

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria dell'Energia

Relazione per la prova finale
***«Analisi comparativa di parchi eolici off-shore:
in Italia e nel mar del Nord»***

Tutor universitario: Prof. Giuseppe Zollino

Laureando: *Giacomo Maggia*

Padova, 22/11/2023

OBIETTIVO DEL LAVORO:

- Fornire un'analisi comparativa tra i parchi eolici in Italia e Mar del Nord

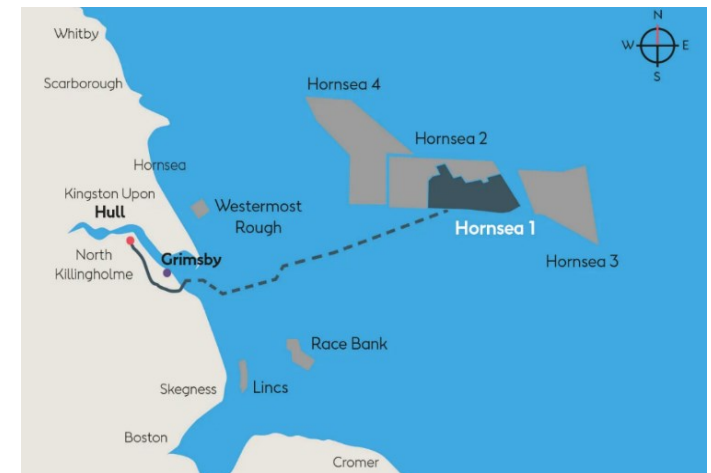
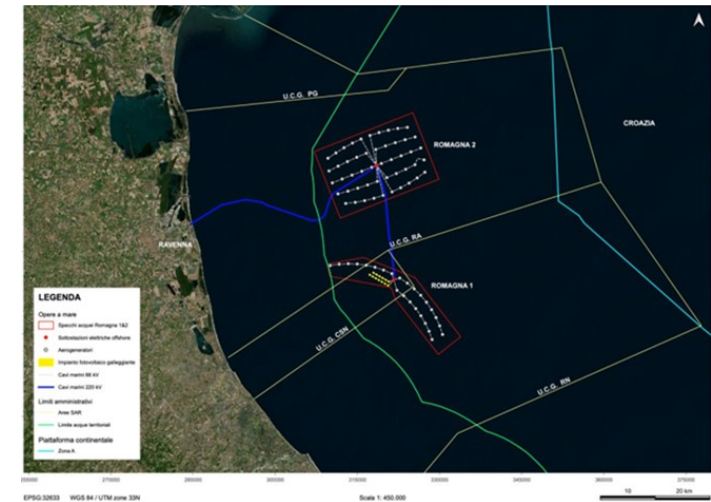
Confronto

Italia - Progetto Agnes

- E' stato elaborato nel 2017 dall'Ingegnere Alberto Bernabini
- Hub energetico:** impianti eolici + fotovoltaici + accumulo mediante batterie + produzione e stoccaggio di idrogeno verde

Mare del Nord - Hornsea Project One - Hornsea Project Two - Hornsea Project Three - Hornsea Project Four

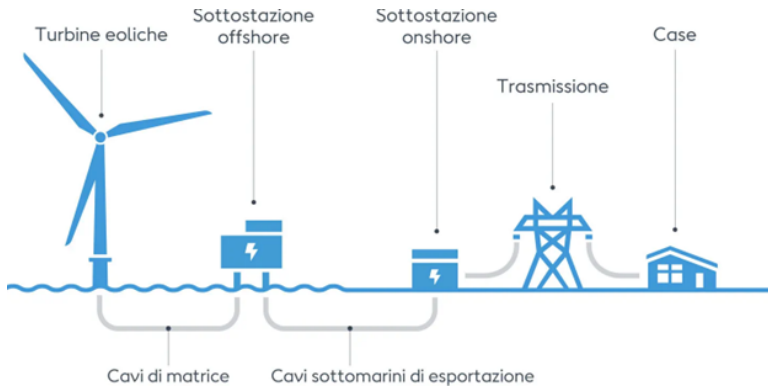
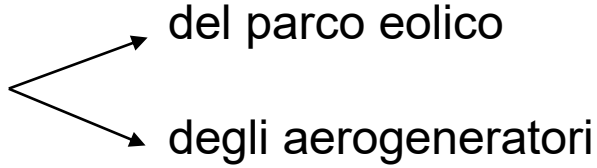
- E' il **più grande parco eolico off-shore al mondo**, in via di completamento



1. Presentazione del progetto

2. Caratteristiche del sito e del sottosuolo

3. Descrizione delle tecnologie specifiche

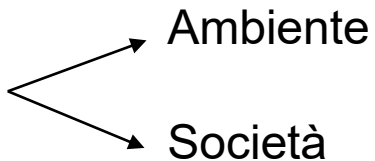


4. Costo energia elettrica

Input di calcolo

- Costo impianto (Isp)(CAPEX)
- Costi fissi OPEX annuali
- Ore equivalenti (Na)
- Tasso di sconto (a)
- Durata di vita utile (n)

5. Impatto con altre realtà



Agnes – Romagna 1

➤ Romagna 1 (200 MW di potenza) ospiterà:

- **25 aerogeneratori** da 8-9 MW
- **impianto fotovoltaico galleggiante** (100 MW) con ormeggi ancorati al fondale
- una sottostazione elettrica di trasformazione da 66/220 kV



➤ Layout della componente eolica è costituito da due linee curve quasi parallele:

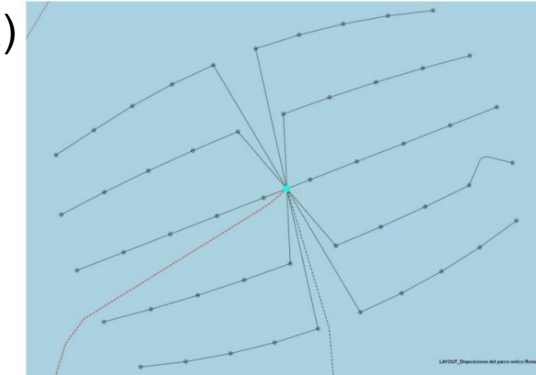
→ la più lunga: 17 aerogeneratori, si estende per 12 miglia nautiche in direzione Sud-Est a partire dalla turbina più vicina a terra, collocata a 12 miglia dalla costa

→ la più corta: inizia da circa 18 miglia nautiche e si estende in direzione Sud-Est per 5/6 miglia nautiche, ospitando 8 aerogeneratori

Agnes – Romagna 2

➤ Romagna 2 (400 MW di potenza) ospiterà:

- **50 aerogeneratori** da 8-9 MW
- una sottostazione elettrica di trasformazione da 66/220 kV.



➤ La zona portuale, identificata come “**Agnes Ravenna Porto**”, è destinata ad ospitare:

- una sottostazione elettrica di trasformazione 220/380
- un impianto di **stoccaggio dell’elettricità** tramite parco **batterie** da 50 MW/200MWh
- un impianto di **produzione di idrogeno verde** fino a 60 MW, con annessi sistemi per compressione e stoccaggio del gas

Hornsea 1

- Ex detentore del primato - **1,2 GW**
- Fornisce energia a oltre **1 milione di case** nel Regno Unito
- Si estende per 120 km al largo della costa dello Yorkshire, coprendo un'area di 407 km²
- Proprietà congiunta di Ørsted, con il 50% di partecipazione, e Jupiter Offshore Wind Limited

Hornsea 2

- E' il più grande parco eolico offshore del mondo - **1,3 GW**
- Fornisce energia a oltre **1,4 milioni di case** nel Regno Unito
- E' situato a 89 km al largo della costa dello Yorkshire e si estende su un'area di 462 km²
- Ogni rotazione è in grado di alimentare una casa media del Regno Unito per l'intera durata di 24 ore

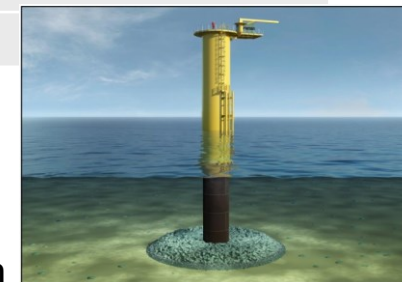
Hornsea 3

- In fase di progettazione - **2,85 GW**
- Sarà in grado di soddisfare il fabbisogno giornaliero medio di oltre **3 milioni di case**
- Sarà situato a 120 km dalla costa del Norfolk e a 160 km da quella dello Yorkshire, in un'area di 696 km².
- Pianificazione di un **progetto di stoccaggio di batterie agli ioni di litio**. Lo stoccaggio è previsto con una capacità di circa 200 MW

Hornsea 4

- Si trova attualmente nella fase decisionale - **2,6 GW**
- Modalità di trasmissione dell'energia: corrente continua ad alta tensione (HVDC) o corrente alternata ad alta tensione (HVAC). In base alla scelta, potrebbero essere necessarie fino a tre sottostazioni di conversione HVDC o fino a tre stazioni booster HVAC offshore
- Pianificato lo **stoccaggio di energia** per garantire una fornitura continua e solida di elettricità

	Agnes – Nord Adriatico	Hornsea – Mare del Nord
Profondità del sito	Profondità media: 35 metri circa Pendenza media: 0,1%.	Profondità che varia generalmente da 20 a 30 metri
Sottosuolo	- Sedimenti sabbioso e sabbioso-limosi, conosciuti con il termine di “sabbie relitte”	- Sabbia, ghiaia e argilla - Le argille glaciali → solide basi per le turbine - Le sabbie marine grossolane → instabilità - La torba → difficile scavare trincee e riduce l’efficienza dei cavi
Vento	vento leggero 3-8 m/s	Il vento può superare i 10 m/s, più stabile

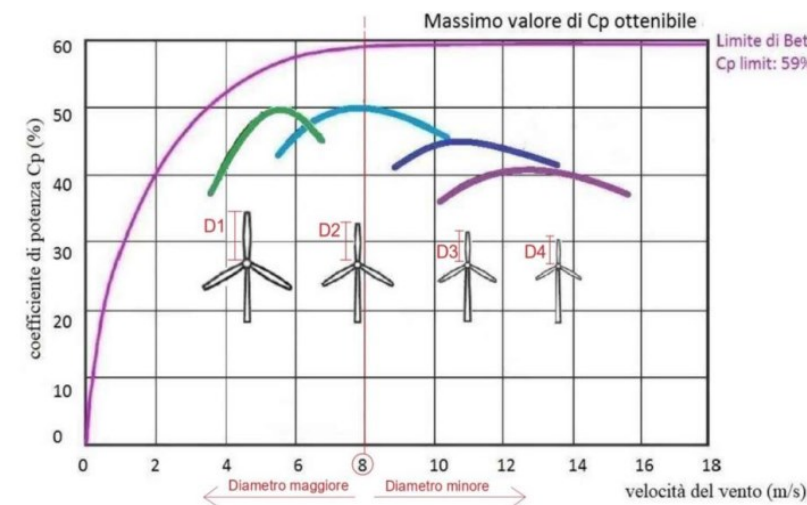


- **Fondazioni** → **Monopalo**
 ➤ Multipalo, Jacket a tre gambe con pali (**Agnes**)
 ➤ Piled jacket foundations, Suction bucket jacket foundations, Mono suction bucket foundations, Gravity base foundations, Floating foundations (**Hornsea**)

Conseguenze

- **Capacity Factor** → varia in base alla **posizione geografica**, **velocità media** e **costanza** del vento, qualità del **design**, **manutenzione**

- **Adattamenti tecnologici delle pale di Agnes** → $P = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 c_p v^2 \eta$



	Agnes – Nord Adriatico	Hornsea – Mare del Nord
Parco eolico	Wind farm e hub energetico	Wind farm
Pale	R1) 25 aerogeneratori da 8-9 MW R2) 50 aerogeneratori da 8-9 MW - Diametro del rotore fino a 260 metri - Altezza del mozzo fino a 170 metri - Altezza di tip fino a 300 metri	H1) 174 turbine eoliche Siemens Gamesa 7 MW, alte 190 metri e con pale lunghe 75 metri H2) 165 turbine eoliche Siemens Gamesa 8 MW SG 8.0-167 DD; lunghe 81 metri, un'altezza massima della punta della pala di 204 metri H3) 400 turbine eoliche da 6 MW, diametro massimo di 265 metri e un'altezza massima della punta della pala di 325 metri H4) 180 turbine eoliche

Conseguenze

Hub energetico

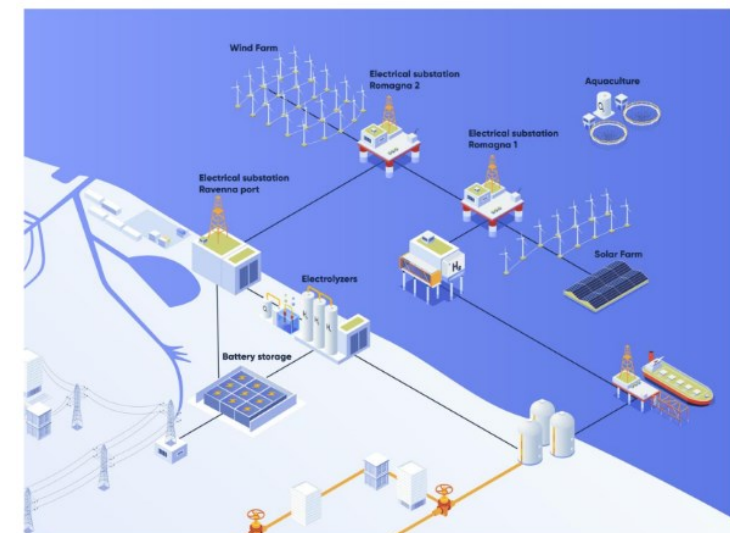
L'elettricità prodotta in mare verrà trasportata a terra con tre diverse finalità:

- Immissione nella Rete di Trasmissione Nazionale (RTN)
- Stoccaggio in sistemi di accumulo tramite batterie al litio
- Produzione di idrogeno verde attraverso il processo di elettrolisi

} Efficienza e continuità

Condivisione delle connessioni a terra e delle stazioni di trasformazione

- Solo componente eolica del progetto (600 MW → 85,7% della potenza) → € 1.500.000.000, ovvero € 2.500/Kw
- Solo componente fotovoltaica (100 MW → 14,3% della potenza) → € 222.000.000, ovvero € 2.220/kW.



Agnes – Nord Adriatico

Hornsea – Mare del Nord

Prezzo

- Impianto fotovoltaico galleggiante: € 166,60/MWh
- Impianti eolici: € 181,30/MWh

Hornsea 1: £₂₀₁₂ 140/MWh
Hornsea 2: Prezzo di mercato dell'elettricità
Hornsea 3: £₂₀₁₂ 37,35 /MWh → £₂₀₂₃ 45 /MWh

Costo di generazione di un kWh eolico - EOLICO RAVENNA 1-2

Costo impianto (Isp)	€/kW	2500
Costi fissi opex annui	% costi impianto	3,5
Costi fissi di es e manutenzion	€/kW.a	87,5
Ore equivalenti (Na)	h	2463
Tasso di sconto (a)		0,05
Durata di vita utile (n)	anni	25
Costi es&man per kWh	Euro/kWh	0,036
Costo attualizzato energia elettrica		
fattore di ammortamento	$(a*(1+a)^n)/((1+a)^n)$	0,071
quota investimento		0,072
quota esercizio e manutenzione		0,036
totale		0,108

fonti rinnovabili -
rischio basso

anni di esercizio

Costo di generazione kWh fotovoltaico (100 Mwe)

Costo impianto (Isp)	€/kW	2220
Costi fissi di es. e manut.	€/kW.a	37,74
Ore equivalenti (Na)	h	1201
Tasso di sconto (a)		0,05
Durata di vita utile (n)	anni	25
Costi es&man per kWh	Euro/kWh	0,031
Costo attualizzato energia elettrica		
fattore di ammortamento	$(a*(1+a)^n)/((1+a)^n)$	0,071
quota investimento		0,131
quota esercizio e manutenzione		0,031
totale		0,163

Costo di generazione di un kWh eolico - HORNSEA 1

Costo impianto (Isp)	€/kW	4221
Costi fissi opex annui	% costi impianto	1,8
Costi fissi di esercizio e manut	€/kW.a	75,97
Ore equivalenti (Na)	h	4143
Tasso di sconto (a)		0,05
Durata di vita utile (n)	anni	25
Costi es&man per kWh	Euro/kWh	0,018
Costo attualizzato energia elettrica		
fattore di ammortamento	$(a*(1+a)^n)/((1+a)^n)$	0,071
quota investimento		0,072
quota esercizio e manutenzione		0,018
totale		0,091

Costo di generazione di un kWh eolico - HORNSEA 3

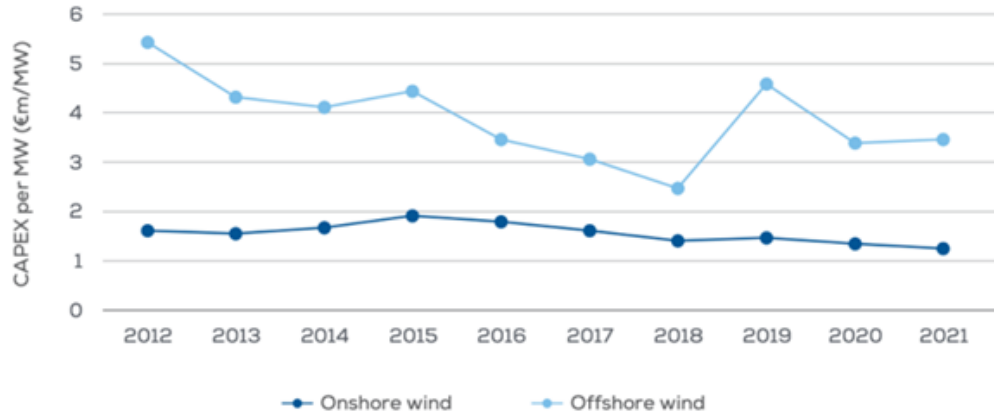
Costo impianto (Isp)	€/kW	3236
Costi fissi opex annui	% costi impianto	1,8
Costi fissi di esercizio e manut	€/kW.a	58,24
Ore equivalenti (Na)	h	4143
Tasso di sconto (a)		0,05
Durata di vita utile (n)	anni	25
Costi es&man per kWh	Euro/kWh	0,014
Costo attualizzato energia elettrica		
fattore di ammortamento	$(a*(1+a)^n)/((1+a)^n)$	0,071
quota investimento		0,055
quota esercizio e manutenzione		0,014
totale		0,069

Costo di generazione di un kWh eolico - HORNSEA 2

Costo impianto (Isp)	€/kW	3413
Costi fissi opex annui	% costi impianto	1,8
Costi fissi di esercizio e manut	€/kW.a	61,43
Ore equivalenti (Na)	h	4143
Tasso di sconto (a)		0,05
Durata di vita utile (n)	anni	25
Costi es&man per kWh	Euro/kWh	0,015
Costo attualizzato energia elettrica		
fattore di ammortamento	$(a*(1+a)^n)/((1+a)^n)$	0,071
quota investimento		0,058
quota esercizio e manutenzione		0,015
totale		0,073

Costo di generazione di un kWh eolico - HORNSEA 4

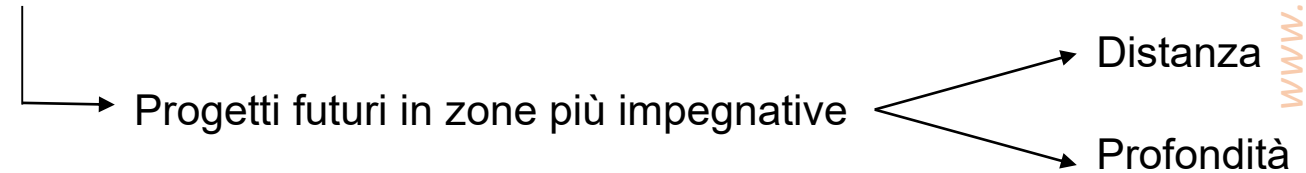
Costo impianto (Isp)	€/kW	2882
Costi fissi opex annui	% costi impianto	1,8
Costi fissi di esercizio e manut	€/kW.a	51,87
Ore equivalenti (Na)	h	4143
Tasso di sconto (a)		0,05
Durata di vita utile (n)	anni	25
Costi es&man per kWh	Euro/kWh	0,013
Costo attualizzato energia elettrica		
fattore di ammortamento	$(a*(1+a)^n)/((1+a)^n)$	0,071
quota investimento		0,049
quota esercizio e manutenzione		0,013
totale		0,062



CAPEX per MW dei progetti finanziati in acque europee (Fonte: Wind Europe, 2022)

Previsto un **trend decrescente del CAPEX** → 2300 €/kWe entro il 2050

→ Nel Mare del Nord l'effetto è parzialmente bilanciato



Considerazioni:

- Capex
 - Fotovoltaico galleggiante
 - Hornsea 1 >> 2, 3, 4
- **Prezzo di vendita** elevato rispetto al **costo di produzione** → più investitori
- Necessari **incentivi**
 - ❖ DI Fondone → 70 milioni di euro (**Agnes**)
 - ❖ Contract for Difference (CfD) (**Hornsea**)

Avifauna

Il rischio di collisioni è correlato alle dimensioni delle pale del rotore



Agnes

- **Non** è una **rotta migratoria principale**
- Solo il Gabbiano Tridattilo sembra probabile che occupi l'area interessata durante l'inverno

Hornsea

- Potenzialmente impattante su tre specie di gabbiani: Larus argentatus, Larus fuscus e Larus marinus.
- Specie in grado di **superare/evitare il parco eolico**

Rumore subacqueo

Costruzione: **Infissione** delle fondazioni, **posa** dei cavi (basso e temporaneo)

Esercizio: **unità navali in movimento** per attività di manutenzione, vibrazioni delle **turbine in movimento**

Evitamento di specifiche aree importanti per: riproduzione - alimentazione - migrazione mammiferi marini

Cavidotti

Emissioni elettromagnetiche: uso di cavi trifase a corrente alternata, guaine ed armature di copertura e interrimento in trincea

