

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 1.4

Titolo del progetto

Materiali e dispositivi di frontiera per applicazioni energetiche

- Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile [ENEA]
- Politecnico di Milano - Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale [POLIMIMaGr]
- Politecnico di Milano - Dipartimento di Scienze e Tecnologie Aerospaziali [POLIMIAIGu]
- Politecnico di Milano [POLIMIBaPr]
- Università degli studi di Ferrara [UNIFEAnBa]
- Università degli Studi di Firenze [UNIFIMaDeLu]
- Università degli Studi di Napoli Federico II [UNINAAnc]
- Università degli Studi di Roma "La Sapienza" - Dipartimento di Chimica [UNIROMA1PiDa]
- Università degli Studi di Roma "La Sapienza"- Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale [UNIROMA1AIBo]
- Università degli Studi di Salerno [UNISAMaSa]
- Università del Salento - Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione - Campus Ecotekne [UNISalentoAnGr]
- Università del Salento - Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione - Laboratorio di Elettrochimica Applicata [UNISalentoCIME]
- Università del Salento - Dipartimento di Matematica e Fisica [UNISalentoAnSe]

- Università di Bologna - Alma Mater Studiorum [UNIBOVIRa]

Durata del progetto: 36 mesi

Costo proposto: 6.200.000,00 €

2. DATI GENERALI DEL PROGETTO

2.1 Dati progetto

Titolo del progetto

Materiali e dispositivi di frontiera per applicazioni energetiche

Durata del progetto

36 mesi

2.2 Descrizione progetto

Abstract del progetto

Il progetto 1.4 "Materiali e dispositivi di frontiera per applicazioni energetiche" prevede lo sviluppo di materiali innovativi per applicazioni nel campo energetico. Il progetto è strutturato in cinque Work Package, focalizzati sui materiali, compositi, metallici e ceramici, per processi di manifattura additiva, WP1 e WP2, catalizzatori innovativi, WP3, e materiali e componenti per il settore eolico, WP4 e WP5. I processi di manifattura additiva (Additive Manufacturing, AM) ribaltano l'approccio produttivo convenzionale, basato generalmente su metodi sottrattivi e di fonderia, con potenziali benefici per il settore produttivo e con ricadute nei diversi settori, in particolare quello energetico.

Nonostante un enorme interesse iniziale, queste tecnologie, per una maggiore diffusione richiedono il superamento di alcune criticità, prima tra tutte quella dei materiali.

Nel WP1 verranno sviluppati materiali metallici e compositi per applicazione nello scambio termico. Da una parte verranno implementate le proprietà di una lega metallica che potrà essere utilizzata per la realizzazione, mediante AM, di scambiatori di calore. Questi, con geometria ottimizzata, sia dal punto di vista dello scambio termico, che per il processo produttivo, potranno essere utilizzati in diversi sistemi energetici, tra i quali impianti per i settori sia civili che industriali, quali quello dell'Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC), dell'elettronica e del recupero di energia. Verranno implementati materiali compositi, a bassa densità ma con conducibilità termica implementata. La possibilità di realizzare geometrie estremamente complesse mediante AM consentirà, nel WP1, di realizzare componenti per il settore della produzione di energia di piccola potenza (< 100 kWe). Tra questi è prevista la realizzazione di turbine per impianti micro-Organic Rankine Cycle (ORC) e turbine Pelton per impianti micro- e pico-idroelettrici. Verranno inoltre studiati gli effetti dei fenomeni di corrosione su campioni metallici realizzati mediante processi additivi, in condizioni simili a quelle operative, e la finitura superficiale.

Il WP2 mira a sviluppare ed ottimizzare l'uso di materiali ceramici avanzati in componenti di microturbine a gas (MTG). Gli obiettivi scientifici e tecnologici comprendono la definizione di formulazioni innovative di feedstock ceramiche, progettate per la stampa 3D, l'ottimizzazione del processo di fabbricazione e la realizzazione di un recuperatore termico ceramico dimostrativo con geometria complessa. L'uso dei materiali ceramici nelle MTG consente di operare a temperature di esercizio significativamente più elevate, in particolare quella di ingresso in turbina, ottenendo così una maggiore efficienza energetica. Tuttavia, l'aumento di efficienza complessiva della MTG risulterebbe limitato senza un adeguato incremento della capacità di scambio termico del recuperatore. Combinando una girante e un recuperatore in materiale ceramico si risponde pienamente all'esigenza di resistere alle alte temperature in ingresso alla turbina e si contribuisce a migliorare ulteriormente il rendimento della MTG. Il WP2, pertanto, si propone di sviluppare un recuperatore ceramico che, attraverso il design ottimizzato e l'uso di geometrie innovative ad elevata superficie di scambio, permette una trasmissione di calore superiore, minimizzando i costi energetici di produzione.

Nel WP3 le attività sono dedicate allo sviluppo di due tipologie di catalizzatori: 1) per la cattura e l'uso integrato della CO₂ (Integrated carbon dioxide capture and utilization, ICCU); 2) di tipo magnetico, in forma di nanoparticelle magnetiche supportate per reazioni di reforming.

I materiali per la ICCU che si vogliono studiare e preparare hanno sia la funzione di adsorbitori che di catalizzatori. I materiali più promettenti in questo senso sono gli layered double oxides (LDO) e gli ossidi di metalli di transizione con struttura 2D (2D TMO). Le sfide aperte sono però molteplici: studiare ed individuare la struttura e la composizione più efficiente, individuare un'efficace procedura di preparazione, scalabile e senza precursori tossici, verificare la capacità e le condizioni di adsorbimento e desorbimento della CO₂, verificare la stabilità del materiale dopo cicli di adsorbimento/desorbimento, individuare la reazione per cui tali materiali possono risultare più efficienti.

Ulteriore obiettivo del progetto è lo sviluppo di materiali avanzati finalizzati alla realizzazione di un reattore chimico ultracompatto in grado di intensificare i processi produttivi, in particolare la produzione distribuita ed elettrificata di syngas, combinando il concetto di catalisi magnetica alimentata mediante induzione RF e la realizzazione, mediante AM, di supporti monolitici aventi geometrie complesse. L'applicazione della tecnologia AM alla catalisi eterogenea consente la progettazione e fabbricazione di strutture porose complesse, funzionali per un elevato caricamento di specie attive e che permettono di modulare il flusso di gas verso la modalità turbolenta,

migliorando la produttività del processo chimico.

Già da diversi anni, tra le fonti rinnovabili, l'energia eolica è quella che sta mostrando una crescita più rapida con un potenziale molto elevato, in virtù soprattutto della prevista diffusione nei prossimi anni della tecnologia offshore flottante. Obiettivo dei WP4 e WP5 è quello di implementare materiali e componenti per il settore eolico.

Il WP4 è focalizzato sull'implementazione di materiali compositi per turbine eoliche che conferiscano alle pale una maggiore durata, migliore manutenibilità, insieme a maggiore sostenibilità e circolarità.

Tale obiettivo verrà realizzato sviluppando da un lato strutture di rinforzo ecosostenibili, basate su fibre di carbonio da riciclo e fibre naturali e dall'altro resine innovative con aumentate caratteristiche di riparabilità e riciclabilità. La combinazione fibra-matrice porterà ad ottenere compositi vitrimerici volti non solo a diminuire il peso della pala ma anche ad aumentarne la possibilità di essere riparata e la riciclabilità. La realizzazione di coating che contribuiscano a prevenire l'erosione delle pale in condizioni di esercizio, sarà volta a ritardarne l'invecchiamento e garantirne la massima efficienza.

Nel WP5 sono stati pertanto individuati componenti e/o dispositivi impiegati nel settore eolico, anche offshore, per i quali ci si prefigge l'obiettivo di migliorarne il comportamento in esercizio: pale eoliche, strutture portanti e supercapacitori. Per i primi due componenti le soluzioni investigate puntano in entrambi i casi ad aumentarne la durabilità complessiva rispetto al deterioramento indotto dalle sollecitazioni meccaniche e dall'azione di ambienti aggressivi, utilizzando un approccio di ecodesign per le pale eoliche e sviluppando specifici rivestimenti anticorrosivi per incrementare la vita utile di impianti offshore. I supercapacitori (SC), invece, in quanto sistemi di accumulo di energia caratterizzati da alta capacità di potenza, trovano applicazione nei sistemi di generazione di energia dall'eolico, sia per il controllo dell'hardware (pale e rotore) che per la gestione delle fluttuazioni nella produzione di energia. Lo sviluppo di soluzioni innovative per i supercapacitori mira non solo ad aumentare la vita utile dei sistemi di accumulo a batteria ma anche a migliorarne le prestazioni in termini di gestione delle fluttuazioni di energia prodotta. Difatti, a causa della natura stocastica del vento, ancor più in mare aperto per gli impianti offshore, l'energia elettrica generata dalle turbine eoliche è altamente irregolare e può influenzare sia la qualità dell'energia prodotta che la pianificazione dei sistemi energetici. Nel WP5 si studieranno i componenti che, per caratteristiche e prestazioni, risultino più idonei alla massimizzazione delle potenzialità capacitive dei SC mirando all'individuazione della configurazione elettrodica più promettente.

Abstract del progetto ENG

Project 1.4 "Frontier materials and devices for energy applications" involves the development of innovative materials for applications in the energy field. The project is structured into five Work Packages, focused on composite, metallic and ceramic materials for additive manufacturing processes, WP1 and WP2, innovative catalysts, WP3, and materials and components for the wind power sector, WP4 and WP5.

Additive manufacturing (AM) processes overturn the conventional production approach, generally based on subtractive and foundry methods, with potential benefits for the production sector and with repercussions in the various sectors, in particular the energy one. Despite enormous initial interest, for greater diffusion these technologies require overcoming some critical issues, first and foremost that of materials.

In WP1, metallic and composite materials will be developed for application in heat exchange. On the one hand, the properties of a metal alloy will be implemented which can be used for the creation, using AM, of heat exchangers. These, with optimized geometry, both from the point of view of heat exchange and for the production process, can be used in various energy systems, including systems for both civil and industrial sectors, such as Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC), electronics and energy recovery. Composite materials will be implemented, with low density but with implemented thermal conductivity. The possibility of creating extremely complex geometries using AM will allow, in WP1, to create components for the low-power energy production sector (< 100 kWe). These include the construction of turbines for micro-Organic Rankine Cycle (ORC) plants and Pelton turbines for micro- and pico-hydroelectric plants. The effects of corrosion phenomena on metal samples made using additive processes, under conditions similar to the operational ones, and the surface finish will also be studied.

WP2 aims at developing and optimizing the use of advanced ceramic materials in micro gas turbine (MTG) components. The scientific and technological objectives include the definition of innovative ceramic feedstock formulations, designed for 3D printing, the optimization of the manufacturing process and the creation of a demonstration ceramic heat recuperator with complex geometry. The use of ceramic materials in MTG allows operation at significantly higher operating temperatures, in particular the turbine inlet temperature, thus achieving greater energy efficiency. However, the increase in overall efficiency of the MTG would be limited without an adequate increase in the heat exchange capacity of the recuperator. Combining a turbine wheel and a recuperator in ceramic material fully responds to the need to resist the high temperatures at the turbine inlet and contributes to further improving the performance of the MTG. WP2, therefore, focuses on developing a ceramic recuperator which, through the optimized design and the use of innovative geometries with a high exchange surface, allows superior heat transmission, minimizing energy production costs.

In WP3 the activities are dedicated to the development of two types of catalysts: 1) for the capture and integrated use of CO₂ (Integrated carbon dioxide capture and utilization, ICCU); 2) magnetic type, in the form of magnetic nanoparticles supported for reforming reactions. The materials for the ICCU that we want to study and prepare have both the function of absorbers and catalysts. The most promising materials in this sense are layered double oxides (LDO) and transition metal oxides with 2D structure (2D TMO). However, there are many open challenges: studying and identifying the most efficient structure and composition, identifying an effective preparation

procedure, scalable and without toxic precursors, verifying the capacity and conditions of CO₂ adsorption and desorption, verifying the stability of the material after adsorption/desorption cycles, identify the reaction for which these materials can be more efficient.

A further objective of the project is the development of advanced materials aimed at the creation of an ultra-compact chemical reactor capable of intensifying production processes, in particular the distributed and electrified production of syngas, combining the concept of magnetic catalysis powered by RF induction and the creation, using AM, of monolithic supports having complex geometries. The application of AM technology to heterogeneous catalysis allows the design and fabrication of complex porous structures, functional for a high loading of active species and which allow the gas flow to be modulated towards the turbulent mode, improving the productivity of the chemical process.

For several years now, among renewable sources, wind energy has been showing the fastest growth with very high potential, mainly due to the expected diffusion of floating offshore technology in the coming years. The objective of WP4 and WP5 is to implement materials and components for the wind sector.

WP4 is focused on the implementation of composite materials for wind turbines that give the blades longer life, better maintainability, together with greater sustainability and circularity.

This objective will be achieved by developing on the one hand eco-sustainable reinforcement structures, based on recycled carbon fibers and natural fibers and on the other innovative resins with increased repairability and recyclability characteristics. The fibre-matrix combination will lead to obtaining vitrimeric composites aimed not only at reducing the weight of the blade but also at increasing its possibility of being repaired and its recyclability. The creation of coatings that help prevent erosion of the blades in operating conditions will be aimed at delaying their aging and guaranteeing maximum efficiency.

In WP5, components and/or devices used in the offshore wind farms, were therefore identified, for which the objective of improving their operational behavior was set: wind turbine blades, metallic components and supercapacitors. For the first two components, the solutions investigated aim in both cases to increase their overall durability with respect to the deterioration induced by mechanical stress and the action of aggressive environments, using an ecodesign approach for wind turbine blades and developing specific anti-corrosion coatings to increase the useful life of metallic components in the offshore wind farms plants. Supercapacitors (SC), on the other hand, as energy storage systems characterized by high power capacity, find application in wind energy generation systems, both for the control of the hardware (blades and rotor) and for the management fluctuations in energy production. The development of innovative solutions for supercapacitors aims not only to increase the useful life of battery storage systems but also to improve their performance in terms of managing fluctuations in the energy produced. In fact, due to the stochastic nature of the wind, even more so in the open sea for offshore installations, the electrical energy generated by wind turbines is highly irregular and can influence both the quality of the energy produced and the planning of energy systems. In WP5, the components which, due to their characteristics and performance, are most suitable for maximizing the capacitive potential of SCs will be studied, aiming at identifying the most promising electrode configuration.

2.3 TRL progetto

TRL iniziale: 2

TRL finale: 5

Nel WP1, l'incremento di TRL si concretizza attraverso lo sviluppo di materiali compositi e metallici e l'investigazione di nuove strategie di fabbricazione mediante tecnologie di additive manufacturing. Alle attività di studio, sviluppo materiali e di pianificazione (TRL 2) si accompagnano campagne sperimentali, su componenti, progettate per rilevare come ottimizzare le variabili e massimizzare le prestazioni e la durabilità. Attraverso l'uso combinato di strumenti di progettazione dei processi e modellazione dei risultati sarà possibile implementare modifiche specifiche alle tecnologie in gioco, valutando in ultimo la fattibilità del transfer tecnologico. Verranno costruiti e testati prototipi in diversi ambienti e quantificate le performance in termini di durabilità e efficienza cambiando le condizioni operative (TRL 5).

Il TRL del WP2 parte da un valore 2, avendo identificato nella formulazione del progetto un concept tecnologico innovativo che mira a dimostrare i vantaggi derivanti dall'introduzione di materiali ceramici avanzati in componenti di microturbine a gas. Per la progettazione di un dimostratore prototipale di recuperatore termico ceramico, con geometria ottimizzata per il massimo scambio termico, saranno sviluppati modelli e sarà valutato l'impatto del recuperatore sull'efficienza complessiva della microturbina. La validazione della tecnologia sarà condotta attraverso test sperimentali in ambiente di laboratorio. L'approccio integrato di progettazione, simulazione, realizzazione e validazione sperimentale permetterà di incrementare il livello di maturità tecnologica del concept, con l'obiettivo di raggiungere un TRL pari a 5.

Nell'ambito delle attività sui materiali idonei alla ICCU, si passerà dell'analisi critica dello stato dell'arte su due particolari classi di materiali, alla preparazione e primi test funzionali sui materiali selezionati. Per quanto riguarda i catalizzatori magnetici, sarà valutata la possibilità di utilizzare l'AM nella realizzazione di supporti per i catalizzatori magnetici. Il processo AM è particolarmente adatto alla realizzazione di supporti con geometria complessa, dove le geometrie convolute generano una maggiore area superficiale, favoriscono una distribuzione uniforme dei flussi di gas ed una migliore interazione solido/gas.

Le tecnologie proposte nel WP4 sono state validate in ambienti rilevanti ma con materiali differenti rispetto alle innovazioni introdotte in questa descrizione, ovvero utilizzando fibre di carbonio da riciclo e materiali termoplastici o termoindurenti a base di resine epossidiche. L'implementazione della tecnologia con fibre di rinforzo naturali, resine con aumentata riciclabilità e coating protettivi sul laminato, consentirà di validare processi messi a punto in progetti precedenti su materiali altamente innovativi e a ridotto impatto ambientale, per applicazioni nel settore eolico, consentendo di passare da un TRL 3 ad un TRL 4.

Nel WP5, i risultati attesi dallo sviluppo delle attività includono la messa a punto di prototipi e di processi produttivi che provino e quindi confermino che gli obiettivi di prestazione sono raggiungibili anche su scala di sistemi modellati e nello specifico campo di applicazione investigato (eolico offshore). Con riferimento alle pale eoliche, le attività puntano alla realizzazione, in scala di laboratorio, di elementi rappresentativi del concept sviluppato, in termini di compound e processo produttivo e la messa a punto di un rivestimento protettivo anticorrosione per la componentistica metallica, che ne garantisca la durabilità anche negli ambienti aggressivi offshore. Con riferimento ai supercapacitori, partendo dallo sviluppo di materiali elettrodici, si punterà a individuare la configurazione elettrodica maggiormente performante e si predisporrà la realizzazione di un primo dispositivo prototipale da laboratorio (TRL4).

2.4 Inquadramento del progetto nello stato dell'arte

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

Il progetto affronta diverse sfide tecnologiche nel campo dei materiali di interesse per il settore energetico: materiali per processi additivi per la realizzazione di componenti avanzati per lo scambio termico e per la produzione di energia (WP1 e WP2); catalizzatori per processi energetici (WP3); materiali per il settore eolico (WP4 e WP5).

I processi produttivi tradizionali, quali quelli sottrattivi, per asportazione di truciolo, e di fonderia, possono presentare dei limiti, in particolare nella realizzazione di componenti con geometrie complesse e con numero limitato di pezzi da assemblare, nell'utilizzo delle risorse materiali e energetiche. I processi additivi ribaltano il paradigma produttivo con un approccio basato sulla realizzazione dell'oggetto strato dopo strato, basandosi su un modello CAD. I processi additivi possono essere alla base di un vantaggio competitivo delle industrie e dare la possibilità di personalizzare la produzione adattandosi alle stringenti esigenze del mercato.

Negli ultimi anni la produzione additiva ha trovato un interesse, sempre crescente, in diversi settori per differenti applicazioni relative alla produzione di energia e all'industria energetica portando alla semplificazione dei processi stessi ed all'efficienza operativa puntando alla ricerca di soluzioni con costi ridotti e tempi brevi. La produzione additiva sta rivoluzionando l'industria energetica in vari settori, guidando progressi essenziali per un futuro energetico più pulito e affidabile. L'AM trova applicazione nei settori aerospaziale, produzione di energia, trasporti, con particolare attenzione a quello automobilistico, per via dell'alleggerimento, e il settore biomedicale [1-4].

La dimensione globale del mercato della produzione additiva è stata stimata essere pari a 13,84 miliardi di dollari nel 2021. Si prevede che il mercato globale crescerà a un tasso di crescita annuo composto del 20,8% dal 2022 al 2030, per raggiungere i 76,16 miliardi di dollari entro il 2030. Il mercato globale della produzione additiva è stato guidato, in questi anni, principalmente dal settore dei metalli e ha rappresentato oltre il 50,6% delle entrate globali nel 2021.

Il mercato europeo della produzione additiva ha generato un fatturato di 6.267,1 milioni di dollari nel 2023.

Si prevede che il mercato crescerà a un CAGR del 23,9% dal 2024 al 2030. A livello nazionale, si prevede che tra i paesi Europei, la Germania registrerà il CAGR più elevato dal 2024 al 2030.

In particolare, le dimensioni globali delle prospettive del mercato della produzione additiva sono state valutate a 864,7 milioni di dollari nel 2022 e si stima che cresceranno a un tasso di crescita annuale composto (CAGR) del 23,6% dal 2023 al 2030 [5].

Le stime riportate denotano non solo un interesse crescente del settore produttivo verso queste tecnologie, ma soprattutto l'enorme potenziale che queste presentano, in particolare in termini di applicazioni tecnologiche.

Come già descritto, esistono diverse tecnologie additive, che possono essere racchiuse in macro-categorie, ognuna delle quali include all'interno diversi processi con le proprie peculiarità, tra le quali il tipo di materiali che possono essere stampati. Questo rappresenta una criticità allo sviluppo di queste tecnologie. Il numero di materiali presenti è infatti ancora limitato, sia per i materiali polimerici e compositi che per i materiali metallici e ceramici. Il motivo è legato anche alla necessità di avere dei materiali che siano processabili con tecnologie quali quelle descritte sopra.

I processi additivi possono essere distinti in genere in base alla forma del materiale di partenza: solido, in polvere o filamento, o liquido, e al tipo di processo. I processi che partono da polveri possono essere sia di tipo a letto di polvere che a deposizione diretta, mediante l'eiezione delle particelle da un ugello. In genere, la sorgente che consente la fusione localizzata di questi materiali è o un laser o un fascio di elettroni. Nei processi a filamento possono essere utilizzati il laser, gli elettroni o un arco elettrico, o estrusori, nel caso di materiali polimerici e compositi, anche per una produzione in continuo. Tra i processi che partono da liquidi, in genere per la stampa di resine,

vengono utilizzati sistemi laser o lampade UV a 365, 385 o 405 nm.

Nel caso specifico dei materiali metallici, i principali processi additivi sono quelli a letto di polvere (Powder Bed Fusion, PBF), a deposizione diretta (Direct Energy Deposition, DED), a getto di legante (Binder Jetting), e a lastre (Sheet Lamination: ultrasonic additive manufacturing, UAM) (fonte: ASTM Committee F42 on Additive Manufacturing). Un'ulteriore suddivisione è in metodi diretti o indiretti. Inoltre è possibile depositare materiali metallici anche partendo da filamenti di materiale composito caricato con particelle metalliche, previo processo di sinterizzazione (Metal Filament Fusion Fabrication, MFFF).

Diversi autori riportano come la manifattura additiva possa portare a una riduzione dei consumi energetici e delle emissioni [6-13], rispetto a processi energivori quali quelli di fonderia e delle lavorazioni meccaniche. Un ulteriore vantaggio risiede nella riduzione di materiale di scarto per la produzione [14-20]. Uno degli aspetti critici per la produttività nella stampa di metalli mediante tecnologie additive è legato principalmente al tasso di deposizione (cm³/h). In [21] è riportato uno studio che considera il costo per la produzione di diverse tipologie di componenti in materiali metallici mediante AM in confronto con le tecnologie sottrattive convenzionali. Il lavoro suddivide lo sviluppo nel tempo delle tecnologie additive in 4 fasi che dipendono dalla velocità di deposizione. L'autore sottolinea come, per poter avere l'abbattimento dei costi di produzione mediante AM, a tal punto da renderli competitivi con i processi produttivi tradizionali, bisogna migliorare di almeno dieci volte gli attuali tassi di deposizione delle macchine di AM.

Attualmente la produttività di componenti metallici mediante AM è limitata rispetto ai sistemi di produzione convenzionali, ma l'evoluzione delle macchine nel prossimo futuro, sia in termini di dimensione dei volumi di stampa, della velocità di deposizione e dei consumi energetici, porterà a un incremento del numero di componenti prodotte per unità di tempo in misura paragonabile alle tecniche sottrattive e di fonderia.

Inoltre al fine di effettuare un confronto tra i vari processi produttivi bisognerebbe tener conto anche delle materie prime utilizzate e quelle di scarto. Una valutazione di questo tipo è complessa poiché dipende dal tipo di componente da realizzare e dal tipo di lavorazione. Indicatori quantitativi per le tecnologie in uso e di comparazione con le tecnologie convenzionali sono quindi:

- Il consumo specifico energetico o SEC (kWh/kg);
- Produttività (kg/h)

Yoon H. et al. hanno valutato i valori di consumo energetico specifico in funzione della produttività per alcune tecnologie additive, sia per polimeri che per metalli. I risultati mostrano come le tecnologie a letto di polvere di tipo EBM, per metalli e SLS, per polimeri, siano quelle a più basso SEC e con una produttività competitiva rispetto alle altre tecnologie [22].

La velocità di produzione è una delle criticità principali dei processi additivi, che inizialmente sono stati relegati al solo supporto nella prototipazione rapida. L'obiettivo delle aziende è però quello di incrementare la velocità delle macchine di stampa per renderle competitive con processi tradizionali e spostare la produzione verso quella di massa. Tra le aziende la Desktop Metal ha presentato recentemente una macchina con processo "binder jetting", che consente di produrre 12 mila cm³/h con spessori inferiori a 100 micron, salvaguardando quindi la finitura superficiale [23].

Diverse sono le applicazioni di queste tecnologie nel settore produttivo. Processi AM di tipo "binder jet" o a letto di polvere possono essere utilizzati per la realizzazione di modelli e stampi per produrre parti complesse. Infatti, la colata di metalli, che si presta all'utilizzo di materiali metallici di scarto e da recupero, può essere effettuata, anche per parti complesse, utilizzando modelli o stampi realizzati mediante AM, con processi "binder jetting", in materiale ceramico (Digital Metal Casting, Foundry Lab). Questo fino a quando i livelli di produzione non giustificano utensili duri per modelli di pressofusione o modelli stampati a iniezione. Le tecnologie di "binder jetting" possono quindi essere una valida alternativa ai processi di casting per ottenere componenti anche di notevoli dimensioni, sia in materiali ceramici che metallici. Con questo tipo di tecnologia Colibrium Additive, un'azienda di GE Aerospace, ha mostrato, nella recente fiera internazionale Formnext 2024, la possibilità di realizzare componenti per pompe per fluidi molto più efficienti rispetto a quelle ottenute per colata, riducendo il numero di componenti da assemblare.

Nel campo delle plastiche, sono stati realizzati, mediante AM, stampi in un numero limitato di pezzi o in singoli blocchi, con limitata necessità di assemblaggio, assicurando una riduzione dei tempi di produzione, grazie a sistemi di raffreddamento più veloci che consentono il rapido distacco dei pezzi. Questo porta a un risparmio, per il settore industriale, dei consumi energetici e una riduzione del costo del pezzo.

Un altro esempio di componenti realizzate mediante tecnologie additive sono i distributori nei ventilatori utilizzati per il raffreddamento di un data center, prodotti dalla Valcon. Per il suo raffreddamento sono necessari 600 ventilatori e la loro realizzazione in una versione più efficiente, dal punto di vista fluidodinamico, del 10% rispetto a quelli ottenuti per estrusione, ha permesso un risparmio annuo quantificabile in 500 mila euro (fonte: Valcon.be).

L'azienda Evove vende delle membrane ceramiche per filtrazione, realizzate mediante processi di stereolitografia, SLA, con il quale assicurano di ottenere, tramite il più efficiente cammino dei fluidi nella membrana una riduzione dei costi energetici per la filtrazione pari all'80% rispetto a una membrana convenzionale. Queste membrane possono essere utilizzate per: separazione olio e acqua, rimozione di

silice, idrocarburi e solidi sospesi, produzione di acqua ultrapura, desalinizzazione, filtrazione ad alte temperature e livelli di pH, riciclo del lavaggio caustico, cibo e bevande, acque reflue industriali (fonte: evove.tech)

All'interno del progetto vengono sviluppati materiali per processi di manifattura additiva, compositi, metallici e ceramici per applicazioni nello scambio termico e per sistemi di produzione di energia.

Stime recenti considerano un sempre maggiore utilizzo di scambiatori di calore, con un grande sviluppo del mercato, trainato dalla domanda crescente di settori quali quello chimico e petrolchimico, petrolio e gas, HVAC e refrigerazione, alimentare e bevande, produzione di energia, carta e pasta di legno e altri. Inoltre l'utilizzo di componenti ottimizzate può impattare in termini di efficienza energetica e di sostenibilità ambientale nei processi termici a livello globale. Nel 2022 il mercato globale degli scambiatori di calore era pari a circa 29 miliardi di dollari e le stime di crescita tra il 2023 e il 2030 prevedono un tasso di crescita annuale composto (CAGR) del 7%. Tra i paesi che stanno incrementando la quota di mercato relativi agli scambiatori di calore vi sono Cina e India, a causa dell'elevato tasso di industrializzazione e urbanizzazione e conseguente aumento della domanda di energia e di sviluppo delle infrastrutture [24]. Tra questi, gli scambiatori di tipo compatto, e in particolare quelli a piastre, rappresentano il 25% della quota di mercato. Gli scambiatori a piastre sono basati sull'assemblaggio di piastre pre-sagomate a formare dei canali e a creare un percorso ad elevata turbolenza dei fluidi, con miglioramento dei coefficienti di scambio.

Tra i materiali più utilizzati vi sono acciai al carbonio, acciai inossidabili, leghe nichel e rame.

Alcuni tipi di macchine, in particolare quelle a ciclo chiuso, utilizzano diversi scambiatori di calore. E' questo il caso delle macchine ad assorbimento che vengono utilizzate per la refrigerazione e il condizionamento, con soluzioni ad alta efficienza energetica. Queste macchine infatti utilizzano principalmente energia termica, anziché elettricità, per raffreddare e sono basati in genere su soluzioni di bromuro di litio e ammoniaca, sostanze con punto di ebollizione a bassa temperatura. I benefici ottenibili con queste macchine sono in termini di riduzione dei consumi energetici, delle emissioni e di costi operativi. Alcuni vantaggi di questi sistemi risiedono nella compattezza, nella possibilità di essere accoppiati con fonti rinnovabili, ad esempio energia solare e geotermia, consentendo di raggiungere gli obiettivi in materia di energia rinnovabile, nella possibilità di monitorare in tempo reale e di controllare, mediante sistemi IoT, il loro funzionamento. E' previsto che il mercato dei refrigeratori ad assorbimento crescerà con un CAGR del 4.5% tra il 2023 e il 2030 [25].

Nel caso delle attività relative alla realizzazione dello scambiatore di calore, essendo presenti, nel processo di preparazione convenzionale, sia lavorazioni meccaniche che trattamenti termici energivori (brasatura, diffusion bonding) la bilancia, nella scelta del processo produttivo, potrebbe spostarsi a favore della produzione mediante AM, in particolare utilizzando la tecnica EBM. Inoltre i processi additivi, nel caso della produzione di scambiatori di calore, consentono di ridurre notevolmente i materiali di scarto, rispetto a quelli convenzionali. Risulta quindi questo un esempio particolarmente interessante di penetrazione delle tecnologie AM nel sistema produttivo con potenziali benefici per il sistema elettrico.

I vantaggi di processi additivi, nel settore energetico, vedono l'opportunità di realizzare componenti con geometrie complesse e con canali interni, senza assemblaggio di diversi pezzi. Questo contribuisce all'ottimizzazione della catena di produzione che vede un numero ridotto di processi. Nel WP1 è quindi previsto lo sviluppo di materiali per la produzione mediante AM di scambiatori di calore. In questo PTR verranno inoltre approfonditi alcuni aspetti critici dei materiali per la stampa a letto di polvere di scambiatori di calore, quali i fenomeni di corrosione. Nel caso della lega ferritica sviluppata, e che verrà implementata ulteriormente in questo PTR, gli unici studi sulla corrosione presenti in letteratura sono quelli effettuati da ENEA, in condizioni statiche [26,27].

Per quanto riguarda invece le leghe di titanio, quali la lega Ti6Al4V, sono presenti pochi studi in presenza di soluzioni ammoniacali. E' necessario quindi uno studio approfondito che preveda test specifici in ambiente d'esercizio.

In alcune applicazioni, ad esempio sistemi elettronici sottoposti a elevati flussi termici, come nei Data Center, scambiatori di calore di tipo passivo, compatti e a ciclo chiuso, quali i tubi di calore, possono essere utilizzati per raffreddare. In questo contesto sono limitati gli studi in letteratura sull'utilizzo della tecnologia additiva per la realizzazione di tubi di calore [28-30].

Le criticità che rivestono particolare interesse sono la definizione di strutture capillari che ottimizzino la risalita capillare dei fluidi, implementando lo scambio termico, la possibilità di realizzare tubi di calore senza assemblaggio (saldatura, brasatura etc.) e di esplorare geometrie complesse.

Il crescente impiego della stampa 3D richiede materiali nuovi e performanti, con caratteristiche idonee ad essere impiegati nelle tecnologie AM. Tra questi le polveri sferoidali metalliche ricoprono un ruolo dominante, soprattutto nei processi di stampa basati sulle tecniche di potenza es. DED, LPBF). Le applicazioni pre-Industria 4.0 impiegavano i vantaggi di queste polveri verso i processi di sinterizzazione, stampaggio e formatura a caldo (MIM, HIP, SPS, ecc.) che sfruttavano le migliorate proprietà di polveri sferoidali prodotte per atomizzazione (Water e Gas atomization). A seguito del crescente interesse verso le applicazioni di AM, i processi e le soluzioni esistenti sono stati indirizzati verso questa specifica applicazione ed accanto ai processi di atomizzazione "classici", l'atomizzazione al plasma è diventata uno dei metodi più adoperati per la produzione di tali polveri. L'impiego di plasma come fonte di energia (plasma sferoidization) consente notevoli vantaggi in quanto essa consente di impiegare impianti di dimensioni contenute, con processi rapidi e

senza transistori energetici in avviamento/spengimento; inoltre, la tecnica consente di ottenere produzioni on demand di polveri di qualità superiore, di trattare un'ampia serie di materiali, anche sensibili all'acqua, e processare materie prime seconde e di recupero.

Per quanto riguarda i processi di sferoidizzazione al plasma, utili per la produzione di polveri per i processi additivi, a livello internazionale il mercato è dominato dalla Tekna, che produce impianti basati sulla tecnologia RF. Sono poi riportate esperienze a livello accademico, ad es. dal Fraunhofer in Germania o VTT in Finlandia. La tecnologia DC però non ha avuto la stessa evoluzione di quella RF, essendo quest'ultima meno energetica e con caratteristiche più idonee all'obiettivo finale come possibilità di iniezione polveri assiale e tempi di permanenza più elevati delle stesse polveri all'interno del plasma. Tuttavia, molti ricercatori hanno iniziato a studiare il problema ed a trovare soluzioni adeguate a avere un prodotto vicino a quello ottenuto da RF.

Nel caso della tecnologia DC, che si intende impiegare nel progetto, esistono diversi costruttori di torce, come Praxair, GTV, Oerlikon, ma solo la Tektronix realizza impianti per la generazione di particelle mediante plasma.

In questa direzione si muovono le attività sperimentali che saranno intraprese presso ENEA. Partendo dai risultati infatti conseguiti nel precedente triennio in cui è stato sviluppato un impianto prototipo per la produzione di polveri sferoidali basato sulla tecnologia del plasma termico DC, si sposterà l'attenzione al miglioramento della produzione e alla selezione del prodotto finale.

Tra i processi che possono trarre un vantaggio dall'utilizzo delle tecnologie di Additive Manufacturing ci sono quelli elettrochimici, grazie alla possibilità di sviluppare sistemi complessi, progettati su misura, a costi ridotti e con elevata versatilità. Tuttavia, la letteratura relativa alla produzione di elettrodi e celle in flusso di elettrolita tramite AM, in particolare con tecnologie economicamente sostenibili che utilizzano materiali ceramici e/o metallici, è limitata o inesistente.

Con riferimento ai processi elettrochimici considerati, per la riduzione della CO₂ in etilene e/o etanolo [36-39], un tema di crescente interesse, gli elettrodi a diffusione di gas (GDE) attualmente disponibili presentano spesso limitazioni in termini di porosità e idrofobicità, parametri fondamentali per ottimizzare il trasporto della CO₂. Recenti studi hanno evidenziato come la modifica dei parametri strutturali del GDL possa influenzare in modo significativo la selettività verso composti C₂+ [36,39,40]. La stampa 3D, in particolare tramite tecnologia FDM, si è dimostrata promettente per migliorare il controllo su porosità, geometria del reticolo e spessore dello strato dei GDL, consentendo una migliore modulazione del trasporto di gas e della reazione elettrochimica.

Tra le tecnologie additive, la tecnologia Laser Powder Bed Fusion, L-PBF, è sempre più studiata per la produzione di compositi a matrice metallica (MMC) a base di titanio e alluminio, materiali ideali per il settore elettrico grazie a proprietà come l'elevato rapporto resistenza/peso e l'eccellente conducibilità. Gli MMC a base di titanio offrono resistenza alla corrosione e prestazioni meccaniche ottimali, rendendoli adatti per applicazioni strutturali avanzate. Gli MMC a base di alluminio, invece, combinano leggerezza e conducibilità, particolarmente utili per componenti elettrici. Entrambi richiedono un controllo preciso dei parametri di processo, della tipologia di sorgente laser utilizzata e delle strategie di scansione, per garantire densità uniforme, solidità dei legami metallurgici e microstrutture ottimali. Nonostante le sfide tecniche, la ricerca sta avanzando per migliorare l'affidabilità e le proprietà funzionali dei componenti prodotti, consolidando il potenziale dell'LPBF per il settore elettrico. La tecnologia L-PBF multimateriale inoltre rappresenta una soluzione innovativa per il settore elettrico, combinando materiali come rame, per la sua elevata conduttività elettrica e termica, e acciaio inossidabile, per la robustezza strutturale e resistenza alla corrosione. Questa integrazione consente di creare componenti compatti ed efficienti sfruttando le proprietà complementari dei materiali. La lavorazione del rame tramite LPBF presenta sfide dovute alla sua elevata conducibilità termica e riflettività. La combinazione di materiali con proprietà termofisiche diverse richiede un controllo preciso dei parametri per garantire una fusione ottimale e legami metallurgici solidi, con strategie come strati funzionalmente graduati. Nonostante le difficoltà dovute alla recentissima introduzione, LPBF multimateriale offre grandi potenzialità per componenti avanzati, come dissipatori di calore e conduttori complessi, migliorando innovazione ed efficienza nel settore elettrico.

Gli obiettivi che l'Europa si è prefissata sono ambiziosi, ovvero ridurre i livelli di emissioni di gas serra inferiori del 55% rispetto a quelli del secolo precedente. Questi obiettivi possono essere raggiunti con un maggior utilizzo delle energie rinnovabili e sostenibili e in parallelo realizzando sistemi di produzione di energia più efficienti. Inoltre la Commissione Europea ha l'obiettivo di incrementare al 40% il contributo delle energie rinnovabili nella produzione UE, con enormi benefici anche in termini ambientali. Nei prossimi anni sarà quindi incrementata la produzione di energia a partire da impianti fotovoltaici, eolici, geotermici, idroelettrici, solari e a biomasse, secondo l'approccio indicato nel Green Deal in Europa [41]. In questo contesto si inseriscono gli impianti per la produzione di energia basati su fonti rinnovabili quali quelli Organic Rankine Cycle (ORC), anche di piccola potenza (< 100kW_e). Quest'impianti utilizzano un fluido organico che subisce un ciclo termodinamico a bassa temperatura. L'espansione del fluido in una turbina permette la trasformazione di energia termica del fluido in energia meccanica dell'asse accoppiato al generatore elettrico. I punti principali di questo impianto sono: la pompa, l'evaporatore, l'espansore, il condensatore. E' possibile anche considerare un rigeneratore per incrementarne ulteriormente il rendimento. I rendimenti termici, nel caso di piccoli impianti, possono essere tra 8 e 12%, perché le temperature delle due sorgenti, calda e fredda, sono basse, anche inferiori a 150°C [42]. In un contesto internazionale critico, di dipendenza energetica e delle risorse materiali, di conflitti internazionali, la realizzazione di impianti per la produzione di energia, quali gli ORC, può essere una valida soluzione in un contesto di transizione energetica.

L'utilizzo di fluidi organici porta a diversi vantaggi, tra i quali: riduzione delle portate volumetriche, per l'elevato valore della massa

molecolare; ridotte temperature critiche e pressioni critiche (lavorando a pressioni inferiori a qualche decina di bar; considerando la curva di saturazione è possibile avere, in alcuni casi, un'espansione diretta, senza surriscaldamento.

Nel contesto residenziale sono già in uso collettori solari per ottenere acqua calda che può anche essere utilizzata nell'evaporatore di un impianto ORC. Un esempio di micro-cogenerazione nel settore domestico è quello di Leal-Chavez et al., [43], che riportano un ORC accoppiato a un campo solare. L'ORC produce energia elettrica (245 W), con il fluido in uscita dalla turbina a 60°C, che può essere utilizzato per ottenere acqua calda sanitaria nel condensatore. A fronte di un basso rendimento elettrico, < 8 %, è possibile avere un rendimento globale superiore al 55%.

Il componente principale in questi impianti è la turbina, che deve essere progettata sulla base del tipo di fluido e delle temperature delle sorgenti calda e fredda. Gli impianti ORC lavorano a ciclo chiuso e richiedono minimi interventi di manutenzione e possono essere considerati un valido sistema di produzione in ambiente residenziale e per piccole medie imprese. Oltre a sorgenti calde, alimentate da energie rinnovabili, è possibile considerare anche flussi termici di scarto provenienti da processi industriali.

In questo contesto, le tecnologie additive consentono di realizzare turbine di geometria personalizzata in base alle condizioni contorno (temperature sorgente calda e fredda e flussi termici) e alle esigenze locali. Tra le turbine di interesse ci sono sicuramente quelle a flusso radiale e assiale che possono essere realizzate mediante i processi additivi a letto di polvere, focalizzando l'attenzione sui contesti residenziali a bassa potenza (< qualche decina di kW) [44]. Mentre il contesto degli ORC di grande potenza è consolidato, anche se margini di sviluppo sono presenti, in letteratura ci sono pochissimi esempi di turbine per ORC di piccola potenza e in particolare realizzate mediante additive manufacturing. La mancanza di studi richiede quindi un approccio integrato, che consideri, sulla base di un'ipotesi di condizioni al contorno, la scelta di un fluido opportuno, a Ozone Depletion Potential (ODP) prossimo a zero e un basso Global Warming Potential (GWP) [46,46], la progettazione, specifica per una produzione additiva, e la realizzazione con queste tecnologie di una turbina, sulla quale effettuare test specifici. Tra le altre criticità che non sono state opportunamente esplorate vi sono gli studi relativi alla rugosità superficiale, che riduce il rendimento della turbina e di opportuni trattamenti post-stampa.

Restano nel campo della produzione di energia da fonti rinnovabili, è possibile considerare le potenziali applicazioni delle tecnologie additive nel settore idroelettrico.

Le precipitazioni annue in Italia sono stimate in 923.9 mm nel 2023 pari a 279.1 miliardi di metri cubi. Sebbene in lieve calo rispetto alla media ponderata nell'ultimo cinquantennio pari a 950 mm e 290 miliardi di metri cubi, tale valore è indice di come il nostro Paese abbia la fortuna di possedere un bene idrico ragguardevole. Occorre naturalmente considerare che le risorse sotterranee sono più difficili anche se non impossibili da sfruttare. Il tessuto idrico è, inoltre, molto capillare e la moltitudine di fiumi, rivoli, torrenti, bacini offre numerose possibilità di sfruttamento. Anche il tessuto industriale si avvantaggia di tale potenzialità includendo nei processi manifatturieri e chimici milioni di metri cubi di acque che possono essere sfruttate. Il pico-hydro ha visto in passato e vede tuttora diversi tentativi promossi dalle amministrazioni pubbliche nazionali e internazionali. Essendo il pico-hydro una risorsa di bassissimo impatto ambientale, a differenza degli impianti di piccola media e grande taglia, è sempre più di strategico interesse sfruttarne ogni opportunità per contrastare il cambiamento climatico e rispondere ad esigenze energivore sempre maggiori. La capillarità, inoltre, permette risparmi nella distribuzione dell'energia potendo delocalizzare i sistemi di generazione vicino al punto di approvvigionamento. Inoltre le sopraggiunte necessità derivanti dal passaggio dell'automotive pongono ulteriori appelli alla generazione dell'energia. Tuttavia, il potenziale su indicato è molto lontano dall'essere anche solo parzialmente trasformato. Il motivo va ricercato nella carenza di informazioni e organizzazioni produttive: al momento solo le turbine di taglia maggiore della piccola vengono interessate da un'attenta fase di progettazione, di analisi degli investimenti, di studio di collocazione. In merito al pico-hydro vi sono piuttosto rari casi di studi professionali mentre nella maggior parte dei casi tutto è affidato al fai da te con prodotti commerciali di bassissima taglia ed efficienza. Tale carenza rende nella maggior parte dei casi inattuabile un ritorno economico limitando qualsiasi decollo in settori cruciali. Uno studio nella direzione di creare metodologie produttive in grado di abbattere i costi di fabbricazione e al contempo elevare le performance delle pico-centrali permetterebbe di attrarre la ricerca di soluzioni energetiche sostenibili decentrate in modo capillare in ambiti urbani, rurali e industriali. Molti aspetti di questa organizzazione produttiva devono però essere collegati, integrati ed ottimizzati. L'aspetto di personalizzazione richiama a gran voce l'uso di tecnologie di Additive Manufacturing che, nel caso venissero applicate, condurrebbero ad un incremento dei costi e ad un abbassamento delle prestazioni. Occorre dunque promuovere investigazioni nelle tecnologie che investano vari punti. Va evidenziato che al momento lo stato dell'arte vede circa 350 tecnologie di Additive Manufacturing tutte caratterizzate da forti limitazioni in termini di qualità dei componenti prodotti, durabilità dei materiali, applicazione a basso costo. Le tecniche di finitura secondaria che possono mitigare solo i primi due aspetti presentano molte lacune in merito alla predizione dei risultati e alla loro applicabilità alle dette tecniche di Additive Manufacturing. Alcuni tentativi per migliorare la durabilità sono stati svolti modificando i materiali con conseguente aggravio dei costi e della fattibilità fabbricativa.

Le attività del WP1 coprono quindi diversi degli obiettivi e dei traguardi nazionali riportati nel PNIEC 2024: le dimensioni della decarbonizzazione, dell'efficienza e della sicurezza energetica, del mercato interno dell'energia e della ricerca, dell'innovazione e della competitività. Ad esempio è possibile considerare l'estensione della conversione energetica a risorse scarsamente valorizzabili o difficilmente accessibili (bassa entalpia). Inoltre sono in linea con il nuovo regolamento sugli F-Gas, citato anch'esso nel PNIEC, che prevede la drastica riduzione dei gas fluorurati, particolarmente utilizzati nel settore della refrigerazione e nel settore HVAC in generale.

Il settore prevede infatti un incremento, entro il 2030, dei consumi finali FER per riscaldamento e raffrescamento del 90% rispetto al 2020. L'attività, inoltre, si colloca all'interno del Net-zero Industry Act (NZIA), nell'ottica dell'implementazione di tecnologie basate su solare termico e impianti basati su pompe di calore (con fluidi a basso impatto ambientale), ed è affine alle tematiche "integrating renewable technologies in the energy systems" e "reducing costs of technologies" del SET-PLAN.

Il WP2 è incentrato sulla ricerca e sviluppo di tecnologie rivolte all'efficientamento della produzione di energia da Micro Turbine a Gas (MTG), considerando nello specifico l'applicazione dei materiali ceramici tecnici avanzati per la realizzazione di componenti con tecniche di AM, coerentemente con il percorso già precedentemente avviato nei precedenti PTR. Il contesto di riferimento relativo alle MTG, sia a livello nazionale che internazionale, non vede ad oggi cambiamenti sostanziali rispetto al precedente PTR di cui si riporta uno stralcio dello stato dell'arte maggiormente saliente e finalizzato all'inquadramento delle nuove attività sperimentali previste per il prossimo triennio.

A partire dagli anni 2000, le MTG si sono sempre più inserite nel mercato della generazione distribuita per la produzione di energia elettrica in unità di autoproduzione di piccole dimensioni, localizzate in diversi punti del territorio e allacciate direttamente alla rete elettrica di distribuzione. Possono essere impiegate efficientemente in tutti quei settori tipici in cui vi sia utilizzo combinato di energia elettrica e termica, quali il settore alberghiero, quello ospedaliero, i centri commerciali, i grandi complessi abitativi, le industrie alimentari, le lavanderie industriali e laddove siano presenti processi di essiccazione in generale. In base alla direttiva 2003/54/CE, si definisce Generazione Distribuita (GD): l'insieme degli impianti di generazione con potenza nominale inferiore a 10 MVA. Con riferimento alla GD-10 MVA, al 31 dicembre 2019 risultavano installati 895.367 impianti per una potenza efficiente lorda pari a 28.580 MW (il 23,9% della potenza efficiente lorda del parco di generazione nazionale); a distanza di tre anni, al 31 dicembre 2021, il numero di impianti è aumentato a 1.032.099 impianti per una potenza pari a 30.601 MW e quindi passando al 25,5% della potenza efficiente lorda del parco di generazione nazionale. [47,48]. Sottoinsiemi della GD sono la Piccola generazione (PG), definita come l'insieme degli impianti per la produzione di energia elettrica, anche in assetto cogenerativo, con capacità di generazione non superiore a 1 MW, e la Microgenerazione (MG), cioè l'insieme degli impianti per la produzione di energia elettrica, anche in assetto cogenerativo, con capacità di generazione inferiore a 50 kWe. Le MTG costituiscono, pertanto, un sistema di generazione di potenza di piccola taglia (generalmente minore di 500 kWe) basato su di un ciclo a gas rigenerativo che comprende un compressore, una turbina, un recuperatore, un alternatore e una parte elettrica di interfacciamento per la cessione della potenza alla rete elettrica. [48]. Nell'anno 2021 in Italia, la produzione lorda di energia elettrica da impianti di PG è stata pari a 32.729 GWh (il 55,6% dell'intera produzione nazionale di energia elettrica da GD-10 MVA) con una lieve riduzione di 0,16 TWh rispetto all'anno 2020 [48].

I principali produttori di MTG sono concentrati prevalentemente nei paesi anglosassoni ed in Italia l'unico produttore presente è Ansaldo come si evince dalla lista dei produttori chiave riportata nel report di analisi di mercato "Microturbine Market Size, Share, Global Industry Report 2032" [49], della Fortune Business Insights: Bladon Micro Turbine (U.K.), UAV Turbine (U.S.), Ansaldo Energia (Italy), Aurelia Turbine (Finland), MTT Microturbine (Netherlands), FlexEnergy Inc. (U.S.), ICR Turbine Engine Corporation (U.S.), Dresser-Rand (U.S.), Turbo Tech Precision Engineering Pvt., Ltd. (India) Brayton Energy, LLC. (U.S.). Nello stesso report si riporta inoltre che, per il mercato globale delle microturbine, si prevede una crescita del tasso annuo di crescita (CAGR, Compounded Average Growth Rate) del 9.6% nel periodo 2024-2032, promosso anche dalla previsione di investimenti crescenti in tecnologie pulite e a basso consumo energetico, che stanno creando già opportunità per il mercato [49].

L'impiego delle MTG per la generazione di potenza elettrica su piccola scala è considerata una applicazione innovativa. Infatti, se le turbine a gas da pochi MW sono progettate semplicemente scalando le unità più grandi (operando in ciclo semplice e con compressore e turbina assiali), le microturbine sono caratterizzate da un completo ripensamento dell'architettura della macchina e si basano sull'impiego di un ciclo rigenerativo e di turbomacchine radiali, assai più economiche ed operanti ad un numero di giri elevatissimo. Le MTG si configurano come impianti per la conversione di energia a basse emissioni, soprattutto in caso di alimentazione con combustibile gassoso (emissioni di CO₂ pari a circa 0.68 kg/kWh), sia per quanto riguarda CO e NO_x, (NO_x < 15ppm, CO < 50ppm) sia per quanto riguarda il particolato. La sempre maggiore diffusione di questi impianti concorrerà ad abbattere i costi di acquisto ed installazione. Lo sviluppo tecnologico ha consentito il raggiungimento di valori di efficienza elettrica del sistema dell'ordine del 30%, anche se che le MTG evidenziano tutte le loro potenzialità nella produzione combinata di energia elettrica e calore: recuperando attraverso uno scambiatore l'energia termica posseduta dai fumi a valle del rigeneratore, si possono raggiungere efficienze complessive del 70-80%. La riduzione dei consumi di combustibile, e quindi dei costi di funzionamento e delle emissioni di inquinanti, si raggiunge con un incremento dell'efficienza delle MTG, come in generale dei sistemi di produzione energetica, sia mediante il miglioramento dei rendimenti sia con l'adozione della cogenerazione.

Il rendimento del processo dipende dalla temperatura di esercizio della MTG ed un incremento della temperatura di ingresso in turbina di 100 °C può comportare un aumento dell'efficienza elettrica del gruppo turbo-gas di qualche punto percentuale. Uno dei principali limiti per l'incremento del rendimento è quindi correlato alle temperature di lavoro dei materiali costruttivi attualmente utilizzati. Sono già studiate da qualche tempo giranti di MTG realizzate con materiali ceramici, che possono lavorare a temperature superiori ai 1000 °C, con un considerevole incremento dell'efficienza del sistema turbo-gas. Di conseguenza, anche gli altri componenti, quali il recuperatore e la camera di combustione, operano a temperature sempre più elevate e gravose richiedendo materiali sempre più performanti, soprattutto in termini di resistenza alle alte temperature. La scelta quindi di esplorare l'applicabilità e fattibilità di componenti realizzati con materiali

ceramici tecnici innovativi è quindi da considerarsi come strada obbligata per la realizzazione di una MTG per la cogenerazione ad elevata efficienza, in grado di convertire l'energia chimica del combustibile in energia elettrica con rendimenti superiori a quelli attuali.

L'incremento del rendimento di diversi punti percentuali, abbinato alla sempre maggiore diffusione delle MTG, conduce ad un evidente risparmio nei costi di produzione di energia elettrica, grazie al minor consumo di metano, con cui sono attualmente alimentate le MTG presenti sul territorio nazionale [50].

Negli ultimi anni sono stati condotti diversi studi per sviluppare recuperatori di calore ceramici specificamente per le MTG, considerando l'elevata resistenza termica e chimica di questi materiali. Questi studi si concentrano soprattutto su tre aspetti chiave: l'ottimizzazione dei materiali ceramici per resistere a cicli termici estremi, la progettazione di geometrie che migliorino lo scambio termico, e la fabbricazione con tecniche avanzate come l'AM per produrre configurazioni complesse.

Per il recupero del calore nelle MTG e quindi per la realizzazione di recuperatori ceramici necessari per l'incremento delle temperature di lavoro e conseguentemente del rendimento, sono ad oggi stati considerati vari ceramici avanzati tra cui l'allumina, la zirconia, il carburo di silicio, il nitruro di silicio e il titanato di alluminio. Tra questi, in base a considerazioni inerenti alla resistenza agli shock termici e la capacità di trasmettere efficacemente il calore (elevata conducibilità termica), si distinguono l'allumina (Al_2O_3) e il carburo di silicio (SiC), come descritto da Sommers et al. in particolare, considerando anche la realizzazione di recuperatori a piastre [51].

La ricerca si è quindi focalizzata su carburo di silicio e allumina, noti per la loro resistenza a temperature elevate e la loro conducibilità termica. Diversi studi hanno esplorato l'uso di recuperatori in SiC per MTG, dimostrando che questo materiale può resistere a temperature di esercizio superiori a quelle raggiungibili con acciai speciali, consentendo un'efficienza più alta senza degrado delle prestazioni [52]. Nel caso del SiC, la possibilità di abbinare alle tecniche di AM la fase di Infiltrazione/Deposizione Chimica da fase Vapore (CVI/CVD) consente di incrementare la densificazione del materiale stampato e quindi anche le proprietà meccaniche, intrinsecamente più limitate nel caso di formatura con stampa 3D. Come evidenziato da He R. et al., le strategie di densificazione e rinforzo finora utilizzate non hanno completamente risolto la sfida ed è quindi necessario ulteriormente investigare questo aspetto [53].

Nel lavoro di Pelanconi et al. si riporta lo studio di un elemento tubolare in Al_2O_3 con architettura cellulare, ottenuto per stereolitografia, in cui si dimostra un aumento del trasferimento di calore radiale fino al 280% rispetto ad un elemento tubolare vuoto [54]. Nello stesso lavoro si evidenzia l'importanza di come la corretta progettazione e realizzazione del design cellulare massimizzi la temperatura di uscita rispetto a quella dei gas in ingresso. Ancora, Pelanconi et al. approfondiscono l'influenza del materiale mostrando come il calore radiativo sullo scambio termico in scambiatori gas-gas non sia trascurabile nel caso di impiego di materiali a minor conducibilità termica, quali gli ossidi ceramici [55].

Altri ricercatori hanno sviluppato e testato prototipi di recuperatori in nitruro di silicio (Si_3N_4), dimostrando una significativa efficienza termica e maggiore resistenza agli shock termici e alla corrosione, caratteristiche essenziali per le applicazioni in MTG [56].

Parallelamente all'innovazione dei materiali costruttivi, anche l'innovazione della geometria del recuperatore può contribuire ad incrementare l'efficienza di scambio termico, come evidenziato in alcune review di confronto delle geometrie più utilizzate [57]. Per la progettazione di geometrie complesse, gli studi recenti puntano a ottimizzare la configurazione dei recuperatori con geometrie a nido d'ape e strutture reticolari, come le strutture a giroide, per massimizzare la superficie di scambio termico e ridurre il peso del componente. Queste potenzialità sono massimizzate lavorando su recuperatori ceramici a geometria complessa costruiti utilizzando tecniche di stampa 3D, permettendo di ottenere una trasmissione del calore superiore a quella raggiungibile con geometrie convenzionali [58]. Al fine di compiere un ulteriore passo in avanti, all'interno del WP2 si considerano pertanto non solo materiali innovativi, ma anche geometrie complesse di ultima generazione, ottenibili mediante stampa 3D.

La realizzazione di componenti per MTG in materiali ceramici tecnici avanzati è stata ad oggi limitata a causa di vari fattori, tra cui i limiti intrinseci del processo di fabbricazione convenzionale, che richiede onerose lavorazioni meccaniche, che possono incidere dal 30 al 50% del costo del componente finito e producono importanti quantità di sfridi di lavorazione, anche fino all'85-90% di materiale rimosso, non riciclabili all'interno dello stesso ciclo produttivo. Inoltre, come riportato da Moritz e Maleksaeedi, i processi convenzionali prevedono tipicamente una formatura in stampo che, oltre a richiedere stampi specifici con costi realizzativi elevati, limita fortemente le geometrie realizzabili. Tra le tecniche di formatura alternative alla pressatura, si distingue la tecnica CIM (Ceramic Injection Moulding), già presente sul mercato per varie tipologie di materiali ceramici, particolarmente utile laddove componenti di dimensioni ridotte e con geometrie relativamente complesse (i.e. fori, filettature, sottosquadri, etc...) siano richieste in produzioni di larga scala, con l'importante vantaggio di poter formare qualsiasi tipologia di materiale ceramico poiché la feedstock è costituita da una fase termoplastica in cui è possibile disperdere dal 50 al 65 %vol. di polvere ceramica indipendentemente dalla sua natura. Laddove invece si vogliono esplorare geometrie ancor più complesse, l'unica alternativa è rappresentata dalle tecnologie di additive manufacturing ceramico, considerando soprattutto in fase esplorativa il vantaggio della produzione di piccole serie e quindi anche la possibilità di raggiungere prototipi di componenti con investimenti iniziali limitati [59].

Al momento ci sono diverse tecnologie AM per ceramici avanzati, ma finora sono stati ottenuti risultati variabili. Come riportato da Cramer et al. e da Lakhdar et al., la selezione del corretto processo di AM per una determinata applicazione non dipende solo dai requisiti in termini di densità, finitura superficiale, dimensioni e complessità geometrica dell'oggetto finale, ma anche dalla natura del particolare ceramico avanzato da stampare [60,61].

L'impiego dell'AM è diventato cruciale per realizzare recuperatori in ceramica dalle geometrie ottimizzate. Come riportato da Cramer et al., sono state condotte ricerche per migliorare i materiali ceramici stampati in 3D, utilizzando tecniche come la stereolitografia e il binder

jetting per produrre recuperatori di calore altamente dettagliati e resistenti, adatti alle elevate temperature delle MTG [62]. Questi studi sono pionieristici nel settore e sottolineano la crescente attenzione all'integrazione di materiali ceramici in recuperatori di calore per MTG fabbricati da AM, con il fine di migliorare l'efficienza complessiva delle turbine, ridurre i costi di esercizio e conseguentemente minimizzare i costi della produzione energetica, come riportato anche da Li e Li e da Sheykhpoor et al. [63,64]

Nel WP3 vengono sviluppati catalizzatori per applicazioni energetiche. Recentemente, nell'ottica di ridurre le emissioni di CO₂, vi è interesse verso processi integrati di cattura e utilizzo/conversione della CO₂ (ICCU) in quanto dalla CO₂ si può ottenere direttamente un prodotto utilizzabile in-situ andando a chiudere parzialmente il ciclo del carbonio e riducendo le problematiche relative al trasporto e allo stoccaggio che si hanno invece nel processo CCU (cattura e utilizzo della CO₂).

Lo sviluppo di materiali bifunzionali (DFM) che siano in grado contemporaneamente di catturare e convertire la CO₂ è l'aspetto chiave della tecnologia ICCU [65,66]. L'approccio tradizionale relativo ai DFM si basa sulla miscelazione fisica di adsorbitori di CO₂ (ossidi e carbonati di metalli alcalini e alcalino terrosi) e di catalizzatori (metalli preziosi e/o di transizione e relativi ossidi). Questa tipologia di materiali viene ottenuta solitamente attraverso due approcci che sono quelli della co-precipitazione [67] e della impregnazione [68], i quali però presentano dei limiti. Nel caso della co-precipitazione, si ottengono dei sistemi omogenei dove però i siti catalitici possono essere inglobati all'interno del materiale, diventando inaccessibili al reagente e quindi rallentando notevolmente il processo di conversione. Viceversa, nel processo di impregnazione, si ha un arricchimento di catalizzatore sulla superficie, ma questo comporta un blocco delle porosità e quindi una riduzione della capacità di adsorbimento. Nello sviluppo di DFM è quindi fondamentale studiare diversi approcci di sintesi che permettano la migliore sinergia tra i siti adsorbitori e quelli catalitici evitando processi di sinterizzazione o fenomeni di aggregazione dei vari componenti. Inoltre, la composizione dei DMF può essere tale che il sito adsorbitore coincida con quello catalitico; in questo modo la gestione dell'intero processo ICCU diventa più semplice.

Negli ultimi cinque anni la ricerca si è concentrata su varie classi di materiali, potenziali DFM per ICCU; tra questi vi sono i metal organic framework (MOF), gli MXeni, i dicalcogenuri di metalli di transizione, gli ossidi misti derivanti da idrossidi a doppio strato (LDH) e gli ossidi di metalli di transizione. Per tutti questi materiali vi è ancora molto spazio per l'approfondimento nella comprensione dei meccanismi e per l'ottimizzazione delle prestazioni.

Gli idrossidi a doppio strato (LDH) sono dei nano-materiali lamellari ionici bidimensionali. Essi sono costituiti da due cationi metallici, uno divalente (es. Ca²⁺, Mg²⁺, Mn²⁺, Fe²⁺, Co²⁺, Ni²⁺, Cu²⁺ or Zn²⁺) e uno trivalente (es. Al³⁺, Cr³⁺), organizzati in doppi strati o strutture lamellari. Gli anioni (nitrati, solfati o carbonati) e le molecole d'acqua riempiono essenzialmente gli interstizi tra gli strati di idrossido metallico. In seguito al processo di calcinazione, si ottengono degli ossidi misti di tipo lamellare (layered double oxides, LDO) che mantengono la morfologia 2D ed in cui la distribuzione dei siti metallici è uniforme grazie alla peculiare struttura del precursore utilizzato. In questa maniera, si ottiene un materiale in cui si superano i problemi di aggregazione e sinterizzazione dei siti metallici catalitici preservando l'accessibilità del materiale per il processo di adsorbimento della CO₂.

Scegliendo opportunamente i precursori di partenza per la sintesi degli LDH è possibile avere sul medesimo materiale sia metalli alcalini e alcalino-terrosi utili per il processo di adsorbimento, sia metalli di transizione che fungono da catalizzatore. Pertanto, gli LDH rappresentano una piattaforma ideale per ottenere degli ossidi misti bidimensionali con la doppia funzionalità di adsorbimento e conversione [69-72].

Un'altra classe di materiali 2D potenzialmente interessante è quella degli ossidi di metalli di transizione (2D TMOs), perché sono contemporaneamente adsorbitori di CO₂ e catalizzatori con performance migliorate grazie alla geometria di tipo 2D [73]. Recentemente, è stata dedicata attenzione alla possibilità di preparare i 2D TMO utilizzando come template il grafene o l'ossido di grafene (GO). Queste strutture sono considerate ideali substrati per crescere i TMO grazie alla loro processabilità in soluzione, alla loro struttura ultrasottile e flessibile nonché alla possibilità di modificare la loro superficie. Inoltre, l'attrazione elettrostatica tra il template GO elettronegativo ed i cationi metallici elettropositivi facilita il processo bottom-up di self-assembly del TMO [74].

Sia gli LDOs che i 2D TMOs possono essere preparati attraverso tecniche da soluzione semplici e altamente scalabili a livello industriale. Un ulteriore vantaggio di queste classi di materiali è quello di poter ottenere composti con caratteristiche opportunamente "tunate", andando ad agire sulla tipologia di precursori utilizzati e sulle condizioni di sintesi. Risulta quindi fondamentale progettare opportunamente i processi di sintesi ed individuare i migliori precursori, al fine di ottimizzare la struttura del materiale e le proprietà adsorbitive e desorbitive. È evidente quindi come questo sia un argomento di ricerca di grosso interesse di cui ci sono ancora molti aspetti da investigare.

Molti dei processi industriali per la produzione di molecole "piattaforma", ovvero sostanze utilizzate nella sintesi di prodotti chimici più complessi, sono di natura endotermica e assorbono notevoli quantità di calore spesso a temperature elevate. Una classe di questi processi è costituita dalle reazioni di reforming del metano con acqua e/o anidride carbonica per la produzione di gas di sintesi (H₂+CO) dove, a causa dei vincoli termodinamici, vengono comunemente utilizzate temperature superiori a 750°C per ottenere alti valori di conversione. Ne consegue che la produttività degli impianti di reforming dipende molto dall'efficienza con cui il calore può essere trasferito al letto catalitico.

Tipicamente, il riscaldamento convenzionale dei reattori tubolari avviene all'interno di fornaci a combustione. L'utilizzo del riscaldamento elettrico diretto dei tubi mediante effetto Joule può determinare una riduzione del volume del reattore fino a 100 volte intensificando

notevolmente il processo. L'elettificazione dei processi chimici è un ambito di crescente interesse poiché offre l'opportunità di rendere i processi industriali più sostenibili ed efficienti riducendo la dipendenza dalle fonti di energia fossile (quando si utilizza energia elettrica da fonti rinnovabili, come l'energia solare o eolica) e le emissioni di anidride carbonica. L'elettificazione dei processi chimici inoltre ha il vantaggio di poter essere combinata con tecnologie digitali come il controllo automatico e l'analisi dei dati per ottimizzare le operazioni, migliorare la qualità del prodotto e ridurre i costi.

Un'ulteriore intensificazione di processo con riduzione dei volumi può essere perseguita mediante la realizzazione di reattori monolitici riscaldati per mezzo di induzione elettromagnetica. Tra le diverse opzioni di trasferimento energetico il riscaldamento a induzione è una tecnologia ben nota per la sua elevata efficienza. L'energia viene fornita direttamente ad un materiale magnetico opportunamente rispondente ad un campo alternato a radiofrequenza, in modo rapido ed efficiente. In questo modo è possibile invertire il profilo di temperatura tradizionale dei reattori convenzionali avendo il cuore del reattore, lì dove viene catalizzato il processo di interesse, alla temperatura di esercizio senza la necessità di scaldare dall'esterno.

In questo ambito si inserisce l'utilizzo di nanoparticelle magnetiche supportate che agiscono contemporaneamente come agenti riscaldanti, dissipando l'energia del campo magnetico in calore, e come catalizzatori per le reazioni di reforming [75-78]. In questo modo il calore di reazione viene fornito istantaneamente e a distanza sul sito chimicamente attivo evitando dissipazioni dovute ad inefficienti trasferimenti dall'esterno del reattore. Grazie alla presenza di catalizzatori magnetici supportati, è ipotizzabile un'ulteriore intensificazione del processo come mostrato in [75].

Poiché nell'ambito della catalisi eterogenea, al fine di ottenere prestazioni affidabili del catalizzatore ed elevata produttività sono discriminanti il tipo di substrato sul quale vengono supportate le specie attive e la sua forma, la sintesi di catalizzatori magnetici si può avvantaggiare dell'utilizzo come supporto di scaffold di materiale ceramico/metallico realizzato mediante Additive Manufacturing. Quest'ultima, è emersa come una piattaforma preziosa per l'ingegneria della forma di solidi porosi e la fabbricazione di configurazioni scalabili da utilizzare in un'ampia varietà di reazioni. A tal fine, vari gruppi di ricerca in tutto il mondo hanno studiato la formulazione di catalizzatori porosi in scaffold strutturati con geometrie complesse che non solo mostrano prestazioni paragonabili o migliorate a quelle dei loro precursori in polvere, ma affrontano anche i problemi di caduta di pressione e attrito delle configurazioni tradizionali [79, 80]

Secondo Eurostat, l'energia eolica ha rappresentato oltre un terzo (37,5%) dell'elettricità totale generata da fonti rinnovabili nell'Unione Europea nel 2022. Nonostante l'aumento costante della capacità di generazione eolica (es. 188 GW nel 2021; 221 GW nel 2023), questo non è ancora sufficiente per soddisfare gli obiettivi energetici e climatici previsti per il 2030. Per questo motivo, sia le istituzioni europee che l'industria eolica si sono impegnate ad incrementare la produzione di energia eolica, sia onshore che offshore, nei prossimi anni. Fra i 5 principali megatrend della tecnologia eolica segnalati da ETIPWind nelle sue schede informative [81], si annovera la sostenibilità, che nello specifico si può declinare in:

- Innovazioni per riciclare componenti chiave come pale e magneti permanenti;
- Sviluppo di nuovi materiali e componenti sostenibili per progettazione;
- Nuove pratiche sostenibili per garantire che i parchi eolici rimangano inclusivi della natura e siano sviluppati in armonia con gli ecosistemi e le comunità locali [82].

Tale sfida, delineata nel "European Strategic Energy Technology Plan" (Set Plan), in particolare nel caso delle applicazioni off-shore, impone non solo l'incremento di efficienza dei sistemi, ma anche la transizione verso materiali ad alta durabilità, facilmente riparabili, totalmente riciclabili (ed auspicabilmente "cradle-to-cradle" - C2C).

All'interno di tale scenario, il WP4 intende sviluppare compositi finalizzati alla realizzazione di componenti della turbina, ad efficienza e durabilità migliorata, anche attraverso approcci di eco-design.

Ai fini dell'inquadramento del WP4 nello stato dell'arte, è utile tenere presenti i materiali attualmente utilizzati per la produzione delle pale eoliche.

La struttura generale della sezione trasversale della pala di una turbina eolica è composta da due gusci aerodinamici (uno sull'aspirazione o lato sottovento e uno sul lato pressione o sopravvento), uniti insieme ad una o più anime di taglio strutturali o ad una trave a cassone (longherone).

I cappucci dei longheroni sono soggetti a carichi elevati associati alla flessione "a ribalta" (flapwise). In particolare, il cappuccio del longherone sul lato pressione è esposto a cicli di carico tensione-tensione, mentre ci sono cicli di carico compressione-compressione sul cappuccio del longherone lato aspirazione. Per questo motivo, i cappucci dei longheroni sono realizzati in materiale composito unidirezionale (UD) nella direzione della campata, solitamente con matrice a base di resina epossidica o in poliestere (Pale LM Wind Power) o poliuretano o vinilestere, rinforzata da fibre di vetro. In alternativa in questa parte strutturale diversi produttori utilizzano compositi in fibre di carbonio (CFRP) per produrre lame più lunghe, sfruttando così la maggiore rigidità e la minore densità delle fibre di carbonio rispetto a quelle di vetro. Anche il bordo d'uscita e quello d'attacco sono realizzati in composito UD, dal momento che i laminati in queste aree sono esposti a carichi di tensione-compressione legati alla flessione laterale. Sia le reti di taglio (laminato piatto) che i gusci aerodinamici (laminato curvo) sono costituiti da strutture a sandwich multiassiale rinforzate in fibre di vetro (GFRP) con matrice a base di resina epossidica, poliestere, poliuretano o vinilestere, con strati $\pm 45^\circ$ o $0/\pm 45^\circ$ come pelle. I core di detto sandwich possono essere realizzati con materiali diversi, come legno di balsa, cloruro di polivinile (PVC), polietilene (PET), in strutture a nido d'ape o schiume [83]. Inoltre, si utilizzano rivestimenti superficiali, (a oggi prevalentemente a base di smalti poliuretanic), per proteggere la pala da

degradazione ultravioletta e penetrazione dell'acqua, nonché per salvaguardare il bordo d'attacco. Come conseguenza dell'elevata velocità raggiunta sulla punta, infatti, quando il rotore gira, il bordo anteriore delle pale eoliche si erode molto più velocemente del previsto a causa dell'effetto della pioggia, della polvere e delle particelle sospese. In tal senso il settore dell'energia eolica sta attualmente affrontando il problema del degrado e in alcuni casi della frantumazione delle pale eoliche oltre i 50 m, che, secondo alcune stime, sta causando perdite tra 100 e 130 milioni di euro all'anno in tutta la flotta eolica europea.

È importante sottolineare che il legno di balsa, uno dei materiali chiave usati nelle pale (cappucci dei longheroni, core dei sandwich all'interno delle pale), a causa delle sue proprietà uniche come "light-weight material" (elevata rigidità; densità compresa tra 120 e 160 kg/m³), è stato dichiarato a rischio approvvigionamento. Uno dei maggiori fornitori di questo legno è l'Ecuador che fornisce tra il 75% e il 90% della domanda mondiale di legno di balsa [84,85]. Un altro materiale con un rischio di approvvigionamento critico è il poliuretano, utilizzato nella finitura superficiale delle pale. Nel 2020, secondo i dati relativi al mercato globale degli adesivi poliuretanici, circa il 61% delle forniture di poliuretano proveniva dalla Cina/Asia Pacifico, e, a seguire, dagli Stati Uniti, che detenevano il 14% di tale mercato [86]. Per quanto riguarda infine la gestione del fine vita, WindEurope prevede un totale di 350.000 tonnellate di rifiuti di pale provenienti dall'industria onshore entro il 2030. Partendo da 9.000 tonnellate all'anno, si stima che la quantità salirà a 52.000 all'anno entro il 2030. Si prevede che Germania, Spagna e Danimarca saranno i primi paesi che dovranno smantellare un gran numero di turbine e che anche Italia, Francia e Portogallo genereranno una significativa quantità di rifiuti derivanti dalle pale EoL entro il 2030 [87]. Timide esperienze di processi di riciclaggio si vanno affacciando nel mondo industriale. Nel 2022, la società statunitense Carbon Rivers ha commercializzato la sua tecnologia, in grado di riciclare tutti i componenti della pala della turbina eolica, tra cui acciaio, fibra di vetro e fibra di carbonio. Anche i materiali in fibra di vetro sono componenti essenziali delle pale delle turbine eoliche e attualmente i produttori europei dipendono fortemente dalle importazioni. Nel 2021, WindEurope ha chiesto di procedere verso il divieto a livello europeo delle autorizzazioni allo smaltimento in discarica per le pale delle turbine dismesse entro il 2025 e, con il miglioramento delle tecnologie di riciclaggio, il riutilizzo dei materiali delle pale può diventare più diffuso. La società danese Continuum sta pianificando di costruire sei fabbriche di riciclaggio in tutta Europa, con la prima che avrebbe dovuto diventare operativa entro la fine del 2024 e ha iniziato a raccogliere le pale a fine vita entro la fine del 2023.

Oggi, i metodi di riciclo più comuni includono il recupero meccanico, che consiste nel tritare le pale per ottenere materiali secondari utilizzabili in altri settori, come l'edilizia. Tuttavia, questo processo degrada le proprietà dei materiali originali. Tecnologie chimiche e termiche più avanzate, come la pirolisi o la solvolisi, permettono invece di separare le fibre dalle resine, recuperando componenti di qualità superiore ma sono ancora da approfondire.

È chiaro quindi che la ricerca su nuovi materiali per il settore eolico, meglio dettagliata nelle sezioni successive, nel mentre punta ad aumentare le performance dei dispositivi non può prescindere da una progettazione che prevenga la generazione di rifiuti: le pale devono essere progettate per avere una durata di vita prolungata, per facilitare il futuro riciclaggio o per ridurre la quantità di utilizzo del materiale, sempre considerando la necessità, ove possibile, di sostituire i materiali a rischio approvvigionamento. La maggior parte delle sfide descritte per l'eolico on-shore sono anche quelle del settore del minieolico, ove le dimensioni ridotte, le condizioni di esercizio variabili, ed il costo relativamente alto, accentuano ulteriormente la necessità di alleggerire la componentistica e nel contempo prevenire le conseguenze dell'esposizione agli agenti atmosferici.

L'attualità delle attività proposte si evince anche dai diversi progetti europei finanziati in questo ambito. Si citano ad esempio: EOLIAN che fra le altre innovazioni propone l'utilizzo di vitrimeri, polimeri che possono essere riprocessati dopo la polimerizzazione ed il cui utilizzo aprirà la strada a diverse soluzioni di fine utilizzo delle pale eoliche; LEP4BLADES (Innovative Leading Edge Protection System for Wind Turbine Blades) durante il quale si sono sviluppati materiali polimerici con una straordinaria resistenza all'erosione.

La ricerca è allineata con la tematica "fonti rinnovabili" del PNIEC 2023 e con le aree "integrating renewable technologies in the energy systems" e "reducing costs of technologies" del SET-PLAN.

Nel 2023, l'eolico offshore ha raggiunto una capacità mondiale pari a 75,2 GW, grazie all'aggiunta nell'intero anno di ulteriori 10,8 GW. L'Europa occupa una posizione di rilievo nel settore, potendo contare su una capacità totale al 2023 di 34 GW, seconda solo alla Cina che ha raggiunto una potenza installata di 38 GW [88].

Le proiezioni per i prossimi anni stimano una crescita su scala mondiale pari a 138 GW entro il 2028 (GWEC) e il sorpasso di installazioni offshore rispetto a quelle onshore già a partire dal 2030 nell'Unione Europea [88].

Secondo il National Renewable Energy Laboratory negli Stati Uniti l'energia ricavabile potenzialmente dal vento negli impianti offshore è pari a più di 4200 GW (equivalenti a circa 13500 TWh) per anno di generazione [89].

La capacità installata nell'UE è distribuita per lo più nei Mari del Nord e nel Mar Baltico, per via di una maturata esperienza acquisita nel corso degli anni e di condizioni ambientali favorevoli quali elevate ventosità e bassi fondali. Difatti la tecnologia di installazione di parchi eolici offshore, che al momento ha raggiunto piena maturità tecnologica e commerciale, è quella denominata bottom-fixed che può essere implementata solo in fondali con altezze massime comprese tra 50 e 60 metri. Di contro, l'installazione in fondali con profondità maggiore può avvenire solo ricorrendo a piattaforme galleggianti che ospitano gli aerogeneratori (eolico flottante, o galleggiante), che al momento è in fase poco più che embrionale. Le prime installazioni a livello mondiale di questo tipo risalgono difatti al 2015 e nel 2022 la capacità mondiale raggiunta è stata di appena 124 MW. In questa prima fase l'Europa occupa una posizione di leadership, potendo contare su una

potenza installata di 113 MW, quindi oltre il 90% delle installazioni mondiali [88]. In Italia a oggi è installato un solo impianto offshore, denominato Beleolico e realizzato con tecnologia bottom-fixed, a ridosso del porto di Taranto [90]. Si tratta di un parco eolico della capacità complessiva di 30 MW, costituito da 10 aerogeneratori da 3 MW. Il Mar Mediterraneo è caratterizzato da fondali particolarmente profondi già a pochi chilometri dalle coste e ciò rende inevitabile il dover fare ricorso quasi completamente (eccezion fatta per rarissimi casi) alla tecnologia offshore flottante. Si contano ad oggi diversi progetti attualmente in fase di autorizzazione, con localizzazioni distribuite tra le coste occidentali della Sicilia, le coste più meridionali dell'adriatico in Puglia e a sud della Sardegna. Sono difatti queste le aree nazionali caratterizzate da un'elevata produzione ventosa e quindi produttività. Le richieste di connessione alla rete elettrica in Italia per l'eolico offshore pervenute a TERNA alla data 30/11/2024 raggiungono una potenza complessiva di 84,37 GW, di cui 20,5 GW in fase già avanzata e con progetti in valutazione e 2,86 GW (relativi a 7 pratiche) di progetti che hanno già ottenuto il nulla osta alle installazioni [91].

Stante quindi il recentissimo sviluppo e la scarsa diffusione dell'eolico offshore flottante, le relative soluzioni tecnologiche includono poche novità. Di contro, la maggiore esperienza e maturità di impianti offshore bottom fixed consente di individuare con maggiore chiarezza le soluzioni ad oggi adottate per la realizzazione degli aerogeneratori, con particolare riferimento ai dispositivi e componenti, oggetto di studio e ricerca nel WP5: pale eoliche, protezione della strutture metalliche e supercapacitori.

I requisiti richiesti alle pale eoliche per assicurarne la corretta funzionalità sono una elevata rigidità per mantenere prestazioni aerodinamiche ottimali, una bassa densità per ridurre il peso e una lunga durata a fatica (che considerando il tempo di vita medio di 25 anni implica un numero di cicli di carico dell'ordine di 108-109) per ridurre il degrado del materiale. Tali requisiti limitano i potenziali materiali che è possibile utilizzare e rendono il ricorso ai materiali compositi fibrorinforzati la scelta migliore. Come dimostrato anche dagli esempi sopra riportati, la maggior parte delle pale eoliche sono di fatti realizzate impiegando resine epossidiche o poliestere rinforzate con fibre di vetro o di carbonio. In particolare, l'uso di compositi rinforzati con fibra di carbonio è in aumento per via delle loro eccellenti prestazioni meccaniche in relazione al peso. Le fibre di carbonio sono però molto più costose delle fibre di vetro e il giusto compromesso adottato ad oggi è l'affermazione di compositi ibridi ottenuti combinando entrambe le fibre.

La tecnica più diffusa per la produzione delle pale eoliche è ad oggi quella dello stampaggio a trasferimento di resina assistita dal vuoto, nota con l'acronimo inglese VARTM, che consiste nell'utilizzo del vuoto per facilitare il flussaggio della resina in uno stampo in cui è allocata una "stuoia" di fibre. Attorno agli anni 90 è stata parzialmente modificata nel metodo SCRIMP (acronimo di Seeman Composites Resin Infusion Molding Process), che ne migliora l'efficienza nella produzione di grandi componenti. Tale tecnologia consente il raggiungimento di elevate qualità del prodotto finito, anche se risulta essere piuttosto complessa, richiede elevati tempi di lavorazione, elevate quantità di energia per l'esecuzione e, di conseguenza, elevati costi.

Le strutture di sostegno, le torri, i monopiles, le strutture galleggianti, altre parti dell'impianto sono di acciaio o comunque metalliche [92].

Ciò comporta la necessità di "proteggere" questi elementi con rivestimenti protettivi per aumentarne la resistenza a corrosione, il cui grado dipende dalle particolari condizioni ambientali (ambiente marino) in cui si trovano, senza che venga compromessa la loro robustezza. Gli effetti della corrosione possono incidere negativamente sulla resistenza meccanica delle strutture portanti, che sono sottoposte anche alle sollecitazioni meccaniche del moto ondoso ed alla potenza del vento, specialmente in aree dove possono abbattersi dei tornado [93]. Pertanto, l'applicazione di rivestimenti anticorrosivi per le strutture di sostegno aumenta il tempo di vita, migliora l'efficienza del sistema, riduce la necessità di frequente manutenzione e quindi i costi, consentendo una maggiore diffusione di parchi eolici offshore. Rivestimenti anticorrosivi per la protezione dei componenti in metallo degli aerogeneratori da agenti atmosferici ed elevata salinità, tipici di ambienti offshore, sono ad oggi piuttosto diffusi e includono: vernici epossidiche (per lo più impiegate come primer o strati intermedi in applicazioni multistrato), rivestimenti poliuretanici, a base di fluoropolimeri, e strati protettivi a base di zinco, ottenuti per zincatura. Rivestimenti polimerici speciali sono invece impiegati per tubazioni e strutture sommerse. In tal caso, si fa anche uso di antivegetativi al fine di evitare l'accumulo di organismi marini su superfici sommerse. Sono tuttavia presenti ancora alcune criticità relative alla progettazione, applicazione e manutenzione dei sistemi di protezione. I rivestimenti anticorrosivi, anche quelli più avanzati, tendono infatti a deteriorarsi nel tempo a causa di esposizione continua a sale, umidità, vento e raggi UV. Questo può ridurre la loro efficacia prima della fine del ciclo di vita della turbina. Inoltre, le sollecitazioni meccaniche (come vibrazioni e carichi del vento) possono causare microfessurazioni nei rivestimenti, esponendo il metallo sottostante alla corrosione.

Lo sviluppo di supercapacitori altamente efficienti e a basso costo, come dispositivi di accumulo di energia, è stato identificato come uno degli approcci più promettenti per risolvere i problemi di intermittenza e instabilità correlati all'utilizzo di energie pulite rinnovabili. I materiali degli elettrodi, componenti principali nei supercapacitori, richiedono una progettazione ed una messa a punto accurate perché ne determinano direttamente le prestazioni. Sebbene lo studio sui materiali elettrodici sia stato finora approfondito e rivolto a numerose tipologie di materiali e composti, ci sono ancora molte sfide aperte, soprattutto relativamente all'ottimizzazione della composizione chimica e strutturale degli elettrodi finalizzata alla massimizzazione della densità energetica del dispositivo e alla sua durabilità. La strategia che sta prendendo piede è quella di combinare i due meccanismi di energy storage in un unico elettrodo, attraverso la coesistenza della capacità a doppio strato (EDLC) e la pseudocapacità. Esiste un'ampia varietà di materiali idonei all'utilizzo come elettrodi per supercapacitori e tra questi hanno maggiore rilievo i materiali a base di carbonio, i metalli di transizione (MT) e, ancor più, i compositi MT-carbonio. Il meccanismo di accumulo di energia in questi compositi può essere spiegato dall'interazione tra i due tipi di materiali: i materiali a base carbonio, strutturalmente stabili, fungono da supporto per i materiali di matrice metallica, facilitandone la dispersione e l'aumento dell'area superficiale specifica disponibile per l'interazione con gli ioni dell'elettrolita e per le reazioni redox.

Inoltre, a causa della presenza sia di elementi metallici che di carbonio, l'accumulo di carica si verifica grazie alla combinazione tra la capacità a doppio strato, generata dagli ioni adsorbiti, con la pseudocapacità fornita da reazioni redox che si verificano sulla superficie dei composti metallici. Negli ultimi anni, sono stati maggiormente studiati i compositi nichel-carbonio, cobalto-carbonio, manganese-carbonio, rutenio-carbonio, ma i primi hanno maggiori vantaggi rispetto agli altri grazie al basso costo di produzione, eccezionali proprietà meccaniche ed ottime prestazioni elettrochimiche. Occorre però studiare le nanostrutture del carbonio, dei metalli, e delle loro combinazioni, in maniera da individuare quelle più performanti in termini di capacità specifica. Non va trascurato anche che gli altri componenti del supercapacitore, cioè separatore ed elettrolita, possono essere ulteriormente migliorati in termini di porosità e struttura nel primo caso e di conducibilità nel secondo. Infine, ulteriore possibilità di miglioramento nella progettazione e nella realizzazione è legata al contenitore del dispositivo supercapacitore che, oltre a essere adatto a contenere l'intero stack, deve rispondere a requisiti di resistenza meccanica e all'ambiente marino, volendo prevedere l'utilizzo dei SC in sistemi eolici offshore.

Riferimenti bibliografici

- [1] DOE, Quadrennial Technology Review. Additive Manufacturing Roadmap 2016. USA Department of Defense
- [2] Srivatsan, T.S.; Sudarshan, T.S. (Eds.) Additive Manufacturing: Innovations, Advances, and Applications; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2015.
- [3] AA.VV., 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry. Annual Worldwide Progress Report. Wohlers 2018
- [4] L. Columbus, "The state of 3D Printing", Forbes 2019
- [5] fonte: Grand View Research, Inc.
- [6] [Kellens, K.; Baemers, M.; Gutowski, T.G.; Flanagan, W.; Lifset, R.; Dufloy, J.R. Environmental dimensions of additive manufacturing: Mapping application domains and their environmental implications. *J. Ind. Ecol.* 2017, 21, S49–S68.
- [7] Paris, H.; Mokhtarian, H.; Coatanéa, E.; Museau, M.; Ituarte, I.F. Comparative environmental impacts of additive and subtractive manufacturing technologies. *CIRP Ann.-Manuf. Technol.* 2016, 65, 29–32
- [8] Liu, Z.; Jiang, Q.; Li, T.; Dong, S.; Yan, S.; Zhang, H.; Xu, B. Environmental benefits of remanufacturing: A case study of cylinder heads remanufactured through laser cladding. *J. Clean. Prod.* 2016, 133, 1027–1033
- [9] Liu, Z.; Ning, F.; Cong, W.; Jiang, Q.; Li, T.; Zhang, H.; Zhou, Y. Energy Consumption and Saving Analysis for Laser Engineered Net Shaping of Metal Powders. *Energies* 2016, 9, 763 1-12.
- [10] Kellens, K.; Baemers, M.; Gutowski, T.G.; Flanagan, W.; Lifset, R.; Dufloy, J.R. Environmental dimensions of additive manufacturing: Mapping application domains and their environmental implications. *J. Ind. Ecol.* 2017, 21, S49–S68.
- [11] Paris, H.; Mokhtarian, H.; Coatanéa, E.; Museau, M.; Ituarte, I.F. Comparative environmental impacts of additive and subtractive manufacturing technologies. *CIRP Ann.-Manuf. Technol.* 2016, 65, 29–32
- [12] Liu, Z.; Jiang, Q.; Li, T.; Dong, S.; Yan, S.; Zhang, H.; Xu, B. Environmental benefits of remanufacturing: A case study of cylinder heads remanufactured through laser cladding. *J. Clean. Prod.* 2016, 133, 1027–1033
- [13] Liu, Z.; Ning, F.; Cong, W.; Jiang, Q.; Li, T.; Zhang, H.; Zhou, Y. Energy Consumption and Saving Analysis for Laser Engineered Net Shaping of Metal Powders. *Energies* 2016, 9, 763 1-12.
- [14] Attaran, M. The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Bus. Horiz.* 2017, 60, 677–688.
- [15] Li, L.; Tirado, A.; Nlebedim, I.C.; Rios, O.; Post, B.; Kunc, V.; Lograsso, T.A. Big area additive manufacturing of high performance bonded NdFeB magnets. *Sci. Rep.* 2016, 6, 36212 1-7.
- [16] Wang, Y.; Chen, X.; Konovalov, S.V. Additive Manufacturing Based on Welding Arc: A low-Cost Method. *J. Synchron. Investig.* 2017, 11, 1317–1328
- [17] Frazier, W.E. Metal Additive Manufacturing: A Review. *J. Mater. Eng. Perform.* 2014, 23, 1917–1928.
- [18] Ford, S.; Despeisse, M. Additive manufacturing and sustainability: An exploratory study of the advantages and challenges. *J. Clean. Prod.* 2016, 137, 1573–1587.
- [19] Huang, R.; Riddle, M.; Graziano, D.; Warren, J.; Das, S.; Nimbalkar, S.; Cresko, J.; Masanet, E. Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: The case of lightweight aircraft components. *J. Clean. Prod.* 2016, 135, 1559–1570.
- [20] Wang J.C.; Dommati H.; Hsieh S.J. Review of additive manufacturing methods for high-performance ceramic materials. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* (2019) 103:2627–2647.
- [21] Simons, M. Additive manufacturing—a revolution in progress? Insights from a multiple case study. *Int J Adv Manuf Technol* 96, 735–749 (2018)
- [22] Yoon, H., Lee, J., Kim, H. et al. A comparison of energy consumption in bulk forming, subtractive, and additive processes: Review and case study. *Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech.* 1, 261–279 (2014)
- [23] <https://www.desktopmetal.com/products/production>
- [24] <https://univdatos.com/it/report/heat-exchanger-market-2/>
- [25] <https://www.marketresearchintellect.com/it/blog/absorption-chiller-market-set-to-thrive-amid-growing-demand-for-energy-efficient-solutions/>

- [26] D. Mirabile Gattia, L. Pilloni, G. Corallo, "Lega metallica per additive manufacturing per applicazioni nel campo dello scambio termico: realizzazione campioni e testing (LA 3.6), Report RdS/PTR2021/227
- [27] D. Mirabile Gattia, L. Pilloni, G. Corallo, "Alloy Design for AM: A Ferritic Alloy for Applications in Corrosive Alkaline Environment" *Key Engineering Materials*, Vol. 964, pp 163-167, doi:10.4028/p-NQPrd8
- [28] Yi-Gao Lv, Yao-Ting Wang, Tong Meng, Qiu-Wang Wang, Wen-Xiao Chu, Review on thermal management technologies for electronics in spacecraft environment, *Energy Storage and Saving*, Volume 3, Issue 3, 2024, Pages 153-189, <https://doi.org/10.1016/j.enss.2024.03.001>
- [29] Szymanski, P.; Mikielawicz, D.; Fooladpanjeh, S. Current Trends in Wick Structure Construction in Loop Heat Pipes Applications: A Review. *Materials* 2022, 15, 5765. <https://doi.org/10.3390/ma15165765>
- [30] B. Richard, W. G. Anderson and J. Crawmer, "Development of a 3D Printed Loop Heat Pipe," 2019 35th Semiconductor Thermal Measurement, Modeling and Management Symposium (SEMI-THERM), San Jose, CA, USA, 2019, pp. 58-60
- [31] [Samokhin, Andrey; Alekseev, N. ; Sinayskiy, Mikhail ; Astashov, Aleksey ; Kirpichev, D. ; Fadeev, A. ; Tsvetkov, Yurii ; Kolesnikov, Andrei. (2018). Nanopowders Production and Micron-Sized Powders Spheroidization in DC Plasma Reactors. 10.5772/intechopen.76262.
- [32] Samokhin, A.V., Fadeev, A.A., Sinayskiy, M.A. et al. Fabrication of high-alloy powders consisting of spherical particles from ultradispersed components. *Russ. Metall.* 2017, 547–553 (2017). <https://doi.org/10.1134/S0036029517070138>
- [33] H. Itagaki et al 2020 Spherical particles with and without attached nanoparticles formed by DC-arc spheroidization of irregularly shaped stainless-steel powder *Jpn. J. Appl. Phys.* 59 SJJG01;
- [34] Iovane, P., Borriello, C., Portofino, S. et al. Thermal Plasma Synthesis of Zirconia Powder and Preparation of Premixed Ca-Doped Zirconia. *Plasma Chem Plasma Process* 39, 1397–1411 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11090-019-10011-y>
- [35] Iovane, P., Borriello, C., Pandolfi, G. et al. Thermal plasma spheroidization and characterization of stainless steel powders using direct current plasma technology. *Plasma* 7,76-90 (2024)].
- [36] E.E. Benson, C.P. Kubiak, A.J. Sathrum et al. Electrocatalytic and homogeneous approaches to conversion of CO₂ to liquid fuels. *Chem. Soc. Rev.* 2009, 38, 89–99. <https://doi.org/10.1039/B804323J>
- [37] I.O. Ekemezie, W.N. Ditemie. (2024). Carbon Capture And Utilization (Ccu): A Review Of Emerging Applications And Challenges. *Eng. Sci. Technol* 2024., 5, 949-961. <https://doi.org/10.51594/estj.v5i3.949>
- [38] Q. Lu, F. Jiao. Electrochemical CO₂ reduction: Electrocatalyst, reaction mechanism, and process engineering. *Nano Energy* 2016, 29, 439–456. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.04.009>
- [39] J. Wicks, M.L. Jue, V.A. Beck et al. (2021). 3D-Printable Fluoropolymer Gas Diffusion Layers for CO₂ Electroreduction. *Adv. Mater.*, 33, 2003855. <https://doi.org/10.1002/adma.202003855>.
- [40] J. Li, G. Chen, Y. Zhu et al. (2018). Efficient electrocatalytic CO₂ reduction on a three-phase interface. *Nat. Catal.*, 1, 592–600. <https://doi.org/10.1038/s41929-018-0108-3>.
- [41] https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_it
- [42] Schuster A, Karellas S, Kakaras E, Spliethoff H. Energetic and economic investigation of Organic Rankine Cycle applications. *Appl Therm Eng* 2009;29(8):1809-17.
- [43] Leal-Chavez, D.; Beltran-Chacon, R.; Cardenas-Terrazas, P.; Islas, S.; Velázquez, N., Design and Analysis of the Domestic Micro-Cogeneration Potential for an ORC System Adapted to a Solar Domestic Hot Water, *Entropy* 2019, 21(9), 911
- [44] Do-Yeop Kim a, You-Taek Kim, Preliminary design and performance analysis of a radial inflow turbine for organic Rankine cycles, *Applied Thermal Engineering* Volume 120, 25 June 2017, Pages 549-559
- [45] André-Charles Mintsa Do Ango, Gaël Levêque, Norman Holaind, Gabriel Henry, Arthur Leroux, Low temperature and power solar energy conversion for domestic use, *Energy Procedia*, Volume 161, 2019, Pages 454-463, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.072>.
- [46] <https://echa.europa.eu/it/substance-information/-/substanceinfo/100.103.448>
- [47] Relazione 356/2021/I/EEL - Monitoraggio dello sviluppo degli impianti di generazione distribuita per l'anno 2019, Arera;
- [48] Relazione 237/2024/I/EEL Monitoraggio dello sviluppo degli impianti di generazione distribuita per l'anno 2021, Arera
- [49] Microturbine Market Size, Share, Global Industry Report 2032, *Fortune Business Insights*, 2024, <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/microturbine-market-100514>
- [50] G. Xiao, T. Yang, H. Liu, D. Ni, M.L. Ferrari, M. Li, Z. Luo, K. Cen, M. Ni, Recuperators for micro gas turbines: A review, *Appl. Energy*, 2017, 197, 83 (<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.095>)
- [51] A. Sommers, Q. Wang, X. Han, C. T'Joen, Y. Park, A. Jacobi Ceramics and ceramic matrix composites for heat exchangers in advanced thermal systems - A review, *App. Therm. Eng.*, 2010, 30, 1277 (<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.02.018>)
- [52] A.H.S. Weerakoon, M. Assadi Trends and advances in micro gas turbine technology for sustainable energy solutions: a detailed review, *Energy Conver. Manag.* X, 2023, 20, Article 100483 (<https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2023.100483>)
- [53] R. He, N. Zhou, K. Zhang, X. Zhang, L. Zhang, W. Wang, D. Fang, Progress and challenges towards additive manufacturing of SiC ceramic, *J Adv Ceram*, 2021, 10, 637 (<https://doi.org/10.1007/s40145-021-0484-z>)
- [54] M. Pelanconi, M. Barbato, S. Zavattoni, G.L. Vignoles, A. Ortona, Thermal design, optimization and additive manufacturing of ceramic regular structures to maximize the radiative heat transfer, *Mater. Des.*, 2019, 163, 107539

(<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.107539>)

- [55] Pelanconi M, Zavattoni S, Cornolti L, Puragliesi R, Arrivabeni E, Ferrari L, Gianella S, Barbato M, Ortona A. Application of ceramic lattice structures to design compact, high temperature heat exchangers: material and architecture selection, *Materials*, 2021, 14 (12), 3225 (<https://dx.doi.org/10.3390/ma14123225>)
- [56] T. Fukudome, S. Tsuruzono, T. Tatsumi, Y. Ichikawa, T. Hisamatsu, I. Yuri, Development of silicon nitride components for gas turbine, *Key Eng. Mat.*, 2005, 287, 10
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.287.10>
- [57] S. Mahmoudinezhad, M. Sadi, H. Ghiasirad, A. Arabkoohsar, A comprehensive review on the current technologies and recent developments in high-temperature heat exchangers, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2023, 183, Article 113467
(<https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113467>)
- [58] Gang Xiao, Tianfeng Yang, Huanlei Liu, Dong Ni, Mario Luigi Ferrari, Mingchun Li, Zhongyang Luo, Kefa Cen, Mingjiang Ni, Recuperators for micro gas turbines: A review, *Appl. Energy*, 2017, 197, 83 (<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.095>)
- [59] T. Moritz, S. Maleksaedi, Additive manufacturing of ceramic components. *Addit. Manuf.*, 2018, 105
(<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-812155-9.00004-9>)
- [60] C.L. Cramer, E.L. Curzio, A.M. Elliott, T.G. Aguirre, Bola Yoon, B.A. Fricke, V. Rao, P. Jain, K. Nawaz, Material selection and manufacturing for high-temperature heat exchangers: Review of state-of-the-art development, opportunities, and challenges, *Int. J. Ceramic. Eng. Sci.*, 2024, 6 (5), 10230 (<https://doi.org/10.1002/ces2.10230>)
- [61] Y. Lakhdar, C. Tuck, J. Binner, A. Terry, R. Goodridge, Additive manufacturing of advanced ceramic materials, *Prog. Mater. Sci.*, 2021, 116, 100736;
(<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100736>)
- [62] C.L. Cramer, E. Ionescu, M. Graczyk-Zajac, A. T. Nelson, Y. Katoh, J.J. Haslam, L. Wondraczek, T.G. Aguirre, S. LeBlanc, H. Wang, M. Masoudi, E. Tegeler, R. Riedel, P. Colombo, M. Minary-Jolandan, Additive manufacturing of ceramic materials for energy applications: road map and opportunities, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2022, 42, 3049 (<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2022.01.058>)
- [63] J. Li, Y. Li, Review: Micro gas turbine: Developments, applications, and key technologies on components, *Propuls. Power Res.*, 2023, 12, 1 (<https://doi.org/10.1016/j.jprr.2023.01.002>);
- [64] H. Sheykhpoor, H.G. Darabkhani, A.W. Awan, Improving efficiency of micro gas turbine systems by integration of combustor and recuperator using additive manufacturing techniques, *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, 2023, 127, 23
(<https://doi.org/10.1007/s00170-023-11396-z>)
- [65] Bowen Lu, Yu Fan, Xinyu Zhi, Ziqiang Han, Fan Wu, Xiaoshan Li, Cong Luo, Liqi Zhang Material design and prospect of dual-functional materials for integrated carbon dioxide capture and conversion, *Carbon Capture Science e Technology*, 2024(12), 100207
- [66] Hongman Sun, Shuzhuang Sun, Tong Liu, Jingbin Zeng, Youhe Wang, Zifeng Yan, and Chunfei Wu, Integrated CO₂ Capture and Utilization: Selection, Matching, and Interactions between Adsorption and Catalytic Sites, *ACS Catal.* 2024 (14), 15572–15589
- [67] Phuoc Hoang Ho, Giancosimo Sanghez de Luna, Nicola Schiaroli, Alejandro Natoli, Francesca Ospitali, Martina Battisti, Francesco di Renzo, Carlo Lucarelli, Angelo Vaccari, Giuseppe Fornasari, and Patricia Benito, Effect of Fe and La on the Performance of NiMgAl HT-Derived Catalysts in the Methanation of CO₂ and Biogas, *Ind. Eng. Chem. Res.* 2022 (61), 10511–10521
- [68] A. Bermejo-López, B. Pereda-Ayo, J.A. González-Marcos, J.R. González-Velasco, Ni loading effects on dual function materials for capture and in-situ conversion of CO₂ to CH₄ using CaO or Na₂CO₃, *Journal of CO₂ Utilization*, 2019 (34), 576–587
- [69] Yunlei Zhao, Youyou Li, Bo Jin, Zhiwu Liang, Layered double hydroxide derived bifunctional Ca-Fe-Mg material for integrated CO₂ capture and utilization via chemical looping strategy, *Chem. Eng. J.* 2022(431), 133826
- [70] L. Santamaría, S.A. Korili, A. Gil, Layered double hydroxides for CO₂ adsorption at moderate temperatures: Synthesis and amelioration strategies, *Chem. Eng. J.* 2023 (455) 140551
- [71] Masatoshi Sakai, Haruo Imagawa, Naoki Baba, Layered-double-hydroxide-based Ni catalyst for CO₂ capture and methanation, *Applied Catalysis A: General*, 2022(647), 118904
- [72] Xingbo Wang, Deng Hu, Yingdong Hao, Lina Zhang, Nannan Sun, Wei Wei, Continuous CO₂ abatement via integrated carbon capture and conversion over Ni-MgO-Al₂O₃ dual-functional materials, *Separation and Purification Technology*, 2023 (322), 124295
- [73] Liuqingqing Yang, Jake Heinlein, Cheng Hua, Ruixia Gao, Shu Hu, Lisa Pfefferle, Yulian He Emerging Dual-Functional 2D transition metal oxides for carbon capture and Utilization: A review, *Fuel*, 2022(324), 124706
- [74] Yu Sun, Qiao Wang, Zhibin Geng, Zhongyuan Liu, Rusen Yang, Fabrication of two-dimensional 3d transition metal oxides through template assisted cations hydrolysis method, *Chem. Eng. J.* 2021(415), 129044
- [75] H. Yang et al. *Nature Communications* 2024, 15, 3868
- [76] F. Varsano et al. Brevetto IT201900018452
- [77] C. Scarfiello et al. *Int J Hydrogen Energy*. 2021, 46 134
- [78] V. Poletto Dotsenko et al. *Catalysis Today*, 2023,418,114049
- [79] S. Lawson et al. *Chem. Rev.* 2021, 121, 6246–6291
- [80] K. Wei et al. *Nature Communications* 2020, 11,4098

- [81] <https://etipwind.eu/publications/>
- [82] Telsnig, T., Georgakaki, A., Letout, S., Kuokkanen, A., Mountraki, A., Ince, E., Shtjefni, D., Joanny Ordonez, G., Eulaerts, O. and Grabowska, M., Clean Energy Technology Observatory: Wind Energy in the European Union – 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022, doi:10.2760/855840, JRC130582
- [83] Francesca Spini, Paolo Bettini, End-of-Life wind turbine blades: Review on recycling strategies, Composites Part B: Engineering, Volume 275, 2024, 111290, ISSN 1359-8368, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111290>
- [84] BNEF Checking the Pulse of Wind Turbine Factories - April 2020;
- [85] The Economist: The wind-power boom set off a scramble for balsa wood in Ecuador., <https://www.economist.com/the-americas/2021/01/30/the-wind-power-boom-set-off-a-scramble-for-balsa-wood-in-Ecuador>
- [86] Statista: Polyurethane adhesives market size worldwide in 2020, by region. Accessed: 06/13/2022. URL: <https://www.statista.com/statistics/1304846/global-polyurethane-adhesives-market-size-by-region/>
- [87] Accelerating Wind Turbine Blade Circularity, Wind Europe, Cefic, Eucia, May 2020
- [88] Wind Energy in Europe - 2023 Statistics and the outlook for 2024-2030, WindEurope. Global Wind Report 2024, GWEC
- [89] Lopez, Anthony et al. "Offshore Wind Energy Technical Potential for the Contiguous United States" (2022)
- [90] <https://renexia.it/beleolico/>
- [91] <https://www.terna.it/it/sistema-elettrico/programmazione-territoriale-efficiente/econnexion>
- [92] Cooperman, Aubryn et al. "Renewable Energy Materials Properties Database: Summary", 2023
- [93] Veers et al., "Grand challenges in the science of wind energy", Science 366, 443 (2019)

b) Attività svolte nel triennio precedente

Nel PTR precedente sono state effettuate alcune prove di prototipazione di scambiatori di calore in materiale polimerico per la successiva realizzazione in materiale metallico. Sono iniziati i primi studi e le prime prove di stampa di materiali compositi a conducibilità termica implementata e sono state progettate e realizzate delle leghe ferritiche per applicazione nello scambio termico in ambiente corrosivo alcalino.

E' stato utilizzato un sistema prototipo basato sul plasma termico DC per la produzione di polveri sferoidali utilizzando allumina e SS316L come materiali dimostrativi del miglioramento della tecnologia per realizzare applicazioni di interesse. È stata sperimentata l'applicazione della tecnica MMEX per la realizzazione di supporti metallici per elettrodi per elettrolisi. I risultati raggiunti e le conoscenze acquisite costituiscono le basi per lo sviluppo proposto nel nuovo PTR 2025-2027.

Le attività svolte nel triennio precedente presso NanoMates-DF di UNISA si sono focalizzate sull'implementazione dell'Additive Manufacturing per la formulazione di componenti per processi elettrochimici. In particolare, sono stati progettati e prodotti tramite AM componenti per celle elettrochimiche, come elettrodi, e celle elettrochimiche in flusso di elettrolita, per l'elettro-produzione, tramite nuovi nanocatalizzatori, di un combustibile gassoso, ovvero idrogeno, a partire da acqua di mare e di biocarburanti liquidi, in particolare biodiesel, a partire da metanolo e da oli esausti.

Per i componenti e i materiali per il settore della produzione di energia sono state effettuate delle prove di stampa di turbine per impianti ORC di potenza inferiore a 10kWe. Le prove effettuate hanno evidenziato alcune criticità, in particolare in termini geometrici e di finitura superficiale. A partire da questi risultati si ritiene quindi opportuno sviluppare delle turbine con limitati difetti geometrici, con ridotte deformazioni e con una ridotta rugosità, anche attraverso l'effettuazione di trattamenti opportuni post-stampa.

In due precedenti progetti di tipo PTR, sono state affrontate diverse tematiche direttamente riconducibili ad aspetti del presente progetto. Nel PTR 2019-2021 sono stati affrontati gli aspetti inerenti la progettazione delle turbine Pelton con particolare riguardo agli step di pre-processing per la fabbricazione in Selective Laser Melting. Una sperimentazione è stata volta a determinare i parametri di processo che bilanciassero la finitura superficiale e l'accuratezza delle palette prodotte. Nel PTR 2022-2024 la fabbricazione di palettature Pelton per Pico-sistemi è stata estesa alla Stereolitografia e al Fused Deposition Modeling. In tale progetto sono state rilevate diverse criticità connesse con l'uso di materiali polimerici, fotopolimeri e termoplastici. In particolare si è osservato come i materiali di dette tecnologie soffrissero riduzioni delle prestazioni meccaniche quando impiegati a lungo a contatto con l'acqua pulita. Proprio in questo progetto si è maturata coscienza che occorre progredire verso l'uso più mirato dei microcicli e macrocicli delle tecnologie finora note ottimizzando il risultato finale mediante la congiunta applicazione delle tecniche di finitura quasi sempre necessarie quando si impiegano le tecniche di Additive Manufacturing. Inoltre, le stesse prove hanno evidenziato come anche con l'impiego di acqua pulita si riscontra una vita limitata della girante. E' quindi importante focalizzare le risorse sui materiali rivolti a questo tipo di funzionamento con l'ulteriore aggravante di operare in acque inquinate e recanti detriti causati dal cambiamento climatico o addirittura reflue o chimiche di processo.

Per quanto riguarda l'attuale WP2, nell'ambito del Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 della Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale, progetto 1.3 Materiali di frontiera per usi energetici (WP3 e WP4), è stata sviluppata una pasta ceramica adatta ad essere stampata mediante una tecnica AM (Liquid Deposition Modeling – LDM), che è stata poi utilizzata per la realizzazione di un dimostratore

di gassificatore per impianti di produzione di energia elettrica da biomasse. In particolare, è stato studiato il caso di un gassificatore che può essere inserito in un impianto cogenerativo con microturbina a gas (MTG), basato su di un ciclo a gas rigenerativo che comprende un compressore, una turbina, un recuperatore, un alternatore e una parte elettrica di interfacciamento per la cessione della potenza alla rete elettrica.

In questo contesto, si è collocata la scelta delle MTG come ambito applicativo dei materiali sviluppati nel WP4 del Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024 della Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale, progetto 1.4 Materiali di frontiera per usi energetici, a implementazione dello studio dei componenti dell'impianto cogenerativo preso in esame nel triennio precedente, in accoppiamento con le MTG nella produzione di energia elettrica. Analogamente a quanto fatto in precedenza, infatti, è stata sviluppata una feedstock ceramica, a base di nitrato di silicio, idonea alla stampa mediante la tecnica di AM conosciuta come Digital Light Processing (DLP), e si è verificata la sua stampabilità. Sono stati sviluppati modelli di simulazione per analizzare le prestazioni di una MTG con girante ceramica, confrontandole con quelle ottenibili con una MTG tradizionale in materiale metallico, con l'obiettivo di evidenziare i benefici derivanti dall'utilizzo dei materiali ceramici, in particolare nella resistenza a temperature più elevate. È stato infine sviluppato un piano per il collaudo della MTG in configurazione ceramica, con un sistema di gestione e monitoraggio della prova, prevedendo la realizzazione di un banco prova per misurare le prestazioni del sistema.

Le attività del presente WP2 verranno perseguite a partire dal know-how metodologico maturato nei precedenti PTR, ampliando ulteriormente la verifica della possibilità di incrementare l'efficienza del sistema MTG con nuovi materiali. La realizzazione di recuperatore termico in materiale ceramico avanzato, in grado di accettare in ingresso gli effluenti gassosi ad elevata temperatura, in uscita a loro volta dalla girante ceramica, consentirebbe, infatti, di dimostrare concettualmente la fattibilità di un impianto MTG ad efficienza incrementata.

Relativamente al WP3, nel triennio precedente non sono state svolte attività analoghe sui materiali per ICCU, mentre per quanto riguarda i catalizzatori magnetici sono state sviluppate nanoparticelle di lega NiCo supportate su γ -Al₂O₃ in grado di raggiungere temperature >800°C e attivi in processi di reforming del metano finalizzato alla produzione di gas di sintesi. A tale proposito, sono stati utilizzati batch di 300 granuli di allumina porosa commerciale (supporti per catalizzatori) per sintetizzare materiali con diversa composizione chimica della lega e diverso caricamento delle nanoparticelle magnetiche sul substrato. I materiali sintetizzati sono stati caratterizzati nella loro struttura cristallina mediante misure di diffrazione di raggi X, area specifica superficiale e distribuzione dei pori mediante misure di adsorbimento di azoto a 77K, morfologia e distribuzione delle dimensioni delle nanoparticelle mediante microscopia elettronica. Le proprietà di riscaldamento sono state studiate in atmosfera inerte (azoto o argon) a diversi campi magnetici applicati. Infine, le proprietà funzionali, quali la conversione dei reagenti a diversi campi magnetici applicati e a diverse concentrazioni/flussi in ingresso, sono state studiate all'interno di un banco prova realizzato in casa. La conversione del metano, che allo stato dell'arte [F. Varsano et al. Brevetto IT201900018452] si assestava intorno al 70-75%, grazie alle attività di ricerca svolte ha raggiunto il valore del 95% a parità di campo magnetico applicato (B=23-32mT) e sono state misurate temperature superiori a 850°C. L'utilizzo dei catalizzatori magnetici sintetizzati è stato esteso a processi di bi-reforming, inviando, oltre al metano e all'acqua, anidride carbonica quale reagente in quantità tipica delle miscele di biogas, in un'ottica di migliorata sostenibilità ambientale dei processi di produzione di gas di sintesi. Modificando il rapporto H₂O/CO₂ in ingresso è stato possibile modulare la composizione del gas di sintesi in uscita con rapporto H₂/CO variabile da 1 a 2.

I risultati raggiunti e le conoscenze acquisite costituiscono le basi per lo sviluppo proposto nel nuovo PTR 2025-2027.

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

Le attività sperimentali condotte nel triennio precedente rappresentano un punto di partenza per poter implementare materiali per l'Additive Manufacturing all'interno del WP1. Il progetto prevede infatti lo sviluppo di materiali non presenti attualmente in commercio che possono essere utilizzati in processi additivi, per la realizzazione di componenti di interesse per il settore elettrico. È previsto infatti l'implementazione delle proprietà della lega ferritica, per la realizzazione di scambiatori di calore per macchine ad assorbimento, tramite opportuni trattamenti termo-meccanici con l'intento di modificarne le proprietà microstrutturali. In commercio non è presente una lega ferritica con la stessa composizione di quella oggetto delle attività sperimentali del presente PTR. La lega è stata infatti sviluppata, mediante un approccio di alloy design per un'applicazione specifica, ovvero l'utilizzo in ambienti corrosivi alcalini. Nel presente PTR verranno condotte indagini sul comportamento alla corrosione della lega di campioni in lega ferritica e in lega di titanio, realizzati con processi additivi a letto di polvere, in ambiente analogo a quello di esercizio, ovvero in soluzioni acqua-ammoniaca. Non sono al momento presenti in letteratura studi analoghi negli ambienti riportati. Queste attività sperimentali consentiranno di raggiungere una conoscenza maggiore delle proprietà di componenti stampate, andando ad indagare fenomeni che avvengono a livello microscopico, ma che possono essere alla base del miglioramento del comportamento meccanico di una lega e in condizioni di esercizio. I processi additivi presentano una enorme versatilità nella realizzazione di componenti con geometria complessa. In questo contesto, lo sviluppo di scambiatori di calore di tipo compatto stampati in materiale composito e metallico apre scenari ancora inesplorati. Sono presenti in commercio scambiatori di calore in materiale polimerico, che trovano applicazione soprattutto per il trattamento di liquidi corrosivi o soluzioni saline, in sostituzione a quelli metallici. Tra i vantaggi è possibile considerare una riduzione dei consumi energetici di produzione e la riduzione del peso. Nel progetto verranno sviluppati quindi dei materiali compositi con una conducibilità termica superiore al

materiale di partenza, in genere pari a 0.2 W/mK, che potranno essere utilizzati in processi additivi in particolare di tipo stereolitografia, SLA, Direct Light Processing, DLP e a filamento, FDM. Sono diversi i lavori in letteratura che descrivono l'utilizzo di particelle di diversa natura, metalli, materiali ceramici, fibre, in materiali polimerici, al fine di implementarne la conducibilità termica. I risultati sperimentali pubblicati sono disomogenei e a volte discordanti. Per questo motivo è necessario uno studio sistematico che consideri i diversi parametri, quali contenuto in volume e in peso, viscosità, omogeneità della dispersione, insieme a modifica delle proprietà del polimero di partenza.

I Piani triennali delle Ricerca di Sistema hanno dimostrato la fattibilità di poter produrre polveri metalliche sferiche mediante tecnologia plasmatica DC. Rispetto al triennio precedente si cercherà di allargare lo spettro dei materiali prodotti al plasma termico DC e di effettuare un miglioramento della produttività e selezione/classificazione del prodotto finale. E' previsto, al fine di ottimizzare la sostenibilità ambientale del processo di produzione e ridurre l'uso di nuove risorse, l'utilizzo di precursori, oltre a quelli puri, di prodotti provenienti da fonti povere o di scarto, anche derivanti da processi di produzione interna. Le polveri prodotte troveranno applicazione nello sviluppo di elementi energetici, quali scambiatori o elettrodi e semi-elementi per celle. Poiché la letteratura sulla produzione di elettrodi, e soprattutto di celle in flusso di elettrolita tramite AM, è scarsa o assente, specialmente per quanto riguarda l'uso di materiali ceramici e/o metallici ottenuti tramite tecnologie AM più economiche, gli obiettivi scientifici e tecnologici del progetto mirano a colmare queste lacune. Il progetto permetterà di realizzare un significativo avanzamento rispetto allo stato dell'arte, attraverso la valutazione di materiali di prova prodotti tramite AM per i componenti elettrochimici sopracitati. Inoltre, in riferimento ai nuovi nanocatalizzatori che verranno sintetizzati e testati nei processi elettrochimici selezionati, si prevede di ottenere performance confrontabili o superiori a quelle riportate nello stato dell'arte attuale.

Il gruppo di ricerca POLIMI si concentrerà sullo sviluppo dei parametri per tecnologia di stampa 3D L-PBF con polveri innovative per il settore elettrico le cui caratteristiche richiedono l'utilizzo di macchine L-PBF con caratteristiche peculiari sia in termini di sorgenti sia in termini di distributori in grado di lavorare anche con piccoli quantitativi di polveri. La principale attività riguarderà lo sviluppo di multimateriali, con un focus specifico sui materiali metallici compositi leggeri caratterizzati da proprietà meccaniche migliorate, come resistenza e durezza. Un esempio significativo è rappresentato dai Metal Matrix Composites (MMC) a matrice di titanio, prodotti a partire da polveri premiscelate appositamente progettate, composte da una matrice metallica e un rinforzo ceramico. La ricerca si concentrerà sull'analisi di come le caratteristiche delle polveri di partenza, anche prodotta mediante plasma termico da materiali di riciclo, quali dimensione, distribuzione, forma e composizione chimica, influenzino la qualità finale del componente. In particolare, l'attività prevede la fabbricazione di campioni di prova con metalli e leghe metalliche di interesse per la ricerca sul sistema elettrico da selezionare tra acciaio, leghe di titanio, rame durante le fasi iniziali del lavoro. I campioni prodotti in forme semplici saranno sottoposti a indagini morfologiche, strutturali, chimico-fisiche e meccaniche per valutare l'efficacia e l'efficienza dei parametri di processo. Accanto alle polveri commerciali sarà testata la possibilità di impiegare polveri fabbricate mediante plasma termico da ENEA a partire da materie prime seconde al fine di un ulteriore efficientamento delle risorse e dell'efficienza energetica e quindi costo complessivo energetico di produzione dei componenti. L'attività verrà poi completata con l'investigazione, a livello esplorativo, di processi L-PBF per multi-materiali metallici, a base acciaio inossidabile e rame, grazie alla disponibilità presso POLIMI del sistema AconityMIDI+, recentemente installato, in grado di utilizzare, grazie alla piattaforma multi materiale Aerosint, fino a tre metalli differenti. Entrambe le sotto-attività saranno mirate allo sviluppo del processo per la realizzazione di componenti per il settore elettrico per il miglioramento dell'efficienza complessiva dei processi e dei sistemi, con riduzione del consumo energetico, delle emissioni e dell'impiego di materie prime critiche e strategiche.

Nel WP1 verranno realizzate, mediante processi additivi, turbine per impianti di produzione di energia di tipo Organic Rankine Cycle, ORC, e mini e pico-elettrico. Sono diverse le criticità riscontrate nel triennio precedente. Durante i processi di stampa a letto di polvere, sia con sorgente laser che a elettroni, è possibile infatti riscontrare alcuni problemi di tipo dimensionale e, in alcuni casi, la deformazione dei componenti. Il progetto della turbina verrà ulteriormente migliorato anche per adattarla a un banco prova per prove prossime a quelle di esercizio. Verranno condotte prove sperimentali per lo studio del comportamento termo-fluidodinamico di componenti stampate, partendo da campioni di prova opportuni.

Tra gli obiettivi del WP1 è previsto uno studio mirato all'efficientamento e alla durabilità di turbine prodotte con sistemi integrati. Per la prima volta le scelte tecnologiche saranno completamente demandate ad una produzione di massa personalizzabile attraverso modelli tecnologici che conducono alla migliore combinazione delle tecnologie da impiegare e degli specifici parametri di processo da settare. Non in ultimo la combinazione ottima sarà determinata su materiali scelti e/o sviluppati con il proposito di aumentare le prestazioni di affidabilità e durabilità tenendo sotto controllo sempre l'aspetto economico. Il tessuto organizzativo precedente sarà caratterizzato dalla massima flessibilità essendo l'input del sistema doverosamente rispondente al variare delle condizioni operative, della collocazione, del tipo di acque, e dello spettro di richiesta energetica. I risultati ottenuti nei precedenti PTR avranno un'adeguata collocazione e un pieno utilizzo in questo PTR poiché si potranno vedere i benefici di una progettazione integrata tra le varie tecnologie e una customizzazione esaltata da un appropriato impiego delle tecnologie di Additive Manufacturing combinate con le tecniche di finitura secondaria.

Il WP2 intende studiare l'utilizzo di processi additivi per la realizzazione di componenti in materiale ceramico per MTG. L'incremento della temperatura di esercizio di una MTG, come già accennato in precedenza, permette l'incremento dell'efficienza della turbina stessa, comportando tuttavia condizioni di esercizio più severe per i materiali coinvolti nella fabbricazione dei vari componenti. L'utilizzo dei materiali ceramici per la realizzazione della girante della turbina, come dimostrato nel corso delle attività del WP4 del precedente PTR 2022-24, ha certamente un effetto sull'incremento della temperatura di esercizio della turbina stessa. Tuttavia, questo incremento potrebbe essere molto limitato, se non seguito da un corrispondente aumento della temperatura di esercizio e della capacità di trasmissione del calore da parte del recuperatore di calore, componente presente immediatamente a valle della turbina, e che si intende implementare all'interno di questo nuovo progetto. Senza l'incremento delle temperature di esercizio sul recuperatore, infatti, l'effetto che si otterrebbe nel funzionamento della MTG potrebbe essere semplicemente un incremento della temperatura dei gas di scarico. Tale effetto sarebbe certamente utile ai fini di un utilizzo di tale calore in sistemi cogenerativi, ma senza alcun impatto sul costo del kWh prodotto. Per avere un effetto sul kWh prodotto occorre, invece, che il maggior contenuto energetico dei gas in uscita dalla turbina sia trasferito all'aria in ingresso alla camera di combustione, limitando in questo modo l'utilizzo di carburante, ma richiedendo un incremento delle temperature di esercizio sul recuperatore, ottenibile grazie all'utilizzo di materiali ceramici. D'altra parte, l'aumento dell'efficacia dello scambio termico sul recuperatore permette un miglioramento dell'efficienza della MTG anche indipendentemente dall'impiego combinato di materiali ceramici sulla girante della turbina. Un incremento di efficacia dello scambio termico, infatti, permette di incrementare la temperatura dell'aria in ingresso alla camera di combustione anche a pari temperatura di uscita dalla turbina dei gas combusti. Per questo motivo lo studio di geometrie innovative, in grado di migliorare lo scambio termico sul recuperatore, permette di ottenere un vantaggio di efficienza della MTG indipendentemente da altre azioni. Di particolare importanza nel progetto è quindi la capacità dell'AM di poter realizzare in materiale ceramico geometrie estremamente articolate e complesse, come ad esempio quelle girodali, derivanti da strutture TPMS (Triply Periodic Minimal Surfaces). Tali strutture, realizzabili unicamente mediante tecniche di AM, permettono una scelta molto più libera della geometria del recuperatore, così da massimizzare la superficie di scambio ed ottimizzare in questo modo l'efficienza dello scambiatore.

Uno degli obiettivi che si prefigge il WP3 è lo studio e sviluppo di materiali innovativi per processi integrati di cattura e utilizzazione della CO₂ (CCU). L'attenzione verrà posta su due tipologie di materiali: layered double oxides (LDOs) e ossidi di metalli di transizione 2D (2D TMOs).

I criteri preferenziali per la progettazione e la preparazione di tali materiali saranno il basso costo e l'uso di materiali non tossici e facilmente reperibili. Inoltre, i processi di preparazione dovranno essere altamente scalabili a livello industriale e permettere un buon controllo composizionale del prodotto finito. Saranno effettuate anche prove di deposizione e crescita utilizzando template a base di nanostrutture di carbonio.

Considerati gli aspetti sopra menzionati, le attività proposte nell'ambito del WP3 sui materiali per al CCU rappresentano un aspetto di novità rispetto all'attuale stato dell'arte sia per quanto riguarda le classi di materiali che si vogliono considerare sia per quanto riguarda il tipo di precursori da utilizzare. Infatti, va detto che i catalizzatori comunemente utilizzati oggi sono a base di metalli preziosi ovvero i precursori impiegati nei processi di preparazione di metalli alternativi sono tossici e/o cancerogeni. Inoltre, nelle attività di questo WP riguardanti la CCU, si andranno ad individuare dei materiali alternativi compatibili sia per l'uomo che per l'ambiente, senza andare a discapito delle performance.

Per quanto riguarda i catalizzatori magnetici, il riscaldamento diretto del catalizzatore tramite induzione magnetica accoppiato alla possibilità di utilizzare l'additive manufacturing nella realizzazione di supporti offre nuove promettenti prospettive per l'intensificazione dei processi chimici. L'additive manufacturing è particolarmente prezioso nello sviluppo di supporti per catalizzatori con geometria complessa, dove la realizzazione di geometrie convolute (porose e/o reticolari) genera una maggiore area superficiale, favorisce una distribuzione uniforme dei flussi di gas che eviti canali preferenziali (dove il gas bypassa porzioni del letto catalitico) ed una migliore interazione solido/gas. I progressi attesi rispetto ai materiali precedentemente sviluppati, sono una migliore attività catalitica intesa come quantità di reagenti convertiti nell'unità di tempo, cosa che rende il processo di produzione più efficiente.

Al meglio delle nostre conoscenze, i materiali compositi proposti nel WP4 risultano innovativi a tre livelli: i) struttura di rinforzo, ii) matrice iii) coating, iv) possibilità di utilizzo nel fine vita

Le prime saranno infatti realizzate con tessuti a base di fibre naturali vegetali e fibre di carbonio da riciclo, che consentiranno di alleggerire la struttura della pala rispetto alle fibre di vetro attualmente impiegate, migliorare la lavorabilità del composito grazie ad un comportamento più elastico, il tutto senza impattare eccessivamente sul costo. Al meglio delle nostre conoscenze l'attenzione sulle potenzialità di queste tipologie di architetture tessili è elevata, ma sono necessarie ricerche che consentano di superarne le difficoltà tecnologiche di applicazione.

Grazie alla collaborazione ed interazione con il referente del cobeneficiario, Prof. Antonio Greco dell'Università del Salento, si investigheranno matrici di frontiera per il settore eolico.

L'uso dei vitrimeri, infatti, apre la strada a soluzioni che facilitino le tecnologie di riparazione delle pale, in funzione naturalmente dell'entità e tipologia del difetto. Concettualmente i compositi a base vitrimerica ottenuti potrebbero essere riprocessati mediante riscaldamento dopo la polimerizzazione. Ciò consentirebbe di sviluppare tecniche di saldatura permesse dalla diffusione molecolare del

polimero a temperature superiori alla propria temperatura di transizione vetrosa. Il riscaldamento potrebbe essere effettuato in diversi modi, per contatto diretto, attraverso sollecitazioni meccaniche (ultrasuoni) o attraverso irraggiamento laser.

Se invece si pensasse a soluzioni di fine utilizzo delle pale eoliche, le proprietà del materiale dovrebbero consentire il riutilizzo del componente senza separazione delle fasi, mediante riscaldamento e semplice rimodellamento (termoformatura). Un'altra possibile strada è quella del riutilizzo dei compositi a base di vitrimeri nei processi di stampa. Alcuni studi hanno esplorato la possibilità di utilizzare vitrimeri a base di resine epossidiche o polietilene nella stampa 3D, prevalentemente attraverso tecniche come la stereolitografia (SLA) o la stampa a getto di materiale. Queste tecniche sfruttano le proprietà dei vitrimeri in forma liquida o pastosa, polimerizzandoli successivamente per ottenere le caratteristiche desiderate. Sono presenti attualmente in letteratura pochi esempi di vitrimeri utilizzati mediante tecniche di stampa 3D a filamento fuso, per cui saranno effettuati studi preliminari in questa direzione.

Infine, per quanto riguarda la finitura superficiale delle pale, i produttori sono soliti applicare una resina chiamata "gelcoat", a base fondamentalmente poliuretanica. Attualmente, questa operazione viene eseguita in un sistema di stampo aperto che rilascia sostanze chimiche potenzialmente nocive nell'aria o nei luoghi di lavoro. Inoltre, come riportato nelle sezioni precedenti, il poliuretano è fra i materiali a rischio di approvvigionamento. Nell'ambito di questo WP, ci si propone di attivare via plasma le superfici dei compositi, per migliorare l'adesione di gel coat tradizionali e/o coating inorganici.

Inoltre, contemporaneamente allo sviluppo di nuovi materiali bisogna tener presente anche che il riciclo dei materiali compositi che attualmente costituiscono le pale eoliche è una delle sfide più importanti per la sostenibilità del settore eolico. Le pale, generalmente realizzate con fibre di vetro o carbonio in combinazione con resine polimeriche, sono estremamente resistenti, ma la loro natura composita rende complesso il recupero dei materiali a fine vita. A partire da esperienze pregresse sul recupero e riciclo di materiali compositi a base di fibre di carbonio, saranno analizzate possibili soluzioni di recupero e riutilizzo anche dei materiali attualmente in uso per il settore eolico.

Le attività costituenti il WP5 consentiranno il conseguimento di progressi tecnologici, economici e ambientali per ognuno dei dispositivi investigati (pale eoliche, protezione dei componenti metallici e supercapacitori).

Lo sviluppo di biopolimeri rinforzati con fibre di origine naturale (basalto, legno, ginestra, canapolo, ecc.) o artificiale (ottenute da pale eoliche riprocciate a fine vita) faciliterà la progettazione di pale eoliche maggiormente eco-friendly e quindi a minor spreco di materie prime, unitamente a maggiore possibilità di riciclo a fine vita, salvaguardando le resistenze da garantire rispetto alle sollecitazioni meccaniche in gioco negli ambienti offshore. Nello specifico, compositi a base di biopolimeri e fibre naturali o derivanti da prodotti a fine vita saranno ottimizzati per l'estrusione con la finalità di ottenere filamenti da impiegare in processi di manifattura additiva (AM) mediante stampa 3D basata sulla tecnologia del Fused Deposition Modeling. I filamenti saranno inoltre additivati con microcapsule autoriparanti, che consentiranno la riparazione di crepe e difetti che eventualmente possono avere origine a causa dei carichi meccanici ai quali la pala è sottoposta durante l'esercizio. L'impiego di processi di AM consentirebbe di risolvere le criticità tipiche del tradizionale processo di SCRIMP, ossia la complessità di esecuzione, i lunghi tempi di lavorazione e le elevate quantità di energia richieste per la realizzazione.

Il miglioramento in termini di protezione dei componenti in metallo dal fenomeno di corrosione, particolarmente accentuato dall'ambiente fortemente salino nelle applicazioni offshore, avverrà attraverso lo sviluppo di nuove formulazioni di vernici o pitture a partire da quelle commerciali. Nello specifico, l'individuazione e impiego di opportune nano cariche di natura inorganica con cui arricchire le vernici organiche comunemente utilizzate consentiranno di muovere passi in avanti per quanto concerne la durata del rivestimento sia in termini di resistenza a fattori ambientali (esposizione a raggi UV e ad ambienti fortemente salini) che in termini di resistenza meccanica (resistenza alla formazione di microfessurazioni dovute alle vibrazioni e oscillazioni causate dal vento). L'impiego di soluzioni anche di origine bio, che comprendono composti inorganici ricavabili da residui vegetali o naturali, consentirebbe un ulteriore beneficio dal punto di vista della riduzione dell'impatto ambientale.

Per quanto riguarda i supercapacitori, la proposta mira ad individuare i composti a base carbonio, anche in combinazione con metalli di transizione o con altri materiali come i polimeri conduttori, che siano in grado di formare elettrodi maggiormente performanti rispetto allo stato dell'arte. Saranno studiati anche elettrolita e separatore, oltre che le possibili configurazioni del dispositivo, valutando l'opportunità di utilizzare una configurazione ibrida, in cui sono combinati i due differenti meccanismi di accumulo di carica. In questo modo si cercherà di ampliare la finestra di potenziale su cui opera il supercapacitore e nello stesso tempo aumentarne la capacità specifica.

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

Per il WP1 è possibile citare alcuni progetti nell'ambito dello sviluppo di materiali per l'Additive Manufacturing e nella realizzazione di componenti:

- il progetto SIRENA, condotto in collaborazione con l'azienda MBDA Italia sulla preparazione di coating per radome a partire da particelle processate per AM;
- il progetto di ricerca F.E.R.G.E: dispositivi, tecniche e tecnologie abilitanti per le Fonti Energetiche Rinnovabili verso la Green Economy (Distretto ad Alta Tecnologia Smart Power System), che ha riguardato la preparazione di nuovi nanomateriali per la ricerca di sistemi di accumulo di energia basati su supercondensatori.

- Da citare è inoltre la collaborazione con il gruppo SSPT-TIMAS-CMS per la realizzazione di elettrodi innovativi stabili e dalle elevate densità di energia e potenza, di sensori, di strutture gerarchiche di tipo core-layers-sheath per nano-heterojunctions, etc.

- MICS, Made in Italy Sostenibile e Circolare, Spoke 6: La manifattura additiva come fattore dirompente della Twin Transition, linea di ricerca 6.09: MATT-Multimaterial Additive Technology and Tools, 2023-2025,

Partenariato: Politecnico di Milano, Politecnico di Bari, CNR, Camozzi, Leonardo, Prima Additive.

Il progetto esplora soluzioni innovative per la produzione additiva multimateriale e multi-tecnologica, che consente nuovi gradi di libertà nella progettazione dei prodotti. La produzione additiva multimateriale consente inoltre di ridurre il numero di componenti, evitando eventualmente operazioni successive di assemblaggio.

- Titanium 4 AM- Development of new metallic alloys for additive manufacturing, ESA ITT AO/1-10435/20/NL/AR, 2021-2025

Partenariato: CRM Group, UCLouvain, SABCA, Any-Shape, Rina e Politecnico di Milano.

Titanium 4 AM vuole investigare una nuova lega Ti producibile mediante AM e con prestazioni superiori rispetto alle leghe commerciali.

- Burner 4.0, Research Fund for Coal and Steel, RFCS-02-2018, 2018-2022,

Partenariato: Tenova, Rina, CRN, Certh, Politecnico di Milano, ArcelorMittal

Il progetto Burner 4.0 mira a superare i limiti tecnologici attuali dei sistemi di combustione in aree come progettazione, produzione, controllo e manutenzione, attraverso l'applicazione delle tecnologie dell'Industria 4.0 sin dalle prime fasi del processo di sviluppo e la produzione di componenti multimateriale più efficienti mediante AM.

European Turbine Network, ETN: ENEA è membro di ETN, un'associazione no-profit che promuove la ricerca nel campo delle turbine e considera tutta la catena del valore della produzione di turbine, con l'intento di creare connessioni tra i diversi membri. Diversi importanti stakeholder del settore della produzione di energia partecipano ai diversi gruppi di lavoro, focalizzati sulla progettazione e sulla produzione di turbine. La divisione TIMAS partecipa al network all'interno del gruppo di lavoro sull'AM.

Il presente progetto viene sviluppato in concomitanza a numerose altre attività che i proponenti stanno da tempo sviluppando in seno ai laboratori del Dip. di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale della Sapienza a cui appartengono. Tali attività riguardano la finitura di massa in particolare riguardo alla tecnologia della burattatura, della vibrofinitura, del centrifugal high disk e dell'elettrolucidatura, lavorazioni multi-asse di asportazione di truciolo a controllo numerico computerizzato. Nell'ambito delle fabbricazione di Additive Manufacturing si collocano le tecnologie Laser Powder Bed Fusion, Laser based Stereolithography, Fused Filament Fabrication, Metal Fused Filament Fabrication, Masked Stereolithography, Functional Graded Material mediante Multijet Manufacturing.

I progetti in corso sono di tipo finanziato dalle industrie, finanziato dall'università, finanziato dal PNRR. Detti progetti insistendo sulla ricerca di base applicata e avanzata sulle tecniche di Additive Manufacturing e finitura di componenti in Additive Manufacturing costituiscono importanti collegamenti per un concreto avanzamento del presente progetto. In dettaglio gli sviluppi in merito alla modellazione predittiva delle tecnologie su menzionate obiettivo dei progetti paralleli verranno impiegati a beneficio di rapide e snelle pianificazioni delle attività sperimentali. Le conoscenze operative in merito alle macchine in dotazione al Gruppo permetteranno di determinare oculate scelte nella combinazione dei parametri di processo a livello operativo e della combinazione dei macrocicli a livello strategico.

Relativamente ai progetti collegati alle attività proposte nel WP2, come riportato in precedenza, all'interno del PTR 2019-2021, è stata sviluppata una pasta ceramica adatta ad essere stampata mediante una tecnica AM, che è stata poi utilizzata per la realizzazione di un dimostratore di gassificatore per impianti di produzione di energia elettrica da biomasse. Analogamente, all'interno del PTR 2022-2024, è stata sviluppata uno slurry ceramico fotosensibile, utilizzato per la stampa 3D di un dimostratore di componente (girante) di un impianto di MTG.

Per l'impostazione del presente progetto ci si è avvalsi del know-how metodologico maturato nei precedenti PTR e della possibilità di considerarlo come un ideale seguito dei precedenti, in cui si vuole verificare la possibilità di utilizzare i materiali ceramici avanzati per realizzare mediante AM un altro componente dello stesso impianto MTG considerato.

Nell'ambito degli Ecosistemi per l'Innovazione (PNRR), il Progetto ECOSISTER prevede lo sviluppo di feedstock ceramiche, idonee ad essere stampate 3D per la realizzazione di componenti ceramici utilizzabili in diversi settori industriali quali il biomedicale e quello energetico.

Analogamente, nel progetto NEST "Network 4 Energy Sustainable Transition" finanziato nell'ambito del PNRR- "Partenariati estesi alle università, ai centri di ricerca, alle aziende per il finanziamento di progetti di ricerca di base" - Missione 4 - Componente 2 - Investimento 1.3, si stanno sviluppando feedstock ceramiche da utilizzare con tecnologie di AM per la realizzazione di componenti specificatamente per l'ambito energetico.

Nel progetto regionale SMAL-SAT, finanziato nell'ambito dei bandi POR-FESR Emilia-Romagna 2021-2027, si prevede la realizzazione, mediante tecniche di AM, di un monoblocco ceramico costituito da camera di combustione ed ugello convergente-divergente. Tale

componente verrà impiegato per assemblare un propulsore "green" utilizzabile per missioni nano-satellitari. Le tecniche di AM individuate per lo sviluppo di tale attività sono l'LDM con l'utilizzo del carburo di silicio (SiC) e la DLP con l'utilizzo del nitruro di silicio (Si₃N₄).

Il progetto di conversione di una turbina da elicottero per utilizzo con alimentazione ad idrogeno, in fase di sviluppo presso l'Università di Bologna – Campus di Forlì e collegato alle attività del PNRR, potrebbe avere ricadute importanti per una prosecuzione delle attività svolte nel presente progetto, portando nel futuro alla definizione di una microturbina con componenti ceramici e alimentazione ad idrogeno. Il collegamento principale che il progetto legato al PNRR potrebbe avere è infatti relativo alla predisposizione della sala prove motore disponibile presso il laboratorio dell'Università di Bologna, allo stoccaggio e distribuzione dell'idrogeno, tassello indispensabile per l'effettuazione di test di altre macchine (come, ad esempio, una microturbina) con questo tipo di alimentazione.

Riguardo alle attività del WP3, nell'ambito del progetto PNRR POR H2, Missione 2 "Rivoluzione verde e transizione ecologica" – Componente 2 "Energia Rinnovabile, Idrogeno, Rete e Mobilità Sostenibile" – Investimento 3.5 "Ricerca E Sviluppo Sull'idrogeno", è stata proposta un'attività in cui si prepareranno membrane anioniche a base di LHD. Non vi sono collegamenti diretti con le attività di questo WP oltre allo studio dello stato dell'arte sulla stessa classe di materiali, che comunque è finalizzato ad applicazioni ed ambiti differenti: produzione di idrogeno nel caso del progetto PNRR, cattura della CO₂ in questo progetto.

Per quanto concerne il WP4 è possibile citare alcuni progetti che trovano collegamenti diretti e indiretti con il presente progetto 1.4:

- "REVALUE - REcycled carbon fibres for high VALUE composites", Ente Finanziatore : EIT Raw Material, avente come partner, SUEZ, CEA, CRF, CETMA, Università del Salento, che si è svolto dal 2017 al 2020 (33 mesi). Il progetto ha visto lo sviluppo di compositi a fibra corta: nylon o polipropilene caricato con fibra di carbonio da riciclo, a seguito della funzionalizzazione di queste per aumentarne la compatibilità con la matrice.
- "EcoCFRP-Componenti e semilavorati per l'aeronautica da fibre di carbonio da riciclo", finanziato da Regione Puglia, che ha visto come partner Carborek, MICAD, Giannuzzi, Sinapsi (durata 30 mesi). Il progetto, che fra le altre ha visto la partecipazione di Giannuzzi, azienda leader nella realizzazione di aziende di aerei, ha comportato lo sviluppo di compositi rinforzati da un Tessuto-non Tessuto in fibra di Carbonio da riciclo.
- "TexStyle-Nuovi tessuti intelligenti e sostenibili multi-settoriali per design creativo e stile made-in-Italy», finanziato dal MIUR, che ha visto come partner CRF, Let'sW, Dreamlux, Technova, CRdC, Next Irlplast, Apollo, Cosmob, Samsara, UniCa, UniBo, e si è svolto dal 2018 al 2021 (36 mesi). Il progetto ha portato alla realizzazione di un impianto pilota tessile sulla FILATURA delle fibre di carbonio da riciclo. I filati realizzati hanno dimostrato adeguate capacità di conduzione di segnali elettrici e quindi la possibilità di essere impiegati all'interno di tessuti intelligenti, trasdurre segnali senza cablatura ecc.
- EcoCarbonio-Circular Economy for the Carbon Fiber Industry", finanziato da Regione Lombardia, avente come partner cotonificio OLCESE; Mako Shark, Argal, Limonta, Persico. Il progetto ha visto la realizzazione di tessuti a base di fibre di carbonio da riciclo e termoplastici che avevano la possibilità di essere assemblati e stampati. Uni dei dimostratori è stata la base di pompe idrauliche Argal.
- CarboPlus Reconstructed CARBOn fabrics for mass Production of Low impact sUustainable compositeS, finanziato dalla fondazione ECOSISTER e partito il primo ottobre 2024. Il progetto studierà il riutilizzo industriale della fibra corta C da pirolisi, mirando a trasformare questa fibra "soffice" in un prodotto tessile semi-finito
- Commessa SIDRO. La commessa si svolge all'interno di un progetto che mira a sviluppare serbatoi in composito di fibra di carbonio per il trasporto di idrogeno, destinati in particolare al trasporto pesante (autobus, camion); l'attività di ENEA: consiste nell'effettuare Analisi micro-tomografiche su compositi fibro rinforzati atte a misurare e quantificare la porosità del materiale.
- Commessa Spoke La commessa si svolge all'interno di un progetto a guida UniSalento, che mira a sviluppare tecnologie di stampa 3D per la realizzazione di pale eoliche in materiale composito fibro-rinforzato. (per conto di IAS Energy,TA). L'attività ENEA consiste nell'analisi microtomografica computerizzata a raggi X (Micro-CT) di provini in composito a fibra corta ottenuti per stampa 3D.
- SIADD_Soluzioni Innovative per la qualità e la sostenibilità dei processi di ADDitive manufacturing (SIADD), finanziato dal MIUR, a guida del Distretto Tecnologico Aerospaziale (DTA) scarl – Brindisi (BR); Lo studio è stato finalizzato alla sostenibilità manifatturiera della produzione industriale di componenti e strutture in materiale nano composito, a geometria complessa.
- "Space it up", progetto finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) con il contratto n. 2024-5-E.O. Questo progetto si concentra sulla affidabilità strutturale di componenti spaziali multifunzionali realizzati tramite produzione additiva.
- "AMICO – Additive Manufacturing e automazione processo per materiali Ibridi e Compositi" finanziato dal MIUR; il progetto AMICO promuove, in diversi settori applicativi, nuovi concetti di produzione caratterizzati da tecnologie additive che garantiscano la possibilità di realizzare, a costi contenuti, prodotti realizzabili utilizzando anche materiali complessi e ad alto valore aggiunto, come i materiali compositi.
- MARIS- Materiali compositi Avanzati ottenuti dal Riciclo di materiali di Sfrido (o Scarto), finanziato dal MISE; il progetto MARIS è finalizzato all'ampliamento ed al potenziamento delle capacità produttive, dei processi e dell'organizzazione delle linee di fabbricazione dei componenti presso- e termo-formati, con l'impiego di materiali compositi riciclati, ottenuti da sfridi e materiale di scarto recuperati in fase di produzione.

Per quanto riguarda il WP5, nell'ambito del Progetto SMART ENERGY BOXES (SEB) (PON02_00323_3588749), sono state svolte attività riguardanti lo studio di polimeri coniugati e sulfonati per applicazioni in sistemi di accumulo di energia. Sebbene le attività svolte in quell'ambito (2014-2016) siano introduttive rispetto a quelle previste nella LA 5.5 e 5.8, hanno portato a risultati che sono ormai datati.

2.5 Obiettivi e risultati

a) Obiettivi finali del progetto

Il futuro della manifattura industriale vede l'introduzione di tecnologie basate su un elevato livello di automazione e controllo, che possono portare a un aumento della produzione, riduzione dei consumi e degli scarti di lavorazione (Industria 4.0). Questo nuovo approccio alla produzione è basato sul concetto di fabbrica intelligente, smart factory, nella quale è possibile avere collegate in rete le attrezzature, i sistemi di controllo e indagine, e sapere in tempo reale lo stato della produzione. I dati acquisiti (Big Data) possono essere utilizzati dall'apparato decisionale dell'azienda, ad esempio, per il miglioramento dei processi produttivi e per la valutazione dello stato di funzionamento delle macchine. Uno studio di Boston Consulting individua, tra le nove "tecnologie abilitanti" dell'industria 4.0, l'additive manufacturing. Infatti questa tecnologia si presta bene al concetto di smart factory, poiché considera la possibilità di modificare il prodotto semplicemente agendo su un modello CAD, consentendo di adattare in tempo reale a richieste personalizzate dei clienti. Inoltre consente di agire sulla produzione anche da remoto e di limitare le giacenze di magazzino.

Questi processi produttivi però richiedono lo sviluppo di nuovi materiali per poter implementare il numero di applicazioni possibili. All'interno del WP1 è quindi prevista lo sviluppo di materiali, con proprietà implementate, non presenti in commercio per applicazioni nel settore energetico. Nel caso della progettazione della lega ferritica, da utilizzare per la realizzazione mediante AM di scambiatori di calore per macchine ad assorbimento a ciclo acqua-ammoniacale, vengono presi in considerazione alcuni aspetti innovativi, tra i quali: una maggiore conducibilità termica e un ridotto coefficiente di dilatazione termica rispetto a materiali di riferimento, quali l'AlSi 316, e l'assenza di Nichel all'interno della composizione. Inoltre la lega è realizzata in forma di polvere per processi di stampa 3D a letto di polvere. Il progetto inoltre prevede anche uno studio approfondito del comportamento della lega ferritica e della lega di titanio, dopo la stampa in processi a letto di polvere. Quanto riportato presenta aspetti innovativi, non essendo presenti in letteratura lavori che riportano l'utilizzo di queste leghe per le applicazioni descritte. Lo sviluppo di scambiatori di calore di tipo compatto, anche di tipo passivo, quali i tubi di calore, realizzati in AM presenta un elevato livello di innovatività, essendo limitato il numero di lavori in letteratura su questi sistemi e non essendo presenti in commercio. Il vantaggio della realizzazione di tubi di calore realizzati in AM è l'enorme flessibilità del processo produttivo e la possibilità di modificare, semplicemente agendo su un modello digitale, la configurazione geometrica, stimando sulla base di dati sperimentali e di modelli descrittivi il comportamento termo-fluidodinamico atteso.

L'interesse rinnovato per la produzione di polveri di qualità nasce dal fatto che l'AM inizia ad avere applicazione sempre più diffusa nell'industria aerospaziale, biomedicale e robotica, trovando in questi settori industriali nuovi spazi per la stampa 3D per la fabbricazione di parti metalliche con geometrie complesse, o a minor peso. La tecnologia DC-plasma è sviluppata ed oggi molto utilizzata per plasma spray; per la sferoidizzazione al plasma si usa la più consolidata e costosa tecnologia RF-Plasma. Trovare quindi soluzioni adeguate mediante tecnologia plasma DC per ottenere un prodotto alternativo ai metodi di produzione classici (WA e GA) e paragonabile a quello ottenuto dalla tecnologia RF-plasma, comporterebbe una apertura ed una espansione di questa tecnica per la produzione di polveri per AM. In tale ambito si collocano gli obiettivi finali delle attività previste presso il Centro Ricerche ENEA Portici (Laboratorio SPPT-TIMAS-CMS) che prevedono il miglioramento della produzione di polveri metalliche mediante prototipo plasma termico DC, progettato internamente, il miglioramento della produttività di processo e dei materiali da qualificare per la stampa. Le polveri prodotte saranno testate dai co-beneficiari PoliMI e/o UniSA per la realizzazione di manufatti di prova e piccoli prototipi.

I principali obiettivi che saranno raggiunti nell'ambito dello sviluppo mediante AM di reattori elettrochimici per l'elettro-riduzione della CO₂ includono:

- La progettazione e la realizzazione tramite AM di materiali di prova, come elettrodi e componenti strutturali per celle elettrochimiche in flusso, con geometrie ottimizzate per la riduzione elettrochimica della CO₂ in etilene e/o etanolo.
- La selezione, la sintesi attraverso approcci di "wet chemistry", la caratterizzazione chimico-fisica e lo studio delle performance elettrochimiche di nanocatalizzatori innovativi per il processo di elettro-riduzione della CO₂ in condizioni controllate di laboratorio.
- La valutazione sperimentale delle proprietà elettrochimiche dei materiali di prova funzionalizzati con i nanocatalizzatori più promettenti, al fine di identificare configurazioni ottimali per l'elettro-riduzione della CO₂.

L'analisi dell'impatto delle proprietà strutturali (porosità, idrofobicità, spessore e geometria del reticolo) dei materiali di prova sulle prestazioni elettrochimiche, al fine di migliorare l'efficienza di conversione e la selettività verso prodotti a valore aggiunto.

La stampa di MCC o multi materiali promette lo sviluppo di componenti a caratteristiche migliorate in termini di resistenza meccanica ed a corrosione ed in termini funzionali andando a sfruttare al meglio le caratteristiche dei singoli materiali e l'impiego sinergico delle loro caratteristiche. Allo stesso tempo il controllo dei parametri di processo è cruciale e la corretta distribuzione e combinazione in qualità e

quantità dei materiali da combinare che all'interfaccia ricade in finestre molto limitate. L'opportunità di valutare l'impiego di materie prime seconde come materiale di partenza permette di avere ulteriori vantaggi in termini di sostenibilità economica ed ambientale grazie alla riduzione delle materie prime critiche. Le ricadute positive per l'industria sono correlate quindi sia all'uso che si può definire puntuale delle materie critiche e dell'energia. Lo sviluppo della tecnologia di stampa multimateriale che in questa prima fase è mirata alla valutazione dei parametri ottimali di stampa per garantire adeguate proprietà in termini di densità e caratteristiche strutturali e funzionali valutate su provini di forma semplice, fornirà dei dati utili alla valutazione della realizzazione di componenti a geometria ottimizzata complessa con conseguente riduzione dei costi energetici ed ambientali sia durante la fase di fabbricazione che di utilizzo, andando a perseguire il concetto di ecodesign del prodotto.

In analogia con quanto è possibile ottenere per gli scambiatori di calore, è possibile considerare numerosi vantaggi nella realizzazione di turbine, per impianti di tipo ORC per la produzione di energia, tramite i processi additivi. Invece di partire da un blocco di materiale che verrà poi via via lavorato fino ad arrivare al componente finito, l'approccio sarà quello additivo che consente, mediante la produzione strato dopo strato, di arrivare a risparmiare oltre l'80% del materiale. Potenzialmente, mediante un'opportuna configurazione della scena di stampa, è possibile ottimizzare il numero di giranti stampate in un unico processo, che nelle macchine attuali è discontinuo. In futuro è prevista l'implementazione di macchine che possono lavorare in modalità semi-continua con un limitato apporto dell'operatore. In parallelo alle attività di realizzazione della turbina per impianti ORC, è prevista anche lo studio dei processi post-stampa finalizzati al miglioramento della finitura superficiale. Il superamento di questa criticità, insieme a quella delle deformazioni, osservabili in alcuni componenti stampati, e delle difformità dimensionali consentirà di arrivare a un prodotto che potrà essere utilizzato in impianti reali. Questo avrà un impatto positivo in termini industriali e di diffusione di impianti di produzione di energia di piccola potenza che sfruttano le fonti di energia rinnovabile, quali appunto gli ORC, e che riducono la dipendenza energetica da paesi terzi.

Tra gli obiettivi finali del progetto c'è l'implementazione di una metodologia industriale per produrre sistemi pico-hydro flessibili ed economici. Allo scopo le attuali conoscenze in merito all'impiego separato delle tecnologie additive e la finitura secondaria dovranno essere migliorate e ottimizzate in via separata e congiunta. Output saranno dunque le modalità flessibili di impiego con dettaglio sul processo di fabbricazione e le sue varianti con strategie dipendenti dalle richieste iniziali. Le conoscenze innovative consisteranno in metodologie, modelli, strumenti applicativi, set di parametri di processo per ciascuna tecnologia sarà adeguata candidata a partecipare al sistema flessibile. La metodologia, per ogni fase di lavorazione, determinerà l'impegno economico e temporale offrendo, pertanto, un valido strumento di preventivazione. Per la precisione, è proprio l'analisi economica che permetterà di scegliere e validare il sistema produttivo nei suoi elementi. I criteri di maggior innovazione riguarderanno le modifiche alle tecnologie in base alla scelta dei parametri di processo determinati su nuovi e innovativi materiali con confronto diretto con i sistemi e materiali commerciali.

Il WP2 del presente progetto si pone l'obiettivo di rivoluzionare il settore delle microturbine a gas (MTG) attraverso l'applicazione di materiali ceramici avanzati prodotti con tecniche di Additive Manufacturing (AM). Questo approccio innovativo mira a superare i limiti delle tecnologie attuali, concentrandosi in particolare sulla progettazione e sviluppo di uno scambiatore di calore ceramico altamente efficiente. La scelta di utilizzare materiali ceramici deriva dalle loro eccezionali proprietà termiche e meccaniche, che consentono di operare a temperature più elevate rispetto ai materiali metallici tradizionali, aumentando così l'efficienza energetica complessiva del sistema.

Gli obiettivi scientifici e tecnologici da conseguire nel WP2 possono essere sintetizzati nei seguenti punti: sviluppo di materie prime ceramiche innovative per stampa 3D, opportunamente messe a punto per le specifiche tipologie di tecnologie AM scelte; successiva ottimizzazione di tutte le fasi del processo di fabbricazione e realizzazione di un componente ceramico dimostrativo, ottenuto per stampa 3D, destinato all'ambito energetico; simulazione dei benefici ottenibili con la sostituzione del componente metallico con quello ceramico da AM sul rendimento energetico di una MTG.

Lo sviluppo e messa a punto di feedstock ceramiche stampabili e la definizione dei loro parametri caratteristici, essendo mirate a tecnologie di AM ceramico low cost, favorirà una maggiore accessibilità delle nuove tecnologie di stampa 3D a livello industriale, attualmente limitata dall'esigua disponibilità sul mercato di formulazioni ceramiche per AM.

Le tecniche di AM, che prevedono minime lavorazioni meccaniche superficiali, rappresentano un processo di formatura dei materiali ceramici maggiormente sostenibile a livello ambientale ed economico, limitando notevolmente gli sprechi di materie prime, gli scarti di lavorazione e il consumo di energia elettrica grazie alla minimizzazione delle operazioni di finitura.

Tramite la tecnologia AM, si potrà, inoltre, realizzare un dimostratore ceramico, in particolare un recuperatore termico, di forma estremamente complessa non realizzabile con tecniche di fabbricazione sottrattiva. Ad esempio, le strutture TPMS (Triply Periodic Minimal Surfaces), ed in particolare il giroide, sono studiate per il superamento della consueta geometria degli scambiatori termici a piastre, poiché la geometria particolarmente articolata, consente di abbinare elevatissime superfici utili per lo scambio termico in un volume compatto, collocandosi così come la geometria più promettente per questo tipo di applicazione [1].

L'ottenimento di un prototipo di recuperatore termico in materiale ceramico e con geometria innovativa andrà, inoltre, a completare la configurazione con girante ceramica della MTG analizzata e studiata nel precedente PTR, per una futura realizzazione di una MTG sperimentale ad alto rendimento energetico.

Le attività del progetto includono, inoltre, sia la simulazione numerica che la sperimentazione pratica per validare le prestazioni delle soluzioni proposte. Attraverso test sui prototipi realizzati e l'ottimizzazione del loro design, si punta a dimostrare i vantaggi concreti dell'utilizzo di materiali ceramici, non solo in termini di efficienza di scambio termico, ma anche in termini di durabilità e resistenza in condizioni operative estreme.

Parallelamente, il progetto si propone di rafforzare le infrastrutture sperimentali esistenti, adattando i banchi prova e le piattaforme di test per eseguire valutazioni affidabili e accurate. L'integrazione di nuovi strumenti e metodologie permetterà di acquisire dati utili non solo per il progetto attuale, ma anche per futuri sviluppi nel campo delle MTG e di altre tecnologie energetiche.

I vantaggi scaturiti dall'utilizzo delle tecniche AM per la realizzazione di componenti ceramici, così come lo sviluppo di nuove formulazioni ceramiche per AM, potranno ampliare la diffusione di questa classe di materiali ai diversi settori ed applicazioni industriali, in particolare quello delle tecnologie energetiche, ad oggi fortemente limitata dal costo del processo di fabbricazione convenzionale e quindi del componente.

Infine, un aspetto centrale del progetto riguarda la scalabilità delle soluzioni sviluppate. L'obiettivo non è solo quello di dimostrare l'efficacia dei componenti ceramici a livello di ricerca, ma anche di creare una base tecnologica che faciliti l'industrializzazione e l'adozione commerciale delle tecnologie avanzate. Questo permetterà di estendere i benefici ottenuti dal progetto a un ampio spettro di applicazioni, contribuendo a ridurre il consumo di combustibili fossili e l'impatto ambientale dei sistemi energetici basati su MTG.

Uno degli obiettivi finali del WP3 è sviluppare materiali bifunzionali innovativi per ICCU che siano a basso impatto ambientale, a basso costo e le cui tecniche di sintesi siano facilmente scalabili pur mantenendo un elevato controllo composizionale del materiale finale.

Per quanto riguarda i processi di sintesi/preparazione, verranno considerate delle procedure poco energivore e di facile scalabilità, tra le quali anche sintesi idrotermale, sintesi con microonde e processi di co-precipitazione. I materiali verranno caratterizzati dal punto di vista chimico, strutturale, morfologico e funzionale e tale scopo verranno utilizzate strumentazioni avanzate con alte prestazioni e metodologie opportunamente definite.

Inoltre, in base alle caratteristiche dei materiali studiati e preparati, si porrà attenzione all'individuazione delle reazioni di conversione della CO₂ in cui tali materiali potranno trovare applicazione, valutando preliminarmente la capacità di cattura della CO₂.

Altro obiettivo del WP3 è lo sviluppo di materiali avanzati finalizzati alla realizzazione di un reattore chimico ultracompatto in grado di intensificare i processi produttivi, in particolare la produzione distribuita ed elettrificata di syngas. Ciò avverrà mediante la combinazione del concetto di catalisi magnetica alimentata mediante induzione RF e la realizzazione, mediante AM, di supporti monolitici aventi geometrie complesse.

L'applicazione della tecnologia AM alla catalisi eterogenea, infatti, consente la progettazione e fabbricazione di strutture porose complesse, nelle quali è possibile realizzare facilmente un elevato caricamento di specie attive. Contemporaneamente tali strutture permettono di modulare il flusso di gas verso la modalità turbolenta, migliorando la produttività del processo chimico. Pertanto, tale tecnologia mostra un enorme potenziale nella catalisi eterogenea sia consentendo di sfruttare al massimo l'attività dei catalizzatori esistenti sia ottimizzando fattori ingegneristici quali il trasferimento di massa, la caduta di pressione e la produttività complessiva dei reattori.

La ricerca proposta è finalizzata al design, allo sviluppo dei processi di sintesi e alla realizzazione di catalizzatori avanzati anche in visione di un ampliamento dei processi chimici nei quali può operare la catalisi magnetica.

La realizzazione delle suddette strutture tramite tecnologia AM, parte dalla definizione dei materiali di interesse per l'applicazione. Verranno sviluppate feedstock ceramiche basate su tali materiali che consentiranno la realizzazione di provini semplici, per la messa a punto dei processi chimico-fisici di consolidamento strutturale. Tali provini serviranno inoltre per test valutativi di impregnazione e la conseguente risposta termica in funzione dell'interazione con il campo RF. Sulla base dei risultati ottenuti verrà definito uno scaffold ceramico poroso, e, a partire da una feedstock ceramica ottimizzata, si realizzerà il prototipo di scaffold poroso atto a supportare efficacemente i catalizzatori magnetici.

Lo scaffold tridimensionale verrà strutturato con geometrie tali da favorire l'interazione tra gas e catalizzatore. Secondo l'attuale stato dell'arte, le forme complesse, come ad esempio strutture trabecolari o a canalizzazioni convolute, necessarie a garantire un'elevata area superficiale e un moto vorticoso dei gas reagenti, sono realizzabili esclusivamente tramite tecniche di AM. Le feedstock e i trattamenti post-processing di stampa 3D saranno finalizzati all'ottenimento di strutture ceramiche aventi porosità ed area superficiale idonee a supportare una quantità elevata di catalizzatore. L'impiego degli scaffold ottenuti tramite AM consente inoltre di ottimizzare il riempimento del reattore, rispetto all'utilizzo di supporti a pellet standard, ed è ragionevole attendersi un aumento dell'efficienza del processo catalitico.

Gli obiettivi del WP4 si inseriscono come potenziali soluzioni ad alcune delle problematiche che il settore eolico pone come prioritarie, ovvero:

i) la ricerca di soluzioni che possano portare a turbine più leggere. Le pale più leggere hanno una minore inerzia rotazionale, il che significa che possono iniziare a girare più velocemente e cambiare direzione più facilmente [2]. Ciò consente loro di catturare più energia eolica, soprattutto in condizioni di vento fluttuante; ii) la possibilità di incrementare la durabilità delle pale ed in particolare; iii) la necessità di sopperire al danneggiamento superficiale/erosione dovuto agli agenti atmosferici.

In risposta alle quali ci si propone di:

a) progettare strutture di rinforzo a base di tessuto non tessuto in fibre di carbonio e/o fibre naturali; b) studiare, grazie alla collaborazione con il gruppo del prof. Greco, Unisalento, nuovi materiali a base di resine vitrimeriche, che possono essere riprocessati dopo la polimerizzazione ed aprono quindi la strada alla riparabilità di componenti danneggiati; c) produrre nuovi materiali compositi a base di tessuto-vitrimerico, che se da un lato dovrebbero consentire di alleggerire la struttura della pala a parità di resistenza, dall'altro preparerebbero il terreno a compositi riparabili o riciclabili; d) realizzare un rivestimento polimerico/inorganico che utilizzi l'ingegnerizzazione delle superfici tramite plasma, in aggiunta ai gelcoat in commercio, per proteggere i bordi di attacco. Infine ci si propone di sviluppare processi di recupero e riuso sia su materiali compatibili con i compositi delle pale eoliche a fine vita sia sui materiali compositi innovativi sviluppati nell'ambito del progetto.

Rispetto a quanto riportato nello stato dell'arte dei componenti e dispositivi oggetto delle attività incluse nel WP5, la prospettiva è di risolvere alcune specifiche criticità, apportando allo stesso tempo dei benefici diretti.

Più nel dettaglio, l'implementazione di un approccio di ecodesign per la realizzazione delle pale, basato cioè sull'impiego di materiali più sostenibili e che garantiscano una maggiore riciclabilità, nonché ottenuti con nuovi processi di produzione come la manifattura additiva, possono aiutare a tagliare dalle radici l'impatto ambientale della prossima generazione di pale eoliche. In aggiunta, l'impiego del processo di produzione additiva consente l'ottenimento di geometrie complesse, non ottenibili con tecniche di produzione tradizionali. Tale peculiarità consentirà di ottimizzare la geometria delle pale, rendendole più leggere, più resistenti e più efficienti dal punto di vista energetico, con l'impiego di una quantità inferiore di materiali. Ciò si traduce in un incremento della produzione specifica e conseguente riduzione del costo unitario di produzione dell'energia elettrica.

Per quanto riguarda i rivestimenti protettivi delle strutture portanti in metallo, lo studio e la fattibilità di ricavare da residui naturali idonee nanocariche inorganiche da additivare alle vernici per realizzare un rivestimento anticorrosivo consentirà una minore richiesta di materie prime ed un vantaggio dal punto di vista dell'impatto ambientale.

Infine, per i supercapacitori, l'obiettivo finale è la definizione delle caratteristiche dei vari componenti, intese principalmente come composizione degli elettrodi, del separatore e dell'elettrolita. Inoltre, a seguito dei vari test funzionali in cella a due elettrodi, sarà definita la configurazione più performante dal punto di vista delle prestazioni in termini di densità di energia, densità di potenza e capacità specifica. Rispetto allo stato dell'arte ci si aspetta di individuare i composti principalmente a base carbonio e metalli di transizione, oltre che le loro nanostrutture, che abbiano maggiori potenzialità di utilizzo nei supercapacitori, mettendo a punto anche le relative tecnologie di preparazione.

I progressi attesi sullo sviluppo dei singoli componenti, incideranno positivamente su varie criticità legate allo sviluppo della tecnologia eolica offshore nel bacino del Mediterraneo, considerata nel suo complesso. La ricaduta positiva per lo sviluppo del settore è pertanto molto diretta, fornendo ulteriori elementi utili alla rimozione di barriere esistenti che possono ostacolare l'implementazione su scala nazionale.

Inoltre, l'ulteriore sviluppo dell'eolico offshore vedrebbe immediate ricadute anche nel settore industriale della nazione, legate essenzialmente alla produzione di acciaio, all'industria navalmecanica e al complesso di infrastrutture portuali, consentendo il rafforzamento di un indotto nazionale, con importanti ripercussioni di carattere economico ed occupazionale. Grazie alla sua posizione centrale nel Mare Mediterraneo, l'Italia può difatti ambire a diventare un hub strategico per la produzione e l'installazione delle turbine eoliche offshore galleggianti. Si stima che per ogni euro di valore aggiunto generato nella filiera dell'eolico offshore galleggiante in Italia, se ne genererebbero ulteriori 1,9 euro nel resto dell'economia italiana, grazie all'attivazione di filiere sul territorio nazionale [3].

A tali fattori va aggiunto il non secondario effetto sul mercato del lavoro. Dal punto di vista occupazionale, infatti, si stima che il raggiungimento dell'obiettivo auspicato di 20 GW di capacità eolica offshore installata al 2050 nelle acque nazionali del Mediterraneo genererebbe 27000 nuovi occupati in Italia [3].

Il WP4 e il WP5, entrambi dedicati allo sviluppo di soluzioni nel campo della tecnologia eolica e finalizzati all'ottenimento di obiettivi comuni in termini di impatti sul sistema energetico nazionale, risultano comunque essere complementari in termini di campi di applicazione e di strategie che intendono mettere in atto. Tali complementarità riguardano diversi aspetti di seguito elencati e oggetto di studio dei due WP:

Sviluppo materiali: il WP4 si focalizza su nuove architetture tessili per il rinforzo di compositi a matrice vitrimorfa, il WP5 indaga il ruolo di diverse tipologie di fibre sciolte e di matrici polimeriche.

Matrici polimeriche: Il WP4 investiga resine con comportamenti vitrimerici, una classe di materiali derivanti da resine termoindurenti ma con proprietà di riciclabilità simili a quelle dei termoplastici. Il WP5 si concentra su polimeri interamente termoplastici, sia di origine naturale che sintetica, e in miscela con materiali autoriparanti.

Processi di produzione: In funzione delle caratteristiche dei materiali sviluppati, il WP4 intende indagare la produzione di compositi per pale eoliche attraverso processi di resin infusion o di compression molding di architetture tessili "green", realizzate a partire da filati in fibra di carbonio da riciclo e fibra vegetale, in miscela con resine vitrimeriche. Il WP5 intende indagare, e adeguatamente adattare, il processo di produzione di manifattura additiva per la realizzazione di pale eoliche, quale valido sostituto dei processi tradizionali ad oggi tecnologicamente più maturi.

Rivestimenti protettivi: Il WP4 esplora lo sviluppo di coating avanzati per la componente pala eolica, realizzati anche con tecnologia al

plasma, mentre il WP5 si occupa di rivestimenti protettivi innovativi su componentistica in metallo presente in diversi punti della turbina, con particolare riferimento alle strutture portanti come la torre di sostegno.

Settore applicativo: il WP4 intende designare il minieolico quale settore di applicazione dei propri materiali, mentre il WP5 ha focus specifico sulla tecnologia dell'eolico offshore.

Si evidenziano infine i seguenti elementi di completa differenziazione tra i due WP:

Il WP4 dedica una intera linea di attività alla valorizzazione delle fibre di carbonio dei compositi una volta raggiunto il fine vita, attraverso l'esplorazione di potenziali percorsi di recupero e riutilizzo delle fibre recuperate.

Il WP5 include:

1. due linee di attività dedicate allo studio, sviluppo e realizzazione di un prototipo di supercapacitore con configurazione ottimizzata per il settore eolico;
2. una linea di attività sul monitoraggio mediante fibre ottiche dei componenti e dispositivi per controllare lo stato di salute della turbina al fine di una adeguata programmazione degli interventi di manutenzione preventiva.
3. la valutazione della sostenibilità ambientale mediante metodologie LCA dei risultati raggiunti in applicazioni offshore nel Bacino del Mediterraneo. Analisi delle criticità e di potenziali barriere nello sviluppo dell'eolico offshore legate alla biodiversità presente nel bacino del Mediterraneo e agli effetti sui processi ecosistemici.

[1] T. Dixit, E. Al-Hajri, M.C. Paul, P. Nithiarasu, S. Kumar, High performance, microarchitected, compact heat exchanger enabled by 3D printing, *Applied Thermal Engineering* 210 (2022) 118339; <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118339>

[2] Firoozi, A.A.; Hejazi, F.; Firoozi, A.A. Advancing Wind Energy Efficiency: A Systematic Review of Aerodynamic Optimization in Wind Turbine Blade Design. *Energies* 2024, 17, 2919. <https://doi.org/10.3390/en17122919>

[3] Eolico Offshore Galleggiante: opportunità nel percorso di decarbonizzazione e ricadute industriali per l'Italia, 2024, The European House Ambrosetti

b) Principali risultati attesi/deliverable

Nel WP1 verranno sviluppati materiali per tecnologie additive con l'intento di realizzare componenti per il settore energetico.

Le attività prevedono l'implementazione delle proprietà di una lega ferritica, da utilizzare per la realizzazione, mediante processi AM, di scambiatori per macchine ad assorbimento a ciclo acqua ammoniacale. E' previsto infatti la definizione di determinati trattamenti termo-meccanici per il miglioramento della microstruttura della lega ferritica. Verrà quindi definita una metodica per l'affinamento del grano che porta a un miglioramento del comportamento meccanico della lega stessa. Verranno effettuate per la prima volta delle prove specifiche di corrosione della lega ferritica e della lega di titanio, su campioni ottenuti mediante stampa 3D, in condizioni analoghe a quelle d'esercizio.

E' previsto inoltre la preparazione di materiali compositi a elevata conducibilità termica per processi additivi di tipo SLA, DLP e FDM. L'attività prevede quindi un primo sviluppo del composito, attraverso l'utilizzo di una determinata carica. Questa andrà valutata tra i materiali che consentono di implementare la conducibilità termica, ma che consente anche di non alterare in maniera sostanziale le proprietà del materiale di partenza in termini di foto-polimerizzazione, nel caso delle resine acriliche, e di estrudibilità, nel caso dei materiali per i processi FDM. Tra i materiali più interessanti è possibile citare materiali a base carbonio, quali grafite, carbon black, fibre di carbonio, nanotubi, che hanno un'elevata conducibilità termica e che possono essere dispersi abbastanza agevolmente sia in resine acriliche che in materiali termoplastici, materiali ceramici, quali allumina, nitrato di alluminio e di boro, 30, 321 e 220-420 W/mK rispettivamente, e materiali metallici quali alluminio (205 W/mK) e rame (385 W/mK). In ultimo verranno realizzati dei campioni con geometria complessa per dimostrare la stampabilità del composito realizzato.

Saranno prodotti mediante plasma DC nuovi materiali di interesse in campo energetico da qualificare per l'impiego in AM. I materiali potranno essere prodotti anche partendo da materie prime seconde.

Si aumenterà la capacità produttiva dell'impianto per processare batch di prova tra 0.2-0.5 kg.

Sarà sperimentata la realizzazione di componenti di interesse per FFF e MMEX.

I materiali prodotti via plasma saranno impiegati dai co beneficiari POLIMI e UniSA, insieme altri disponibili in commercio, per la realizzazione di provini di test ed di componenti, come scambiatori o elettrodi o semi-elementi per celle, con caratteristiche pari a quelli ottenuti con materiali tradizionali.

I risultati saranno raccolti nei deliverable prodotti alla fine delle attività.

Per le attività dell'Università di Salerno all'interno del WP1, i risultati attesi prevedono test finali su materiali di prova. I materiali elettrochimici sviluppati tramite AM saranno sottoposti a test finali per verificarne le prestazioni rispetto alle tecnologie tradizionali. In particolare, i nanocatalizzatori sintetizzati e testati su materiali di prova per i processi elettrochimici selezionati mirano a raggiungere risultati in linea o superiori con lo stato dell'arte attuale. Relativamente alla riduzione elettrochimica della CO₂ in etilene e/o etanolo, si prevede di ottenere efficienze faradiche (FE) del 60-70% e densità di corrente superiori a 100 mA/cm², grazie all'ottimizzazione delle proprietà dei materiali, come porosità e idrofobicità. Questi test finali permetteranno di valutare le potenzialità dei materiali di prova nel

migliorare i processi elettrochimici considerati e forniranno indicazioni per ottimizzazioni future.

Le attività condotte da POLIMI, nel WP1, porteranno alla realizzazione di campioni mediante tecnologia L-PBF (Laser Powder Bed Fusion) per verificare la stampabilità di polveri innovative MMC e multimateriale (es. acciai inox/ leghe di rame) e valutazione di aspetti quali integrità, densità, microstruttura e proprietà meccaniche. Saranno analizzati fattori cruciali come la densità del materiale, la qualità del legame metallurgico e chimico tra la matrice metallica e il composito, nonché proprietà meccaniche quali durezza e resistenza. L'attività prevede l'esplorazione di due combinazioni di polveri per l'attività MMC ed una copia bi-materiale per l'attività multimateriale, la cui composizione chimica e origine saranno definite nelle fasi iniziali del progetto. Le polveri potranno essere sia vergini e prodotte commercialmente, sia sviluppate internamente da ENEA attraverso processi di plasma termico.

I risultati saranno descritti un deliverable dal titolo: Studio del processo L-PBF con quantitativi ridotti di polvere di strutture MMC e multimateriale

L'attività sperimentale, condotta da ENEA, dedicata alla realizzazione di turbine per impianti Organic Rankine Cycle, ORC, mediante processi a letti di polvere, prevede:

- ottimizzazione del processo di stampa per la realizzazione del componente;
- caratterizzazioni sia microstrutturali che mediante prove non distruttive del componente stampato;
- trattamenti superficiali al fine di ridurre la rugosità superficiale;
- realizzazione, mediante AM, di opportuni campioni per prove sperimentali per la definizione del comportamento termo-fluidodinamico di componenti ottenute mediante stampa 3D di metalli e compositi;
- progettazione e effettuazione di test sperimentali, in condizioni prossime a quelle di esercizio, su un banco prova;
- progetto di un banco prova per test sperimentali della turbina.

I risultati attesi per le attività dell'Università "La Sapienza", all'interno del WP1, possono essere così riassunti:

- metodologie di fabbricazione: dettaglio dei cicli di lavorazione e dei parametri di processo utili all'immediato trasferimento tecnologico;
- strumenti atti a semplificare la fase predittiva quali fogli di calcolo con gli indici di prestazione, tempi di processamento, materiali necessari, costi diretti e indiretti;
- dimostratore tecnologico di girante prodotta con materiali e tecnologie innovative;
- report con la caratterizzazione del materiale, della palettatura in termini di resistenza e durabilità, dell'efficienza della palettatura;
- paragone con i processi e materiali commerciali.

Nel WP2, i principali risultati attesi/deliverable prodotti nelle LA 2.1 e 2.2 sono i seguenti:

- Individuazione di materiali costituenti e definizione dei requisiti per la formulazione di feedstock ceramiche affinché siano idonee alla stampa 3D di recuperatori ceramici per processi di produzione di energia basati su microturbine a gas (materiali e metodi, LA 2.1);
- Sviluppo di feedstock ceramiche e loro caratterizzazione (metodo e risultati sperimentali LA 2.1);
- Produzione di un batch dimostrativo di feedstock ceramica, stampabile tramite tecniche AM selezionate (campione del materiale sviluppato, LA 2.1);
- Definizione dei parametri del processo produttivo del materiale ceramico di riferimento per AM, incluso il post-processing (e.g. cicli termici di degasaggio e sinterizzazione) (metodo, LA 2.1);
- Realizzazione di provini per le caratterizzazioni chimico-fisiche e microstrutturali del materiale ceramico ottenuto per AM (provini, LA 2.1);
- Caratterizzazione chimico-fisiche e microstrutturali del materiale sinterizzato, realizzato tramite stampa 3D di provini e successivi processi di consolidamento (risultati sperimentali, LA 2.1);
- Messa a punto dei parametri del processo di Infiltrazione Chimica da Fase Vapore (CVI) in relazione alla densità dei provini in SiC ottenuti da LDM (risultati sperimentali, LA 2.1);
- Ottimizzazione della feedstock ceramica e sua caratterizzazione (metodo e risultati sperimentali, LA 2.2);
- Realizzazione di provini per le caratterizzazioni del materiale ceramico ottenuto per stampa 3D (provini, prova della bontà del metodo di fabbricazione messo a punto; LA 2.2);
- Caratterizzazione e individuazione delle proprietà termomeccaniche del ceramico avanzato ottenuto da stampa 3D (risultati sperimentali, LA 2.2);
- Progettazione del disegno CAD ottimale per la produzione del componente in materiale ceramico, eventualmente modificato con DfAM (file, progetto, LA 2.2);
- Elaborazione del file STL idoneo alla stampa 3D (file, progetto, LA 2.2);
- Realizzazione del dimostratore ceramico ottenuto tramite stampa 3D (prototipo, LA 2.2);
- Verifica delle caratteristiche dimensionali del dimostratore (risultati sperimentali, LA 2.2);
- Ottimizzazione del processo di Infiltrazione Chimica da Fase Vapore (CVI) dei provini in SiC ottenuti da LDM (risultati sperimentali, LA 2.2);

- Incremento di densità dei provini in SiC prodotti da abbinamento LDM+CVI (risultati sperimentali, LA 2.2).
- Per quanto riguarda le LA 2.3 e 2.4, i principali risultati attesi/deliverable si possono sintetizzare come segue:
- Definizione di un set di parametri di design per lo scambiatore (risultati sperimentali, LA 2.3);
 - Modello CAD dettagliato dello scambiatore in configurazione standard (file, progetto, LA 2.3);
 - Modello numerico del funzionamento di una MTG (file, progetto, LA 2.3);
- Banco prova aggiornato avente la possibilità di testare l'efficienza di scambiatori di calore (risultati sperimentali, LA 2.4).

Nel WP3, al termine del triennio i principali risultati possono essere riassunti nei seguenti punti:

- individuazione dei precursori per la preparazione dei materiali bifunzionali;
- ottimizzazione dei processi di sintesi di materiali bifunzionali;
- definizione di tecniche di caratterizzazione per la valutazione funzionale del materiale, specialmente riguardo cattura e rilascio della CO₂;
- miglioramento della comprensione delle relazioni tra composizione, struttura, caratteristiche morfologiche e funzionalità dei materiali preparati;
- realizzazione per additive manufacturing di supporti porosi per catalizzatori. L'impatto di questo risultato trascende la catalisi magnetica, infatti la possibilità di realizzare supporti porosi stabili alle alte temperature permette di estendere la tecnologia della stampa additiva a numerosi processi di catalisi eterogenea.
- ottimizzazione del processo di sintesi di catalizzatori magnetici finalizzato alla realizzazione di un reattore compatto alimentato mediante induzione magnetica per la produzione di gas di sintesi ad aumentata produttività rispetto allo stato dell'arte.

All'interno del WP4 si prevede di sviluppare campionature sperimentali di architetture tessili innovative (stoppini e/o filati, tessuti non tessuti, TNT, o veli, tessuto a trama ordito biassiale in rCF in mista con fibre vegetali), da utilizzare per il rinforzo, di compositi per pale eoliche. Studi computazionali hanno dimostrato come l'impiego di fibre naturali potrebbe arrivare a risparmiare circa l'8 % del peso totale di una pala [1].

Ci si aspetta inoltre di superare gli attuali limiti delle matrici termoindurenti, sviluppando metodi di sintesi e processo finalizzati a facilitarne la riparabilità ed il riciclo, mediante l'impiego di vitrimeri non solo riciclabili ma auspicabilmente riparabili. Il tutto consentirebbe di ottenere campionature di compositi che possano essere aggiustabili o riutilizzabili. Sviluppati i materiali, per dimostrarne la validità tecnologica, si passerà alla realizzazione di un prototipo dimostrativo di componente o sub-componente di pala, in scala ridotta od in forma modulare, con prestazioni fisico-meccaniche richieste dalle normative di settore.

Si prevede infine la realizzazione di campionature di provini con ingegnerizzazione superficiale che possa contribuire a ritardare o diminuire il fenomeno dell'erosione delle pale.

Inoltre, verranno ottenute campionature di fibre recuperate da compositi presenti nelle pale eoliche a fine vita nonché dai materiali innovativi realizzati nel WP, atte ad agire come rinforzo in provini ottenuti da stampa 3D.

I principali risultati attesi dalle attività del WP5 includono:

- 1) filamenti a base di biopolimeri rinforzati con fibre di origine naturale (basalto, legno, ginestra, canupolo, ecc.) o artificiale, ottenuti mediante processo di estrusione e successivamente additivati con microcapsule autoriparanti, per impieghi in processi di manifattura additiva (l'aggiunta delle microcapsule avverrà a monte del processo di estrusione, consentendo l'ottenimento di un filamento già additivato). I filamenti rappresenteranno un prodotto intermedio per le successive attività previste nella LA 5.6;
- 2) nuove formulazioni di vernici anticorrosive ottenute additivando vernici commerciali con nanocariche opportunamente selezionate;
- 3) campioni prodotti mediante manifattura additiva di filamenti estrusi come al punto 1, sui quali sarà svolta una campagna di caratterizzazione fisica, meccanica e termica e test di durabilità per la valutazione delle prestazioni;
- 4) dispositivo prototipale di supercapacitore in cui verranno impiegati i componenti studiati e messi a punto nelle LA 5.5 e 5.8. Gli elettrodi saranno a base di composti di carbonio e metalli di transizione, ottenuti mediante tecniche di preparazione di sintesi in soluzione. Mediante tecnologie similari verrà preparato l'elettrolita solido mentre il separatore sarà ottenuto utilizzando la tecnica dell'elettrospinning, ottimizzando la composizione della soluzione filabile e i parametri di processo, in maniera da avere l'opportuno spessore e un'adeguata conducibilità. La configurazione elettrodica del dispositivo prototipale sarà definita dalle prestazioni complessive del dispositivo, ma si prevede di adottare una configurazione ibrida in cui nei due elettrodi si abbia un accumulo capacitivo sia per fenomeni Faradici che non-Faradici;
- 5) realizzazione in scala di laboratorio di un contenitore protettivo del supercapacitore resistente alle sollecitazioni ambientali.

2.6 Fattibilità tecnico-scientifica

a) Fattibilità tecnico-scientifica

Il progetto è articolato in 5 working package (WP) focalizzati su diverse tematiche di interesse energetico quali materiali e dimostratori per applicazioni nell'Additive Manufacturing (WP1, WP2 e in parte anche nel WP3 e WP5), nel settore della catalisi (WP3) e in quello

eolico (WP4 e WP5).

Il WP1 prevede lo sviluppo di materiali per i processi additivi per la realizzazione di dimostratori per il settore energetico.

Lo studio e la realizzazione di una lega metallica idonea all'utilizzo nello scambio termico è l'attività prevista all'interno del WP1 LA 1 e 2. L'attività prende spunto dalle problematiche presenti nel campo dello scambio termico e principalmente collegate a una bassa resistenza alla corrosione in ambienti particolari di alcuni metalli (quale il Cu in presenza di ammoniaca) e a una bassa conducibilità termica degli acciai di tipo austenitico, quali l'AISI 316 (16.3 W/mK). Gli acciai ferritici hanno in genere una conducibilità termica maggiore rispetto agli acciai austenitici o martensitici e presentano una buona resistenza alla corrosione, assicurata dalla presenza di elementi quali il Cr e Mo [1-3]. Dall'altro lato però al fine di implementare il comportamento meccanico della lega è opportuno un affinamento del grano mediante opportuni trattamenti termo-meccanici.

E' previsto quindi nelle LA 1 e 2 del WP1:

- Definizione di trattamenti termo-meccanici per l'ottimizzazione della microstruttura della lega ferritica per la realizzazione di scambiatori di calore mediante AM;

- Studio degli effetti della corrosione sui campioni stampanti con processi a letto di polvere in lega ferritica e in lega di titanio;

- Definizione di trattamenti meccanici per la dispersione di ossidi nella matrice metallica (quantità del dispersoide e parametri di alligazione meccanica).

- Sviluppo di nuovi compositi per l'additive manufacturing, con conducibilità termica implementata (> 1 W/mK) partendo da polimeri a bassissima conducibilità termica (circa 0,2 W/mK), per applicazioni nel settore dello scambio termico. Matrici utilizzate: resine fotoindurenti e termoindurenti; cariche: materiali ceramici, quali nitruri e ossidi, nanostrutture di carbonio, metallici. Già nel precedente PTR, sono state effettuate prove di miscelazione di resine commerciali con cariche ad elevata conducibilità termica e successiva stampa. Seppure i risultati sono preliminari, si ritiene possibile sviluppare ulteriormente i compositi, con il fine di realizzare campioni a geometria complessa;

- Prove di saldabilità tra la lega ferritica e lega austenitica (quale ad esempio acciaio inox AISI 316) o acciaio al carbonio e caratterizzazione mediante prove non distruttive e indagini microstrutturali. Il laboratorio SSPT-TIMAS-MADD ha esperienza decennale nel campo delle saldature e delle indagini microstrutturali e non distruttive;

- Realizzazione di uno scambiatore di calore a spirale ottenuto mediante processo EBM. Nonostante questo processo presenti delle criticità nella rimozione della polvere dopo la stampa, si ritiene possibile, grazie ad alcune prove preliminari effettuate, ritenere si possa ulteriormente implementare la geometria dello scambiatore anche per adeguarla al processo di stampa. Il processo EBM è tra i più veloci tra quelli a letto di polvere, e, nella configurazione scelta per lo scambiatore, è possibile ridurre al minimo l'utilizzo di supporti e di conseguenza di successive lavorazioni meccaniche;

Le LA 3 e 4 del WP1 prevedono un approfondimento della gamma di materiali prodotti al plasma termico DC e il miglioramento della produttività e selezione/classificazione del prodotto finale. L'obiettivo sarà conseguito sperimentando la produzione di nuovi materiali di interesse energetico mediante plasma termico, partendo anche da precursori, ovvero materie prime seconde o realizzando reazioni in fiamma; si cercherà inoltre di aumentare la produttività dell'impianto anche per ottenere utili elementi di valutazione energetico/economica del sistema. Nel precedente triennio è stata valutata la destinazione delle polveri di acciaio prodotte all'interno del settore energetico, realizzando test di purificazione, selezione e classificazione delle polveri prodotte. E' stata sperimentata la stampa MMEX per produrre componenti per elettrodi e sono stati realizzati dei filamenti per questa tecnica.

In questo triennio proseguirà l'applicazione della stampa MMEX e FFF per applicazioni nel settore energetico e le polveri prodotte da plasma, in quantità adeguate, saranno testate nella realizzazione di manufatti e componenti di prova in scala impiegando le tecniche di stampa e caratterizzazione disponibili presso i co-beneficiari POLIMI e UNISA.

Nel caso delle attività di UNISA, l'idea innovativa della proposta è garantire lo sviluppo sostenibile di processi elettrochimici attraverso l'impiego di nuovi nanocatalizzatori più efficienti ed economici rispetto a quelli attualmente disponibili e, soprattutto, mediante l'uso di materiali di prova (elettrodi e componenti per celle in flusso di elettrolita) realizzati tramite tecnologie AM più economiche. L'obiettivo è ottenere prestazioni almeno comparabili con quelle dei componenti elettrochimici prodotti con metodi tradizionali. Per raggiungere questi risultati, il Centro fornirà competenze scientifiche avanzate, software di progettazione e tecnologie AM per la realizzazione dei materiali di prova.

La sintesi dei nanocatalizzatori sarà effettuata attraverso approcci di tipo "wet chemistry", mentre la loro caratterizzazione sarà eseguita tramite analisi strutturali (XRD), termiche (TGA) e morfologiche (SEM/EDX, TEM). I test elettrochimici saranno condotti utilizzando tecniche potenziostatiche/galvanostatiche e gascromatografia-spettrometria di massa per l'analisi dei prodotti generati. Durante questa fase, verranno selezionati i nanocatalizzatori più promettenti per i processi elettrochimici considerati. I catalizzatori saranno sintetizzati, caratterizzati e sottoposti a test elettrochimici in sistemi commerciali da laboratorio per valutarne le prestazioni. Parallelamente, verranno progettati e realizzati materiali di prova, come elettrodi e componenti per celle elettrochimiche in flusso di elettrolita, utilizzando tecnologie AM. I materiali prodotti saranno sottoposti a test preliminari per valutarne parametri fondamentali come porosità, idrofobicità e geometria del reticolo. Durante questa fase, si continuerà lo sviluppo di materiali di prova ottimizzati tramite AM, individuando le configurazioni più adatte per i processi elettrochimici studiati. Saranno anche identificate e implementate tecniche per garantire una deposizione efficace dei nanocatalizzatori sui materiali di prova. I materiali così preparati saranno sottoposti a test finali per

verificarne le performance elettrochimiche, con l'obiettivo di raggiungere risultati in linea o superiori a quelli ottenuti con componenti tradizionali. Infine, si studierà la possibilità di ridurre ulteriormente il consumo energetico dei processi elettrochimici, valutando l'uso di calore a bassa temperatura come metodo di attivazione per i materiali di prova prodotti tramite AM.

Le attività condotte dal Politecnico di Milano prevedono l'utilizzo di due piattaforme L-PBF specifiche per ricerca: la piattaforma L-PBF, appositamente progettata per la ricerca e l'esplorazione di nuovi materiali quando il quantitativo di polveri disponibili è ridotto e la piattaforma Aconity Midi per soluzioni multimateriale. La prima piattaforma si distingue per la sua capacità di lavorare con quantitativi ridotti di polvere. Inoltre, offre un'elevata flessibilità nella modalità di utilizzo della sorgente laser, che può operare in modalità pulsata, continua, gaussiana o multimodo. Grazie a queste caratteristiche, è possibile un controllo avanzato delle traiettorie e delle strategie di processo, ampliando le possibilità di ottimizzazione e innovazione. La seconda invece è il sistema AconityMIDI+, recentemente installato presso POLIMI, in grado di utilizzare la racla multi materiale Aerosint e di distribuire sul singolo layer fino a tre metalli differenti. Grazie alla dotazione strumentale è possibile effettuare studi dei parametri su quantitativi di polveri estremamente limitate rispetto agli usuali sistemi e questo permette un'economia di sistema di ricerca che permette lo sviluppo di nuovi parametri con risorse in termini di materiali estremamente ridotte.

Lo studio della qualità del prodotto ha un impatto sulla corretta gestione delle risorse sia in termini di materiali impiegati che di energia utilizzata per la produzione del prodotto stesso. Il corretto funzionamento di un componente sottoposto a determinate condizioni di esercizio, come ad esempio in un impianto di produzione di energia elettrica, permette un numero ridotto di fermi macchina per manutenzioni e sostituzioni e di conseguenza potenzialmente una maggiore quantità di energia prodotta nell'anno dall'impianto. Considerando gli aspetti relativi alla qualifica dei materiali, l'attività si concentrerà in particolare sullo studio di campioni realizzati mediante tecnologie a letto di polvere, quali Electron Beam Melting (EBM), di leghe a base Titanio (Ti6Al4V). Questa lega ricopre quasi la metà del mercato mondiale delle leghe metalliche a base Titanio e trova applicazione sia nel campo energetico, in particolare per la realizzazione di turbine, che in quello aerospaziale, automobilistico, navale, chimico e industria biomedicale [4]. Le proprietà più importanti di questa lega riguardano la bassa densità, l'elevata resistenza meccanica, elevata resistenza alla corrosione sia in ambiente acido che basico e biocompatibilità.

Nel caso della produzione di energia le leghe a base di Titanio trovano applicazione nel campo delle turbine a vapore dove sono state utilizzate (Ti6Al4V) al posto degli acciai 12Cr già dagli anni '80 per la realizzazione delle pale. Il fermo impianto nei sistemi di generazione di energia è quasi sempre collegato alla rottura dei componenti della turbina a vapore. Generalmente la maggior parte delle rotture avviene nelle turbine a vapore a bassa pressione nelle ultime due file (L-1 e L). Oltre ad ottenere una riduzione del peso delle pale di circa il 60% rispetto agli acciai, queste presentano una elevata resistenza ai cloruri acidi contenenti ossigeno disciolto, che riducono drasticamente la resistenza a fatica degli acciai, al di sotto i 69 MPa e generazione di fenomeni corrosivi quali "corrosion fatigue" e "stress corrosion cracking". L'utilizzo delle leghe di Titanio permette di modificare la geometria della turbina incrementandone l'efficienza [5]. I parametri di maggior interesse nello studio delle proprietà di questa lega sono il carico di snervamento e di rottura, il modulo elastico, allungamento e coefficiente di strizione, le porosità, la rugosità superficiale, la microstruttura e le difettosità [4].

All'interno del progetto, oltre alla realizzazione della turbina per impianti ORC sono previsti dei test sperimentali sia per verificare il comportamento termo-fluidodinamico di superfici con elevata rugosità, sia per verificare il comportamento, in condizioni prossime a quelle di esercizio di turbine realizzate in additive manufacturing. Queste attività vedono coinvolti sia ENEA che l'Università degli Studi di Firenze e di Roma "La Sapienza", in un approccio integrato, basato su competenze e su esperienze pregresse diverse, che non era stato seguito nei precedenti PTR. Sarà possibile infatti affrontare alcuni aspetti critici che riguardano la corretta progettazione della girante, la rugosità superficiale, che impatta sul rendimento della turbina, e la valutazione del comportamento di quest'ultima in condizioni prossime quelle reali. Gli obiettivi prefissati rappresentano dei punti di partenza per la futura realizzazione di impianti di tipo ORC personalizzabili sulla base di esigenze specifiche locali.

Le tecnologie additive risultano piuttosto complesse poiché l'ottenimento del risultato è la combinazione di numerosi step intimamente interconnessi tra di loro necessitando conoscenze e metodologie in ambiti e discipline ingegneristiche diverse. Analogamente, le tecniche di finitura di massa, coinvolgendo flussi granulari, sono particolarmente difficile da modellare e prevedere, anche se sono state acquisite in passato competenze nell'uno e nell'altro campo. Sono pertinenti i ritrovati scientifici in merito alla predizione della rugosità ottenibile in numerose tecnologie additive così come nella finitura di massa. Inoltre, molteplici contributi scientifici riguardano la combinazione di dette tecniche. Associati con questi contributi, i proponenti intendono impiegare metodologie note e normate riguardanti la caratterizzazione delle superfici che si sono dimostrate valide per il riconoscimento di impronte tecnologiche, misure specifiche, quantificazione dei risultati di lavorazione e/o usura. Inoltre, si intendono impiegare delle metodologie innovative volte alla determinazione quantitativa di materiale rimosso, molto delicata per lavorazioni di finitura e superfinitura. L'applicazione ragionata a campagne sperimentali dedicate potrà aprire la strada a modellazioni e predizioni. In tal senso sarà possibile discriminare le soluzioni migliori sulla base di analisi di dettaglio e non, come accade spesso, solo sulla base di osservazioni morfologiche. L'analisi di dettaglio permetterà di formulare ipotesi di comportamento e più in dettaglio definirà la micromeccanica della lavorazione. Le tecnologie additive verranno investigate mediante metodi di Design of Experiments con l'obiettivo di legare i parametri coinvolti con l'output di sistema

caratterizzato con i metodi di profilometria a contatto, prove meccaniche statiche, caratterizzazioni superficiali di durezza, rendimenti energetici, prove tecnologiche di comportamento dinamico. È realistico puntare a modellazioni di sistema e la determinazione tramite ottimizzazione congiunta degli ottimi dei parametri di processo che massimizzano la desirability function dei numerosi output di qualità e funzionamento ivi compresi i costi di produzione. Questi ultimi sono la base operativa e metodologica per calcolare uno dei quattro attributi della produzione. Nell'ordine si approfondiranno teoricamente e sperimentalmente gli aspetti per la produzione flessibile di giranti. Gradualmente ci si muoverà verso modifiche delle tecnologie, dell'impianto metodologico di attuazione del processo digitale e operativo nell'Additive Manufacturing, introduzione sviluppo e testing di nuovi materiali, progettazione funzionale delle giranti, digitalizzazione e verifica dei modelli solidi ai fini della fabbricazione, sperimentazione applicata alle giranti. Caratterizzazione, testing tramite sistema di prova dedicato. Insito in ogni step è il calcolo dei costi di produzione associato al beneficio ottenuto dall'implementazione del sistema tecnico nella collocazione che ha prodotto il progetto del componente.

All'interno del WP2 si intende sviluppare un prototipo di recuperatore ceramico da utilizzare in un processo di produzione dell'energia basato sull'impiego di una microturbina a gas ad alta efficienza, in piena continuità con le attività svolte nel precedente Piano Triennale 2022-24-Progetto 1.4 - WP4. La realizzazione del recuperatore prototipale passerà attraverso la messa a punto di un ciclo di fabbricazione che comprende la ottimizzazione delle feedstock ceramiche necessarie alla stampa 3D, la progettazione del componente e la fabbricazione del prototipo mediante una tecnica di AM. L'innovazione delle attività del WP2 risiede quindi nel dimostrare la possibilità di utilizzare tecnologie di AM per la fabbricazione di recuperatori termici ceramici, al fine di incrementare l'efficienza del processo di produzione di energia delle MTG. Questo sarà possibile grazie all'utilizzo di componenti realizzati in materiale ceramico avanzato, che consentono di incrementare la temperatura di esercizio e quindi l'efficienza di singole fasi del sistema MTG. Inoltre, l'utilizzo di tecniche di stampa 3D permette la realizzazione di recuperatori con geometrie estremamente complesse con un'area di scambio incrementata e pareti sottili, che contribuiscono all'efficientamento dello scambio termico.

Le attività di ricerca del WP2 saranno articolate su quattro linee di attività.

La prima LA (LA 2.1) si conclude al primo SAL, e prevede:

- Sviluppo di feedstock ceramiche idonee per la stampa 3D di recuperatori ceramici per processi di produzione di energia basati su microturbine a gas e loro caratterizzazione;
- Definizione dei parametri del processo produttivo del materiale ceramico di riferimento per AM, incluso il post-processing (e.g. cicli termici di degasaggio e sinterizzazione);
- Realizzazione di provini per le caratterizzazioni chimico-fisiche e microstrutturali del materiale ceramico ottenuto per AM;
- Caratterizzazione chimico-fisiche e microstrutturali del materiale sinterizzato, realizzato tramite stampa 3D di provini e successivi processi di consolidamento (risultati sperimentali, LA 2.1).

La seconda LA (LA 2.2), inizierà al tredicesimo mese e si concluderà alla fine del secondo SAL. Prevede:

- Ottimizzazione della feedstock ceramica e sua caratterizzazione;
- Realizzazione di provini per le caratterizzazioni del materiale ceramico ottenuto per stampa 3D;
- Caratterizzazione e l'individuazione delle proprietà termomeccaniche del ceramico avanzato ottenuto da stampa 3D;
- Progettazione del disegno CAD ottimale per la produzione del componente in materiale ceramico, eventualmente modificato con DfAM;
- Produzione del file STL idoneo alla stampa 3D;
- Realizzazione stessa del dimostratore ceramico ottenuto tramite stampa 3D.

La terza LA (LA 2.3), di competenza dell'Università di Bologna, inizierà alla partenza del progetto e si concluderà alla fine del primo SAL.

Prevede:

- Utilizzo del banco prova presente nei laboratori dell'Università di Bologna, adatto all'esecuzione di test sperimentali su microturbine e sviluppato nell'ambito del precedente progetto PTR, per ottenere dati utili alla determinazione delle specifiche per il materiale ceramico da utilizzare per la realizzazione dello scambiatore di calore;
- Produzione del modello CAD di uno scambiatore a partire dal reverse engineering di uno scambiatore metallico contenuto all'interno di una MTG commerciale. Il modello dovrà tenere conto delle dimensioni ottenibili con le tecniche di produzione messe a punto nei LA precedenti e delle proprietà meccaniche del materiale ceramico stesso;
- Sviluppo di un modello di simulazione e valutazione dell'incremento di efficienza ottenibile utilizzando i materiali ceramici.

La quarta LA (LA 2.4), ancora di competenza dell'Università di Bologna, inizierà al mese tredicesimo del progetto e si concluderà alla fine del secondo SAL. Prevede:

- Rivisitazione ed estensione delle funzionalità del banco prova presente presso i laboratori dell'Università di Bologna per la realizzazione di prove sperimentali utili alla determinazione dell'efficienza di scambio termico di scambiatori metallici e/o ceramici;
- Validazione del modello di simulazione sviluppato nel LA precedente e valutazione dell'incremento di efficienza ottenibile utilizzando i materiali ceramici e verifiche sperimentali delle principali condizioni di funzionamento su allestimento di prova non ottimizzato.

Le principali criticità riscontrabili nella LA 2.1 e 2.2 sono legate alla possibilità di ottenere provini con proprietà non rispondenti alle aspettative e conseguentemente al fatto che il materiale messo a punto non abbia i requisiti meccanici e chimico-fisici richiesti. Il superamento di queste eventuali criticità potrà avvenire mediante la modifica e ottimizzazione dei parametri del processo di

fabbricazione.

Un'ulteriore criticità consiste nella difficoltà di stampa 3D di componenti prototipali di geometria estremamente complessa con elevato grado di definizione e bassa rugosità superficiale. L'acquisto di una stampante industriale maggiormente performante consentirà di incrementare la precisione e la riproducibilità di stampa e, conseguentemente, la realizzazione di una serie di prototipi ceramici ad elevata accuratezza superficiale.

La definizione dei parametri di processo CVI sarà vincolata al grado di porosità residua dei campioni in SiC che si otterranno mediante LDM e richiederà quindi una fase di messa a punto iterativa.

Tutte le criticità descritte appaiono quindi superabili grazie al know-how pregresso.

Le principali milestones del WP2 si possono sintetizzare come segue:

- Individuazione dei materiali per lo sviluppo della feedstock (materiale ceramico, additivi, disperdenti, fotoiniziatori, etc.);
- Sviluppo di una feedstock costituita da un opportuno materiale ceramico avanzato, ottimizzata per una specifica tecnica AM;
- Messa a punto di opportuni cicli di fabbricazione e post processing con la determinazione dei parametri caratteristici di processo;
- Caratterizzazione del materiale stampato;
- Realizzazione di un dimostratore di recuperatore termico per MTG in materiale ceramico mediante una specifica tecnica AM;
- Simulazione e validazione dell'incremento di rendimento ottenibile utilizzando i materiali ceramici e le geometrie innovative;
- Progettazione di un banco prova finalizzato alla futura verifica sperimentale dei componenti ceramici realizzati tramite AM.

Il raggiungimento degli obiettivi previsti nell'ambito del WP3 sarà garantito dalle competenze tecnico scientifiche dello staff (ricercatore e personale tecnico) e dalle strumentazioni già presenti nei centri di ricerca coinvolti nelle attività. Da sottolineare che da anni ENEA sta svolgendo attività progettuale nel settore dei materiali catalizzatori ed ha laboratori di riferimento con apparecchiature allo stato dell'arte per la realizzazione e caratterizzazione funzionale dei materiali di interesse. Lo svolgimento delle attività previste in questo WP prevede l'uso di strumentazione di piccolo taglio, specifica per la sintesi, i cui costi potranno essere facilmente coperti dal budget di spesa. Sarà inizialmente condotto uno studio approfondito sui materiali idonei alla ICCU finalizzato all'individuazione di opportuni precursori dei LDO e dei 2D TMO, che non siano nocivi o tossici, e che abbiano le caratteristiche adatte alla sintesi dei materiali individuati. Allo stesso tempo si individueranno le tecniche di sintesi che rientrano nella tipologia della sintesi da soluzione e che siano potenzialmente scalabili. Successivamente alla verifica della fattibilità della preparazione di tali materiali, si effettueranno preliminari test di adsorbimento e desorbimento della CO₂, con il duplice scopo di verificare la funzionalità e ottimizzare la composizione e/o struttura, in feedback con le proprietà funzionali. Caratterizzazioni chimiche, fisiche e strutturali consentiranno di mettere in relazione le caratteristiche dei materiali con le proprietà funzionali.

La possibilità di realizzare, tramite AM, scaffold ceramici a geometria complessa ed elevata area superficiale, personalizzabili in funzione della camera di reazione, della tipologia di catalizzatore, e dei flussi gassosi al suo interno, risulta essere estremamente interessante per la versatilità della sua applicazione, rispetto a svariati processi chimici e per la possibilità di incrementare l'efficienza di tali processi. Lo sviluppo di catalizzatori magnetici supportati su manufatti convoluti realizzati per additive manufacturing verrà perseguito da due laboratori ENEA dislocati in Casaccia e a Faenza in collaborazione con il Laboratorio Catalisi Eterogenea del Dipartimento di Chimica dell'Università di Roma Sapienza, grazie ad attività di supporto volte a chiarire la composizione dei materiali prodotti, la morfologia delle particelle supportate, le proprietà di superficie che determinano l'attività catalitica dei materiali.

Questi obiettivi saranno perseguiti attraverso quattro attività tecnico-scientifiche in continuo feedback. Brevemente, il lab. ENEA Casaccia svilupperà metodi di sintesi di nanoparticelle magnetiche su supporti di γ -Al₂O₃ realizzati mediante AM dal lab. ENEA di Faenza a valle di un processo di sviluppo di feedstock ed ottimizzazione delle condizioni di stampa. Saranno investigati processi termici di consolidamento strutturale ed attivazione dei catalizzatori. Sarà valutata l'attività catalitica dei materiali sviluppati nel processo di produzione di gas di sintesi a partire di miscele di metano/acqua/anidride carbonica in rapporto variabile. Uniroma1 svolgerà attività di supporto nella caratterizzazione chimico fisica dei catalizzatori realizzati e misurerà l'attività catalitica dei materiali sviluppati utilizzando metodi di riscaldamento tradizionali. Infine, svilupperà dei metodi di analisi dei campioni post-reforming per individuare eventuali criticità.

La proposta descritta nel WP4 mira allo studio di materiali compositi che consentano un aumento di efficienza e durabilità di turbine eoliche, anche utilizzando approcci di eco-design.

Si partirà dallo sviluppo di nuovi filati e tessuti (LA 4.1) che possano essere utilizzati come supporti all'interno di materiali compositi al fine di alleggerirne la struttura. La prima milestone (M1) sarà quindi rappresentata da stoppini e/o filati con caratteristiche meccaniche che le rendano potenzialmente adeguate al rinforzo, ad esempio, di "spar caps" o shell panels delle pale. La seconda milestone (M2) consisterà nello sviluppo di tessuti utili al consolidamento soprattutto di shell panel o componenti nel settore del minieolico.

Eventuali criticità, rappresentate da meccanica non adeguata o non uniformità del filato verranno affrontate agendo, i) a livello dell'architettura tessile (es. aumento della componente con tensile strength più elevata, aumento della componente vergine a vantaggio di quella riciclata); ii) a livello della chimica delle fibre laddove agendo opportunamente con sizing chimico o via plasma sarà possibile modulare e migliorare l'interazione fra fibre di natura diversa (es. rCF e canapa).

Contemporaneamente si intende procedere a sviluppare nuove matrici termoidurenti vitrimeriche (LA 4.2) al fine di aumentare la

durabilità dei compositi per l'eolico. I vitrimeri sono una delle tecnologie che potrebbe estendere la vita delle pale grazie a meccanismi di "autoriparazione". La prima milestone della LA sarà rappresentata dalla selezione progettazione e sintesi di vitrimeri che garantiscano legami intercambiabili, condizioni di processabilità compatibili con i successivi rinforzi e caratteristiche meccaniche adeguate a porzioni di pala (M3).

La seconda milestone (M4) consisterà nella verifica delle caratteristiche di riparabilità e/o riprocessabilità della resina, che potranno essere indotte sulla base di stimoli esterni. In caso contrario, si procederà alla ricerca di soluzioni che possano accelerare la risposta del polimero [6].

La durata a lungo termine dei vitrimeri soprattutto in condizioni meteorologiche estreme, risulta ancora poco investigata. Inoltre, la loro resistenza alla fatica in particolare sotto carichi dinamici, così come la loro resistenza sotto impatti ad alta energia, come gli impatti con gli uccelli, potrebbe richiedere ulteriori indagini. Alcune di queste criticità verranno affrontate nella LA 4.3, in cui si verificherà a seguito della sintesi di compositi a matrice vitrimerica (SAL I), il loro comportamento degradativo in condizioni di esercizio (SAL II). La strategia per limitare i danni da erosione di detti compositi verrà affrontata nella LA 4.4 (SAL I) ed a sua volta verificata in condizioni di esercizio (SAL II). Le principali milestone di queste attività saranno: compositi adatti a costruire una porzione di pala (M5) ed una tecnologia che ne ritardi la degradazione (M6), preservando l'efficienza della pala. La LA 4.5 infine si propone di sviluppare processi per recupero e riuso di fibre da materiali compositi costituenti le attuali pale eoliche (M7) nonché dai nuovi materiali sviluppati nelle LA 4.1. Inoltre, saranno esplorate nuove strade di riutilizzo di questi materiali a fine vita, ad esempio mediante stampati in 3D (M8).

Le LA risultano tutte correlate ma allo stesso tempo autoconsistenti, al fine di impedire che i rischi su una di esse impattino sull'intero progetto.

A fronte dei costi affrontati, il raggiungimento dei risultati previsti avrà ricadute nel settore del minieolico, ma anche in ambiti tecnologici diversi: tessuti innovativi anche funzionali, architetture tessili utili a progettare strutture biomimetiche con applicazione nel campo del rinforzo di compositi per svariati ambiti, materiali in grado di rispondere a stimoli esterni, ingegnerizzazioni di superfici in grado non solo di proteggere materiali ma anche di conferire loro nuove funzionalità (si pensi ad un'aerodinamica di pale migliorata grazie alla finitura superficiale).

Le proposte di soluzioni innovative avanzate nel WP5 si basano su idee e principi specifici per ogni componente/dispositivo indagato. Per lo sviluppo delle pale eoliche l'idea di base è provvedere alla sostituzione dei polimeri termoindurenti comunemente impiegati nella realizzazione delle pale, ma che presentano criticità legate alla possibilità di riciclo a fine vita, con polimeri termoplastici di origine naturale. Questi ultimi consentono di fare ricorso a materiali di origine naturale o derivanti da prodotti di scarto anziché impiegare materie prime per la realizzazione di resine termoindurenti, con evidenti benefici in termini di sostenibilità ambientale. Per quanto concerne i costi, recenti studi [7] hanno dimostrato che le pale composite delle turbine eoliche realizzate in materiale termoplastico possono costare il 4,7% in meno di una pala epossidica equivalente. Tale riduzione del costo è dovuta a fattori quali una riduzione dei costi di capitale, tempi di ciclo più rapidi e minori richieste di energia e di manodopera.

Inoltre, possono essere sottoposti a percorsi di riciclo per essere reimpiegati in nuove applicazioni.

Benefici economici sono attesi anche dalla sostituzione di parte delle fibre artificiali in vetro o carbonio con fibre naturali. Difatti, il costo energetico per la produzione delle fibre è mediamente stimato tra 15 e 30 MJ/kg per le fibre di vetro e 300-400 MJ/kg per le fibre di carbonio. Quello di una pala eolica di massa tra 6 e 8 tonnellate può raggiungere i 50 GJ se in composito in fibra di vetro e 150 GJ per compositi in fibra di carbonio. Notevolmente inferiori invece sono i costi energetici legati alla produzione di fibre naturali (nell'ordine di 4-5 MJ/kg).

L'aggiunta di microcapsule autoriparanti consente, invece, la riparazione di eventuali difettosità introdotte dalle condizioni di esercizio e quindi di allungarne la vita utile. La sperimentazione da condurre include processi di estrusioni dei materiali costituenti il composito fibrorinforzato desiderato (resine di origine vegetale, fibre naturali e/o artificiali e microcapsule) per l'ottenimento di filamenti da inviare successivamente a un sistema di manifattura additiva basata su tecnologia denominata Fused Deposition Modeling (FDM). La caratterizzazione fisica, termica e meccanica dei prodotti ottenuti dal processo di AM consentirà di ottimizzare i parametri di processo fino a valori che ne attestino l'efficacia e la replicabilità. Una analisi di simulazione fluidodinamica computazionale (CFD) del comportamento aerostutturale di una pala ottenuta impiegando in parte o interamente i materiali sviluppati, completerà la dimostrazione dell'efficacia dei risultati attesi.

Le principali milestone sono rappresentate dall'ottenimento di filamenti estrusi senza e con microcapsule autoriparanti, dalla realizzazione di campioni mediante manifattura additiva dei suddetti filamenti e dai risultati della simulazione CFD su una pala a geometria fissata.

Per quanto riguarda le strutture portanti in acciaio, le nuove formulazioni di rivestimenti protettivi, applicati su substrati di acciaio di dimensioni ridotte con tecnologie scalabili, dovranno avere una resistenza ad ambienti corrosivi di categoria CX e di immersione Im4, come definiti dalla norma UNI EN ISO 12944-2:2018 Pitture e vernici - Protezione dalla corrosione di strutture di acciaio mediante verniciatura - Parte 2: Classificazione degli ambienti. A tal fine devono essere sottoposti a idonei test di laboratorio che simulano queste condizioni naturali in un intervallo di tempo ridotto definito dalle norme UNI EN ISO 12944-6:2018 Pitture e vernici - Protezione dalla corrosione di strutture di acciaio mediante verniciatura - Parte 6: Prove di laboratorio per le prestazioni e UNI EN ISO 12944-9:2018 Pitture e vernici - Protezione dalla corrosione di strutture di acciaio mediante verniciatura - Parte 9: Sistemi di verniciatura per la

protezione dalla corrosione e metodi di laboratorio per le valutazioni delle performance di strutture offshore.

Per tutti i componenti e dispositivi investigati, la fattibilità tecnico-scientifica è garantita dalle competenze e dotazione strumentale presente in ENEA.

Riferimenti bibliografici

- [1] Thermophysical properties of stainless steels, R.H. Bogaard, P.D. Desai, H.H. Li, C.Y. Ho, *Thermochimica Acta*, 218, 3 May 1993, Pages 373-393
- [2] Committee of Stainless Steel Producers: *The Role Stainless Steel in Industrial Heat Exchangers*, 2001, Nickel Institute
- [3] matweb.com
- [4] S. Liu, Y. C. Shin, Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review, *Materials & Design*, 164 (2019) 107552
- [5] Non-Aerospace Applications of Titanium and Titanium Alloys, M. Peters, C. Leyens, *Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications*, Capitolo 15, Editor(s): Dr. Christoph Leyens Dr. Manfred Peters, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2013)
- [6] Yixin Ren et al., Rapid Photothermal Healing of Vitrimer Nanocomposites Activated by Gold-Nanoparticle-Coated Graphene Nanoplatelets, *ACS Appl. Nano Mater.* 2024, 7, 16, 18769–18778
- [7] Murray, R.E., et al., 2019. Techno-economic analysis of a megawatt-scale thermoplastic resin wind turbine blade. *Renew. Energy* 131, 111–119

2.7 Impatto sul sistema energetico e benefici attesi

a) Impatto e benefici sul sistema energetico

La stampa 3D si presta quindi alla realizzazioni di componenti con funzionalità implementate, quali ad esempio i componenti alleggeriti. In genere la realizzazione di questo tipo di componenti richiede l'utilizzo di processi di brasatura, incollaggio o saldatura. E' possibile invece lavorare direttamente sul modello digitale del componente, con studi di ottimizzazione topologica, individuando i volumi meno sollecitati e sostituirli con strutture trabecolari, alveolari.

Se non sono richiesti cicli di produzione brevi, cavità interne o materiali unici allora, in genere, i metodi di fabbricazione convenzionali sono ancora competitivi. Se le parti sono semplici o realizzate con leghe a basso costo e facili da lavorare, potrebbe essere sufficiente la fabbricazione non additiva come il getto d'acqua o il taglio laser con successivi lavorazioni.

Il tempo necessario per costruire o stampare in modo additivo una parte metallica può essere piuttosto lungo, il che è accettabile nei prototipi e nelle applicazioni a breve termine. La produzione additiva di metalli può ridurre i costi dei materiali e gli scarti, il che può fornire risparmi nella produzione di parti costose, realizzate ad esempio in leghe di titanio e nichel.

La realizzazione di componenti, e in particolare di scambiatori di calore realizzati in lega metallica e in materiale composito, potrebbe portare dei vantaggi per il sistema energetico in termini di:

- riduzione dei consumi energetici;
- riduzione dell'uso delle materie prime;
- ottimizzazione della catena produttiva: è possibile infatti realizzare componenti con un numero ridotto di pezzi da assemblare;
- incremento dell'efficienza mediante componenti ottimizzati tramite software di simulazione direttamente sul modello CAD, e riduzione delle fasi di ottimizzazione "trial and error";
- alleggerimento: questo è possibile e di particolare interesse anche in altri settori quali quelli della mobilità elettrica.

Nell'applicazione oggetto delle attività del WP1, la realizzazione di scambiatori in lega ferritica per le macchine ad assorbimento potrebbe portare a una maggiore diffusione di queste macchine, basate sull'assorbimento termico per produrre raffreddamento o caldo. A differenza dei tradizionali impianti di climatizzazione o riscaldamento che utilizzano motori elettrici, queste macchine funzionano sfruttando l'energia termica (come il calore di scarto) per generare refrigerazione o riscaldamento.

Le principali applicazioni delle macchine ad assorbimento sono:

- Raffreddamento e climatizzazione: vengono utilizzate in ambienti commerciali, industriali e residenziali per produrre aria condizionata. In questo caso, il calore viene utilizzato per alimentare il ciclo frigorifero, riducendo i consumi di energia elettrica;
- Riscaldamento: possono essere impiegate per produrre acqua calda sanitaria o riscaldamento in ambienti. Ad esempio, in alcune applicazioni industriali, il calore di scarto proveniente da processi produttivi viene utilizzato per alimentare il sistema di riscaldamento tramite una macchina ad assorbimento.
- Industria e impianti energetici: possono essere utilizzate per la cogenerazione, dove un impianto produce simultaneamente calore ed energia (per esempio, utilizzando il calore di un impianto di produzione di energia elettrica per il raffreddamento o il riscaldamento tramite assorbimento);
- Le macchine ad assorbimento sono particolarmente vantaggiose in situazioni in cui è disponibile una fonte di calore residuo o di scarto, come nel caso di impianti industriali o centrali termiche. Questo permette di ridurre il consumo di energia elettrica, aumentando l'efficienza complessiva e riducendo i costi operativi.

Le loro caratteristiche sono la possibilità di essere accoppiate con impianti di fonti rinnovabili, migliorando l'efficienza complessiva del sistema e ottimizzando lo sfruttamento delle fonti di energia sostenibile.

Alcuni esempi di accoppiamento con fonti rinnovabili sono:

- Impianto solare termico: Un impianto solare termico può produrre calore, che può essere utilizzato per alimentare una macchina ad assorbimento per la climatizzazione o per la produzione di acqua calda sanitaria. L'energia solare, specialmente durante i mesi estivi, è particolarmente utile per alimentare queste macchine, riducendo la necessità di utilizzare combustibili fossili o elettricità;
- Cogenerazione con biomassa: in un impianto di cogenerazione a biomassa, che produce sia energia termica che elettrica, il calore residuo da questo processo può essere utilizzato per alimentare una macchina ad assorbimento, riducendo il bisogno di altre fonti di calore e migliorando l'efficienza complessiva;
- Geotermia: un impianto geotermico può fornire l'energia termica necessaria ad alimentare una macchina ad assorbimento per la climatizzazione o il riscaldamento. I vantaggi della geotermia sono legati alla fornitura costante di energia termica e quindi trovare applicazione nel riscaldamento invernale o nel raffreddamento estivo;
- Celle a combustibile (Fuel Cell): in uno scenario di maggiore penetrazione del vettore idrogeno, è possibile ipotizzare di integrare un impianto con una cella a combustibile, la quale converte l'idrogeno in energia elettrica e calore, con una macchina ad assorbimento che sfrutti il calore residuo prodotto dalla cella, rendendo il sistema ancora più efficiente e autonomo.

L'uso di energie rinnovabili in combinazione con le macchine ad assorbimento riduce i consumi di combustibili fossili, abbassa le emissioni di CO₂ e migliora la sostenibilità dell'intero impianto. Inoltre, consente di ottimizzare il rendimento in base alla disponibilità delle risorse rinnovabili (per esempio, il sole o il calore geotermico).

I vantaggi specifici attesi dall'attività sono: una vita più lunga, grazie alla resistenza alla corrosione della lega ferritica; una maggiore efficienza di processo, grazie alla maggiore conducibilità termica della lega rispetto a quella di riferimento AISI 316 e alla geometria ottimizzata realizzata mediante stampa 3D; richieste energetiche inferiori per l'effettuazione del ciclo termodinamico del fluido; maggiore affidabilità delle macchine, grazie a componenti non saldobrasati o ottenuti per diffusion bonding; minori consumi energetici nella produzione degli scambiatori e drastica riduzione del materiale di scarto per la loro produzione; un costo inferiore della macchina per l'utente finale; minori costi in bolletta, grazie all'utilizzo di macchine che possono lavorare in autonomia sfruttando fonti rinnovabili. Le attività del WP1 inoltre potranno essere messe a sistema con competenze non solo interne a ENEA, che in passato ha realizzato macchine ad assorbimento con potenze fino a 18 kW, ma anche con aziende del panorama italiano, con il fine di sviluppare un prodotto altamente innovativo. Infatti in Italia sono diverse le aziende che propongono soluzione con sistemi ad assorbimento, tra queste: Robur, Systema, Kloben, TermoSystem, Maya. Inoltre sono diversi gli studi di progettazione e gli installatori che si occupano di sistemi con macchine ad assorbimento. Il tessuto industriale italiano del settore termotecnico sarebbe quindi pronto per recepire prodotti innovativi basati sulla manifattura additiva.

Le macchine ad assorbimento offrono numerosi vantaggi a livello ambientale, soprattutto in confronto ai tradizionali impianti a compressione. Ecco alcuni dei principali benefici:

Basso impatto sul riscaldamento globale: Le macchine ad assorbimento utilizzano come fonte di energia termica il calore (di solito scarti termici industriali, calore solare o gas naturale) e non elettricità, riducendo la necessità di impianti a combustione di combustibili fossili, contribuendo a una minore emissione di gas serra.

Utilizzo di refrigeranti naturali: Molte macchine ad assorbimento impiegano refrigeranti come l'ammoniaca o l'acqua, che hanno un impatto molto inferiore sul cambiamento climatico rispetto ai refrigeranti sintetici utilizzati nei sistemi di refrigerazione convenzionali, che spesso hanno un alto potenziale di riscaldamento globale (PRG).

Efficiente utilizzo del calore residuo: Utilizzando calore di scarto, queste macchine permettono di sfruttare energie che altrimenti andrebbero perse, contribuendo così a un utilizzo più razionale e sostenibile delle risorse energetiche.

Minore consumo di energia elettrica: A differenza dei sistemi a compressione, che richiedono un motore elettrico per azionare il compressore, i sistemi ad assorbimento non necessitano di energia elettrica in modo significativo. Questo riduce la domanda di energia elettrica e quindi l'impatto ambientale legato alla produzione e distribuzione dell'elettricità.

Minore rumore e vibrazioni: Queste macchine tendono a generare meno rumore e vibrazioni rispetto ai tradizionali sistemi di condizionamento dell'aria, che può contribuire a un ambiente urbano più silenzioso e meno inquinato acusticamente.

In generale, l'adozione di macchine ad assorbimento può essere vista come una scelta favorevole per ridurre l'impatto ambientale delle tecnologie di climatizzazione e raffreddamento, contribuendo a una gestione energetica più efficiente e sostenibile.

Lo scambiatore sviluppato da ENEA, e realizzato anche in altri materiali, potrebbe inoltre essere utilizzato all'interno di caldaie murali. Considerando che attualmente sono installate in Italia circa 20 milioni di unità, e quelle di nuova installazione, solo nel 2018, erano 750 mila unità/anno, anche ipotizzando una sostituzione per anno pari almeno al 10%, è possibile considerare notevoli vantaggi dall'utilizzo di scambiatori stampati in 3D rispetto a quelli convenzionali. Ovviamente diversi fattori influenzano la vendita di caldaie, tra i quali le normative sull'efficienza energetica, gli eventuali incentivi fiscali e la necessità di sostituire impianti obsoleti, non più efficienti, con quelli più recenti, quali le caldaie a condensazione.

Le applicazioni, mediante utilizzo della stampa 3D che impiega polimeri, metalli e ceramici, richiedono polveri con caratteristiche dimensionali e chimico-fisiche di livello elevato per garantire alte prestazioni nella realizzazione dei manufatti. Analogamente nella

chimica di processo sono utilizzati catalizzatori, reattori, sistemi elettrochimici e/o di stoccaggio energetico che richiedono materiali funzionali attivi o di supporto, distribuiti in geometrie e forme strutturate e funzionali. Le polveri prodotte tramite plasma possiedono le caratteristiche idonee a rispondere ai requisiti dei processi di stampa. Inoltre, in considerazione dell'eventuale utilizzo di precursori e prodotti provenienti anche da fonti povere e/o di riciclo, la tecnica potrà contribuire ad una migliore sostenibilità ambientale dei processi produttivi impiegati, in accordo con i principi base dell'economia circolare e dello sviluppo sostenibile.

In tale ambito si collocano le attività previste dal Centro Ricerche ENEA Portici Laboratorio SSPT-TIMAS-CMS il cui conseguimento di un componente elettrico prodotto per stampa FDM da filamenti ad alto carico di filler, sinterizzabili porterà un contributo positivo al settore energetico. Non sono presenti molti esempi componenti prodotti per Metal Material Extrusion (MMEX), ovvero stampa FFF da filamenti ad alto carico di filler e successiva sinterizzazione. Poiché la tecnica utilizza apparecchiature di stampa e processamento convenzionali, la possibilità di disporre di un sistema di produzione largamente accessibile agli utenti, fornisce un potenzialmente un rilevante vantaggio economico rispetto all'impiego di tecniche più costose come quelle di potenza (SLM/SLS).

Il miglioramento dell'efficienza dei processi elettrochimici considerati avrà un impatto positivo sul sistema energetico, riducendo significativamente l'impatto ambientale. In particolare, l'elettro-riduzione della CO₂ in etilene (C₂H₄) e/o etanolo (C₂H₅OH) rappresenta una soluzione sostenibile, grazie alla capacità di questo processo di immagazzinare energia da fonti rinnovabili in forma chimica e di ridurre le emissioni di gas serra. I test finali sui materiali di prova, realizzati tramite Additive Manufacturing (AM), si concentreranno sull'ottimizzazione di parametri strutturali come porosità, idrofobicità e geometria del reticolo, fondamentali per migliorare l'efficienza e la selettività del processo elettrochimico. L'integrazione di strati di diffusione del gas (GDL) composti da materiali conduttivi come PLA o ABS caricati con grafene e la funzionalizzazione con nanocatalizzatori permetteranno di ottenere performance superiori. Gli obiettivi includono il raggiungimento di efficienze faradiche (FE) per etilene e/o etanolo del 60-70% e densità di corrente superiori a 100 mA/cm². Questi test finali rappresentano un passo cruciale verso l'ottimizzazione di tecnologie elettrochimiche sostenibili, garantendo prestazioni competitive rispetto ai componenti tradizionali e sfruttando i vantaggi economici e di flessibilità offerti dalle tecnologie AM.

L'impiego di tecnica di stampa 3D L-PBF di multimateriali siano essi MCC che MMM, permette di utilizzare nel modo ottimale il materiale e l'energia di processo permettendo la realizzazione di componentistica non altrimenti realizzabile. Questo induce miglioramenti ambientali sia sotto l'aspetto dell'utilizzo delle risorse in termini di materie prime che di energia.

Il WP1 ha tra i suoi obiettivi anche quello di realizzare una turbina per impianti ORC (Organic Rankine Cycle) di piccola potenza, mediante l'utilizzo di processi additivi. I benefici ottenibili da questa attività sono correlati alla maggiore penetrazione, nel sistema energetico, di questo tipo di impianti, utilizzati per la generazione di energia a partire dal ciclo termodinamico di un fluido organico. Questi infatti presentano numerosi vantaggi, sia a livello ambientale che economico. E' possibile elencare alcuni dei potenziali benefici di questi impianti:

i) Sfruttamento di fonti di calore a bassa temperatura

Gli impianti ORC sono particolarmente adatti per sfruttare fonti di calore a bassa temperatura, come flussi termici industriali di scarto, il calore da impianti di fonti rinnovabili, ad esempio geotermici o solari. Questo consente di recuperare energia da fonti che altrimenti andrebbero sprecate, migliorando l'efficienza complessiva del sistema.

ii) Basso impatto ambientale

Poiché gli impianti ORC non richiedono alte temperature per generare energia, possono operare con fluidi di lavoro che hanno un basso impatto ambientale. Alcuni di questi, infatti, hanno un basso potenziale di riscaldamento globale (GWP) e non contribuiscono significativamente al cambiamento climatico, come i refrigeranti di vecchia generazione.

iii) Alta efficienza energetica

Gli impianti ORC permettono di ottenere una buona efficienza anche a temperature di calore relativamente basse, in condizioni operative quindi non contemplabili dai cicli tradizionali di generazione energetica, i quali richiedono temperature più elevate. Questo rende l'ORC ideale per applicazioni in cui le fonti di calore sono a bassa temperatura.

iv) Flessibilità e modularità

Gli impianti ORC di piccola potenza presentano un'elevata flessibilità in termini di modularità e scalabilità. Questo li rende adatti alle specifiche esigenze di PMI e ad applicazioni di potenza limitata. Trovano quindi applicazione in vari contesti: processi industriali di piccola scala fino ad applicazioni residenziali.

v) Riduzione dei costi energetici

Sfruttare il calore di scarto per generare energia riduce il bisogno di acquisto di energia esterna, abbattendo i costi energetici a lungo termine. Inoltre, per le applicazioni che utilizzano fonti di calore rinnovabili (come geotermico o solare). In generale il costo operativo dell'impianto è basso, il costo di impianto è ovviamente variabile in base alle taglie, ma deriva principalmente da alcuni componenti dell'impianto stesso, in particolare la turbina, e dal costo del fluido.

vi) Benefici per piccole e medie imprese e settore residenziale

Gli impianti ORC di piccola potenza sono ideali per le PMI che hanno bisogno di una fonte di energia a basso costo e che dispongono di

calore residuo o risorse geotermiche locali o solari. Questi impianti sono spesso più economici e facili da implementare rispetto alle soluzioni di grande scala.

L'adozione di impianti ORC di piccola potenza contribuisce alla transizione verso un sistema energetico più sostenibile, promuovendo l'uso di energie rinnovabili e la riduzione degli sprechi. La possibilità di utilizzare calore di scarto e altre fonti rinnovabili rende questo tipo di impianto una tecnologia a lungo termine adatta a un'economia circolare.

In sintesi, gli impianti ORC di piccola potenza offrono un'alternativa ecologica ed economica per la generazione di energia, rendendo più efficienti e sostenibili molteplici settori industriali e residenziali.

Gli impianti decentralizzati di tipo pico-idroelettrico consentirebbero due importanti vantaggi: l'aumento della potenza disponibile attraverso una costellazione di generatori che possono attingere a micro-sorgenti energetiche difficili da raggiungere in altri modi; la riduzione delle perdite e degli investimenti necessari alla distribuzione. La diffusione dei prodotti del progetto diventerà di larga scala quando saranno declamati i vantaggi economici e tecnici. Non in ultimo il beneficio in termini ambientali essendo il pico-hydro a bassissimo impatto dato che le opere di installazione e insediamento si traducono nelle sole opere di presa attraverso una piccola tubazione mentre la pico-centrale è un dispositivo trasportabile e posizionabile senza necessità di opere in cemento. Tale mobilità permette, oltretutto, l'uso stagionale oppure una grande flessibilità di impiego.

L'impatto e i benefici del WP2 sul sistema energetico si basano sostanzialmente sulla possibilità di incrementare l'efficienza dei sistemi di produzione distribuita, del tipo MTG, e sul potenziale utilizzo di combustibili maggiormente sostenibili, in alternativa a quelli fossili. L'utilizzo dei materiali ceramici nelle MTG consente di lavorare a temperature più elevate (in ingresso alla turbina) e pertanto di aumentare l'efficienza rispetto agli impianti attualmente presenti sul mercato. L'incremento di efficienza delle MTG si può tradurre in un immediato beneficio sul sistema energetico, perché consentirebbe una significativa riduzione dei consumi di combustibile, a parità di energia prodotta. Nel caso di utilizzo di gas naturale come combustibile, questo aspetto è estremamente importante, in quanto consente di ridurre non solo i costi di produzione dell'energia, ma anche le emissioni di CO₂.

L'introduzione di una girante in materiale ceramico nelle MTG, analizzata nello scorso PTR, comporta necessariamente l'utilizzo di uno scambiatore anch'esso ceramico, date le alte temperature coinvolte. Pertanto, le considerazioni sull'impatto sul sistema energetico e benefici attesi, che sono state esplicitate nello scorso PTR relativamente all'utilizzo di materiali ceramici nelle MTG, restano valide rafforzandosi e sono di seguito riassunte.

Se si considera un numero di 30 impianti per cogenerazione distribuita funzionanti con MTG installati nel 2018 (dati desunti dalla Relazione annuale sulla cogenerazione in Italia-Anno produzione 2018 - MISE 2020) e che le MTG attualmente sono alimentate esclusivamente a metano, si può calcolare un minor consumo per singolo impianto installato di circa 53.000 m³ di metano, che si traduce in un totale di 2.850 t/anno di CO₂ in meno immesse in atmosfera.

L'utilizzo dei materiali ceramici e il conseguente incremento del rendimento dell'impianto MTG porterebbero in ogni caso ad un risparmio di combustibile, anche se si valutasse in futuro di alimentare le MTG mediante combustibili sostenibili in sostituzione al metano (ad esempio idrogeno verde).

Inoltre, l'utilizzo delle tecniche di AM per la formatura di componenti di MTG in materiale ceramico ha il duplice vantaggio di limitare le lavorazioni meccaniche post sinterizzazione, e, conseguentemente, il consumo energetico correlato a tali lavorazioni, nonché di minimizzare l'utilizzo di materie prime, evitando sprechi ed incrementando quindi la sostenibilità ambientale del processo produttivo.

La riduzione delle emissioni di CO₂ è uno degli obiettivi principali da raggiungere per fare fronte alle problematiche ambientali. I processi di cattura e conversione della CO₂ rientrano tra i possibili approcci per limitare le emissioni di CO₂ ed evitare così il surriscaldamento globale, come raccomandato dell'Accordo di Parigi del 2015 e dal COP28. È necessario però che le tecnologie e i materiali usati a tale scopo siano idonei in termini di performance, costo e impatto ambientale. Oltre all'abbattimento della CO₂, l'ottenimento di materiali a basso costo ed "environmental friendly" rappresenta un vantaggio notevole per il sistema energia. Infatti, il processo di conversione della CO₂ consentirebbe la produzione di sostanze chimiche (combustibili liquidi e gassosi) che possono essere utilizzate per generare energia contribuendo alla decarbonizzazione di molti settori. L'interesse internazionale in questo settore è molto alto: solo nel 2024 il DOE (Department of Energy) statunitense ha investito circa 1,3 miliardi di dollari nella ricerca e sviluppo di soluzioni innovative per la decarbonizzazione del settore industriale e della generazione di energia. Il raggiungimento dei risultati prefissati in ambito internazionale avrebbe ripercussioni positive su tutti i sistemi energetici nazionali, in quanto si aprirebbero nuove opportunità economiche e tecnologiche per la produzione energetica sostenibile.

Va detto, inoltre, che la catalisi è un pilastro fondamentale dell'industria chimica e viene utilizzata in tutta la filiera produttiva, dalla produzione di carburanti, alla chimica fine, ai prodotti agrochimici (fertilizzanti e diserbanti) ai prodotti dell'industria farmaceutica. Con l'aumento delle fonti alternative di energia rinnovabile, è fondamentale lo studio, l'aggiornamento e l'evoluzione permanente dei catalizzatori e dei processi catalitici per affrontare le inevitabili variazioni nella produzione di elettricità. In particolare, tra i parametri di importanza sempre crescente dobbiamo includere l'efficienza energetica e l'adattabilità alla fornitura di energia intermittente. In questo contesto, l'induzione magnetica offre la possibilità di riscaldare direttamente i nanocatalizzatori magnetici in modo estremamente localizzato, rapido ed efficiente dal punto di vista energetico, oltrepassando l'esigenza di riscaldare l'intero ambiente del reattore

(solvente, parti del reattore, ecc.). A sua volta, ciò si traduce in temperature di processo complessive più miti e un consumo energetico inferiore. Inoltre, il rapido riscaldamento e raffreddamento dei nanocatalizzatori riscaldati magneticamente è di grande interesse per affrontare le sfide associate all'uso di energia rinnovabile fluttuante. I benefici offerti dalla catalisi magnetica sono schematizzabili nei seguenti punti: a) elettrificazione dei processi termochimici in chiave di sostenibilità energetica; b) accumulo di surplus energetici: power to gas/ power to chemicals; c) possibilità di operare i processi termochimici con fonti di energia intermittente grazie a tempi di start-up estremamente ridotti; d) messa in pratica di processi chimici altamente energivori su piccola scala; e) riscaldamento ad elevata efficienza (si riscalda direttamente il catalizzatore tramite RF superando le limitazioni legate al trasporto di calore).

I materiali innovativi che costituiranno il rinforzo delle matrici in WP4, risultano più leggeri non solo rispetto ai metalli ma anche rispetto ai più recenti rinforzi strutturali, quali le fibre di vetro.

L'alleggerimento delle turbine eoliche offre diversi vantaggi che contribuiscono a una maggiore efficienza:

- Aerodinamica migliorata: pale più leggere possono essere progettate con forme ottimizzate e profili alari più sottili, con conseguenti migliori prestazioni aerodinamiche. Ciò migliora la cattura di energia dal vento, con conseguente maggiore potenza in uscita;
 - Velocità di rotazione aumentata: componenti più leggeri consentono velocità di rotazione più elevate, consentendo alla turbina di estrarre più energia dal vento. Ciò è particolarmente vantaggioso nelle aree con velocità del vento inferiori;
 - Carichi strutturali inferiori: turbine più leggere subiscono carichi strutturali ridotti, con conseguente minore stress sui componenti. Ciò prolunga la durata della turbina e riduce i costi di manutenzione;
 - Costi di trasporto e installazione ridotti: le turbine più leggere sono più facili da trasportare e installare, il che comporta costi logistici inferiori e una distribuzione più rapida;
 - Maggiore stabilità della torre: le turbine più leggere possono essere montate su torri più alte, consentendo loro di raggiungere velocità del vento maggiori e generare più energia;
 - Minori requisiti di fondazione: il peso ridotto delle turbine più leggere riduce il carico sulla fondazione, il che si traduce in fondamenta più piccole e meno costose. Tale considerazione risulta particolarmente importante nella realizzazione di impianti eolici offshore
- Si voglia inoltre notare come anche la ricerca sulla nuova classe di termoindurenti, ovvero i vitrimeri possa portare a notevoli vantaggi per il settore eolico, in termini di:

- Estensione del tempo di vita delle pale e riduzione dei costi di mantenimento: i compositi vitrimerici saranno progettati per risultare riparabili, e questo apre enormi possibilità di agire sui difetti lavorando sotto le torri;
- Riduzione dei costi fissi del fine vita: le pale a matrice vitrimerica saranno riciclabili, consentendo di riutilizzare il composito in toto, oppure di separare le fasi matrice e rinforzo.

È chiaro come questa possibilità da un lato riduca notevolmente l'impatto ambientale e dall'altro consenta di abbattere i costi fissi di smaltimento.

All'interno del WP5, su scala del singolo componente/dispositivo, il conseguimento dei risultati consente di ottenere prodotti a maggiore sostenibilità ambientale e di più semplice riciclo a fine vita, unitamente all'allungamento della durabilità, che contribuisce a ridurre la frequenza, e quindi i costi, delle operazioni di OeM. Il beneficio sull'intero sistema energetico è rilevante, se si considera che i costi delle operazioni di OeM di un parco eolico offshore sono ad oggi stimati nella forbice 27-33% di quelli sostenuti durante l'intero ciclo di vita di un parco eolico, compresi i costi di sviluppo, progettazione, trasporto, installazione, esercizio e dismissione. I vantaggi ottenuti sui singoli componenti si ripercuotono su tutta la tecnologia di produzione elettrica da eolico, facilitandone la possibilità di implementazione sul territorio. Tale implementazione è certamente auspicabile poiché l'energia elettrica generata dall'eolico offshore galleggiante ha nel suo complesso performance ambientali migliori rispetto al mix energetico medio della rete elettrica nazionale: si stima che 1 GWh generato dall'eolico offshore galleggiante ha un potenziale impatto ambientale medio 67% inferiore rispetto a quello causato dall'energia elettrica prelevata dalla rete elettrica italiana nel 2013.

Il collegamento al fondale attraverso ormeggi e tiranti è inoltre enormemente meno impattante su fondali ed ecosistema marino rispetto alle installazioni offshore bottom-fixed. Recenti studi mettono anzi in evidenza che la presenza di piattaforme galleggianti possano fornire superfici di protezione e creare zone di sicurezza che escludono imbarcazioni e pesca, costituendo pertanto un rifugio per le popolazioni ittiche.

b) Benefici per gli utenti

Diverse istituzioni internazionali quali il Department of Energy, nella Quadrennial Technology Review, e il Dipartimento della difesa americano nell'AM-Roadmap ribadiscono i potenziali vantaggi dei processi additivi, tra i quali il miglioramento dell'efficienza, ridurre i costi e promuovere soluzioni più sostenibili. Nel futuro è previsto un maggiore incremento di prodotti realizzati con queste tecnologie e sempre maggiori richieste. È necessario quindi sviluppare in parallelo, oltre a processi innovativi e più veloci, anche nuovi materiali che possono essere utilizzati per applicazioni con determinate richieste tecnologiche. Questo richiederà anche lo studio di determinati parametri di processo per ottenere prodotti analoghi a quelli che possono essere realizzati mediante processi tradizionali. Nel caso delle attività relative allo sviluppo di una lega metallica per la realizzazione, mediante processi AM, di sistemi di scambio di calore per macchine ad assorbimento, il beneficio per gli utenti finali potrebbe derivare da una maggiore diffusione di queste macchine nel

settore della refrigerazione e della climatizzazione. Questo implica, come già discusso nella sezione precedente, una riduzione dei consumi energetici, sia in ambito industriale che residenziale, grazie al maggiore sfruttamento delle risorse energetiche rinnovabili o allo sfruttamento di flussi di calore di scarto.

È possibile anche prevedere, mediante l'utilizzo di processi additivi, la riduzione del costo dei componenti per sistemi e impianti e una riduzione del consumo di materiali. Oltre quindi a evidenti vantaggi in termini di sostenibilità dei processi produttivi, e di transizione energetica, questo implica l'ottenimento di un minor costo degli impianti e conseguentemente una riduzione dei costi in bolletta per l'utente finale.

Un discorso analogo può essere fatto per le attività che prevedono lo sviluppo e realizzazione, mediante additive manufacturing, di turbine per impianti ORC e pico-idroelettrici. I benefici per gli utenti sono misurabili nelle predette applicazioni e vantaggi. Utenze domestiche, piccole e grandi industrie, pubbliche amministrazioni sono i destinatari delle pico-centrali. Chiunque abbia dei liquidi in movimento può convogliare il flusso verso una piccola pico-centrale e ottenere un beneficio energetico. È lapalissiano come chi possiede una fonte naturale come un rivolo o un piccolo bacino possa trasformare un bene prezioso in una continua fonte energetica senza alterare considerevolmente e permanentemente l'ambiente. Non occorre installare ampie metrature di pannelli né grandi piloni per ottenere la trasformazione da fonti rinnovabili. È altrettanto ecologico pensare di usare le acque di processo o reflue. Si tratta di acque tutt'altro che pulite la cui rimozione è necessaria e richiede risorse ambientali ed economiche. Pensare di usare parte di quell'energia ridurrebbe l'impatto complessivo di questo tipo di processamento. Pertanto anche le pubbliche amministrazioni e le industrie sono i soggetti destinatari dei benefici attesi del progetto che si focalizza su pico-centrali in grado di processare acque totalmente diverse dalle comuni acque di sorgente. Va ripetuto anche il problema dell'inquinamento che conduce a considerare che le acque moderne sono cariche di particelle, detriti, inquinanti acidi e, pertanto, la vita delle giranti viene ridotta quando elaborano detti fluidi. Il progetto prevede lo sviluppo di materiali innovativi in grado di resistere a questo nuovo tipo di inquinanti che non sarebbe economico o non desiderato da filtrare a monte della pico-centrale.

Le attività svolte dal Centro Ricerche ENEA Portici Laboratorio SSPT-TIMAS-CMS prevedono lo sviluppo di un sistema per la produzione di materiali per AM, ma non solo, on demand, ovvero capace di realizzare produzioni al bisogno evitando grandi problematiche di approvvigionamento e scorte di magazzino. L'alta flessibilità del sistema consente di cambiare agevolmente la produzione. Inoltre, il plasma, sorgente ad alta intensità di energetica, costituisce un sistema "on/off" con mancanza di transitori di processo, potenzialmente riducendo quindi i costi di produzione; questa caratteristica consente in linea di principio di realizzare le produzioni in momenti di costo ridotto dell'energia. Lo sviluppo di materiali di nuova generazione per scambio termico ed elettrochimica per applicazioni di conversione e immagazzinamento dell'energia rappresenta una delle possibili strade da percorrere per l'utilizzo ridotto di combustibili fossili e la loro sostituzione con fonti di energia rinnovabile. Inoltre, l'utilizzo di tecniche AM per la realizzazione di tali obiettivi, consente la possibilità di produrre componenti customizzati ed on demand, con una associata riduzione dei costi di produzione degli elementi e delle scorte di magazzino. Parallelamente all'approfondimento dell'uso delle tecniche basate sul LASER, previste dal co-beneficiario POLIMI, l'impiego di tecniche di stampa "povere" consente l'accesso a queste produzioni ad una maggiore platea di produttori ed utenti finali.

La realizzazione di materiali elettrochimici tramite AM comporta una riduzione intrinseca dei costi di produzione, nel caso di pochi componenti complessi, mantenendo prestazioni almeno comparabili a quelle dei componenti ottenuti con tecniche tradizionali. Questa ottimizzazione si traduce in una diminuzione dei costi energetici associati ai processi, come l'elettro-riduzione della CO₂ per la produzione di etilene e/o etanolo, e alla generazione di idrogeno per applicazioni energetiche come le fuel cell. Di conseguenza, il costo dell'energia prodotta attraverso questi processi sarà significativamente ridotto, offrendo un beneficio diretto agli utenti finali, che potranno accedere più facilmente a tecnologie innovative e sostenibili. Questo approccio supporta una transizione verso un sistema energetico più efficiente, economicamente accessibile e rispettoso dell'ambiente.

Lo sviluppo della tecnologia di stampa 3D multimateriale permette di realizzare componenti non altrimenti realizzabili permettendo la riduzione dei costi sia di produzione che di esercizio. Con un investimento limitato possono essere sviluppati parametri di processo per materiali in pratica nuovi in situ per una successiva applicazione a componenti a geometria complessa per sistemi energetici che impegnati in sistemi complessi come ad esempio elettrodi di celle a combustibile ottimizzati possono supportare l'aumento dell'efficienza, la riduzione del peso e l'aumento della durata che si traduce in un minor costo per l'energia elettrica dell'utente finale [1].

I benefici attesi del WP2 per gli utenti del sistema elettrico nazionale sul sistema energetico sono principalmente correlati alla possibilità di utilizzare materiali ceramici all'interno di impianti MTG, in quanto tali materiali consentono di incrementare l'efficienza di questi sistemi di produzione distribuita.

Anche in questo caso, le considerazioni sui benefici attesi per gli utenti, che sono state esplicitate nello scorso PTR relativamente all'utilizzo di materiali ceramici nelle MTG, restano valide e sono riassunte di seguito.

L'aumento di efficienza imputabile all'uso dei materiali ceramici porta ad un incremento dell'energia elettrica prodotta, a parità di combustibile utilizzato.

Considerando il costo dell'energia elettrica, il numero di impianti MTG attualmente presenti in Italia (30 impianti), il consumo di energia

elettrica per utenza domestica italiana (dati ARERA primo trimestre 2023 [2]), si può calcolare l'utilizzo di materiali ceramici comporterebbe un surplus di energia elettrica prodotta, a parità di combustibile utilizzato, tale da coprire il fabbisogno di 1.890 utenze aggiuntive.

Riguardo i materiali bifunzionali per ICCU, quelli che si andranno a sviluppare nell'ambito delle attività del WP3 possono potenzialmente portare a una riduzione dei costi di produzione dell'energia, grazie al loro utilizzo nella sintesi di sostanze chimiche seconde riutilizzabili per la generazione di energia. L'integrazione di questa tipologia di materiali nel sistema elettrico nazionale potrebbe portare ad una riduzione dei costi in bolletta in analogia con quanto accade per le energie rinnovabili.

Riguardo i catalizzatori magnetici, lo sviluppo di materiali avanzati volti all'implementazione di reattori ultracompatti realizzati mediante AM ed alimentati mediante induzione elettromagnetica contribuisce all'elettrificazione dei processi chimici industriali. Tale avanzamento tecnologico, grazie all'utilizzo di un metodo di riscaldamento ad elevata efficienza di trasferimento di energia e alla realizzazione di reattori ottimizzati per la catalisi eterogenea, offre numerosi vantaggi/benefici al settore chimico industriale. Inoltre, i catalizzatori sviluppati nel progetto possono potenzialmente portare a risparmi di costi, di materiali e di sostanze inquinanti (nichel e cobalto), grazie ad un aumento dell'efficienza del reattore. A medio termine, l'industria dei processi chimici svolgerà un ruolo fondamentale nell'affrontare le grandi sfide sociali legate alla sostenibilità. La necessaria transizione del settore chimico per affrontare tali sfide includerà, tra l'altro, la decarbonizzazione e l'uso di energie rinnovabili. L'intensificazione dei processi mediante l'applicazione della catalisi magnetica rappresenta un elemento critico di questa transizione.

Il LCOE (costo livellato dell'energia) è un indicatore che prende in considerazione il costo del capitale (CapEx), i costi di esercizio e manutenzione (OeM) e la produzione energetica annuale.

Una parte significativa del CapEx di una turbina eolica è legata al costo dei materiali utilizzati nella costruzione delle sue componenti chiave. Essi rimangono a livelli molto elevati rispetto ai livelli pre-pandemia, non soltanto per quanto concerne le terre rare necessarie per i magneti nel generatore, ad es. neodimio (+300%), ma anche per quanto riguarda i materiali necessari alla produzione delle pale, ad es. resine epossidiche (+200%) [3]. I rischi legati all'approvvigionamento aumentano ulteriormente questi costi. Va da sé che ricercare nuovi materiali che potrebbero diminuire il quantitativo dei materiali attualmente utilizzati nella costruzione delle pale (es. un aumento della percentuale di fibre a scapito della matrice nei compositi fibro-rinforzati; una diminuzione di materiali critici nella realizzazione dei rivestimenti protettivi) si candida ad avere un impatto sulla diminuzione del LCOE.

Benché quantificare con precisione il miglioramento dell'efficienza dovuto alla riduzione del peso richieda simulazioni specifiche, studi e report di settore suggeriscono come la riduzione del peso delle pale possa portare a un aumento di alcuni punti percentuali nella produzione energetica annuale (AEP), che insieme a costi di installazione e manutenzione inferiori possono contribuire a un costo livellato dell'energia (LCOE) inferiore.

Soluzioni che consentano di ridurre l'erosione delle pale, consentirebbero di ridurre il costo dell'energia, essendo essa direttamente correlata all'aumento del LCoE. L'erosione infatti riduce la produzione energetica annuale di una turbina eolica tra il 4% e il 20%, a seconda del livello e della gravità del fenomeno. I costi di riparazione di un set di 3 pale sono stimati in un minimo di 50.000 € nei parchi eolici onshore e circa il doppio di questa cifra negli impianti off-shore.

Inoltre, nel tentativo di ridurre il costo dell'energia, le turbine eoliche multi-megawatt devono garantire un'elevata disponibilità (Disponibilità: rapporto tra il numero totale di ore durante un certo periodo, escluso il numero di ore in cui il sistema di generazione della turbina eolica non ha potuto essere utilizzato a causa di manutenzione o situazioni di guasto, e il numero totale di ore nel periodo, espresso in percentuale [4], affidabilità (Affidabilità: la capacità di funzionare come richiesto, senza guasti, per un dato intervallo di tempo, in date condizioni [5, 6]).

I materiali proposti nel WP4 si candidano potenzialmente a garantire almeno uno dei requisiti sopracitati di "Disponibilità ed Affidabilità": l'alleggerimento dei rinforzi, unito alla capacità della matrice e quindi del composito di essere riparato lavorando sul componente senza separare le fasi, dovrebbe diminuire i tempi di fermo e diminuire la possibilità di danni permanenti.

Infine, i materiali proposti, finalizzati a facilitare le possibilità di riuso e riciclo, si candidano a diminuire i costi fissi di smaltimento della componente pala.

I risultati attesi dal WP5 possono determinare un allungamento della vita utile di alcuni componenti dell'aerogeneratore, con particolare riferimento alle pale eoliche e alla componentistica in metallo. Questo implica una riduzione della frequenza di manutenzione ordinaria prevista nella programmazione delle attività di OeM, i cui relativi costi si stimano ad oggi attorno al 30% di quelli complessivi imputabili all'intero ciclo di vita di un parco eolico. Una riduzione dei costi di OeM implicherebbe una riduzione dei costi di produzione di energia elettrica e di conseguenza una riduzione del costo in bolletta per l'utenza. In aggiunta, un miglioramento atteso è anche nel campo dell'accumulo di energia prodotta, grazie allo sviluppo di supercapacitori più efficienti, in grado di determinare un incremento della produzione elettrica immessa in rete, con conseguente riduzione del costo unitario di energia prodotta.

[1] <https://www.samaterials.it/enhancing-fuel-cell-performance-with-platinized-titanium-anodes.html>

[2] <https://www.arera.it/it/dati/eep35.htm>

[3] BNEF: 1H2022 Wind Turbine Price Index (WTPI): Turbulence Stays

[4] IEC 60050-415:1999 International Electrotechnical Vocabulary (IEV)—Part 415: Wind Turbine Generator Systems. International Electrotechnical Commission IEC: Geneva, Switzerland, 1999

[5] IEC 60050-192; International Electrotechnical Vocabulary (IEV)—Part 192: Dependability. International Electrotechnical Commission IEC: Geneva, Switzerland, 2015

[6] Carroll, J.; McDonald, A.; McMillan, D. Failure rate, repair time and unscheduled O e M cost analysis of offshore wind turbines. *Wind. Energy* 2016, 19, 1107–1119

c) Previsione delle ricadute applicative

Le principali ricadute applicative e della possibile industrializzazione dei risultati delle attività previste nel WP1 sono:

- lo sviluppo della lega ferritica per applicazioni in ambienti altamente corrosivi alcalini (acqua-ammoniaca), consentirà la realizzazione di scambiatori di calore realizzati mediante processi additivi. Questi sono dei prodotti ad elevato valore aggiunto e potrebbero portare enormi vantaggi in termini produttivi ad un eventuale utilizzatore del settore industriale. Questi vantaggi sono riassumibili nei seguenti punti: personalizzazione dell'impianto, mediante la modifica dei suoi componenti principali a partire da un modello CAD e dall'ottimizzazione di questi mediante simulazioni numeriche; ridotta necessità di approvvigionamento di componenti assemblabili e lavorati; ridotti consumi di materiale nella realizzazione degli stessi con evidente vantaggi in termini ambientali; ridotti consumi energetici; ottenimento di incentivi grazie al raggiungimento di obiettivi ambientali e energetici.

Il livello elevato di sviluppo richiederà passi successivi per un'eventuale industrializzazione, quali i test in condizioni di esercizio reali.

Questo tipo di test richiederanno, in future azioni progettuali, un partner industriale con competenze nel settore delle macchine ad assorbimento. Il livello atteso di conoscenze sviluppate all'interno del progetto potrà però ridurre il divario tra ricerca e applicazioni industriali. In questa direzione sono volte le azioni di coinvolgimento dei cobeneficiari, in particolare l'attività dell'Università degli Studi di Ferrara dedicata allo studio dei fenomeni di corrosione sulla lega ferritica e sulla lega di titanio;

- Lo sviluppo di scambiatori di calore passivi, Heat Pipes, realizzate mediante additive manufacturing potrà portare ricadute enormi nel settore energetico. In analogia a quanto già riportato per gli scambiatori per le macchine ad assorbimento, le heat pipes portano vantaggi al settore industriale in particolare del settore dell'elettronica, del processamento e dell'immagazzinamento dei dati. I tubi di calore sono sistemi estremamente compatti, a ciclo chiuso, e non richiedono manutenzione per il loro funzionamento. In uno scenario futuro, nel quale sarà richiesto un sempre maggiore utilizzo di sistemi di immagazzinamento e processamento di dati e di immagazzinamento di energia, a seguito di una grande penetrazione di impianti per la sua produzione basati su fonti rinnovabili, è previsto un incremento dello sviluppo di sistemi compatti di smaltimento del calore, ed eventuale riutilizzo;

- La produzione di polveri sferoidali di qualità mediante la tecnologia plasma DC presente a Portici comporterebbe un'apertura ed un'espansione di questa tecnica a molti campi di applicazione, in particolare a tutti i campi di applicazione delle tecniche di additive manufacturing, tra cui quello energetico.

Lo sviluppo del plasma termico alla produzione di polveri sferoidali fornirebbe un esempio di realizzazione di processi on demand con il potenziale utilizzo intelligente delle risorse e dell'energia

- Materiali per processi di elettrolisi: al termine delle attività proposte, i materiali di prova sviluppati tramite AM saranno ottimizzati per un futuro scale-up, con promettenti prospettive e benefici concreti per il settore energetico in chiave di sostenibilità. L'attuale necessità di una transizione energetica basata su una "chimica verde" è di primaria importanza, e in questo contesto l'impiego dell'elettrolisi per produrre "idrogeno verde" rappresenta un passo cruciale verso lo sviluppo di un'economia a zero emissioni.

I test finali sui materiali di prova, destinati all'elettrolisi dell'acqua e all'elettro-riduzione della CO₂ in etilene e/o etanolo, mirano a garantire prestazioni in linea o superiori con lo stato dell'arte attuale, contribuendo alla riduzione delle emissioni di gas serra e promuovendo la sostenibilità. In particolare, l'ottimizzazione dei parametri strutturali, come la porosità e l'idrofobicità, dei materiali prodotti consentirà di migliorare l'efficienza energetica e la selettività dei processi. I risultati attesi offriranno soluzioni realistiche e sostenibili, contribuendo alla riduzione delle emissioni di gas serra e fornendo nuove opportunità per un'industria energetica più responsabile e competitiva.

- Materiali per processi AM multimateriale: una volta individuate le coppie di materiali ed i parametri di processo migliori su piccola scala il processo L-PBF, entro opportuni limiti, può essere scalato andando ad aumentare i serbatoi di stampa e applicando laser in parallelo, raggiungendo dimensioni di componenti utili per le realizzazioni di impianti di produzione energetica industriale.

- Realizzazione di turbine mediante AM per produzione di energia elettrica sfruttando le energie rinnovabili. Nel passato alcuni esempi di impianti ORC di piccola taglia sono stati realizzati anche sul territorio italiano. Questi timidi tentativi non si sono concretizzati successivamente in realtà strutturate. Questo potrebbe essere stato causato anche da una difficoltà nella flessibilità di realizzazione degli impianti che nel reperimento di componenti. I risultati delle attività del progetto saranno sia dati sperimentali che componenti reali. Questi saranno utili per la valutazione di aziende che vogliono investire in impianti di piccola taglia per il settore residenziale e industriale, creando un prodotto finale al momento non presente sul mercato. Nel caso dello sfruttamento della risorsa idrica, oltre alle predette ricadute sull'utenza domestica e pubblica, va approfondito l'aspetto dell'uso industriale di una pico-centrale con girante a bassa vulnerabilità agli agenti aggressivi. La possibilità di rendere capillare la distribuzione energetica può condurre all'implementazione di questi sistemi in processi industriali, chimici, farmaceutici là dove occorra una quantità di energia per sottoprocessi di difficile accessibilità

o localizzati lontano dalla distribuzione. È il caso di tecnologie ancillari al processo padre o la sensoristica per il controllo. Ancor più indicativo è il caso di processi delocalizzati e distribuiti dove la generazione è attualmente economica solo attraverso batterie il cui impatto ambientale ed economico associato alla fabbricazione, manutenzione e reintegro nell'ambiente è al momento enorme. Il progetto prevede di fornire i connotati e le metodologie per la fabbricazione aggregata delle giranti pertanto un ulteriore impatto è proprio la successiva fase di produzione massiva che coinvolgerà molti attori delle tecnologie emergenti e innovative fornendo nuovi posti di lavoro invece che continuare a deviare la richiesta di componenti i sistemi di generazione verso i sistemi produttivi asiatici peraltro nella direzione opposta alla sostenibilità ambientale dei processi di fabbricazione.

All'interno del WP2, la realizzazione di un componente dimostrativo in ceramico, quale il recuperatore, mediante AM in grado di sostituire l'analogo in materiale metallico operante in impianti MTG, per aumentarne l'efficienza, costituirà una dimostrazione di fattibilità, che potrà perciò portare, a livello industriale, ad una maggiore apertura verso i materiali ceramici avanzati e le loro peculiarità.

Tali materiali, infatti, ad oggi trovano poca diffusione nel mondo industriale, a causa degli elevati costi di fabbricazione di componenti complessi con le tecniche tradizionali. Le tecniche di stampa 3D rappresentano una valida chance per incrementare la loro diffusione oltre applicazioni di nicchia quali il settore dentale o l'aerospazio.

L'attività di diffusione dei risultati conseguiti sarà infatti propedeutica all'individuazione di eventuali stakeholder industriali, ai quali proporre i materiali messi a punto per la tecnologia di AM considerata.

In un'ottica in cui si vogliono ridurre le emissioni di CO₂, lo sviluppo di tecnologie ICCU, all'interno del WP3, rappresenta un valido approccio. Le attività del progetto focalizzate all'utilizzo di materiali sostenibili e processi scalabili e meno energivori possono dare la spinta necessaria affinché tali tecnologie possano raggiungere un livello prototipale ed uscire dalla scala dei test di laboratorio. Inoltre, si individuano due principali ricadute applicative delle attività riguardanti i catalizzatori magnetici. La prima è l'acquisizione della capacità di progettare e realizzare mediante AM dei substrati monolitici in materiale ceramico poroso. Questa abilità è ampiamente spendibile, al di là della realizzazione dei catalizzatori magnetici obiettivo di questo progetto, in tutto il mondo della catalisi eterogenea. La seconda è l'applicazione ai processi chimici in flusso, in particolare quelli energivori, di fonti di energia intermittente grazie alla versatilità e adattabilità della catalisi magnetica. A medio termine è possibile ipotizzare lo sviluppo di reattori di scala-media utilizzabili in piccole unità decentralizzate, alimentabili a richiesta.

In relazione al WP4, si ritiene che la combinazione fra fibre naturali e vitrimeri possa creare una potente sinergia applicabile soprattutto nel settore del minieolico, banco di prova per il testing di nuovi materiali e tecnologie. La collaborazione con aziende del settore a valle questo progetto potrebbe portare alla sperimentazione di turbine utili a servire zone impervie in cui l'installazione di grandi pale fosse proibitiva. Successivi sviluppi del progetto amplierebbero il mercato del minieolico, soprattutto in zone difficilmente raggiungibili ove la portata di resine, compositi e quindi pale che per difetti che rispondono ai requisiti della riparazione in loco potrebbero essere più facilmente riparate, risulterebbe particolarmente efficace.

Si voglia inoltre notare come a livello internazionale, il mercato del minieolico presenti un quadro più dinamico e diversificato rispetto a quello italiano e progetti del tipo di quello descritto possono contribuire a rivitalizzarlo. Si citano ad esempio la LIAM F1 UWT, turbina prodotta dalla compagnia olandese The Archimedes, che si distingue per la sua forma elicoidale ispirata alla spirale di Archimede, o la Birmingham Blade, la prima turbina eolica urbana progettata dall'intelligenza artificiale. L'A.I. può contribuire ad analizzare il microcontesto, a livello soprattutto di microclima, tipologia e direzione del vento, mentre la creatività umana a progettare soluzioni esteticamente e paesaggisticamente integrate (si pensi a Pergosolar come esempio in tal senso). A cascata, la stampa 3D permetterebbe di realizzare stampi customizzati per la realizzazione di forme geometriche ottimizzate, grazie all'utilizzo dei nuovi materiali studiati nel progetto: le proprietà dei compositi fibra-vitrimeri potranno essere modulate per adattarsi a specifiche esigenze applicative, consentendo di progettare componenti con caratteristiche meccaniche ottimizzate.

Non si esclude infine la possibilità di implementare le attuali strategie per la riparazione di componenti di pale eoliche, grazie all'impiego dei materiali sviluppati ed in funzione del danno. Queste strategie includono: rivestimenti per la riparazione e protezione dall'erosione superficiale, riempimento e sigillatura mediante resine vitrimeriche per piccole fessurazioni superficiali o piccole delaminazioni e crepe, oppure l'uso di tappi o toppe per danni strutturali, comprese le fibre fessurate.

Le attività da svolgere nel WP5 porteranno a risultati significativi che potrebbero avere ricadute applicative importanti in vari settori industriali. In particolare, i risultati ottenibili nella progettazione delle nuove pale secondo i principi dell'eco-design aprirebbero la strada a possibili applicazioni in altre industrie chiave che impiegano materiali compositi, come l'Automotive, l'Aeronautica o l'Aerospazio. Un'altra potenziale ricaduta applicativa offerta dai risultati della ricerca condotta nel WP5 è la possibilità per le aziende operanti nel settore di sviluppare nuovi prodotti o migliorare quelli esistenti, attraverso una riduzione dei tempi e dei costi di produzione o degli impatti ambientali, oppure un incremento dell'efficienza di produzione.

L'applicazione dei risultati della ricerca potrebbe rispondere a bisogni emergenti in diversi mercati. Ad esempio, i risultati auspicati sullo sviluppo di supercapacitori a prestazioni elevate, da destinare al settore eolico, potrebbero rilevarsi di grande interesse in altri settori dell'energia rinnovabile, che ambiscono ad adottare nuovi sistemi di accumulo energetico in grado di gestire in maniera più efficiente le

fluttuazioni di produzione da fonti rinnovabili.

Non secondarie sono le già citate ricadute di carattere economico ed occupazionale che i risultati delle attività del WP5 possono avere in settori industriali chiave della nostra nazione: produzione di acciaio, industria navalmecanica, infrastrutture portuali. Dal punto di vista occupazionale, infatti, si stima che il raggiungimento dell'obiettivo auspicato di 20 GW di capacità eolica offshore installata al 2050 nelle acque nazionali del Mediterraneo genererebbe 27000 nuovi occupati in Italia (Eolico Offshore Galleggiante: opportunità nel percorso di decarbonizzazione e ricadute industriali per l'Italia, 2024, The European House Ambrosetti).

2.8 Verifica dell'esito del progetto

a) Oggetti e documentazione dei risultati finali

Gli obiettivi e conseguentemente gli oggetti e le documentazioni che verranno fornite alla fine del progetto nell'ambito del WP1 sono i seguenti:

- Sviluppo della lega ferritica per la produzione di scambiatori di calore per macchine ad assorbimento a ciclo acqua/ammoniaca;
- Definizione dei trattamenti termici per l'ottimizzazione della microstruttura (affinamento del grano) e caratterizzazioni microstrutturali. Da effettuare presso il centro ENEA di Casaccia;
- Realizzazione di campioni di lega ferritica, mediante processi additivi a letto di polvere, per le successive prove di corrosione (definizione delle geometri opportune e stampa campioni) e da fornire all'Università di Ferrara. Caratterizzazioni microstrutturali. Da effettuare presso il centro ENEA di Casaccia;
- Realizzazione di campioni in lega di titanio, mediante processi additivi a letto di polvere, per le successive prove di corrosione (definizione delle geometri opportune e stampa campioni) e da fornire all'Università di Ferrara. Caratterizzazioni microstrutturali. Da effettuare presso il centro ENEA di Casaccia;
- Prove sperimentali per lo studio del comportamento a corrosione della lega ferritica e della lega di Titanio, su campioni ottenuti mediante stampa 3D, con processi a letto di polvere. Da effettuare presso l'Università di Ferrara;
- Realizzazione di campioni di lega ferritica, mediante processi additivi a letto di polvere, per le successive prove di saldabilità (definizione delle geometri opportune e stampa campioni) da effettuare presso il centro ENEA di Casaccia;
- Prove di saldabilità della lega ferritica ottenuta mediante stampa 3D con altri materiali, quali ad esempio AISI 316 da effettuare presso il centro ENEA di Casaccia;
- Sviluppo di nuovi compositi per l'additive manufacturing, con conducibilità termica implementata ($> 1 \text{ W/mK}$) partendo da polimeri a bassissima conducibilità termica (circa $0,2 \text{ W/mK}$), per applicazioni nel settore dello scambio termico. Matrici utilizzate: resine acriliche e termoindurenti; cariche: materiali ceramici, quali nitruri e ossidi, nanostrutture di carbonio, metallici. Ad integrazione verranno studiate le proprietà elettriche dei compositi sviluppati. Da effettuare presso il centro ENEA di Casaccia;
- Realizzazione di campioni e dimostratori mediante processi additivi a bassa temperatura e basso consumo energetico (quali DLP o SLA o FDM), partendo dai materiali compositi a alta conducibilità termica sviluppati;
- Sviluppo di modelli numerici per l'analisi delle prestazioni di sistemi bifase per lo scambio termico e Analisi delle prestazioni di tubi di calore realizzati tramite tecniche di Additive Manufacturing. Da effettuare presso l'Università degli Studi "Federico II" di Napoli;
- Realizzazione di campioni in lega di titanio, mediante processi additivi a letto di polvere, per i successivi post-trattamenti superficiali (definizione delle geometri opportune e stampa campioni) e da fornire all'Università di Roma "La Sapienza". Caratterizzazioni microstrutturali. Da effettuare presso il centro ENEA di Casaccia;
- Individuazione delle migliori condizioni operative per aumentare la produzione dell'impianto Plasma Termico, sui materiali adoperati. Verifica dei risultati mediante caratterizzazione morfologica (SEM) e strutturale (XRD) e granulometriche delle polveri ottenute. (per polveri metalliche Flowability $< 40 \text{ s/50 g}$; densità paragonabile ad analoghi commerciali).
- Produzione mediante plasma di opportune quantità di polvere necessarie alla stampa (per polveri metalliche lotti da 200 g).
- Sviluppo di processi di purificazione e classificazione delle polveri prodotte. Verifica dei risultati mediante caratterizzazione morfologica (SEM) e strutturale (XRD)
- Realizzazione di manufatti di prova con filamenti commerciali mediante stampa MMEX/FFF. Test di verifica delle capacità di scambio presso Laboratorio MADD e/o POLIMI e/o UNISA.

Le attività condotte all'interno del WP1 dall'Università di Salerno prevedono:

- Test finali su materiali di prova per applicazioni elettrochimiche (elettrodi e celle elettrochimiche in flusso di elettrolita) prodotti tramite AM.
- Nuovi nanocatalizzatori per riduzione elettrochimica della CO_2 .
- Deliverable, per LA, descrittivi l'avanzamento e il conseguimento degli obiettivi.

In fase di valutazione dei risultati verranno elencati i seguenti test di verifica: test di verifica delle capacità elettrochimiche (tecniche potenziostatiche/galvanostatiche, gascromatografia-spettrometria di massa) dei nanomateriali e dei nanomateriali caricati sui materiali

di prova; caratterizzazioni chimico-fisiche (XRD, TGA, SEM/EDX, TEM) a valle della sintesi dei nanomateriali e per la valutazione delle tecniche di deposizione ottimali di tali nanomateriali sui materiali di prova; test di stampa 3D per la verifica del corretto ottenimento dei materiali.

Le attività condotte all'interno del WP1 dal Politecnico di Milano prevedono:

- I test di verifica delle attività riguarderanno in primis la valutazione della densità in funzione dei parametri di processo e le conseguenti caratteristiche metallurgiche e micromeccaniche (durezza).
- In funzione della densità massima e minima ottenibile potranno essere ipotizzate applicazioni strutturali, funzionali o miste dei materiali ed ei processi;

L'attività di ENEA focalizzata sullo sviluppo di turbine per impianti ORC, da realizzare mediante AM prevede:

- La realizzazione, presso il Centro Casaccia di ENEA, di campioni mediante processi a letto di polvere, per successive prove in camera del vento (da effettuare presso l'Università di Firenze), al fine di definirne il comportamento termofluidodinamico. L'attività prevede anche lo studio su campioni a diversa rugosità superficiale;
- Studio delle condizioni di stampa in processi a letto di polvere: definizione delle rugosità in funzione dell'angolo di sbalzo rispetto al piano di stampa. In generale, la rugosità superficiale aumenta man mano che l'angolo di inclinazione aumenta rispetto all'asse di costruzione. Con angoli più acuti (maggiore inclinazione rispetto all'asse di costruzione), la superficie può diventare meno liscia e più ruvida;
- La realizzazione, presso il Centro Casaccia di ENEA, di campioni mediante processi a letto di polvere, per successive prove di trattamento superficiale volte alla riduzione della rugosità superficiale;
- Realizzazione di campioni per prove meccaniche, mediante processi a letto di polveri, volti alla definizione di una "mappa" del comportamento meccanico dei componenti stampati in funzione della posizione di stampa;
- Prototipazione di una turbina (girante e voluta) per un impianto ORC per la produzione di energia, utilizzando tecniche di stampa a bassa temperatura;
- Realizzazione di una turbina (girante e voluta) in lega metallica per successive prove sperimentali su banco prova;
- Sviluppo del modello e sua validazione, con utilizzo di tool numerici per studiare l'effetto della rugosità superficiale sul flusso del fluido attorno alle pale delle turbine; in alternativa si provvederà a mettere a punto modelli semplificati 2-3D basati su SW commerciali;
- Definizione della geometria dei campioni per l'effettuazione dei prove in camera del vento per studi degli effetti della rugosità superficiale su comportamento termofluidodinamico di componenti stampate (Università di Firenze);
- Progettazione delle prove sperimentali in camera del vento e risultati sui campioni realizzati da ENEA (Università di Firenze);
- Definizione delle modalità di test delle turbine su banco prova sperimentali, che effettuerà ENEA presso esterni (Università di Firenze);
- Studio dei componenti critici degli impianti ORC e dei fluidi di lavoro (Università di Firenze);
- Progetto di un banco prova per l'effettuazione di misure sperimentali di turbine per impianti ORC (Università di Firenze);
- Realizzazione, presso il Centro Casaccia dell'ENEA, di elementi di girante, ed eventualmente di una intera, per impianti di produzione di energia idroelettrica di taglia pico, mediante processo a letto di polvere EBM. L'attività prevede l'interazione all'interno del progetto con l'Università di Roma "La Sapienza", finalizzata ai successivi test da effettuare sugli elementi di turbina.

Gli oggetti e la documentazione prodotta dalle attività sperimentali nelle quali è coinvolta l'Università di Roma "La sapienza", e derivanti anche dalla collaborazione con ENEA, sono riportati di seguito:

- nell'ambito delle attività per la realizzazione dei turbine per sistemi idroelettrici a bassa potenza, verranno definiti strumenti e modelli per l'AM, basandosi sul modello solido fabbricabile e flessibile della girante. Si inizieranno anche i modelli riferiti ai costi di fabbricazione. Le piattaforme di pre-processamento del modello solido saranno di due categorie: open-source e industriali. A seconda della tecnologia e a seconda del tipo di macchina verranno impiegate piattaforme come CURA, Simplify 3D, Chitobox, Lychee Slicer 3, Suite Z, Preform per le macchine open-source e Nautica, Fictor, GrabCAD per quelle industriali.
- Acquisizione e prove su diversi materiali commerciali e i componenti (matrice e rinforzo);
- definizione di diverse geometrie di prova come parallelepipedi, test bench, calibration test, Resin Exposure Range Finder e fabbricazione con considerazioni sul costo complessivo come fattore riducente le combinazioni di quelle tecnologie e/o materiali non ragionevolmente economiche per lo scopo di questo progetto, introducendo indici di efficacia e qualità dei componenti prodotti come combinazione lineare dell'accuratezza e ripetibilità;
- dopo una prima sperimentazione e dopo la pianificazione secondo Design of Experiments, saranno forniti risultati in termini di analisi statistica dei dati: Main Effect e Interaction Plot per l'identificazione dei livelli medi ottenuti, Analisi della Varianza per determinare i fattori significativi, con definizione di una mappa di fabbricabilità;
- definizione di metodi di caratterizzazione dei campioni stampati con diverse tecniche, focalizzandosi sull'aspetto della superficie. I metodi di misura profilometrica saranno riportati nella relazione in termini di posizione delle misure sui provini e sulle giranti, lunghezze di esplorazione, filtri a norma 16610, parametri di rugosità. A seguito di queste misure si riporteranno le osservazioni sperimentali e aggiorneranno i costituenti dei modelli, già definiti, fornendo ulteriori indicazioni e guide sul posizionamento in tavola del componente per

i fini di funzionalità dello stesso. Il report riguarderà l'applicazione della stessa metodologia di indagine per determinare l'effettività e l'efficacia delle lavorazioni di finitura di massa applicate alle giranti.

- Risultati dell'attività sperimentazione condotta mediante le tecnologie di mass finishing su campioni stampati. Verranno acquisiti campioni da ENEA. Si descriveranno le tecniche candidate, i media impiegati, i parametri di processo suggeriti dai proponenti. Gli andamenti dei profili e dei parametri di rugosità saranno forniti sotto forma grafica e tabellare corredati da osservazioni sperimentali e dai tempi e costi di produzione;
- Descrizione dei risultati generati da attrezzature specifiche per le prove di rendimento delle giranti (condizioni di prova e la catena di misura per l'acquisizione dei dati) e di durabilità saranno descritte e riportate sotto forma tabellare. Dimostratore di girante collaudata in laboratorio e provvista delle curve di rendimento.

I risultati finali e metodi di verifica attesi relativi al WP2 sono di seguito riportati.

Per quanto concerne la LA 2.1, gli obiettivi principali possono essere schematizzati come segue:

- Analisi e reperimento dei materiali (polveri ceramiche, additivi, disperdenti, fotoiniziatori...) più idonei allo sviluppo delle feedstock destinate alla fabbricazione tramite stampa 3D di recuperatori ceramici avanzati per processi di produzione di energia basati su microturbine a gas;
- Sviluppo sperimentale di feedstock ceramiche innovative, ottimizzate per le tecniche di AM scelte;
- Definizione dei parametri di post-processing (e.g. cicli termici di degasaggio e sinterizzazione) delle tecnologie AM;
- Caratterizzazione del materiale sinterizzato, realizzato tramite stampa 3D di provini e successivi processi di consolidamento.

Il conseguimento degli obiettivi relativi alla LA 2.1 potrà essere verificato tramite i risultati sperimentali e i metodi descritti nel rapporto tecnico-scientifico contenente la descrizione delle attività svolte riguardanti:

- la scelta di materiali costituenti le feedstock ceramiche, destinate alla realizzazione di un recuperatore per MTG;
- le fasi di sviluppo delle feedstock, di messa a punto delle quantità di polveri ceramiche, additivi, disperdenti, fotoiniziatori e altri additivi presenti nelle feedstock;
- la messa a punto e ottimizzazione dei parametri di post processo;
- le fasi di stampa, tipologia e numero di provini per la caratterizzazione;
- i risultati delle prove di caratterizzazione.

Lo sviluppo di batch di feedstock, stampabili tramite le tecniche AM selezionate, costituirà in sé uno strumento di verifica (materiale); analogamente la stampa 3D, con i successivi processi di consolidamento, di almeno 10 provini per le caratterizzazioni costituirà lo strumento di verifica della bontà del metodo di fabbricazione messo a punto e del relativo obiettivo prefissato.

I provini dovranno, inoltre, avere le caratteristiche di seguito riportate e che costituiscono lo strumento di verifica inerente alle proprietà richieste (risultati sperimentali):

- Densità relativa in sinterizzato, maggiore del 90% rispetto alla densità teorica;
- Conducibilità termica a temperatura ambiente, maggiore di 25 W/m K;
- Conducibilità termica a 1000°C, maggiore di 4 W/m K.

L'obiettivo della diffusione dei risultati della LA 2.1 potrà essere verificato tramite l'accesso alla relativa documentazione prodotta (raccolta file).

Per quanto concerne la LA 2.2, gli obiettivi principali possono essere schematizzati come segue:

- Ottimizzazione della feedstock sviluppata nella LA 2.1 e/o individuata commercialmente, al fine di perfezionarne o selezionarne le proprietà, per l'ottenimento di quella maggiormente performante e adeguata alla tecnologia AM scelta nella LA2.1;
- Studio delle proprietà reologiche delle feedstock, per la definizione della preparativa e l'ottimizzazione del comportamento reologico;
- caratterizzazione chimico-fisica e microstrutturale, a supporto del processo di ottimizzazione delle feedstock, e caratterizzazione termomeccanica, finalizzata alla corretta progettazione del dimostratore;
- Progettazione di un dimostratore di recuperatore ceramico: modifica di un disegno CAD; eventuale applicazione del DfAM, generazione di file STL;
- Realizzazione di un recuperatore ceramico, con il materiale e la tecnologia di AM individuati/scelti: stampa 3D del componente dimostrativo; sinterizzazione del componente; verifica dimensionale tramite fotogrammetria.

Il raggiungimento di tali obiettivi potrà essere verificato tramite i risultati sperimentali e i metodi descritti nel rapporto tecnico-scientifico contenente la descrizione:

- dell'attività e dei risultati relativi all'ottimizzazione e caratterizzazione di feedstock ceramiche;
- dei risultati della caratterizzazione reologica della feedstock ceramica;
- delle fasi di stampa, tipologia e numero di provini per la caratterizzazione;
- delle fasi di post processo di stampa 3D;
- dei risultati delle prove di caratterizzazione chimico-fisica, microstrutturale e termomeccanica;
- la descrizione della realizzazione mediante tecnica AM del dimostratore ceramico.

La feedstock ottimizzata dovrà, inoltre, avere le seguenti proprietà (risultati sperimentali):

- Contenuto solido DLP \geq 35 vol%;

- Viscosità DLP, $\eta \approx 5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, ad uno shear rate di 10 s^{-1} .

Un altro strumento di verifica del raggiungimento degli obiettivi/risultati della LA 2.2 sarà la realizzazione di almeno 10 provini, destinati alle caratterizzazioni del materiale ceramico da stampa 3D, come prova della bontà del metodo di fabbricazione messo a punto.

I provini dovranno, inoltre, avere le caratteristiche di seguito riportate e che costituiscono lo strumento di verifica inerente alle proprietà richieste (risultati sperimentali):

- Densità relativa in sinterizzato, maggiore del 90 % rispetto alla teorica;
- MOR a temperatura ambiente, $\text{MOR} \geq 200 \text{ MPa}$;
- MOR ad alta temperatura ($T \geq 1000 \text{ }^\circ\text{C}$), maggiore di 150 MPa;
- Modulo di Young, maggiore/uguale 250 GPa.

Per la stampa 3D del dimostratore, verrà utilizzato il disegno CAD del componente in materiale ceramico, eventualmente modificato con DfAM, da convertire poi in file STL per la stampa DLP del componente ceramico. La produzione del file STL idoneo alla stampa DLP consisterà nello strumento di verifica.

La realizzazione stessa del dimostratore ceramico ottenuto tramite stampa 3D costituirà l'elemento di verifica dell'obiettivo relativo; un ulteriore elemento di verifica sarà costituito dalle seguenti caratteristiche del dimostratore (risultati sperimentali):

- Volume minimo stampato: 3300 mm^3 ;
- Ritiro lineare maggiore del 10%.

L'obiettivo della diffusione dei risultati della LA 2.2 potrà essere verificato tramite l'accesso alla relativa documentazione prodotta (raccolta file).

Per quanto riguarda le LA 2.3 e 2.4, i principali obiettivi possono essere riassunti come segue:

- Definizione di un set di parametri di progetto per lo scambiatore, determinati a partire dalle misure sperimentali effettuate sul banco con turbina a gas attuale;
- Realizzazione di un modello CAD dettagliato, pronto per l'implementazione nelle successive fasi di prototipazione e fabbricazione.

Modello CAD disponibile in formato STL;

- Creazione di un modello numerico per la simulazione del funzionamento della MTG, che sarà utilizzato per guidare ulteriori sviluppi progettuali. Il modello sarà disponibile in formato Matlab-Simulink, e sarà validato, utilizzando i dati sperimentali raccolti sul banco prova, in modo da poter essere utilizzato come strumento di analisi e sviluppo per futuri studi;

- Un banco prova aggiornato, in grado di supportare la sperimentazione avanzata di recuperatori di calore per MTG. Il target del banco sarà la misura dell'efficienza di scambio con una accuratezza del 5-10%.

L'obiettivo della diffusione dei risultati delle LA 2.3 e 2.4 potrà essere verificato tramite l'accesso alla relativa documentazione prodotta (raccolta file).

Nel WP3 i risultati attesi, che verranno riportati all'interno dei report, sono i seguenti:

- preparazione di LDH attraverso tecniche da soluzione e relativo processo di trasformazione in LDO;
- preparazione di TMO 2D attraverso tecniche da soluzione con particolare riferimento all'utilizzo di template;
- caratterizzazioni chimico-fisiche, strutturali e morfologiche dei materiali sintetizzati, prima e dopo i test di capacità adsorbitiva e desorbitiva;
- sviluppo di un setup sperimentale per le analisi delle proprietà funzionali;
- test funzionali preliminari per la verifica delle capacità di adsorbimento e desorbimento, ed individuazione delle relative condizioni di processo

- sviluppo dei catalizzatori supportati, le relative caratterizzazioni chimico-fisiche e le proprietà dissipative dei materiali realizzati.

Saranno riportate nel dettaglio le condizioni sperimentali di realizzazione dei supporti, la sintesi dei catalizzatori supportati e le proprietà chimico fisiche e funzionali per processi chimici di produzione di gas di sintesi, lo stato dei materiali post-reforming ed i parametri che più ne influenzano l'attività catalitica.

- produzione di un catalizzatore magnetico costituito da nanoparticelle di lega NiCo supportate su scaffold realizzati mediante additive manufacturing.
- caratteristiche composizionali della feedstock preliminare, le sue proprietà reologiche, i cicli termici post-stampa e il numero di provini realizzati
- composizione della feedstock finale, la geometria degli scaffold e le loro proprietà fisiche, nonché i parametri di processo per il loro consolidamento e sinterizzazione.

I risultati attesi per ogni attività che si prevede di svolgere nel WP4, insieme ai principali test di verifica da eseguire durante la fase di valutazione, sono elencati di seguito:

LA 4.1 Prototipi di stoppino, filato e tessuto in fibre vegetali naturali eventualmente in combinazione con rCF o fibre termoplastiche da riciclo; metodologia per la compatibilizzazione di fibre con caratteristiche chimico-fisiche differenti nella medesima architettura tessile; Verifica delle proprietà meccaniche di stoppini e filati mediante Single Fiber Tensile Test (SFTT). Verifica della tessibilità del filato anche mediante collaborazione con azienda esterna.

LA 4.2 Formulazioni di resine con legami covalenti dinamici; metodologia per processare dette resine in funzione delle LA successive. Test meccanici, test di pressatura a caldo per verificare la effettiva capacità del materiale di fluire ad elevate temperature, ed individuare quindi la capacità del vitrimerico di modificare la sua forma. Test ciclici di riparabilità/riciclo, al fine di valutare l'eventuale decadimento delle proprietà durante successivi step di riscaldamento

LA 4.3 Prototipi in eco-compositi ottenuti per impregnazione dei filati e tessuti della LA 4. 1 con i vitrimeri formulati nella LA 4.2. Prototipo di componente o sub-componente di pala in ecocomposito.

Test meccanici a flessione e trazione ed osservazioni morfologiche per verificare la tipologia di rottura. Test di degradazione in condizioni di esercizio. Processabilità per componenti pale da minieolico.

LA 4.4 Metodologia per la ingegnerizzazione e la funzionalizzazione superficiale di provini a matrice vitrimerica;

Test per la verifica dell'adesione composito-coating (scratch test, nanoindentazione, tribologia), Test che permettano di valutare le performance del rivestimento, ovvero prove di invecchiamento in condizioni di esercizio.

LA 4.5 Processi per il recupero di Fibre e per il loro riutilizzo per la Produzione di provini stampati in 3D. Campionatura di fibre recuperate. Formulazione e stampa di provini con fibre recuperate.

Test per la verifica delle caratteristiche chimico-fisiche delle fibre recuperate.

I risultati sopra menzionati saranno oggetto dei rapporti tecnici indicati nella tabella riassuntiva di cui al paragrafo 4.

All'interno del WP5, l'attività LA 5.1 porterà alla redazione di un rapporto tecnico che metterà in evidenza le maggiori criticità dei componenti e dispositivi investigati e, integrando i risultati delle attività LA 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5, consentirà di effettuare un primo studio di prefattibilità tecnico-economica e ambientale delle soluzioni proposte.

Al termine della LA 5.2 si disporrà di diverse tipologie di filamenti in materiale composito, ottenute variando la matrice polimerica (polimeri termoplastici, polimeri sintetici derivati da monomeri naturali poli(acido lattico), polimeri naturali e da fermentazione microbica) e la tipologia di fibra, sia di origine naturale (basalto, legno, ginestra, canupolo, ecc.) che artificiale (ottenute da pale eoliche riprocessate a fine vita). Tutte le attività svolte e i risultati ottenuti saranno riportati in un rapporto tecnico finale.

Al termine della LA 5.3 si disporrà di filamenti ottimizzati nella LA 5.2 e ulteriormente ingegnerizzati attraverso l'aggiunta di microcapsule autoriparanti. Il processo sarà perfezionato sulla base delle risultanze pervenute dalle attività delle LA 5.6 e 5.9. Tutte le attività svolte e i risultati ottenuti saranno riportati in un rapporto tecnico finale.

Al termine della LA 5.4 saranno prodotte due tipologie di rivestimenti protettivi, le prime realizzate con vernici caricate con nanofiller commerciali ed eventualmente sottoposti a pretrattamenti, le seconde con nanocariche inorganiche, ricavabili da residui vegetali o naturali, che potenzialmente potrebbero presentare idonee proprietà di resistenza a corrosione. Tutte le attività svolte e i risultati ottenuti saranno riportati in un rapporto tecnico finale.

Al termine della LA 5.5 si disporrà di almeno due tipologie di materiali in forma di nanostrutture, principalmente a base di carbonio, utili per la preparazione di elettrodi per supercapacitori. Tali materiali saranno messi a punto utilizzando i risultati delle caratterizzazioni strutturali su di essi condotte. Inoltre, utilizzando tali materiali saranno preparati degli elettrodi che verranno testati dal punto di vista funzionale con una serie completa di caratterizzazioni elettrochimiche in cella a tre elettrodi. Sullo svolgimento di tali attività si produrrà un rapporto tecnico.

Al termine della LA 5.6 si disporrà di campioni in scala di laboratorio in materiale composito fibrorinforzato, rappresentativi di porzioni di pale eoliche e ottenuti mediante processo di manifattura additiva. Ulteriore risultanza sarà un contenitore, in scala di laboratorio, di materiale polimerico o a base di polimero fibrorinforzato ottenuto mediante processo di AM per il supercapacitore. Sullo svolgimento di tali attività si produrrà un rapporto tecnico.

Al termine della LA 5.7 si disporrà di un sistema in scala di laboratorio, realizzato mediante sensori in fibra ottica di tipo FBG, per il monitoraggio continuo e real-time di componenti di aerogeneratori. Sullo svolgimento di tali attività si produrrà un rapporto tecnico.

Al termine della LA 5.8 si disporrà dei componenti del dispositivo prototipale supercapacitore, e quindi di elettrodi, separatore ed elettrolita solido. Con tali componenti sarà realizzato un prototipo avente la configurazione elettrodica che è risultata maggiormente performante in termini di densità di energia, densità di potenza e capacità specifica. Sui singoli componenti e sul dispositivo completo saranno condotte caratterizzazioni analitiche e test funzionali. Tutte le attività svolte e i risultati ottenuti saranno riportati in un rapporto tecnico finale.

Al termine della LA 5.9 sarà prodotto un rapporto tecnico con i risultati della campagna di caratterizzazione termica, fisica, meccanica e dei test di durabilità svolta sia per quanto riguarda le soluzioni relative alle pale (LA 5.2, 5.3 e 5,6) che per quanto riguarda i rivestimenti anticorrosione realizzati con le formulazioni messe a punto nella LA 5.4. Tale test saranno fondamentali e forniranno indicazioni utili per l'ottimizzazione dei processi condotti nelle linee LA 5.2 - 5.3 - 5.4 e 5.6. In aggiunta, le risultanze della campagna di caratterizzazione forniranno elementi utili per le attività di simulazione numerica fluidodinamica di un rotore eolico da condurre all'interno della linea LA 5.12 e impiegante le pale sviluppate nel corso del WP5.

La linea LA 5.10 produrrà un rapporto tecnico sulla valutazione dei potenziali impatti sociali lungo l'intero ciclo di vita delle tecnologie sviluppate, considerando aspetti quali le condizioni di lavoro, il rispetto dei diritti umani, e gli effetti sulle comunità locali. Il rapporto tecnico includerà anche una dettagliata analisi della criticità dei materiali, prendendo in considerazione le supply chain e l'impatto sul mercato delle materie prime, con le conseguenti ricadute sociali.

La linea LA 5.11 produrrà un rapporto tecnico sullo sviluppo e la caratterizzazione, mediante metodi elettrochimici, di materiali per supercondensatori a base di Pedot:PSS. Il rapporto includerà la definizione delle procedure di misura impiegate e i risultati ottenuti in seguito allo sviluppo e ottimizzazione dei materiali compositi a base di PEDOT:PSS con diversi filler carboniosi e agenti disperdenti, alla caratterizzazione elettrochimica, all'analisi comparativa dei filler carboniosi testati e alla valutazione dell'effetto di alcuni agenti disperdenti

La linea LA 5.12 produrrà un rapporto tecnico sui risultati di simulazione numeriche di rotori eolici realizzati con i componenti sviluppati e per installazioni off-shore. In particolare, le simulazioni consentiranno di mettere in evidenza le eventuali differenze in termini di comportamento strutturale e risposta dinamica che la pala sviluppata nel corso del WP5 potrebbe avere rispetto alla pala standard. Le attività permetteranno altresì di identificare le condizioni operative critiche e i limiti di funzionamento delle pale sviluppate.

La linea 5.13 produrrà un rapporto tecnico sulla valutazione dell'integrazione nella metodologia LCA degli impatti degli impianti eolici offshore sulla biodiversità e sui servizi ecosistemici. Saranno evidenziate eventuali lacune delle proposte attuali e individuati possibili miglioramenti, ad esempio attraverso l'inclusione di nuovi parametri o di nuove tecniche di integrazione tra metodologie per la valutazione degli impatti ambientali diverse dalla LCA. Saranno testati i indicatori o i metodi ritenuti rilevanti per le attività del WP5, applicandoli cioè ai componenti sviluppati e a processi produttivi basati sulla manifattura additiva.

La linea 5.14 produrrà un rapporto tecnico sull'analisi del ciclo di vita di materiali e processi innovati investigati per le turbine eoliche offshore. I risultati includeranno un'analisi di scale-up tecnologico, che permetterà di modellare la transizione dai prototipi di laboratorio alla produzione industriale, integrando i dati nei modelli LCA per stimare gli impatti ambientali su larga scala. In aggiunta sarà condotta un'analisi LCA cradle-to-grave che considererà le varie fasi del ciclo di vita della turbina eolica: l'acquisizione delle materie prime (estrazione e lavorazione), la fase di produzione del componente, la fase d'uso (considerando le prestazioni in condizioni operative tipiche dell'eolico offshore nel Mar Mediterraneo), incluse le operazioni di manutenzione, e il fine vita (riciclo, recupero o smaltimento). L'analisi includerà lo scale-up tecnologico per stimare gli impatti su scala industriale, con particolare attenzione alle specificità del contesto italiano.

In ultimo, al fine di implementare le sinergie tra i diversi gruppi di lavoro, anche con l'intento di valutare incontri congiunti finalizzati alla diffusione dei risultati, in occasione del termine del periodo di rendicontazione di ciascun SAL, sarà programmato un incontro per condividere e armonizzare l'andamento del progetto. Opportune relazioni saranno incluse nei SAL.