengono rappresentati (es. BREF) presentano due vizi che ne pregiudicano spesso l'utilizzo: il primo è il range del valore riportato che risulta essere spesso molto ampio; il secondo è che questi risentono fortemente dell'eterogeneità del campione dati proveniente da contesti nazionali diversi (da qui anche l'elevata ampiezza del range dei valori di riferimento riportati). I processi produttivi delle aziende italiane, anche legati al contesto energetico nazionale, presentano, spesso, consumi energetici inferiori di quelli di altri paesi europei. Partendo da queste considerazioni l'utilizzo della banca dati a disposizione di ENEA contenente sia le diagnosi energetiche obbligatorie ai sensi del DLgs 102/2014 che quelle legate all'accesso ai diversi sistemi incentivanti (es. "energivori DM 256/2024 e precedenti" e "gasivori DM 541/2021") permetterà per i principali settori produttivi italiani l'individuazione di indici di prestazione energetica maggiormente rappresentativi ed affidabili.

Purtroppo però anche l'affidabilità di questi indici, benché calcolati su un campione omogeneo presenta alcune criticità:

- La prima è che il campione è rappresentato quasi esclusivamente o da grandi imprese o da imprese manifatturiere con elevati consumi energetici gas/elettricità;
- La seconda è che per alcuni settori produttivi le aziende presentano specificità molto spinte o il numero di imprese che hanno presentato la diagnosi energetica è molto limitato.

All'interno del progetto si cercherà di affrontare queste due criticità. Verrà costituito un osservatorio/tavolo di lavoro per affrontare il tema degli audit energetici e per individuare le opportunità di efficientamento energetico nelle PMI. Verrà potenziato il TOOLPMI per renderlo maggiormente efficace per l'individuazione delle opportunità di efficientamento energetico e realizzato un portale dedicato all'osservatorio dove verranno inserite tutte le risultanze (metodologia, opportunità di efficientamento energetico basate su analisi costo benefici, toolPMI, dati aggregati sulle PMI, etc). In merito all'individuazione delle inefficienze in settori produttivi difficilmente standardizzabili, si cercherà di sondare l'applicabilità di una metodologia di analisi basata sull'approccio della lean production per

l'individuazione delle inefficienze all'interno del processo produttivo.

L'attività proposta nelle LA 2.3, LA 2.4 e LA 2.5 va nel solco della normativa Europea che nella nuova DIRETTIVA (UE) 2023/1791 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 13 settembre 2023 sull'efficienza energetica (che modifica il regolamento (UE) 2023/955) dove si chiede che le PMI vengano supportate ed incoraggiate a sostenere a livello tecnico la realizzazione di audit energetici ma soprattutto ad attuare le raccomandazioni in essi contenuti. L'obiettivo che si vuole realizzare e che costituisce l'avanzamento rispetto allo stato dell'arte e lo sviluppo di una metodologia e di strumenti che possano incentivare questo percorso e che contribuiscano significativamente, in modo relativamente semplice e chiaro, di valutare e percepire il reale beneficio energetico ed economico degli audit energetici e dell'attuazione delle specifiche raccomandazioni in essi contenuti.

La LA 2.6 propone un approccio innovativo per la decarbonizzazione del settore industriale hard-to-abate, utilizzando idrogeno rinnovabile per alimentare sistemi cogenerativi. A differenza della letteratura tecnico-scientifica esistente sulla produzione di idrogeno per la co-combustione, il modello proposto mira a fornire una valutazione accurata del funzionamento di un sistema integrato (pannelli fotovoltaici, elettrolizzatore e motore cogenerativo) utilizzando un numero limitato di dati in input. La modellazione dei sistemi chiave è basata su dati di sistemi reali e commerciali.

L'analisi dettagliata che verrà sviluppata durante gli anni di ricerca si concentrerà su:

1. La riproduzione numerica delle tecnologie principali.
2. La stima della producibilità annua dell'impianto fotovoltaico, basata su metodologie consolidate, per considerare l'influenza delle condizioni meteorologiche, del tipo di montaggio e dei fattori di perdita caratteristici.
3. La strategia di accoppiamento ottimale tra elettrolizzatore e impianto fotovoltaico, in funzione della dimensione del motore cogenerativo.

L'obiettivo è il dimensionamento ottimale della configurazione del sistema integrato, utilizzando una funzione obiettivo che considera simultaneamente parametri economici, operativi ed energetici, ampliando così quanto già presente in letteratura. Nella LA 2.7, i benefici energetici e ambientali derivanti dall'adozione di pratiche e strumenti lean sono già documentati in letteratura, come dimostrano i recenti studi riguardanti il settore sanitario (Verdonck and Verniers, 2025) e delle costruzioni (Sadikoglu et al., 2022). Tuttavia, molti settori risultano ancora privi di indagini dedicate e approfondite. Pertanto, la presente Linea di Attività (LA) si pone innanzitutto l'obiettivo di estendere la letteratura disponibile, esplorando l'applicazione di pratiche lean in settori finora poco indagati. Parallelamente, diversi studi hanno sviluppato strumenti, metodi e modelli lean per monitorare e migliorare i consumi energetici. In questo contesto, la maggior parte dei lavori si limita ad applicare le metodologie proposte ad un solo caso di studio, senza coinvolgere esperti industriali. Questo potrebbe limitare l'applicazione degli strumenti in contesti reali. Infatti, come sperimentato in altri campi, può sussistere un gap tra la letteratura e la pratica (Conole, 2010; Lu et al., 2020). Un raro esempio in cui viene valorizzato il giudizio di esperti industriali è rappresentato dallo studio di Fontoura et al., (2023). Tuttavia, risulta necessario testare la stessa metodologia in diversi settori e contesti (e.g., diversa maturità rispetto all'adozione di pratiche lean), integrando opinioni e feedback di esperti aziendali. La presente LA intende anche sviluppare un modello per il monitoraggio e controllo dei consumi energetici, integrando opinioni derivanti da esperti industriali e realizzando delle linee guida per agevolarne l'adozione. La ricerca empirica sul tema dell'efficientamento energetico nel settore industriale ha identificato un quadro multidimensionale di barriere - economiche, tecniche e organizzative - capaci di ostacolare significativamente l'implementazione di misure di efficientamento energetico (MEE), nonostante il loro potenziale di riduzione dei costi operativi (Schleich, 2004; Thollander et al., 2007; Anderson and Newell, 2004; De Beer, 1998; Kemp and Volpi, 2008; Tornatzky and Klein, 1982; Gillingham and Palmer, 2014; Cagno and Trianni, 2012; Cooremans et al., 2013; Biresselioglu et al., 2018; Gerarden et al., 2017; Gupta and Gregg, 2017; Martin et al., 2021). Un contributo epistemologicamente rilevante, con focalizzazione esplicita sulle determinanti contestuali, è fornito da Costantini et al. (2024). Attraverso l'analisi delle diagnosi energetiche rese disponibili dall'ENEA, gli autori evidenziano come i percorsi di transizione energetica industriali siano plasmati da eterogeneità intra-aziendali, condizioni contestuali e dinamiche relazionali inter-aziendali. Tali dimensioni concorrono a determinare l'efficacia degli interventi realizzati, la cui implementazione si associa, a sua volta, a ricadute positive sulla performance aziendale e, più in generale, a un rafforzamento dell'equità distributiva nel quadro della transizione energetica (Costantini et al., 2025). Tuttavia, gran parte degli studi si limita ad analisi ex ante delle determinanti dell'adozione delle MEE o a valutazioni ex post, spesso condotte in chiave statica, che non colgono la traiettoria evolutiva dei processi decisionali aziendali. L'attività proposta nella LA 2.8 si colloca in questa linea di ricerca, proponendo un'estensione temporale e settoriale dell'analisi, grazie all'impiego di dati armonizzati sui cicli di diagnosi 2019 e 2023 e all'integrazione con fonti microeconomiche e territoriali, al fine di valutare la persistenza o il mutamento dei comportamenti aziendali in risposta agli obblighi normativi e ai cambiamenti di contesto.

All'interno del WP3 si affronta il tema della gassificazione di energia da biomassa. A livello nazionale in Italia, diverse istituzioni accademiche, centri di ricerca e aziende stanno conducendo studi e progetti sperimentali sull'utilizzo della gassificazione per la produzione di energia da biomasse residuali e rifiuti plastici. ENEA è in prima linea considerando le attività finora portate avanti nel corso dei vari progetti di ricerca nazionali, quali Ricerca di Sistema Elettrico, POR-H2 e POR FESR Lazio 2014-2020 (ZEPHYRUS Periodo: 2021 - 2023 Programma: "Gruppi di ricerca 2020" -- Azione 1.2.1) e Horizon Europe (GICO), in cui vi è un focus importante sulla gassificazione intensificata di biomasse. Attività di ricerca sul DRM vengono condotte in ENEA nell'ambito del progetto europeo Marie-Curie Rise CHemPGM, ed in Italia sono state portate avanti anche da vari soggetti industriali, tra cui Italiana Coke e il gruppo Paul Wurth, che si sono

occupati della valorizzazione dei gas di scarico di una cokeria mediante dry reforming. Recentemente, la cattura diretta dall'aria sta suscitando un notevole interesse a livello mondiale per le sue potenzialità sulla riduzione della CO₂ in atmosfera e per il raggiungimento degli obiettivi net-zero. Attualmente in Italia ci sono diversi piccoli progetti locali che si prefiggono di studiare dal punto di vista sperimentale i processi di cattura diretta e stanno nascendo startup nell'ambito della DAC come la società CarpeCarbon, anche in collaborazione con partner internazionali. ENEA e Politecnico di Torino durante le attività del PTR 22-24 hanno effettuato studi tecnico-economici sull'accoppiamento della cattura diretta di CO₂ dall'aria combinata con processi industriali hard-to-abate (cementifici e acciaierie). A livello internazionale paesi come Germania, Svezia, Stati Uniti, Giappone e Cina stanno conducendo ricerche per lo sviluppo di tecnologie avanzate di gassificazione, esplorando processi più efficienti per la conversione di biomasse e rifiuti in energia. L'implementazione di DRM e DAC è oggetto di interesse in diverse nazioni, soprattutto negli Stati Uniti, in Canada, in alcuni paesi europei (ad esempio Norvegia, Svizzera, Regno Unito) e in Cina, con progetti pilota e iniziative per catturare e immagazzinare le emissioni di CO₂ a livello locale che hanno dei vantaggi di posizionamento rispetto a punti centralizzati di stoccaggio della CO₂, poiché di questi siti di stoccaggio (hub) ne sono stati individuati pochi.

Infine, alcuni progetti pilota stanno esplorando l'integrazione di tecnologie di gassificazione con DRM, ad esempio, impianti in Norvegia e negli Stati Uniti stanno cercando di combinare queste tecnologie per ridurre le emissioni e produrre syngas con un potere calorifico maggiore cercando di eliminare il problema dei composti volatili pesanti.

Nessuno dei processi sopraelencati ha raggiunto una maturità tecnologica tale da consentirne la diffusione su larga scala. Attualmente, la barriera maggiore per la scalabilità della SEG è l'alto costo di produzione del syngas prodotto, mentre per il DRM gli attuali ostacoli sono dovuti ai costi elevati del reattore e alla stabilità del catalizzatore.

Il WP3 avanza nello stato dell'arte proponendo la gassificazione in pressione di biomasse per la produzione di syngas ad alto contenuto di H₂ e la contemporanea cattura di CO₂ e integrando i processi con DRM e DAC. L'alta pressione consente di ottimizzare l'utilizzo delle biomasse fino alla produzione di idrogeno puro mediante successivo processo di purificazione.

In particolare, come richiesto in fase di integrazione della proposta progettuale di evidenza che la gassificazione è un processo di conversione termochimica che, attraverso la parziale ossidazione di un combustibile solido, consente di ottenere un vettore gassoso. Questo vettore, che può essere un gas o una miscela di gas, è impiegato per il trasporto, la distribuzione, la produzione di energia o biocombustibili (tra cui anche idrogeno). Il principale prodotto energetico della gassificazione è il syngas, un gas sintetico versatile. Tuttavia, il processo genera anche sottoprodotti indesiderati, come gli idrocarburi pesanti condensabili (tar), che rappresentano un grave problema sia a livello tecnico che ambientale. Il processo di gassificazione viene eseguito per reazione con aria, ossigeno, vapore o loro miscele in un ambiente ad elevata temperatura (600-900 °C) .

Il processo di gassificazione con vapore a doppio letto fluidizzato (DFB) è considerato una tecnologia promettente di gassificazione poiché produce un gas ad alto potere calorico e ricco di idrogeno (fino ad un 75-50% vol. dry). Nei sistemi di gassificazione DFB il processo di gassificazione è separato dalla parziale combustione e condotto in due reattori a letto fluidizzato separati: uno per la gassificazione con solo vapore, l'altro per la combustione del char residuo con aria. Il calore necessario per le reazioni endotermiche di gassificazione con vapore è trasportato al gassificatore, dal reattore di combustione del char, per mezzo dello stesso materiale solido del letto che circola tra i due reattori. Come conseguenza gassificando con solo vapore si può ottenere un gas ricco di idrogeno .

Inoltre, è possibile il trasferimento selettivo di specie gassose specifiche come la CO₂ dal gassificatore al combustore utilizzando un materiale di letto appropriato. Il trasferimento selettivo di CO₂ utilizzando un sorbente a base di ossido di calcio (come la dolomite calcinata) costituisce quella che viene denominata Sorption Enhanced Gasification (SEG). La SEG è una tecnologia emergente in cui il materiale biogenico viene gassificato e la CO₂ viene simultaneamente rimossa tramite l'uso di un sorbente solido. Il componente principale del materiale del letto circolante è solitamente CaO/CaCO₃, che non solo funge da vettore di calore, ma può anche essere utilizzato per trasportare selettivamente l'anidride carbonica nel gas prodotto. La CO₂ viene assorbita nel gassificatore (reazione di carbonatazione) e quindi rilasciata dopo essere stata trasportata nel combustore (reazione di calcinazione), riducendo così la CO₂ nel gas prodotto e aumentando il contenuto di H₂ . Contemporaneamente se invece di alimentare aria nel reattore di combustione si alimenta ossigeno puro o una miscela O₂/CO₂, la corrente secca uscente da quest'ultimo reattore risulterà composta da sola CO₂ che potrà quindi essere inviata a confinamento (stoccaggio) o ulteriore utilizzo, garantendo quindi che il processo di gassificazione di biomasse nel suo complesso sia non solo neutro ma bensì ad emissioni negative di CO₂. A causa dell'esistenza della reazione di carbonatazione, la temperatura nel gassificatore è generalmente di 600-700 °C in condizioni di pressione atmosferica. La temperatura della reazione di calcinazione nel combustore è di 830-930 °C.

Nell'ultimo decennio sono stati condotti numerosi studi per verificare la fattibilità del processo SEG in laboratorio, in impianti pilota , , e su un gassificatore di scala industriale con input di biomassa pari a 8MWth , operanti a pressione atmosferica in un intervallo di temperatura compreso tra 600-700 °C (per la gassificazione), dimostrando che è possibile generare un gas con un contenuto di idrogeno prossimo all'80% in un singolo processo.

In questo progetto si continuerà, in continuità con il precedente piano triennale, a lavorare su processi SEG a pressione atmosferica con reattori RDR e DFB, utilizzando però biomasse e rifiuti solidi urbani con caratteristiche compatibili con la strumentazione (principalmente rimozione di parti metalliche che sono state individuate nei campioni in nostro possesso), principalmente vagliando ed essiccando gli stessi rifiuti. Si utilizzeranno inoltre mix di plastiche che possono dar luogo alla produzione di syngas con elevato potere calorifico in quanto presentano un basso contenuto di ossigeno. Si verificherà inoltre la possibilità di lavorare con un mix plastiche biomasse per

rendere il processo di SEG più flessibile.

Relativamente alla gassificazione, l'avanzamento rispetto allo stato dell'arte consisterà nell'implementazione di un nuovo reattore per la gassificazione intensificata da cattura di CO₂ ad alta pressione.

Nella LA 3.1 e 3.2, in continuità con i precedenti progetti PTR, si svilupperanno e testeranno catalizzatori per il dry reforming in situ della CO₂ prodotta dalla calcinazione di materiali bifunzionali. L'utilizzo in situ della CO₂ per la reazione di reforming costituisce un processo innovativo e ancora a basso TRL, anche su scala laboratorio.

Verranno inoltre sviluppati materiali sorbenti innovativi supportati su polimeri elettrofilati per applicazione nella DAC (direct air capture), una tecnologia di emergente che consiste nella cattura diretta di CO₂ dall'aria, e di grande potenziale per la mitigazione dei gas serra.

Ci si occuperà anche dello studio sperimentale e modellistico del riuso della CO₂ prodotta dal processo di calcinazione per la produzione di biofuel provenienti da processi di gassificazione.

Anche la valorizzazione della CO₂ mediante plasmii freddi è un processo piuttosto innovativo, e già nel PTR 22-24 è stato dimostrato un avanzamento rispetto all'utilizzo combinato di CH₄ e CO₂ rispetto alla sola dissociazione della CO₂. Nel PTR25-27, si cercherà di ottimizzare la configurazione del reattore al plasma per ottimizzare i processi di conversione allo scopo di migliorare le prestazioni e ridurre i costi.

Le attività della LA 3.3 sono a corredo e a sostegno dell'obiettivo principale, ovvero la produzione di un gassificatore operabile in pressione fino ad un massimo di 10 bar. Se infatti la gassificazione con vapore viene operata a pressione maggiore della pressione atmosferica (fino a 10 bar nel nostro caso specifico), come previsto nella LA 3.2, il gas sarebbe già pronto per eventuali upgrading ad idrogeno puro, o comunque sarebbero necessari sistemi di compressione più semplici (con rapporto di compressione minore) per avere le pressioni necessarie alla produzione di biofuel (bio-metanolo ad esempio). Inoltre, ad alte pressioni, gli ingombri stessi (del reattore, delle pipeline) risulterebbero inferiori con indubbi vantaggi per il processo, quali ad esempio minori dispersioni termiche. Operare il processo SEG a pressioni maggiori permetterebbe inoltre di aumentare le temperature di gassificazione sopra i 700 °C, poiché a pressioni più elevate la temperatura di carbonatazione risulterebbe maggiore. Ciò permetterebbe di avere una maggiore conversione del char (con conseguente aumento della resa di gas prodotto) e dei tar direttamente all'interno del reattore. È risaputo infatti che le reazioni di gassificazione del char e di conversione dei tar sono prevalentemente limitate dalla cinetica di reazione. Un aumento di temperatura comporterebbe infatti velocità di reazione più elevate con conseguente avvenimento delle stesse. Operare il processo SEG in pressione comporta d'altro canto che anche la calcinazione/combustione deve essere operata a temperature maggiori (se infatti la carbonatazione è favorita ad alte pressioni al contrario la calcinazione è favorita a basse pressioni), con il rischio di avere temperature proibitive (>1200 °C) nel reattore di combustione. Ne consegue che è necessario disaccoppiare il processo di gassificazione/carbonatazione con vapore e quello di combustione/calcinazione per quanto riguarda le pressioni di esercizio. Tale disaccoppiamento può essere ottenuto inserendo tra i due reattori (gassificatore operante a 10 bar e combustore a pressione atmosferica) due sistemi tipo lock hopper: i) nel ramo che porta il sorbente rigenerato dal combustore/calcinatore al gassificatore/carbonatore, ii) nel ramo che porta il sorbente carbonatato dal gassificatore/carbonatore al combustore/calcinatore. Tali elementi possono garantire la circolazione dei solidi in maniera semi-batch, impedendo comunque il passaggio dei gas da un reattore all'altro. Per poter accoppiare i due ambienti operanti a differenti pressioni è previsto un 1° sistema composto da un serbatoio e doppia valvola (in ingresso e allo scarico del serbatoio). In tale serbatoio è accumulato il materiale proveniente dal calcinatore e il sistema a doppia valvola permette l'isolamento tra i due ambienti a pressioni differenti. Nel momento in cui il serbatoio è pieno è chiusa la valvola all'alimentazione del serbatoio e si apre la valvola di scarico del serbatoio per rifornire il gassificatore. Il serbatoio prima di ricominciare ad ospitare nuovo sorbente rigenerato sarà depressurizzato con lavaggio di gas inerte. Il 2° sistema dal gassificatore/carbonatore al combustore/calcinatore opererà in maniera analoga al 1°. Il dimensionamento e lo studio di questo apparato, almeno dal punto di vista del modello freddo, saranno condotti nella LA 3.3. Di tutti questi processi si provvederà a portare avanti una modellazione matematica e simulativa per l'identificazione del miglior design di progetto e dei principali KPI. Infine, nella LA 3.3 i partner si occuperanno di produzione di biofuel da riduzione della CO₂ in diverse configurazioni di processo e sperimentali. Lo studio di un sistema a lock-hopper per la reazione di gassificazione integrata con cattura costituisce un avanzamento significativo del processo di SEG in pressione in quanto riduce considerevolmente le limitazioni dell'applicazione di questo processo. Oltre al modello freddo, si effettuerà anche uno studio modellistico simulativo, cercando di far collimare risultati sperimentali e ipotesi modellistiche ottenute nel precedente piano triennale per avere un'idea del funzionamento, dell'operatività e del design di questi apparati. Dal punto di vista modellistico, per la reazione di gassificazione in pressione saranno verificati i risultati sperimentali ottenuti nelle LA 3.1 e 3.2 per ottenere un modello realistico del gassificatore in pressione, risultato non scontato. Esistono infatti pochi studi in letteratura sul processo di gassificazione in pressione combinato con la reazione di carbonatazione ad alta temperatura del CaO.

La cattura della CO₂ da processi industriali HtA ha dato luogo alla realizzazione di una metodologia di studio estendibile a diversi processi industriali. Riguardo alle attività della LA3.4 si continuerà ad avanzare lo studio sui processi di cattura applicati alla produzione di acciaio sia da impianti EAF che più classici BF-BOF, andando a studiare anche processi integrati per la produzione di materiale preridotto. Una nuova attività sarà l'implementazione di processi di cattura ad alto TRL 7-9 per la cattura da impianti di potenza e di termovalorizzatori dei rifiuti, questi ultimi rappresentano una nuova frontiera per l'applicazione della CCUS.

La cattura della CO₂ dall'aria è una delle tecnologie più promettenti per la compensazione delle emissioni di CO₂. Tali processi sono, tuttavia, particolarmente energivori e con costi molto variabili a seconda della tecnologia e sorbente utilizzato. Nella LA 3.4, verrà effettuata un'analisi di letteratura dettagliata finalizzata all'individuazione e descrizione delle tecnologie attualmente più promettenti e

leader del mercato. Lo scopo finale sarà quello di sviluppare modelli di processo delle soluzioni tecnologiche più mature, allo scopo di quantificare i consumi di energia, l'impatto ambientale e i costi.

Infine, si prevede di sviluppare una metodologia di analisi semplificata per la caratterizzazione, la stima dei costi, e performance ambientali dell'intera filiera CCS. La metodologia di analisi sviluppata dovrà poter essere integrata con algoritmi di ottimizzazione utili per l'individuazione di hub industriali e caratterizzazione della rete di trasporto e stoccaggio della CO₂.

Nei gassificatori operanti a pressione atmosferica, ulteriori upgrading dell'idrogeno contenuto nel syngas prodotto, richiederebbero a valle del gassificatore complessi e costosi sistemi di compressione di un gas ricco di idrogeno, costosi sia da un punto di vista energetico che economico. Nella LA 3.5 verranno condotte prove sperimentali su materiali sorbenti per H₂S in processi di gassificazione in pressione, che costituisce un fondamentale passo in avanti nel riutilizzo del syngas per qualsiasi processo di utilizzo. Il test di questi materiali in pressione costituisce un upgrade anche nei confronti della letteratura in quanto esistono pochi lavori che hanno individuato materiali che possano lavorare in queste condizioni.

Questa attività mira, dunque, a colmare questa lacuna, fornendo dati sperimentali originali e validazioni in condizioni più rappresentative del processo, al fine di valutare la reale applicabilità e robustezza dei materiali sviluppati.

Un obiettivo chiave di questa fase sarà il raggiungimento di concentrazioni residue di H₂S inferiori a 10 ppm, soglia necessaria per l'integrazione diretta del gas di sintesi in celle a combustibile ad ossidi solidi (SOFC). Qualora tale target risulti difficilmente raggiungibile alle temperature tipiche dell'uscita dal gassificatore, si valuterà l'introduzione di uno stadio di purificazione aggiuntivo a temperatura più bassa, pur sempre compatibile con il requisito di mantenere il gas a temperature elevate, condizione preferibile per un'efficiente alimentazione della SOFC.

Per aumentare ulteriormente l'efficienza complessiva del processo, sarà inoltre esplorata la possibilità di recuperare e valorizzare lo zolfo rimosso, attraverso la rigenerazione controllata del sorbente solido esausto. In particolare, verrà valutata la fattibilità di produrre zolfo elementare o acido solforico a partire dai composti solforati accumulati nel materiale durante la fase di cattura. La combinazione tra un processo di gassificazione avanzato e il recupero selettivo dello zolfo rappresenta un approccio innovativo e ad oggi poco esplorato in letteratura, con potenziali ricadute positive sia in termini di sostenibilità ambientale che di valorizzazione economica dei sottoprodotti. Le attività della LA 3.6 riguarderanno l'avanzamento della conoscenza su materiali innovativi e scalabili per le reazioni di reforming e reforming intensificato. Ad oggi i materiali utilizzati per SMR, DRM e SE-SMR sono principalmente costituiti da nichel supportato su ossidi (Al₂O₃, CeO₂, CaO) o ossidi misti (CeZrO₂). Nonostante il basso costo e l'elevata attività catalitica, questi sistemi presentano diverse criticità riguardanti la stabilità in operando. Se esposto continuamente alla miscela di reazione, infatti, il nichel tende a disattivarsi per via dei fenomeni di coking e sintering. Il primo consiste nella formazione di residui carboniosi che passivano i siti catalitici, il secondo comporta la progressiva perdita di attività dovuta all'aggregazione dei siti catalitici, che avviene per diffusione ad alta temperatura. In generale, inoltre, questi sistemi sono soggetti a degradazione termica e avvelenamento a causa di impurezze (S, Cl) presenti nelle miscele di reazione. Per quanto riguarda la reazione di SE-SMR, si aggiunge la perdita nel tempo della capacità adsorbente del sistema nei confronti della CO₂.

Gli ossidi misti a struttura perovskitica (ABO₃, A₂BO₄) considerati nella linea di attività LA 3.6 verranno progettati con la finalità di superare le criticità sopraelencate. In particolar modo, gli avanzamenti rispetto ai materiali dello stato dell'arte si articoleranno secondo i seguenti punti:

1) Incremento della mobilità degli ioni ossigeno nel supporto. La sostituzione di cationi aliovalenti al sito A darà luogo a stechiometrie innovative progettate e realizzate per dotare l'ossido di un'elevata quantità di vacanze di ossigeno, pur mantenendone la stabilità strutturale negli ambienti di esercizio. L'introduzione di vacanze d'ossigeno, che consentono quindi un'elevata mobilità degli ioni O²⁻, permette al supporto a base ossido di contrastare efficacemente l'eventuale formazione di residui carboniosi, ossidandoli. Nel caso del SE-SMR, mediante la sostituzione al sito A è possibile modificare la basicità della superficie, aumentandone l'affinità all'assorbimento della CO₂.

2) Incremento della stabilità/attività catalitica. La sostituzione di cationi aliovalenti al sito B sarà orientata a massimizzare l'attività catalitica dei sistemi considerati. A questo scopo, verrà sfruttato il fenomeno dell'exsolution, che consiste nella segregazione superficiale dell'elemento contenuto al sito B, sotto forma di nanoparticelle uniformemente distribuite. Queste costituiranno i siti cataliticamente attivi, offrendo una maggiore resistenza al coking e al sintering. La reversibilità del processo di exsolution consentirà il rinnovamento in-situ del catalizzatore, aumentandone la resistenza alla disattivazione per avvelenamento e/o deposizione di residui carboniosi. Nel caso dei nichelati di lantanio (LaNiO₃), la sostituzione parziale degli elementi al sito B sarà altresì volta ad aumentarne la stabilità strutturale.

3) Incremento della resistenza al sintering. L'ottimizzazione delle procedure di sintesi verrà orientata verso la stabilizzazione del composto a temperature maggiori rispetto a quella prevista di esercizio, mantenendo al contempo un'elevata area superficiale. Questa strategia verrà attuata modificando opportunamente la rampa di riscaldamento, prevedendo l'introduzione di agenti porogeni o composti organici che garantiscano combustioni repentine e a elevato rilascio di gas.

Riguardo alle attività della LA 3.4 si provvederà ad ampliare la metodologia per ora applicata a cementifici ad altre tipologie di industrie hard to abate approfondendo l'integrazione di sistemi di cattura della CO₂ (post-combustione e/o pre-combustione) all'interno di centrali termoelettriche tradizionali (turbine a gas e impianti combinati a gas o carbone, inceneritori) e industrie hard-to-abate, quali ad esempio l'industria siderurgica e processi di produzione di pre-ridotto tramite riduzione diretta di ossidi di ferro (DRI). I risultati ottenuti da

dettagliate analisi di processo, saranno utilizzati come input all'interno di metodi di integrazione energetica/termica (quali, ad esempio, la metodologia della pinch analysis) per la definizione di sistemi ottimali dal punto di vista dell'integrazione termica e i consumi energetici. Seguiranno le valutazioni economiche e ambientali, quest'ultimo con particolare riferimento alle emissioni di gas serra (con almeno estensione SCOPE 1 & 2) e loro riduzione.

Allo stato dell'arte l'applicazione di misure per l'efficienza energetica nel settore del trattamento delle acque reflue in Italia è ancora molto limitata e, con rare eccezioni, l'autoproduzione energetica degli impianti italiani è lontana dalle potenzialità conseguibili anche soltanto applicando le tecnologie già mature sul mercato. Mentre la ricerca scientifica e tecnologica del settore continua a sviluppare apparecchiature e processi più efficienti dal punto di vista energetico, l'analisi delle diagnosi energetiche del 2019 ha evidenziato una preponderanza di interventi di efficientamento poco innovativi, a basso costo e con un impatto limitato, soprattutto negli impianti medio-piccoli.

Diversi articoli scientifici del settore evidenziano l'inefficienza energetica degli impianti di trattamento delle acque reflue (WWTP) a livello globale, inclusa l'Italia. [82]. La ricerca evidenzia che l'autosufficienza energetica è un obiettivo realistico per i WWTP, ma raggiungere un livello soddisfacente di prestazioni energetiche è raro [83]. Molti WWTP, in particolare quelli di piccole dimensioni, non dispongono di sistemi di monitoraggio e controllo adeguati a ottimizzare il consumo energetico [84, 85]. Gli interventi per migliorare l'efficienza energetica sono spesso limitati alla sostituzione o al miglioramento di specifiche apparecchiature elettromeccaniche, mentre l'aggiornamento della configurazione complessiva del sistema è meno comune [86]. Sebbene esistano tecnologie per migliorare l'efficienza energetica e il recupero delle risorse nei WWTP, la loro adozione è ostacolata da diverse barriere [87].

Il settore ha, quindi, notevoli margini di ottimizzazione attraverso varie misure, che vanno dal miglioramento dell'efficienza dei processi, all'aggiornamento delle apparecchiature elettromeccaniche, all'implementazione di tecnologie di recupero energetico come la produzione di biogas e i sistemi di recupero dei cascami termici e dell'energia termica dei reflui, all'installazione di sistemi solari fotovoltaici e di impianti idroelettrici su piccola scala, per i quali gli impianti di trattamento delle acque reflue urbane sono sempre più riconosciuti, anche dalla normativa, come "aree di riferimento".

In particolare, come richiesto in fase di integrazione della proposta progettuale di evidenza che il contributo delle LA4.1 e LA4.2 all'avanzamento dello stato dell'arte si articola su diversi fronti complementari, inserendosi in un approccio integrato mirato alla neutralità energetica del settore depurativo in conformità con la recente Direttiva (UE) 2024/3019.

Le LA ENEA sviluppano due strumenti unici nel panorama italiano:

1. **Analisi sistematica delle diagnosi energetiche 2023:** L'ENEA, dato il ruolo istituzionale di verifica della conformità delle diagnosi alle prescrizioni del D.Lgs. 102/2011, dispone dell'accesso a tutte le diagnosi energetiche redatte dalle grandi imprese e dalle imprese a forte consumo di energia. L'analisi dei dati contenuti nelle diagnosi 2023 per il settore idrico renderà possibile una valutazione completa dell'evoluzione del comparto nel quadriennio 2019-2023. Questo consentirà di estrarre benchmark specifici per tipologia e dimensione di impianto, essenziali per orientare correttamente le strategie di efficientamento energetico. Inoltre l'analisi comparativa consentirà di quantificare i risparmi energetici conseguiti nei vari impianti grazie all'implementazione di misure di efficientamento individuate nel precedente quadriennio e valutare la tipologia di interventi.
2. **Software DEES:** Rappresenta l'unico strumento italiano, utilizzabile facilmente e gratuitamente e dedicato specificamente alla classificazione energetica degli impianti di depurazione e all'analisi di scenario. La metodologia, basata sull'impiego di indicatori di prestazione chiave (KPI) facilmente calcolabili, consente il confronto delle prestazioni energetiche degli impianti di depurazione e orienta gli utilizzatori ad individuare misure di efficientamento. Le evoluzioni previste nel nuovo triennio, con particolare riferimento alla trasformazione di DEES in web app, all'integrazione di nuovi moduli per la valutazione di trattamenti quaternari e alla modellazione di impianti energeticamente neutri, rispondono a precise esigenze del settore identificate anche attraverso il dialogo con vari gestori, che hanno già manifestato interesse a collaborare nella fase di test e sviluppo.
3. **Modellazione di impianti energeticamente neutri:** Sarà selezionato un impianto reale e rappresentativo del contesto italiano, in base al quadro delle diagnosi energetiche di cui al punto 1), su cui sviluppare un modello matematico innovativo utilizzando software di simulazione con licenza. Il modello sarà prima calibrato per aspetti processuali ed energetici, poi saranno modellate le soluzioni ottimali per raggiungere la neutralità energetica, valutando l'integrazione di tecnologie avanzate di recupero energetico, fonti rinnovabili e processi di trattamento efficienti oltre all'analisi delle componenti emissive di gas GHG. Questo fungerà anche da processo validativo di DEES di cui al punto 2, contribuendo così alla innovazione nel panorama degli strumenti decisionali per il settore.

Tecnologie innovative per l'efficientamento e il recupero energetico

L'approccio alle tecnologie di trattamento e ai processi di recupero energetico rappresenta un avanzamento rispetto allo stato dell'arte grazie a:

4. **Ottimizzazione del processo MBBR per reflui specifici:** Lo sviluppo di un bioreattore a letto mobile (MBBR) per il trattamento di acque reflue caratterizzate da un basso rapporto carbonio/azoto rappresenta un'innovazione significativa. Questa tecnologia, particolarmente efficace per surnatanti dei processi di stabilizzazione dei fanghi e scarichi industriali, sfrutta il meccanismo di trattamento basato su biofilm che consente la nitrificazione e denitrificazione simultanea all'interno dello stesso sistema [88, 89]. L'implementazione di sistemi di controllo avanzati basati sul monitoraggio in tempo reale permetterà di massimizzare l'efficienza e ridurre il consumo energetico. Sebbene diversi studi abbiano investigato questo processo in scala di laboratorio, il potenziale di un MBBR aerato in modo intermittente

in applicazioni pilota e reali con acque reflue reali deve ancora essere pienamente esplorato [90, 91], aspetto che questo progetto intende approfondire.

5. Valorizzazione energetica dei fanghi di depurazione: Il progetto sviluppa in parallelo processi di pirolisi, trattamenti idrotermali e upgrading biologico di biogas e syngas, ottimizzando l'integrazione di queste tecnologie nell'ottica della neutralità energetica. La co-pirolisi di fanghi con rifiuti plastici, iniziata in modo esplorativo nel triennio precedente, viene ora sviluppata con approccio sistematico e caratterizzazione degli oli per uso come combustibili, rappresentando un significativo passo avanti nella valorizzazione energetica [92, 93].

Sviluppo di sistemi di biometanazione ibridi: L'innovazione proposta combina sistemi a biomassa adesa e sospesa per migliorare i processi di biometanazione. Questa configurazione crea un'ampia superficie per le interazioni gas-liquido-biofilm, superando efficacemente le limitazioni al trasferimento di massa gas-liquido che rappresentano una delle sfide chiave nella biometanazione [94, 95]. La conversione biologica del syngas in biometano offre diversi vantaggi rispetto alla metanazione catalitica, tra cui l'uso di biocatalizzatori meno costosi, condizioni operative più blande, maggiore tolleranza alle impurità del syngas e migliore selettività del prodotto [96]. L'approccio che combina sistemi ibridi di biomassa, biometanazione del syngas e utilizzo del char per l'adsorbimento della CO₂ si allinea con le direzioni emergenti della ricerca, affrontando le principali limitazioni delle tecnologie attuali e abbracciando i principi dell'economia circolare. I processi depurativi convenzionali, quali ad esempio la rimozione biologica dell'azoto e del fosforo (nitrificazione, denitrificazione e defosfatazione), seppur efficaci, consumano molta energia, emettono gas serra e non permettono il recupero di nutrienti preziosi come azoto e fosforo. La proposta di ricerca della LA 4.3 si concentra sullo sviluppo di un processo biologico assimilativo per via eterotrofa al fine di rimuovere i nutrienti dalle acque e convertirli in biomassa microbica successivamente valorizzabile come fertilizzante o mangime [97]. Oltre a delle elevate rese depurative, questo approccio promette una drastica riduzione dei consumi energetici e delle emissioni di gas serra, quali anidride carbonica e protossido di azoto. Regolando opportunamente alcuni parametri operativi, tra cui il rapporto C/N della corrente idrica influente e la fonte di carbonio da utilizzare, quale ad esempio i fermentati derivanti dal trattamento anaerobico della FORSU, è possibile incrementare l'efficienza assimilativa dei fanghi attivi rispettando i limiti imposti allo scarico per sostanza organica e nutrienti. Questa integrazione tra trattamento delle acque e gestione dei rifiuti rende il processo più sostenibile ed economico. La modellazione di bioreattori anaerobici si avvale di approcci separati per la descrizione dei processi biochimici e fluidodinamici. I modelli biochimici si concentrano sulle reazioni metaboliche e sulla crescita microbica, mentre i modelli fluidodinamici analizzano il comportamento del flusso e il trasporto di massa ed energia [98]. La ricerca proposta propone l'elaborazione di un modello matematico innovativo che simula simultaneamente la fluidodinamica e la biochimica di un reattore anaerobico termofilo per la conversione di biogas in biometano. Questo modello sarà composto da due moduli interconnessi e bidirezionali: un modulo biochimico dettagliato, basato su equazioni dinamiche e cinetiche, e un modulo fluidodinamico avanzato, capace di considerare diverse condizioni di flusso e trasferimento di massa. Questo approccio integrato fornirà una comprensione molto più accurata e realistica del funzionamento del bioreattore, aprendo nuove prospettive per l'ottimizzazione del processo di produzione di biometano. Per incrementare la produzione di biogas nella digestione anaerobica dei fanghi di depurazione è stato proposto nella letteratura scientifica e, negli ultimi anni, in alcune applicazioni a scala reale, l'utilizzo di una serie di reattori anaerobici in cascata (CAD, Cascade Anaerobic Digesters). Il progetto di ricerca proposto nella LA 4.4 rappresenta un avanzamento rispetto allo stato dell'arte grazie a:

1. Sviluppo di linee guida tecniche per l'applicazione, la gestione ed il monitoraggio del sistema CAD, sulla base dei risultati della sperimentazione a scala pilota per 12 mesi. In particolare verranno individuati: tempi ottimali di ritenzione; distribuzione ottimale dei volumi tra i diversi reattori in cascata; carichi volumetrici consigliati in avviamento ed in funzionamento ordinario; efficienze di rimozione dei SV raggiungibili; produzione specifica di biogas per kgSV e per m³ di reattore.
2. Integrazione del sistema CAD con il processo di carbonizzazione idrotermica. Tale applicazione è fortemente innovativa ed è finalizzata ad incrementare ulteriormente la produzione di biogas e l'efficienza di riduzione del digestato, oltre a consentire di produrre un potenziale "End-of-Waste", con importanti ricadute sui costi di gestione degli impianti di depurazione [103].

Sviluppo di linee guida tecniche per l'applicazione, la gestione ed il monitoraggio del sistema integrato CAD-HTC [104].

Il settore Processi Chimici Industriali cui appartiene il gruppo di ricerca UNIROMA1_DICMA ha acquisito negli anni precedenti un solido know-how relativamente all'applicazione di processi idrotermali su biomasse residuali e rifiuti polimerici [99, 100] allo scopo, principalmente, di produrre un hydrocrude e secondariamente non escludendo il recupero di chemicals ad alto valore aggiunto [101]. La ricerca ha riguardato lo studio del meccanismo idrotermale su composti modello [102] allo scopo di definire le condizioni di processo ottimizzate. Si è infine studiato e definito l'effetto di metalli generatori di idrogeno in condizioni idrotermali sulle reazioni di deidroossigenazione necessarie per l'ottenimento di un prodotto liquido stabile, ad alto potere calorifico e bassa acidità e viscosità. Nel corso del precedente triennio è stato sviluppato in collaborazione con ENEA un processo di upgrading basato sull'utilizzazione di catalizzatori classici di hydrotreating e/o di metalli generatori di idrogeno nelle condizioni di processo, che permettano di eseguire un hydrofining idrotermale sull'olio di pirolisi prodotto da Enea e sull' hydrocrude prodotto da UNIROMA1_DICMA, entrambi da fanghi. I risultati ottenuti e il know-how acquisito permetteranno nel triennio 2025-27 di portare avanti una ricerca innovativa (LA 4.5) relativamente allo studio di processi di hydrofining alle frazioni liquide ottenute mediante copiroli e coHTL di fanghi e rifiuti polimerici, allo scopo di ottenere un combustibile upgradato più vicino alle specifiche. L'utilizzazione del char ottenuto suddetti processi costituisce parte integrante per il completamento della ricerca, così come l'innovativo uso delle ceneri (presenti in alta concentrazione nei fanghi) come catalizzatori, di cui saranno valutate le potenzialità.

- [1] Direttiva 2009/125/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 21 ottobre 2009 relativa all'istituzione di un quadro per l'elaborazione di specifiche per la progettazione ecocompatibile dei prodotti connessi all'energia, GUUE L 285 del 30.10.2009.
- [2] Regolamento 2017/1369 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 4 luglio 2017 che istituisce un quadro per l'etichettatura energetica e che abroga la direttiva 2010/30/UE, GUUE L 198 del 28.07.2017.
- [3] Regolamento quadro (UE) 2014/1781 del Parlamento europeo e del Consiglio [1] del 13 giugno 2024 - che stabilisce il quadro per la definizione dei requisiti di progettazione ecocompatibile per prodotti sostenibili, modifica la direttiva (UE) 2020/1828 e il regolamento (UE) 2023/1542 e abroga la direttiva 2009/125/CE
- [4] Art. 79 Abrogazione e disposizioni transitorie, Regolamento 2024/1781. I prodotti sono: pannelli fotovoltaici, gli apparecchi per il riscaldamento d'ambiente e gli apparecchi di riscaldamento misti, gli scaldacqua, gli apparecchi per il riscaldamento d'ambiente locale a combustibile solido, i condizionatori d'aria, comprese le pompe di calore aria-aria e i ventilatori, le caldaie a combustibile solido, i prodotti di riscaldamento e raffrescamento dell'aria, le unità di ventilazione, gli aspirapolvere, gli apparecchi di cottura, le pompe ad acqua, i ventilatori industriali, i circolatori, gli alimentatori esterni, i computer, i server e i prodotti di archiviazione dati, i trasformatori di potenza, le apparecchiature per la refrigerazione professionale e le apparecchiature per il trattamento di immagini.
- [5] Fraunhofer ISI. Direct electrification of industrial process heat. An assessment of technologies, potentials and future prospects for the EU [Internet]. 2024. Disponibile su: <https://www.agora-industry.org/publications/direct-electrification-of-industrial-process-heat>
- [6] Gilbert T, Menon AK, Dames C, Prasher R. Heat source and application-dependent leveled cost of decarbonized heat. *Joule* [Internet]. gennaio 2023 [citato 31 luglio 2024];7(1):128–49. Disponibile su: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2542435122005645>
- [7] Center for Climate and Energy Solutions. Clean heat pathways for industrial decarbonization [Internet]. 2021. Disponibile su: <https://www.c2es.org/document/clean-heat-pathways-for-industrial-decarbonization/>
- [8] Sandbag: smarterclimate policy. Barriers to Industrial Decarbonisation [Internet]. 2018. Disponibile su: <https://sandbag.be/project/results-barriers-to-decarbonisation-call-for-evidence/>
- [9] Dumont M, Wang R, Wenzke D, Blok K, Heijungs R. The techno-economic integrability of high-temperature heat pumps for decarbonizing process heat in the food and beverages industry. *Resources, Conservation and Recycling* [Internet]. gennaio 2023 [citato 31 luglio 2024];188:106605. Disponibile su: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344922004396>
- [10] "Commission adopts EU-wide scheme for rating sustainability of data centres," Directorate-General for Energy, 2024. (https://energy.ec.europa.eu/news/commission-adopts-eu-wide-scheme-rating-sustainability-data-centres-2024-03-15_en?prefLang=it)
- [11] "Top 10 strategic technology trends for 2020," Stamford, CT, USA, 2019. (<https://www.gartner.com/en/doc/432920-top-10-strategic-technology-trends-for-2020>)
- [12] "Data Centres and Data Transmission Networks", International Energy Agency, 2023. (<https://www.iea.org/energy-system/buildings/data-centres-and-data-transmission-networks>)
- [13] "Software Energy Profiling", A. Sinha, A. Chandrakasan, 2002. In: R. Graybill, R. Melhem, (eds) *Power Aware Computing*. Series in Computer Science. Springer, Boston, MA. (https://doi.org/10.1007/978-1-4757-6217-4_17)
- [14] Clairand, J.-M.; Briceno-Leon, M.; Escrivá-Escrivá, G.; Pantaleo, A.M. Review of Energy Efficiency Technologies in the Food Industry: Trends, Barriers, and Opportunities. *IEEE Access* 2020, 8, 48015–48029, doi:10.1109/ACCESS.2020.2979077.
- [15] Tubiello, F.N.; Karl, K.; Flammini, A.; Gütschow, J.; Obli-Laryea, G.; Conchedda, G.; Pan, X.; Qi, S.Y.; Hall-dórudóttir Heiðarsdóttir, H.; Wanner, N.; et al. Pre- and Post-Production Processes Increasingly Dominate Greenhouse Gas Emissions from Agri-Food Systems. *Earth Syst Sci Data* 2022, 14, 1795–1809, doi:10.5194/essd-14-1795-2022.
- [16] Jadhav, H.B.; Annapure, U.S.; Deshmukh, R.R. Non-thermal Technologies for Food Processing. *Front. Nutr.* 2021, 8, 1–14, doi:10.3389/fnut.2021.657090.
- [17] Maloney, N.; Harrison, M. Advanced Heating Technologies for Food Processing. In *Innovation and Future Trends in Food Manufacturing and Supply Chain Technologies*; Elsevier, 2016; pp. 203–256 ISBN 9781782424703.
- [18] FAOSTAT, 2021.
- [19] Dati ISTAT 2018-2020, UNAPROL.
- [20] TESLA Project Final Report: Efficient Olive oil mills" - EU Publications (2014)
- [21] "TESLA Project Final Report: Energy Efficiency in the Wine Sector" - EU Publications (2016)
- [22] "Energy efficiency in winemaking industry: Challenges and opportunities" - Science of The Total Environment (2024)
- [23] "Improved energy efficiency in wineries using data from audits" - Ciência e Técnica Vitivinícola (2017)
- [24] Jiang, R., Mao, C., Hou, L., Wu, C. & Tan, J. (2018). A SWOT analysis for promoting offsite construction under the backdrop of China's new urbanisation. *Journal of Cleaner Production*, 173, 225-234.
- [25] Lihtmaa, L. & Kalamees, T. (2024). Emerging renovation strategies and technical solutions for mass-construction of residential districts built after World War II in Europe. *Energy Strategy Reviews*, 51, 101282.
- [26] Hong, J., Shen, G. Q., Mao, C., Li, Z & Li, K. (2016). Life-cycle energy analysis of prefabricated building components: an input-output-based hybrid model. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2198-2207.

- [27] Hong, J., Shen, G. Q., Li, Z., Zhang, B. & Zhang, W. (2018). Barriers to promoting prefabricated construction in China: a cost-benefit analysis. *Journal of Cleaner Production*, 172, 649-660.
- [28] Kamali, M. & Hewage, K. (2017). Development of performance criteria for sustainability evaluation of modular versus conventional construction methods. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3592-3606.
- [29] Lopez-Guerrero, R. E., Vera, S. & Carpio, M. (2022). A quantitative and qualitative evaluation of the sustainability of industrialised building systems: A bibliographic review and analysis of case studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157, 112034.
- [30] Malik, S., Fatima, F., Imran, A., Chuah, L. F., Klemes, J. J., Khaliq, I. H., Asif, S., Aslam, M., Jamil, F., Durrani, A. K., Akbar, M. M., Shahbaz, M., Usman, M., Atabani, A. E., Yusup, S. & Bokhari, A. (2019). Improved project control for sustainable development of construction sector to reduce environment risks. *Journal of Cleaner Production*, 240, 118214.
- [31] European Parliament, Energy Performance of Buildings (recast). Available online: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2023-0068_EN.pdf Accessed 2 February 2024.
- [32] MASE - Piano nazionale integrato energia e clima 2024
https://www.mase.gov.it/sites/default/files/PNIEC_2024_revfn_01072024%20errata%20corrigere%20pulito.pdf
- [33] Sonogo, M., Echeveste, M. E. S. & Galvan Debarba, H. (2018). The role of modularity in sustainable design: a systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 176, 196-209.
- [34] Abeynayake, D. N., Perera, B. & Hadiwattege, C. (2022). A roadmap for business model adaptation in the construction industry: a structured review of business model research. *Construction Innovation*, 4 (22), 1122-1137.
- [35] Goulding, J., Pour, F., Arif, R. M. & Sharp, M. (2014). New offsite production and business models in construction: priorities for the future research agenda. *Architectural Engineering and Design Management*, 3 (11), 10.1080/17452007.2014.891501.
- [36] Jin, R., Gao, S., Cheshmehzangi, A. & Aboagye-Nimo, E. (2018). A holistic review of off-site construction literature published between 2008 and 2018. *Journal of Cleaner Production*, 202, 1202-1219.
- [37] Tennakoon T.M.M.P., Chileshe N., Rameezdeen R., Ochoa Paniagua J., Samaraweera A., Statsenko L. (2023). Uncertainties affecting the offsite construction supply chain resilience: a systematic literature review. *Construction Innovation*, In Press. DOI: 10.1108/CI-04-2023-0075.
- [38] Martin H., Garner M., Manewa A., Chadee A. (2024). Validating the Relative Importance of Technology Diffusion Barriers- Exploring Modular Construction Design-Build Practices in the UK. *International Journal of Construction Education and Research*. DOI: 10.1080/15578771.2024.2323487
- [39] Choi, J.O., O'Connor, J. T. & Kim, T. W. (2016). Recipes for cost and schedule successes in industrial modular projects: qualitative comparative analysis. *Journal of Construction Engineering and Management*, 10 (142), 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001171.
- [40] Ali A.H., Kineber A.F., Elyamany A., Ibrahim A.H., Daoud A.O. (2023). Identifying and assessing modular construction implementation barriers in developing nations for sustainable building development. *Sustainable Development*, 31 (5), pp. 3346 - 3364. DOI: 10.1002/sd.2589
- [41] H. Li et al., "Magnetic Metal-Organic Frameworks for Efficient Carbon Dioxide Capture and Remote Trigger Release," *Adv. Mater.*, vol. 28, no. 9, pp. 1839-1844, 2016, doi: 10.1002/adma.201505320.
- [42] H. Li, M. M. Sadiq, K. Suzuki, P. Falcaro, A. J. Hill, and M. R. Hill, "Magnetic Induction Framework Synthesis: A General Route to the Controlled Growth of Metal-Organic Frameworks," *Chem. Mater.*, vol. 29, no. 15, pp. 6186-6190, 2017, doi: 10.1021/acs.chemmater.7b01803.
- [43] M. M. Sadiq, M. Rubio-Martinez, F. Zadehahmadi, K. Suzuki, and M. R. Hill, "Magnetic Framework Composites for Low Concentration Methane Capture," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 57, no. 18, pp. 6040-6047, 2018, doi: 10.1021/acs.iecr.8b00810.
- [44] M. Gholami, B. Verougstraete, R. Vanoudenhoven, G. V. Baron, T. Van Assche, and J. F. M. Denayer, "Induction heating as an alternative electrified heating method for carbon capture process," *Chem. Eng. J.*, vol. 431, no. November 2021, 2022, doi: 10.1016/j.cej.2021.133380.
- [45] X. Lin et al., "In Situ Electromagnetic Induction Heating for CO₂ Temperature Swing Adsorption on Magnetic Fe₃O₄/N-Doped Porous Carbon," *Energy and Fuels*, vol. 34, no. 11, pp. 14439-14446, 2020, doi: 10.1021/acs.energyfuels.0c02699.
- [46] M. R. Rahimi and S. Mosleh, "Magnetic and electrical-assisted adsorption processes," in *Intensification of Sorption Processes*, Elsevier, 2022, pp. 71-93.
- [47] Decreto legislativo 18 luglio 2014, n.102, Attuazione della direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica, che modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE:
<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2014/07/18/14G00113/sg>
- [48] Gazzetta Ufficiale, DECRETO-LEGGE 29 settembre 2023, n. 131 Misure urgenti in materia di energia, interventi per sostenere il potere di acquisto e a tutela del risparmio: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2023/09/29/23G00141/sg>
- [49] Decreto "Condizionalità Green", Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, del 10 luglio 2024:
https://www.mase.gov.it/sites/default/files/archivio/bandi/CEE/dm_128076_11-07-2024.pdf
- [50] EUR-Lex, Comunicazione della Commissione - Disciplina in materia di aiuti di Stato a favore del clima, dell'ambiente e dell'energia 2022: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52022XC0218\(03\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52022XC0218(03))
- [51] Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, Decreto del Ministro della transizione ecologica n. 541 del 21 dicembre 2021

- "Rideterminazione dei corrispettivi a copertura degli oneri generali del sistema del gas applicati alle imprese a forte consumo di gas naturale": https://www.mase.gov.it/sites/default/files/archivio/allegati/trasparenza_valutazione_merito/dm_541_21_12_2021.Pdf
- [52] EUR-Lex, Direttiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 13 ottobre 2003 che istituisce un sistema per lo scambio di quote di emissioni dei gas a effetto serra nella Comunità e che modifica la direttiva 96/61/CE del Consiglio: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32003L0087&from=en>
- [53] EUR-Lex, Direttiva (UE) 2023/959 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 10 maggio 2023 recante modifica della direttiva 2003/87/CE, che istituisce un sistema per lo scambio di quote di emissioni dei gas a effetto serra nell'Unione, e della decisione (UE) 2015/1814, relativa all'istituzione e al funzionamento di una riserva stabilizzatrice del mercato nel sistema dell'Unione per lo scambio di quote di emissione dei gas a effetto serra: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023L0959>
- [54] Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, NOVITÀ EU ETS: <https://www.ets.minambiente.it/NovitaEUETS>
- [55] IEA Energy Efficiency Indicators: Essentials for Policy Making; IEA, Paris 2014
- [56] Philipsen GJM, Blok K, Worrell E. International comparisons of energy efficiency-Methodologies for the manufacturing industry. *Energy Policy* 1997;25:715-725
- [57] Bruni G, De Santis A, Herce C, Leto L, Martini C, Martini F, Salvio M, Tocchetti FA, Toro C. From Energy Audit to Energy Performance Indicators (EnPI): A Methodology to Characterize Productive Sectors. The Italian Cement Industry Case Study. *Energies* 2021;14:8436
- [58] Lawrence A, Thollander P, Andrei M, Karlsson M. Specific Energy Consumption/Use (SEC) in Energy Management for Improving Energy Efficiency in Industry: Meaning, Usage and Differences. *Energies* 2019;12:247.
- [59] Mengh, R, Papetti A, Germani M, Marconi M. Energy efficiency of manufacturing systems: A review of energy assessment methods and tools. *Journal of Cleaner Production* 2019;240:118276
- [60] Saygin D, Worrell E, Patel MK, Gielen DJ. Benchmarking the energy use of energy-intensive industries in industrialized and in developing countries. *Energy* 2011;36:6661-6673.
- [61] Worrell E, Bernstein L, Roy J, Price L, Harnisch J. Industrial energy efficiency and climate change mitigation. *Energy Efficiency* 2008;2:109
- [62] Muller P et al. Annual Report on European SMEs 2021/22. SMEs and environmental sustainability. SME Performance Review 2021/2022; European Commission. Publications Office of the European Union 2022.
- [63] Fawcett T, Hampton S. Why & how energy efficiency policy should address SMEs. *Energy Policy* 2020;140:111337.
- [64] Cagno E, Trianni A. Exploring drivers for energy efficiency within small- and medium-sized enterprises: First evidences from Italian manufacturing enterprises. *Applied Energy* 2013;104:276-285.
- [65] Johansson I, Mardan N, Cornelis E, Kimura O, Thollander, P. Designing Policies and Programmes for Improved Energy Efficiency in Industrial SMEs. *Energies* 2019;12:1338.
- [66] Herce C, Biele E, Martini C, Salvio M, Toro C. Impact of Energy Monitoring and Management Systems on the Implementation and Planning of Energy Performance Improved Actions: An Empirical Analysis Based on Energy Audits in Italy. *Energies* 2021;14:4723
- [67] Trianni A, Cagno E, Thollander P, Backlund S. Barriers to industrial energy efficiency in foundries: a European comparison. *Journal of Cleaner Production* 2013;40:161-176
- [68] Fleiter T, Schleich J, Ravivanpong P. Adoption of energy-efficiency measures in SMEs-An empirical analysis based on energy audit data from Germany. *Energy Policy* 2012;51:863-875
- [69] Thollander P, Paramonova S, Cornelis E, Kimura O, Trianni A, Karlsson M, Cagno E, Morales I, Jiménez Navarro JP. International study on energy end-use data among industrial SMEs (small and medium-sized enterprises) and energy end-use efficiency improvement opportunities. *Journal of Cleaner Production* 2015;104:282-296.
- [70] Velasco-Fernández, Raúl, Tessa Dunlop, and Mario Giampietro. "Fallacies of energy efficiency indicators: Recognizing the complexity of the metabolic pattern of the economy." *Energy Policy* 137 (2020): 111089
- [71] Abdulmalek, Fawaz A., and Jayant Rajgopal. "Analyzing the benefits of lean manufacturing and value stream mapping via simulation: A process sector case study." *International Journal of production economics* 107.1 (2007): 223-236.
- [72] Verma, Neha, and Vinay Sharma. "A literature review on energy value stream mapping (EVSM)." *International Journal of Advanced Science and Technology* 27.1 (2019): 1-8.
- [73] Baysan, Serdar, et al. "A simulation-based methodology for the analysis of the effect of lean tools on energy efficiency: An application in power distribution industry." *Journal of cleaner production* 211 (2019): 895-908.
- [74] Müller, Egon, Timo Stock, and Rainer Schillig. "A method to generate energy value-streams in production and logistics in respect of time-and energy-consumption." *Production Engineering* 8 (2014): 243-251.
- [75] Xie, Haiyan, et al. "Simulation of dynamic energy consumption in modular construction manufacturing processes." *Journal of Architectural Engineering* 24.1 (2018): 04017034.
- [76] Garza-Reyes, Jose Arturo, et al. "The effect of lean methods and tools on the environmental performance of manufacturing organisations." *International Journal of Production Economics* 200 (2018): 170-180.
- [77] Sihag, Nitesh, and Kuldip Singh Sangwan. "An improved micro analysis-based energy consumption and carbon emissions modeling approach for a milling center." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 104 (2019): 705-721.
- [78] Estrada-Gonzalez, Ivan E., et al. "Decreasing the environmental impact in an egg-producing farm through the application of LCA and

lean tools." *Applied Sciences* 10.4 (2020): 1352.

[79] Fontoura, Leonardo, et al. "Real-time energy flow mapping: A VSM-based proposal for energy efficiency." *Journal of Cleaner Production* 419 (2023): 137871.

[80] Trianni, A.; Cagno, E.; Farné, S. Barriers, Drivers and Decision-Making Process for Industrial Energy Efficiency: A Broad Study among Manufacturing Small and Medium-Sized Enterprises. *Appl. Energy* 2016, 162, 1537–1551

[81] Herce, C.; Martini, C.; Toro, C.; Biele, E.; Salvio, M. Energy Efficiency Policies for Small and Medium-Sized Enterprises: A Review. *Sustainability* 2024, 16, 1023

[82] Alexandros Maziotis, Ramon Sala-Garrido, Manuel Mocholi-Arce, Maria Molinos-Senante, A comprehensive assessment of energy efficiency of wastewater treatment plants: An efficiency analysis tree approach, *Science of The Total Environment*, Volume 885, 2023, 163539, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163539>.

[83] Dario Torregrossa, Joachim Hansen, Francesc Hernández-Sancho, Alex Cornelissen, Georges Schutz, Ulrich Leopold, A data-driven methodology to support pump performance analysis and energy efficiency optimization in Waste Water Treatment Plants, *Applied Energy*, Volume 208, 2017, Pages 1430-1440, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.012>.

[84] D. Torregrossa, G. Schutz, A. Cornelissen, F. Hernández-Sancho, J. Hansen, Energy saving in WWTP: Daily benchmarking under uncertainty and data availability limitations, *Environmental Research*, Volume 148, 2016, Pages 330-337, ISSN 0013-9351, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.04.010>.

[85] Gandiglio Marta , Lanzini Andrea , Soto Alicia , Leone Pierluigi , Santarelli Massimo, Enhancing the Energy Efficiency of Wastewater Treatment Plants through Co-digestion and Fuel Cell Systems, *Frontiers in Environmental Science*, Volume 5, 2017, <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00070>

[86] G. Sabia, L. Petta, F. Avolio, E. Caporossi, Energy saving in wastewater treatment plants: A methodology based on common key performance indicators for the evaluation of plant energy performance, classification and benchmarking, *Energy Conversion and Management*, Volume 220, 2020, 113067, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113067>.

[87] Vicent Hernández-Chover, Lledó Castellet-Viciano, Ramón Fuentes, Francesc Hernández-Sancho, Circular economy and efficiency to ensure the sustainability in the wastewater treatment plants, *Journal of Cleaner Production*, Volume 384, 2023, 135563, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135563>.

[88] Petrilli, A., Mattioli, D., Capua, F., Minieri, V., Papirio, S., Esposito, G. Modellazione dei processi di nitrificazione e denitrificazione simultanea accoppiati alla rimozione del fosforo in reattori a biofilm a letto mobile. *Journal of Water Process Engineering*, 59, 2024, 105022.

[89] Yang, Q., Wang, J., Wang, H., Chen, X., Ren, S., Li, X., Xu, Y., Zhang, H., Li, X. Rimozione dell'azoto da acque reflue a basso C/N in un reattore a biofilm anossico. *Bioresource Technology*, 224, 2017, 87-93.

[90] Yin, Z., Xiao, J., Chen, Z., Li, T., Xiao, R. Progettazione di un sistema MBBR intermittente basato su parametri di disturbo per il trattamento di acque reflue municipali. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(4), 2022, 6122-6133.

[91] Lanzetta, A., Mattioli, D., Di Capua, F., Minieri, V., Papirio, S., Esposito, G. Modellazione della nitrificazione e denitrificazione simultanea completa e semplificata accoppiata alla rimozione del fosforo in reattori a biofilm a letto mobile. *Journal of Water Process Engineering*, 59, 2024, 105022.

[92] Cedrone, G., Bracciale, M.P., Cafiero, L., Langone, M., Mattioli, D., Scarsella, M., Tuffi, R. Ottimizzazione dei parametri di pirolisi mediante design of experiment per la produzione di biochar da fanghi di depurazione. *Environments - MDPI* 11, 10, 2024, 210.

[93] Pelagalli, V., Langone, M., Matassa, S., Race, M., Tuffi, R., Papirio, S., Lens, P.N.L., Lazzazzara, M., Frugis, A., Petta, L., Esposito, G. Pirolisi dei fanghi di depurazione municipali: sfide, opportunità e nuove vie di valorizzazione per biochar, bio-olio e gas di pirolisi. *Environmental Science: Water Research and Technology*, 10, 10, 2024, 2282-2312.

[94] Cheng, S., Xing, D., Call, D.F., Logan, B.E. Elettrosintesi microbica diretta di metano dal biossido di carbonio mediante ossidazione di elettrodi a superficie ad alta area. *Nature Communications*, 2022, 13, 1541.

[95] Sposob, M., Bakke, R., Dinamarca, C. Sviluppo di bioreattori a colonna a scala di laboratorio per la conversione del syngas in biocombustibili. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 405, 126726.

[96] Mohammadrezaei, R., Zareei, S., Behroozi-Khazaei, N. Rapporto di miscelazione ottimale nei reattori di biogas: calcoli del bilancio energetico e simulazione della fluidodinamica computazionale. *Energy*, 159, 2018, 54-60.

[97] Tang, Q., Zeng, M., Zou, W., Jiang, W., Kahaer, A., Liu, S., Hong, C., Ye, Y., Jiang, W., Kang, J., Ren, Y., Liu, D. Una nuova strategia per la rimozione e il recupero simultanei dell'azoto dalle acque reflue senza emissione di N₂O mediante batteri azoto-assimilanti eterotrofi. *Science of The Total Environment*, 872, 2023, 162211.

[98] Mohammadrezaei, R., Zareei, S., Behroozi-Khazaei, N. Rapporto di miscelazione ottimale nei reattori di biogas: calcoli del bilancio energetico e simulazione della fluidodinamica computazionale. *Energy*, 159, 2018, 54-60.

[99] Tai, L., de Caprariis, B., Scarsella, M., De Filippis, P., Marra, F. Miglioramento della qualità del bio-grezzo dalla liquefazione idrotermale del legno di quercia assistita da metalli zerovalenti. *Energy and Fuels*, 2021, 35(12), 10023-10034.

[100] Tai, L., Musivand, S., de Caprariis, B., Ma, W., De Filippis, P. Co-trattamento delle plastiche con acqua subcritica per la produzione di prodotti chimici di valore e combustibile solido pulito. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 337, 130529.

[101] Bracciale, M.P., de Caprariis, B., Musivand, S., Damizia, M., De Filippis, P. Riciclaggio chimico dei rifiuti dell'industria dell'occhialeria in

- acetato di cellulosa mediante trattamento idrotermale. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2024, 63(12), 5078-5088.
- [102] Amadei, A., Bracciale, M.P., Damizia, M., de Caprariis, B., Ferrasse, J.-H., Scarsella, M. Liquefazione idrotermale di composti modello di rifiuti organici: l'effetto della velocità di riscaldamento sulla resa e qualità del biogrezzo da miscele di cellulosa-albumina-olio di girasole. *ACS Omega*, 2024, 9(40), 41194-41207.
- [103] Lucian, M., Volpe, M., Merzari, F., Wüst, D., Kruse, A., Andreottola, G., Fiori, L. Carbonizzazione idrotermale accoppiata alla digestione anaerobica per la valorizzazione della frazione organica dei rifiuti solidi urbani. *Bioresource Technology*, Volume 314, 2020, 123734.
- [104] Zhu, Y., Yu, D., Koornneef, E., Parker, W.J. Valutazione pilota della digestione anaerobica a cascata di fanghi misti di trattamento delle acque reflue municipali. *Water Environment Research*, 2024, 96, e11072.

b) Attività svolte nel triennio precedente

Diverse delle attività proposte nel progetto costituiscono una naturale continuazione e sviluppo di attività presenti nel precedente triennio, sia da un punto di vista di contenuti, sia di approcci metodologici.

Per quanto riguarda il WP1, LA 1.1, il triennio precedente ha visto l'ENEA impegnata nella definizione di politiche di etichettatura energetica ed ecodesign per i prodotti connessi all'energia nei settori industriale, professionale e domestico. L'ENEA ha fornito supporto al MASE e al MiMiT per la negoziazione con la Commissione Europea e gli Stati Membri delle proposte del Regolamento quadro 2024/1781 e della Direttiva 2024/1799 sul diritto alla riparazione, e di nuovi regolamenti di prodotto, svolgendo anche azioni di monitoraggio dell'applicazione dell'etichettatura energetica nei punti vendita e di miglioramento dell'efficacia della sorveglianza del mercato a protezione dei consumatori e dei produttori nazionali. Sono stati infine predisposti nuovi documenti relativi agli standard mondiali ed europei per le prestazioni degli apparecchi del lavaggio (lavatrici, lavasciugatrici ed asciugatrici) e più recentemente della refrigerazione (frigoriferi, frigocongelatori e congelatori) nei settori domestico e professionale.

Le LA 1.2 - 1.4 sul calore industriale, nel corso del triennio precedente hanno portato alla creazione di uno strumento di simulazione, in grado di supportare le aziende nell'identificazione di opportunità di recupero del calore di scarto industriale a bassa temperatura. Il software, sviluppato in ambiente Excel/VBA e comprendente sei moduli (di cui due database finalizzati a raccogliere informazioni sulle tecnologie di recupero e casi di studio), consente di individuare le potenziali sorgenti di calore di scarto associate ai processi produttivi, definire i possibili interventi di recupero di calore di scarto (interni o esterni allo stabilimento medesimo) e di metterli a confronto rispetto a criteri di natura energetica, economica ed ambientale. In particolare, tra le opzioni di recupero interno, il software consente di indagare, tramite un modulo dedicato, l'opportunità di integrare reti di scambiatori di calore o operare il retrofit di reti esistenti, attraverso l'applicazione della pinch analysis. Nel corso del PTR 2022-24, tale modulo del software è stato ulteriormente potenziato, con l'obiettivo di renderlo uno strumento stand-alone, in grado di consentire anche lo studio di processi industriali caratterizzati da flussi termici variabili nel tempo, tra cui i processi di tipo batch o processi caratterizzati da variazioni stagionali. A tale scopo, nell'ambito di tale attività di ricerca, sono stati sviluppati anche due strumenti a supporto del modello per l'applicazione della pinch analysis, ovvero un database per la caratterizzazione dei processi industriali ed una metodologia per la definizione di profili tempo-dipendenti delle richieste di calore industriale. Il database, in particolare, oltre ad individuare e caratterizzare le fasi di processo con richieste di energia termica per riscaldamento/raffreddamento e i fattori responsabili delle fluttuazioni temporali, raccoglie anche un insieme di casi di studio riguardanti l'applicazione della pinch analysis a processi industriali.

L'attività di ricerca delle LA 1.6 - 1.8 svolta nel PTR 22-24 ha analizzato l'applicazione di trattamenti termici innovativi (TTI) e non termici (TNNT) in processi chiave dell'industria alimentare quali ad esempio pastorizzazione e sterilizzazione, oltre che per la valorizzazione dei residui di lavorazione. Sono state analizzate da letteratura tecnologie non termiche come i campi elettrici pulsati (PEF), gli ultrasuoni (US) e l'omogenizzazione ad alta pressione (HHP), oltre a tecnologie termiche innovative come il riscaldamento ohmico (OH) e a radiazione infrarossa (IR). In parallelo, si è studiato l'impatto di processi convenzionali come la pastorizzazione e la sterilizzazione (HTST, UHT), analizzando consumi energetici, emissioni di CO₂ e costi operativi. Le tecnologie TTI e TNNT hanno mostrato vantaggi significativi in termini di efficienza energetica, sostenibilità e miglioramento della qualità dei prodotti. Sono stati creati strumenti comparativi per facilitare la comprensione delle differenze tra processi tradizionali e innovativi, e definiti indicatori specifici legati a energia, economia e qualità dei prodotti. È stata inoltre introdotta una metodologia preliminare di valutazione energetica ed economica (MVEE), applicata a vari casi di studio, come l'uso dei PEF per la pastorizzazione di succhi di frutta e il riscaldamento ohmico per la sterilizzazione di alimenti solidi-liquidi in alternativa ai tradizionali trattamenti termici (HTST) ad una temperatura di 90°C e con un tempo di processo di 15s. Un'ulteriore analisi ha confrontato la pelatura di frutta e verdura tramite metodi convenzionali e innovativi, evidenziando vantaggi economici e ambientali nella valorizzazione degli scarti.

Infine, grazie ai dati delle diagnosi energetiche forniti da ENEA per la produzione di succhi di frutta, si è valutato il potenziale di efficienza energetica delle tecnologie studiate, confermando la validità della metodologia MVEE per promuovere la sostenibilità nell'industria alimentare.

L'attività sul settore vitivinicolo e oleario (LA 2.9 - 2.11) nel triennio 2022-24 ENEA ha riguardato l'analisi dei consumi energetici nelle aziende vitivinicole siciliane. Le aziende vitivinicole sono state censite e classificate sulla base dei consumi energetici, sono stati effettuati rilievi e monitoraggi su aziende selezionate allo scopo di elaborare indicatori di prestazione energetica, stabilire dei benchmark e

individuare interventi di efficientamento secondo le migliori prassi in base alla tipologia di azienda. Il progetto per il triennio 2025-27 mira a estendere queste attività all'intero settore vitivinicolo su scala nazionale e sviluppare benchmark energetici consistenti e modelli di efficientamento replicabili basati sul monitoraggio dei consumi e le migliori prassi di efficientamento.

Nel triennio 2022-2024 (LA 1.12 – 1.16) è stata realizzata una mappatura completa delle filiere OSC esistenti e delle aziende potenzialmente parte di future filiere OSC sul territorio nazionale; è stato inoltre condotto uno studio energetico dei processi produttivi coinvolti nella filiera OSC partendo dalle diagnosi energetiche raccolte da ENEA ai sensi del D.Lgs. 102/2014, che ha portato alla definizione di una metodologia integrata per l'analisi energetica a livello di filiera e ad una prima identificazione di buone pratiche; sono stati identificati e classificati i materiali "innovativi" o "non convenzionali", per i quali è anche stato realizzato un framework decisionale per facilitare le aziende nella valutazione di una loro potenziale adozione; infine, è stato avviato l'osservatorio nazionale OFFICIO sulle filiere di soluzioni modulari e OSC per l'efficientamento energetico degli edifici, attraverso la definizione di una rete nazionale di stakeholder e di strumenti per la comunicazione, la diffusione e la facilitazione del dialogo.

Nell'ambito dei precedenti PAR (2019-2021) e PAR (2022-2024) gli stessi soggetti della presente proposta hanno svolto attività di ricerca sullo sviluppo di materiali compositi magnetici per l'efficientamento di processi separativi industriali (LA 1.17 – 1.2). In questo ambito è stata maturata un'esperienza relativa allo sviluppo di materiali magnetici compositi attivabili mediante induzione e sulla caratterizzazione funzionale dei materiali sorbenti prodotti. Nello specifico sono stati sintetizzati i seguenti metal-organic framework: MIL 100 (Fe), UiO66, HKUST-1 e CLAF-20. Con questi ultimi due sono stati sviluppati i compositi magnetici. L'attività ha previsto la realizzazione di un banco di prova per lo studio di processi di adsorbimento e desorbimento mediante induzione che può essere opportunamente ottimizzato e utilizzato nel triennio 2025-2027.

Per quanto riguarda l'attività proposta all'interno del WP2, nel triennio precedente per alcuni settori specifici merceologici (alberghi, uffici, plastica, tessile, aeroporti, acciaio, etc) è stata svolta una approfondita analisi delle diagnosi energetiche obbligatorie ai sensi dell'articolo 8 del D.Lgs. 102/2014 e s.m.i. con il fine di individuare indici di benchmark, soluzioni tecnologiche allo stato dell'arte, valutare l'impatto di queste in termini di costo beneficio, definire metodologie di approccio alla diagnosi energetica, etc. L'obiettivo principale è stato quello di fornire alle imprese, così come ai decisori politici, un insieme di informazioni e strumenti utili per affrontare il tema dell'efficienza energetica. Partendo da queste analisi nel triennio 2022-2024 sono state realizzate 5 linee guida settoriali (Alberghi, Uffici, Aeroporti, Plastica, Tessile) raccolte in una collana denominata "quaderni dell'efficienza energetica" nata proprio all'interno del programma di ricerca di sistema. Parallelamente, per dare maggiore evidenza alle opportunità derivanti dagli interventi di efficientamento energetico è stata avviata la definizione di una metodologia volta a individuare e quantificare i benefici multipli associati a tali interventi da cui è scaturito un ulteriore "quaderno" illustrativo. Questa metodologia considera sia aspetti qualitativi che, ove possibile, quantitativi, in relazione agli interventi tipici di ciascun settore economico analizzato. Particolare attenzione è stata dedicata alle PMI, che spesso dispongono di strumenti limitati per valutare le opportunità derivanti dall'efficientamento energetico. In questo contesto, le attività di sensibilizzazione e informazione risultano fondamentali per promuovere una maggiore consapevolezza e incoraggiare azioni concrete.

Per semplificare l'individuazione delle criticità e di conseguenza, delle opportunità di efficientamento energetico all'interno di una PMI è stato sviluppato e reso disponibile da fine 2024 un tool dedicato a questa tipologia di aziende ToolPMI. Questo strumento consente alle PMI di effettuare una autodiagnosi energetica identificando le aree più critiche e fornendo possibili suggerimenti di efficientamento energetico. Il tool ha anche lo scopo di consentire ad ENEA di raccogliere informazioni utili su quelle aziende di piccole dimensioni non soggette all'obbligo di diagnosi energetica che rappresentano la maggioranza del tessuto produttivo italiano. È stato inoltre lanciato un ulteriore tool, sviluppato con l'università di Tor Vergata, di supporto alla progressiva implementazione di sistemi di gestione dell'energia (certificati e non) all'interno delle organizzazioni aziendali precorrendo quanto previsto dalla nuova direttiva efficienza energetica.

Per quanto riguarda il WP3 l'obiettivo principale del triennio precedente è stato quello di implementare, attraverso lo sviluppo di materiali, reattori e processi, la produzione di idrogeno verde da biomasse residuali e verificarne la fattibilità con studi preliminari su scala laboratorio mediante processi innovativi ad alta pressione. L'attività è stata anche rivolta a studi preliminari per la valorizzazione e lo stoccaggio non-geologico di CO₂ che hanno riguardato scorie di acciaieria e l'implementazione di brine. Sono stati studiati inoltre processi con reattori al plasma freddo per la produzione di e-fuels con alta concentrazione di CO provenienti dalla dissociazione della CO₂ e di correnti di O₂ puro che possono essere riciclate nel processo per aumentarne l'efficienza.

Relativamente al WP4 le attività del PTR 2022-24, a loro volta in continuità con il PTR 2019-21 hanno cercato di rispondere alla necessità di adeguamento alla normativa di settore. Per questo motivo sono stati ampliati gli strumenti per la valutazione di scenari di ottimizzazione energetica basati su approcci efficienti e circolari, grazie ad un'estesa raccolta di dati presso i gestori e all'analisi delle diagnosi energetiche del 2019, per fornire ai gestori dati per il benchmark e definire le priorità di intervento. Il software DEES per il Labelling Energetico e per l'analisi di scenario, sviluppato nel precedente PTR, è stato ulteriormente arricchito di funzionalità, in particolare di una procedura per valutare la distanza dagli obiettivi di neutralità energetica. Inoltre, nel PTR 2022-24 ci si è focalizzati particolarmente sulle richieste energetiche della filiera del riutilizzo di reflui depurati in ambito agricolo (depurazione, stoccaggio, distribuzione), tramite l'analisi di casi studio.

Nel triennio 2022-24 sono state sperimentate per la prima volta tecnologie di trattamento dei fanghi di depurazione per minimizzarne la produzione e recuperare energia e materie prime, in particolare mediante trattamenti termici. Si è proseguito inoltre lo sviluppo di altre tecnologie come il trattamento in reattore MBBR in alternanza di microaerazione e anossia (portato in scala pilota in ambiente rilevante),

il reattore ESG di granulazione anaerobica (efficientato in scala laboratorio) ed il reattore di biometanazione idrogenotrofa (testato su scala pilota per l'ottimizzazione del sistema di diffusione gas-liquido)

Come richiesto in fase di integrazione della proposta progettuale, si riporta di seguito un maggiore dettaglio degli avanzamenti del progetto rispetto alle attività svolte nel triennio precedente con i corrispondenti valori di TRL. Si fa notare che non essendo possibile riportare tale risposta in forma tabellare (come suggerito nella medesima richiesta), la tabella è stata creata sostituendo i delimitatori di colonna con il simbolo "|"; l'intestazione delle colonne è riportata nella prima riga e fra una riga e la successiva (corrispondenti ad una LA o a gruppi di LA omogenee) è riportata una riga vuota.

Linea di Attività || Attività specifica || PTR 2022 || 24 || PTR 2025 || 27 || TRL PTR 2022 || 24 || TRL PTR 2025 || 27

LA1.1

Preparazione, attuazione, monitoraggio e controllo della legislazione per l'ecoprogettazione l'etichettatura energetica || Preparazione, attuazione, monitoraggio e controllo della legislazione per l'ecoprogettazione l'etichettatura energetica || Preparazione, attuazione, monitoraggio e controllo della legislazione per l'ecoprogettazione l'etichettatura energetica || 6 || 7

LA 1.2, LA 1.3

Sviluppo di modelli per l'efficientamento di processi industriali || Sviluppo di strumenti per l'applicazione della pinch analysis a processi industriali caratterizzati da flussi termici variabili nel tempo || Sviluppo di modelli per l'indagine di soluzioni di decarbonizzazione del calore industriale, incluse le opportunità basate sull'impiego di strategie di demand response e sistemi di accumulo termico || 5 || 6

LA 1.4

Sviluppo di modelli per l'efficientamento di processi industriali || Non presente || Sviluppo di modelli di simulazione dinamica per la definizione di strategie di controllo di sistemi di produzione del calore industriale basati su tecnologie di decarbonizzazione e recupero di calore || NP || 5/6

LA 1.5 || Monitoraggio energetico di Data Center || HPC || Non presente || Monitoraggio energetico di Data Center || HPC || NP || 4

LA 1.6, LA 1.7

Studio sui trattamenti di natura non termica e trattamenti termici innovativi in sostituzione di processi termici tradizionali nell'industria alimentare || Identificazione di best practices da letteratura, definizione preliminare di una metodologia di valutazione energetica ed economica e sviluppo di strumenti di supporto alle decisioni per le aziende. || Aggiornamento di best practices, ottimizzazione di una metodologia di valutazione energetica ed economica e sviluppo di un software per il supporto alle decisioni per le aziende. || 5/6 || 7/8

LA1.8

Valutazione dell'Impatto Economico e Ambientale dell'Integrazione di Tecnologie Innovative nei Processi dell'Industria Alimentare || Identificazione di best practices da letteratura, applicazione al processo di trasformazione del pomodoro, definizione di una metodologia di valutazione energetica ed economica e sviluppo di strumenti di supporto alle decisioni per le aziende. || Aggiornamento di best practices, applicazione a processi e prodotti alimentari diversi dal pomodoro, validazione consolidamento di una metodologia di valutazione energetica ed economica e utilizzo di simulatori di processo e analisi del ciclo di vita (LCA) || 5/6 || 7/8

LA 1.9, LA1.10

Efficienza energetica nelle filiere vitivinicola e olivicola || olearia
Censimento, analisi efficienza, best practice e Guida per efficientamento energetico aziende vitivinicole siciliane. Casi studio e classificazione. || Estensione nazionale analisi e Guida a filiere vitivinicola e olivicola || olearia. Censimento, classificazione, best practice, casi studio, benchmarking, indicatori. || 5 || 7

LA 1.11 || Consumi energetici in oleifici e definizione di criteri per sistemi di autoconsumo da fonti rinnovabili

Non presente || Studio consumi energetici in oleifici. Criteri progettazione/gestione sistemi autoconsumo da FER. Analisi dati impianto poligenerazione UniBA/ENEA. || NP || 7

LA 1.12, LA 1.13

Osservatorio OFFICIO, line guida ed elaborazione di raccomandazioni di policy || Creazione dell'Osservatorio OFFICIO ed analisi generale della filiera e dei processi produttivi || Sviluppo per tematiche specifiche, definizione linee guida, potenziamento sito,

formazione e policy support || 6 || 7

LA 1.14

Mappatura soluzioni OSC || Filiere legno e acciaio: elaborazione atlante soluzioni OSC e della ricerca applicata. || Approfondimento tecnico || economico quantitativo soluzioni OSC. Analisi di fattibilità su edificio tipo. || 7 || 8

LA 1.15

Filiere e business models || Identificazione di filiere e business model del mercato attuale || Analisi dettagliato delle filiere di successo e delle tecnologie abilitanti per la creazione di business model di filiera || 7 || 8

LA 1.16

Sostenibilità e circolarità delle soluzioni OSC per la riqualificazione edilizia come servizio. || Mappatura di materiali di scarto da utilizzare per la produzione di materiali termoisolanti a basso impatto. || Analisi soluzioni OSC focalizzata su service life, riqualificazione come servizio, durabilità, prospettive di smontaggio, recupero o riuso || 6 || 7

LA 2.1, LA 2.2

Analisi delle diagnosi energetiche e quaderni settoriali || Analisi settoriale di 5 settori produttivi e sviluppo di quaderni settoriali || Analisi settoriale di 5 settori produttivi diversi da quelli del triennio precedente e sviluppo di ulteriori quaderni settoriali || 5/7 || 5/7

LA 2.1, LA 2.2

Sviluppo di una metodologia per il confronto delle performance energetiche degli edifici/immobili secondo quanto previsto dalle nuove direttive EU relative alla tassonomia || Non presente || Sviluppo di un tool in grado di fornire indicazioni sul grado di rispondenza a criteri previsti dalla tassonomia || NP || 5/7

LA 2.1, LA 2.2, LA 2.3, LA 2.4, LA 2.5

Osservatorio PMI e sviluppo di strumenti per l'individuazione delle opportunità di efficientamento energetico nelle PMI || Prima versione di un tool dedicato agli audit energetici nelle PMI || Creazione di una tavolo tecnico o osservatorio partecipato dei principali stakeholders del settore. Definizione e produzione degli strumenti utili all'individuazione delle opportunità di efficientamento energetico. || 6 || 7

LA 2.1, LA 2.2, LA 2.7

Metodologie per l'individuazione delle inefficienze energetiche nelle imprese || Non presente || Sviluppo di una metodologia, basata sulle tecniche della Lean production, che permetta di individuare le inefficienze energetiche in quei settori produttivi dove l'utilizzo dei KPI risulta essere di difficile applicazione || NP || 5/7

LA 2.6

Sistema di ottimizzazione dell'analisi economica degli interventi || Sviluppo di modelli per l'ottimizzazione di impianti di cogenerazione, pompe di calore || Sviluppo di un modello per l'ottimizzazione tecnico economica di un impianto di autoproduzione energetica con produzione ed utilizzo di idrogeno. || 5/7 || 5/7

LA 2.8

Modelli econometrici per l'individuazione delle barriere all'implementazione delle soluzioni di efficientamento energetico || Sviluppo e applicazione su un settore produttivo di modelli econometrici per la valutazione degli impatti di politiche di incentivazione sull'implementazione degli interventi || Ampliamento dell'attività svolta nel precedente PTR valutando più cicli di diagnosi energetiche (2019 e 2023) ed allargando il lavoro a più settori || 5/6 || 6/7

LA 3.1, LA 3.2

Sviluppo di materiali sorbenti e catalizzatori in forma granulare per campagne sperimentali di gassificazione. Test per la verifica su scala pilota di un processo innovativo di produzione di H2 verde in pressione da biomasse intensificate con la cattura di CO2 mediante sorbenti solidi (Sorption Enhanced Gasification (SEG)). || Sono stati sviluppati materiali sorbenti e catalizzatori. Sono stati condotti test SEG su scala pilota mediante gassificatore a tamburo rotante (Rotary Drum Reactor, RDR) e gassificatore a doppio letto fluidizzato (Dual Fluidized Bed, DFB) per dimostrare il processo a pressione ambiente. Sono stati condotti studi preliminari di assorbimento di CO2 in pressione mediante bilancia termogravimetrica in pressione (HP || TGA) e test SEG a 10 bar su banco prova da laboratorio. || Sarà progettato e sviluppato un nuovo gassificatore in pressione di taglia 4kg/h di materiale da gassificare, operante fino a 10 bar e a temperatura compresa tra 650 °C e 850 °C. Saranno condotte campagne sperimentali di gassificazione intensificata con cattura di CO2 utilizzando sia biomasse residuali (sansa di oliva e forsu) che biomasse miste a rifiuti plastici (plasmix).

La forsu e la plasmics non sono mai state utilizzate in passato nei nostri test SEG. || 2 || 3

LA 3.1, LA 3.2

Test di valorizzazione di CO₂ mediante plasmii freddi. || Sono state condotte prove di dissociazione di CO₂ in O₂ e CO mediante reattore a scarica di barriera dielettrica DBD. Il sistema è stato anche modificato per alloggiare membrane di ossigeno supportate su metallo e sono stati condotti test preliminari di tenuta e stabilità del sistema. Sono state condotte anche prove di dissociazione del metano. || Si proseguirà con i test di membrane a separazione di ossigeno e si cercherà di implementare il sistema con catalizzatori per favorire sia la produzione di un syngas arricchito di CO a partire da miscele di CO₂ che di CH₄, anche con catalizzatori a valle del reattore DBD. || 1/2 || 3

LA 3.1, LA 3.2

Test di mineralizzazione di CO₂. || Nelle annualità passate sono state condotte campagne di mineralizzazione di CO₂ su scorie bianche e acque di scarto di processi industriali. || Verranno condotti test di mineralizzazione di CO₂ su scorie industriali mescolate a brine. Questa combinazione di scarti industriali non è stata investigata in precedenza. Verrà collaudata ed impiegata allo scopo una nuova autoclave, acquisita mediante altro progetto. || 2 || 3

LA 3.1, LA 3.2

Sviluppo di materiali innovativi per la cattura di CO₂ a bassa temperatura e dall'aria. || Non presente || Studio di materiali sorbenti supportati su membrane polimeriche ad elevata area superficiale, selettivi per la CO₂ a bassa temperatura (60 || 400 °C) per rimuovere la CO₂ restante (2 || 3% vol.) e completare l'upgrading del syngas e il raggiungimento di tenori di H₂ superiori al 95% a valle del reforming dei TAR. Studio di materiali sorbenti supportati su membrane polimeriche per applicazioni di CCS su flue gas e DAC, concentrandosi sulla rigenerazione e la ciclazione di questi materiali. || NP || 1/2

LA 3.1, LA 3.2

Sviluppo di catalizzatori per applicazione nelle reazioni di dry reforming del metano (DRM). || Non presente || Sviluppo di catalizzatori per DRM a base di nichel di metalli preziosi recuperati da catalizzatori esausti. || NP || 1/3

LA 3.3

Test sperimentali di gassificazione e validazione e verifica delle analisi CFD su un reattore per gassificazione in pressione. || Simulazioni Euleriane || Lagrangiane CPFD di un reattore di gassificazione in pressione su scala da laboratorio. Progettazione di un "modello freddo" del gassificatore in pressione di cui sopra. || Realizzazione e test del "modello freddo" per: i) verificare la circolazione di materiale del letto tra il gassificatore operante a p=10 bar e il calcinatore operante a p atmosferica, e ii) validare le simulazioni CPFD effettuate sul reattore. Test sperimentali su scala da banco, per la produzione di bio/elettro || combustibili sfruttando la CO₂ rilasciata dal calcinatore. Simulazione del processo integrato per la sintesi di bio/elettro || combustibili. || 2/3 || 4

LA 3.4

Processi innovativi per cattura della CO₂ in impianti per la produzione del cemento. || Attività conclusa con identificazione e simulazione di schemi impiantistici basati su processi di Calcium looping (TRL 7) e ammine (TRL 8), e valutazione KPI energetici, ambientali ed economici. || Pubblicazione dei risultati delle simulazione e ottimizzazione dei processi identificati. || 7/8 || 7/8

LA 3.4

Processi innovativi per cattura della CO₂ in impianti per la produzione di acciaio. || Analisi preliminari con cattura della CO₂ con processo Calcium Looping da processi tradizionali di produzione dell'acciaio. || Focus su integrazione di sistemi innovativi di cattura della CO₂ (TRL 5 || 7) in processi di produzione di preridotto (DRI). || NP || 5/7

LA 3.4

Processi innovativi per cattura della CO₂ in impianti di potenza. || Identificazione e simulazione di sistemi integrati di produzione di potenza con tecnologie innovative di cattura della CO₂ (TRL 5 || 7). Focus su inceneritori e cicli combinati a gas naturale. || NP || 5/7

LA 3.4

Studio di sistemi di cattura della CO₂ dall'aria. || Analisi preliminari di letteratura e identificazione delle tecnologie principali di cattura dall'aria: solid || DAC e liquid || DAC. || Analisi dei costi e consumi di energia delle soluzioni tecnologiche principali identificate: solid || DAC (TRL 7) e liquid || DAC (TRL 6) || NP || 6/7

LA 3.5

Sviluppo di materiali per l'abbattimento dell'H₂S nel syngas a valle di processi di gassificazione in pressione. || Sviluppo di materiali per l'abbattimento di gas acidi direttamente nel reattore di gassificazione alla pressione di 1 bar, utilizzando come condizioni iniziali la miscela presente nel gassificatore presente in ENEA Casaccia. Ottimizzazione delle condizioni operative per massimizzare l'abbattimento, in particolare di H₂S all'interno del reattore; interazioni con CaO presente nel gassificatore per la cattura della CO₂. || Partendo dall'ottimizzazione già effettuata nel triennio precedente, sarà condotto uno studio dell'effetto della pressione sul processo di abbattimento dei gas acidi e del tar contenuti nel syngas. Tale studio ha come scopo quello di testare i materiali in condizioni di lavoro prossime a quelle di impianti industriali. La sperimentazione dei nuovi materiali per la rimozione di H₂S sarà effettuata a pressioni nell'intervallo 5 || 10 bar mediante campagne sperimentali presso un impianto su scala di laboratorio di purificazione di syngas e, una volta ottimizzate le condizioni, nell'impianto presente in Casaccia. Questa attività rappresenta un passo fondamentale verso l'integrazione dei materiali in processi di gassificazione reali. || 1/3 || 4

LA 3.6

Progettazione, sintesi e caratterizzazione di catalizzatori innovativi per SMR, DMR e SE || SMR || Non presente || Sarà definito il metodo di sintesi e l'ottimizzazione delle condizioni di calcinazione per ossidi perovskitici monofasici per lo sviluppo di catalizzatori per test SMR, DMR e SE || MR. Le reazioni catalitiche saranno condotte nel reattore a letto fisso e nel microreattore presenti presso il laboratorio SFERO del Centro Casaccia. || NP || 1/3

LA 4.1

Analisi diagnosi energetiche || Analisi diagnosi energetiche 2019 || Analisi diagnosi energetiche 2023 con confronto temporale 2019 || 2023 || 6 || 7

LA 4.1

Sviluppo DEES || Sviluppo software DEES come cartella Microsoft Excel. || Trasformazione in web app, revisione dei pesi dei KPI basata sul feedback dei gestori e sui risultati dell'analisi delle diagnosi energetiche, revisione e ottimizzazione dei moduli presenti e sviluppo di nuovi moduli in linea con gli obiettivi della nuova direttiva UWWTD (es. trattamenti quaternari, valutazione emissioni GHG) || 6 || 7

LA 4.2

Modellazione || Focalizzazione su richieste energetiche della filiera del riutilizzo di reflui depurati || Modellazione di un impianto energeticamente neutro, a partire da un impianto reale e rappresentativo del contesto italiano. || 5 || 6

LA 4.1, LA 4.2

Trattamenti termici dei fanghi || Prima sperimentazione di pirolisi e trattamenti idrotermali || Perfezionamento con approccio DoE, co || pirolisi di fanghi con rifiuti plastici, caratterizzazione degli oli come combustibili || 2 || 4

LA 4.1, LA 4.2

Utilizzo del biochar/hydrochar || Prove esplorative di attivazione dell'hydrochar e prove di adsorbimento CO₂ || Utilizzo come additivo/co || compostato nei processi di compostaggio, valutazione della qualità degli ammendanti prodotti || 2 || 4

LA 4.1, LA 4.2

Biometanazione || Test su scala pilota per l'ottimizzazione del sistema di diffusione gas || liquido || Sviluppo di sistemi ibridi con biomassa adesa e sospesa per aumentare la cinetica di produzione e ridurre i volumi dei reattori. Conversione biologica del syngas in biometano. Test di possibile riutilizzo del char come adsorbente della CO₂. || 4 || 5

LA 4.2

Trattamento MBBR || Sviluppo e test in ambiente reale di un reattore MBBR pilota || Proseguimento della sperimentazione in scala reale. Ottimizzazione per reflui con basso rapporto C/N. Adeguamento delle logiche di controllo avanzate basate sul monitoraggio in tempo reale. || 5 || 6

LA 4.3

Processo biologico assimilativo || Non presente || Sviluppo di un processo biologico assimilativo mono || stadio per il trattamento e il recupero di nutrienti dalle acque reflue || NP || 3/5

LA 4.3

Modellazione biometanazione || Non presente || Sviluppo di un modello matematico di simulazione di un bioreattore anaerobico di upgrading del biogas a biometano || NP || 2/4

LA 4.4

Digestori anaerobici a cascata (CAD) Combinazione CAD + HTC || Non presente || Sviluppo e ottimizzazione di sistema CAD per incremento produzione biogas da fanghi municipali. Studio della combinazione del sistema CAD con processo di Hydrothermal Carbonization (HTC) || NP || 3/5

LA 4.5

Liquefazione idrotermale (HTL) || Ottimizzazione delle condizioni di processo HTL su fanghi, valutazione dei prodotti e loro upgrading || Co || trattamento idrotermale di fanghi con materiali polimerici, upgrading avanzato dei prodotti || 3 || 5

LA 4.5

Valorizzazione char e ceneri || Analisi preliminare || Sviluppo di applicazioni innovative per char e ceneri, incluso uso come catalizzatori || 2 || 4

c) Obiettivi scientifici e tecnologici e progressi attesi rispetto allo stato dell'arte

Il progetto si pone l'obiettivo di sviluppare metodi, strumenti e soluzioni per incrementare l'efficientamento energetico del settore industriale, favorendo un approccio analitico e integrato che vada dal singolo prodotto/macchinario al processo produttivo, filiera produttiva fino al comparto/settore, con focus specifici sull'efficientamento dei processi termici, delle PMI, delle industrie hard to abate e sulle filiere dell'Off-Site Construction per la riqualificazione del parco immobiliare e del riutilizzo idrico. Le attività proposte risultano coerenti e in linea con i principali documenti europei di indirizzo strategico, quali il Clean Energy Package, il Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC), il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), e con gli obiettivi nazionali di riduzione delle emissioni. In particolare, nel PNIEC viene evidenziata la necessità di "coniugare le politiche di decarbonizzazione con (...) il mantenimento della competitività e dell'occupazione, data la struttura del tessuto produttivo e manifatturiero italiano, non solo nei confronti dei paesi extraeuropei che ancora non attuano con pari determinazione e velocità le politiche di decarbonizzazione, ma anche evitando fenomeni di concorrenza intraeuropea, a causa di misure nazionali non armonizzate a livello comunitario". Il ruolo dell'industria, e in particolare della "piccola-media industria", nella riduzione del consumo energetico e delle emissioni nazionali, viene quindi ancora una volta sottolineato e valorizzato.

Il SET Plan, nell'ambito dell'Action 6 relativa a "Energy Efficiency in Industry" pone il focus sui seguenti elementi fondamentali: il recupero e la valorizzazione del calore di scarto industriale, la promozione di sinergie all'interno di catene e distretti industriali per una migliore gestione delle risorse energetiche, la cattura e l'uso della CO₂ come fonte energetica alternativa per i processi industriali, la promozione della gestione efficiente dell'energia anche attraverso la diffusione di strumenti per il capacity building e la condivisione delle informazioni e delle innovazioni tra i principali stakeholder coinvolti nei processi di efficientamento degli impianti industriali. Tale focus è assolutamente in linea con le attività proposte nel progetto.

Per questo motivo, i primi due WP del progetto partono da un'analisi legata alla verifica dell'efficienza energetica dei prodotti dell'industria nazionale legati al consumo di energia.

Le tematiche affrontate nel WP1 riguardanti lo sviluppo di metodologie e strumenti per l'efficientamento di alcuni settori e filiere industriali, lo sviluppo di metodi e standard per la progettazione ecocompatibile e la valutazione dell'impatto energetico e funzionale dei prodotti connessi all'energia (LA 1.1), lo sviluppo di tecnologie per l'elettrificazione dei processi, il recupero e riuso del calore di scarto. In particolare, le attività sull'etichettatura energetica e l'ecodesign (LA 1.1) comprendono la revisione di Regolamenti di prodotto esistenti nell'ambito della Direttiva 2009/125/CE per i prodotti del settore domestico, professionale e commerciale per i prodotti elencati nell'Articolo 79 del Regolamento 2024/1781. Alla revisione dei requisiti esistenti in senso più restrittivo si aggiungono nuovi requisiti relativi all'efficienza dei materiali & delle risorse e all'economia circolare. In parallelo il supporto alla sorveglianza del mercato è necessario per garantire il risparmio di energia/risorse e la conformità agli specifici requisiti di compatibilità ambientale dei singoli prodotti, mentre la preparazione di nuovi standard mondiali, europei e nazionali permetterà di misurare i parametri eco-prestazionali considerati nella legislazione comunitaria per l'ecodesign. Infine, il trasferimento dei risultati dell'Azione Concertata pan-europea ai singoli Stati Membri inclusa l'Italia favorirà una più efficace sorveglianza del mercato nazionale.

L'attività sul calore industriale (LA 1.2 - 1.4) mira allo sviluppo di modelli di simulazione ed ottimizzazione in grado di identificare le soluzioni più opportune per la decarbonizzazione del calore di processo industriale, al fine di favorirne l'effettiva penetrazione nei settori produttivi. Rispetto agli strumenti sviluppati nei precedenti Piani triennali di RdS, i modelli consentiranno di indagare non solo le tecnologie di recupero del calore di scarto, ma l'insieme delle strategie di decarbonizzazione (tecnologie rinnovabili, elettrificazione diretta o indiretta del calore, ecc.), incluse le opportunità offerte dall'interazione con la rete elettrica, attraverso l'uso di strategie di demand response in combinazione con sistemi di accumulo termico. Grazie al loro carattere di generalità, i modelli sviluppati potranno essere applicati a contesti industriali diversi per localizzazione, condizioni economiche e tipologie di processi produttivi, contribuendo così a superare i limiti dei modelli esistenti.

Le attività sui Data Center (LA 1.5) hanno il duplice obiettivo di fornire un'analisi dettagliata del processo "as-is" e delle performance

dell'intero processo di DC-HPC, dalla sistematicità dei dati alla visualizzazione degli stessi tramite dashboard di controllo per la risoluzione dei problemi da un lato e dall'altro di ottimizzare le prestazioni del DC con ad es. interventi sul codice sorgente, introduzione di resilienza ai guasti o di modalità di esecuzione (allocazione dinamica dei processi, backfill).

L'attività sull'applicazione di trattamenti termici innovativi (TTI) e non termici (TNNT) in processi chiave dell'industria alimentare (LA 1.6 – 1.8) proseguirà con l'analisi dei processi ad alta intensità energetica nell'industria alimentare, come l'essiccamento, la pastorizzazione e la sterilizzazione, estendendola ad altri alimenti. Inoltre, amplierà l'analisi degli scarti a biomasse come vinacce e residui di carciofi. Le buone pratiche industriali saranno aggiornate, includendo schemi di impianto e strategie di controllo, con tabelle e grafici comparativi per facilitare l'efficientamento energetico nei nuovi casi di studio. Saranno condotte analisi LCA per misurare l'impatto ambientale. Inoltre, saranno utilizzati i dati delle diagnosi energetiche raccolti da ENEA per valutare il potenziale di penetrazione ed efficientamento delle tecnologie. Le informazioni raccolte ottimizzeranno la metodologia MVEE, che sarà integrata in un software per supportare le aziende nell'analisi costi-benefici. Infine, il software sarà validato attraverso casi di studio reali.

L'attività di efficientamento dei settori vitivinicolo e olivicolo-oleario (LA 1.9 – 1.11) intende superare i limiti di indagine di progetti precedenti, che forniscono valori di indicatori di prestazione energetica per una cantina di vinificazione e un oleificio di tipo standard, mediante un'analisi campionaria con elevata rappresentatività dei differenti contesti produttivi, considerando le significative differenze nelle modalità di consumo energetico anche tra aziende di dimensioni simili. L'innovazione risiede nell'analisi dei consumi energetici di casi studio aziendali rappresentativi, l'implementazione di schemi di monitoraggio, la costruzione di una base dati consistente per la definizione degli indicatori di prestazione energetica delle imprese dei settori considerati. Le attività di progetto sono tese a migliorare la comprensione della gestione energetica a livello dei processi produttivi e mirano a fornire un supporto efficace nella scelta e replicazione delle migliori pratiche per l'efficienza energetica. La redazione della Guida per l'efficientamento energetico delle imprese delle filiere selezionate costituisce lo strumento che permette di diffondere le buone pratiche a una vasta platea di aziende.

Rispetto agli studi precedenti, in linea con i risultati del PTR 2022-24 e come avanzamento rispetto al progetto già sviluppato sulle cantine vitivinicole siciliane, il progetto si distingue per la scala nazionale e l'approccio basato su una analisi sistematica dei settori considerati, il riferimento alle Best Practice e l'ambizione di rappresentare un riferimento nell'impostazione del benchmarking delle prestazioni energetiche dei settori considerati.

La replicabilità delle soluzioni di efficientamento contribuirà alla transizione energetica, permettendo di ridurre l'impatto ambientale migliorando la competitività dei settori considerati, colmando le attuali lacune in termini di efficienza energetica e sostenibilità nelle filiere agricole, con ricadute positive sulla competitività delle imprese.

L'attività sull'OSC (LA 1.12 – 1.16) intende supportare lo sviluppo delle catene di valore e nuovi business model per la filiera di produzione e fornitura delle soluzioni OSC per l'isolamento termico degli edifici che in Italia rappresenta ad oggi un obiettivo non ancora raggiunto. L'obiettivo generale verrà perseguito attraverso una serie di sotto-obiettivi specifici quali il potenziamento osservatorio nazionale (avviato nel triennio precedente), lo sviluppo di linee guida per la promozione del comparto, la creazione di raccomandazioni politiche e la raccolta e analisi critica delle soluzioni disponibili come casi di studio di buone pratiche. Questi casi di studio verranno analizzati da tre prospettive diverse: 1) Analisi fattibilità tecnico/economica dell'applicazione di OSC su specifiche tipologie di edifici e stima dei vantaggi; 2) Analisi catena del valore relativa al progetto, processo decisionale, processo produttivo (tecnologie digitali e lean, sostenibilità); e 3) Analisi soluzioni focalizzata sul concetto di service life, riqualificazione come servizio, durabilità, prospettive di smontaggio, recupero o riuso.

I risultati presenti in letteratura e quelli ottenuti durante i precedenti trienni hanno evidenziato i potenziali della tecnologia MISA nella separazione di miscele CO₂/N₂ da post-combustione (LA 1.17 – 1.22). Dalla sperimentazione effettuata sono stati ricavati dati energetici che hanno permesso di effettuare una valutazione dell'efficienza della tecnologia proposta, rispetto alla rigenerazione dei sorbenti sviluppati, mediante riscaldamento convenzionale e rispetto a quanto riportato nello stato dell'arte. Per i materiali sviluppati è stato dimostrato che la produttività del processo di riscaldamento mediante induzione è sempre superiore al processo tradizionale e che l'efficienza della tecnologia è migliorabile sviluppando materiali con migliori performances separative. L'attività proposta per il triennio 2025-2027 ha come obiettivo l'ottimizzazione delle performances separative dei materiali sviluppati nel precedente triennio nelle condizioni sperimentali tipiche dei processi separativi post-combustione ovvero su miscele CO₂/N₂ contenenti 4-7% vol di acqua.

L'obiettivo del WP2 è quello di aumentare progressivamente la consapevolezza delle aziende, in particolare delle PMI, riguardo al tema dell'efficienza energetica fornendo informazioni e dati utili al decisore politico per valutare o definire programmi di stimolo e/o incentivazione verso soluzioni maggiormente sostenibili. Tali soluzioni mirano a ridurre i consumi energetici e a favorire la sostenibilità ambientale (riduzione delle emissioni di CO₂). Per far questo è necessario informare e mettere a disposizione strumenti per l'individuazione e la valutazione delle soluzioni di efficientamento energetico. Verranno quindi proseguiti gli studi settoriali avviati nei precedenti programmi di Ricerca di Sistema con la realizzazione di ulteriori linee guida settoriali. Verranno inoltre aggiornati e potenziati gli strumenti realizzati tenendo conto anche del recepimento della nuova Direttiva Efficienza Energetica (Direttiva EU 1791/2023) che ridisegna i requisiti per l'obbligo alla realizzazione di una diagnosi energetica, passando dall'obbligo legato alla dimensione economica delle imprese a quello relativo ai consumi energetici. Questo avrà ricadute su molte PMI del settore manifatturiero che a seguito del recepimento potrebbero trovarsi obbligate a redigere una diagnosi energetica.

Altro aspetto rilevante che il progetto intende affrontare riguarda l'ambito energetico/ambientale, con particolare attenzione alla

sostenibilità. L'attività sarà concentrata su fornire indici di riferimento nell'ambito della Sustainable Finance Disclosure Regulation (SFDR), in vigore dal marzo 2021, che obbliga alcune categorie di società (ad esempio i fondi immobiliari) a fornire informazioni dettagliate sulle politiche di sostenibilità e sui rischi ESG. Tali indici sono rilevanti anche nell'ambito della Tassonomia per le definizioni di criteri chiari sul tema della sostenibilità. In entrambi i casi verranno analizzati solo gli aspetti legati al tema dell'efficienza energetica e all'implementazione di soluzioni di efficientamento energetico, che possono avere anche una ricaduta in tema di sostenibilità ambientale in termini di riduzione delle emissioni clima-alteranti.

Per raggiungere questi obiettivi è necessario sviluppare strumenti (procedure, tool e materiale informativo) a supporto delle imprese. Inoltre è altrettanto fondamentale organizzare incontri diretti con le imprese. Pertanto, con il supporto dei partner accademici e delle associazioni di categoria, professionisti e stakeholder potranno essere svolti audit energetici presso PMI, che non sono obbligate secondo la normativa attuale (D.lgs.102/2014), né per le disposizioni future legate al recepimento della nuova Direttiva Europea sull'Efficienza Energetica, o per i decreti incentivanti come quelli per imprese elettrivore e gasivore. Parallelamente sarà definita una procedura di analisi che possa essere condivisa ed utilizzata dai professionisti per la realizzazione di checkup energetici rapidi ed economici presso le PMI. Questo contribuirà alla realizzazione di una piattaforma di condivisione ed informazione nella quale le imprese e i professionisti possano incontrarsi e confrontarsi e dove potrà essere possibile trovare informazioni relativamente agli indici di prestazione energetica. In questa piattaforma inoltre sarà possibile consultare alcune schede con i principali interventi di efficientamento energetico, comprendendo anche una prima quantificazione dei possibili risparmi e degli investimenti. Elemento fondamentale di questo approccio sarà l'utilizzo del TOOLPMI sviluppato nel precedente triennio e che dovrà essere ulteriormente potenziato e sviluppato sulla base delle esperienze e dei feedback segnalati dagli utilizzatori e raccolti dai partner universitari.

Gli obiettivi proposti nel WP3 si prefiggono di ottimizzare le tecnologie CCS sviluppate in ENEA già nel corso degli anni passati, cercando di ottimizzare i parametri di processo per migliorare la qualità del syngas prodotto e implementando il processo SEG a pressioni più elevate (fino a 10 bar) sia su scala laboratorio che pilota. Nelle annualità passate, infatti, il processo SEG è stato condotto a pressione atmosferica, e modellizzato e analizzato dal punto di vista della fattibilità fino a pressioni di 10 bar e con prove preliminari su scala laboratorio. Nelle prossime annualità si cercherà di implementare il processo SEG a pressioni elevate, individuandone le criticità ed ottimizzando il processo per migliorare il syngas e ridurre il contenuto di tar, implementando simulazioni e valutazioni tecnico economiche e sull'efficienza energetica. Gli studi sperimentali verranno corredati da attività numeriche per la chiusura di bilanci di materia ed energia sia di processi ad emissione negativa di CO₂ mediante la rimozione di carbonio dall'aria (i.e. DAC e BECCS) e sia di processi CCUS per il riuso e lo stoccaggio di carbonio. L'attività ENEA sarà in sinergia con quelle di alcuni dei cobeneficiari che effettueranno le loro attività di modelling e/o sperimentali su gassificazione a pressioni elevate e rimozione dei tar ad alta pressione. L'ottimizzazione delle tecnologie CCS proposte consentirà di valutare i benefici della loro implementazione nei settori Hard to Abate, per progredire nella loro decarbonizzazione ed aumentarne la sostenibilità economica e l'impatto ambientale.

In merito al WP4 lo stato dell'arte presentato evidenzia la necessità di strumenti per la corretta individuazione dei fabbisogni del settore, delle priorità di intervento e delle tecnologie e delle strategie di efficientamento energetico. Il confronto con i gestori rivela in particolare una domanda di:

- strumenti di benchmarking di facile utilizzo per analizzare le prestazioni energetiche degli impianti;
- sistemi di supporto alle decisioni semplici per la selezione delle misure di efficienza da parte dei gestori;
- dati quantitativi su costi e benefici delle tecnologie più efficienti;
- sviluppo continuo di nuovi processi per soddisfare l'evoluzione delle normative e delle linee guida.

Affrontare queste priorità, come il WP4 si propone di fare, potrebbe accelerare la transizione del settore verso una maggiore efficienza energetica e sostenibilità.

Per questo gli obiettivi principali del WP4 includono l'ottimizzazione del recupero di risorse dai processi di trattamento, lo sviluppo sperimentale di tecnologie innovative a basso consumo energetico, o ad elevato potenziale di autoproduzione, l'integrazione di fonti energetiche rinnovabili nei processi depurativi fino alla neutralità energetica degli stessi e la valutazione dell'impatto dei cambiamenti climatici sul settore idrico e i benefici che questo può determinare in termini di mitigazione degli effetti

d) Eventuali collegamenti con altri progetti relativamente alle attività previste nel progetto

Viste le tematiche di elevato interesse scientifico, le attività presentano connessioni con diversi progetti nazionali e internazionali, apportando in ogni caso un significativo e originale contributo alle tematiche trattate.

Il progetto europeo EEPLIANT4 Energy Efficiency Compliant Products 2023 ha tematiche affini alle attività proposte nella LA 1.1. E' una Azione Concertata pan-europea di sorveglianza multi-prodotto della durata di 60 mesi promossa dalla Commissione Europea nell'ambito del programma LIFE, e vede la partecipazione di 27 partner da 23 Paesi con le più elevate competenze in Europa in materia di sorveglianza del mercato per i cosiddetti "prodotti sostenibili". Per l'Italia partecipa ENEA in cooperazione con la Camera di Commercio di Milano Monza Brianza Lodi. Obiettivo di EEPLIANT4 è contribuire al miglioramento della conformità dei prodotti oggetto di politiche di efficienza energetica/etichettatura ed ecodesign attraverso analisi documentale e prove di laboratorio, ottimizzando le risorse disponibili

nei paesi partecipanti. Il trasferimento dei risultati permetterà di rendere le azioni del PTR in linea con lo stato dell'arte europeo e di evitare eventuali sovrapposizioni.

Per quanto riguarda il WP1, LA 1.6 - 1.8, nel corso delle annualità 2015-2018 di Ricerca di Sistema (progetto D3 di ENEA) sono stati condotti alcuni studi e attività sperimentali relativi all'impiego dei PEF (Pulsed Electric Fields, campi elettrici pulsati) nel settore alimentare (con focus sull'applicazione all'inattivazione microbica nel settore vitivinicolo e lattiero-caseario). In particolare, è stato realizzato il prototipo di una camera di trattamento per l'applicazione di campi elettrici ad alta intensità a fluidi in quiete e in movimento. Negli ultimi anni si sono moltiplicate le applicazioni di trattamenti innovativi in sostituzione di processi termici tradizionali nell'industria alimentare, anche se nella pratica rimangono poco diffuse nel settore industriale italiano. Per questo motivo in questo triennio lo studio che si andrà a realizzare sarà caratterizzato da un focus più ampio (non considerando solo i PEF, ma anche altre tecnologie gli ultrasuoni l'omogenizzazione ad alta pressione, tecnologie termiche innovative come il riscaldamento ohmico e a radiazione infrarossa, ecc.) e finalizzato alla realizzazione di strumenti di supporto che consentano di facilitare la valutazione e l'adozione di queste tecnologie da parte delle aziende.

Per quanto riguarda le LA 1.12 - 1.16, ENEA è coinvolta nel progetto H2020 REHOUSE ("Renovation packagEs for HOlistic improvement of EU's bUildingS Efficiency, maximizing RES generation and cost-effectiveness", in corso di svolgimento), che ha un ambito tematico affine a quello delle LA indicate, e nel quale si occupa principalmente della realizzazione di un dimostratore localizzato nella regione Puglia. Il progetto risulta quindi avere un focus molto diverso da quello del PTR 25-27: verrà comunque assicurato il trasferimento di eventuali informazioni rilevanti che permetterà di incrementare l'allineamento delle azioni del PTR con lo stato dell'arte europeo e di evitare eventuali sovrapposizioni. Le "policy recommendations" saranno condivise a livello nazionale ed internazionale mediante il coinvolgimento di ENEA nella "6th Concerted Action supporting Member States and participating countries in implementing the Energy Performance of Buildings Directive" che ha lo scopo di allineare attività e condividere buone pratiche tra paesi nell'implementazione della EPBD.

L'attività prevista nel WP2 potrà essere sinergica con il progetto finanziato dal MASE attraverso la "Convenzione per l'attuazione delle disposizioni contenute nell'art. 8 del Decreto Legislativo 4 luglio 2014, n. 102, modificato dal Decreto Legislativo 14 luglio 2020, n. 73 in materia di diagnosi energetiche" all'interno della quale l'ENEA è impegnata in una intensa attività di sensibilizzazione sul tema dell'efficienza energetica rivolto principalmente alle PMI. In questo contesto, infatti, le tappe della campagna di sensibilizzazione potranno essere utilizzate anche per incontrare le PMI e diffondere i risultati e le metodologie sviluppati all'interno del WP. Altro utile collegamento potrà essere il progetto Life LEAPto11 coordinato da ENEA che mira a supportare gli Stati Membri durante la fase di implementazione dell'Articolo 11 della nuova Direttiva sull'Efficienza Energetica (2023/1791) attraverso un'azione di cooperazione di dieci Agenzie Energetiche Nazionali. L'obiettivo principale del progetto è contribuire a un miglioramento globale della qualità degli audit energetici e i sistemi di gestione dell'energia (SGE), attraverso la valutazione e l'ottimizzazione degli attuali programmi nazionali. Il progetto esaminerà anche altri aspetti della nuova Direttiva per promuovere sinergie tra audit energetici, SGE, regimi obbligatori di efficienza energetica, misure alternative e programmi di informazione. Nel potenziamento del tool e nella definizione della metodologia di approccio saranno utili gli spunti che emergeranno nel confronto con gli altri paesi EU. Allo stesso modo, sarà possibile veicolare i risultati raggiunti, condividendo l'approccio sviluppato nel progetto a livello internazionale. Tutte queste sinergie contribuiranno a raggiungere un maggior numero di imprese e di professionisti.

Alcune delle attività proposte nel WP3 sono complementari ed in sinergia con attività condotte nell'ambito di progetti europei in cui ENEA è coinvolta. Ad esempio, nell'ambito del progetto europeo CHemistry of Platinum Group Metals (CHemPGM) i ricercatori ENEA si occupano dello sviluppo di catalizzatori a base di metalli del gruppo del platino ottenuti utilizzando il Pt recuperato da catalizzatori a fine vita mediante processi idrometallurgici. Gli studi di valorizzazione di CO₂ condotti nel reattore plasma DBD e gli studi di gassificazione, sono stati condotti anche nell'ambito del progetto GICO utilizzando materiali e membrane diverse, sviluppati ad hoc da ricercatori di ENEA Casaccia e Trisaia e partner di progetto.

Il WP4 si interfacerà e condividerà dati e risultati con altri progetti in cui è direttamente coinvolto lo stesso laboratorio SSPT-EC-AR, in particolare con il WP3 della Scheda Progetto Risorsa idrica e sistema energetico di RdS, nel quale sono approfondite le tematiche connesse al riuso degli effluenti depurati.

Nel presente WP saranno inoltre utilizzati alcuni dei risultati del progetto Smartee plants, focalizzato sull'efficientamento del processo depurativo di tre impianti di depurazione siciliani, e del progetto Rigenera, che ha come obiettivo l'efficientamento dell'utilizzo della risorsa idrica in allevamenti di bufale e il recupero nutrienti dagli effluenti zootecnici. Per quanto riguarda i trattamenti termochimici dei fanghi, saranno riprese ed approfondite le metodologie di analisi sviluppate nell'ambito del progetto JCA ENI-ENEA conclusosi nel 2024. Saranno inoltre garantiti collegamenti con la Piattaforma Italiana per l'Economia Circolare (ICESP) nonché con la Piattaforma Italiana del Fosforo soprattutto per quel che concerne le tematiche di riutilizzo di acque e reflui e del recupero di nutrienti e prodotti (es. char, bio-olio).

2.5 Obiettivi e risultati

a) Obiettivi finali del progetto

Il progetto ha l'obiettivo generale di sviluppare metodi, strumenti e soluzioni per incrementare l'efficacia delle azioni di efficientamento energetico in ambito industriale favorendo un approccio analitico e integrato che vada dal singolo prodotto/macchinario al processo produttivo, filiera produttiva fino al comparto/settore, con focus specifici sull'efficientamento dei processi termici, delle PMI, delle industrie hard to abate e sulle filiere dell'Off-Site Construction per la riqualificazione del parco immobiliare e del riutilizzo idrico. Nei paragrafi precedenti relativi allo stato dell'arte è stato evidenziato il grado di innovatività che il progetto propone per le singole attività. Di seguito per ciascun WP e obiettivo sono fornite indicazioni relative allo sviluppo e alle ricadute positive per l'industria del settore.

Il WP1 ha l'obiettivo generale di realizzare studi e sviluppare soluzioni per l'efficientamento e l'ottimizzazione di prodotti, processi, distretti e filiere industriali. Di seguito sono dettagliati i principali obiettivi specifici:

- (i) incrementare l'impatto di misure di efficientamento energetico note ma poco esplorate da un punto di vista ingegneristico e che presentano barriere alla diffusione industriale di tipo legale, conoscitivo, gestionale ed economico; il trasferimento di conoscenze e competenze all'industria, alle Autorità di sorveglianza e alle altre parti interessate; proteggere l'industria nazionale ed europea dalla concorrenza sleale delle importazioni di prodotti non-conformi; assicurare il consumatore – utente del sistema elettrico nazionale - sulle reali prestazioni energetiche, funzionali ed ambientali per i beni acquistati; supportare il Paese nel raggiungimento degli obiettivi di efficientamento energetico e decarbonizzazione pianificati in risposta agli obblighi comunitari; supportare e perseguire la digitalizzazione fornendo ai consumatori informazioni standardizzate per quanto possibile in formato digitale.
- (ii) Valutazione delle opportunità di decarbonizzazione dei processi industriali, con particolare attenzione alle richieste di energia termica. Tale obiettivo sarà conseguito grazie allo sviluppo di opportuni strumenti (mappe e modelli di simulazione e ottimizzazione) flessibili, ovvero in grado di essere applicati allo studio di differenti tipi di processo e in grado di considerare l'eventuale disponibilità di fonti energetiche rinnovabili e sorgenti di calore di scarto potenzialmente recuperabili. I modelli saranno anche in grado di valutare le possibili sinergie che si possano instaurare con il sistema elettrico, attraverso l'adozione di specifici programmi di demand response, in combinazione con sistemi di accumulo del calore. Tali strumenti forniranno alle aziende un supporto concreto nella scelta delle soluzioni di decarbonizzazione del calore industriale più opportune, al variare delle specifiche di processo e del contesto economico presente.
- (iii) Ottimizzare processi ed efficientare il DC-HPC attraverso la visualizzazione in tempo reale dei dati relativi alle richieste di provisioning di servizi e assistenza, alle loro priorità e alle tempistiche di risoluzione secondo gli SLA concordati e attraverso la profilazione e ottimizzazione energetica del software.
- (iv) Promuovere l'adozione di tecnologie non termiche e termiche innovative come alternative o complementi ai processi termici tradizionali nel settore alimentare, attraverso lo sviluppo di strumenti specifici di supporto alle decisioni. Il progetto prevede l'identificazione dei principali processi termici tradizionali attualmente utilizzati nell'industria alimentare, individuando tecnologie innovative, sia non termiche che termiche, già in uso o non ancora sfruttate. Sarà valutato il loro potenziale applicativo e saranno realizzati strumenti che aiuteranno le aziende a comprendere meglio le opportunità di efficientamento e sostenibilità dei propri processi, consentendo una prima valutazione di fattibilità su larga scala.
- (v) Migliorare l'efficienza energetica e ridurre le emissioni nei settori vitivinicolo e olivicolo-oleario, superando lo stato dell'arte grazie a una migliore comprensione della gestione energetica dei processi produttivi, all'integrazione di sistemi di monitoraggio, alla diffusione capillare delle Best Practice. L'innovazione risiede nell'estensione, su scala nazionale, di modelli di efficientamento testati localmente con successo e nella costruzione di una base dati di supporto al benchmarking energetico delle aziende delle filiere considerate. Le ricadute positive includono una maggiore competitività per le filiere agro-industriali, la riduzione dei costi energetici e dell'impatto ambientale, e il potenziale abbassamento dei prezzi di vendita dei prodotti ai consumatori. Questo approccio integrato rafforza la sostenibilità e l'efficienza in un'ottica di transizione energetica a lungo termine.
- (vi) Ottimizzare e promuovere soluzioni modulari e OSC per la riqualificazione energetica degli edifici in Italia. Gli obiettivi si sviluppano in diverse fasi, contribuendo a un approccio sostenibile: potenziamento dell'Osservatorio Nazionale OFFICIO, garantendo aggiornamenti e mantenimento nel tempo; mappatura di best practice e casi di successo, caratterizzazione dei processi produttivi e analisi della sostenibilità delle soluzioni OSC; collaborazione con gli stakeholder per sviluppare linee guida per il settore; creazione di raccomandazioni politiche per facilitare il dialogo con i legislatori.
- (vii) Effettuare lo studio funzionale dei materiali sviluppati nel precedente triennio per la separazione di miscela CO₂/N₂ in presenza di acqua. Infatti, nelle condizioni sperimentali tipiche dei processi separativi post-combustione il vapore è presente in miscela in quantità 4-7% vol. Il MOF CALF-20 individuato nel precedente triennio è stabile in acqua, mostra buone proprietà separative per la CO₂ in presenza di acqua ma le performance diminuiscono in funzione della quantità d'acqua presente. Pertanto, le proprietà funzionali dovranno essere studiate con miscele CO₂/N₂ a diverse umidità relative. Sulla base dei risultati ottenuti, il materiale sarà modificato mediante operazioni di funzionalizzazione chimica e/o sostituzione parziale dei linkers organici per l'ottenimento di un sorbente con migliori performances separative in presenza della quantità d'acqua presente nelle miscele da post-combustione (acqua in miscela pari a 4-7% vol). Altri nuovi MOF stabili in acqua potranno essere sintetizzati per raggiungere l'obiettivo proposto. I risultati attesi

miglioreranno l'efficienza della tecnologia separativa proposta in quanto permetteranno di utilizzare il materiale senza dover effettuare una preliminare separazione dell'acqua con conseguente aumento dei costi complessivi del processo.

Per quanto riguarda il WP2, gli obiettivi principali sono in continuità con il PTR precedente e mirano a guidare e stimolare le imprese verso un approccio di miglioramento continuo in ambito di efficienza energetica e sostenibilità ambientale. In particolare, si punta a promuovere l'adozione di sistemi di gestione energetica all'interno delle organizzazioni, in linea con le disposizioni e le ambizioni della nuova direttiva sull'efficienza energetica. Inoltre, il WP intende fornire ai decisori politici e istituzionali elementi per valutare in modo più consapevole e informato le politiche volte al risparmio e alla gestione energetica.

Per raggiungere questi obiettivi saranno utilizzate:

(i) Le informazioni presenti nella banca dati delle diagnosi energetiche obbligatorie. Infatti, il database risulta essere un unicum a livello Europeo, raccogliendo negli anni più di 30.000 diagnosi energetiche tra quelle obbligatorie (ai sensi del D.lgs.102/2014 o dei recenti decreti energivori e gasivori) e quelle volontarie.

(ii) Le informazioni ricavabili dai diversi tool sviluppati in questi anni da ENEA come il questionario di autovalutazione, il TOOLPMI, il toolEM, attraverso i quali sarà possibile ricavare informazioni aggiuntive rispetto a quelle incluse nel database delle diagnosi energetiche. Soprattutto il ToolPMI potrà essere un prezioso strumento per avvicinare anche le PMI al tema dell'efficienza energetica e dell'autovalutazione delle performance energetiche e l'individuazione e valutazione delle opportunità di efficientamento energetico. Questo utilizzo permetterà ad ENEA di acquisire informazioni sempre più dettagliate anche relativamente al mondo delle PMI. Questa attività, come già sottolineato, non potrà prescindere dal coinvolgimento crescente delle PMI e dei principali stakeholder (associazioni di categoria, EGE, Energy manager, etc..) con l'obiettivo di avviare un percorso virtuoso condiviso. Questo percorso si baserà sullo sviluppo di metodologie e documentazione condivisa che permetteranno di garantire alle imprese un elevato livello di qualità del prodotto "valutazione energetica & individuazione opportunità di efficientamento energetico" ed ai consulenti strumenti e metodologie chiare per approcciarsi alle aziende in maniera trasparente. Tutta l'attività è svolta in maniera sinergica ed integrata con i cobeneficiari universitari.

Per il WP3 l'obiettivo è la prosecuzione di alcune attività iniziate nello scorso triennio mirate alla produzione di un syngas ad alto contenuto di idrogeno mediante cattura di CO₂. Verranno valorizzate biomasse residuali e rifiuti plastici di scarso valore economico per la produzione di syngas che potrà essere utilizzato in processi di produzione di energia (fuel-cell, microturbine, etc.) o nella sintesi di fuel. Per la calcinazione in flusso di CO₂ sarà studiata l'implementazione con membrane per lo scambio di O₂ supportate su acciaio, integrate con reattore di calcinazione in-situ o ex-situ. Verrà studiata su scala pilota la produzione di syngas a pressioni fino a 10 bar in modo da ottimizzare la cattura di CO₂ e la produzione di H₂. In aggiunta, sarà valutata la possibilità di integrare la cattura diretta di CO₂ dall'aria nei vari schemi di processo investigati, allo scopo di raggiungere l'azzeramento o emissioni negative, in accordo con le direttive europee. In continuità con quanto fatto nel precedente PTR 22-24, si studierà lo stoccaggio a lungo termine della CO₂ con il processo di mineralizzazione accelerata su scorie industriali e brine.

Gli schemi di processo verranno analizzati dal punto di vista dell'efficienza, della sostenibilità economica ed ambientale, in particolare si cercherà di integrare ai recuperi termici la generazione in loco di energia con cicli termodinamici a vapore. Si studierà l'impatto sulla generazione di corrente per la rete utilizzando il syngas prodotto dalla gassificazione con cattura, valutando efficienza termica e elettrica di tutto il processo.

Nel caso del WP4 gli obiettivi finali del PTR 25-27 si concentrano sull'avanzamento delle tecnologie sviluppate nei trienni precedenti e sull'introduzione di innovazioni volte a raggiungere la neutralità energetica nel settore del trattamento delle acque reflue, in linea con le più recenti direzioni intraprese dalla normativa del settore. La stretta collaborazione con i gestori degli impianti assicurerà che le soluzioni sviluppate siano pratiche, scalabili e rispondenti alle reali esigenze del settore.

Al fine di favorire l'efficientamento energetico degli impianti, sarà eseguita la modellazione di impianti di depurazione "ideali" energeticamente neutri e sarà ulteriormente sviluppato del software DEES; essi saranno utili strumenti che con l'obiettivo di supportare i gestori nella pianificazione di interventi tecnologici di efficientamento e strategie a lungo termine per raggiungere la neutralità energetica.

La ricerca sulle tecnologie innovative avrà come obiettivo quello di minimizzare i consumi energetici delle tecnologie atte alla depurazione rispetto al panorama attuale. A questo proposito il trattamento MBBR e il processo biologico assimilativo risultano promettenti e possono dare il loro apporto nel migliorare il bilancio energetico netto dell'impianto.

Dall'altro lato si valuterà anche il contributo alla neutralità energetica di alcune implementazioni nelle linee di trattamento fanghi quali l'efficientamento del processo di digestione anaerobica (trattamento a stadi), l'upgrading biologico a biometano e l'introduzione dei trattamenti termochimici dei fanghi. Allo stesso tempo si testeranno possibili tecnologie per il riutilizzo dei prodotti ottenuti nell'ottica di economia circolare.

Il progetto si propone di quantificare i benefici economici e ambientali delle tecnologie sviluppate, non solo in termini di risparmi energetici e operativi, ma anche di riduzione delle emissioni di gas serra e di potenziali ricavi dalla produzione di energia e materiali. Questo approccio olistico mira a catalizzare un cambiamento di paradigma nel settore, trasformando gli impianti di depurazione in hub di

produzione sostenibile.

b) Principali risultati attesi/deliverable

Di seguito sono descritti i principali deliverable di progetto considerati maggiormente rappresentativi degli obiettivi di progetto e quindi fondamentali anche per la verifica del loro raggiungimento, con indicazione dei principali risultati, della relativa tipologia e di prestazioni attese e principali criteri di confronto con eventuali soluzioni esistenti.

Per il WP1:

- Rapporto tecnico della LA 1.1 contenente la descrizione e la quantificazione delle riunioni del Consultation Forum, dell'Ecodesign Forum, del Regulatory Committee di ecodesign, dell'Expert Group di etichettatura energetica e del regolamento 2024/1781 e dei Gruppi ADCO realizzate, delle proposte di regolamenti discussi ed eventualmente adottati, dei prodotti oggetto della sorveglianza del mercato, nonché la descrizione dello stato di avanzamento dei nuovi standard mondiali per gli apparecchi per il lavaggio e la refrigerazione domestica e professionale.
- Rapporto tecnico per le LA 1.2 contenente l'analisi di letteratura in materia di tecnologie e soluzioni di decarbonizzazione del calore industriale, tra cui anche quelle basate sull'impiego combinato di strategie di demand response e sistemi di accumulo termico e la preliminare definizione di una metodologia per la mappatura delle sorgenti di calore di scarto dei settori industriali.
- Rapporto tecnico per le LA 1.3 contenente lo sviluppo dei modelli di simulazione delle tecnologie e/o soluzioni di decarbonizzazione del calore industriale; l'applicazione dei modelli a differenti casi di studio (reali o di letteratura) e la valutazione delle migliori opportunità di decarbonizzazione del calore di processo industriale; la definizione di una metodologia per la creazione di mappe del potenziale del calore di scarto industriale e la relativa implementazione in ambiente GIS.
- Rapporto tecnico per le LA 1.4 contenente la descrizione del sistema di controllo predittivo sviluppato, l'applicazione del sistema di controllo a casi studio simulativi e l'analisi tecnico-economica delle tecnologie di recupero di calore e delle soluzioni per la decarbonizzazione dei processi industriali
- Rapporto tecnico per le LA 1.5 contenente l'analisi e l'ottimizzazione (mediante tecniche di AI) dei consumi del DC studiato, la descrizione della dashboard sviluppata su parametri chiave come consumo energetico, temperatura ed efficienza, con notifiche di allerta per la prevenzione dei rischi di malfunzionamento, i risultati dell'ottimizzazione del codice e/o delle strategie di esecuzione per alcuni casi studio di software al fine di migliorarne la prestazione energetica del DC.
- Rapporti tecnici per le LA 1.6 – 1.8 contenenti le buone pratiche nel settore alimentare per i principali processi termici e le loro alternative più efficaci e sostenibili. Inoltre, include linee guida per le aziende che evidenziano i benefici energetici e non energetici derivanti dall'uso di tecnologie non termiche e innovative. Queste linee guida aiuteranno le aziende a valutare tali tecnologie, il cui inserimento nel settore alimentare italiano è ancora limitato a causa di barriere non tecnologiche, come la mancanza di conoscenza.
- Software (LA 1.7) che implementa la metodologia di valutazione energetica ed economica (MVEE) ottimizzata, pensato per supportare le decisioni aziendali. Questo strumento fornirà alle aziende un set di informazioni completo e chiaro, centralizzando i dati e semplificando i processi decisionali. Il software faciliterà l'analisi costi-benefici e la valutazione di vari casi studio, offrendo uno strumento più efficiente e intuitivo rispetto ai metodi precedentemente sviluppati.
- Rapporto tecnico della LA 1.9 contenente la classificazione preliminare delle aziende italiane dei settori vitivinicolo e olivicolo-oleario e la raccolta delle Best Practice.
- Rapporto tecnico della LA 1.10 contenente l'analisi energetica dettagliata dei casi studio selezionati, l'identificazione di benchmark di riferimento dei consumi energetici, la raccolta delle Best Practice, le informazioni utili nel processo di valutazione di fattibilità tecnico-economica degli interventi di efficientamento energetico, basati sulle migliori pratiche.
- Guida per l'efficientamento energetico delle aziende vitivinicole e olivicolo-olearie (LA 1.10).
- Rapporto tecnico della LA 1.11 contenente l'analisi dei consumi energetici e la definizione dei criteri di progettazione e gestione di un sistema di autoconsumo di energia da fonti rinnovabili negli oleifici.
- Rapporto tecnico della LA 1.12 contenente il potenziamento dell'osservatorio OFFICIO, identificazione di casi studio ed elaborazione preliminare di linee guida per il settore.
- Rapporto tecnico della LA 1.13 contenente l'elaborazione di linee guida e raccomandazioni di policy a livello nazionale.
- Rapporto tecnico della LA 1.14 contenente l'analisi critica e di dettaglio di casi studio rilevanti e replicabili riqualificati attraverso l'utilizzo di tecnologie OSC.
- Rapporto tecnico della LA 1.15 contenente la descrizione ed analisi di casi di applicazione di soluzioni OSC per la riqualificazione di edifici già esistenti.
- Rapporto tecnico della LA 1.16 contenente l'analisi sulla sostenibilità e circolarità delle soluzioni OSC per la riqualificazione edilizia come servizio.
- Rapporti tecnici delle LA 1.17 – 1.22 contenenti le procedure sui processi di sintesi di materiali compositi porosi e magnetici stabili in acqua e con proprietà ottimizzate per la separazione di miscele CO₂/N₂ in presenza di acqua, la qualificazione chimica, strutturale,

morfologica e funzionale dei materiali sviluppati e la valutazione della capacità separativa e ottimizzazione della cinetica di rilascio modulata attraverso Magnetic Induction Swing Adsorption in paragone allo stato dell'arte, ai risultati ottenuti nei precedenti trienni e al riscaldamento convenzionale.

WP2

- LA 2.1 rapporto tecnico all'interno del quale verranno riportati i risultati delle analisi di almeno due settori merceologici con caratterizzazione del processo produttivo, KPI o indici di prestazione energetica individuati; l'analisi degli interventi di efficientamento energetico proposti e realizzati. La metodologia per la realizzazione di uno strumento di ranking per il patrimonio immobiliare nazionale; Le risultanze del tavolo tecnico per la realizzazione di audit/assessment energetici nelle PMI, con la definizione delle metodologie, aspetti migliorativi del ToolPMI, con definizione del capitolato tecnico per l'affidamento a società software, specifiche del portale WEB dedicato e definizione del capitolato tecnico; Panoramica sullo stato dell'arte e strumenti per l'applicazione della Lean Production ai fini dell'efficienza energetica in ambito industriale; individuazione dei vantaggi, delle criticità e delle competenze necessarie all'impiego degli strumenti della Lean.
- LA 2.2 rapporto tecnico all'interno del quale verranno riportati i risultati delle analisi di almeno un settore merceologico con caratterizzazione del processo produttivo, KPI o indici di prestazione energetica individuati; l'analisi degli interventi di efficientamento energetico proposti e realizzati, Le risultanze dell'analisi del DB relativo al sistema di classificazione degli immobili e descrizione del tool sviluppato; Le risultanze del tavolo tecnico per la realizzazione di audit/assessment energetici nelle PMI, descrizione del portale WEB sviluppato, descrizione del ToolPMI definitivo, schede tecniche interventi ed eventuale materiale informativo; Validazione della metodologia relativi all'applicabilità della lean management e descrizione del tool sviluppato.
- LA 2.2 Tre "Quaderni dell'efficienza energetica";
- LA 2.2 Tool Classificazione Immobili;
- LA 2.2 Tool PMI;
- LA 2.2 Portale WEB per Assesment energetici PMI;
- LA 2.2 Tool per applicazione della Lean management ad un settore produttivo ad alta specializzazione;
- LA 2.3 report tecnico all'interno del quale verranno identificati i principali fattori che influenzano l'adozione di Misure di Efficienza Energetica (EEM) in vari contesti organizzativi; Sviluppo della tassonomia EEM; Indicatori e metriche di valutazione per valutare efficacemente l'adozione di EEM, attività di valutazione delle PMI.
- LA 2.4 report tecnico all'interno del quale verranno riportate delle linee guida per la conduzione di "audit light" per le PMI; la metodologia di individuazione dei settori da indagare; I risultati dell'analisi bibliografica, con le principali tecnologie e interventi di efficientamento energetico già documentati, insieme alle evidenze scientifiche e tecniche che hanno guidato lo sviluppo di schede tecniche; Descrizione delle attività di audit svolte presso le PMI.
- LA2.5 un tecnico report all'interno del quale saranno descritte le metodologie di calcolo e gli strumenti a supporto della redazione di diagnosi attraverso l'implementazione di interventi di efficientamento. All'interno del report saranno descritte in dettaglio le metodologie e i modelli di calcolo utilizzati per lo sviluppo delle schede degli interventi. Allo stesso tempo saranno riportate le modalità operative e le linee guida redatte a supporto dei settori selezionati. Il report sarà quindi in grado di fornire indicazioni per lo sviluppo di analisi energetiche preliminari e per la redazione di diagnosi e includerà anche i questionari sviluppati per raccogliere le informazioni dalle aziende coinvolte ed esempi numerici di schede di intervento applicate a casi studi specifici al fine di riportare, attraverso casi reali, i benefici, anche multipli, degli interventi e delle opportunità di risparmio energetico.
- LA 2.6 report tecnico con la valutazione dell'analisi di fattibilità tecnico-economica legata all'utilizzo di idrogeno, in co-combustione al gas naturale, nei motori primi cogenerativi attualmente installati presso le aziende manifatturiere italiane. L'analisi dei dati e delle informazioni ricavate durante l'attività di ricerca costituiranno degli utili elementi conoscitivi per quelle imprese che intendono intraprendere un percorso aziendale (anche autonomo) di decarbonizzazione.
- LA 2.7 report tecnico all'interno del quale sono descritte in dettaglio tutte le attività svolte e i rispettivi risultati conseguiti. In particolare, il suddetto report tecnico sarà suddiviso in due macro-parti. La prima macro-parte comprende gli output relativi all'identificazione delle soluzioni tecnologiche per ridurre i consumi energetici. La seconda macro-parte inerente all'adozione di pratiche lean in ottica risparmio energetico.
- LA 2.8 report tecnico all'interno del quale saranno riportati i risultati suddivisi in macrosezioni: In particolare, la prima sezione del rapporto sarà dedicata alla descrizione della metodologia di armonizzazione dei database utilizzati per la composizione della base informativa univoca che contenga i dati ENEA da monitoraggio e i dati di impresa dettagliati. La seconda sezione del rapporto sarà focalizzata sulla descrizione della metodologia di analisi sviluppata ad hoc sulla base della struttura dei dati disponibili da un lato e delle domande di ricerca e obiettivi generali condivisi con ENEA dall'altro. In tale sezione saranno inoltre resi disponibili in forma descrittiva saranno tutti i file di input e di output utilizzati nelle analisi di tipo econometrico e riportati gli script del codice con la relativa descrizione per permettere una piena replicabilità dell'esercizio qualora ENEA voglia estendere l'analisi a settori non inclusi nel progetto. La terza e ultima sezione si concentrerà sulla descrizione dei risultati ottenuti sui settori individuati insieme a ENEA, con l'obiettivo sintetico di generare delle implicazioni di policy che possano informare il decisore per il miglioramento della strumentazione utile a garantire performance crescenti di efficientamento energetico.

Per il WP3:

- LA 3.1 Gassificazione di biomasse residuali combinate e residui plastici intensificati con cattura della CO₂. M14
- LA 3.1 Formulazione di materiali granulari sorbenti/catalizzatori per la cattura e il reforming, meccanicamente resistenti agli attriti, per applicazione in letti fluidizzati e rotanti. M18
- LA 3.1 Studio di materiali sorbenti supportati su membrane polimeriche ad elevata area superficiale selettivi per la CO₂ a bassa temperatura (60-400 °C) per rimuovere la CO₂ restante (2-3% vol.) e completare l'upgrading del syngas e il raggiungimento di tenori di H₂ superiori al 95% a valle del reforming dei TAR. M18
- LA 3.1 Ottimizzazione di membrane per la separazione di O₂ supportate su metallo sinterizzato e test in DBD M12.
- LA 3.1 Sviluppo di catalizzatori per DRM classici a base di nichel e si continuerà lo studio di catalizzatori a base di metalli preziosi recuperati da processi di leaching di catalizzatori a fine vita sia su microreattore termochimico sia ottimizzando il reattore al plasma a scarica di dielettrico DBD. M18
- LA 3.1 Progettazione del gassificatore in pressione. M18
- LA 3.3 Indicatori prestazionali tecnici (ad es. indice di SPECCA) per ogni configurazione analizzata, M18.
- LA 3.2 Studio di materiali sorbenti supportati su membrane polimeriche per applicazioni di CCS su flue gas e DAC, concentrandosi sulla rigenerazione e la ciclazione di questi materiali. M24
- LA 3.2 simulazioni e attività modellistiche su modelli reali cercando di validare i risultati sperimentali ottenuti su scala prototipo e su modelli freddi. M24
- LA 3.5 Misura su vari materiali del tasso di abbattimento in funzione della concentrazione iniziale di H₂S alle P di 1 atm e alla P di 10 atm (M24) e scelta e ottimizzazione del materiale (M36).
- LA 3.5 Misura del tasso di abbattimento del tar in funzione della temperatura e pressione di esercizio (M24) e ottimizzazione della formulazione del catalizzatore sintetizzato. M36
- LA 3.6 Definizione metodo di sintesi e ottimizzazione delle condizioni di calcinazione per ossidi perovskitici monofasici. M24
- LA 3.4 Test su un modello freddo per la validazione sperimentale di modelli a doppio letto fluido M24 test sperimentali di produzione di bio/elettro-combustibili e sulle simulazioni del processo integrato per la sintesi di bio/elettro-combustibili. M36
- LA 3.2 Integrazione in DBD di membrane per la separazione di O₂ supportate su metallo sinterizzato, ottimizzazione del gap del dielettrico e della scarica ad archi. M30
- LA 3.3 Per ogni configurazione impiantistica saranno forniti tutti i capisaldi termodinamici e le potenze meccaniche/termiche scambiate nei componenti di impianto. M30
- LA 3.3 Analisi tecnico-economica e impatto ambientale di sistemi di cattura della CO₂ dall'aria. M33
- LA 3.2 Simulazione del processo DAC in ambiti hard to abate per il raggiungimento di emissioni negative. M34
- LA 3.2 Sarà condotta un'analisi dell'efficienza energetica dei vari processi di cattura e/o valorizzazione di CO₂ proposti, valutando anche la possibilità di sfruttare le potenzialità dei recuperi termici per la generazione di energia elettrica da utilizzare nei processi stessi (cicli Rankine). M30
- LA 3.2 Realizzazione gassificatore in pressione. M33
- LA 3.2 Campagna preliminare di SEG in pressione. M36
- LA 3.3 Identificazione preliminare di un cluster industriale per la cattura della CO₂ e valutazioni tecno-economiche e pre-normative sull'intera filiera CCUS. M36.
- LA 3.4 test sperimentali di produzione di bio/elettro-combustibili e sulle simulazioni del processo integrato per la sintesi di bio/elettro-combustibili. M36

Per il WP4:

- Sviluppo software DEES (programma di calcolo) integrazione di nuove funzionalità, miglioramento dell'affidabilità e dell'usabilità. Prestazioni attese: strumento per la classificazione energetica e l'efficientamento.
- Risultati della modellazione di impianto energeticamente neutro (modello matematico, per bilanci di massa ed energia dinamici). Prestazioni attese: Identificazione di configurazioni di impianto in grado di raggiungere la neutralità energetica.
- Banca dati aggiornata basata sulle diagnosi energetiche 2023 (database). Prestazioni attese: dati di almeno cento impianti.
- Ottimizzazione e controllo di processi biologici di trattamento reflui (Impianti scala laboratorio e pilota e dati sperimentali). Prestazioni attese: miglioramento efficienza energetica rispetto ai processi tradizionali.
- Processi di valorizzazione dei fanghi (impianti scala laboratorio, dati sperimentali, valutazione scenari) Prestazioni attese: ottimizzazione dei processi di pirolisi e idrotermali per migliorare la produzione di energia e prodotti riutilizzabili come biochar e bio-olio, ottimizzazione scenari di trattamento per la neutralità energetica.
- Sviluppo processo biometanazione (Impianto pilota prototipale, dati sperimentali, modello fluidodinamico accoppiato con modello biochimico) Prestazioni attese: miglioramento della stabilità e delle prestazioni del processo di conversione biologica di substrati gassosi in biometano.

2.6 Fattibilità tecnico-scientifica

a) Fattibilità tecnico-scientifica

Relativamente al WP1

- 1.2-1.4 Le principali milestones del progetto saranno:

- sviluppo di mappe del calore di scarto industriale e di modelli di simulazione ed ottimizzazione delle soluzioni di decarbonizzazione del calore di processo;

- applicazione dei modelli di simulazione ed ottimizzazione a casi di studio inerenti a diversi processi industriali.

- 1.5 Milestone: monitoraggio e acquisizione dati, implementazione del prototipo di dashboard analitica di visualizzazione e controllo, messa in produzione della dashboard; censimento delle metodiche di profilazione e selezione di quelle da impiegare nell'infrastruttura di prova, selezione del software da profilare e validazione metodiche, ottimizzazione energetica per alcuni casi selezionati con interventi sul codice e/o strategie di esecuzione; studio delle metodiche di stima basate sul codice sorgente ed eventualmente proposta di tentativo che utilizzi l'archivio dei codici di SWH.

- 1.6-1.8: Milestone: Sensibilizzazione nell'utilizzo dei processi non termici ed innovativi.

- 1.9 – 1.11 Le principali milestone includono la raccolta dati, l'implementazione di schemi di monitoraggio, la valutazione dei risultati, la redazione e adattamento della Guida per l'efficientamento energetico, la diffusione e disseminazione dei risultati del progetto.

- 1.12 – 1.13 potenziamento dell'osservatorio con riunioni tematiche e tavoli di lavoro, promuovendo formazione e informazione, e svilupperà linee guida per il settore e i policymaker.

- 1.14 valutazione della fattibilità tecnico-economica dell'applicazione di OSC su tipologie di edifici specifiche.

- 1.15 analisi della catena del valore e i processi decisionali delle soluzioni OSC.

- 1.16 valutazione di service life, durabilità e recupero delle soluzioni OSC.

- 1.17 – 1.22 - Sviluppo di una componente organica con buone capacità di adsorbimento selettivo per la CO₂ in presenza della quantità d'acqua contenuta nelle miscele di post-combustione (4-7%vol).-Minori capacità di adsorbimento delle CO₂ nei materiali funzionalizzati.

-Prestazioni del composito magnetico inferiori a quelle previste in seguito ai processi di granulazione. -Costo dei materiali associati al processo di sintesi

Relativamente al WP2 si procederà in continuità con il precedente PTR tenendo conto delle nuove esigenze normative derivanti dalla prossima trasposizione della nuova direttiva EE, alla Tassonomia, passando per i decreti nazionali "energivori" e "gasivori". Il progetto presentato infatti vuole sviluppare strumenti e metodi per supportare le aziende, in particolare le PMI, nella riduzione dei consumi energetici in coerenza con le normative nazionali ed europee. Vista l'esperienza maturata negli ultimi anni si ritiene che i principali risultati dell'attività siano pienamente raggiungibili anche grazie al supporto dei partner accademici e delle associazioni di categoria. Per rendere ancora più efficace il raggiungimento degli obiettivi oltre al responsabile di WP e dei responsabili di contratto con le Università, per le LA 3.1 e 3.2 saranno individuati dei responsabili di sottoattività. Milestone:

- LA 2.1 e 2.2 analisi dei processi produttivi e individuazione dei KPI per almeno 3 settori (in totale);

- LA 2.2 realizzazione dei "Quaderni dell'efficienza energetica";

- LA 2.1 definizione di specifiche tecniche e realizzazione capitolato per la realizzazione di un tool informatico per valutare il ranking di un immobile (tool che sarà realizzato nella LA 2.2).

- LA 2.1, 2.3, 2.4 e 2.5 costituzione di un tavolo di lavoro condiviso con università, associazioni di categoria, professionisti del settore energetico per la definizione di metodologie e strumenti per la realizzazione di assesment "light" nelle PMI.

- LA 2.2, 2.3, 2.4 e 2.5 Tool informatico per gli assesment, e portale web dedicato con informazioni relative agli interventi di efficientamento energetico oltrechè metodologie, documentazione etc... e con l'ausilio delle Università LA2.3, 2.4 e 2.5 un ampio campione di casi studio svolti sul campo.

- LA 2.1, 2.2, 2.7 definizione di una metodologia per la valutazione delle inefficienze nei settori dove l'analisi di benchmarking esterno potrebbe risultare essere fallace;

- LA 2.6 valutazione di fattibilità di utilizzo dell'idrogeno prodotto dal surplus di produzione elettrica da fonte rinnovabile come co-combustibile nei sistemi di cogenerazione andando a definire un modello matematico di valutazione tecnico-economica;

- LA 2.8, sulla base dell'analisi degli interventi di efficientamento energetico presentati in due cicli di diagnosi energetiche verranno analizzati i driver economici che ne hanno permesso o frenato la loro applicazione.

Per quanto riguarda il WP3 Le soluzioni innovative e milestone su cui si basa la proposta sono:

- Gassificazione in pressione su scala pilota di biomasse residuali ad emissioni negative. Si ottimizzerà il processo allo scopo di produrre idrogeno verde puro mediante processo Pressure Swing Absorption (PSA).

- Produzione di sorbenti supportati su membrane polimeriche ad elevata area superficiale selettivi per la CO₂ a bassa temperatura (60-400 °C) per purificazione del syngas e ottenimento di tenori di H₂ superiori al 95% a valle del reforming dei TAR.

- Sviluppo di sistemi innovativi di rimozione di composti dello zolfo e del cloro dal syngas.

In merito al WP 4 le soluzioni proposte combinano tecnologie mature con approcci all'avanguardia, per l'ottimizzazione dei processi depurativi e l'incremento e integrazione di fonti energetiche rinnovabili.

Tra i principali punti critici vi è la scalabilità delle tecnologie e delle soluzioni proposte nonché il loro adattamento all'applicazione su scala industriale, con il conseguente rischio di replicabilità delle prestazioni. Per mitigare questo rischio i test su scala pilota saranno condotti in condizioni operative il più possibile realistiche.

Milestones principali:

- Mese 6: Analisi della letteratura
- Mese 12: Completamento dell'analisi delle diagnosi energetiche 2023 e aggiornamento del database. Termine delle prove di pirolisi e HTC su soli fanghi ai fini della costruzione degli scenari di trattamento.
- Mese 18: Completamento di tutte le attività della L.A. 4.1.
- Mese 24: Prima versione del modello di impianto energeticamente neutro validata con dati dei gestori. Avviamento dell'impianto di biometanazione nella configurazione ibrida (biomassa adesa e sospesa).
- Mese 30: Rilascio della versione beta del software DEES 2.0 per test con gestori selezionati. Conclusione delle campagne sperimentali sui prototipi pilota e analisi dei risultati.

2.7 Impatto sul sistema energetico e benefici attesi

a) Impatto e benefici sul sistema energetico

L'efficienza energetica e la transizione verso l'elettrificazione dei processi industriali sono diventati temi centrali nell'agenda energetica globale, con l'Unione Europea (UE) che svolge un ruolo di primo piano nel promuovere politiche e normative finalizzate a ridurre le emissioni di gas serra e a migliorare la sostenibilità energetica e ambientale.

La Direttiva sull'Efficienza Energetica (EED 3) ha infatti introdotto obiettivi vincolanti per la riduzione entro il 2030 del consumo energetico finale dell'UE dell'11,7% rispetto al 2020. Inoltre, è stata proposta una modifica della Direttiva sulle Energie Rinnovabili (RED 3) per aumentare l'obiettivo europeo al 40% entro il 2030, introducendo obiettivi vincolanti per gli Stati Membri e regole specifiche per la bioenergia sostenibile. Il Green Deal europeo propone a questo riguardo un ulteriore passo avanti, mirando a rendere l'Europa il primo continente a emissioni zero entro il 2050. Questo ambizioso piano prevede investimenti significativi nelle infrastrutture e nelle tecnologie sostenibili, con l'obiettivo di spingere le imprese ad adottare modelli di sviluppo più sostenibili ed efficienti, valorizzando l'utilizzo delle risorse presenti sul territorio e disaccoppiando la crescita economica dall'impatto ambientale.

Risulta pertanto di fondamentale importanza, e in linea con i principali documenti europei di indirizzo strategico, quali il Clean Energy Package, il Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC), il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), e con gli obiettivi nazionali di riduzione delle emissioni, sviluppare metodi, strumenti e soluzioni che favoriscano una maggiore competitività di Piccole e Medie Imprese (PMI) e di settori industriali energivori e rafforzino l'autonomia e la resilienza in catene di valore strategiche e in aree di potenziali alleanze industriali, anche attraverso meccanismi di innovazione sistemica e condivisa.

In particolare, un notevole apporto al raggiungimento degli obiettivi attesi potrà essere fornito dalla promozione di soluzioni tecnico-gestionali innovative per la riduzione dei consumi e l'ottimizzazione dell'utilizzo delle risorse energetiche e idriche nei processi produttivi, dalla diffusione di strumenti di digitalizzazione e di tecnologie elettriche in sostituzione di soluzioni convenzionali basate sui combustibili fossili. Risultano tra queste di elevato interesse quelle soluzioni in grado di valorizzare gli scarti agroindustriali, industriali e municipali promuovendo l'utilizzo efficiente delle risorse disponibili e dei fluidi di processo, convertendoli in energia e nuovi vettori energetici.

In tale ambito, si evidenzia ad esempio la possibilità di generare gas di sintesi ad alto contenuto di idrogeno combinando processi di cattura della CO₂ (SEG) in situ e processi di gassificazione con vapore d'acqua attraverso l'integrazione con diverse metodologie di elettrificazione.

Altro aspetto di rilievo è quello dell'efficientamento della filiera idrica; il servizio di collettamento e depurazione delle acque reflue ha, infatti, un'incidenza significativa sui consumi elettrici del Servizio Idrico Integrato (SII) e sul totale del consumo nazionale. A fronte di un panorama in cui il settore depurativo municipale tratta carichi inquinanti superiori a 75 milioni di Abitanti Equivalenti (AE) con un fabbisogno energetico superiore ai 3 miliardi di kWh/anno, il raggiungimento della neutralità energetica imposto dalla bozza di direttiva quadro (EUCOM 541) rappresenta un obiettivo estremamente ambizioso, soprattutto perché dovrà essere coniugato con un livello di trattamento superiori agli attuali, con il riuso idrico e il recupero di materie seconde.

Si sottolinea infine la necessità di promuovere la sorveglianza del mercato a livello nazionale ed europeo relativamente all'efficienza dei prodotti connessi all'energia per garantire l'applicazione delle relative misure politiche e il risparmio energetico previsto dalle specifiche misure di prodotto; in tale ambito, la preparazione di nuovi standard mondiali, europei e nazionali è di fondamentale importanza al fine di consentire la misurazione dell'efficienza energetica e le prestazioni funzionali dei prodotti oggetto delle misure politiche adottate.

b) Benefici per gli utenti

I benefici a breve e medio termine attesi per gli utenti finali riguardano non solo gli utenti del settore industriale, ma anche quelli dei

settori civile e terziario. Le attività di studio, ricerca e verifica sperimentale di tecnologie efficienti per i processi industriali hanno l'obiettivo di incrementare le conoscenze tecnico-scientifiche per aumentare il livello di competitività del settore produttivo e contribuire a migliorare la crescita economica del Paese e a ridurre la bolletta elettrica nazionale e l'impatto ambientale.

Nel caso degli utenti del settore civile, l'immissione sul mercato di prodotti tecnologicamente innovativi e performanti e il prolungamento della vita di questi apparecchi, nel rispetto dei requisiti di ecodesign/ecosostenibilità, si traduce nella riduzione dell'energia necessaria per il recupero dei materiali dei beni dismessi e il minore consumo energetico (elettricità e gas) e di acqua (ove applicabile) degli apparecchi che devono essere più tecnologicamente avanzati per essere conformi ai requisiti minimi di ecodesign/ecosostenibilità garantendo allo stesso tempo prestazioni funzionali adeguate. Inoltre, una maggiore diffusione degli interventi di riqualificazione, facilitata da tecniche di edilizia off-site, potrebbe ridurre significativamente i costi delle bollette energetiche. Secondo i dati ARERA, le tariffe elettriche aumentano di circa il 3% annuo; pertanto, l'adozione di queste tecniche può comportare risparmi notevoli in termini di fabbisogno energetico dell'edificio, con una conseguente diminuzione dei consumi.

Per gli utenti industriali i benefici attesi riguardano principalmente una riduzione dei consumi energetici dei processi, una riduzione dei costi indotti da una gestione più efficiente di catene del valore strategiche a aree di potenziali alleanze industriali avvicinandole sempre più al paradigma di ecosistemi dinamici di innovazione; tale approccio consente di ottimizzare energeticamente ed economicamente le eccedenze di energia e materia e favorisce la riduzione dei costi e l'incremento generale delle sinergie ed economie di scala (con un beneficio indiretto sugli utenti civili che potenzialmente avranno una riduzione nei prezzi al consumatore dei beni prodotti).

I benefici conseguibili saranno riscontrabili sul breve e medio periodo in termini di miglioramento delle prestazioni relative ai consumi energetici e di tipologia di vettori energetici utilizzati anche in ottica di elettrificazione o decarbonizzazione dei consumi.

c) Previsione delle ricadute applicative

Tutti i risultati del progetto presentano ricadute applicative nel medio-lungo termine, risultando di particolare rilievo per aziende interessate a progettare, costruire e commercializzare sul mercato italiano apparecchi tecnologicamente innovativi e performanti e migliorare il proprio posizionamento sul mercato europeo. Per i decisori politici – nazionali e comunitari - i risultati delle attività proposte possono essere utili per l'analisi dello stato del mercato a supporto delle decisioni relative alla definizione di nuove misure politiche (per esempio sulla sorveglianza del mercato, aggiungere altro).

Il progetto si propone di fornire risultati utili per l'avanzamento dello stato dell'arte delle tematiche trattate, che saranno valorizzati mediante pubblicazioni scientifiche.

Di seguito si segnalano i principali risultati che hanno il potenziale per una futura industrializzazione e immissione sul mercato:

- Le mappe di distribuzione del calore di scarto per specifici settori industriali e i modelli di simulazione ed ottimizzazione delle soluzioni di decarbonizzazione del calore di processo sviluppati nel WP1 costituiranno una valida base di conoscenze per le aziende interessate alla realizzazione di interventi di decarbonizzazione
- L'impiego di tecnologie non termiche e termiche innovative in sostituzione dei processi termici tradizionali può portare a risparmi sui costi di produzione, aumento della produzione e maggiori entrate derivanti dalla vendita di prodotti alimentari freschi e di qualità per gli utenti.
- L'aggiornamento della Guida per l'efficientamento energetico delle aziende vitivinicole (anche con l'aggiunta della sezione relativa alle aziende del settore olivicolo-oleario) può fornire una valida base per incrementare la competitività delle aziende nei mercati globali e ridurre il carico sulle reti elettriche, con benefici economici diretti per i produttori e, potenzialmente, per i consumatori, attraverso una riduzione dei costi dei prodotti. La possibilità di estendere queste soluzioni su scala nazionale offre ulteriori opportunità di innovazione e miglioramento per l'intero settore agro-industriale italiano.
- Lo sviluppo di nuove catene di valore e modelli di business nel comparto OSC per la riqualificazione energetica degli edifici fornirà elementi concreti per incrementare lo standard di qualità e sostenibilità delle filiere industriali innovative nel settore delle costruzioni e la digitalizzazione nelle fasi di progettazione e fabbricazione, generando benefici economici e ambientali.
- Le nuove soluzioni OSC proposte ridurranno l'impatto delle opere durante i lavori, a vantaggio dei residenti e dei lavoratori degli edifici coinvolti. A livello nazionale, questo sviluppo può rappresentare una spinta significativa verso il raggiungimento degli obiettivi di rinnovamento del parco edilizio, contribuendo a triplicare l'attuale tasso di ristrutturazione (fino al 2% nel 2030 e al 2,6% nel 2050 in Italia).
- La realizzazione di 3 nuove linee guida settoriali "Quaderni dell'efficienza Energetica, l'identificazione di Indici di prestazione energetica settoriali di riferimento, che tengano conto anche delle specificità dei singoli processi e delle possibili soluzioni di efficientamento allo stato dell'arte, corredate con un'analisi costo/beneficio sono un importante strumento per le imprese per valutare le proprie performance energetiche ed individuare eventuali criticità e possibilità di miglioramento.
- Lo sviluppo di Tool informatici gratuiti che possono guidare le imprese verso l'individuazione di eventuali criticità insieme alla realizzazione delle linee guida settoriali saranno uno strumento utilissimo per affrontare il tema dell'efficienza energetica anche nelle PMI.
- L'utilizzo efficiente delle risorse energetiche applicato alle operazioni di separazione è di grande interesse per tutto il settore industriale chimico ed energetico in quanto le separazioni sono operazioni particolarmente energivore e presenti in tutti i processi produttivi. Il campo di applicazione è pertanto molto vasto. La grande versatilità dei materiali selezionati come sorbenti (i MOF censiti al momento

superano i 10000), la possibilità di miscelarli con le nanoparticelle e la loro versatilità chimica fa sì che la tecnologia MISA sia estendibile a un elevato numero di processi separativi.

- La CCS è essenziale per la decarbonizzazione dei settori Hard to Abate e per la loro sostenibilità economica e l'implementazione di sistemi di cattura della CO₂ su impianti alimentati da combustibili fossili potrebbe rappresentare una soluzione efficace per accelerare nel breve termine la decarbonizzazione e renderla economicamente sostenibile. La decarbonizzazione è attualmente un argomento strategico per la transizione energetica e sta mobilitando una serie di iniziative a livello globale. ENEA è stata direttamente chiamata in causa su queste tematiche strategiche per il nostro Paese, e ha già preso parte tramite i suoi esperti ai lavori di tavoli tecnici su CCS e trasporto di CO₂.

- Il perfezionamento del software DEES fornirà ai gestori, pianificatori e decisori uno strumento per l'ottimizzazione energetica degli impianti, facilitando la programmazione degli interventi in linea con gli obiettivi comunitari. Le metodologie sviluppate per l'analisi e l'ottimizzazione energetica potranno essere applicate agli impianti esistenti, portando a significativi miglioramenti dell'efficienza senza necessità, almeno in partenza di grandi investimenti infrastrutturali.

- Le attività sperimentali su tecnologie di trattamento innovative potranno portare allo sviluppo di tecnologie di depurazione ad alta efficienza energetica, pronte per l'applicazione industriale. Le ricerche sui processi termochimici applicati ai fanghi apriranno nuove possibilità per la valorizzazione energetica e materiale dei fanghi di depurazione, con potenziali applicazioni in diversi settori industriali.

- Lo sviluppo di processi per la produzione di biometano da biogas e syngas potrà trovare applicazione non solo nel settore della depurazione, ma anche in altri ambiti di gestione dei rifiuti organici.

- La ricerca sul biochar e altri prodotti dei processi termochimici potrebbe portare allo sviluppo di nuovi materiali con applicazioni nell'agricoltura, nel trattamento delle acque e in altri settori industriali.

2.8 Verifica dell'esito del progetto

a) Oggetti e documentazione dei risultati finali

Di seguito sono riportati i prodotti della ricerca delle attività dell'interno del progetto (oltre i report tecnici, per i quali è prevista una verifica funzionale e prestazionale in coerenza con quanto dichiarato nella descrizione della linea di attività:

- mappe del potenziale del calore di scarto per specifici settori industriali;
- modelli di simulazione ed ottimizzazione delle prestazioni energetiche ed economiche delle soluzioni e/o strategie di decarbonizzazione del calore industriale di processo;
- linee guida per le aziende contenenti i benefici energetici e non energetici nell'utilizzo delle tecnologie non termiche ed innovative;
- Guida per l'efficientamento energetico delle aziende vitivinicole e olivicolo-olearie (LA 1.10).

Per quanto riguarda i deliverable, riportati in maniera estesa nella tabella apposita, si prevedono le seguenti modalità per la verifica dei risultati:

- per ciascuna linea di attività verrà realizzato un rapporto tecnico di dettaglio nel quale saranno descritte le attività svolte insieme ai risultati ottenuti. I rapporti tecnici di dettaglio saranno consegnati in fase di SAL per opportuna valutazione da parte degli esperti, attraverso il confronto tra i contenuti dei documenti e la descrizione di linee di attività e relativi risultati. I rapporti tecnici di dettaglio conterranno anche la descrizione dei deliverable di altra tipologia associati alla medesima linea di attività.
- Per i prodotti di ricerca definiti nella tabella dei deliverable come "strumenti di calcolo" si provvederà a consegnare in fase di SAL i relativi applicativi, fogli di calcolo, ecc. per opportuna verifica funzionale da parte degli esperti, insieme ad eventuali manuali d'uso e supporti esplicativi del funzionamento.
- Per i prodotti di ricerca definiti nella tabella dei deliverable come "linee guida" o "guida" si provvederà a consegnare in fase di SAL la relativa documentazione in PDF o eventualmente i link alle pagine del sito web di ENEA per il download degli stessi.
- Per i prodotti di ricerca definiti nella tabella dei deliverable come "applicativo web" si provvederà a consegnare in fase di SAL i link alle pagine dove saranno messi in produzione per opportuna verifica funzionale da parte degli esperti.

come richiesto in fase di richiesta di integrazioni alla proposta di progetto, si evidenzia che il coordinamento tra i diversi co-beneficiari di tutti i WP è stato strutturato in modo da garantire l'efficacia e l'omogeneità delle attività di ricerca, pur rispettando l'autonomia scientifica di ciascun partner. Il piano di coordinamento prevede incontri periodici di allineamento con cadenza semestrale, durante i quali verranno presentati e discussi gli stati di avanzamento delle diverse linee di attività, evidenziando sinergie, risultati ottenuti e criticità riscontrate. Per le attività che richiedono un'interazione più frequente e un coordinamento più stretto, sono previsti incontri dedicati con frequenza Maggiore. Questo approccio flessibile al coordinamento permette di adattare le modalità e le frequenze di interazione alle effettive necessità delle diverse linee di ricerca, garantendo sia l'efficienza complessiva del progetto sia il raggiungimento degli obiettivi specifici delle singole LA.

in merito alle azioni di coordinamento ENEA-RSE, si precisa:

RSE ed ENEA collaborano da diversi anni sui temi del progetto 1.6, relativi all'efficientamento dei prodotti e processi industriali, grazie ad una consolidata e solida metodologia di scambio informazioni e proficue discussioni tecniche.

L'attività di coordinamento realizzata già nelle prime fasi progettuali per il PTR 2025-27, è concretizzata nella predisposizione di un

Comitato di Coordinamento durante la riunione del 19/12/2024 (di cui al verbale Prot. ENEA/2024/0090161), in ottemperanza a quanto prescritto dal Decreto MASE DM 388 del 06-11-2024, ha riguardato in primo luogo l'esame dei temi proposti dai due affidatari, e le possibili sinergie attuabili.

I principali temi oggetto di analisi sono stati:

- a) Efficientamento dei processi industriali di separazione dei gas – entrambi gli affidatari operano in continuità con le attività svolte nel PTR 22-24. Su questo tema gli affidatari concordano che le attività proposte (per RSE: uso di scarti termici per la produzione di ossigeno come gas di processo in processi ad alta temperatura; per ENEA: materiali per la separazione di miscele CO₂/N₂ in presenza di acqua), seppur afferenti alla medesima tematica (membrane), sono caratterizzate da oggetti di studio (tecnologie) molto diversi con applicazioni diverse, fornendo soluzioni efficienti a diversi contesti industriali (valorizzazione degli scarti termici per la produzione di ossigeno nelle industrie hard to abate per RSE e studio dell'impiego di Metal Organic Frameworks nella tecnologia Magnetic Induction Swing Adsorption per ENEA). Le ricerche risultano quindi sostanzialmente sinergiche e complementari.
- b) Valutazioni strategiche per la decarbonizzazione – gli affidatari operano in continuità con le attività svolte nel PTR 22-24. Su questo tema gli affidatari concordano che le attività illustrate, seppur afferenti alla medesima tematica, sono realizzate utilizzando diverse metodologie (ENEA presenta un approccio bottom-up, che parte dai dati forniti dalle singole aziende per valutare il potenziale di penetrazione di specifiche tecnologie energeticamente efficienti a livello nazionale, RSE invece un approccio top-down, che parte dall'analisi delle policy) e risultano quindi sostanzialmente sinergiche e complementari. L'azione congiunta degli affidatari garantisce una più ampia stima dei potenziali di efficientamento e decarbonizzazione delle tecnologie innovative considerate in ciascuna attività.
- c) Analisi dell'efficienza energetica per cluster industriali (filiera/distretti) – su questo tema RSE intende sviluppare strumenti di ottimizzazione e controllo per cluster industriali per una gestione energetica sinergica di tutti i vettori energetici, con lo scopo di minimizzare i costi, massimizzare l'autoconsumo su più vettori energetici e ridurre l'impatto sulle reti, migliorando al contempo la sostenibilità e l'efficienza complessiva del sistema; ENEA propone definizione di metodologie di analisi dei consumi, definizione di indicatori di efficienza energetica e benchmarking, identificazione e condivisione di buone pratiche per cluster industriali. Gli affidatari concordano che le attività illustrate, seppur afferenti alla medesima tematica, sono caratterizzate da metodologie diverse (ENEA più focalizzata sullo sviluppo di strumenti di analisi energetica e benchmarking, RSE più focalizzata sulla valutazione dell'impatto dell'introduzione di alcune buone pratiche nella filiera) e risultano quindi sostanzialmente sinergiche e complementari.
- d) Analisi dell'efficienza energetica del settore agroalimentare – su questo tema RSE intende proporre una valutazione del potenziale di decarbonizzazione del settore – in particolare focalizzato su soluzioni/misure/tecnologie innovative 4.0- sull'intero processo di produzione del prodotto alimentare, al fine di garantire la sostenibilità economica e sociale del processo di cambiamento; ENEA intende estendere la metodologia di analisi già impiegata nel comparto vitivinicolo siciliano su scala nazionale ed effettuare uno studio analogo anche per la filiera olivicolo-olearia. Inoltre, ENEA si propone di continuare lo studio relativo alle tecnologie non termiche e termiche innovative a tale settore industriale. Gli affidatari concordano che alcune delle attività illustrate sono afferenti alla medesima tematica, e quanto proposto da ENEA sviluppa ulteriormente quanto già realizzato da RSE nel triennio precedente, realizzando un ampliamento delle indagini sul territorio e delle soluzioni proposte. Gli studi risultano quindi sostanzialmente sinergici e garantiscono riscontri più completi agli operatori di settore.

L'attività di coordinamento si intende attiva durante l'intera vita del progetto.