

**PIANO TRIENNALE DI REALIZZAZIONE 2025-27 - RICERCA DI SISTEMA  
ELETTRICO NAZIONALE**

**Progetti di ricerca di cui all'art. 10 comma 2, lettera a) del decreto 26 gennaio 2000**

**AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA E LO SVILUPPO  
ECONOMICO SOSTENIBILE**

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto 1.4 - Materiali e dispositivi di frontiera per applicazioni energetiche

Durata: 36 mesi

Periodo attività: 01/01/2025 - 31/12/2025

**ABSTRACT ATTIVITA' ANNUALE:**

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. Nel WP1 verranno sviluppati materiali metallici e compositi per applicazione nello scambio termico. Il WP2 mira a sviluppare ed ottimizzare l'uso di materiali ceramici avanzati in componenti di microturbine a gas (MTG). Nel WP3 le attività sono dedicate allo sviluppo di due tipologie di catalizzatori: 1) per la cattura e l'uso integrato della CO<sub>2</sub> (Integrated carbon dioxide capture and utilization, ICCU); 2) di tipo magnetico, in forma di nanoparticelle magnetiche supportate per reazioni di reforming. 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. Nel WP5 sono stati 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.

Nella presente annualità, all'interno del WP1, focalizzato sui materiali metallici e compositi per i processi di manifattura additiva, sono state definite le geometrie dei campioni per lo studio delle proprietà meccaniche e della resistenza alla corrosione della lega ferritica ad alta conducibilità termica e della lega di Titanio prodotta mediante Electron Beam Melting (EBM) (LA1.1), e ci si è concentrati sullo sviluppo di polveri per AM, da produrre mediante impianto sperimentale Plasma Termico, a partire da polveri irregolari di lega di titanio Ti6Al4V e rame (LA1.3). Sono state definite le geometrie dei campioni, da stampare mediante EBM, per le prove in gallerie del vento e per valutare l'effetto della rugosità superficiale in funzione dell'inclinazione delle superfici (LA1.5). Sono stati messi a punto dei modelli numerici per la simulazione dei dati sperimentali ottenuti su prototipi di scambiatori di calore bifase di tipo flat (LA1.7), ed è stata effettuata un'ottimizzazione preliminare di materiali di prova per processi di elettro-riduzione della CO<sub>2</sub> mediante tecnologie di Additive Manufacturing (LA1.10). Nella LA1.14, è stato affrontato lo studio dell'effetto della rugosità delle superfici e dei diversi fluidi in relazione all'utilizzo di componenti realizzate mediante Additive Manufacturing e definito un set-up sperimentale per misure in galleria del vento.

Il progetto si articola su due linee di ricerca per lo sviluppo di materiali ceramici avanzati ad alte prestazioni. All'interno del WP2, nella LA2.1, per la linea “Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-DLP”, è stata formulata feedstock ceramica fotosensibile, che ha consentito il settaggio preliminare dei parametri di stampa della stampante DLP, nell'ottica di realizzare un prototipo di recuperatore ceramico con geometrie complesse. Per la linea “SiC-LDM”, sono stati stampati mediante tecnica LDM campioni in carburo di silicio, e definiti i parametri per l'infiltrazione di SiC tramite processo CVI, per massimizzarne

densità e conducibilità termica e studiare le possibilità di applicazione nelle microturbine a gas. All'interno della LA 2.3 UNIBO ha sviluppato strumenti e metodologie per la definizione dei parametri di progetto di uno scambiatore di calore (recuperatore termico) ceramico e dei benefici ottenibili in termini di aumento di rendimento dall'utilizzo di componenti ceramici innovativi in microturbine a gas per la produzione di energia.

All'interno del WP3, le attività della linea LA3.1 si sono concentrate sullo sviluppo di materiali nanostrutturati bidimensionali per la cattura e l'utilizzo integrato della CO<sub>2</sub>. In particolare, sono stati studiati gli idrossidi a doppio strato (LDH) come precursori di materiali bifunzionali, individuando le tecniche di sintesi ottimali e i metalli catalitici più idonei.

Per quanto riguarda la linea LA 3.3, durante il primo anno è stata sviluppata una formulazione a base di boehmite per produrre supporti porosi in  $\gamma$ -allumina tramite stampa 3D. I provini ottimali mostrano una superficie specifica di 230 m<sup>2</sup>/g. Successivamente, tramite impregnazione con sali di nichel e cobalto, sono stati realizzati catalizzatori magnetici che saranno successivamente testati.

Nello svolgimento delle attività della LA 3.5, la caratterizzazione (AAS, FESEM-EDX, XPS) di catalizzatori NiCo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ha mostrato nanoparticelle strutturalmente stabili. Il rapporto metallico e la miscela reattiva influenzano i depositi carboniosi ridotti nel sistema ricco di cobalto (Ni<sub>30</sub>Co<sub>70</sub>) grazie all'attivazione della CO<sub>2</sub>. I primi prototipi monolitici in stampa 3D mostrano proprietà comparabili ai granuli e promettente reattività.

Il WP4 ha visto l'avvio delle attività di sviluppo di eco-compositi per il settore eolico, attraverso la selezione e caratterizzazione di fibre vegetali e tecnologiche, l'impostazione delle prime lavorazioni tessili e l'individuazione della filiera di trasformazione (LA 4.1). Parallelamente sono state avviate attività su matrici epossidiche vitrimeriche (LA 4.2), trattamenti superficiali al plasma per il miglioramento dell'interfaccia e la realizzazione di coating protettivi (LA 4.4), nonché le prime prove di recupero e valorizzazione di fibre di carbonio da compositi tipici del settore eolico a fine vita (LA 4.5).

Nel WP5 sono state effettuate attività di interesse per il settore dell'eolico off-shore. Le attività della LA5.1 hanno interessato lo studio di prefattibilità e analisi delle criticità connesse allo sviluppo di componenti per sistemi eolici offshore, con particolare riferimento ai materiali per pale eoliche e ai sistemi di protezione della componentistica metallica. La linea di attività 5.2 ha riguardato lo sviluppo di soluzioni avanzate di compound per la realizzazione di pale eoliche offshore, attraverso attività di ricerca sperimentale basate sull'estrusione di polimeri termoplastici fibrorinforzati. I materiali selezionati (PLA, ABS e PETG) e le tipologie di rinforzo (microfibre naturali di lino e canapa e fibre di vetro) sono stati individuati come candidati promettenti e successivamente validati a livello sperimentale. La linea di attività 5.3 ha riguardato lo sviluppo di soluzioni per pale eoliche autoriparanti, in continuità con materiali e processi precedentemente individuati. La LA 5.4 ha affrontato la problematica della corrosione delle strutture metalliche di impianti offshore, come i monopile, a causa dell'ambiente marino. Nella LA 5.5 sono stati studiati, caratterizzati e sviluppati materiali ibridi a base di carbonio, aventi elevata porosità e area specifica superficiale. Le attività della LA 5.12 si sono concentrate sullo sviluppo di metodologie numeriche per l'analisi avanzata di rotori eolici. Nella LA 5.13 è stata condotta una mappatura delle interazioni tra Offshore Wind Farms (OWF), specialmente galleggianti, biodiversità marina e servizi ecosistemici, con focus sul Mar Mediterraneo.

## ATTIVITA' SVOLTE

**WP1: Sviluppo di materiali innovativi metallici e compositi e realizzazione di componenti mediante AM per processi di produzione di energia e per scambio termico**

| <i><b>AFFIDATARIO /<br/>COBENEFICIARIO</b></i> | <i><b>SINTESI DELLE ATTIVITÀ DI RICERCA SVOLTE, RISULTATI<br/>CONSEGUITI E RICADUTE SUL SETTORE PRODUTTIVO</b></i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ENEA</b>                                    | <p><b>LA 1.1: Materiali metallici e compositi innovativi per processi additivi per applicazioni nello scambio termico</b></p> <p>L'attività prevede lo sviluppo di una lega ferritica, non attualmente in commercio, per applicazioni nel settore dello scambio termico. In particolare, la lega è stata sviluppata per la realizzazione, mediante processi di manifattura additiva a letto di polvere, di scambiatori per macchine ad assorbimento a ciclo acqua ammoniacale. Queste macchine vengono utilizzate nel settore della refrigerazione e della climatizzazione, accoppiate con impianti di energia rinnovabile. Al fine approfondire lo studio della lega e di migliorarne le proprietà della lega, questa è stata prodotta in forma di laminati, in quantitativi dell'ordine della decina di kg. Le caratterizzazioni microstrutturali hanno mostrato una dimensione del grano non adeguata, e sono stati quindi messi a punto dei trattamenti termici e termo-meccanici al fine di ottenere un affinamento del grano, implementandone il comportamento meccanico.</p> <p>L'attività inoltre ha previsto la definizione della geometria dei campioni da stampare per le prove di corrosione che verranno effettuate da UNIFE. La lega infatti dovrà lavorare in esercizio in un ambiente corrosivo alcalino, dovuto alla presenza di soluzioni acqua/ammoniaca, a diverse concentrazioni. I campioni verranno successivamente realizzati mediante il processo di Additive Manufacturing LPBF (Laser Powder Bed Fusion). Questo processo di stampa utilizza polveri sferiche, e di dimensioni comprese tra 15 e 45 micron, con elevata scorrevolezza, con composizione prossima a quella della lega ferritica progettata. I campioni in lega Ti6Al4V verranno invece realizzati mediante processo additivo EBM (Electron Beam Melting). Sono state definite alcune geometrie preliminari per le prove di saldabilità della lega ferritica.</p> <p>L'attività prevede inoltre la realizzazione di una formulazione di materiali compositi ad elevata conducibilità termica, per i processi di stampa DLP (Digital Light Processing). La resina che si utilizza, sia nei processi DLP che SLA (Stereolithography) presentano una conducibilità termica di circa 0.2 W/mK. Sono state quindi effettuate delle prove di miscelazione sia con Nitrato di Boro che con grafite al fine di realizzare, mediante DLP, dei campioni di dimensioni opportune per l'effettuazione di misure di conducibilità termica di tipo HotDisk.</p> <p>Le principali prospettive e i risultati della presente attività sono stati presentati al Workshop "Frontier Materials for Energy Applications" tenutosi a Roma il 19 settembre 2025, nell'ambito del Congresso Internazionale Nanoinnovation 2025.</p> |

**LA 1.3: Produzione di polveri metalliche mediante plasma termico per la manifattura additiva**

L'attività è focalizzata sulla produzione di materiali per AM usando la tecnologia del plasma termico, con particolare attenzione a metalli e leghe metalliche. In continuità con investimenti e risultati del PTR 2022-2024, è stato impiegato il sistema basato sul plasma termico DC installato presso ENEA Portici per la produzione di materiali di interesse in campo energetico. Le attività della prima annualità hanno riguardato lo sviluppo di polveri per AM a partire da polveri irregolari di lega di titanio Ti6Al4V e Rame. Sono stati condotti test sulla lega di Titanio, materiale già disponibile. I materiali in ingresso e le polveri prodotte sono stati oggetto di caratterizzazione in ENEA mediante SEM/EDX, PSD, XRD, ed altre analisi, anche per avere indicazioni sul processo. Oltre a polveri commerciali, i test, tuttora in corso, hanno impiegato trucioli di lega di titanio forniti da una ditta del settore aeronautico, come materiale di partenza, dopo lo sviluppo di un opportuno trattamento di macinazione e vagliatura.

**LA 1.5: Manifattura additiva per la componentistica di sistemi di tipo ORC per la produzione di energia: analisi delle potenzialità e test sperimentali**

Nell'ottica di una indipendenza energetica, come auspicato nel Piano REPowerEU, la LA1.5 e la successiva LA1.6 prevedono la realizzazione, mediante processi di manifattura additiva, di una turbina per impianti Organic Rankine Cycle (ORC) di piccola taglia (< 10kWe). In questi impianti un fluido organico compie un ciclo termodinamico. L'espansione in turbina del fluido consente la trasformazione di energia termica in energia meccanica di rotazione dell'asse collegato a un generatore elettrico. La sorgente calda può essere ottenuta con un impianto di fonti rinnovabili (ad esempio solare termico e geotermico) o da recupero di calore di scarto. Per questi motivi la realizzazione e la diffusione di impianti ORC di piccola potenza per il settore industriale e residenziale potrebbero portare a evidenti vantaggi del sistema energetico italiano ed europeo.

L'attività si è concentrata quindi sulla implementazione di un software che consente rappresentare le curve di saturazione dei fluidi di lavoro del ciclo ORC e di fornire, come output, i dati in ingresso al software di progettazione per turbomacchine in uso, prendendo in considerazione anche le miscele. Il software di progettazione per turbomacchine consentirà di definire la geometria della girante. Lo stesso modello consentirà poi di definire i parametri per la progettazione del banco prova. Sono state definite le geometrie dei campioni da produrre con EBM (Electron Beam Melting), per le prove in gallerie del vento che verranno effettuate da UNIFI. La geometria a piastra è stata definita considerando sia fenomeni di "bending" che l'installazione nel set-up sperimentale presente presso UNIFI.

E' stata definita la geometria dei campioni, che verranno successivamente prodotti in lega di Titanio, Ti6Al4V, mediante processo EBM, per lo sviluppo di processi per la finitura superficiale. Nell'ottica della migliore comprensione delle potenzialità del processo EBM è stata definita una geometria, "benchmark", di un campione per lo studio della rugosità

|                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                             | <p>superficiale in funzione dell'inclinazione. Anche questo verrà realizzato successivamente entro la conclusione della presente LA.</p> <p>Alcuni risultati della presente LA sono stati presentati presso il Congresso Internazionale 4th International Workshop on Plasticity, Damage and Fracture of Engineering Materials tenutosi nei giorni 24-26 September 2025 a Istanbul, Turchia.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <p><b>Università degli Studi di Napoli Federico II</b><br/><b>Dipartimento di Ingegneria Industriale</b></p>                                | <p><b>LA 1.7 - Sviluppo di modelli numerici per l'analisi delle prestazioni di sistemi bifase per lo scambio termico</b></p> <p>Nel corso delle attività sono stati messi a punto dei modelli numerici per la simulazione dei dati sperimentali ottenuti su prototipi di scambiatori di calore bifase di tipo flat. I modelli numerici sono stati realizzati utilizzando il codice ANSYS Fluent ed hanno permesso di analizzare il comportamento del prototipo in assenza di liquido di lavoro ottenendo valori per la resistenza termica dell'ordine di 4 K/W. Sono in corso delle analisi per l'implementazione dei processi di evaporazione e condensazione del liquido di lavoro all'interno dello scambiatore di calore.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <p><b>Università di Salerno</b><br/><b>Dipartimento di Fisica "E. R. Caianello" - Centro di Ricerca Interdipartimentale - NanoMates</b></p> | <p><b>LA 1.10 - Sviluppo mediante AM di reattori elettrochimici per l'elettro-riduzione della CO<sub>2</sub>: test preliminari</b></p> <p>Nel corso dei primi 12 mesi della LA1.10, le attività si sono concentrate sulla progettazione e ottimizzazione preliminare di materiali di prova per processi di elettro-riduzione della CO<sub>2</sub> mediante tecnologie di Additive Manufacturing. In particolare, sono stati sviluppati e testati prototipi di elettrodi e componenti per celle elettrochimiche in flusso di elettrolita realizzati tramite stampa 3D FDM con materiali compositi conduttivi.</p> <p>Parallelamente, sono state avviate attività di sintesi di nanocatalizzatori a base di rame e metalli di transizione mediante approcci di "wet chemistry", accompagnate da caratterizzazioni strutturali e morfologiche tramite XRD, TGA e SEM/EDX. I primi test elettrochimici in configurazioni da laboratorio hanno consentito di valutare il comportamento preliminare dei materiali sviluppati per la conversione della CO<sub>2</sub> in etilene ed etanolo.</p> <p>Le attività, ancora in corso, hanno inoltre riguardato l'ottimizzazione di parametri chiave dei gas diffusion layers (GDL), quali porosità, spessore e idrofobicità, al fine di migliorare il trasporto della CO<sub>2</sub> e la selettività verso prodotti C<sub>2+</sub>.</p> <p>Le ricadute industriali attese riguardano lo sviluppo di tecnologie sostenibili per la valorizzazione della CO<sub>2</sub> e l'accumulo di energia rinnovabile in forma chimica, con possibili applicazioni future nei settori dell'energia, della chimica verde e dei materiali avanzati.</p> |
| <p><b>Università degli Studi di Firenze</b><br/><b>Dipartimento di Ingegneria Industriale</b></p>                                           | <p><b>LA 1.14 - Studio effetti della rugosità su campioni realizzati mediante additive manufacturing e messa a punto di un modello numerico e sua validazione</b></p> <p>L'Università degli Studi di Firenze con il Dipartimento di Ingegneria Industriale ha condotto attività mirata a valutare l'effetto della rugosità delle superfici e dei fluidi nei componenti ottenibili con tecniche di additive manufacturing. Lo studio è stato affrontato con un approccio modellistico e sperimentale.</p> <p>Nei primi 12 mesi si è portato avanti lo Studio preliminare degli effetti della rugosità su turbine con approcci semplificati per confluire nella</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |

|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>Progettazione delle misure sperimentali e della geometria dei campioni per test a livello di laboratorio. Successivamente sono state definite le misure sperimentali su campioni realizzati da ENEA.</p> <p>È poi stato definito in dettaglio l'approccio sperimentale da mettere in atto. Questa attività si poi concretizzata sulla definizione, progettazione e lancio della produzione di un TEST-Article capace di ospitare i campioni ENEA. L'attività ha previsto la modifica di una galleria del vento esistente presso UNIFI (operante fino a Mach 0.3) per accettare il nuovo Test-Article. Parallelamente sono stati portati avanti studi su fluidi nuovi capaci di garantire prestazioni adeguate rispettando sempre di più l'ambiente.</p> |
|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**WP2: Sviluppo di materiali e componenti ceramici mediante tecniche di additive manufacturing per l'incremento dell'efficienza in sistemi per la produzione di energia quali le microturbine a gas**

| <b><i>AFFIDATARIO / COBENEFICIARIO</i></b> | <b><i>SINTESI DELLE ATTIVITÀ DI RICERCA SVOLTE, RISULTATI CONSEGUITI E RICADUTE SUL SETTORE PRODUTTIVO</i></b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ENEA</b>                                | <p><b>LA 2.1: Sviluppo di materiali ceramici avanzati per la realizzazione di componenti per la produzione di energia mediante additive manufacturing</b></p> <p>Il progetto si articola su due linee di ricerca per lo sviluppo di materiali ceramici avanzati da impiegarsi per la realizzazione di prototipi di recuperatori termici di microturbine a gas (MTG) per la produzione energetica.</p> <p>Linea di ricerca «Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – DLP». Nel corso del primo anno di progetto sono state individuate le materie prime per la messa a punto di feedstock (sospensioni ceramiche fotopolimeriche) per la stampa mediante tecnica DLP di un prototipo di recuperatore ceramico. In particolare, si è selezionata una allumina con bassa area superficiale (6 m<sup>2</sup>/g), così da agevolarne la dispersione all'interno della sospensione fotopolimerica. Sono stati individuati e testati i singoli componenti della sospensione, tra cui vari monomeri (caratterizzati da diversi gruppi funzionali), fotoiniziatori, sia commerciali che preparati sperimentalmente in laboratorio, e disperdenti commerciali. Particolare attenzione è stata posta nella scelta e sviluppo di sistemi di fotoiniziatori sostenibili, che non siano dannosi per la salute.</p> <p>Le analisi spettroscopiche FTIR, reologiche e fotoreologiche hanno permesso di definire quali di questi componenti sono maggiormente adeguati alla formulazione della feedstock ceramica. Con tale preparativa sono state effettuate delle prove di stampa preliminari per il settaggio dei parametri della stampante, quali il tempo di esposizione e lo spessore degli strati che consenta un compromesso fra grado di definizione e tempo totale di stampa.</p> <p>La stampa 3D permetterà di realizzare un prototipo di recuperatore termico per MTG, caratterizzato da un duplice vantaggio in termini di efficienza di processo di scambio, legato sia alla possibilità di sfruttare geometrie complesse più performanti che all'utilizzo di materiali ceramici operanti</p> |

|                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                         | <p>portare a vantaggi in termini di maggior energia prodotta a parità di combustibile utilizzato.</p> <p>Linea di ricerca «SiC – LDM». Durante il primo anno di progetto sono stati stampati mediante LDM dei campioni 3D a geometria semplificata in SiC, con densità finale media 84% rispetto al teorico. Sono stati messi a punto i parametri del processo CVI di SiC, necessario ad infiltrare le porosità residue dei campioni 3D ed incrementarne la densità finale (velocità di deposizione del SiC: <math>0,21 \div 0,40 \mu\text{m/h}</math>). La possibilità di ottenere campioni 3D in SiC con densità elevate, consentirebbe di massimizzare l'effetto della elevata conducibilità termica del SiC sull'incremento delle prestazioni delle MTG.</p> <p>Le principali prospettive e i risultati della presente attività sono stati presentati al Workshop "Frontier Materials for Energy Applications" tenutosi a Roma il 19 settembre 2025, nell'ambito del Congresso Internazionale Nanoinnovation 2025.ad elevate temperature. L'incremento di efficienza del processo potrà portare a vantaggi in termini di maggior energia prodotta a parità di combustibile utilizzato.</p> <p>Linea di ricerca «SiC – LDM». Durante il primo anno di progetto sono stati stampati mediante LDM dei campioni 3D a geometria semplificata in SiC, con densità finale media 84% rispetto al teorico. Sono stati messi a punto i parametri del processo CVI di SiC, necessario ad infiltrare le porosità residue dei campioni 3D ed incrementarne la densità finale (velocità di deposizione del SiC: <math>0,21 \div 0,40 \mu\text{m/h}</math>). La possibilità di ottenere campioni 3D in SiC con densità elevate, consentirebbe di massimizzare l'effetto della elevata conducibilità termica del SiC sull'incremento delle prestazioni delle MTG.</p> <p>Le principali prospettive e i risultati della presente attività sono stati presentati al Workshop "Frontier Materials for Energy Applications" tenutosi a Roma il 19 settembre 2025, nell'ambito del Congresso Internazionale Nanoinnovation 2025.</p> |
| <p><b>"Alma Mater Studiorum" -<br/>Università di<br/>Bologna<br/>Dipartimento di<br/>Ingegneria<br/>Industriale</b></p> | <p><b>LA 2.3 - Definizione dei parametri di progetto per uno scambiatore ceramico per Micro Turbine a Gas</b></p> <p>Durante i primi 12 mesi il gruppo di lavoro si è focalizzato sulla definizione delle specifiche meccaniche e termiche che il recuperatore ceramico innovativo dovrà sostenere durante il suo normale funzionamento. Tali specifiche tecniche, quali temperatura massima, portata da elaborare e perdite di carico in condizioni operative standard, sono state ottenute grazie ad un'attività sperimentale condotta all'interno dei laboratori dell'Università di Bologna, riadattando un banco prova esistente all'utilizzo di microturbine a gas (MTG) commerciali di piccola taglia. Parte dell'attività ha riguardato la modifica e l'aggiornamento del banco prova esistente per la misurazione dei parametri fondamentali per l'identificazione delle specifiche tecniche del recuperatore termico.</p> <p>Parallelamente all'attività sperimentale, il gruppo di ricerca ha svolto un'attività di studio del recuperatore termico. Questa attività ha inizialmente riguardato una intensiva indagine di mercato finalizzata all'identificazione di un componente commerciale idoneo all'integrazione con una MTG di piccola taglia, in grado di rappresentare il benchmark per le successive analisi prestazionali. Una volta identificato il componente, è stata svolta un'attività di modellazione CAD tridimensionale del</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |

|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|--|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>recuperatore termico metallico selezionato, completo e allineato in tutte le sue parti e sottocomponenti al componente fisico reale. Inoltre, grazie alla geometria tridimensionale ottenuta, è stato messo a punto uno strumento di simulazione CFD 3D in grado di rappresentare accuratamente prestazioni, caratteristiche fluidodinamiche e flussi termici all'interno del recuperatore al fine di ottenere un valido riferimento per lo sviluppo del recuperatore ceramico innovativo.</p> <p>Infine, nel corso del primo anno del progetto, il gruppo di lavoro si è concentrato sullo sviluppo di un modello zero-dimensionale di un gruppo MTG cogenerativo, utilizzando dati e informazioni di componenti commerciali, in grado di simulare il punto operativo del sistema e, parallelamente, quantificare gli indici di prestazione e l'impatto su di essi di un incremento di temperatura di esercizio ottenibile grazie all'adozione di materiali ceramici. Il modello a parametri concentrati sviluppato, comprensivo di tutti i componenti del sistema (quali compressore, camera di combustione, turbina, recuperatori termici e generatore) potrà essere successivamente utilizzato per valutare il beneficio prodotto adottando il recuperatore ceramico innovativo sviluppato nel corso del progetto.</p> |
|--|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

### WP3: Sviluppo di catalizzatori per applicazioni energetiche

| <i><b>AFFIDATARIO /<br/>COBENEFICIARIO</b></i> | <i><b>SINTESI DELLE ATTIVITÀ DI RICERCA SVOLTE, RISULTATI<br/>CONSEGUITI E RICADUTE SUL SETTORE PRODUTTIVO</b></i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ENEA</b>                                    | <p><b>LA 3.1: Studio di materiali nanostrutturati idonei della cattura della CO<sub>2</sub> e utilizzo integrato come catalizzatori (ICCU)</b></p> <p>Le attività della LA3.1 hanno interessato lo studio di letteratura riguardo la fattibilità dello sviluppo di materiali nanostrutturati, con particolare riferimento alla sintesi di materiali bidimensionali, idonei alla cattura della CO<sub>2</sub> e all'utilizzo integrato come catalizzatori (ICCU).</p> <p>A tale riguardo, è stata approfondita la possibilità di utilizzo degli idrossidi a doppio strato (LDH) quali precursori per la sintesi di materiali bifunzionali per ICCU. Sono state individuate le principali tecniche di sintesi utilizzate per la preparazione degli LDH, la tipologia di metalli da utilizzare come catalizzatori, nonché le relative reazioni di trasformazione della CO<sub>2</sub>. Sono stati effettuati i primi test utilizzando Cu e Fe quali metalli funzionali ed è stato fatto un primo confronto utilizzando tre diverse tecniche di sintesi: idrotermale, coprecipitazione e microonde. È stata inoltre esplorata la possibilità di sintetizzare gli LDH su template bidimensionali, al fine di migliorare la dispersione e l'orientazione delle lamelle, incrementare l'area superficiale accessibile e la stabilità strutturale, con la finalità di migliorare le proprietà funzionali. A tal proposito, l'ossido di grafene (GO) è stato identificato come la tipologia di template più promettente e sarà testato nella successiva fase progettuale. I risultati di tali studi e delle prove preliminari ci hanno consentito di pianificare le attività dell'ultimo semestre della LA3.1 e le attività previste nelle LA3.2 e 3.7.</p> |



|                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                               | <p>La definizione di questi composti e delle relative metodologie di preparazione permetterà di ottenere materiali bifunzionali efficaci ed economici, mettendo a disposizione del comparto industriale una tecnologia economicamente sostenibile per trasformare le emissioni di CO<sub>2</sub> in vettori energetici o intermedi chimici ad alto valore aggiunto. Le principali prospettive e i risultati della presente attività sono stati presentati al Workshop "Frontier Materials for Energy Applications" tenutosi a Roma il 19 settembre 2025, nell'ambito del Congresso Internazionale Nanoinnovation 2025.</p> <p><b>LA 3.3: Catalizzatori magnetici per la produzione di syngas supportati su strutture porose di geometria complessa realizzate mediante Additive Manufacturing</b></p> <p>Il primo anno di attività è stato dedicato allo sviluppo della feedstock necessaria alla produzione di provini porosi tramite tecnologia di manifattura additiva Direct Ink Writing (DIW) e alla loro fabbricazione in forma semplice (dischi di diametro 20 mm e altezza 10 mm). A tal fine sono state impiegate polveri di precursori dell'allumina (Boehmite), peptizzate in soluzioni diluite di HNO<sub>3</sub> a differenti rapporti [HNO<sub>3</sub>]/[Al] per favorire la formazione di gel estrudibili mediante DIW. I provini sono stati sottoposti a misure di desorbimento a temperatura programmata (TPD) per definire la temperatura di consolidamento. Dopo sinterizzazione, i campioni sono stati caratterizzati mediante analisi di diffrazione a raggi X, che ha confermato la formazione di <math>\gamma</math>-allumina; sono state inoltre eseguite analisi della superficie specifica e della distribuzione delle porosità. La formulazione ottimale ha prodotto substrati con superficie specifica di 230 m<sup>2</sup>/g, un valore prossimo a quello dei granuli commerciali (250 m<sup>2</sup>/g), mentre il volume poroso richiede ulteriore ottimizzazione.</p> <p>Mediante impregnazione da soluzione contenente sali di nichel e cobalto utilizzando il processo messo a punto nelle precedenti annualità sono stati preparati due lotti di catalizzatori magnetici, successivamente integrati in un prototipo di reattore ultracompatto per le prime prove di catalisi. Tale reattore è concepito per essere impiegato in contesti decentralizzati, dove la produzione locale di syngas da biogas rappresenta una concreta opportunità nell'ottica dell'economia circolare.</p> <p>Le principali prospettive e i risultati della presente attività sono stati presentati al Workshop "Frontier Materials for Energy Applications" tenutosi a Roma il 19 settembre 2025, nell'ambito del Congresso Internazionale Nanoinnovation 2025.</p> |
| <p><b>Sapienza Università di Roma</b><br/> <b>Dipartimento di Chimica</b></p> | <p><b>LA 3.5 - Caratterizzazione chimico-fisica di catalizzatori magnetici per la produzione di syngas: influenza della struttura sulla reattività</b></p> <p>I catalizzatori a base di nanoparticelle NiCo a diverso rapporto Ni:Co (Ni<sub>50</sub>Co<sub>50</sub> e Ni<sub>30</sub>Co<sub>70</sub>) supportate su Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in forma di granuli sono stati caratterizzati mediante FESEM-EDX dopo gli studi di catalisi magnetica di bi-reforming condotti presso ENEA. Indipendentemente dal rapporto Ni:Co del campione, i risultati hanno evidenziato stabilità strutturale delle nanoparticelle la cui morfologia rimane sostanzialmente invariata rispetto ai campioni freschi, salvo un lieve allargamento della distribuzione dimensionale. Il rapporto Ni:Co e la composizione della miscela di</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|--|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>reazione influenzano invece la deposizione di carbonio, principale causa della disattivazione catalitica. In particolare, l'analisi FESEM ha evidenziato depositi carboniosi in forma di nanotubi in quantità maggiori (i) nel campione a rapporto Ni:Co maggiore (Ni<sub>30</sub>Co<sub>70</sub>), e (ii) dopo reazione con miscele ricche in CO<sub>2</sub> (CH<sub>4</sub>:H<sub>2</sub>O: CO<sub>2</sub> = 3:1:2) piuttosto che ricche in H<sub>2</sub>O (CH<sub>4</sub>:H<sub>2</sub>O: CO<sub>2</sub> = 3:2:1). Il catalizzatore Ni<sub>30</sub>Co<sub>70</sub> ha mostrato stabilità catalitica maggiore anche nello studio con miscele contenenti O<sub>2</sub> (dry-reforming ossidativo) e O<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O (tri-reforming): la probabile presenza di clusters CoOx sulla superficie delle nanoparticelle, grazie all'elevata affinità del cobalto per l'ossigeno, favorisce l'attivazione della CO<sub>2</sub> e la conseguente gassificazione delle specie carbonio adsorbite. Una seconda parte dell'attività ha riguardato le analisi AAS e FESEM-EDX dei primi campioni a base di monoliti di Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ottenuti mediante <i>additive manufacturing</i> presso ENEA. Il caricamento in metalli (totale e relativo) e la morfologia delle nanoparticelle NiCo (forma e dimensioni) sono risultati abbastanza comparabili a quelli dei campioni preparati su pellet, nonostante la procedura preparativa sia ancora in fase di ottimizzazione.</p> <p>La metodologia di caratterizzazione adottata si dimostra quindi efficace per un confronto dei due sistemi e i primi risultati suggeriscono una promettente reattività catalitica dei sistemi monolitici.</p> <p>Le principali prospettive e i risultati della presente attività sono stati presentati al Workshop "Frontier Materials for Energy Applications" tenutosi a Roma il 19 settembre 2025, nell'ambito del Congresso Internazionale Nanoinnovation 2025.</p> |
|--|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**WP4: Materiali compositi per componenti strutturali di turbine eoliche ad efficienza e durata migliorata**

| <b><i>AFFIDATARIO / COBENEFICIARIO</i></b> | <b><i>SINTESI DELLE ATTIVITÀ DI RICERCA SVOLTE, RISULTATI CONSEGUITI E RICADUTE SUL SETTORE PRODUTTIVO</i></b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ENEA</b>                                | <p><b>LA 4.1: Individuazione, studio e sviluppo di architetture tessili di rinforzo per eco-compositi con applicazioni eoliche</b></p> <p>Ai fini dello studio e della selezione di fibre vegetali, con la canapa individuata come sistema di riferimento, sono stati identificati, a seguito di ricerche di mercato, diversi fornitori a livello locale (fibre grezze, corde e tessuti), nazionale (filati a base di fibre tessili) ed estero (fibre tessili). Sono stati inoltre attivati contatti <i>in kind</i> con una primaria multiutility attiva nel recupero di fibre di carbonio (rCF). Le fibre sono state caratterizzate sotto il profilo spettroscopico, morfologico, dimensionale (sezione canapa, fornitore estero, 17–25 µm; rCF 6,5–8 µm), meccanico (resistenza a rottura pari a 400-900 MPa per canapa fornitore estero, e 3500–4500 MPa per rCF; modulo di Young pari a 20-30 GPa per canapa fornitore estero, e pari a 200–350 GPa per rCF ) e di resistenza termica (fino a circa 200 °C per fibre derivanti da tessuti del fornitore locale). Le fibre selezionate sono</p> |

|                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                          | <p>state utilizzate per il set-up sperimentale delle macchine tessili attualmente in dotazione (carda e stiro-roving), permettendo la produzione dei primi lotti di veli e nastri in miscela rCF/canapa (50/50). Parallelamente è stata individuata una mini-linea tessile integrata, in grado di coprire le principali fasi di processo successive allo stiro-roving (filatura ring, assemblaggio, ritorcitura e maglieria), che consentirà la produzione di campioni rappresentativi e l'analisi dei parametri di processo. Le attività risultano abilitanti per applicazioni nel settore eolico, con potenziali benefici in termini di alleggerimento strutturale, ottimizzazione dei carichi ed efficienza energetica, favorendo al contempo l'integrazione tra la filiera tessile e quella eolica. La diffusione dei risultati è stata promossa attraverso visite ai laboratori da parte di almeno tre istituti scolastici e la partecipazione con uno stand alla Maker Faire 2025.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <p><b>Università del Salento</b><br/><b>Dipartimento Ingegneria dell'Innovazione</b></p> | <p><b>LA 4.2: Sviluppo ed ottimizzazione di matrici termoindurenti potenzialmente riparabili e/o riciclabili per eco-compositi</b></p> <p>UniSalento ha avviato lo sviluppo di matrici vitrimeriche basate su resine epossidiche convenzionali (derivate da bisfenolo A ed epiclorigidrina), in cui grazie all'uso di agenti di cura a base di anidridi e catalizzatori a base di zinco, è possibile attivare reazioni di transesterificazione che impartiscono al materiale comportamento vitrimerico. Le formulazioni sono state concepite anche in vista di una futura estensione a sistemi parzialmente bio-based. Le prime caratterizzazioni indicano come le matrici vitrimeriche presentino proprietà meccaniche e termiche confrontabili con quelle delle epossidiche standard.</p> <p>Le possibili ricadute per il settore produttivo sono state analizzate attraverso:</p> <p>1) Prove di riciclabilità: la matrice è stata macinata e sottoposta a cicli di riscaldamento sotto pressione. I campioni riciclati mostrano un recupero delle proprietà meccaniche dell'ordine del 50% (modulo) e 30% (resistenza) rispetto al materiale vergine;</p> <p>2) Prove di saldatura: provini rettangolari sono stati saldati sotto pressa, ed hanno dimostrato valori di resistenza a taglio interlaminare fino a circa 30 MPa, in linea con valori misurati per giunti co-curati;</p> <p>3) Prove di riparabilità: provini per prove di trazione, su cui sono stati prodotti dei fori passanti per simulare il danneggiamento, hanno mostrato una resistenza pari a circa il 40% dei provini vergini. Successivamente tali provini, riparati sotto pressa a circa 250°C, hanno mostrato un recupero della resistenza fino a circa il 70% della resistenza dei provini vergini.</p> |
| <p><b>ENEA</b></p>                                                                       | <p><b>LA 4.4: Materiali per il settore eolico: coating protettivi e test di invecchiamento su campioni di prova in condizioni di esercizio</b></p> <p>Nella fase iniziale dell'attività è stato individuato un sistema di trattamento superficiale basato su plasma atmosferico che consenta sia la generazione di plasma a <math>T \leq 40^\circ\text{C}</math>, sia di sperimentare processi di deposizione plasma-assistita (PECVD). Sono state quindi definite le prime condizioni sperimentali per:</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|--|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• trattamenti di etching ed attivazione superficiale mediante plasma in gas inerte; (gas di lavoro Ar; gas di raffreddamento N<sub>2</sub>)</li> <li>• test di polimerizzazione plasma-assistita mediante introduzione di precursori chimici per la formazione di strati funzionali o protettivi (gas di lavoro Ar; gas di raffreddamento N<sub>2</sub>; gas di processo N<sub>2</sub>; precursore: esametildisilossano, HMDSO)</li> </ul> <p>Tali trattamenti sono stati originariamente applicati su trefoli in canapa (derivanti da tessuti reperiti da fornitore locale), evidenziando la formazione di un coating di qualche decina di nanometri a base silicea, come suggerito dalla presenza di silicio nelle analisi SEM-EDX.</p> <p>Le tecnologie plasma-assistite selezionate risultano promettenti per:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ottimizzare preliminarmente le interazioni interfaccia fibra/matrice, in maniera complementare rispetto ai sistemi di sizing in sviluppo nella LA 4.1</li> <li>• sviluppare di coating protettivi, con potenziale incremento della resistenza agli agenti ambientali, mediante processi con prospettive di maggiore scalabilità e integrazione in linea rispetto a tecnologie al plasma a bassa pressione.</li> </ul> <p>La diffusione dei risultati è stata promossa attraverso visite ai laboratori da parte di tre istituti scolastici.</p> |
|  | <p><b>LA 4.5: Valorizzazione di fibre di carbonio da pale eoliche a fine vita</b></p> <p>Le attività del periodo in esame hanno riguardato preliminarmente l'esame dei materiali compositi più utilizzati per la produzione di pale eoliche. È stato quindi definito e attivato un programma di prove preliminari di trattamento termico su compositi termoindurenti Epoxy/CF, valutati come materiali rappresentativi del settore eolico. Le prove sono state precedute da analisi termogravimetriche mediante TGA sui campioni di partenza, allo scopo di individuare la composizione per macro-componenti dei prodotti e gli intervalli di decomposizione della matrice. Lo studio è proseguito con test di recupero, effettuati grazie alle apparecchiature a disposizione dei laboratori di Portici, allo scopo di ottimizzare i parametri del processo, in particolare temperature, ambiente reattivo e tempo di reazione, per ottenere fibre di carbonio recuperate di elevata qualità. Tutti i prodotti dei test sono stati avviati alla caratterizzazione mediante analisi morfologica SEM/EDX.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

## WP5: Componenti, dispositivi e sistemi per il settore eolico offshore

| <i><b>AFFIDATARIO /<br/>COBENEFICIARIO</b></i> | <i><b>SINTESI DELLE ATTIVITÀ DI RICERCA SVOLTE, RISULTATI<br/>CONSEGUITI E RICADUTE SUL SETTORE PRODUTTIVO</b></i>                                                                                                                                                                                                               |
|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ENEA</b>                                    | <p><b>LA 5.1: Studio di prefattibilità e analisi delle criticità nello sviluppo di componenti e sistemi di controllo. Comparazione con lo stato dell'arte</b></p> <p>Le attività della LA5.1 hanno interessato lo studio di prefattibilità e analisi delle criticità connesse allo sviluppo di componenti per sistemi eolici</p> |

|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>offshore, con particolare riferimento ai materiali per pale eoliche e ai sistemi di protezione della componentistica metallica.</p> <p>I risultati conseguiti hanno permesso di identificare le principali limitazioni dei materiali compositi attualmente impiegati nelle pale, tra cui resistenza a fatica, fenomeni di delaminazione, erosione superficiale e difficoltà di riciclo. In parallelo, è stata evidenziata la vulnerabilità della componentistica metallica ai fenomeni di corrosione in ambiente marino, spesso combinati con carichi ciclici e degrado meccanico.</p> <p>L'analisi ha consentito di individuare soluzioni tecnologiche coerenti con le più recenti evoluzioni del settore, quali l'impiego di compositi ibridi e matrici termoplastiche per migliorare sostenibilità e riciclabilità e l'introduzione di microfibre naturali per incrementare le prestazioni e la durata. Per le strutture metalliche, sono state individuate strategie basate sull'impiego di coating multistrato ad alta resistenza alla corrosione. Le risultanze dello studio hanno consentito la pianificazione delle linee sperimentali di ricerca condotte in altre LA, nello specifico LA5.2, LA5.3 LA5.4 e LA5.5.</p> <p>Le ricadute sul settore produttivo riguardano il miglioramento dell'affidabilità e della vita utile dei componenti, la riduzione dei costi di manutenzione e l'apertura a filiere più sostenibili e circolari. L'importanza del ruolo svolto dai materiali nel settore eolico offshore e le relative criticità sono state oggetto di discussione all'interno dell'evento organizzato da ENEA <i>"Il ruolo dei materiali per l'eolico offshore"</i> svoltosi presso KEY–The Energy Transition Expo, Rimini, 6 marzo 2026.</p>                                                                                            |
|  | <p><b>LA 5.2: Sviluppo di soluzioni avanzate del compound per la realizzazione di pale eoliche di sistemi offshore</b></p> <p>La linea di attività ha riguardato lo sviluppo di soluzioni avanzate di compound per la realizzazione di pale eoliche offshore, attraverso attività di ricerca sperimentale basate sull'estrusione di polimeri termoplastici fibrorinforzati. I materiali selezionati (PLA, ABS e PETG) e le tipologie di rinforzo (microfibre naturali di lino e canapa e fibre di vetro) sono stati individuati come candidati promettenti e successivamente validati a livello sperimentale.</p> <p>Le attività hanno consentito di verificare la processabilità dei compound mediante estrusione, valutando la qualità del filamento in termini di morfologia, uniformità e assenza di difetti visivi. Sono stati inoltre condotti test meccanici di trazione sui filamenti prodotti, al fine di analizzarne le prestazioni e la compatibilità tra matrice polimerica e fase di rinforzo. I risultati conseguiti hanno evidenziato una buona lavorabilità dei materiali, con particolare efficacia per i sistemi a base PETG e PLA, e una generale fattibilità del processo anche in presenza di fibre naturali, seppur con alcune criticità legate alla dispersione, all'adesione interfacciale e all'usura di alcuni componenti del sistema di estrusione.</p> <p>Le ricadute sul settore produttivo riguardano la possibilità di sviluppare nuovi materiali compositi più sostenibili, riciclabili e compatibili con tecnologie di manifattura additiva, con potenziali benefici in termini di riduzione dei costi e maggiore flessibilità produttiva. La futura diffusione delle attività si inserisce nel contesto delle traiettorie innovative del settore eolico, contribuendo al trasferimento di conoscenze verso applicazioni</p> |

|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|--|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>industriali e allo sviluppo di ulteriori attività di ricerca sui materiali avanzati per applicazioni offshore.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|  | <p><b>LA 5.3: Studio e sviluppo di soluzioni per la realizzazione di pale eoliche autoriparanti</b></p> <p>La linea di attività ha riguardato lo sviluppo di soluzioni per pale eoliche autoriparanti, in continuità con materiali e processi precedentemente individuati. In fase iniziale era prevista l'integrazione nei filamenti termoplastici di microcapsule contenenti agenti autoriparanti; tuttavia, a seguito di analisi di mercato e contatti con fornitori, è emersa la scarsa disponibilità e maturità commerciale di tali materiali, impedendone l'approvvigionamento.</p> <p>Le attività sono state pertanto rimodulate verso uno studio preliminare basato sull'impiego di microsfeere cave vetrose, utilizzate come sistemi modello per simulare il comportamento delle microcapsule autoriparanti. La sperimentazione ha riguardato la processabilità dei compound, la dispersione delle particelle nella matrice, l'adesione interfacciale e la qualità morfologica dei filamenti estrusi. I risultati hanno evidenziato la fattibilità dell'integrazione e fornito indicazioni utili sulle interazioni matrice-rinforzo e sui parametri di processo.</p> <p>Le ricadute sul settore produttivo sono significative in prospettiva: l'adozione di sistemi autoriparanti consente di intercettare difetti iniziali, prevenendone la propagazione in danni più gravi, riducendo il tasso di rottura delle pale e prolungandone la vita utile. Ciò comporta una diminuzione degli interventi manutentivi e dei costi operativi (O&amp;M). La diffusione delle attività, da svolgere nei prossimi mesi, contribuirà ad accrescere la maturità tecnologica del tema e a favorire futuri sviluppi industriali nel settore eolico offshore.</p> |
|  | <p><b>LA 5.4: Studio e sviluppo di soluzioni protettive di componenti in metallo del settore eolico in applicazioni offshore</b></p> <p>La LA 5.4 ha affrontato la problematica della corrosione delle strutture metalliche di impianti offshore, come i monopile, a causa dell'ambiente marino. Comunemente la protezione delle strutture metalliche avviene attraverso l'applicazione di coating multistrato ottenuti mediante cicli di verniciature a più strati. Si parte dal primer (che garantisce l'adesione degli strati successivi al substrato metallico e ha anch'esso la funzione di protezione), procedendo quindi alla realizzazione di uno o due strati intermedi di vernice (che fanno da barriera protettiva, ostacolando il percorso delle specie chimiche aggressive verso il substrato metallico) e quindi all'applicazione del rivestimento finale. In particolare, le attività sperimentali si sono focalizzate sulla messa a punto dello strato intermedio di coating per la protezione da corrosione di componentistica presente in zona 1 atmosferica, che richiede un grado di resistenza a corrosione C5-CX. L'attività sperimentale svolta ha riguardato lo studio delle caratteristiche di una pittura commerciale epossidica a base di solvente. Sono state individuate alcune tipologie di nanocariche inorganiche, in particolare nanoargille, nanoparticelle di ZnO, di ZrO<sub>2</sub>, di SiO<sub>2</sub>, di TiO<sub>2</sub> e di BN esagonale, da aggiungere in una percentuale non superiore al 5% in peso. Lo studio ha puntato a individuare dei solventi compatibili con la</p>                                                                                                                                    |

|                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                           | <p>resina, per facilitare la miscelazione e impedire la naturale tendenza all'aggregazione delle nanocariche, ma al contempo non tossici e nocivi per l'ambiente come lo xilene o la nafta, contenuti solitamente in questo tipo di vernici. La dispersione delle nanocariche richiede l'individuazione della procedura più adeguata in termini di quantità di solvente, di necessità di modificare o funzionalizzare superficialmente i nanofiller e di metodo e parametri di miscelazione. Migliorare le proprietà anticorrosive e di durabilità della vernice commerciale ha ricadute positive dal punto di vista economico ed ecologico, perché consente di aumentare l'intervallo di tempo tra una manutenzione e l'altra e il tempo di vita della struttura.</p> <p><b>LA 5.5: Studio e sviluppo di supercapacitori con prestazioni elevate per il settore eolico</b></p> <p>In questa LA sono stati studiati, caratterizzati e sviluppati materiali ibridi a base di carbonio, aventi elevata porosità e area specifica superficiale. Si tratta di materiali compositi a base di polianilina, un polimero coniugato ad alta conducibilità elettrica, a cui è stata aggiunta una opportuna percentuale di nanostrutture di carbonio, nello specifico nanotubi di carbonio nella tipologia <i>Multi Walled</i> e carbonio mesoporoso. Tali materiali sono stati selezionati in virtù delle caratteristiche morfologico-strutturali e delle proprietà elettriche. L'arricchimento della matrice polimerica con questo tipo di nanostrutture ha permesso di massimizzare sia la porosità che la conducibilità elettrica.</p> <p>Per la preparazione degli strati elettrodi, sono state utilizzate e confrontate tra loro due tecniche: la deposizione elettroforetica (EPD) e la sintesi elettrochimica (ELD). Entrambe le tecniche sono poco energivore, facilmente scalabili e permettono un controllo della morfologia e degli spessori degli strati depositi. Tali parametri sono fondamentali nella definizione delle caratteristiche funzionali del dispositivo. Per entrambe le tecniche, è stata valutata l'efficacia e l'applicabilità.</p> <p>La realizzazione di strati elettrodi per supercapacitori basati su polimeri coniugati e carbonio mediante tecniche di elettrodeposizione ha grosse prospettive nei confronti della sostenibilità dei processi. Dal punto di vista manifatturiero, la tecnica dell'elettrodeposizione si integra nelle linee di produzione preesistenti (come il <i>roll-to-roll</i>), abbattendo i costi di fabbricazione grazie a processi a basse temperature e ridotto impatto ambientale.</p> <p>I risultati ottenuti in questa prima fase della LA5.5 sono stati presentati al FRONTIERS OF ENERGY STORAGE Workshop 2025, tenutosi a Roma il 5-6 novembre 2025.</p> |
| <p><b>Politecnico di Milano</b><br/> <b>Dipartimento di</b><br/> <b>Scienze e Tecnologie</b><br/> <b>Aerospaziali</b></p> | <p><b>LA 5.12: Simulazione numerica del comportamento di rotori eolici realizzati con i componenti sviluppati e impiegati in installazioni offshore</b></p> <p>Nel 2025 le attività si sono concentrate sullo sviluppo di metodologie numeriche per l'analisi avanzata di rotori eolici. È stato validato un framework di interazione fluido-struttura (URANS-Multibody, SU2-MBDyn) tramite soluzioni analitiche 2D e confronti 3D con DUST-MBDyn e OpenFAST. Il framework serve ad analizzare condizioni operative in cui i modelli a bassa fedeltà perdono affidabilità. Parallelamente, è stato sviluppato e validato con simulazioni 3D un metodo</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

|                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                | <p>BEM+2D per l'impatto di particelle d'acqua sulle pale in condizioni di non-equilibrio aerodinamico, eliminando gli errori sistematici degli approcci ridotti standard.</p> <p>Il framework URANS-Multibody consentirà all'industria di quantificare i margini di errore dei metodi a bassa fedeltà nel calcolo dei carichi in condizioni critiche; il metodo BEM+2D permetterà di migliorare l'accuratezza dei software industriali nella stima delle traiettorie, ottimizzando le previsioni di erosione e ghiaccio. Non sono state effettuate attività di disseminazione; i metodi sviluppati e dati di validazione pongono le basi per future pubblicazioni.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <p><b>Dipartimento di<br/>Ingegneria Civile e<br/>Ambientale<br/>Politecnico di Milano</b></p> | <p><b>LA 5.13 - Valutazione delle criticità e barriere nello sviluppo dell'eolico offshore legate alla biodiversità presente nel bacino del Mediterraneo e agli effetti sui processi ecosistemici</b></p> <p>È stata condotta una mappatura delle interazioni tra Offshore Wind Farms (OWF), specialmente galleggianti, biodiversità marina e servizi ecosistemici, con focus sul Mar Mediterraneo. Questa, abbinata ad una revisione dello stato dell'arte dei metodi di Life Cycle Impact Assessment (LCIA) applicabili agli ecosistemi marini, ha permesso di definire un quadro aggiornato dei modelli disponibili per la quantificazione degli impatti ambientali associati agli impianti eolici offshore. Sono state evidenziate le principali criticità metodologiche, la limitata disponibilità di dataset e la necessità di modelli più spazializzati e integrati con approcci ecologici. L'analisi ha evidenziato l'importanza di includere nei framework LCA sia pressioni oggi ancora poco considerate (quali rumore e campi elettromagnetici) sia i potenziali effetti positivi delle OWF (quali effetto reef artificiale e effetto riserva dato dall'esclusione dalla pesca). Le attività svolte forniscono strumenti utili per supportare una pianificazione marittima sostenibile e una progettazione degli impianti offshore maggiormente informata degli effetti su ecosistemi marini e relativi servizi ecosistemici. Le ricadute sul settore produttivo riguardano lo sviluppo di pratiche industriali più sostenibili, la riduzione degli impatti ambientali lungo il ciclo di vita degli impianti e il rafforzamento delle filiere legate all'eolico offshore. La diffusione delle attività è avvenuta attraverso collaborazioni scientifiche e condivisione dei risultati.</p> |