

## **AFFIDATARIO CNR**

Tema - Titolo del progetto: Progetto 1.8: Energia Elettrica dal Mare

Durata: 36 M

Semestre n. 2 – Periodo attività: M07-M12

### **ABSTRACT ATTIVITA' SEMESTRALE:**

Il progetto di ricerca propone un cambio di rotta della situazione italiana per la progettazione e lo sviluppo di soluzioni innovative per piattaforme galleggianti dedicate allo sfruttamento di risorse rinnovabili marine, in grado di sopportare condizioni complesse e severe e, come nel caso delle turbine eoliche, carichi indotti esterni all'ambiente marino. Enfasi e' dedicata alla progettazione integrata e multidisciplinare delle turbine eoliche galleggianti (TEG) che, a partire dalle linee di ancoraggio e piattaforma galleggiante, fino alla turbina, comprensiva di hub, pale, controllo e convertitori di potenza, costituisce la dorsale portante del progetto, attraverso un'azione congiunta dal punto di vista teorico-numeric e sperimentale, sia in laboratorio che in mare. Lo studio di forme innovative e idrodinamicamente efficienti consente l'accoppiamento ottimo con l'aerogeneratore al fine di massimizzarne la produzione energetica per le condizioni meteo-marine tipiche di alcune aree nel Mediterraneo, opportunamente identificate attraverso i dati sulla risorsa disponibili in letteratura e/o forniti dai colleghi di ENEA e RSE. Congiuntamente allo studio di nuovi tipi di ancoraggio ed il loro accoppiamento con le TEG, questo progetto di ricerca mira ad una progettazione ottima della piattaforma, con lo scopo di ridurre il costo di costruzione e di manutenzione delle TEG, favorendo una riduzione del Levelized Cost of the Energy (LCOE) ed un incremento sostanziale del TRL di alcune soluzioni tecnologiche innovative che verranno proposte. Particolare attenzione sarà dedicata a nuove soluzioni progettuali per una riduzione consistente dell'impatto ambientale che tali tecnologie possono avere.

Il principale output del progetto di ricerca e' la progettazione e costruzione di un laboratorio a mare per energie rinnovabili, il primo in Italia e tra i pochi in Europa. La disponibilità di un sito nel quale poter effettuare prove in ambiente reale consentirà: a) un innalzamento del TRL delle tecnologie sviluppate in Italia; b) una più profonda comprensione della scalatura di alcuni fenomeni fisici quando si passa da modello a prototipo; c) di costituire un valore aggiunto nel prossimo futuro per l'intera comunità scientifica italiana e per l'industria nazionale del settore. Attraverso una tale infrastruttura si potrà approfondire lo studio del comportamento dinamico di un dimostratore di TEG (in scala 1:7 di una 5MW, il primo in Italia) in condizioni ambientali rilevanti, il suo monitoraggio strutturale e di performance nel tempo, e valutare la fattibilità di alcuni moduli di quello che sarà l'Arcipelago Energetico, un'idea innovativa per il Mediterraneo proposta recentemente dal CNR-INM. Verranno quindi studiati, sia dal punto di vista teorico-numeric che sperimentale in laboratorio indoor, dei moduli galleggianti con la duplice funzionalità di frangiflutto e Wave Energy Converter (WEC). Nel concetto di Arcipelago, questi ne delimiteranno il perimetro, favorendo la realizzazione di una zona di mare protetta nella quale sarà possibile installare nuove forme di sfruttamento di energia in mare (e.g. isola solare), che insieme a quella prodotta dalle TEG (presenti al di fuori dell'arcipelago) permetteranno in futuro: a) nuove attività produttive (e.g. acquacultura); b) storage

dell'energia attraverso la produzione di combustibile liquido a basso impatto ambientale (e.g. metanolo e idrogeno), c) desalinizzazione di acqua marina.

All'interno del presente PR si svilupperanno possibili soluzioni innovative di piattaforme galleggianti per isole solari, che verranno realizzate, dapprima in scala modello per studi in laboratorio indoor, e poi in scala prototipale per prove in laboratorio a mare.

Infine, utilizzando l'opera civile del dimostratore del wave energy converter "OBREC" già esistente nel sito del laboratorio a mare ed integrato nella diga portuale prospiciente il sito stesso, si procederà alla progettazione e costruzione di una turbina idraulica a basso carico che consentirà di quantificare l'efficienza energetica del dimostratore.

In tal modo si vuole proporre un cambiamento di paradigma con il quale affrontare le sfide tecnologiche delle rinnovabili marine nel futuro: l'industria propone dei topic rilevanti per il suo sviluppo futuro e per la sua competitività nel medio-lungo termine nel mercato delle rinnovabili; il mondo della ricerca studia e propone delle progettualità per risolvere i problemi posti dall'industria. Queste vengono poi revisionate e discusse con l'industria per arrivare a delle soluzioni costruttive da utilizzare e testare. La disponibilità di una rete di laboratori indoor e, soprattutto di un laboratorio a mare, permetterà uno sviluppo consistente ed omogeneo delle progettualità proposte, favorendo una più rapida crescita del TRL associato. In questo processo virtuoso, si introducono fin dall'inizio le competenze scientifiche che coinvolgono aspetti interdisciplinari quali basso impatto ambientale delle tecnologie proposte ed alto valore aggiunto per l'economia delle comunità locali.

Il presente progetto si propone pertanto come obiettivo primario di fungere da punto di attrazione per l'industria nazionale ed europea che opera nel settore delle energie rinnovabili marine e più in particolare dell'eolico galleggiante, che si presenta come una delle tecnologie più promettenti per una soluzione ecosostenibile del problema energetico del nostro paese.

<b>ATTIVITA' SVOLTE</b>	
<b>AFFIDATARIO / COBENEFICIARIO</b>	<b>SINTESI DELLE ATTIVITÀ DI RICERCA SVOLTE, RISULTATI CONSEGUITI E RICADUTE SUL SETTORE PRODUTTIVO</b>
CNR	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ WP1: Studi sulla producibilità energetica da fonte marina lungo la costa italiana, anche a sfruttamento delle infrastrutture esistenti a mare (piattaforme offshore) e mappatura di siti idonei anche in relazione all' integrazione tra sfruttamento energetico e altre attività produttive nonché attività di supporto allo sviluppo della generazione eolica offshore su piattaforme ancorate e sistemi galleggianti</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ WP2: Valutazioni di sostenibilità ambientale ed economica di siti specifici, in funzione della disponibilità delle risorse energetiche, compatibilità con gli altri usi del mare, la prossimità ed il valore della domanda energetica, complessità d'installazione/manutenzione, costi, ecc.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ WP3: Sistemi di previsione a breve e medio termine della producibilità energetica in ambiente marino e costiero da moto ondoso, correnti marine e vento, anche in funzione delle caratteristiche di sistemi di conversione innovativi.</li></ul>
	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ WP4: Sviluppo di soluzioni e studio di materiali innovativi per lo sfruttamento energetico da fonte marina, allo scopo non solo di ottimizzare la produzione di energia, ma anche di ridurre il costo di costruzione e di manutenzione dei sistemi e quindi favorire una riduzione del LCOE.</li></ul>
	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ WP5: Sperimentazione e realizzazione di prototipi in scala 1:1.</li></ul>

Responsabile scientifico: Claudio Lugni

## Progetto 1.8: Energia Elettrica dal Mare

### Relazione Semestrale 1: M1 – M6



#### 1) Introduzione

Il progetto di ricerca propone un cambio di rotta della situazione italiana per la progettazione e lo sviluppo di soluzioni innovative per piattaforme galleggianti dedicate allo sfruttamento di risorse rinnovabili marine, in grado di sopportare condizioni complesse e severe e, come nel caso delle turbine eoliche, carichi indotti esterni all'ambiente marino. Enfasi e' dedicata alla progettazione integrata e multidisciplinare delle turbine eoliche galleggianti (TEG) che, a partire dalle linee di ancoraggio e piattaforma galleggiante, fino alla turbina, comprensiva di hub, pale, controllo e convertitori di potenza, costituisce la dorsale portante del progetto, attraverso un'azione congiunta dal punto di vista teorico-numerico e sperimentale, sia in laboratorio che in mare. Lo studio di forme innovative e idrodinamicamente efficienti consente l'accoppiamento ottimo con l'aerogeneratore al fine di massimizzarne la produzione energetica per le condizioni meteo-marine tipiche di alcune aree nel Mediterraneo, opportunamente identificate attraverso i dati sulla risorsa disponibili in letteratura e/o forniti dai colleghi di ENEA e RSE. Congiuntamente allo studio di nuovi tipi di ancoraggio ed il loro accoppiamento con le TEG, questo progetto di ricerca mira ad una progettazione ottima della piattaforma, con lo scopo di ridurre il costo di costruzione e di manutenzione delle TEG, favorendo una riduzione del Levelized Cost of the Energy (LCOE) ed un incremento sostanziale del TRL di alcune soluzioni tecnologiche innovative che verranno proposte. Particolare attenzione sarà dedicata a nuove soluzioni progettuali per una riduzione consistente dell'impatto ambientale che tali tecnologie possono avere.

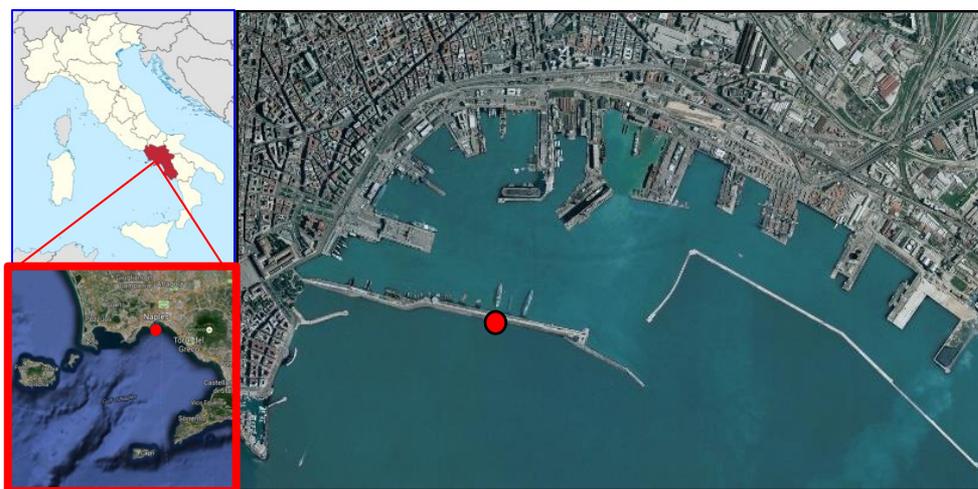


Figura 1: Sito per il laboratorio a mare

Il principale output del progetto di ricerca e' la progettazione e costruzione di un laboratorio a mare per energie rinnovabili, il primo in Italia e tra i pochi in Europa. La disponibilità di un sito nel quale poter

effettuare prove in ambiente reale consentirà: a) un innalzamento del TRL delle tecnologie sviluppate in Italia; b) una più profonda comprensione della scalatura di alcuni fenomeni fisici quando si passa da modello a prototipo; c) di costituire un valore aggiunto nel prossimo futuro per l'intera comunità scientifica italiana e per l'industria nazionale del settore. Attraverso una tale infrastruttura si potrà approfondire lo studio del comportamento dinamico di un dimostratore di TEG (in scala 1:7 di una 5MW, il primo in Italia) in condizioni ambientali rilevanti, il suo monitoraggio strutturale e di performance nel tempo, e valutare la fattibilità di alcuni moduli di quello che sarà l'Arcipelago Energetico, un'idea innovativa per il Mediterraneo proposta recentemente dal CNR-INM. Verranno quindi studiati, sia dal punto di vista teorico-numerico che sperimentale in laboratorio indoor, dei moduli galleggianti con la duplice funzionalità di frangiflutto e Wave Energy Converter (WEC). Nel concetto di Arcipelago, questi ne delimiteranno il perimetro, favorendo la realizzazione di una zona di mare protetta nella quale sarà possibile installare nuove forme di sfruttamento di energia in mare (e.g. isola solare), che insieme a quella prodotta dalle TEG (presenti al di fuori dell'arcipelago) permetteranno in futuro: a) nuove attività produttive (e.g. acquacultura); b) storage dell'energia attraverso la produzione di combustibile liquido a basso impatto ambientale (e.g. metanolo e idrogeno), c) desalinizzazione di acqua marina.

All'interno del presente PR si svilupperanno possibili soluzioni innovative di piattaforme galleggianti per isole solari, che verranno realizzate, dapprima in scala modello per studi in laboratorio indoor, e poi in scala prototipale per prove in laboratorio a mare.

Infine, utilizzando l'opera civile del dimostratore del wave energy converter "OBREC" già esistente nel sito del laboratorio a mare ed integrato nella diga portuale prospiciente il sito stesso, si procederà alla progettazione e costruzione di una turbina idraulica a basso carico che consentirà di quantificare l'efficienza energetica del dimostratore.



Figura 3: Schema concettuale dell'Arcipelago Energetico

In tal modo si vuole proporre un cambiamento di paradigma con il quale affrontare le sfide tecnologiche delle rinnovabili marine nel futuro: l'industria propone dei topic rilevanti per il suo sviluppo futuro e per la sua competitività nel medio-lungo termine nel mercato delle rinnovabili; il mondo della ricerca studia e propone delle progettualità per risolvere i problemi posti dall'industria. Queste vengono poi revisionate e discusse con l'industria per arrivare a delle soluzioni costruttive da



utilizzare e testare. La disponibilità di una rete di laboratori indoor e, soprattutto di un laboratorio a mare, permetterà uno sviluppo consistente ed omogeneo delle progettualità proposte, favorendo una più rapida crescita del TRL associato. In questo processo virtuoso, si introducono fin dall'inizio le competenze scientifiche che coinvolgono aspetti interdisciplinari quali basso impatto ambientale delle tecnologie proposte ed alto valore aggiunto per l'economia delle comunità locali.

Il presente progetto si propone pertanto come obiettivo primario di fungere da punto di attrazione per l'industria nazionale ed europea che opera nel settore delle energie rinnovabili marine e più in particolare dell'eolico galleggiante, che si presenta come una delle tecnologie più promettenti per una soluzione ecosostenibile del problema energetico del nostro paese.

Il progetto si articola in 5 diversi WP che affrontano le diverse tematiche interdisciplinari connesse con le Risorse rinnovabili marine: la modellistica teorico-numerica (WP1) di tutte le componenti di un sistema complesso quale è una TEG; l'aspetto dell'impatto ambientale (WP2) e della stima accurata della forzante ondosa vicino alle strutture (WP3); lo studio e la validazione sperimentale in laboratorio indoor, i.e. in condizioni controllate (WP4); e infine la fase di testing dei dispositivi studiati e sviluppati nei precedenti WP, in condizioni realistiche e in ambiente rilevante quale è il laboratorio a mare MaRELab (WP5) che verrà realizzato all'interno del progetto stesso e costituirà uno degli output più rilevanti del progetto. Le attività in ogni WP sono strettamente correlate tra loro e comunque sono tutte funzionali alla piena realizzazione degli ultimi due WP, dove vengono realizzati materialmente i prototipi che saranno provati su due scale diverse.

## 2) Stato di avanzamento al Mese 12

Nel secondo semestre di attività del progetto sono state concluse tutte le linee di attività funzionali alla scelta ed alla definizione dei prototipi che saranno poi utilizzati per lo studio teorico-numerico, finalizzato alla creazione di un sistema di progettazione avanzato, e per la sperimentazione in laboratorio ed al vero. E' stato inoltre conclusa tutta la parte scientifica relativa allo sviluppo e validazione della parte modellistica che sarà uno step fondamentale per la progettazione preliminare dei prototipi, sia per solare che per eolico galleggiante, da provare nei WP4 e WP5. Le attività scientifiche, in termini di risultati, sono dettagliate nelle linee nel seguito del presente documento.

## 3) Dettagli attività svolte nel periodo M7-M12:

**WP1: Studi sulla producibilità energetica da fonte marina lungo la costa italiana, anche a sfruttamento delle infrastrutture esistenti a mare (piattaforme offshore) e mappatura di siti idonei anche in relazione all' integrazione tra sfruttamento energetico e altre attività produttive nonché attività di supporto allo sviluppo della generazione eolica offshore su piattaforme ancorate e sistemi galleggianti**

Il WP1 mira allo sviluppo di modelli teorici e numerici a complessità crescente per la tecnologia delle piattaforme galleggianti dedicate allo sfruttamento dell'energia eolica e solare in mare. Particolare enfasi è stata data allo studio del sistema complesso costituito da una turbina eolica galleggiante per il Mediterraneo, esplorando i modelli che caratterizzano ciascun sottosistema: quello idrodinamico, aerodinamico, controllo di convertitori elettronici di potenza, regolazione e azionamenti elettrici, monitoraggio strutturale e delle performance della macchina. Tali modelli, una volta verificati e validati

all'interno del progetto stesso, saranno resi disponibili per l'industria nazionale del settore, con evidenti vantaggi per la progettazione preliminare ed avanzata, sia in termini di costi che di affidabilità ed accuratezza. L'attività del secondo semestre è riportata di seguito per ciascuna linea:

*LA 1.1: Sviluppo di modelli numerici a complessità crescente per la progettazione di piattaforme galleggianti. Anno I (CNR-INM):* L'attività svolta ha riguardato lo sviluppo di modelli idrodinamici teorico-numeriche basati sulla soluzione per l'equazione di Navier-Stokes e di sue eventuali approssimazioni, per la definizione del comportamento dinamico di una piattaforma galleggiante (PG) per rinnovabili marine (solare, eolico, onde), anche in presenza di linee di ancoraggio. Il problema può essere affrontato mediante una teoria lineare, nell'ipotesi di flusso a potenziale, per es.: nel caso dei moti verticali di una spar-buoy o nel caso di una piattaforma semisommersa. Questo tipo di modello diventa invece insufficiente, nel caso in cui si pensa a piattaforme di tipo TLP; un modello non lineare o comunque debolmente non lineare diventa fondamentale. Per i moti orizzontali poi, l'accoppiamento con le linee di ancoraggio è inevitabile, almeno nel caso di spar-buoy o di semi-sommerse, per definire un sistema massa-molla caratterizzato quindi da una frequenza di risonanza tipica del sistema. La corretta previsione dei lenti moti orizzontali, eccitati da termini idrodinamici di ordine superiore, diventa fondamentale per una corretta valutazione dei carichi sulle linee di ancoraggio.

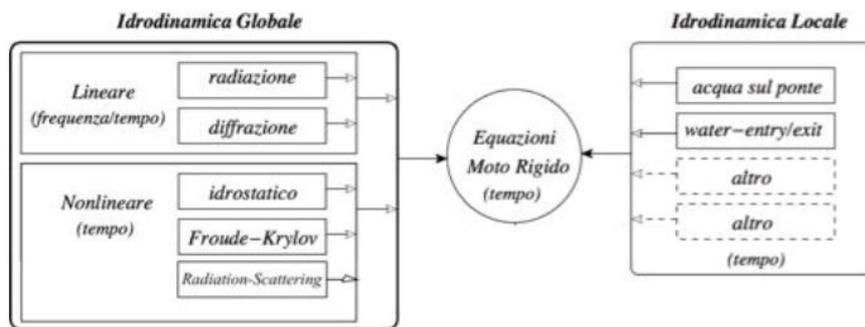


Figura 4: Schema della strategia numerica per piattaforme galleggianti

In questa linea di attività sono stati proposti i seguenti algoritmi per la dinamica del sistema PG: a) Modello lineare a potenziale nel dominio della frequenza e del tempo per PG. b) Modello debolmente non lineare a potenziale nel dominio del tempo per PG. c) Modello b) con eventuali correzioni viscosive a seconda del tipo di PG. d) Tecniche domain decomposition con l'accoppiamento del modello b) per il flusso esterno con modelli locali per l'occorrenza i fenomeni di impatto e/o di acqua sul ponte della piattaforma (vedi schema della strategia numerica proposta).

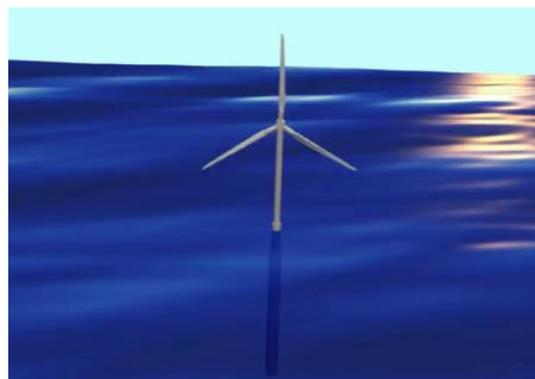


Figura 5: Simulazione di una TEG (CNR-INM/Università di Roma 3)

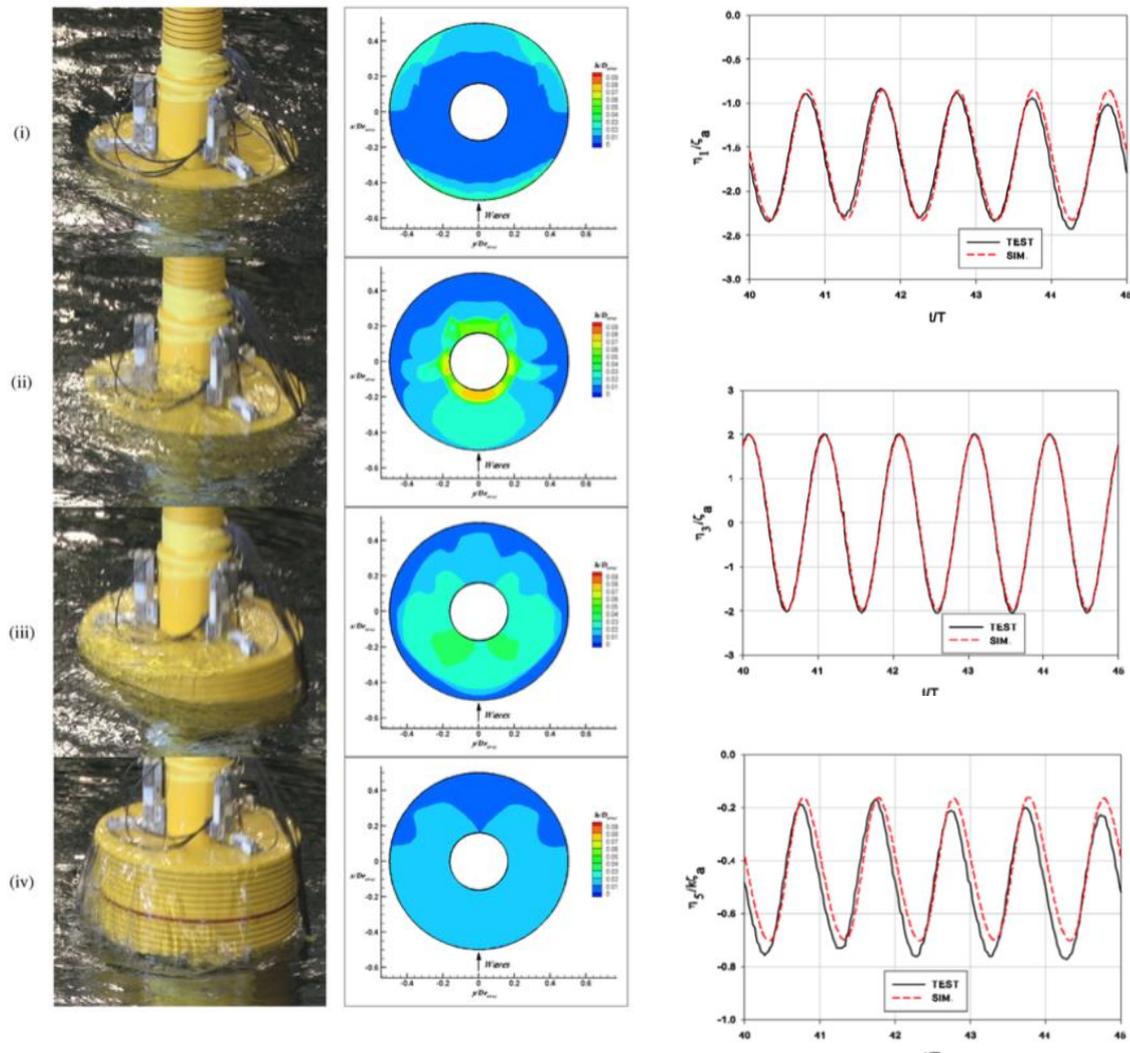


Figura 6: Simulazione con il codice CNR-INM di un sistema di generazione di energia dalle onde montato su una turbina eolica (CNR-INM): confronto numerico-sperimentale dell'evoluzione dell'acqua sul ponte del sistema (sinistra) e dei moti della struttura galleggiante (destra)

**LA 1.3: Progettazione delle pale eoliche e sviluppo di modelli per il controllo delle prestazioni di floating offshore wind turbines. Anno I (Università Roma Tre):** L'attività svolta ha riguardato la progettazione concettuale e preliminare delle pale eoliche che devono costituire il rotore per le floating offshore wind turbine (FOWT). Viene eseguita una doppia azione di progettazione: una dedicata alla turbina che verrà esaminata in vasca e una dedicata alla turbina che verrà installata nel laboratorio a mare. Il processo della progettazione concettuale partendo da un'accurata analisi dello stato dell'arte ha portato alla definizione di massima delle dimensioni e tipologie di pale, in funzione degli obiettivi applicativi e delle condizioni operative attese. Per prima cosa è stata effettuata l'opportuna scalatura dei modelli destinati all'uso in vasca e a mare. Il modello di riferimento è stato identificato in una macchina da 5MW, tra le più utilizzate attualmente in ambito industriale, sulla quale è disponibile una cospicua letteratura scientifica e tecnica esaminante tutti gli aspetti costruttivi e di funzionamento. Sono state scelte due diverse scale per la realizzazione dei modelli sperimentali, nel caso della macchina da testare in vasca il limite sulla dimensione viene dalle limitazioni dettate dalle strutture a disposizione mentre

nel caso del generatore da installare in mare è stata eseguita una valutazione più complessa considerando anche tutti gli aspetti legati alle condizioni meteo-marine del sito identificato per gli esperimenti. A valle della progettazione concettuale, prendendo come input i dati ottenuti per le due diverse turbine, sono state identificate le caratteristiche aerodinamiche e strutturali delle pale da realizzare per le attività sperimentali.

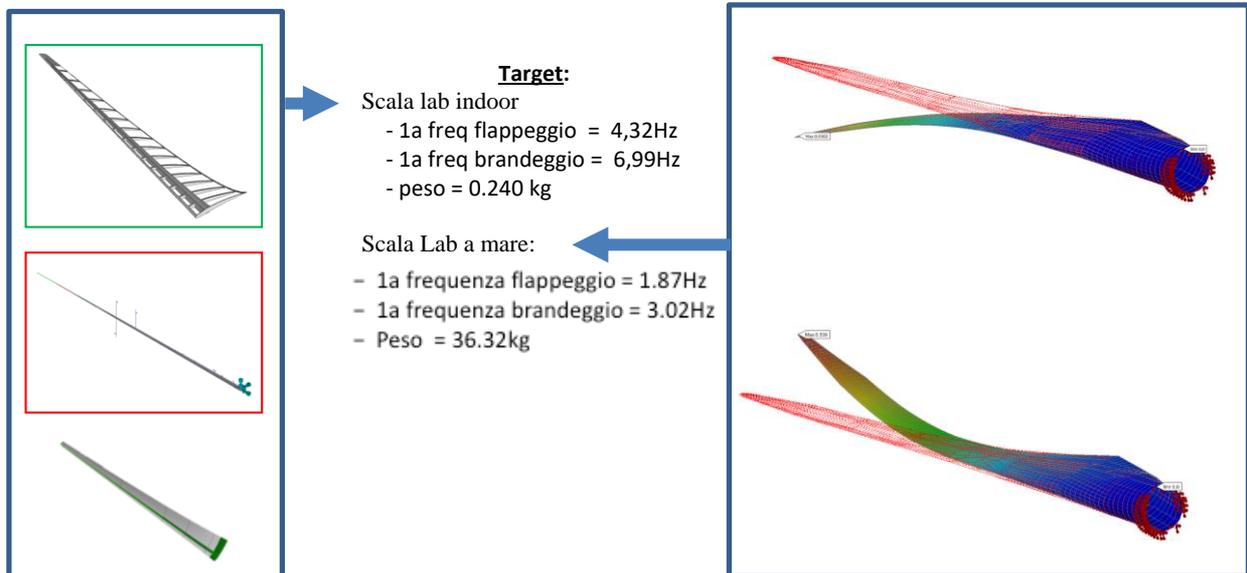


Figura 7: Risultati della progettazione aeroelastica delle pale della TEG nel modello in scala per laboratorio indoor (sinistra) e per laboratorio a mare (destra). Nel caso di prove in laboratorio indoor (sinistra) sono state previste tre diverse soluzioni: pala in balsa e vetroresina (in alto), trave scatolare equivalente in alluminio (al centro) e pala in schiuma (in basso)

Una volta determinati i profili e le distribuzioni di corda e svergolamento necessari a garantire le prestazioni scalate è stato impostato un problema di ottimizzazione che basandosi su analisi FEM delle strutture di prova ha permesso l'identificazione delle distribuzioni di massa e rigidità atte a garantire la completa scalatura aeroelastica delle pale stesse.

**LA1.6 Modellistica e regolazione di azionamenti elettrici per l'inseguimento della massima potenza generabile in floating offshore wind turbine. Anno I (CNR-INM):** Nel corso del secondo semestre del progetto si è proceduto ad un'analisi teorica delle modalità costruttive, delle prerogative tecniche, dei pregi e difetti, delle macchine multifase in generale e delle macchine dual three-phase in particolare.

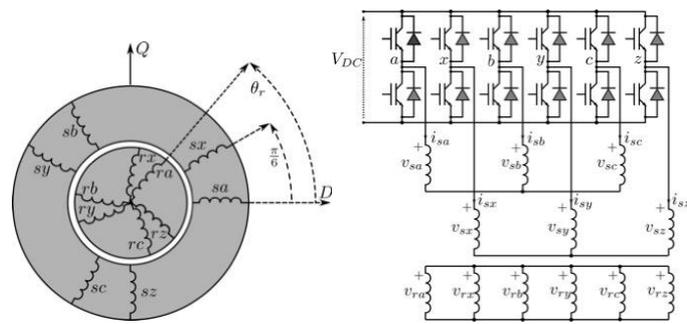


Figura 8: sezione trasversale di una macchina dual three-phase asincrona (sinistra). Schema dell'inverter esafase per l'alimentazione del motore dual three-phase asincrono (destra)

Si sono messe in evidenza le prerogative principali che le rendono preferibili alle corrispondenti macchine trifasi nel contesto del sistema di generazione eolica off-shore oggetto di studio (potenza 5 MW), con particolare riferimento alle prerogative di robustezza ai guasti e relativa capacità di riconfigurazione (fault tolerance).

*LA1.9 Sviluppo e controllo di convertitori elettronici di potenza per floating offshore wind turbine. Anno I (Università Roma Tre):* L'attività condotta nel corso della prima annualità fa riferimento a due specifici argomenti individuati in fase di proposizione del progetto; nello specifico, la definizione delle caratteristiche elettriche nei sistemi Floating Offshore Wind Turbine (FOWT) in funzione della potenza estraibile e della distanza dalla terraferma, e la classificazione delle tecnologie per i dispositivi elettronici da impiegare nei convertitori elettronici di potenza per la conversione AC-DC e DC-AC insieme alla classificazione dei cavi per impiego marino nei sistemi FOWT. Sulla base degli studi effettuati con riferimento ai due punti evidenziati saranno successivamente definite le caratteristiche principali delle apparecchiature (convertitori statici di potenza e cavi) da impiegare nel dimostratore da installare sul campo. In aggiunta a quanto esposto, nel corso delle attività si è resa necessaria l'individuazione di macchina elettrica, convertitore elettronico di potenza e piattaforma di controllo da impiegare per il set-up del prototipo destinato alle prove in bacino previste presso il sito sperimentale CNR-INM di Roma.

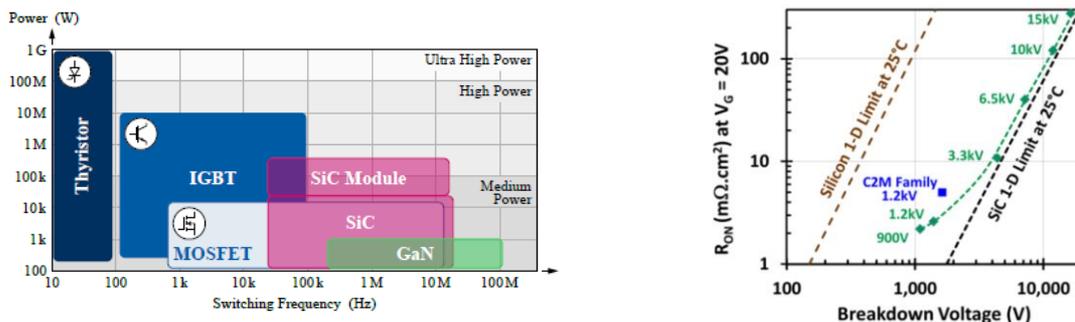


Figura 9: Grafico delle aree di utilizzo delle diverse tecnologie di semiconduttori di potenza, in funzione della frequenza di commutazione e della potenza (sinistra). Confronto della resistenza di conduzione in funzione della tensione di blocco in dispositivi Si e SiC (destra)

Tale sistema prototipale è stato opportunamente scalato per l'indagine degli aspetti aero-idrodinamici e delle sollecitazioni meccaniche sulle diverse parti della turbina eolica; indagine necessaria ad elaborare informazioni fondamentali per la progettazione dei sistemi a piena potenza. L'azionamento elettrico proposto è stato individuato in relazione anche alla possibilità di impiegare alcune parti, in particolare il convertitore elettronico di potenza e la piattaforma di controllo, come base per lo sviluppo dell'azionamento elettrico di generazione che sarà utilizzato nel prototipo destinato alle prove nel laboratorio a mare.

LA1.12 Modelli di simulazione high-fidelity per la verifica delle strategie di controllo (per floating offshore wind turbine). Anno I (CNR-INM): Durante il secondo semestre di attività della LA 1.12, il solutore aerodinamico sviluppato nel semestre precedente (FUNAERO) è stato applicato all'analisi di una turbina *onshore* operante in condizioni di shear estremo analizzando i sovraccarichi alle componenti meccaniche che derivano da una condizione di *off-design*. Inoltre, sono stati inclusi nel solutore i gradi di libertà cinematici necessari per l'interfaccia con il solutore della dinamica della piattaforma sviluppato nelle altre linee di attività.

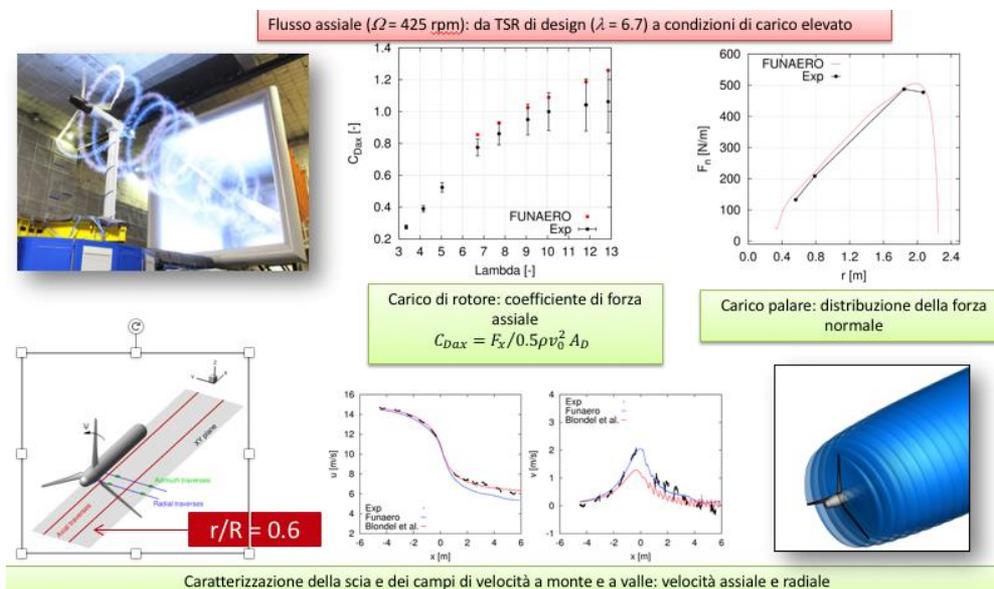


Figura 10: Validazione del codice aerodinamico CNR-INM Funaero con dati sperimentali New Mexico (galleria del Vento)

Nel semestre in esame è stato quindi considerato il caso di una turbina *offshore* galleggiante soggetta ad un moto imposto corrispondente ad un'oscillazione periodica di pitch della piattaforma. I risultati conseguiti hanno mostrato che, in caso di oscillazioni anche di pochi gradi della piattaforma, le pale ed il rotore risultano soggetti a rilevanti sovraccarichi rispetto alle condizioni di design (flusso assiale). Inoltre l'interazione tra il moto della piattaforma e quello di rotazione influenza lo spettro in frequenza dei carichi aerodinamici. La capacità di descrivere tale fenomeno risulta fondamentale per il seguito delle attività del progetto ai fini della caratterizzazione aeroelastica del rotore e per la sintesi di opportune leggi di controllo per la massimizzazione della potenza generata.

Anche nel secondo semestre, nell'ambito della stessa LA 1.12, è stato proseguito il lavoro sul modello di sintesi basato su metamodelli adattivi multi-fedeltà per l'assimilazione/fusione dei risultati da solutori a fedeltà variabile. Le prestazioni del modello sono state valutate su un problema benchmark costituito da quattro funzioni analitiche, specificatamente SK1, SSFY2, MLF1, Far1, selezionate in letteratura (Huband et al. 2006). Tali funzioni hanno dimensionalità tra uno e due e contengono due funzioni obiettivo. Per simulare l'ambiente multi-fedeltà la prima funzione obiettivo è stata considerata l'obiettivo di alta fedeltà, la seconda come la funzione errore e la bassa fedeltà è stata ottenuta per differenza tra alta fedeltà ed errore.

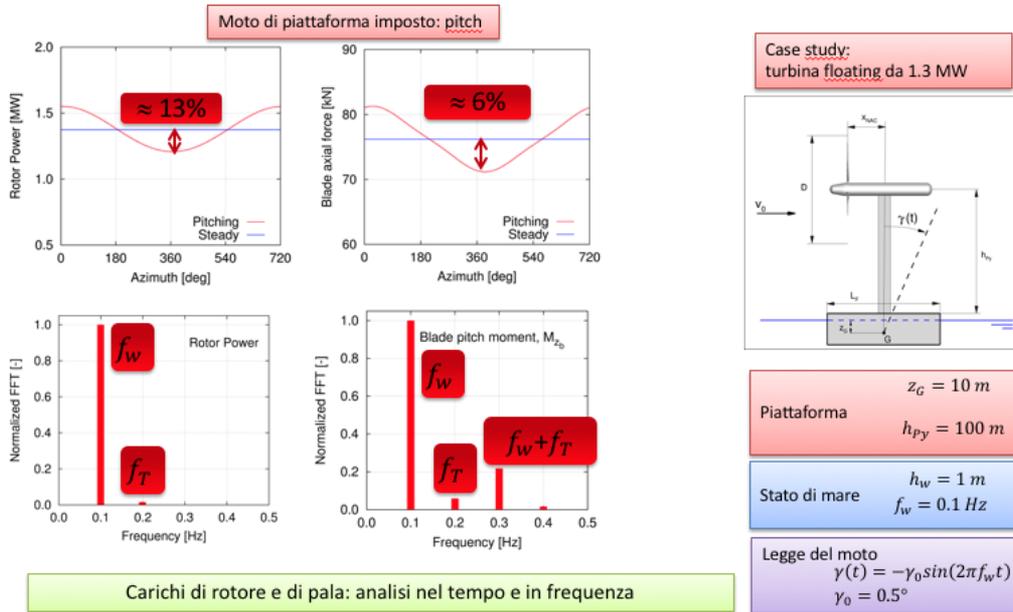


Figura 11: Applicazione del modello numerico CNR-INM Funaero al caso di turbine eoliche galleggianti

Nonostante i problemi esaminati non siano a dimensionalità alta, assumono notevole interesse nel contesto della costruzione del metamodello a fedeltà multipla, essendo multimodali e presentando diversi minimi. Inoltre, le funzioni errore sono multimodali e le funzioni di alta e bassa fedeltà mostrano significative differenze, proprio come può accadere quando vengono usati modelli fisici diversi (ad esempio, modelli per flussi potenziali o viscosi) per risolvere lo stesso problema fluidodinamico.

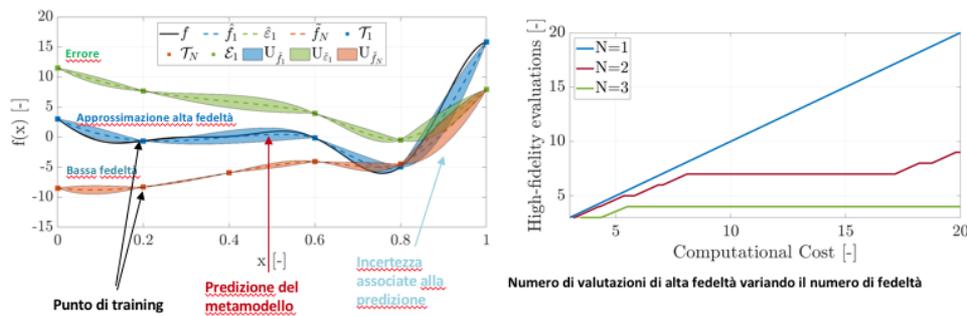


Figura 12: Applicazione di metamodelli a fedeltà variabile su problemi prototipo

La valutazione delle prestazioni del metamodello multi-fedeltà è stata effettuata in termini di convergenza al minimo della funzione obiettivo, usando le quattro metodologie di campionamento implementate nel primo semestre: (i) la predizione di massima incertezza (MUAS), (ii) una versione multi-fedeltà dell'expected improvement (MFEI), (iii) la predizione di massima incertezza e la funzione obiettivo attraverso un opportuno fattore di merito aggregato (ACAS), (iv) un criterio di campionamento basato sulla soluzione di un problema multi-obiettivo considerando la predizione di massima incertezza e il valore della funzione obiettivo (MCAS). I risultati sui problemi benchmark

analitici hanno dimostrato che la metodologia di campionamento ACAS, seguita dalla metodologia di campionamento MFEI, è la più efficace sotto l'aspetto dell'ottimizzazione.

**LA1.15 Sviluppo e progettazione di un sistema di monitoraggio strutturale per turbina eolica galleggiante. Anno I (CNR-INM):** Sono stati definiti gli obiettivi generali del sistema di monitoraggio della turbina eolica per il laboratorio a mare. Le finalità generali del sistema di monitoraggio sono state definite e tradotte in specifiche sul tipo, numero e posizione delle grandezze da misurare, nonché in altri requisiti quali robustezza, impermeabilità, compatibilità elettromagnetiche e così via. Queste specifiche sono state quindi confrontate con le best practice su sistemi di questo genere sia a livello industriale che di ricerca scientifica in modo da avere un riferimento sullo stato dell'arte nel settore. Sono state raccolte quindi le tecnologie necessarie all'implementazione del sistema di misura, e sono state avviate ricerche di mercato per il reperimento dei sensori e dei sistemi di acquisizione. Le interazioni con gli altri WP-LA sono state evidenziate e conseguentemente è stato messo a punto un flusso di lavoro per la progettazione e realizzazione del sistema di monitoraggio. Si è pertanto in condizione di procedere ad un progetto di dettaglio del sistema e al successivo acquisto dei sistemi.

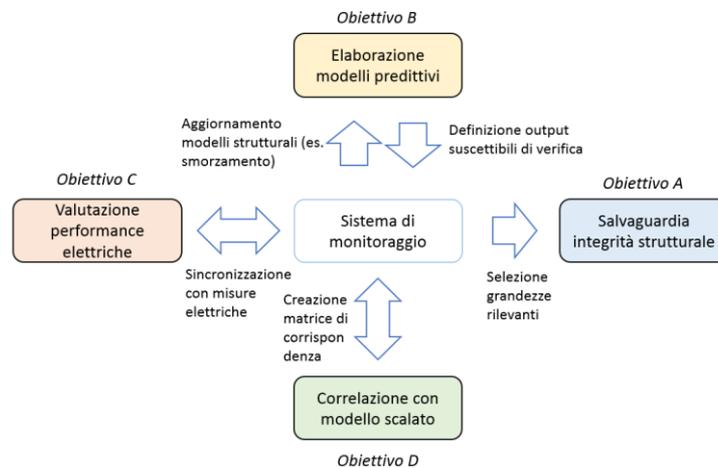


Figura 13: Obiettivi del sistema di monitoraggio per le prove in mare, presso il laboratorio a mare MaRELab

Come criticità si mette in evidenza il soddisfacimento di molteplici criteri nello sviluppo e nella realizzazione del sistema (efficienza e bilanciamento del sistema, costi e tempi di acquisto della strumentazione, armonizzazione con altre LA) che richiedono una certa attenzione per evitare latenze e ritardi nelle successive fasi del progetto.

**WP2: Valutazioni di sostenibilità ambientale ed economica di siti specifici, in funzione della disponibilità delle risorse energetiche, compatibilità con gli altri usi del mare, la prossimità ed il valore della domanda energetica, complessità d'installazione/manutenzione, costi, ecc.**

**LA2.1 - Valutazione di sostenibilità ambientale del sito identificato per il laboratorio a mare. Anno I (Università della Campania):** Nell'ambito della LA 2.1, la compatibilità dell'inserimento nel laboratorio a mare è valutata attraverso una ricognizione dei potenziali impatti e la verifica della possibilità di una loro eventuale mitigazione. La valutazione di sostenibilità ha la finalità di verificare la compatibilità delle scelte del progetto di laboratorio con le criticità del sito, ai fini di individuare preventivamente gli

effetti che ne potrebbero derivare e le misure volte ad impedire, mitigare o compensare l'incremento delle eventuali criticità ambientali e territoriali già presenti e/o i potenziali impatti negativi delle scelte operate.

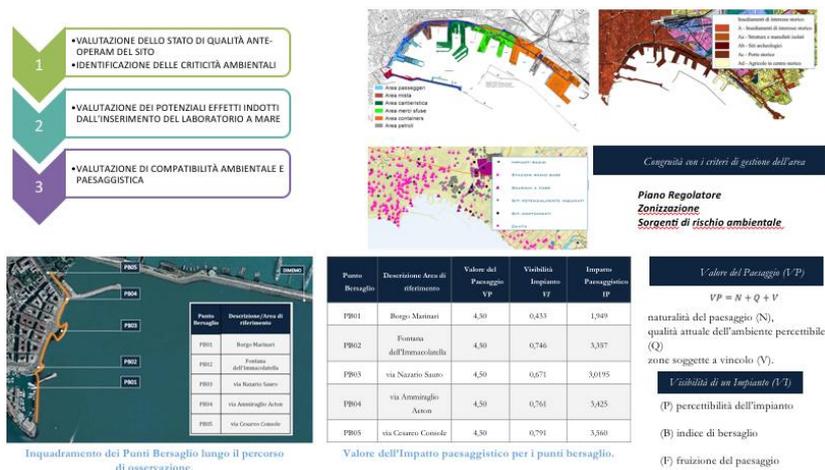


Figura 14: Strategia per lo studio dell'impatto ambientale presso il laboratorio a mare MaRELab

E' stato prodotto un Technical Report sugli esiti della valutazione di sostenibilità ambientale e territoriale relativo all'inserimento del laboratorio a mare presso il Molo S.Vincenzo – Porto di Napoli che ha evidenziato il trascurabile impatto delle attività e dei dispositivi previsti dal progetto.

**WP3: Sistemi di previsione a breve e medio termine della producibilità energetica in ambiente marino e costiero da moto ondoso, correnti marine e vento, anche in funzione delle caratteristiche di sistemi di conversione innovativi.**

**LA3.1- Sviluppo di un modello su scala locale per la previsione del moto e energia ondosa. Applicazione al sito del lab a mare. Anno I (CNR-INM):**

Nel secondo semestre del 2019 il codice è stato esteso per includere problemi di propagazione multi-direzionale e l'interazione con batimetrie complesse. In particolare sono stati considerati fondali di concreto interesse applicativo, come barre sommerse, piccole isole e profili di costa (per esempio, baia-promontorio). Dove possibile, sono stati effettuati confronti con dati (sperimentali o numerici) presenti in letteratura e in tutti i casi il codice ha mostrato un buon accordo con i valori di riferimento. Nel caso della propagazione sul profilo baia-promontorio è stata effettuata in maniera preliminare un'analisi per individuare le zone della regione costiera in cui è presente una maggiore focalizzazione del moto ondoso e, di conseguenza, un maggior contenuto energetico. In entrambe le fasi di sviluppo sono stati effettuati test sia in casi di propagazione in condizioni di acque intermedie/profonde che in casi di acqua bassa.

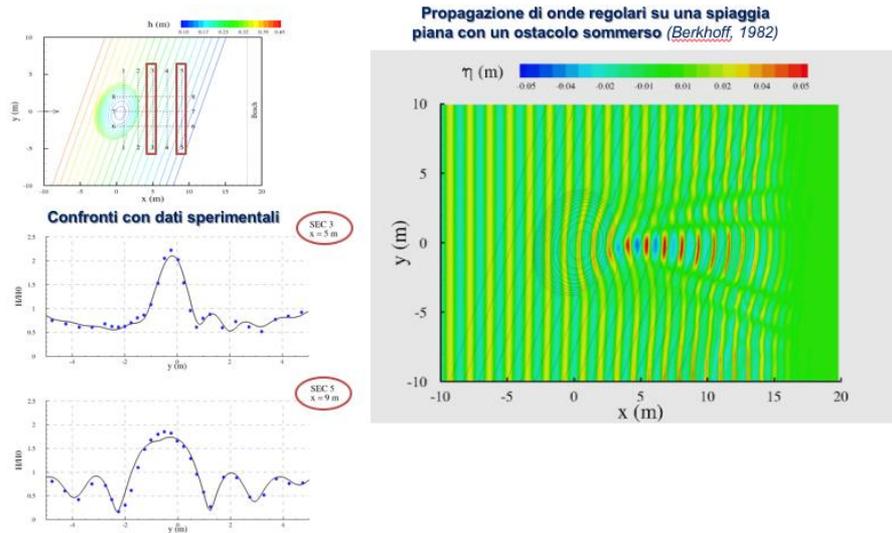


Figura 15: Validazione codice numerico CNR-INM per la propagazione di onde regolari su una spiaggia piana con ostacolo sommerso

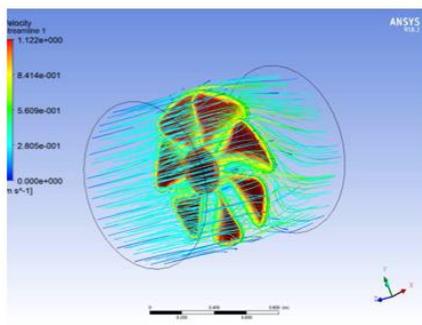
**WP4: Sviluppo di soluzioni e studio di materiali innovativi per lo sfruttamento energetico da fonte marina, allo scopo non solo di ottimizzare la produzione di energia, ma anche di ridurre il costo di costruzione e di manutenzione dei sistemi e quindi favorire una riduzione del LCOE.**

Lo scopo di questo WP consiste nello sviluppo in scala modello di prototipi fisici per soluzioni innovative di nuovi dispositivi per l'estrazione di energia marina da vento, sole e onda. In accordo agli obiettivi di progetto, al fine di portare avanti lo sviluppo del concetto di arcipelago energetico galleggiante (AEG), vengono proposte diverse soluzioni progettuali da poter integrare nel concept di AEG, utilizzando le caratteristiche uniche degli impianti sperimentali disponibili presso il CNR-INM e l'Università Unicampania.

*LA4.3 Sviluppo di una turbina Idroelettrica a salto ridotto per applicazioni marine. Anno I (Università della Campania):*

La LA 4.3 ha visto la collaborazione di personale con diverse competenze per la messa a punto di un codice di algoritmo di simulazione delle prestazioni del sistema OBREC e per l'analisi multicriteriale delle diverse tecnologie di macchine idrauliche come risultanti dal pre-screening ottenuto nel primo semestre.

Turbina ad elica



Turbina a vite di archimede

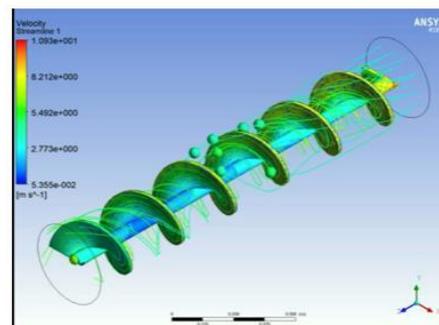


Figura 16: Modellazione CFD di turbine idroelettriche a salto ridotto

Sono stati avviati studi di dettaglio e simulazioni numeriche (sia con codice di calcolo a parametri concentrati che con software CFD) che costituiscono i passi prioritari per lo sviluppo di questa nuova tecnologia.

#### LA4.6 Sperimentazione in vasca su modello in scala di una piattaforma galleggiante per solare fotovoltaico: Anno I (CNR-INM)

La presente linea di attività sperimentale assume un ruolo fondamentale per identificare i meccanismi fisici ed idrodinamici alla base del comportamento dinamico della piattaforma galleggiante per pannelli fotovoltaici. Tale attività è propedeutica allo sviluppo dei modelli teorico-numeriche che verranno condotti nella linea L4.14 e 4.15, finalizzati allo sviluppo di una piattaforma flessibile innovativa per solare PV che verrà poi realizzata a livello prototipale nella linea L5.7-5.9 per le prove nel laboratorio a mare. Per le sue caratteristiche di piattaforma energetica, i.e. ricoperta di pannelli solari PV, l'isola non può accettare moti angolari elevati che potrebbero essere penalizzanti per la produzione di energia. Da qui nasce l'idea di utilizzare il modulo "isola solare" all'interno del concetto di Arcipelago Energetico (AE), cioè di una zona di mare circondata da frangiflutti/WEC. I frangiflutti avranno lo scopo di favorire l'instaurarsi di condizioni di mare più calmo all'interno dell'Arcipelago, determinando condizioni favorevoli per lo sfruttamento ottimale dell'energia solare. Pertanto ispirandosi ai modelli flessibili per i galleggianti usati negli impianti di acquacultura, in questo secondo semestre è stato sviluppato un modello matematico semplificato per piattaforme flessibili che ha permesso la progettazione di tre diverse piattaforme galleggianti (due dei quali illustrati in figura). E' stato affrontato e risolto il problema della scalatura del prototipo per l'esecuzione delle prove in vasca INM da condurre nel secondo anno di attività. E' stato infine impostato il set-up sperimentale per la futura esecuzione delle prove.

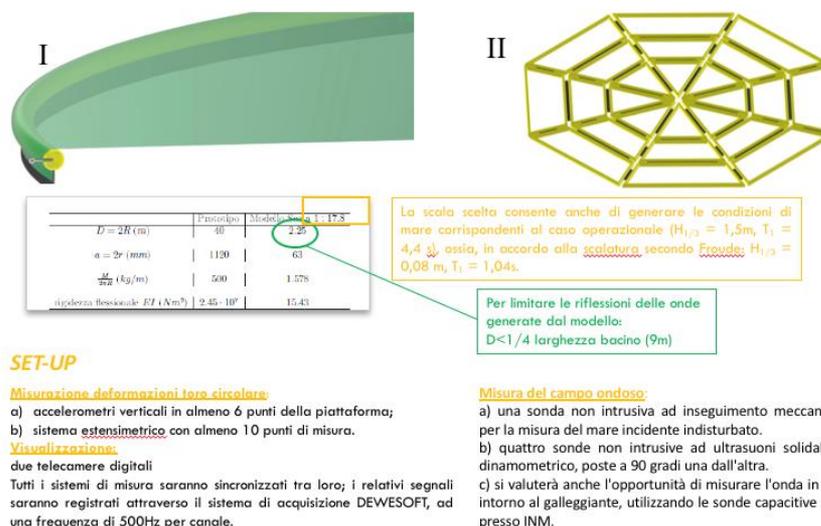


Figura 17: Progettazione del setup di due dei tre concept di isola solare per esperimenti in laboratorio CNR-INM

**LA4.9 Sperimentazione in vasca su modello in scala di turbine eolica galleggiante: Anno I (CNR-INM).** Obiettivo di questa attività è la progettazione strutturale e aero-idrodinamica di un modello in scala per prove in vasca di una turbina eolica galleggiante. L'attività progettuale è finalizzata alla esecuzione di una intensa campagna sperimentale da eseguire nel corso del progetto stesso presso la vasca navale dell'Istituto CNR-INM. Pertanto, oltre alla progettazione del sistema piattaforma galleggiante, ancoraggi, torre eolica e rotore, viene descritto il dettaglio del set-up sperimentale e del sistema di generazione del vento utilizzato nel bacino di prova CNR-INM. Entrambi saranno appositamente costruiti per lo svolgimento delle prove in vasca su modello di turbina eolica galleggiante previste nel futuro nella seguente attività di ricerca. Viene quindi proposta la strategia di investigazione per le prove in vasca, arrivando alla definizione di una matrice di test.

La progettazione di un modello di turbina eolica galleggiante è un'attività relativamente complessa, dato che, similmente alla progettazione di una turbina reale, richiede delle competenze interdisciplinari che vanno da quelle aerodinamiche a quelle idrodinamiche, strutturali e di controllo. Una tale esigenza è stato il filo conduttore della presente linea di attività che va vista inserita all'interno di uno studio interdisciplinare con le attività svolte nel WP1. La presente linea di ricerca si è quindi diversificata su diversi fronti di indagine che, nel secondo semestre possono essere riassunti in:

- progettazione interdisciplinare del modello fisico di turbina eolica galleggiante;
- progettazione del set-up di misura delle grandezze fisiche di interesse;
- progettazione del sistema di generazione del vento in vasca.

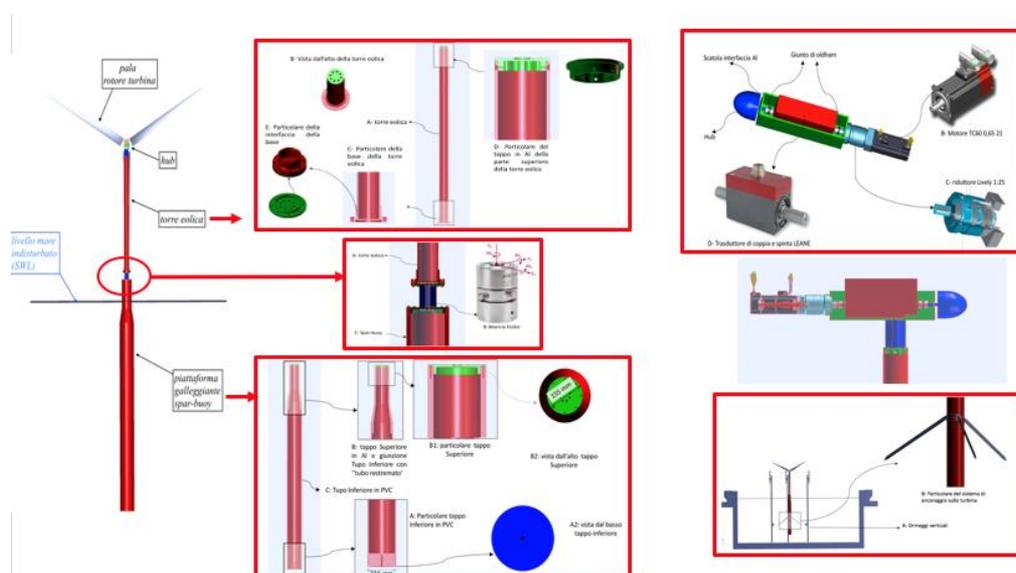


Figura 18: Dettaglio della progettazione del setup per esperimenti in laboratorio CNR-INM su turbina eolica galleggiante

*LA4.12 Sperimentazione in vasca su modello in scala di un sistema galleggiante multiuso per l'estrazione di energia dalle onde / frangiflutti: Anno I (Università della Campania)*

Il secondo semestre di attività della LA 4.12 si sono concentrate sulla definizione di dettaglio delle modifiche da apportare alla vasca ondogena del Dipartimento di Ingegneria di UNICAMPANIA al fine di poter accogliere il dispositivo frangiflutti-WEC ricercato.

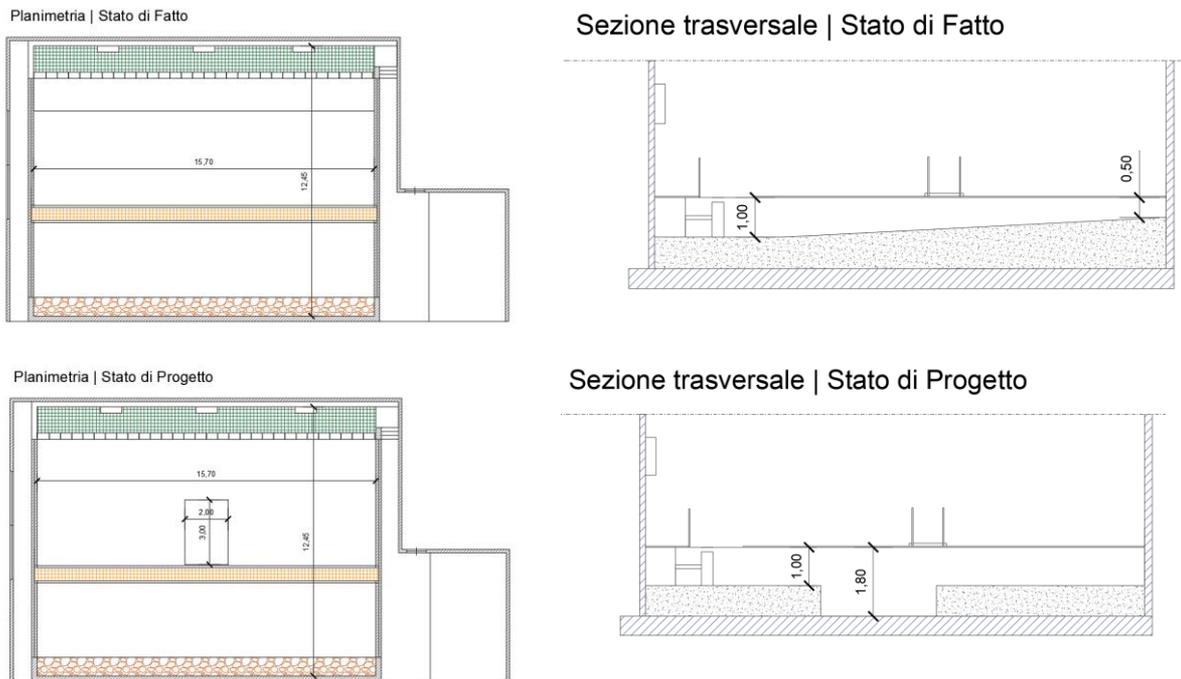


Figura 19: Modifiche vasca ondogena Dip. Ingegneria Univ. Unicampania

Tali modifiche hanno riguardato sia importanti variazioni di assetto nella geometria del fondale, ad una riconfigurazione delle superfici assorbenti e alla realizzazione di un “pozzo” offshore, posto nella parte centrale della vasca. Inoltre, sono state riesaminate le elettroniche di controllo e regolazione dei battitori, al fine di ricalibrarle per le nuove modalità di funzionamento.

**WP5: Sperimentazione e realizzazione di prototipi in scala 1:1.**

Il WP5 è finalizzato alla costruzione del primo laboratorio a mare del Mediterraneo per le Energie Rinnovabili Marine. Il sito prescelto è quello presso la diga foranea del porto di Napoli, dove esiste uno spazio di mare dato in concessione ad Unicampania (per un’area rettangolare di circa 100m verso mare x 40 m lungo la diga). La batimetria del sito è tale per cui già a qualche decina di metri dalla diga si realizzano profondità del fondale intorno ai 30 metri, consentendo quindi un corretto scaling del comportamento delle piattaforme in acque intermedie. All’interno del progetto si doterà il lab di : una turbina idraulica a basso carico per il sistema di conversione di energia dalle onde OBREC in scala 1:1 già presente nel sito; - una piattaforma galleggiante per solare fotovoltaico.- un dimostratore di turbina eolica galleggiante; – un sistema di monitoraggio strutturale per il dimostratore turbina eolica galleggiante; - sistemi di conversione di energia.

#### LA5.1 Realizzazione di un laboratorio a mare per prove su sistemi per la conversione di energie rinnovabili marine presso il porto di Napoli: Anno I (CNR-INM)

Nel secondo semestre è stata realizzata la progettazione del primo laboratorio a mare con relativi sistemi di misura e progettazione di un sistema elettrico per ricevere energia elettrica prodotta da un generatore eolico e da una piattaforma solare, da localizzarsi nei limiti dello specchio acqueo antistante Molo S. Vincenzo nel Porto di Napoli. Lo scopo dell'installazione è implementare le dotazioni strumentali del laboratorio a mare già costituito dal dispositivo sperimentale denominato "DIMEMO" (Diga Marittima per l'Energia del Moto Ondoso), installato sulla scogliera del molo S. Vincenzo, nonché da quota parte della "ex palazzina meteo", con funzione di hub logistico e da un sistema di misura innovativo per la misura delle onde basato sull'utilizzo di boe ondometriche e wave radar.

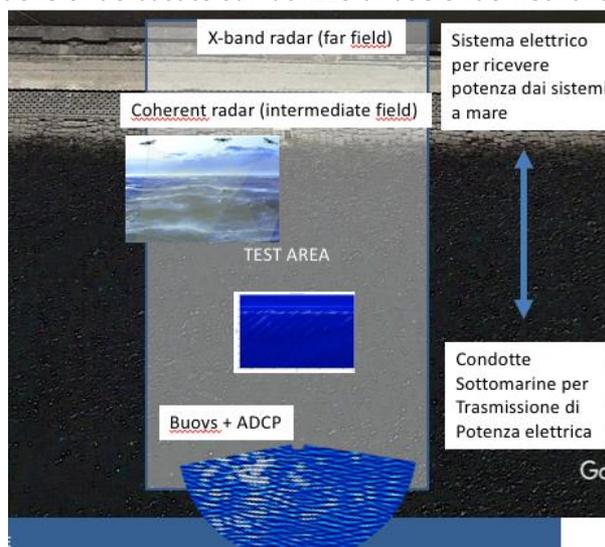


Figura 20: Dotazione sperimentale laboratorio a mare MaRELab

Nel presente studio sono riportate le considerazioni tecniche di base come strumento indispensabile per la corretta interpretazione delle attività da porsi in essere nella seguente LA, che costituiscono inoltre un unicum internazionale che proietterà il Porto di Napoli ancora di più nel settore della sostenibilità degli approvvigionamenti energetici "blu", ovvero derivanti dalle tecnologie offshore del mare e del vento.

#### LA5.4 Realizzazione di una turbina idraulica a basso carico per il sistema di conversione di energia dalle onde OBREC in scala 1:1 (lab a mare): Anno I (Università della Campania)

A partire dalla tecnologia identificata nella fase LA4.3, si è proceduto alla definizione dei parametri progettuali del primo prototipo al mondo di turbina "marino-elettrica", da realizzare, installare e monitorare presso la sala macchine del dispositivo OBREC. Le attività comprendono una campagna sperimentale condotta nell'autunno-inverno 2019 e la messa a punto di elaborati di dettaglio necessari per la messa in produzione delle varie componenti della nuova macchina idraulica. I risultati includono una parte di test in condizioni reali di una macchina idraulica a basso salto nel sistema di conversione dell'energia del moto ondoso "OBREC". Le analisi dei dati sperimentali raccolti, uniti a quanto emerso dagli studi propri della LA 4.3, sono stati implementati numericamente allo scopo di facilitare il ridimensionamento dell'impianto riducendo il rischio degli investimenti relativi alle attività dimostrative dell'OBREC.



Figura 21: Immagini dell'area del laboratorio a mare MaRELab con particolare vista del sistema OBREC durante la campagna condotta nel 2019

#### 4) Conclusioni e prospettive:

Le attività previste per la fine del primo anno di progetto si sono concluse con successo, e permetteranno di procedere alla progettazione accurata di piattaforme per sistemi TEG e solare galleggiante da installare presso il laboratorio a mare MaRELab. Gli strumenti sviluppati, sia teorico-numeriche, che di progettazione avanzata, consentiranno di superare le eventuali criticità che si manifesteranno durante la fase di progettazione per la costruzione dei sistemi complessi, e dei relativi sistemi di ancoraggio. Particolare criticità è stata identificata nella procedura di installazione che inevitabilmente necessiterà il coinvolgimento di partner industriali con adeguata esperienza. Alla fine del primo anno, in accordo con quanto atteso nelle premesse, il progetto ha riscosso un notevole interesse tra i diversi partner industriali nel settore delle rinnovabili marine. Tale interesse si potrebbe concretizzare in opportuni accordi scientifici per lo studio di specifiche piattaforme di interesse per i partner industriali del nostro paese, risultando in un possibile incremento del TRL di tecnologie ancora considerate in fase di sviluppo.