

**UNIVERSITY OF GENOA**

**POLYTECHNIC SCHOOL**

**DIME**

**Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica,  
Gestionale e dei Trasporti**



**PhD THESIS**

**XXXII COURSE**

**Energy from the sea: performance analysis of different  
Wave Energy Converters in relevant environment**

**Supervisor:**

Chiar.<sup>mo</sup> Prof. Ing. Alberto Traverso

**Candidate:**

Ing. Tommaso Reboli

*Year: 2019*

# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA

## SCUOLA POLITECNICA

**DIME**

**Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica,  
Gestionale e dei Trasporti**



**TESI DI DOTTORATO**

**DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA DELLE MACCHINE E DEI  
SISTEMI PER L'ENERGIA, L'AMBIENTE E I TRASPORTI  
CICLO XXXII**

**Energia dal mare: analisi prestazionale di dispositivi  
per la conversione energetica da moto ondoso in  
ambiente rilevante**

**Relatore:**

Chiar.<sup>mo</sup> Prof. Ing. Alberto Traverso

**Candidato:**

Ing. Tommaso Reboli

*Anno: 2019*

# **ENERGY FROM THE SEA: PERFORMANCE ANALYSIS OF DIFFERENT WAVE ENERGY CONVERTERS IN RELEVANT ENVIRONMENT**

## **ABSTRACT**

The current global and environmental energy scenario, increasingly focused on the search for sustainable energy solutions able to represent an effective and convenient alternative to the use of fossil fuels, considers the energy from the sea, and in particular from the waves, a very interesting resource, thanks to its enormous potential.

However, the great variability of the phenomenon and the complex and harsh environment where it is intended to operate makes the identification of an efficient, robust, replicable and low-cost technology extremely challenging. In fact, although many solutions have been proposed over the years, today there is not a technology that is able to fully satisfy the requirements of reliability and low costs necessary for market success. In this context the present work aims at analysis of point absorber type wave energy converters and the development of a facility dedicated to experimental campaign in relevant environment, compassing in various activities such as dimensioning and design, numerical modelling, experimental activities.

Chapter 4 shows the activity carried out regarding the wave energy converter called SeaSpoon, developed by the Thermochemical Power Group of the DIME Department of the University of Genoa. Several experimental campaigns have been carried out and different calculation codes have been developed in order to evaluate the potential performance of the device in different marine conditions, equipped with different types of profiles. Such technology has led to the development of the SeaWHAM project, illustrated in chapters 5 and 6, whose purpose was to design, implement and characterize an artificial wave generator installed on a quay connected to the open sea, to enable tests in a controlled but relevant environment (unique facility in Europe). Furthermore the project targeted the design, installation and experimental campaign on a integrated system able to convert the wave power (caught thanks to a "point absorber" wave energy converter) in other forms, such as hydraulic, pneumatic and electrical energy, with experimental characterisation of the entire efficiency chain.

# **ENERGIA DAL MARE: ANALISI PRESTAZIONALE DI DISPOSITIVI PER LA CONVERSIONE ENERGETICA DA MOTO ONDOSI IN AMBIENTE RILEVANTE**

## **SOMMARIO**

L'attuale scenario energetico globale ed ambientale, focalizzato sempre di più sulla ricerca di soluzioni energetiche sostenibili in grado di rappresentare un'alternativa efficace e conveniente all'utilizzo delle risorse fossili, vede nell'energia dal mare, ed in particolare del moto ondoso, una risorsa energetica molto interessante, visto l'enorme potenziale di cui dispone. Tuttavia, la grande variabilità del fenomeno e l'estrema complessità ed aggressività dell'ambiente ove si intende operare rende l'individuazione di una tecnologia efficiente, robusta, replicabile ed a basso costo una sfida estremamente impegnativa. Di fatto, nonostante molte soluzioni siano state proposte nel corso degli anni, tutt'oggi non vi è una tecnologia che riesca a soddisfare appieno i requisiti di affidabilità ed economicità necessari ad una naturale affermazione sul mercato.

In questo contesto il presente lavoro ha come obiettivo l'analisi di dispositivi di conversione energetica del tipo point absorber e lo sviluppo di una infrastruttura dedicata alla sperimentazione in ambiente significativo ed è articolato in diverse attività quali dimensionamento e progettazione, modellazione numerica, attività sperimentali.

In particolare, nel capitolo 4 viene riportata l'attività svolta in merito al dispositivo di conversione da moto ondoso chiamato SeaSpoon, sviluppato dal Thermochemical Power Group del Dipartimento DIME dell'Università degli Studi di Genova. Sono state condotte diverse campagne sperimentali e sono stati sviluppati diversi codici di calcolo al fine di valutare le prestazioni potenziali del dispositivo in diverse condizioni marine, equipaggiandolo con diverse tipologie di profili.

La ricerca sulle tematiche della conversione dell'energia da moto ondoso ha portato allo sviluppo del progetto SeaWHAM, illustrato nei capitoli 5 e 6, il cui scopo è stato quello di progettare, realizzare e caratterizzare un generatore di onda artificiale installato su banchina connessa al mare aperto che consente dunque di eseguire test in ambiente controllato ma significativo (facility unica in Europa), oltre alla progettazione, l'installazione e campagna sperimentale su un sistema di conversione energetico da moto ondoso del tipo "point absorber" in grado di convertire l'energia delle onde in altre forme, quali energia idraulica, pneumatica ed elettrica: si è quindi potuto caratterizzare sperimentalmente l'intero sistema integrato.

# INDICE DEI CONTENUTI

<b>Abstract</b> .....	<b>i</b>
<b>Sommario</b> .....	<b>ii</b>
<b>Indice delle tabelle</b> .....	<b>vi</b>
<b>Indice delle figure</b> .....	<b>viii</b>
<b>Nomenclatura</b> .....	<b>xiv</b>
<b>Simboli</b> .....	<b>xiv</b>
<b>Simboli greci</b> .....	<b>xv</b>
<b>Apici e pedici</b> .....	<b>xv</b>
<b>Abbreviazioni e acronimi</b> .....	<b>xvi</b>
<b>1 Scenario Energetico</b> .....	<b>1</b>
1.1 Scenario energetico mondiale .....	2
1.2 Energia del mare .....	3
1.2.1 Energia dal moto ondoso .....	5
<b>2 Wave Energy Converter</b> .....	<b>9</b>
2.1 Definizione di Wave Energy Converter.....	10
2.2 Classificazione WEC per posizione rispetto alla costa.....	11
2.3 Classificazione WEC per principio di funzionamento .....	12
2.4 Prototipi WEC.....	16
2.4.1 Esperienza italiana .....	18
<b>3 Fisica delle onde superficiali su liquidi</b> .....	<b>23</b>
3.1 Definizioni generali .....	24
3.2 Parametri caratteristici delle onde.....	27
3.3 Cinematica e dinamica delle onde gravitazionali .....	30
3.4 Cenni storici, Teoria di Airy .....	42
3.4.1 Teoria lineare .....	44
3.4.2 Cenni alla teoria di Stokes .....	55
3.5 Componenti della velocità, spostamento delle particelle e velocità di gruppo....	62
3.5.1 Energia e potenza dell'onda.....	69
3.6 Onde Irregolari e stati di mare .....	75
3.6.1 Modello Pierson-Moskowitz.....	77
3.6.2 Modello JONSWAP .....	80

3.6.3	Onde Mediterraneo .....	82
3.7	Teoria dei wavemaker .....	84
<b>4.</b>	<b>Dispositivo WEC - SeaSPOON .....</b>	<b>89</b>
4.1	Principio di funzionamento .....	90
4.2	Campagna sperimentale su prototipo .....	93
4.2.1	Descrizione set up sperimentale .....	93
4.2.2	Descrizione facility .....	97
4.2.3	Risultati sperimentali .....	98
4.3	Modello Excel-VBA .....	105
4.3.1	Modello Excel-VBA onde .....	105
4.3.2	Modello Excel-VBA Seaspoon equipaggiato con pala piana .....	110
4.3.3	Modello Excel-VBA Seaspoon equipaggiato con rotore Darrieus .....	121
4.4	Conclusioni .....	147
<b>5.</b>	<b>Progetto SeaWHAM - Generatore di onda artificiale .....</b>	<b>148</b>
5.1	Descrizione del progetto Sea-WHAM .....	149
5.2	Descrizione infrastruttura .....	149
5.2.1	Struttura meccanica .....	150
5.2.2	Circuito idraulico .....	155
5.2.3	Attività di installazione generatore di onde .....	159
5.2.4	Interfaccia PLC .....	165
5.3	Controlli .....	171
5.3.1	Controllo triangolare .....	171
5.3.2	Controllo simmetrico .....	172
5.3.3	Controllo semitriangolare .....	175
5.4	Caratterizzazione facility .....	177
5.4.1	Sistema di acquisizione ed analisi dei dati .....	177
5.4.2	Operazioni preliminari sui dati acquisiti .....	182
5.4.3	Caratterizzazione con controllo triangolare .....	185
5.4.4	Caratterizzazione con controllo semitriangolare .....	187
5.5	Similitudine per stato di mare oceanico / mediterraneo .....	190
5.5.1	Similitudine con controllo triangolare .....	190
5.5.2	Similitudine con controllo semitriangolare .....	196

5.6	Conclusioni .....	200
<b>6.</b>	<b>Progetto SeaWHAM - Sistema integrato.....</b>	<b>201</b>
6.1	Descrizione sistema integrato .....	202
6.1.1	Wave energy converter .....	204
6.1.2	Skid oleo-pneumatico .....	206
6.1.3	Microturbina .....	210
6.2	Prove a banco.....	214
6.2.1	Prove a banco skid oleo-pneumatico .....	214
6.2.2	Prove a banco microturbina .....	228
6.3	Campagna sperimentale.....	231
6.3.1	Condizioni operative.....	234
6.3.2	Risultati.....	236
6.4	Conclusioni .....	244
<b>7.</b>	<b>Conclusioni .....</b>	<b>246</b>
	<b>Riferimenti bibliografici.....</b>	<b>250</b>

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1.1 – Potenziale energetico dal moto ondoso per continente.....	7
Tabella 3.1 – Caratteristiche dei regimi ondosi .....	45
Tabella 3.2 – Possibili valori del parametro k .....	48
Tabella 3.3 – Riassunto grandezze introdotte.....	75
Tabella 3.4 – Fattori di scala e similitudine di Froude - $W_s$ .....	76
Tabella 3.5 – Stati di mare secondo la scala di Douglas.....	77
Tabella 3.6 – Stati di mare e grandezze significative secondo il modello Pierson Moskowitz .....	80
Tabella 3.7 – Estratto tabella campionamenti RON a La Spezia.....	82
Tabella 3.8 – Stati di mare e grandezze significative mare Mediterraneo.....	84
Tabella 4.1 – Coppie resistenti applicate .....	97
Tabella 4.2 – Caratteristiche delle onde.....	102
Tabella 4.3 – Caratteristiche delle pale.....	102
Tabella 4.4 – Parametri iniziali di simulazione .....	106
Tabella 4.5 – Parametri d’onda.....	106
Tabella 4.6 – Parametri del flusso uniforme.....	106
Tabella 4.7 – Coefficienti di Fenton al generico i-esimo istante .....	108
Tabella 4.8 – $Z_{lim}$ , u e w per i cinque ordini di Stokes.....	109
Tabella 4.9 – Output ricerca massima potenza al variare dei coefficienti di coppia resistente .....	115
Tabella 4.10 – Set-up simulazioni .....	118
Tabella 4.11 – Risultati simulazioni (potenza) .....	119
Tabella 4.12 – Risultati simulazioni (rendimento) .....	119
Tabella 4.13 – Parametri fluidodinamici del profilo.....	124
Tabella 4.14 – Valori del coefficiente di portanza in funzione di Re e incidenza.....	125
Tabella 4.15 – Valori istantanei.....	128
Tabella 4.16 – Esempio di output profilo 1 .....	130
Tabella 4.17 – Tabella Input-Output modalità “Regime”.....	132
Tabella 4.18 – Set-up simulazioni .....	144
Tabella 4.19 – Risultati simulazioni (TSR) .....	145
Tabella 4.20 – Risultati simulazioni (Potenza).....	145
Tabella 4.21 – Risultati simulazioni (Rendimento).....	146
Tabella 5.1 – Componenti struttura generatore di onde.....	152
Tabella 5.2 – Componenti impianto oleodinamico.....	159
Tabella 5.3 – Acquisizione PLC per movimentazione paratie .....	165
Tabella 5.4 – I/O adibiti al controllo dell’impianto oleodinamico .....	169
Tabella 5.5 – I/O per movimentazione delle paratie.....	171
Tabella 5.6 – Dati dei test effettuati.....	185
Tabella 5.7 – Altezze e periodi delle componenti principali di ogni onda generata.....	186
Tabella 5.8 – Test caratterizzazione controllo semi-triangolare.....	187

Tabella 5.9 – AV modificate per le singole paratie .....	188
Tabella 5.10 – Risultati test di caratterizzazione del controllo semi-triangolare.....	189
Tabella 5.11 – Onde producibili in similitudine con stato di mare oceanico .....	191
Tabella 5.12 – Seastate riproducibili con onde oceaniche al variare del fattore di scala ..	192
Tabella 5.13 – Valori $W_s$ associati ai diversi stati di mare per onde mediterranee.....	193
Tabella 5.14 – Onde producibili in similitudine con stato di mare mediterraneo .....	194
Tabella 5.15 – Seastate riproducibili con onde mediterranee al variare del fattore di scala .....	195
Tabella 5.16 – Onde producibili in similitudine con stato di mare oceanico .....	196
Tabella 5.17 – Seastate riproducibili con onde oceaniche al variare del fattore di scala ..	197
Tabella 5.18 – Onde producibili in similitudine con stato di mare mediterraneo .....	198
Tabella 5.19 – Seastate riproducibili con onde mediterranee al variare del fattore di scala .....	199
Tabella 6.1 – Caratteristiche WEC .....	206
Tabella 6.2 – Caratteristiche skid oleo-pneumatico.....	207
Tabella 6.3 – Output prove a banco .....	227
Tabella 6.4 – Output attualizzati con la portata reale attesa .....	227
Tabella 6.5 – Test sulla microturbina .....	228
Tabella 6.6 – Caratteristiche profili d’onda generati .....	234
Tabella 6.7 – Output test – dettaglio grandezze oleodinamiche .....	243
Tabella 6.8 – Output test – dettaglio grandezze pneumatiche .....	243
Tabella 6.9 – Potenza media prodotta dai dispositivi del sistema integrato .....	244
Tabella 6.10 – Energia elaborata dai dispositivi del sistema integrato in un ciclo di carica- scarica .....	245
Tabella 6.11 – Energia elaborata dai dispositivi del sistema integrato in un’ora di lavoro .....	245

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.1 – Consumi energetici mondiali per sorgente.....	2
Figura 1.2 – Investimenti economici nel settore delle energie rinnovabili per paese [3].....	3
Figura 1.3 – Investimenti economici nel settore delle energie rinnovabili [2].....	4
Figura 1.4 – Aree di interesse energetico per le maree.....	5
Figura 1.5 – Distribuzione mondiale della risorsa energetica da moto ondoso.....	6
Figura 1.6 – Risorsa energetica dal moto ondoso sulle coste italiane.....	8
Figura 2.1 – Potenza installata da tecnologie di conversione dal moto ondoso.....	10
Figura 2.2 – Densità di potenza dal moto ondoso al variare della distanza dalla costa.....	12
Figura 2.3 – Tipologie di WEC.....	13
Figura 2.4 – Pelamis WEC al largo delle isole Orcadi.....	14
Figura 2.5 – Struttura e funzionamento di un Oscillating Water Column.....	15
Figura 2.6 – Schema di funzionamento di un dispositivo Overtopping.....	15
Figura 2.7 – Dispositivo Oyster.....	17
Figura 2.8 – Prototipo di Wave Star installato a Hanstholm, in Danimarca.....	17
Figura 2.9 – Corpower C3 prima dell'installazione.....	18
Figura 2.10 – Installazione di REWEC presso Civitavecchia (sopra) e schema di funzionamento (sotto).....	19
Figura 2.11 – Prototipo di WaveSAX.....	20
Figura 2.12 – Prototipo in scala di PEWEC.....	20
Figura 2.13 – Schema ISWEC (sin) e installazione in mare (dx).....	21
Figura 2.14 – Sistema GEL.....	21
Figura 3.1 – Diverse tipologie di onde marine.....	24
Figura 3.2 – Processo di formazione dell'onda.....	25
Figura 3.3 – Illustrazione dei moti orbitali al variare della profondità del fondale.....	25
Figura 3.4 – Domini di Le Meahute.....	26
Figura 3.5 – Confronto tra i diversi profili dell'onda, secondo le principali teorie.....	27
Figura 3.6 – Principali grandezze di onda.....	28
Figura 3.7 – Azione del vento sulla superficie dell'acqua.....	28
Figura 3.8 – Formazione onde swell.....	30
Figura 3.9 – Condizioni al contorno per la risoluzione delle equazioni di Laplace.....	31
Figura 3.10 – Elemento di superficie.....	38
Figura 3.11 – Esempio di generatore di onde.....	39
Figura 3.12 – Volume di controllo e condizioni al contorno necessarie.....	41
Figura 3.13 – Rappresentazione dei moti orbitali per fondali differenti.....	46
Figura 3.14 – Intersezione delle due equazioni di cui sopra.....	54
Figura 3.15 – Esempio di onda di Stokes del terzo ordine [47].....	56
Figura 3.16 – Lo spostamento dell'acqua nel caso di un'onda stazionaria.....	58
Figura 3.17 – Linee di flusso e linee equipotenziali visualizzate per diverse configurazioni di onde, considerando il movimento o il riferimento stazionario.....	60
Figura 3.18 – Coefficienti di Fenton [46] [49].....	61

Figura 3.19 – Spostamenti di particelle d'acqua e velocità delle particelle d'onda.....	64
Figura 3.20 – Traiettorie ellittica descritta dalle particelle.....	64
Figura 3.21 – Traiettorie di particelle d'acqua per acque poco profonde, condizioni intermedie e acque profonde.....	66
Figura 3.22 – Velocità e accelerazioni locali.....	67
Figura 3.23 – Sovrapposizione di due treni d'onda.....	68
Figura 3.24 – Colonna d'acqua associata ad uno spostamento d'acqua.....	69
Figura 3.25 – Spettro di onde di mare completamente sviluppato per differenti velocità di vento.....	77
Figura 3.26 – Altezza significativa e periodo di picco in funzione della velocità del vento (mare completamente sviluppato).....	79
Figura 3.27 – Periodo di un'onda in funzione dell'altezza significative.....	79
Figura 3.28 – Spettro di onde del mare per differenti fetch secondo Hasselmann.....	80
Figura 3.29 – Confronto tra spettro di Pierson-Moskowitz e di Hasselmann.....	81
Figura 3.30 – Diagramma di Le Mehauté con onde mediterranee analizzate da RON.....	82
Figura 3.31 – Altezza significativa media pesata.....	83
Figura 3.32 – Wave steepness in funzione del periodo di picco.....	84
Figura 3.33 – Generatore d'onda piston type e flap type.....	85
Figura 3.34 – Teoria di Galvin per un piston wavemaker.....	86
Figura 3.35 – Schema dell'ipotesi per il dimensionamento del generatore di onde.....	88
Figura 4.1 – Primo concept di SeaSpoon.....	91
Figura 4.2 – Rappresentazione dei componenti del SeaSpoon “solo paletta”.....	92
Figura 4.3 – Dettaglio del giunto magnetico.....	94
Figura 4.4 – Navicella centrale del modello di Seaspoon, senza pale.....	94
Figura 4.5 – CAD 3D delle pale utilizzate.....	95
Figura 4.6 – Modello Seaspoon in acqua.....	96
Figura 4.7 – Curva coppia resistente dispositivo.....	96
Figura 4.8 – Schema vasca ondogeno TPG presso IES Lab di Savona.....	97
Figura 4.9 – Ondogeno TPG presso IES Lab di Savona.....	98
Figura 4.10 – Sequenza video test in vasca.....	99
Figura 4.11 – Profili di fase SeaSpoon – Onda per diverse coppie resistenti imposte – pala piana.....	100
Figura 4.12 – Profili di fase SeaSpoon – Onda per diverse coppie resistenti imposte – pala curva.....	100
Figura 4.13 – Perdita di fase SeaSpoon al crescere della coppia resistente – pala piana ..	101
Figura 4.14 – Perdita di fase SeaSpoon al crescere della coppia resistente – pala curva ..	102
Figura 4.15 – Potenza estratta (pale corte).....	104
Figura 4.16 – Potenza estratta (pale lunghe).....	104
Figura 4.17 – Diagramma di Le Mehauté.....	107
Figura 4.18 – Risoluzione numerica dell'equazione (4.2).....	110
Figura 4.19 – Variazione dei coefficienti di Lift e Drag nel caso di lastra piana, al variare dell'angolo di incidenza.....	111

Figura 4.20 – Schermata di simulazione.....	113
Figura 4.21 – Variazione della velocità angolare .....	114
Figura 4.22 – Distribuzione delle coppie al variare del livello dell’acqua .....	114
Figura 4.23 – Potenza estratta al variare del livello dell’acqua .....	115
Figura 4.24 – Potenza estratta al variare della coppia resistente media .....	116
Figura 4.25 – % Fase pala al variare della coppia resistente media .....	116
Figura 4.26 – Confronto tra la potenza estratta Seaspoon equipaggiato con pala corta ....	117
Figura 4.27 – Confronto tra la potenza estratta Seaspoon equipaggiato con pala lunga ...	118
Figura 4.28 – Potenza estratta dal Seaspoon equipaggiato con pala piana al variare del seastate .....	120
Figura 4.29 – Rendimento del Seaspoon equipaggiato con pala piana al variare del seastate .....	120
Figura 4.30 – Esempio di profilo palare .....	122
Figura 4.31 – Schema Darrieus tripala .....	122
Figura 4.32 – Scomposizione delle forze agenti sulla pala.....	123
Figura 4.33 – Curve dei coefficienti di lift e di drag per profilo NACA0018 .....	124
Figura 4.34 – Effetti del numero di pale sul coefficiente di potenza [67] .....	127
Figura 4.35 – Schermata dinamica simulazione .....	129
Figura 4.36 – Distribuzione delle coppie dei tre profili in funzione della posizione angolare dell’albero .....	131
Figura 4.37 – Visualizzazione coppia motrice e coppia resistente .....	131
Figura 4.38 – Variazione della velocità angolare .....	131
Figura 4.39 – Prima parte macro “Regime” .....	132
Figura 4.40 – Seconda parte macro “Regime” .....	133
Figura 4.41 – Terza parte macro “Regime” .....	133
Figura 4.42 – Coefficiente di potenza al variare di TSR per una generica simulazione ...	134
Figura 4.43 – Schematizzazione delle velocità caratteristiche del flusso [68] .....	135
Figura 4.44 – Velocità caratteristiche secondo il Double-Disk Multiple-Streamtube Model [68].....	136
Figura 4.45 – Andamento di $\alpha$ in funzione di $\theta$ [69] .....	136
Figura 4.46 – Rappresentazione dello stallo dinamico: (a) TSR = 1, (b) TSR = 2, (c) TSR = 3 [69].....	137
Figura 4.47 – Grafico $CL - \alpha$ in condizioni dinamiche .....	137
Figura 4.48 – Curvatura virtuale [22] .....	138
Figura 4.49 – Geometria della turbina [72] .....	139
Figura 4.50 – Andamenti della velocità a monte e valle del rotore [72] .....	139
Figura 4.51 – Grafici $PT - N$ e $\eta - TSR$ con solidità $\sigma = 0.366$ [72] .....	140
Figura 4.52 – Grafico $Ta - N$ per velocità del flusso $v = 1.0$ m/s [72].....	140
Figura 4.53 – Confronto della potenza estratta (S: dato sperimentale) .....	141
Figura 4.54 – Confronto grafico $CP - TSR$ per $v = 0.6, 0.8, 1.0$ m/s.....	142
Figura 4.55 – Confronto grafico $CP - TSR$ per $v = 1.2, 1.4$ m/s.....	143
Figura 4.56 – Confronto della coppia media per $V = 1$ m/s .....	143

Figura 4.57 – Potenza estratta Seaspoon equipaggiato con rotore Darrieus in funzione del seastate .....	146
Figura 4.58 – Rendimento Seaspoon equipaggiato con rotore Darrieus in funzione del seastate .....	147
Figura 5.1 – Panoramica dell'impianto ondogeno .....	150
Figura 5.2 – Posizioni paratia generatore onde.....	151
Figura 5.3 – Vista laterale struttura paratia.....	152
Figura 5.4 – Vista laterale posizione emersa .....	153
Figura 5.5 – Dettagli di paratia e collare reggi-cerniera .....	154
Figura 5.6 – Schema generale dell'impianto oleodinamico .....	156
Figura 5.7 – Dettaglio impianto, componenti all'interno della sala macchine.....	157
Figura 5.8 – Pistone e valvola proporzionale .....	158
Figura 5.9 – Predisposizione banchina .....	160
Figura 5.10 – Completamento installazione telaio .....	160
Figura 5.11 – Installazione moduli mobili mediante gru.....	161
Figura 5.12 – Ondogeno installato.....	161
Figura 5.13 – Vista dell'interno del container – motore e pompa idraulica .....	163
Figura 5.14 – Dettaglio collegamenti idraulici .....	163
Figura 5.15 – Dettaglio sistema di lettura posizione .....	164
Figura 5.16 – Struttura interna di un PLC .....	166
Figura 5.17 – Elementi base del linguaggio ladder .....	167
Figura 5.18 – Funzioni logiche di base dell'algebra booleana .....	167
Figura 5.19 – Pagina HMI per posizionamento dei pistoni .....	168
Figura 5.20 – Portata massima erogabile in relazione all'apertura della valvola.....	170
Figura 5.21 – AV in funzione del tempo per controllo triangolare .....	171
Figura 5.22 – Posizione pistone nel caso di controllo triangolare .....	172
Figura 5.23 – AV in funzione del tempo per controllo simmetrico.....	172
Figura 5.24 – Confronto tra posizione pistone nel caso di controllo triangolare e simmetrico .....	173
Figura 5.25 – Variabili di inizio moto comuni a tutte le paratie.....	173
Figura 5.26 – Righe di programma con controllo simmetrico per la movimentazione della paratia 1 nel moto di andata.....	174
Figura 5.27 – Confronto tra posizione pistone nel caso di controllo triangolare e semi-triangolare .....	176
Figura 5.28 – AV in funzione del tempo per controllo semi-triangolare .....	176
Figura 5.29 – Righe di programma con controllo semi-triangolare per la movimentazione della paratia 1 nel moto di andata .....	177
Figura 5.30 – Sensore a Ultrasuoni mic600+/iu/tc .....	178
Figura 5.31 – Cono di lavoro del Sensore .....	179
Figura 5.32 – Esempio di picchi nelle forme d'onda .....	179
Figura 5.33 – Sostegno del sensore .....	180
Figura 5.34 – Bus della Scheda Madre realizzata da Techcom S.R.L.....	181

Figura 5.35 – Scheda completa, vedasi nomi produttori su scheda .....	181
Figura 5.36 – Centraggio di una forma d'onda .....	183
Figura 5.37 – Foglio di calcolo per trasformata di Fourier.....	184
Figura 5.38 – Spettro della frequenza dell'onda ottenuta dal test 17 .....	184
Figura 5.39 – Profilo d'onda ottenuto dal Test 21 .....	185
Figura 5.40 – Caratterizzazione con controllo triangolare .....	187
Figura 5.41 – Profilo d'onda test H.....	188
Figura 5.42 – Generazione di onde test D .....	189
Figura 5.43 – Caratterizzazione con controllo semitriangolare.....	190
Figura 5.44 – Confronto tra Wave steepness onde oceaniche e onde generate con controllo triangolare .....	191
Figura 5.45 – Confronto tra Wave steepness onde mediterranee e onde generate con controllo triangolare.....	193
Figura 5.46 – Confronto tra Wave steepness onde oceaniche e onde generate con controllo semitriangolare.....	196
Figura 5.47 – Confronto tra Wave steepness onde mediterranee e onde generate con controllo semitriangolare .....	198
Figura 5.48 – Vista panoramica sul generatore di onde .....	200
Figura 6.1 – Schema sistema SeaWHAM .....	202
Figura 6.2 – Sistema di conversione energia meccanica da moto ondoso ad aria compressa. ....	203
Figura 6.3 – Sistema di conversione da energia meccanica (aria compressa) in energia elettrica mediante microturbina. ....	204
Figura 6.4 – Schema WEC con meda .....	205
Figura 6.5 – Dettaglio galleggiante.....	205
Figura 6.6 – Schema impiantistico dello skid oleo-pneumatico.....	207
Figura 6.7 – Dettaglio del sistema di filtraggio in aspirazione (sx) e del blocco di linearizzazione flusso e sistema di filtraggio in mandata (dx).....	208
Figura 6.8 – Skid oleo-pneumatico.....	208
Figura 6.9 – Dettaglio del sistema oleodinamico .....	209
Figura 6.10 – Dettaglio della valvola oleodinamica di inversione .....	209
Figura 6.11 – Modello ottimizzato della microturbina .....	210
Figura 6.12 – Ingombri microturbina .....	211
Figura 6.13 – Schema del quadro pneumatico della microturbina .....	211
Figura 6.14 – Quadro pneumatico della Microturbina .....	212
Figura 6.15 – Parte elettrica del quadro .....	213
Figura 6.16 – Variazione pressione stoccaggio pneumatico al variare della pressione di ingresso .....	214
Figura 6.17 – Pressione pneumatica massima al variare della pressione di ingresso .....	215
Figura 6.18 – Potenza istantanea nel tempo .....	216
Figura 6.19 – Potenza istantanea VS pressione stoccaggio pneumatico .....	216
Figura 6.20 – Variazione ciclica pressione cilindro pneumatico.....	217

Figura 6.21 – Velocità di variazione della pressione nel cilindro pneumatico.....	217
Figura 6.22 – Potenza pneumatica istantanea prodotta.....	218
Figura 6.23 – Potenza pneumatica nel tempo .....	219
Figura 6.24 – Potenza pneumatica VS pressione stoccaggio pneumatico.....	219
Figura 6.25 – Potenza idraulica nel tempo .....	220
Figura 6.26 – Potenza idraulica VS pressione stoccaggio pneumatico .....	220
Figura 6.27 – Rendimento skid nel tempo .....	221
Figura 6.28 – Rendimento skid VS pressione stoccaggio pneumatico.....	221
Figura 6.29 – Pressione media olio nel tempo.....	222
Figura 6.30 – Pressione media olio VS pressione stoccaggio pneumatico.....	223
Figura 6.31 – Portata olio nel tempo.....	223
Figura 6.32 – Portata olio VS pressione stoccaggio pneumatico .....	224
Figura 6.33 – Andamento pressione circuito pneumatico (P in = 50 bar).....	224
Figura 6.34 – Andamento pressione circuito oleodinamico (P in = 50 bar).....	225
Figura 6.35 – Andamento potenza prodotta (P in = 50 bar) .....	225
Figura 6.36 – Dettaglio pressione circuito pneumatico (P in = 50 bar).....	226
Figura 6.37 – Dettaglio potenza istantanea pneumatica prodotta (P in = 50 bar).....	226
Figura 6.38 – Grandezze acquisite nei test .....	229
Figura 6.39 – Grandezze acquisite nel singolo test .....	230
Figura 6.40 – Andamento della corrente di carica.....	231
Figura 6.41 – Attività di installazione WEC.....	232
Figura 6.42 – Configurazione finale .....	233
Figura 6.43 – Sistema integrato installato a banchina .....	233
Figura 6.44 – Profili d’onda nel dominio del tempo.....	234
Figura 6.45 – Profili d’onda nel dominio delle frequenze: onda_1 (sopra), onda_2 (centro), onda_3 (sotto) .....	235
Figura 6.46 – Variazione pressione stoccaggio pneumatico al variare della pressione di ingresso .....	236
Figura 6.47 – Potenza pneumatica istantanea VS avanzamento nel tempo.....	237
Figura 6.48 – Potenza pneumatica istantanea VS pressione stoccaggio pneumatico.....	237
Figura 6.49 – Variazione temporale potenza pneumatica media.....	238
Figura 6.50 – Potenza pneumatica media VS pressione stoccaggio pneumatico .....	238
Figura 6.51 – Variazione temporale potenza idraulica .....	239
Figura 6.52 – Potenza idraulica VS pressione stoccaggio pneumatico .....	239
Figura 6.53 – Variazione temporale rendimento skid.....	240
Figura 6.54 – Rendimento skid VS pressione stoccaggio pneumatico.....	240
Figura 6.55 – Variazione temporale pressione media olio .....	241
Figura 6.56 – Pressione media olio VS pressione stoccaggio pneumatico.....	241
Figura 6.57 – Variazione temporale portata olio .....	242
Figura 6.58 – Portata olio VS pressione stoccaggio pneumatico .....	242

# NOMENCLATURA

## SIMBOLI

$c$	Corda [m]
$c_D$	Coefficiente di resistenza
$c_L$	Coefficienti di portanza
$c_n$	Coefficiente di forza normale
$c_t$	Coefficiente di forza tangenziale
$dh$	Altezza dell'elemento di pala [m]
$g$	Accelerazione di gravità [m/s <sup>2</sup> ]
$h$	Profondità fondale [m]
$i$	Istante
$k$	Numero d'onda angolare [m <sup>-1</sup> ]
$\vec{n}$	Versore normale
$n$	Numero di pale
$t$	Tempo [s]
$u$	Velocità orizzontale [m/s]
$\vec{v}$	Velocità del flusso [m/s]
$w$	Velocità verticale [m/s]
$x$	Fattore correttivo
$A$	Area frontale [m <sup>2</sup> ]
$A_{ij}$	Generico coefficiente di Fenton
$B_{ij}$	Generico coefficiente di Fenton
$C_{2i}$	Generico coefficiente di Fenton
$C_p$	Coefficiente di potenza
$C_M$	Coefficiente di coppia
$C_r$	Coppia resistente [Nm]
$C$	Velocità di fase dell'onda [m/s]
$F_d$	Forza di Drag [N]
$F_l$	Forza di Lift [N]
$F_{CL}$	Fattore correttivo sul $c_L$
$F_{CD}$	Fattore correttivo sul $c_D$
$F_\alpha$	Fattore correttivo sull'angolo di incidenza
$H$	Altezza d'onda [m]
$L$	Lunghezza d'onda [m]
$L_{pala}$	Altezza palare [m]
$N$	Velocità di rotazione [RPM]
$N_R$	Velocità di rotazione a regime [RPM]
$P_{max}$	Potenza massima generata dalla turbina [W]
$P'_{onda}$	Potenza d'onda captabile dalla turbina [W]
$P$	Potenza erogata [W]
$P_i$	Potenza ideale [W]
$R$	Raggio della turbina [m]

$T$	Periodo [s]
$\tilde{T}$	Coppia generata [Nm]
$T_{av}$	Coppia media [Nm]
$U_{rs}$	Numero di Ursell
$\vec{U}$	Velocità periferica della turbina [m/s]
$\vec{V}$	Velocità assoluta del flusso [m/s]
$V_a$	Velocità assiale [m/s]
$V_t$	Velocità tangenziale [m/s]
$V_n$	Velocità normale [m/s]
$V_\infty$	Velocità del flusso indisturbato [m/s]
$V_{blade}$	Velocità del flusso in prossimità della pala [m/s]
$V_{wake}$	Velocità del flusso all'uscita sufficientemente distante dal rotore [m/s]
$V_{eq}$	Velocità del flusso nell'attraversamento della turbina [m/s]
$\vec{W}$	Velocità relativa del flusso [m/s]
$Z_{lim}$	Elevazione della superficie libera [m]

## SIMBOLI GRECI

$\alpha$	Angolo di incidenza [°]
$\gamma$	Angolo di calettamento [°]
$\varepsilon$	Parametro pari $\frac{kH}{2}$
$\tilde{\eta}$	Rendimento
$\eta$	Superficie di separazione aria-acqua
$\theta$	Angolo azimutale [°]
$\lambda$	Fattore di scala [-]
$\rho$	Densità [kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Pulsazione dell'onda [s <sup>-1</sup> ]
$\tilde{\sigma}$	Solidità
$\tau$	$\tau$ -esimo ordine di Stokes
$\omega$	Velocità angolare [rad/s]
$\omega_1$	Velocità di rotazione [RPM]
$\Phi$	Potenziale di velocità [m <sup>2</sup> /s]
$\Delta t$	Tempo di discretizzazione [s]

## APICI E PEDICI

0	istante iniziale
in	ingresso
out	uscita

## **ABBREVIAZIONI E ACRONIMI**

AV	Apertura Valvola
HMI	Human Machine Interface
I/O	Input/Output
OTEC	Ocean Thermal Energy Conversion
OWSC	Oscillating Wave Surge Converter
OWC	Oscillating Water Column
PMI	Punto Morto Inferiore
PMS	Punto Morto Superiore
PTO	Power Take Off
TRL	Technology Readness Level
TSR	Tip Speed Ratio
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine
WEC	Wave Energy Converter

# CAPITOLO 1

## SCENARIO ENERGETICO

## 1.1 SCENARIO ENERGETICO MONDIALE

Lo scenario energetico mondiale vede attualmente i consumi di energia primaria, a partire da qualsiasi fonte, ammontare a circa 155 TWh nel 2016 [1]. Un ruolo fondamentale viene svolto dal gas naturale che, all'interno del mix energetico globale, supporta la crescita economica e la lotta ai cambiamenti climatici in un processo di transizione energetica mondiale in rapida evoluzione. Secondo le principali proiezioni, i consumi sono destinati a crescere significativamente: entro il 2035 il gas potrebbe superare il carbone come seconda principale fonte di energia nel mondo, subito dietro al petrolio, aumentando la quota nel mix energetico totale dall'attuale 22% a oltre il 24%. Diversamente, carbone e petrolio mantengono il loro primato coprendo più della metà dei consumi energetici mondiali. Le energie rinnovabili, idroelettrico escluso, coprono invece solamente il 3% circa dei consumi globali [2].

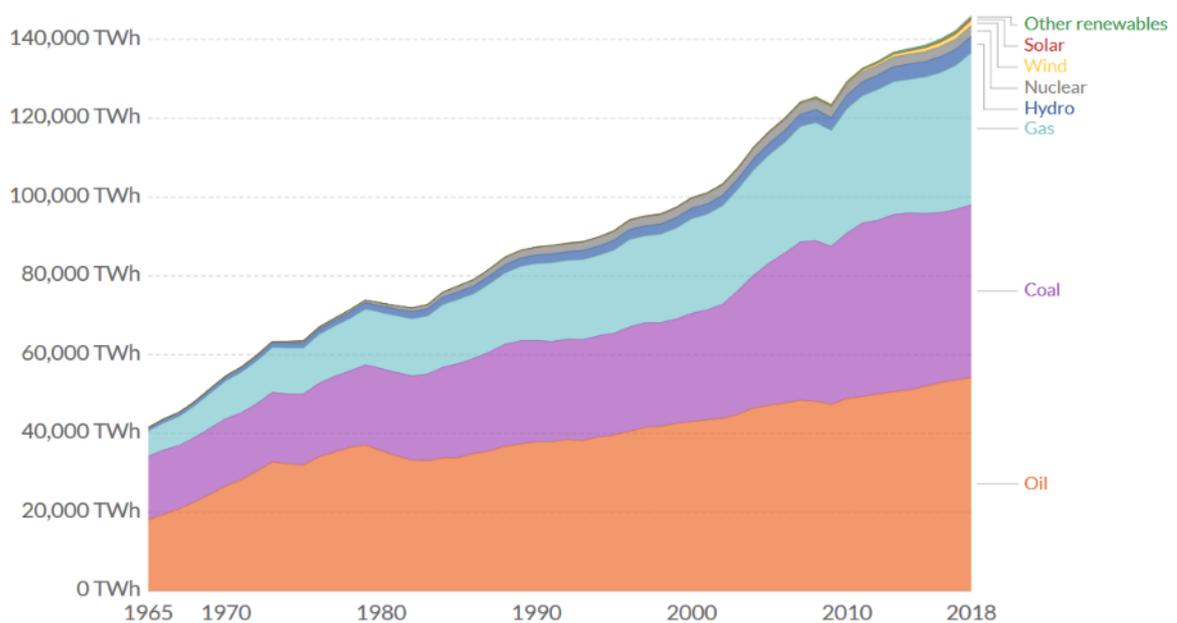


Figura 1.1 – Consumi energetici mondiali per sorgente

La percentuale riferita ai consumi di energie rinnovabili ha registrato invece un'ottima crescita negli ultimi anni: nel 2016, l'energia rinnovabile (escluso l'idroelettrico) è cresciuta del 14,1%, rispetto alla media dei consumi degli ultimi 10 anni, con un incremento dall'anno precedente di più di 600 TWh. L'energia eolica è responsabile invece di più della metà della crescita delle rinnovabili, mentre l'energia solare ha contribuito per quasi un terzo. La sola produzione di energia idroelettrica invece è aumentata del 2,8% nel 2016 con 31 MWh. La Cina in questo scenario si conferma colosso in ambito di produzione di tecnologie rinnovabili, superando inoltre gli Stati Uniti.

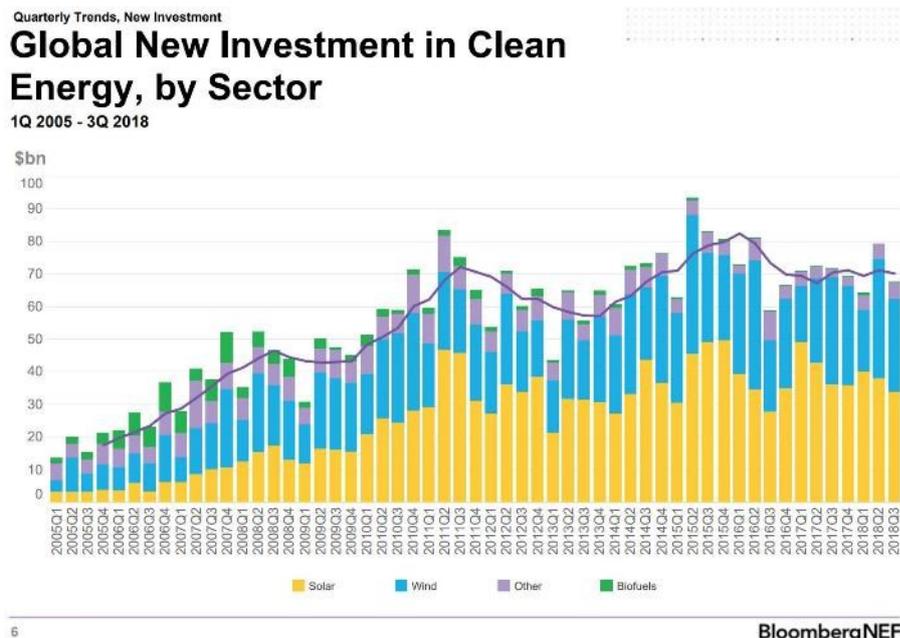


Figura 1.2 – Investimenti economici nel settore delle energie rinnovabili per paese [3]

La Cina infatti ha sfruttato negli ultimi anni una transizione energetica a favore dell'abbandono del carbone per privilegiare le rinnovabili, primi fra tutti idroelettrico (circa 300 GW di capacità produttiva installata, e si prevede arrivi a 350 GW entro il 2020) e solare. Ad oggi il paese punta ad investimenti consistenti nel settore e prevede, entro il 2020, di investire in energie rinnovabili fino a 367 miliardi di dollari, necessari per raggiungere l'obiettivo 2030, ovvero il 20% dell'energia prodotta da rinnovabili [4].

## 1.2 ENERGIA DEL MARE

L'energia dal mare costituisce una risorsa decisamente nota a livello globale ma ancora poco sfruttata nel panorama delle energie rinnovabili. Le tecnologie per ricavare energia dal mare sono infatti in pieno sviluppo ma nessuna di questa risulta essere particolarmente vantaggiosa per diventare un riferimento nel settore.

Le modalità con cui questa energia può essere estratta sono diverse, in particolare l'acqua di mare può essere sfruttata come forza motrice oppure attraverso il suo potenziale chimico o termico.

Sebbene una valutazione dettagliata della risorsa energetica marina sia ancora in una fase preliminare, le prime stime a livello globale indicano che il potenziale energetico teorico del mare, nelle sue diverse forme, supera di gran lunga il presente fabbisogno energetico dell'intera popolazione mondiale. A valle di ciò non viene data molta fiducia a questo settore ad altissimo potenziale in quanto gli investimenti su queste tecnologie rappresentano una piccola percentuale del totale, nel 2016 pari a 0,08% [5].

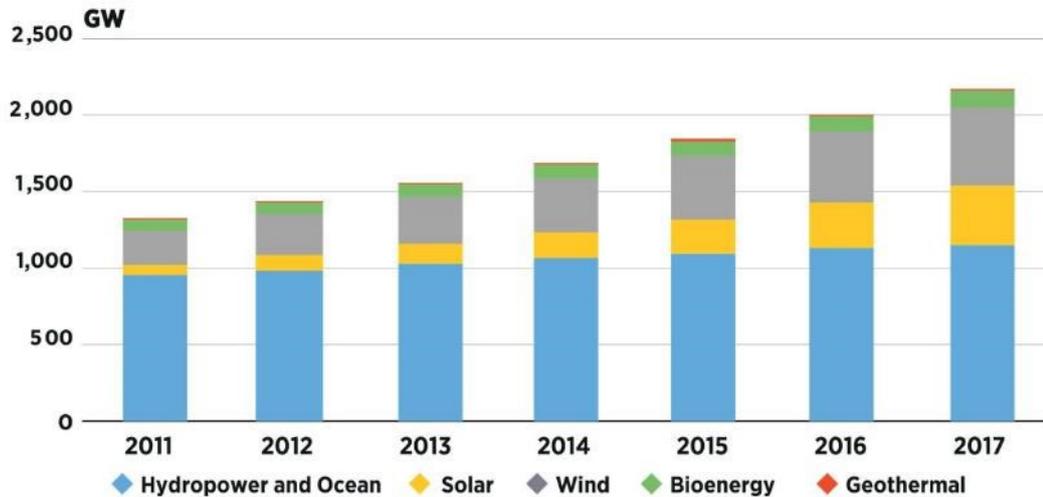


Figura 1.3 – Investimenti economici nel settore delle energie rinnovabili [2]

Considerando gli alti livelli di energia disponibile a livello globale, moltissime iniziative sono state già intraprese da svariati enti al fine di sostenere il settore dell'energia dal mare attraverso una serie di sovvenzioni per la ricerca e lo sviluppo di tecnologie efficienti, lo sviluppo di infrastrutture, protocolli e regolamenti per le autorizzazioni di facilities, ecc.

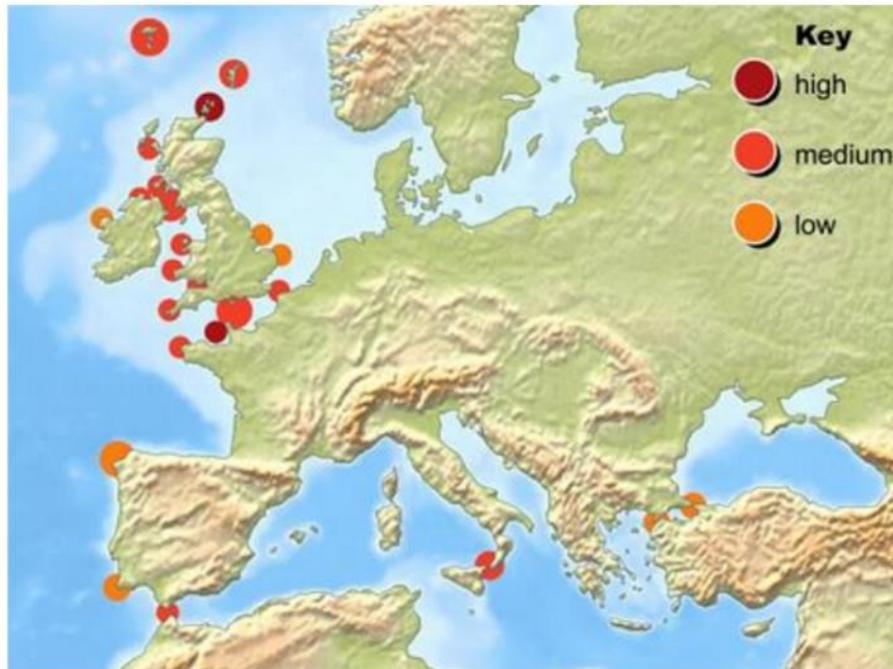
Grande parte delle installazioni deriva però da stati Europei e da quelli Asiatici, arrivando a circa 500 GWh di produzione annuale nel primo caso e a circa 500 GWh nel secondo [6].

Il settore dell'energia marina include differenti risorse, principalmente sei: le onde, le maree, le correnti di marea, le correnti marine, i gradienti di temperatura e di salinità. Ognuna di queste fonti, ovviamente, richiede una particolare tecnologia per la conversione in energia elettrica. Le correnti e le onde ricoprono senza dubbio le fonti di maggiore interesse.

Alcune di queste risorse, come le correnti marine e il gradiente di salinità, sono distribuite quasi uniformemente a livello globale, mentre altre forme di energia marina sono distribuite in modo complementare tra loro. L'energia termica degli oceani, per esempio, è principalmente presente ai tropici (latitudine 0° a 35°), mentre l'energia delle onde si concentra alle medie latitudini (tra 30° a 60°). Tutte le tecnologie di conversione, ad eccezione degli sbarramenti di marea, sono allo stato attuale in fase di ricerca e sviluppo, o in uno stadio di prototipo dimostrativo o al massimo pre-commerciale.

Tra le risorse energetiche marine esistenti, le correnti marine risultano le più sfruttate e associate a tecnologie ormai consolidate. Queste consistono in movimenti orizzontali di acqua che risentono fortemente della variazione di profondità del fondo marino, e per questo motivo si intensificano negli stretti e nei canali. Per questa loro caratteristica le correnti di marea, di intensità sufficiente per essere convertite in energia elettrica, sono localizzate in poche regioni della superficie terrestre. In Europa, il potenziale energetico delle correnti di

marea è limitato a pochi Paesi: Scozia, Irlanda, Grecia, Francia e Italia. In Italia le regioni più interessanti in termini di correnti di marea sono lo stretto di Messina, la laguna di Venezia, il canale di Sicilia e le Bocche di Bonifacio in Sardegna [7] [8].



*Figura 1.4 – Aree di interesse energetico per le maree*

Il Mediterraneo è un mare marginale, e come tale è caratterizzato da una circolazione marina con associati gradienti di temperatura e salinità sensibilmente più deboli rispetto a quelli oceanici. Queste caratteristiche limitano il numero di fonti energetiche disponibili nel Mediterraneo a due: correnti di marea e onde. Anche le onde risentono tuttavia delle dimensioni ridotte del bacino e sono infatti caratterizzate da altezze significative e periodi minori rispetto a quelle oceaniche.

### **1.2.1 ENERGIA DAL MOTO ONDOSO**

L'energia racchiusa nel moto ondoso deriva dall'azione del vento sulla superficie del mare. Questo scambio di energia si riscontra principalmente con la generazione di un'onda e risulta tanto più evidente quanto lo è l'intensità e la durata del vento. Questo moto racchiude intrinsecamente un'energia potenziale e cinetica che può quindi essere sfruttata per la generazione di energia elettrica, utilizzando diverse tipologie di dispositivi. Tuttavia, questa fonte di energia ha mediamente una disponibilità puntuale contenuta e le tecnologie per la sua cattura devono fare i conti con l'ambiente marino particolarmente aggressivo [9].

L'energia racchiusa in un'onda è proporzionale al quadrato della sua altezza come verrà illustrato nel Capitolo 3, è evidente che più ci si avvicina alla costa e più l'intensità energetica media dell'onda diminuisca a causa dell'interazione con il fondale marino. La dissipazione

di energia nelle zone vicine alla riva può però essere compensata da fenomeni naturali come rifrazione o diffrazione, caratterizzati però da estrema imprevedibilità.

La distribuzione globale di potenziale energetico dal moto ondoso varia molto a seconda delle conformazioni dei fondali, delle correnti ventose e delle temperature ambientali; di conseguenza alcune zone risultano avere potenziali maggiori rispetto altre. Ad esempio, grazie alla sua posizione geografica, la costa occidentale dell'Europa è caratterizzata da un'energia particolarmente elevata. Solo la parte meridionale del Sud America possiede un'energia del moto ondoso superiore, grazie a tempeste circumpolari vicine all'atlantico. Recenti studi assegnano all'area nord-est atlantica (incluso il mare del Nord) una potenza disponibile di moto ondoso annuo di circa 290 GW. Il livello di potenza del moto ondoso durante l'anno varia dai circa 25 kW/m della parte più meridionale dell'Europa (isole Canarie) fino ai 75 kW/m di Irlanda e Scozia. Più a nord il livello diminuisce a 30 kW/m nella parte nord della costa norvegese. Nel mare del Nord, la risorsa cambia significativamente, variando dai 21 kW/m nell'area più esposta a nord fino a metà del precedente valore nell'area più a sud (maggiormente riparata). Nel bacino del Mar Mediterraneo il livello di potenza varia annualmente tra 4 e 11 kW/m, il più alto valore si verifica nell'area sud-ovest del mar Egeo. L'intera potenza disponibile annualmente nelle coste europee nel bacino del Mediterraneo è nell'ordine dei 30 GW, quindi la totale potenza disponibile per l'Europa risulta pari a circa 320 GW [10].

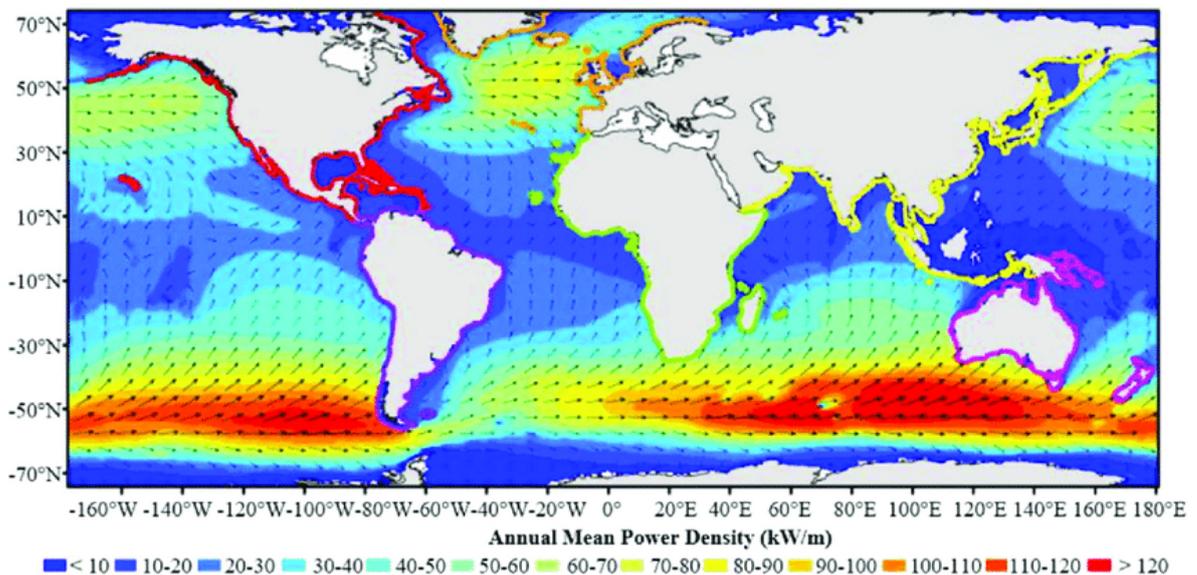


Figura 1.5 – Distribuzione mondiale della risorsa energetica da moto ondoso

A livello globale i siti di maggiore interesse risultano quindi:

Regione	Potenziale del moto ondoso [ $\frac{TWh}{anno}$ ]
Asia	6200
Australia, Nuova Zelanda, Isole del Pacifico	5600
Sud America	4600
Nord America	4000
Africa	3500
Europa Settentrionale e Occidentale	2800
America Centrale	1500
Mar Mediterraneo	1300

*Tabella 1.1 – Potenziale energetico dal moto ondoso per continente*

Pur ricoprendo un'attrattiva davvero unica, l'energia dal moto ondoso risulta estremamente complessa da poter sfruttare. Gli indubbi punti di forza sono:

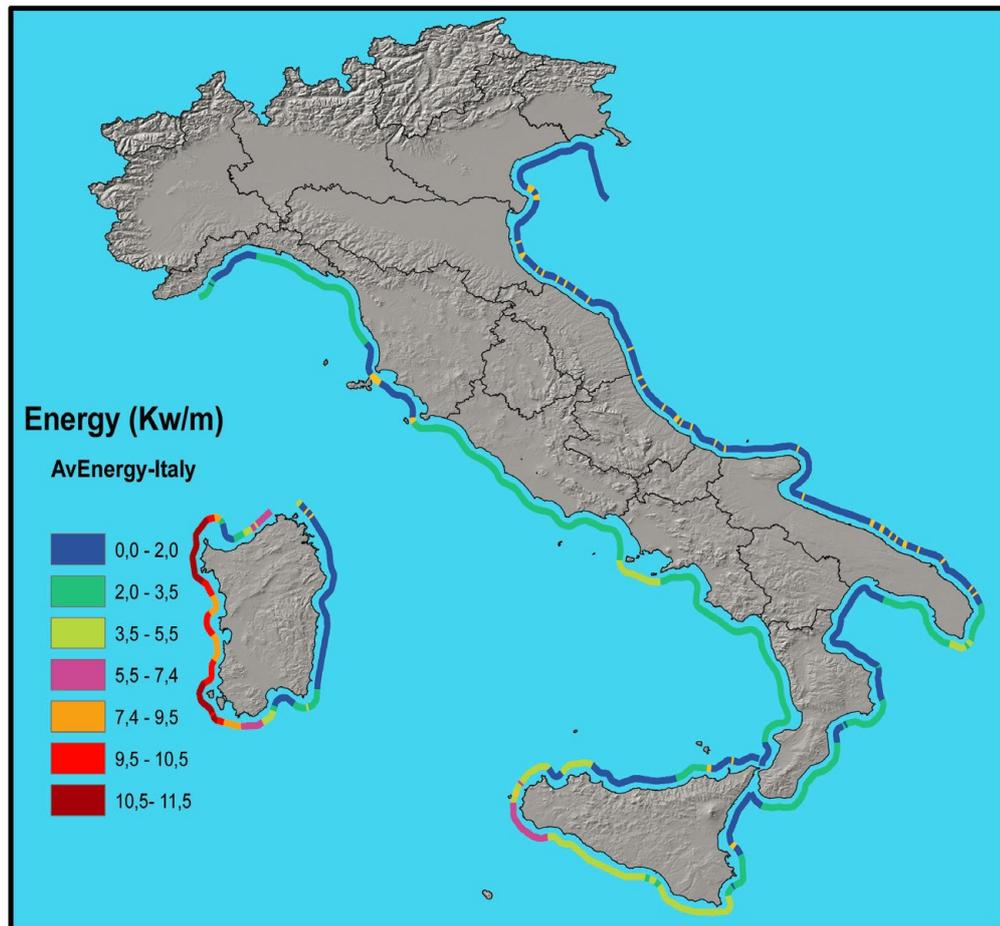
- densità energetica: appena sotto la superficie libera risulta molto maggiore sia della risorsa eolica che di quella solare;
- prevedibilità e costanza: sebbene caratterizzata da una certa intermittenza è sicuramente molto più prevedibile e costante rispetto le classiche rinnovabili;
- accessibilità: la maggior parte dell'energia si trova vicino alla superficie libera quindi in una posizione dove è facile estrarla.

Le potenzialità del Mediterraneo per produrre energia dalle onde sono sicuramente sotto la media globale ma presentano in ogni caso siti di interesse, con potenze comprese tra 5 e 15 kW/m. Il Mediterraneo presenta poi delle unicità dovute alla sua morfologia, come ad esempio la regolarità dell'onda e la presenza di molte isole, fatto che consente di accedere a potenziali energetici superiori alla media essendo in mare aperto. Inoltre, al contrario di aree del nord Europa, dove la risorsa energetica raggiunge livelli di potenza maggiori, l'Italia e l'intero bacino del Mediterraneo presentano una capacità di connessione costiera estremamente elevata [11].

In Italia invece risultano particolarmente interessanti i valori riscontrati nel Tirreno nord-occidentale dove è relativamente facile raggiungere potenziali costantemente superiori a 13 kW/m anche per periodi piuttosto lunghi. Un importante parametro che deve essere preso in considerazione è l'indice WEDI (wave energy development index), questo è ottenuto dividendo il potenziale energetico medio calcolato nelle sole condizioni di tempesta per il potenziale medio annuo. Un indice WEDI molto alto, a parità di potenza annua disponibile, implica dei costi aggiuntivi di progetto poiché durante le condizioni meteomarine peggiori, le fondamenta, (o gli ormeggi, in caso di dispositivo galleggiante) devono sopportare

sollecitazioni fino a 100 volte maggiori rispetto quelle ordinarie. Le coste italiane sono quindi caratterizzate da indici WEDI molto bassi rispetto la media globale [12].

Qui di seguito un estratto delle zone più interessanti a livello energetico delle coste italiane



*Figura 1.6 – Risorsa energetica dal moto ondoso sulle coste italiane*

Considerando le caratteristiche morfologiche della penisola, i quasi 8.000 km di coste potrebbero fornire un'ottima base di partenza per migliorare la ricerca, lo sviluppo e l'implementazione di nuove tecnologie marine. Va sottolineato che la risorsa derivante dalle correnti di maree presenta limiti naturali in quanto il potenziale dislivello è di lieve entità ed il potenziale energetico da moto ondoso, se confrontato ad esempio con le aree oceaniche, è di un ordine di grandezza inferiore.

# CAPITOLO 2

## WAVE ENERGY CONVERTER

## 2.1 DEFINIZIONE DI WAVE ENERGY CONVERTER

Un Wave Energy Converter (WEC) è un dispositivo atto alla conversione dell'energia del moto ondoso in energia elettrica. Storicamente, i primi sistemi capaci di sfruttare questa risorsa risalgono a inizio 1800 e si collocano in Francia. Tuttavia, i principali progressi tecnologici si sono concentrati negli ultimi quarant'anni, quando, con la crisi petrolifera del 1973, vennero intrapresi numerosi progetti nel campo del rinnovabile. Ad oggi, sono state sviluppate diverse tipologie di WEC, ma nessuna soluzione risulta dominante rispetto le altre. Negli ultimi anni, 838 MW di progetti di energia del moto ondoso si trovano in diverse fasi di sviluppo, tuttavia solo 20 MW di questi si interfacciano con una rete elettrica nazionale [13].

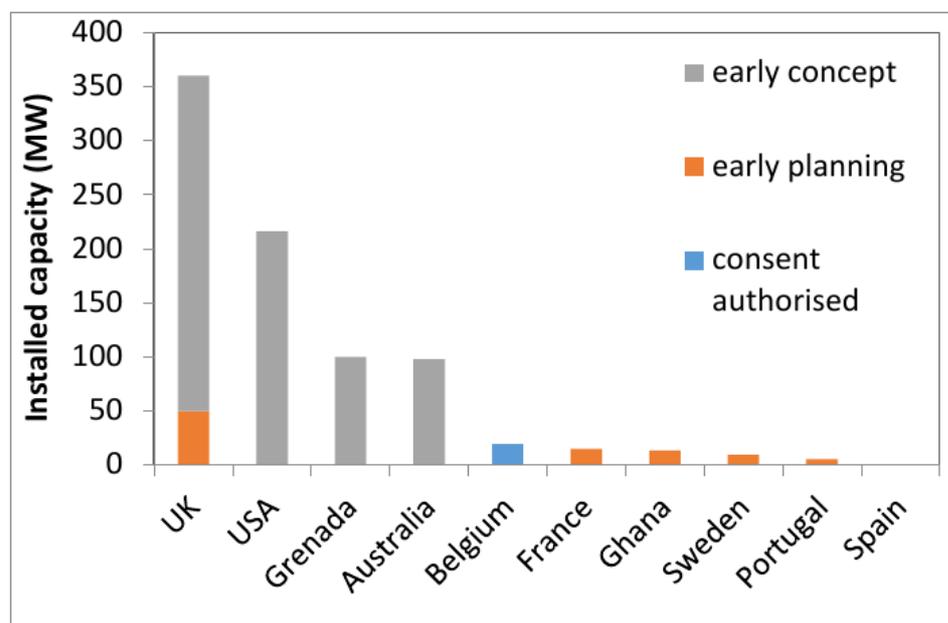


Figura 2.1 – Potenza installata da tecnologie di conversione dal moto ondoso

In generale un dispositivo WEC può sfruttare in diversi modi il movimento delle onde del mare, ognuno di questi si basa però sulla caratteristica fisica della generazione delle onde, ovvero il moto orbitale.

Un WEC può essere suddiviso in sei sottosistemi, ovvero [14] [15]:

*Struttura*: la struttura fisica del dispositivo inclusiva dei componenti che interagiscono con la risorsa ondosa e il convertitore energetico. Il materiale generalmente utilizzato è l'acciaio, anche se attualmente lo stato dell'arte è molto vasto.

*Fondamenta e ormeggi*: ovvero tutto ciò che viene utilizzato per fissare il dispositivo al fondale marino. Vengono considerate strutture permanenti come corpi morti o fondazioni pinnate, oppure diversamente ancoraggi di vario tipo.

Power Take Off: il sistema con cui l'energia meccanica estratta dalle onde viene convertita in energia elettrica. Esistono diversi tipi di PTO, tra cui ad azionamento meccanico, idraulico o elettrico mediante generatori a magneti permanenti.

Sistema di controllo: sistemi e software per salvaguardare il dispositivo e ottimizzare le sue prestazioni operative. I sistemi di controllo possono regolare alcuni parametri del dispositivo autonomamente al fine di garantirne il funzionamento ottimo.

Installazione: il metodo per posizionare la struttura e il dispositivo nella sua posizione operativa. Ciò include tutti i mezzi e le attrezzature ausiliarie necessarie allo spiegamento completo di un WEC.

Connessione: i cavi e l'infrastruttura elettrica per il collegamento del dispositivo alla rete elettrica. Il vettore energetico può essere energia elettrica come acqua che viene pompata a terra.

Le principali caratteristiche che distinguono le diverse tecnologie sono [16]:

- Posizione rispetto alla costa
- Principio di funzionamento

## 2.2 CLASSIFICAZIONE WEC PER POSIZIONE RISPETTO ALLA COSTA

Le tecnologie WEC possono essere suddivise in diverse categorie facendo riferimento alla loro posizione di installazione rispetto la costa. In generale queste possono essere *onshore*, ovvero direttamente installati sulla costa, oppure in mare aperto, *nearshore* o *offshore* [9].

I dispositivi *onshore* sono quindi installati sulla costa e possono essere avvicinati al mare (tendenzialmente in acque basse) grazie a strutture come frangi-flutti, dighe, moli oppure fissati ad una scogliera. Il principale vantaggio di questi convertitori è la loro agevole manutenzione e installazione, essendo infatti facilmente accessibili nella maggior parte dei casi. Ulteriore vantaggio di questi dispositivi è che non necessitano di alcun sistema di ancoraggio e di lunghi sistemi di cavi marini per la connessione alla rete elettrica. D'altro canto, uno svantaggio di questi dispositivi è che generalmente la potenza delle onde in prossimità della costa è minore che al largo, a causa della interazione con il fondale.

I dispositivi *nearshore* vengono installati a poche centinaia di metri dalla costa, in acque di moderata profondità (10-25 m). Tali dispositivi vengono solitamente installati sul fondale marino (evitando ancoraggi) dovendo però far fronte alle significative sollecitazioni che nascono dal moto ondoso. In altri casi, tali dispositivi possono anche essere di natura galleggiante [17].

I dispositivi *offshore*, infine, vengono collocati in acque profonde (profondità superiori ai 40 m), lontani dalla costa, e costruiti sotto forma di struttura galleggiante o semimmersa, ancorata al fondale marino. Grazie alla loro posizione, dovrebbero essere in grado di sfruttare moti ondosi ben più potenti di quelli che caratterizzano le altre due classi di dispositivi; d'altro canto, i costi di gestione e manutenzione, l'affidabilità e la sopravvivenza di questi dispositivi rappresentano un grosso problema.

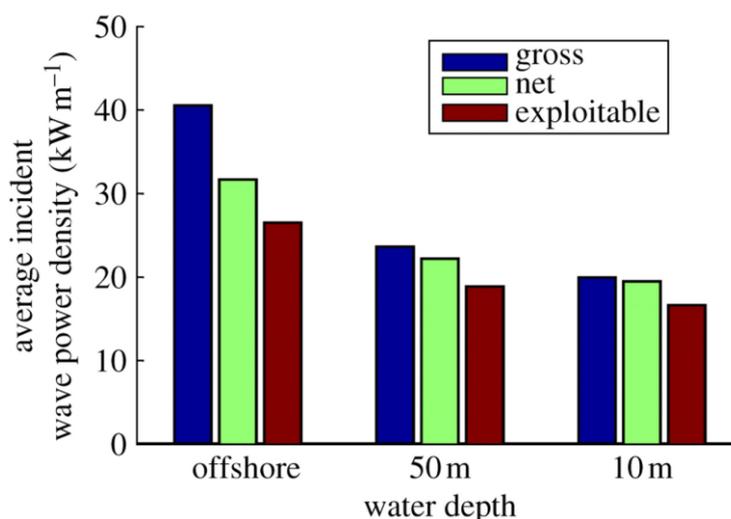


Figura 2.2 – Densità di potenza dal moto ondoso al variare della distanza dalla costa

## 2.3 CLASSIFICAZIONE WEC PER PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Un'ulteriore classificazione di rilievo è senza dubbio quella derivante dalle differenze tecnologiche nel funzionamento di vari WEC. L'European Marine Energy Centre [18] ha individuato otto classi di WEC, queste sono:

*Attenuators*: sono dispositivi galleggianti che operano in direzione parallela a quella dell'onda.

*Point Adsorber*: hanno il vantaggio di poter lavorare in qualsiasi direzione, senza necessità di essere orientati. Presentano dimensioni piccole, se confrontate con la lunghezza dell'onda.

*Oscillating Wave Surge Converter (OWSC)*: sono sistemi nearshore che, comportandosi come un pendolo, sfruttano la componente orizzontale del moto delle particelle fluide.

*Oscillating Water Column (OWC)*: sono dispositivi parzialmente sommersi, che sfruttano la variazione del livello dell'acqua per comprimere una colonna d'aria, che espande successivamente in una turbina Wells. Il particolare profilo delle pale di questa turbina conferisce la capacità di ruotare sempre nella stessa direzione, indipendentemente da quella del flusso che la attraversa.

Overtopping / Terminator: Adatti sia in corrispondenza della costa sia in mare aperto, immagazzinano e convogliano il flusso d'acqua in una turbina a bassa prevalenza.

Submerged Pressure Differential: Posizionati sul fondale, si basano sul principio di Archimede: si sfrutta il gradiente di pressione al di sopra del dispositivo generato dal moto ondoso (l'altezza della colonna d'acqua soprastante varia ciclicamente)

Bulge Wave: Il dispositivo è costituito da un tubo di gomma posto nella direzione dell'onda. L'acqua entra dall'estremità posteriore, determinando un rigonfiamento, che si propaga attraverso il tubo, aumentando di dimensione; attraversa quindi una turbina a bassa prevalenza, collocata all'estremità opposta.

Rotating Mass: si utilizza il moto ondoso per sfruttare l'effetto di precessione di una massa rotante. Tali dispositivi vengono posti in superficie.

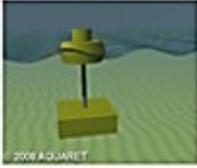
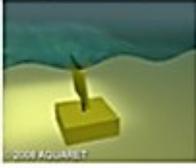
<b>CLASS A</b> Attenuator 	<b>CLASS B</b> Point Absorber 	<b>CLASS C</b> Oscillating Wave Surge Converter 
<b>CLASS D</b> Oscillating Water Column 	<b>CLASS E</b> Overtopping / Terminator 	<b>CLASS F</b> Submerged Pressure Differential 
<b>CLASS G</b> Bulge Wave 	<b>CLASS H</b> Rotating Mass 	<b>CLASS I</b>  Others

Figura 2.3 – Tipologie di WEC

Una ulteriore classificazione, semplificata rispetto al principio di funzionamento, vede invece solamente 4 categorie: floating, oscillating wave surge, over-topping e pressure differential devices. Nel seguito si riporta un breve descrizione delle quattro categorie citate [19].

## FLOATING DEVICE

I dispositivi galleggianti sono essenzialmente costituiti da uno o più corpi galleggianti che vengono movimentati dalle onde. Il movimento oscillatorio utilizzabile può essere verticale, orizzontale oppure una combinazione di questi. Più in generale, questo movimento può essere indotto dal moto relativo di un corpo rispetto una struttura fissa, oppure dal moto relativo tra due corpi in movimento.

I dispositivi facenti parte di questa categoria possono avere diverse forme e differenti allineamenti rispetto all'onda. Di grande rilievo sono i WEC con struttura allungata, ovvero con lunghezze maggiori rispetto alla lunghezza dell'onda, in questo caso i dispositivi vengono posti parallelamente alla direzione di propagazione dell'onda. Un esempio tra tanti è il dispositivo Pelamis [20]. Pelamis (precedentemente noto come Ocean Power Delivery) è entrato nel mercato di Anni '90, impegnando risorse significative per lo sviluppo dei suoi dispositivi durante gli anni 2000. Ciò ha permesso a Pelamis di diventare la prima azienda al mondo a generare attraverso sistemi WEC nel 2004 e il primo a installare 3 dispositivi Pelamis (2,25 MW nominali totali) della costa del Portogallo a Aguacadora nel 2008.



*Figura 2.4 – Pelamis WEC al largo delle isole Orcadi*

## OSCILLATING WATER COLUMN

Consistono in una struttura cava parzialmente sommersa, aperta sotto il livello del mare e con una seconda apertura che garantisce l'uscita dell'aria all'esterno, tipicamente attraverso una turbina. Questi WEC sono classificabili come terminators, secondo la precedente classificazione, e sono normalmente installati sulla linea di costa. Quando l'onda è in fase di avanzamento il livello dell'acqua all'interno sale e tende a comprimere la colonna d'aria soprastante venendosi così a creare un gradiente di pressione positivo tra l'interno e l'ambiente; la situazione inversa si viene a creare quando l'onda si ritira e il livello dell'acqua all'interno scende abbassandosi così inevitabilmente la pressione al di sotto di quell'ambiente e generando un flusso d'aria in ingresso attraverso la turbina. È fondamentale

un corretto dimensionamento della camera d'aria in relazione al periodo delle onde incidenti; un calcolo di progetto errato porterebbe allo sviluppo di fenomeni di risonanza che potrebbero anche portare all'annullamento del flusso d'aria.

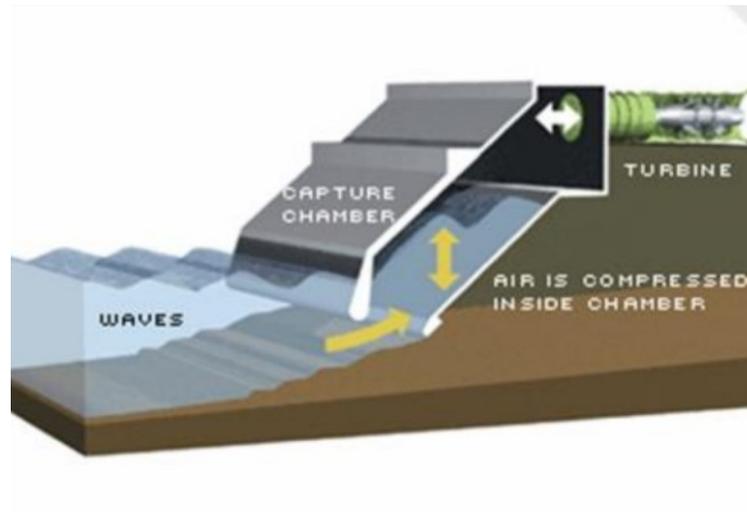


Figura 2.5 – Struttura e funzionamento di un Oscillating Water Column

Le potenze di picco raggiunte normalmente da questo tipo di dispositivi sono tra i 500 e 1000 kW, le notevoli dimensioni di questo tipo di impianto però creano dei problemi in termini di costi di progettazione e di impatto.

### OVERTOPPING

Classificabili come terminator, il principio alla base di questa tipologia di dispositivi è la cattura fisica della massa d'acqua spostata dalle onde in serbatoi al di sopra del livello del mare, fino a 3 m, che viene successivamente rilasciata attraverso il passaggio in turbine Kaplan installate sul fondo di tale serbatoio. Normalmente sono presenti collettori che hanno la funzione di incanalare verso il serbatoio una maggior massa d'acqua. Possono essere collocati lungo la linea di costa, o più spesso in prossimità di essa.

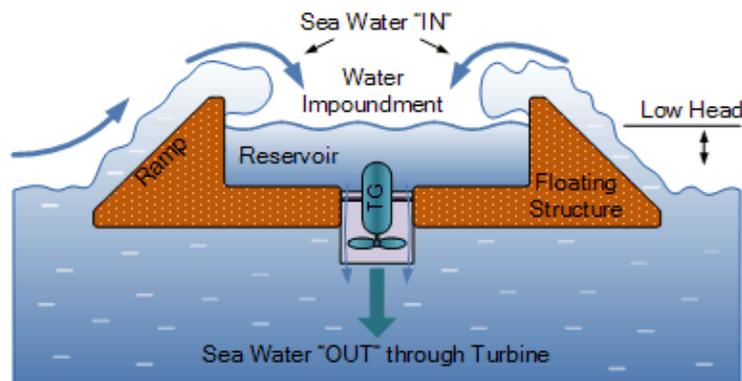


Figura 2.6 – Schema di funzionamento di un dispositivo Overtopping

Wave Dragon [21] è un dispositivo galleggiante di grandi dimensioni che rientra in questa categoria, un prototipo di 57 m e 237 tonnellate, dotato di 7 turbine ciascuna di potenza nominale pari a 20 kW fu installato in Danimarca nel 2003 e dopo una serie di test positivi collegato alla rete nel 2004 finché una tempesta non distrusse gli ormeggi nel 2005. Uno dei principali vantaggi di questo tipo di dispositivi è l'assenza di componenti meccaniche, turbine escluse, che riduce al minimo la necessità di interventi manutentivi in mare.

#### **PRESSURE DIFFERENTIAL DEVICES**

Il principio di funzionamento di questa categoria di dispositivi si basa sullo sfruttamento del differenziale di pressione associato alla salita e alla discesa del livello del mare dovuto al moto ondoso. L'elemento principale di questi convertitori consiste in un cilindro cavo verticale sommerso, il quale può avere un'estremità chiusa ed una aperta, oppure entrambe le estremità aperte. Se entrambe le estremità fossero chiuse, non ci sarebbe alcun flusso d'acqua e il dispositivo diventerebbe di tipo di galleggiante; se progettati correttamente, infatti, questi sistemi si comporterebbero come dei point absorber.

I dispositivi sommersi sono meno vulnerabili alle tempeste e hanno un impatto visivo praticamente nullo, tuttavia, essendo situati solo pochi metri sotto la superficie, possono interferire con la navigazione

## **2.4 PROTOTIPI WEC**

Le diverse possibilità di conversione dell'energia del moto ondoso hanno portato allo sviluppo di numerosi prototipi, alcuni dei quali hanno raggiunto un livello prossimo alla commercializzazione.

Tra i progetti di maggiore rilievo si cita la tecnologia Oyster [22], sviluppata da Aquamarine Power, riconducibile alla categoria "floating device". Come si evince dalla *Figura 2.7*, si tratta di un dispositivo nearshore, costituito da un battente, incernierato, ancorato al fondale tramite un'apposita struttura di supporto. Il moto oscillatorio del battente aziona un pistone idraulico, che pompa il fluido ad elevata pressione in un impianto a gradiente salino per la produzione elettrica. I principali punti di forza dell'Oyster sono la sua semplicità e la possibilità di funzionamento anche in condizioni estreme.

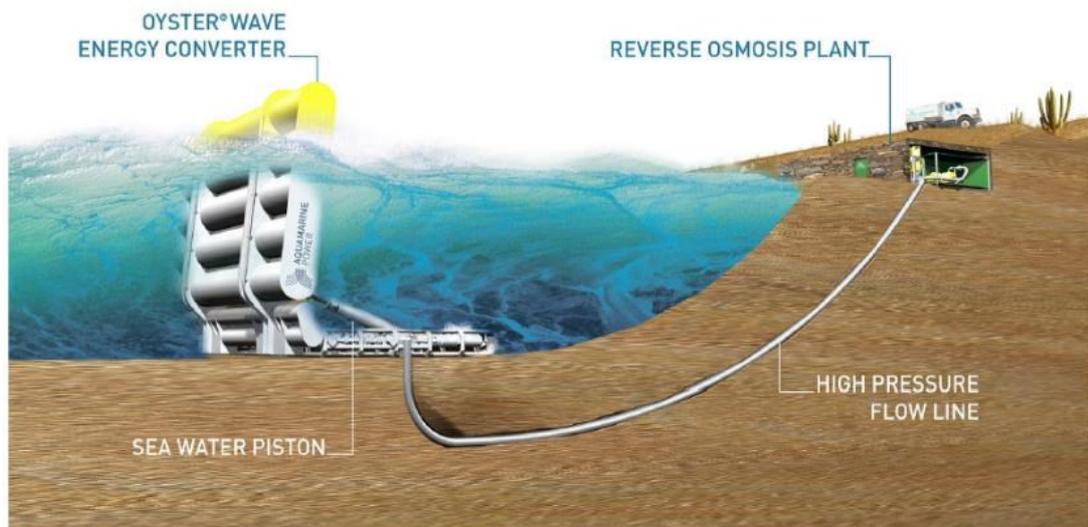


Figura 2.7 – Dispositivo Oyster

Un altro sistema del tipo floating di grande interesse è il quasi commercializzato Wave Star. Questo device dalle dimensioni significative può produrre quantitativi rilevanti di energia partendo dal galleggiamento di singoli moduli indipendenti tra loro. L'installazione di maggiore rilievo è quella del prototipo in scala 1:2 ad Hanstholm in Danimarca. Tale prototipo lungo 70 m, può produrre fino 600 kW di potenza [23].



Figura 2.8 – Prototipo di Wave Star installato a Hanstholm, in Danimarca

Per quanto riguarda i dispositivi offshore, ad oggi quello che ha riscontrato maggiore successo è il sopracitato Pelamis Wave Energy Converter [20]. È composto da una struttura articolata galleggiante, che sfrutta il moto ondoso per azionare pistoni idraulici presenti al suo interno. Questi, posti in corrispondenza dei giunti, spingono acqua in accumulatori ad alta pressione. Ciascuna unità presenta un proprio sistema di power take-off, consentendo una generazione continua e regolabile.

Infine, una delle aziende maggiormente attive nel settore è CorPower Ocean [24] che attualmente sta testando un prototipo offshore nelle isole Orcadi. Rispetto ai floating devices convenzionali, il CorPower C3 presenta un sistema di controllo di fase che rende il sistema intrinsecamente risonante su un'ampia gamma di periodi d'onda, amplificando notevolmente la conversione energetica. Il risultato è quello di un dispositivo con elevato rapporto potenza estratta/peso.

L'obiettivo futuro di CorPower Ocean è quello di realizzare una vera e propria wave farm: si stanno studiando opportuni schemi di manutenzione volti a minimizzare i costi di esercizio dell'impianto.



*Figura 2.9 – Corpower C3 prima dell'installazione*

#### **2.4.1 ESPERIENZA ITALIANA**

A livello nazionale la ricerca e sviluppo nel settore dell'energia da moto ondoso, correnti di marea ed eolico marino è portata avanti principalmente in ambito accademico e nei centri di ricerca pubblici e privati. Al fine di unire in più possibile tali esperienze virtuose e promuovere lo sviluppo nazionale sul tema è stato fondato un centro di coordinamento, il Cluster BIG [25].

I soggetti proponenti del Cluster Tecnologico Nazionale “Blue Italian Growth” (CTN-BIG) hanno la le capacità scientifiche e un bagaglio di collaborazioni strategiche che possono portare a sinergie per un corretto posizionamento strategico su scala internazionale.

Il CTN BIG è impostato per mantenersi in assoluta sintonia con le principali traiettorie di sviluppo internazionale, e possono essere riassunte in: (i) Ambiente marino e fascia costiera, (ii) Biotecnologie blu, (iii) Energie rinnovabili dal mare, (iv) Risorse abiotiche marine, (v) Risorse biotiche marine, (vi) Cantieristica e robotica marina.

Il CTN BIG dedica poi attenzione specifica alla disseminazione focalizzando il proprio intervento lungo tre direttrici: aperto coinvolgimento di tutti gli stakeholders nei propri processi interni di formulazione di posizioni condivise, diffusione attraverso convegni e

eventi di approfondimento e di restituzione dei risultati conseguiti e delle posizioni formulate, divulgazione verso il largo pubblico delle attività del Cluster e più in generale del valore dell'economia del mare, per favorir la coscienza pubblica di tutti gli aspetti del mare.

Tra le tecnologie di maggiore interesse e avanzamento tecnologico a livello italiano possiamo citare:

## REWEC

L'impianto di conversione di energia da moto ondoso REWEC (Resonant Wave Energy Converter) [26] [27] [28] sviluppato dall'Università degli Studi di Reggio Calabria, consiste in una variante particolare di Oscillating Water Column, caratterizzato dall'introduzione di un condotto ad U situato tra la camera pneumatica e il mare aperto.

Questo consente di disporre l'apertura maggiormente in prossimità rispetto ai classici OWC (riducendo le perdite per attrito fluidodinamico), ma la vera innovazione consiste nella fisica del sistema, che consente alla colonna d'acqua di raggiungere condizioni di risonanza con le onde incidenti e potendo dunque massimizzare l'energia estratta.

Attualmente un dispositivo REWEC3 (TRL6) è installato presso il porto di Civitavecchia (vedi Figura 2.10), evidenziando una capacità produttiva compresa tra 5000 e 9000 MWh/anno per km di installazione.

Sono previste installazioni presso il Porto di Salerno e di Roccella Ionica (Reggio Calabria) e se ne valuta l'installazione a Genova, nel Principato di Monaco ed in Belgio.

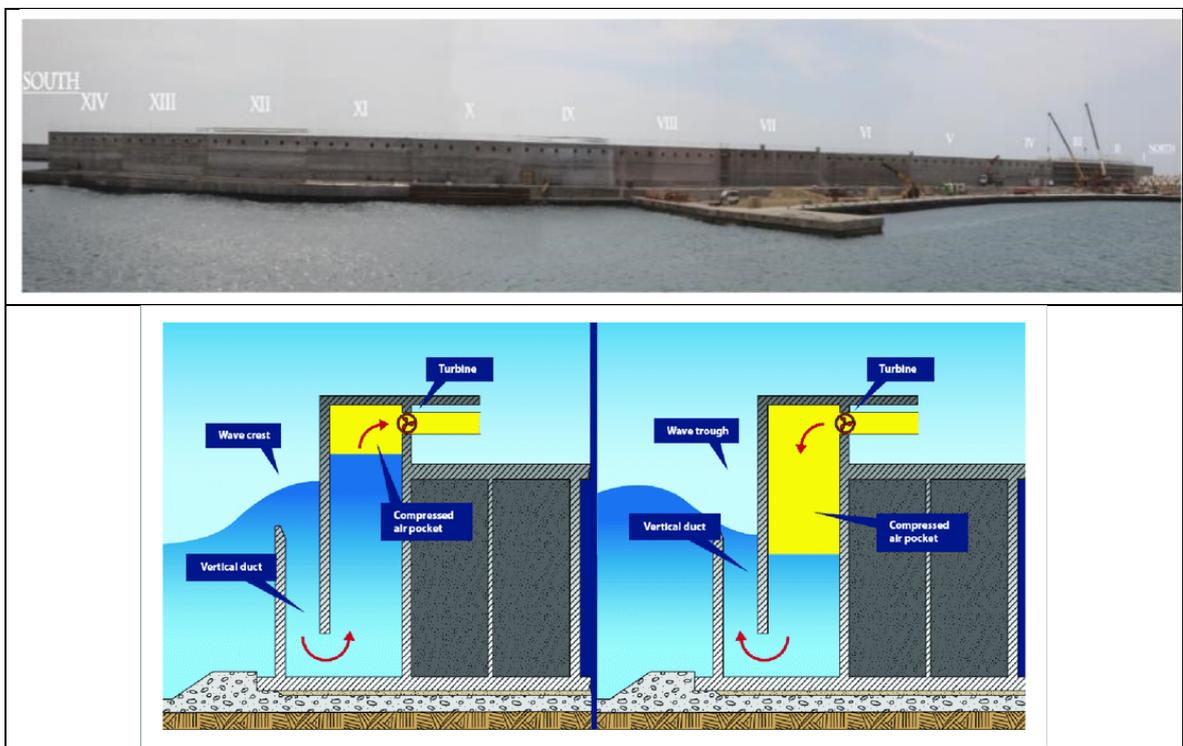


Figura 2.10 – Installazione di REWEC presso Civitavecchia (sopra) e schema di funzionamento (sotto)

## WAVESAX

Il dispositivo WaveSAX [29] [30], sviluppato da RSE, è del tipo OWC aventi due peculiarità: la turbina Wells, a differenza dei classici OWC, elabora direttamente l'acqua di mare nel suo moto alternato lungo il condotto. Inoltre, vi è un'apertura ed un condotto sagomati appositamente per incrementare l'energia percepita in ingresso. Un prototipo in scala 1:20 è stato testato presso l' HMRC (Hydraulic Marine Research Center) in Irlanda e un altro con scala 1: 5 è stato testato presso l'ECN Hydrodynamic and Ocean Engineering Tank, Francia (Peviani, 2015). Attualmente si trova al TRL 5/6.



Figura 2.11 – Prototipo di WaveSAX

## PEWEC

PEWEC (Pendulum Wave Energy Converter) [31] sviluppato da ENEA e Politecnico di Torino, è un dispositivo near-shore oppure off-shore. Si tratta di un dispositivo galleggiante della categoria point absorber, attualmente al TRL 5.

È composto principalmente da uno scafo galleggiante ormeggiato sul fondo del mare e un pendolo collegato all'albero di un generatore elettrico, parte integrante della struttura dello scafo. Tutti gli organi mobili sono chiusi nello scafo, rendendo il dispositivo particolarmente resistente al deterioramento, riducendo dunque la manutenzione necessaria.



Figura 2.12 – Prototipo in scala di PEWEC

## ISWEC

Il dispositivo ISWEC (Inertial Sea Wave Energy Converter) [32] è una macchina progettata dal Politecnico di Torino e dall'azienda Wave for Energy srl. Si tratta di uno scafo completamente chiuso all'interno del quale è presente un giroscopio. Interagendo con il moto ondoso si creano dei moti di precessione convertiti in energia elettrica da un opportuno generatore.

Tecnologia in avanzata fase sperimentale, ha raggiunto 51 kW di energia di picco durante le sperimentazioni al largo di Pantelleria e Ravenna

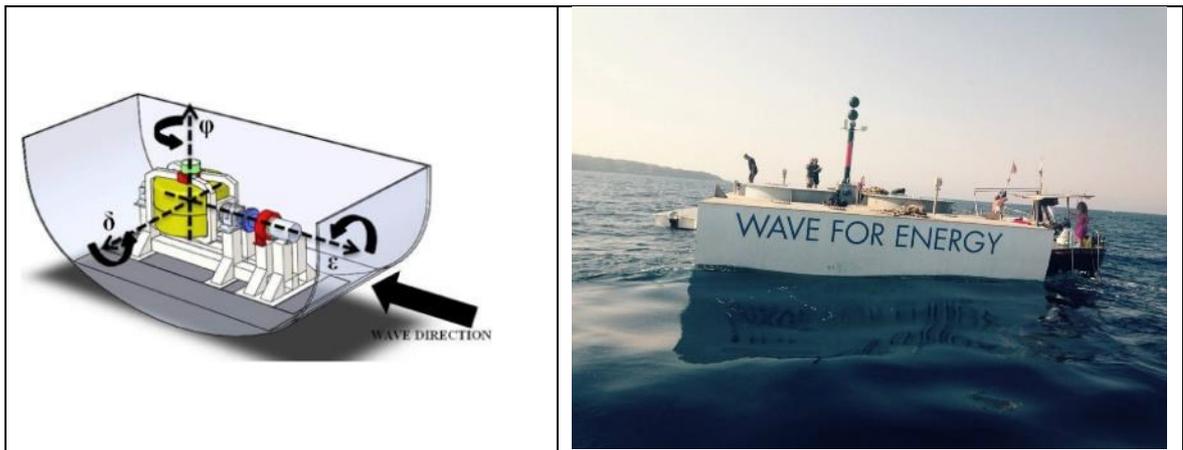


Figura 2.13 – Schema ISWEC (sin) e installazione in mare (dx)

## GEL

Il sistema GEL [33] è un convertitore di energia delle onde sviluppato da SEAPOWER srl ed è progettato per funzionare vicino alla costa o in acque poco profonde. Il dispositivo è costituito da un corpo galleggiante opportunamente sagomato collegato a un telaio fisso che viene lasciato libero di oscillare attorno ad un asse orizzontale sotto l'azione delle onde. All'interno dello scafo è presente un generatore elettrico a magneti permanenti integrato nella PTO. La prontezza tecnologica del dispositivo (TRL) è 5



Figura 2.14 – Sistema GEL

Anche Università di Genova partecipa alle attività del Cluster ed il lavoro oggetto di questa tesi illustra le attività svolte e mostra i principali risultati ottenuti nel settore dell'energia dalle onde, con particolare attenzione all'analisi di WEC del tipo "point absorber" con attuatore operante sul principio della resistenza fluidodinamica, "point absorber" che sfruttino le spinte idrostatiche (floating WEC) e infine vengono presentati i risultati relativi alla infrastruttura dedicata alla generazione di onde artificiali in ambiente significativo, sviluppata interamente dal TPG.

# CAPITOLO 3

## FISICA DELLE ONDE SUPERFICIALI SU LIQUIDI

### 3.1 DEFINIZIONI GENERALI

Le onde del mare sono onde meccaniche che si propagano in corrispondenza dell'interfaccia acqua-aria. A seconda delle forze agenti su questa interfaccia, si possono distinguere diverse tipologie di onde marine, come mostrato in Figura 3.1. All'interno di questo spettro sono anche compresi gli tsunami (derivanti da terremoti) e le maree, che possono essere viste come onde dal periodo molto elevato.

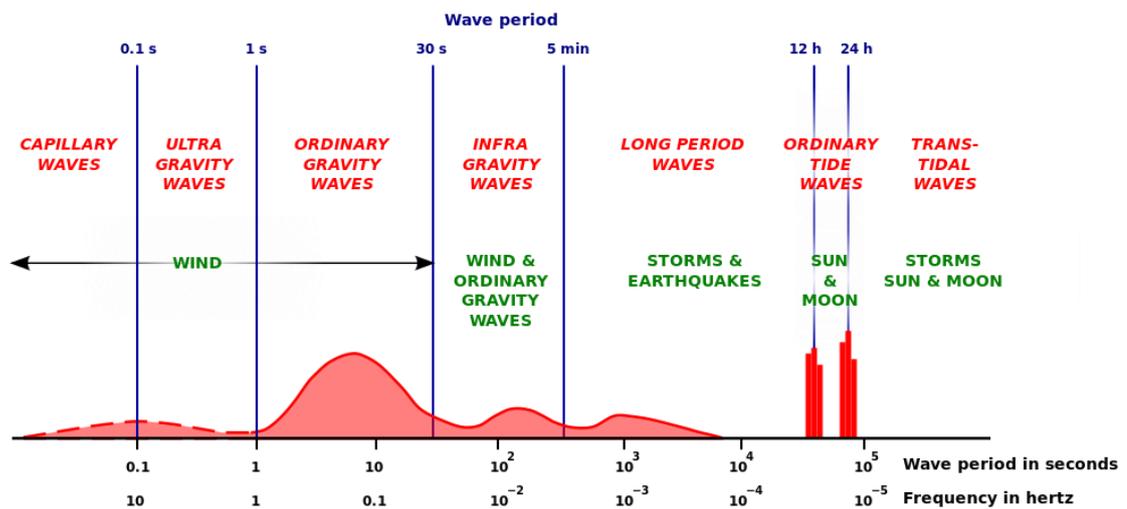


Figura 3.1 – Diverse tipologie di onde marine

Se in ascissa viene riportato il periodo dell'onda, in ordinata si riporta la densità energetica con cui si manifestano i vari fenomeni. Le onde che presentano maggiore contenuto energetico, e che quindi risultano di maggiore interesse in ambito di conversione energetica da moto ondoso, sono senza dubbio le ordinary gravity waves, in cui la forza di richiamo è data dall'azione della gravità.

Queste onde vengono generate principalmente dall'azione del vento, ma più in generale, dalla circolazione atmosferica, collegata quindi anche a pressione e temperature di acqua e aria. Il vento agisce cedendo parte della sua energia cinetica e quantità di moto alla superficie del mare; ogni strato d'acqua tende a trascinare quello sottostante, più lento [34].

I due principali meccanismi che contribuiscono alla formazione dell'onda sono rappresentati da:

- Fluttuazioni di pressione che determinano azioni tangenziali e normali alla superficie libera [35],
- Instabilità dello sforzo di parete: la continua variazione dello sforzo, esercitato dal moto turbolento dell'aria sulla superficie dell'acqua, complica lo studio del fenomeno stesso, che può essere trattato con metodi statistici.

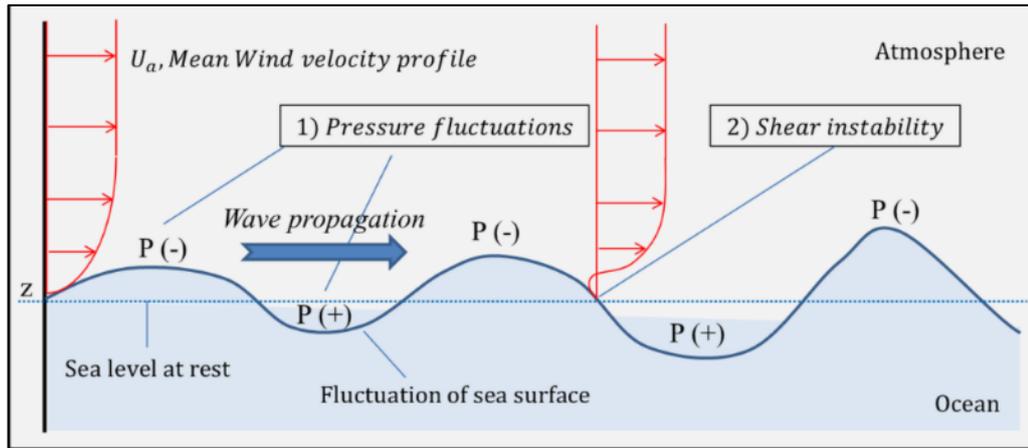


Figura 3.2 – Processo di formazione dell'onda

Nel caso di onde in acque profonde, ad esempio, le particelle che vengono forzate in questo movimento ripetitivo, finiscono per seguire una traiettoria circolare. In questo senso si parla di moti orbitali, come illustrato in figura sottostante: all'aumentare della profondità il raggio della traiettoria diminuisce, fino ad azzerarsi.

Nel caso di acque poco profonde, invece, la presenza del fondale influisce sulla traiettoria delle particelle; le orbite tendono a schiacciarsi, assumendo forma ellittica [9].

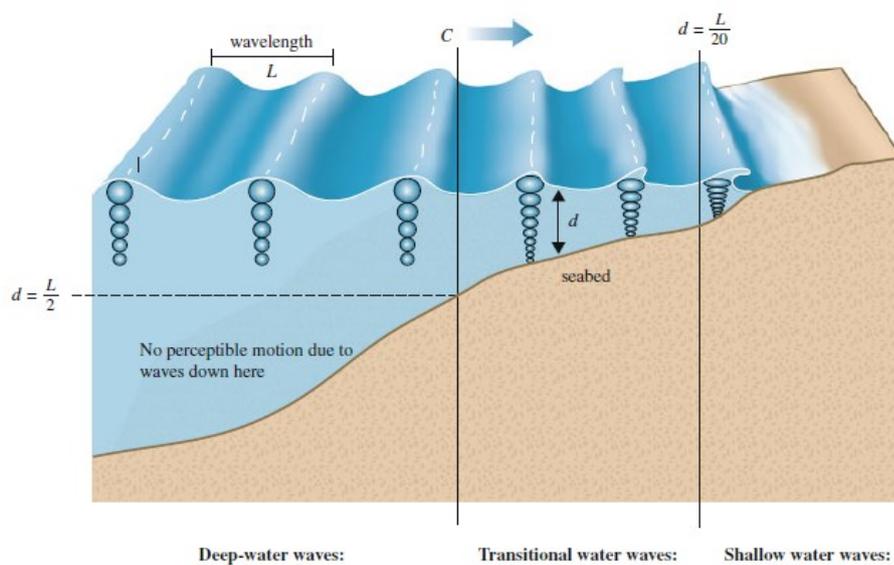


Figura 3.3 – Illustrazione dei moti orbitali al variare della profondità del fondale

Il problema matematico racchiuso nel tentativo di descrivere il moto ondoso risiede nel voler definire con una funzione la superficie di separazione tra aria e acqua e, ovviamente, il suo campo di velocità.

Fissato un sistema di assi cartesiani, la funzione forma dell'onda sarà quindi dipendente della coordinata spazio e dal tempo.

Esistono molte teorie capaci di descrivere come si comporta un profilo d'onda in questo dominio [36], ed essendo la materia molto ampia, comunemente viene fatto riferimento ai domini di validità tracciati da Le Mehaute [37]: al variare di altezza e periodo dell'onda, congiuntamente alla profondità del punto considerato, vengono definiti i campi di applicazione delle varie teorie conosciute.

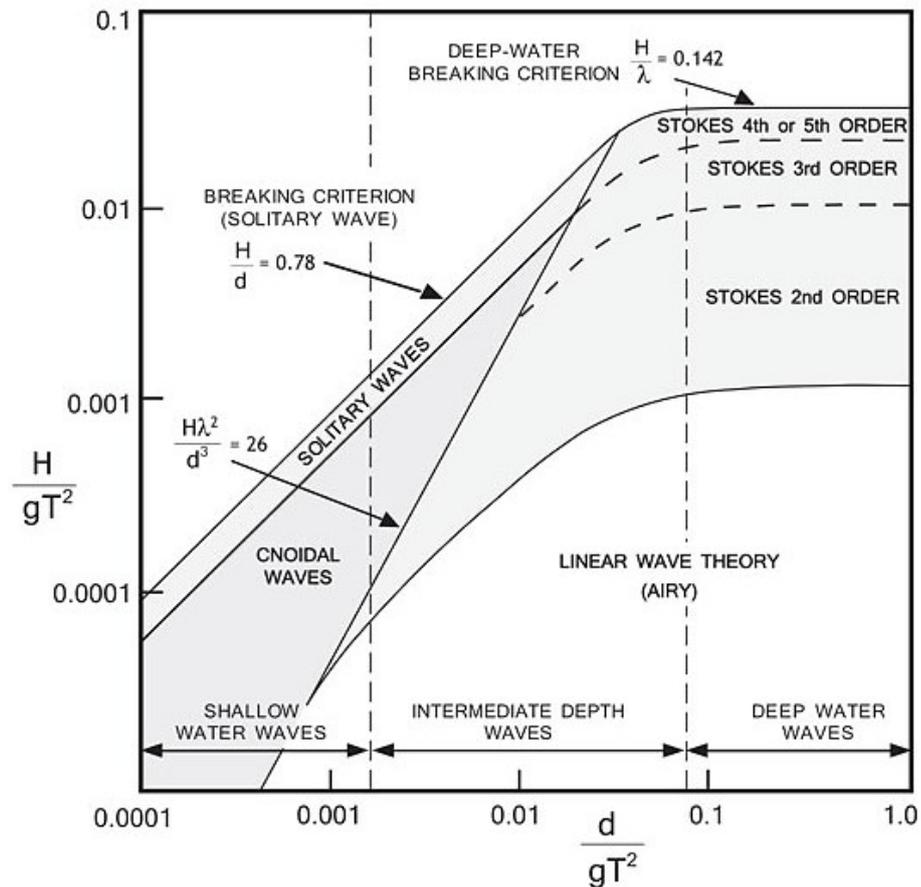


Figura 3.4 – Domini di Le Meahute

Storicamente questo grafico contiene gran parte delle teorie che hanno portato a definire le principali tipologie di onde marine conosciute, onde lineari, onde di Stokes, onde cnoidali,.. Ciò che si vuole affrontare in questo capitolo sono alcuni passaggi preliminari necessari alla completa comprensione del moto ondoso.

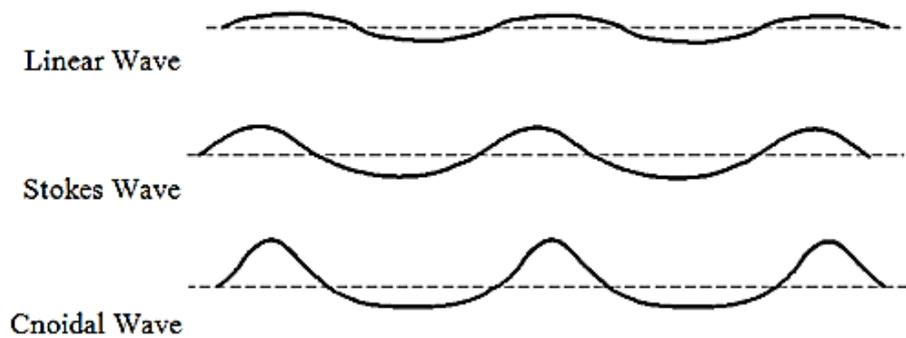


Figura 3.5 – Confronto tra i diversi profili dell'onda, secondo le principali teorie

## 3.2 PARAMETRI CARATTERISTICI DELLE ONDE

Le onde marine comuni nascono grazie alla somma di molteplici contributi non lineari, per questo motivo non possono essere considerate banalmente sinusoidali. L'osservazione porta però a scoprire che normalmente le onde sono caratterizzate da creste più alte ed ampie rispetto a quelle di una sinusoide.

Si introducono quindi i principali parametri che caratterizzano l'onda e il moto ondoso al fine di iniziare a descrivere questo fenomeno:

- $\eta(x, y, t)$  [m] è l'elevazione sul livello a riposo
- $L$  [m] è la lunghezza dell'onda cioè la distanza tra due creste
- $T$  [s] è il periodo dell'onda, cioè il periodo che trascorre tra il passaggio di due creste ad un punto fisso
- $H = \eta_{\max} - \eta_{\min}$  [m] è l'altezza dell'onda
- $a = \eta_{\max}$  [m] è l'altezza dell'onda rispetto al livello a riposo
- $c = L/T$  [m/s] è la velocità dell'onda
- $\varepsilon = H/L$  è la ripidità dell'onda
- $k = 2\pi/L$  [1/m] è il numero d'onda
- $\omega = 2\pi/T$  [s<sup>-1</sup>] frequenza angolare d'onda

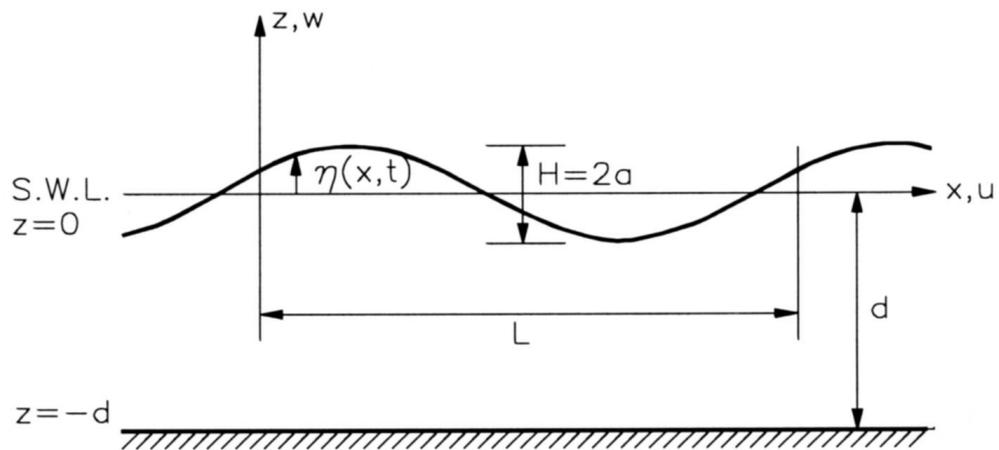


Figura 3.6 – Principali grandezze di onda

Come brevemente accennato nell'introduzione del presente capitolo, il vento ha importanza primaria nella formazione delle onde attraverso una sequenza di processi di proporzioni variabili nel tempo. Esso infatti trasferisce quantità di moto ed energia dall'atmosfera al mare. Se la velocità del vento non è elevata, la turbolenza produce fluttuazioni casuali di pressione, che portano alla formazione sulla superficie marina di piccole onde capillari di lunghezza d'onda dell'ordine del centimetro. Queste piccole onde sono instabili e possono aumentare nel tempo sia l'ampiezza che la lunghezza d'onda, ciò accade a causa dell'azione superficiale esercitata tangenzialmente dal flusso d'aria e della presenza di vortici turbolenti su piccole scale. Il contributo più significativo nella generazione delle onde rimane però la forzante diretta del vento, che genera differenze di pressione lungo il profilo ondosio, in particolare sulle parti più ripide dell'onda.

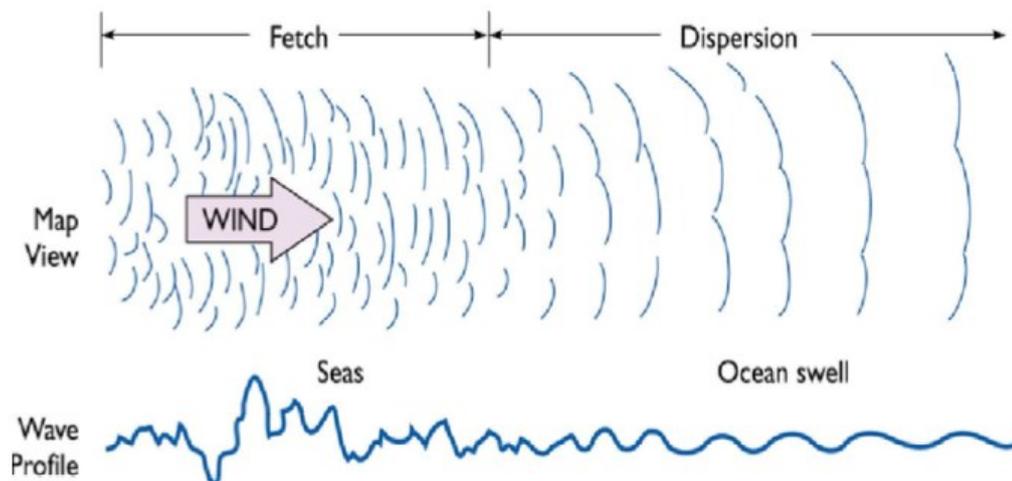


Figura 3.7 – Azione del vento sulla superficie dell'acqua

Il lavoro di pressione deriva dalle componenti che hanno lunghezza d'onda paragonabile a quella delle onde e che sono in fase con la pendenza: il risultato è l'aumento di  $\eta$  e di  $L$ . Ne

consegue un aumento della pressione esercitata e l'instabilità assume una crescita di tipo esponenziale. Assume a questo punto notevole importanza il processo di interazione non lineare tra onde di ampiezza finita. Le onde di gravità casuali subiscono allora una diffusione reciproca, producendo onde con  $L$  sia maggiori che minori del valore di partenza. L'ordine più basso in cui possono avvenire queste interazioni prevede un sistema a tre onde, in cui due onde interagiscono non linearmente trasferendo energia ad una terza onda: questo processo è importante in condizioni di profondità finita, ma non significativo per acqua profonda. Secondo la teoria perturbativa per interazioni non lineari risonanti in un mare random [38], un set di 4 onde (quadrupletto) può scambiare energia quando sono verificate le seguenti condizioni di risonanza sul numero d'onda e sulla frequenza:

$$k_1 + k_2 = k_3 + k_4 \quad (3.1)$$

$$\omega_1 + \omega_2 = \omega_3 + \omega_4 \quad (3.2)$$

Queste condizioni definiscono le frequenze che possono interagire non linearmente e le loro direzioni di propagazione, vista la forma vettoriale della condizione di risonanza per il numero d'onda. Tutte le componenti presenti nel campo di onde sono potenzialmente accoppiate e l'energia può essere scambiata non solo tra componenti di frequenza diversa, ma anche tra componenti che si propagano in direzioni diverse. Questo processo porta ad una forma spettrale caratteristica del sistema ondoso e ad un aumento nel tempo della lunghezza d'onda. Si raggiunge un punto di equilibrio tra vento e onde quando non è possibile ulteriore trasferimento di energia, cioè quando si verifica un bilancio tra l'input di energia dal vento, il trasferimento dell'energia tra le varie componenti ondose e la dissipazione per rottura delle onde. La distribuzione di energia raggiunge una forma di saturazione più o meno globale sia come livello (presenza di una frequenza di picco) che come forma analitica. L'onda raggiunge la velocità del vento e non può viaggiare più veloce in quanto comincerebbe la sua erosione per attrito ed effetto frenante, in questo caso si parla di condizioni di *fully developed sea* (f.d.s.), cioè non può essere prodotta per le onde una frequenza minore di quella minima del vento, data la sua velocità.

Le onde superficiali dipendono, quindi, per la loro generazione da quattro parametri: velocità del vento, direzione del vento, durata dell'azione del vento, area di azione del vento (fetch). Venti veloci, unidirezionali, che soffiano da più tempo e su aree estese generano onde con lunghezze d'onda maggiori.

Le onde, propagandosi e allontanandosi dalla zona di generazione, formano un campo di radiazione della sorgente ondosa e prendono il nome di onde *swell*. Le onde più lunghe viaggiano più velocemente, per cui le onde *swell* hanno periodo e lunghezza d'onda che crescono con il tempo e la distanza dalla sorgente, mentre l'ampiezza subisce una attenuazione minima a causa di attriti e di una distribuzione di energia in direzioni diverse da quella di moto.

Date le loro caratteristiche, il campo di onde swell può interagire con il campo di onde prodotte dal vento, sia alterando il flusso del vento, e quindi il flusso di energia, sia con una interazione non lineare diretta di quadrupletto [38].

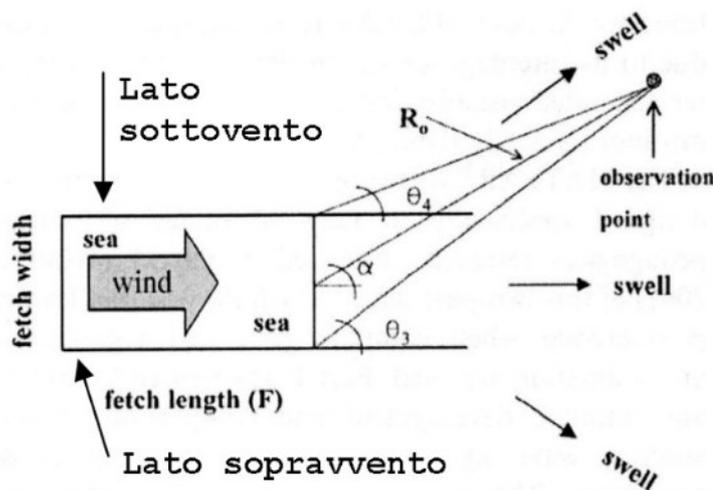


Figura 3.8 – Formazione onde swell

Le onde swell sono quelle che si allontanano dal fetch: gli angoli di propagazione  $\theta_3$ ,  $\theta_4$  e  $\alpha$  sono utilizzati per la previsione nel punto indicato.  $R_0$  è la distanza tra il confine sottovento del fetch e il punto di osservazione. L'energia nel punto di osservazione è inferiore a quella originariamente prodotta dal vento, sia per il ridotto range di frequenze che per la dispersione angolare  $D(\theta)$  [39].

### 3.3 CINEMATICA E DINAMICA DELLE ONDE GRAVITAZIONALI

Nel seguente paragrafo verranno introdotte la grandezza principali legate alla cinematica e alla dinamica delle onde gravitazionali partendo dalle equazioni di Laplace per poi convergere alla teoria di Airy per il moto ondoso.

L'equazione di Laplace ha molteplici campi di applicazioni, ricopre un rilevante interesse in quanto applicabile a molti settori dell'ingegneria e della fisica, come ad esempio conduzione termica, termostatica, elettrostatica, elettrodinamica e fluidodinamica. È un'equazione differenziale parziale del secondo ordine (PDE ellittica). La teoria generale per ricavare le soluzioni di questa equazione è nota come teoria del potenziale, le sue soluzioni sono conosciute come funzioni armoniche.

Prendendo in considerazione le onde gravitazionali, la soluzione dell'equazione di Laplace può descrivere la loro propagazione. Il primo passo è senza dubbio impostare correttamente

le condizioni al contorno del problema, con le sue condizioni spaziali e temporali (Figura 3.9).

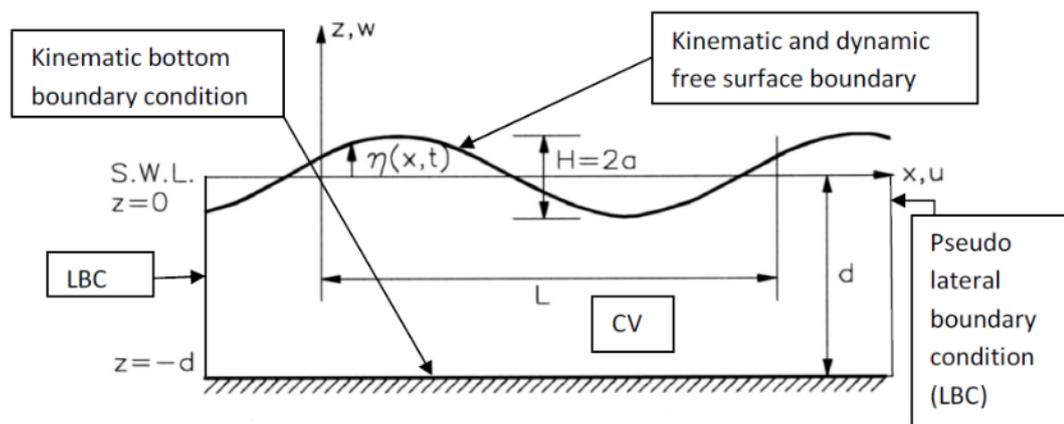


Figura 3.9 – Condizioni al contorno per la risoluzione delle equazioni di Laplace

Il volume di controllo (CV) o la regione di interesse, deve essere pensato per definire l'area entro la quale l'equazione di Laplace è soddisfatta. Nell'immagine compaiono anche i confini condizioni.

### EQUAZIONE DI LAPLACE E CONDIZIONI AL CONTORNO

Considerando un campo di flusso 2D, caratterizzato dalla velocità vettoriale  $V$ , in un fluido omogeneo, le ipotesi iniziali che devono essere considerate sono:

- Flusso senza attrito ( $\mu = 0$ ),
- Movimento Irrotazionale ( $\text{rot}(V) = 0$ ),
- Fluido incompressibile ( $\rho = \text{costante}$ ).

L'assunzione di flusso irrotazionale significa che le particelle fluide non ruotano attorno ai propri assi poiché la velocità angolare è zero. Un esempio di flusso irrotazionale è il vortice irrotazionale, dove le traiettorie delle particelle sono cerchi e il flusso è caratterizzato da velocità angolare pari a 0 e velocità tangenziale proporzionale a  $1/r$ , dove  $r$  è la distanza della particella rispetto al centro vortice. È importante sottolineare che l'ipotesi di irrotazionalità è valida solo se il flusso è privo di attrito: come conseguenza del teorema di Kelvin, la velocità angolare è originata dalla viscosità, quindi un flusso non viscoso assicura zero velocità angolare e flusso irrotazionale.

Gli effetti viscosi si concentrano comunque principalmente in strati sottili (strati limite) vicino al fondo e alla superficie, rendendo accettabili le ipotesi di assenza di attrito e irrotazionalità.

Le ipotesi di irrotazionali e mancanza di attrito portano a una funzione potenziale scalare  $\varphi = \varphi(x, z)$  così che:

$$\vec{V} = -grad(\varphi) = -\nabla\varphi \quad (3.3)$$

Dove  $V$  è il vettore velocità. Questa equazione potenziale soddisfa l'equazione di continuità:

$$div\vec{V} = \nabla \cdot \vec{V} = \frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta w}{\delta z} = 0 \quad (3.4)$$

Sostituendo quindi l'equazione potenziale all'interno dell'equazione di continuità si soddisfa la forma generale dell'equazione di Laplace per un flusso in due dimensioni:

$$div(grad(\vec{\varphi})) = \nabla \cdot \nabla\varphi = \nabla^2 \varphi = \Delta\varphi = 0 \quad (3.5)$$

Finora l'equazione di Laplace è stata espressa attraverso la funzione potenziale  $\varphi$  (velocità potenziale). Consideriamo ora l'ipotesi di incomprimibilità: una funzione di flusso esiste come conseguenza dell'assunzione fatta ed è definita, ad esempio, come segue:

$$\vec{V} = \nabla \times \psi \quad (3.6)$$

Dove  $\psi$  è la funzione di flusso mentre  $u$  e  $v$  sono quindi definiti a partire da essa:

$$u = -\frac{\delta\psi}{\delta z} \quad w = \frac{\delta\psi}{\delta x} \quad (3.7)$$

L'equazione di continuità viene quindi raggiunta attraverso l'equazione di bilancio delle linee di flusso dentro e fuori da un volume di controllo:  $\psi_{in} = \psi_{out}$ . A turno, dopo la semplificazione, l'equazione di continuità diventa come segue e quindi sostituisce le definizioni di  $u$  e  $v$  secondo la funzione di flusso:

$$\frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta w}{\delta z} = 0 \qquad -\frac{\delta^2 \psi}{\delta x \delta z} - \frac{\delta^2 \psi}{\delta z \delta x} = 0 \qquad (3.8)$$

Ed infine, la funzione di flusso diviene:

$$\operatorname{div}(\operatorname{grad}(\vec{\psi})) = \nabla \cdot \nabla \psi = \nabla^2 \psi = \Delta \psi = \frac{\delta^2 \psi}{\delta^2 x} + \frac{\delta^2 \psi}{\delta^2 z} = 0 \qquad (3.9)$$

La funzione di flusso è quindi correlata alla velocità potenziale. Le linee con valori di velocità potenziale costante (chiamate linee equipotenziali) risultano essere perpendicolari alle linee con valori costanti della funzione flusso:

$$d - \frac{\delta \varphi}{\delta x} = -\frac{\delta \psi}{\delta z} \quad \text{oppure} \quad -\frac{\delta \varphi}{\delta z} = -\frac{\delta \psi}{\delta x} \qquad (3.10)$$

Ora che sono state introdotte le equazioni armoniche, vengono definite le condizioni al contorno per il caso studiato, considerando gli assi (x, z) e le componenti della velocità (u, w) come precedentemente mostrato in Figura 3.9. Le condizioni cinematiche al contorno sono correlate al movimento delle particelle d'acqua, mentre le condizioni al contorno dinamiche sono riferite al gradiente di pressione e le forze relative che entrano in gioco.

#### CONDIZIONI CINEMATICHE AL CONTORNO

Le condizioni al contorno cinematiche (KBC) devono essere applicate sia sulla superficie inferiore del volume di controllo che alla superficie superiore (superficie libera). Tuttavia, prima di introdurre queste due condizioni richieste è necessario spiegare il significato fisico dei KBC.

Quando si considera un'interfaccia oppure una superficie fissa o libera, i KBC assicurano che non nessun flusso vi passi attraverso. In ogni caso, è necessario porre una condizione sulla componente del flusso del fluido perpendicolare all'interfaccia: questa è una conseguenza del fatto che in prossimità di un limite impermeabile, il flusso deve essere tangenziale. Se l'interfaccia è fissa, come nel caso del fondale, la componente normale della velocità del fluido deve essere zero. Se l'interfaccia si muove, ad esempio in funzione del tempo come la superficie libera del mare, la componente normale della velocità del flusso deve essere uguale alla componente di velocità della superficie libera, perpendicolare a sé stessa.

In termini matematici il modo più semplice per esprimere queste condizioni è usando l'equazione generale che descrive una superficie (quindi l'interfaccia):

$$3D: S(x, y, z, t) = 0 \quad 2D: S(x, z, t) = 0$$

La derivata totale dell'equazione sopra, in funzione del tempo, è pari a zero se la superficie dipende dalla funzione tempo:

$$\frac{DS(x, y, z, t)}{Dt} = \frac{\delta S}{\delta t} + u \frac{\delta S}{\delta x} + v \frac{\delta S}{\delta y} + w \frac{\delta S}{\delta z} = 0 \quad (3.11)$$

$$-\frac{\delta S}{\delta t} = \vec{v} \cdot \nabla S = \vec{v} \cdot \vec{n} |\nabla S| \quad (3.12)$$

La seconda equazione è diretta conseguenza della prima e il vettore  $\vec{n}$  è normale alla superficie  $S$ . L'equazione (3.12) è quindi la condizione al contorno cinematica nel caso di superficie in movimento, che può essere espressa come segue:

$$\vec{v} \cdot \vec{n} = \frac{-(\delta S / \delta t)}{|\nabla S|} \quad (3.13)$$

Dove  $|\nabla S|$  rappresenta:

$$|\nabla S| = \sqrt{\left(\frac{\delta S}{\delta x}\right)^2 + \left(\frac{\delta S}{\delta y}\right)^2 + \left(\frac{\delta S}{\delta z}\right)^2} \quad (3.14)$$

Considerando invece il caso di superficie fissa, la derivata parziale di  $S$  rispetto al tempo è pari a zero, la condizione introdotta precedentemente è quindi soddisfatta:

$$\vec{v} \cdot \vec{n} = 0 \quad (3.15)$$

### CONDIZIONI AL CONTORNO SUL FONDALE

Facendo riferimento al caso 2D, l'equazione di superficie sarà:

$$S(x, z) = z + h(x) = 0 \quad (3.16)$$

Tenendo a mente che il fondale è da considerarsi come fisso allora  $v \cdot n = 0$ ;  $h(x)$  è la profondità dell'acqua. Come in Figura 3.9 l'asse  $z$  si estende verso la parte superiore del volume di controllo rendendo così il fondale alla profondità  $z = -d = h$ . In questo caso è anche necessario specificare cosa rappresenta  $n$ :

$$\vec{n} = \frac{\nabla S}{|\nabla S|} = \frac{\frac{\delta h}{\delta x} \vec{i} + 1 \vec{k}}{\sqrt{\left(\frac{\delta h}{\delta x}\right)^2 + 1}} \quad (3.17)$$

Dall'espressione (3.17) emerge che  $h$  dipende da  $x$  e la sua derivata prima rispetto  $z$  è di conseguenza pari a 1. Continuando nei calcoli e sostituendo l'espressione di  $n$  in (3.15):

$$u \frac{dh}{dx} + w = 0 \quad \text{valido sul fondale } (z = -h(x)) \quad (3.18)$$

$$w = \begin{cases} 0 & \text{se fondale orizzontale} \\ -u \frac{dh}{dx} & \text{se fondale inclinato} \end{cases} \quad \text{valido sul fondale } (z = -h(x))$$

Che rappresenta la condizione applicata alla componente normale della velocità del fluido sul fondale.

### CONDIZIONI AL CONTORNO SULLA SUPERFICIE LIBERA

Facendo nuovamente riferimento al caso 2D:

$$S(x, y, z, t) = z - \eta(x, y, t) = 0 \quad (3.19)$$

L'equazione è valida in prossimità del livello superficiale di acqua, dove convenzionalmente  $z = 0$ , quindi per  $z = \eta(x, y, t)$ . Il parametro  $\eta$  è stato precedentemente definito come l'elevazione della superficie dell'acqua o lo spostamento della superficie libera. L'equazione per la condizione al contorno è quindi:

$$\vec{v} \cdot \vec{n} = \frac{\frac{\partial \eta}{\partial t}}{\sqrt{\left(\frac{\partial \eta}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial y}\right)^2 + 1}} \quad \text{valid for } z = \eta(x, y, t) \quad (3.20)$$

Ovvero la derivata totale rispetto al tempo dell'equazione di superficie libera  $S(x, y, z, t) = z - \eta(x, y, t) = 0$ . In effetti risulta che:

$$\frac{DS(x, y, z, t)}{Dt} = 1 - \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial \eta}{\partial y} = 0 \quad (3.21)$$

Da cui deriva l'espressione del vettore normale  $n$ :

$$\vec{n} = \frac{\nabla S}{|\nabla S|} = \frac{-\frac{\partial \eta}{\partial x} \vec{i} - \frac{\partial \eta}{\partial y} \vec{j} + 1 \vec{k}}{\sqrt{\left(\frac{\partial \eta}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial y}\right)^2 + 1}} \quad (3.22)$$

Sostituendo questa espressione nelle condiziona al contorno:

$$(u, v, w) \cdot \left(-\frac{\delta \eta}{\delta x} \vec{i} - \frac{\delta \eta}{\delta y} \vec{j} + 1 \vec{k}\right) = \frac{\delta \eta}{\delta t} \quad (3.23)$$

Infine, valutando il prodotto è possibile esprimere le condizioni al contorno per la superficie libera, e quindi la componente normale della velocità del fluido.

$$w = \frac{\delta\eta}{\delta t} + u \frac{\delta\eta}{\delta x} + v \frac{\delta\eta}{\delta y} \text{ valido per } z = \eta(x, y, t) \quad (3.24)$$

### CONDIZIONI DINAMICHE AL CONTORNO SULLA SUPERFICIE LIBERA

La pressione sulla superficie libera subisce una variazione e quindi all'interfaccia è richiesta la condizione di uniformità di pressione. Per  $z > \eta$  la pressione è uguale a quella atmosferica  $p_a$ , tuttavia per  $z < \eta$  la pressione deve essere calcolata attraverso l'equazione di Bernulli. L'equazione di Bernulli nasce a valle delle equazioni del moto (equazioni di Eulero) per il caso 2D (piano x-z):

$$\begin{aligned} \frac{\delta u}{\delta t} + u \frac{\delta u}{\delta x} + w \frac{\delta u}{\delta z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\delta p}{\delta x} \\ \frac{\delta w}{\delta t} + u \frac{\delta w}{\delta x} + w \frac{\delta w}{\delta z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\delta p}{\delta z} - g \end{aligned} \quad (3.25)$$

Considerando la condizione di irrotazionalità come la velocità potenziale e risolvendo attraverso un integrale le due equazioni (rispetto a x per la prima e rispetto a z per la seconda), l'equazione di Bernulli risulta:

$$-\frac{\delta\phi}{\delta t} + \frac{(u^2 + w^2)}{2} + \frac{p}{\rho} + gz = C(t) \quad (3.26)$$

Dove  $C(t)$  è il termine di Bernulli ed è costante se si considera il flusso stazionario, come quello in esame. Invece, sulla superficie libera  $z=\eta(x,t)$ , deve esserci un determinata pressione  $p_\eta$  (generalmente  $p_\eta=0$ ), per cui:

$$-\frac{\delta\phi}{\delta t} + \frac{(u^2 + w^2)}{2} + \frac{p_\eta}{\rho} + gz = C(t) \text{ valid for } z = \eta(x, t) \quad (3.27)$$

con  $p_\eta$  costante.

La superficie libera, tuttavia, è soggetta a variazioni spaziali e temporali. Considerando ad esempio l'azione del vento che soffia sulla superficie, l'interfaccia è sicuramente interessata

da gradienti di pressione e velocità: il campo vento e il campo onda sono "accoppiati" a mezzo dell'equazione di Bernoulli.

In un punto distante dalla superficie, la costante  $C(t)$  potrà essere pari a  $p_a/\rho$ . In quella regione il fluido può essere considerato indipendente dal campo del vento e quindi a riposo, indisturbato e uniforme. Appena sopra la superficie, la pressione sarà ancora uniforme, comunque immediatamente sotto, la pressione non sarà più uniforme a causa della curvatura dell'interfaccia, proprio come rappresentato in Figura 3.10.

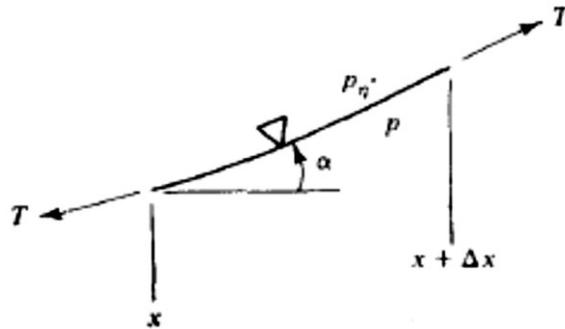


Figura 3.10 – Elemento di superficie

La tensione superficiale entra in gioco per bilanciare la differenza di pressione sulla superficie:

$$T = \sigma'$$

Dove  $\sigma'$  è il coefficiente di tensione superficiale e  $T$  la tensione per unità di lunghezza. Considerando la superficie, oggetto dello studio,  $p$  è la pressione sotto la superficie libera e assumendo che l'interfaccia sia caratterizzata da una determinata curvatura  $\chi$ :

$$\chi = \nabla \cdot \vec{n} = \nabla \cdot \left( \frac{-\nabla \eta}{\sqrt{1 + (\nabla \eta)^2}} \right) \quad (3.28)$$

Quindi, l'analisi delle forze su corpo libero sull'asse  $z$  (considerando valida l'approssimazione  $\delta\eta/\delta x \approx \sin(\alpha)$ ):

$$T[\sin\alpha|_x + \sin\alpha|_{x+\Delta x}] + (p - p_\eta)\Delta x + \text{termini di ordine } \Delta x^2 = 0 \quad (3.29)$$

Usando le espansioni di serie di Taylor, il risultato è:

$$p = p_\eta - \sigma' \frac{\delta^2 \eta}{\delta x^2} \quad (3.30)$$

Combinando queste ultime espressioni, le condizioni al contorno dinamiche per una superficie libera risulta:

$$-\frac{\delta \varphi}{\delta t} + \frac{(u^2 + w^2)}{2} + \frac{p_\eta}{\rho} + gz - \sigma' \frac{\delta^2 \eta}{\delta x^2} = C(t) \text{ valido per } z = \eta(x, t) \quad (3.31)$$

### CONDIZIONI AL CONTORNO LATERALI

Le condizioni al contorno laterali del volume di controllo si fissano considerando  $x$  come la direzione verso cui le onde si propagano (Figura 3.9), quindi la condizioni di bidimensionalità è generalmente anche per imporre la condizione di assenza di flusso lungo la direzione  $y$ . Si supponga che, per lo scopo dello studio, le condizioni al contorno laterali si basino sul caso del moto ondoso indotto da una forza nota, anche lungo la direzione di propagazione. L'esempio fisico di questo caso che può essere utilizzato è un generico generatore di onde (Figura 3.11) caratterizzato da palette verticale che si muove nella direzione  $x$ .

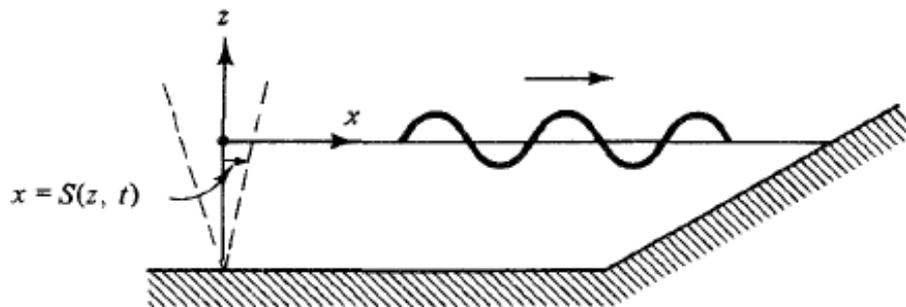


Figura 3.11 – Esempio di generatore di onde

Nella figura viene mostrato lo spostamento di una paratia incernierata sul fondale della vasca, indicato come  $x=S(z,t)$ . Le condizioni al contorno sono espresse dal prodotto scalare  $\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}$ :

$$\vec{v} \cdot \vec{n} = \frac{\frac{\delta S(z, t)}{\delta t}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\delta S}{\delta z}\right)^2}} \quad (3.32)$$

Con il vettore normale inteso come:

$$\vec{n} = \frac{\nabla S}{|\nabla S|} = \frac{1\vec{j} - \frac{\delta S}{\delta z}\vec{k}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\delta S}{\delta z}\right)^2}} \quad (3.33)$$

Sostituendo poi la definizione di vettore normale n nella prima equazione:

$$(u, v, z) \cdot \left(1\vec{j} - \frac{\delta S}{\delta z}\vec{k}\right) = \frac{\delta S(z, t)}{\delta t} \quad (3.34)$$

Infine, calcolato il prodotto scalare, si ottengono le condizioni al contorno laterali, considerando la movimentazione di fluido lungo l'asse x:

$$u - w \frac{\delta S}{\delta z} = \frac{\delta S(z, t)}{\delta t} \quad \text{valido per } x = S(z, t) \quad (3.35)$$

Si suppone quindi che le particelle in movimento seguano il moto della paratia (almeno per le particelle "più vicine" al muro mobile) e che quindi la condizione appena introdotta sia valida per il caso di onde indotte da disturbi nel punto  $x = 0$ . Un'altra condizione richiesta sull'altro confine laterale del volume di controllo, come mostra Figura 3.11, consiste in una possibile riva.

Le onde periodiche richiederebbero una speciale condizione al contorno, come conseguenza della loro condizione periodica, espressa come segue (T è il periodo d'onda, L è la lunghezza d'onda):

$$\begin{aligned} \varphi(x, t) &= \varphi(x + L, t) \\ \varphi(x, t) &= \varphi(x, t + T) \end{aligned} \quad (3.36)$$

Da considerare che  $\varphi$  dipende dal tempo  $t$  e dalla coordinata spaziale della propagazione direzione delle onde  $x$ .

Tutte le condizioni al contorno discusse sono state introdotte con successo per il volume di controllo bidimensionale 2D (Figura 3.12) delimitato quindi in direzione  $x$  all'interno di  $0$  e  $L$  ( $0 < x < L$ ) e in direzione  $z$  all'interno di  $-h$  e  $\eta$  ( $-h < z < \eta$ ).

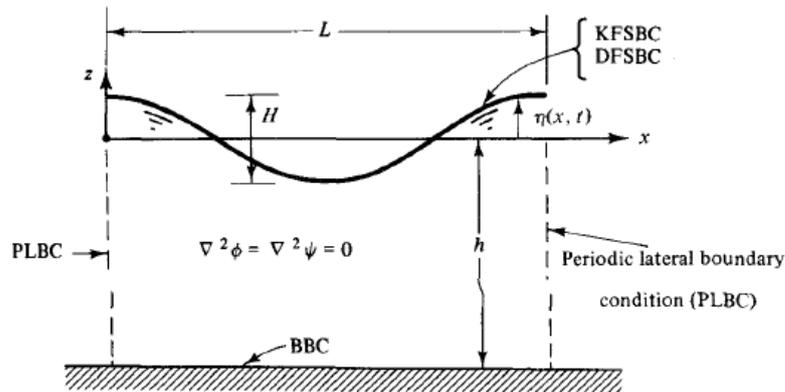


Figura 3.12 – Volume di controllo e condizioni al contorno necessarie

Al fine di riassumere opportunamente le condizioni al contorno si riportano schematicamente i limiti introdotti.

- KBBC – Kinematic Bottom Boundary Condition – Condizione al contorno cinematica sul fondo

$$w = \begin{cases} 0 & \text{per fondo orizzontale} \\ -u \frac{dh}{dx} & \text{per fondo in pendenza} \end{cases} \quad \text{valido per il fondo } (z = -h(x)) \quad (3.37)$$

- KFSBC – Kinematic Free Surface Boundary Condition – Condizione al contorno cinematica sulla superficie libera

$$w = \frac{\delta\eta}{\delta t} + u \frac{\delta\eta}{\delta x} + v \frac{\delta\eta}{\delta y} \quad \text{valido per } z = \eta(x, y, t) \quad (3.38)$$

- DFSBC – Dynamic Free Surface Boundary Condition – Condizione al contorno dinamica sulla superficie libera

$$-\frac{\delta\varphi}{\delta t} + \frac{(u^2 + w^2)}{2} + \frac{p_\eta}{\rho} + gz = C(t) \quad \text{valid for } z = \eta(x, t) \quad (3.39)$$

- PLBC – Periodic Lateral Boundary Condition – Condizione al contorno laterale periodica

$$\begin{aligned}\varphi(x, t) &= \varphi(x + L, t) \\ \varphi(x, t) &= \varphi(x, t + T)\end{aligned}\tag{3.40}$$

A questo punto tutti i valori limite sono stati inquadrati all'interno del volume di controllo, il passo successivo è quindi quello di procedere in avanti con la soluzione (soluzione linearizzata) del problema [40] [41] [42].

### 3.4 CENNI STORICI, TEORIA DI AIRY

La teoria delle onde lineari fu introdotta per la prima volta da G. Airy nel 1841 e successivamente ulteriormente studiata e sviluppata da G. G. Stokes. Tuttavia, gli studi e i lavori precedenti su cui si basano queste teorie, furono sviluppati da L. Eulero, che elaborò e derivò l'equazione governante dell'idrodinamica (tra il 1757 e il 1761). Altri hanno poi contribuito allo studio del moto ondoso: P. Laplace e J. L. Lagrange. Soprattutto Lagrange, tra il 1781 e il 1786, raggiunse la forma linearizzata per l'equazione del moto delle onde, nel caso di piccola ampiezza: la soluzione che ha trovato, tuttavia, era solo limitata al caso di onde piane lunghe all'interno di acque poco profonde. Laplace poi, fu il primo a porre il problema del valore iniziale e quindi ad applicare il ben noto approccio "Lagrangiano" (anziché quello "Euleriano") per descrivere il campo d'onda e le componenti della velocità. Nel 1804, F. J. von Gerstner, ottenne la soluzione non lineare per onde di ampiezza finita, che si propagano in acque profonde, la ottenne derivando la teoria dell'onda trocoidale non lineare non irrotazionale.

Successivamente A. L. Cauchy (1816), e poco dopo S. D. Poisson (1818), arricchirono il lavoro estendendo la teoria anche ad acque di profondità indefinita. Il lavoro di Cauchy fu pubblicato nel 1827 e l'analisi del moto ondoso, per la prima volta, fu eseguita applicando le trasformazioni di Fourier. Quasi contemporaneamente (1825), i fratelli Weber pubblicarono la loro vasta ricerca che descrive i risultati dei loro esperimenti di laboratorio, riguardanti treni periodici di onde in canale.

Nel frattempo, in Gran Bretagna, nel 1831, venne fondata la British Association for the Advancement of Science. Sotto la sua supervisione, nel 1837, fu istituito il "Committee on Waves" al fine di migliorare la ricerca nel settore e svolgere attività sperimentale. Questa iniziativa influenzò positivamente il mondo accademico di Cambridge, spingendo molti a presentare resoconti sulle proprie attività di laboratorio e intraprendere studi riguardante il moto delle onde e la loro propagazione. J. S. Russell e J. Robinson, tra i tanti, furono i due

studiosi nominati dall'Associazione Britannica per entrare in questa commissione. Tra coloro che seguirono il loro lavoro e che ben presto pubblicarono articoli e ricerche, G. Green, P. Kelland, S. Earnshaw e G. Airy.

Kelland in particolare pubblicò la prima parte del suo studio in un articolo nel 1840 dal nome "On the Theory of Waves" seguito da una seconda parte nel 1844. Lo studio affrontato si basava su un'analisi delle caratteristiche del moto ondoso per onde lunghe in acque poco profonde, analogamente a quanto fece Laplace. Kelland riuscì però ad analizzare anche la propagazione di onde in canali a sezione trasversale differente dalla classica rettangolare, esaminò ad esempio canali a sezione triangolare.

S. Earnshaw, invece, nel 1847 tentò di descrivere il moto delle onde solitarie per mezzo di espressioni matematiche discontinue, usando diverse ipotesi rispetto a quella precedentemente usata da Kelland. Tuttavia non riuscì a impostare una teoria non lineare: secondo Stokes, Earnshaw pose erroneamente le condizioni per l'interfaccia tra acqua ferma e onda. Analizzò il moto di un'onda solitaria supponendo che la velocità orizzontale di ogni singola particella, attraverso la sezione trasversale, fosse la stessa, quindi un flusso uniforme attraverso il canale. Tuttavia, non fece la stessa supposizione che Russell fece con i suoi esperimenti, quindi Earnshaw non considerò una profondità finita dell'acqua (condizione di acqua bassa non applicabile) né una piccola ampiezza delle onde. Nonostante il suo lavoro, Earnshaw non ottenne ulteriori progressi dal lavoro portato avanti da Kelland. Comunque successivamente (1876), in seguito alle sue osservazioni, Rayleigh trovò una soluzione (approssimativamente corretta soluzione) alla teoria non lineare.

Il lavoro di Airy fu pubblicato su "Encyclopaedia Metropolitana": le sue osservazioni e studi lo portarono a considerare la soluzione raggiunta da Laplace, nel secolo precedente, come non realmente attendibile nel descrivere le condizioni dell'oceano. I suoi lavori si concentrano principalmente sullo studio delle onde di tipo marea (onde lunghe) nei canali. La profondità dei canali venne impostata in modo da essere variabile all'interno di valori finiti, quindi spostandosi verso una direzione diversa rispetto agli studi di Earnshaw. Lagrange aveva già trovato l'equazione in grado di correlare la velocità dell'onda con la profondità e la gravità standard ( $v = (gd)^{1/2}$ ), mostrando che, per acque poco profonde, la velocità dell'onda è indipendente dalla sua lunghezza. Airy riuscì a dimostrare poi che questa relazione è ancora valida considerando l'onda di ampiezza ridotta (ampiezza molto inferiore rispetto il valore medio della profondità dell'acqua). Inoltre riuscì a mostrare, attraverso le sue attività sperimentali, che tale equazione funziona ancora in canali a sezioni trasversali non uniformi.

Le forze di marea che studiò, gli permisero di mostrare che la velocità della cresta dell'onda è maggiore, se si considerano onde di ampiezza grande, rispetto alla velocità con cui le particelle si muovono. Ciò porta a componenti armoniche, nella soluzione dell'equazione di Laplace, caratterizzate da metà del periodo.

Grazie all'osservazione delle stesse onde nei canali, Airy mostrò la stretta dipendenza dell'ampiezza e della fase sulla profondità e del periodo di disturbo (riferendosi alle forze di marea coinvolte). Ciò ha portato, tra le altre cose, a mostrare quanto erronee possano essere le stime della massa lunare, basate sul confronto tra maree solari e lunari, per la profondità reale degli oceani e dei mari.

Nonostante i suoi risultati relativi alla descrizione delle onde gravitazionali superficiali che utilizzano il flusso potenziale siano limitati per i casi 2D, riuscì ad ottenere la loro corretta derivazione e formulazione.

Nel 1847, basandosi sulle teorie di Russell e Robinson, Kelland, Earnshaw e Airy, Stokes fu in grado di estendere la teoria lineare, elaborata da Airy, al moto ondoso non lineare, con risultati corretti fino al terzo ordine.

Ulteriori studi furono poi intrapresi da un gran numero di studiosi di rilievo come W. Thomson e J. H. Poincaré nella seconda metà del 19° secolo.

A valle di questo breve riassunto storico riguardante la teoria del moto ondoso, si va a definire con maggiore dettaglio la teoria di Airy, dopo aver introdotto la teoria di base di Lagrange, al fine di descrivere nel modo più esaustivo possibile il problema in termini matematici [43] [44].

### **3.4.1 TEORIA LINEARE**

La teoria lineare relativa la propagazione di onde proposta da Airy, permette di descrivere semplicemente la propagazione e la cinematica delle onde lungo la superficie di un fluido omogeneo, portando ad una rappresentazione sinusoidale del profilo d'onda. Questa teoria è spesso usata per stimare in modo rapido ed approssimato le caratteristiche dell'onda e i suoi effetti, l'approssimazione è ridotta per piccoli valori del rapporto altezza d'onda su profondità (per onde in acque poco profonde) e altezza su lunghezza d'onda (per onde in acque profonde). La teoria lineare delle onde è spesso applicata in ingegneria marittima e costiera, dando risultati soddisfacenti in termini di precisione ed accuratezza.

Affinché la teoria di Airy sia applicabile, è necessario il rispetto delle seguenti ipotesi fondamentali:

- la profondità  $d$  e la lunghezza d'onda  $L$  sono costanti
- il moto è irrotazionale e bidimensionale
- le onde non variano la loro forma nel tempo
- il fluido è incomprimibile
- sono trascurati gli effetti di viscosità, tensione superficiale e turbolenza

- l'altezza dell'onda  $H$  è piccola sia rispetto alla profondità che alla lunghezza d'onda ( $H/d \ll 1$ ;  $H/L \ll 1$ )

È possibile individuare tre regimi di onde differenti basandosi o sul rapporto  $H/L$  o sul numero d'onda  $k$ .

Regimi ondosi	$H/L$ or $k = 2\pi / L$	Descrizione
Onde in acque profonde	$H/L > 1/2$ $kH > \pi$	Le onde non sono influenzate dal fondale. Le particelle descrivono moti orbitali circolari con raggio decrescente con la profondità, Raggiungendo zero quando $H=L/2$ . La loro velocità è fortemente legata alla profondità.
Onde in acque di profondità intermedia	$1/20 < H/L < 1/2$ $\pi/10 < kH < \pi$	Caso intermedio dove sia la profondità che la lunghezza d'onda hanno un'influenza significativa sulla soluzione della teoria di Airy.
Onde in acque poco profonde	$H/L < 1/20$ $0 < kH < \pi/10$	Le onde dipendono dalla profondità dell'acqua e le particelle descrivono orbite ellittiche con eccentricità crescente vicino al fondale. La loro velocità dipende esclusivamente dalla profondità e non dalla lunghezza d'onda.

*Tabella 3.1 – Caratteristiche dei regimi ondosi*

Figura 3.13 mostra le differenze dei moti delle particelle dell'acqua sotto la superficie: ellittici per fondali bassi circolari per acque profonde;  $d$  è la profondità dell'acqua,  $w$  e  $v$  le componenti della velocità delle particelle.

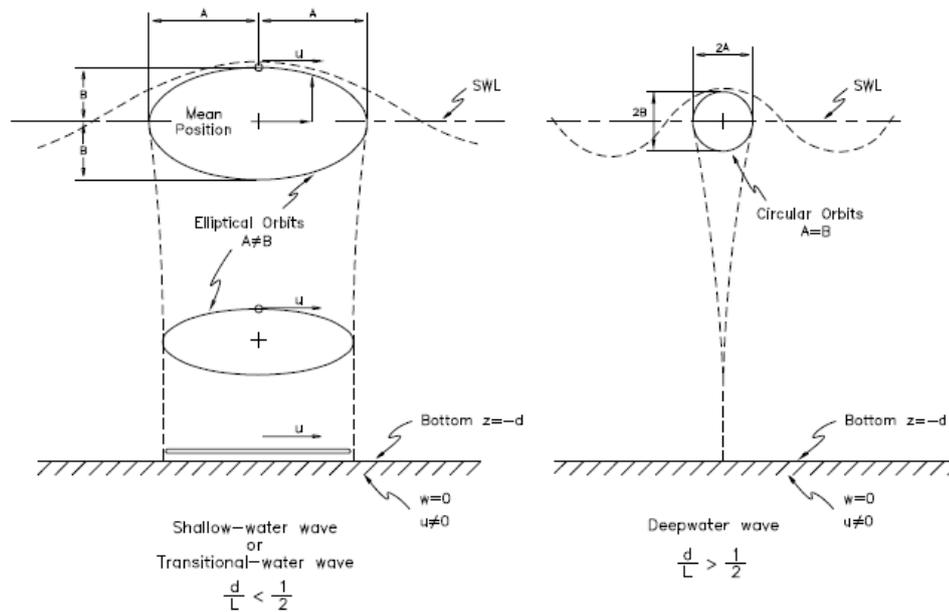


Figura 3.13 – Rappresentazione dei moti orbitali per fondali differenti

Nella figura si riportano i due regimi di moto principali,  $d$  è la profondità dell'acqua,  $u$  e  $w$  invece le componenti della velocità delle particelle d'acqua rispettivamente su  $x$  e  $z$ .

### METODO DELLA SEPARAZIONE DELLE VARIABILI

L'equazione di Laplace è un'equazione differenziale parziale, quindi, il modo adatto per ottenere la soluzione linearizzata di Airy-Stokes è applicare il metodo della separazione delle variabili. Il metodo si basa sul fatto che la soluzione può essere espressa come un prodotto di termini diversi. Ciascuno dei termini dipende solo da una delle variabili indipendenti. Ovviamente il numero di termini dipende dal numero di variabili indipendenti (ci sono tanti termini quante più variabili indipendenti). Il potenziale di velocità quindi, mediante il quale viene espressa la formulazione della teoria delle onde lineari, può essere scritto come segue:

$$\varphi(x, z, t) = X(x)Z(z)T(t) \quad (3.41)$$

Dove  $X$ ,  $Z$  e  $T$  sono i termini che dipendono solo da  $x$ ,  $z$  e  $t$  rispettivamente. Le onde gravitazionali studiate sono periodiche nello spazio e nel tempo, quindi il termine  $T$  può essere espresso con una funzione sinusoidale:  $T(t) = \sin(\sigma t)$ , dove  $\sigma$  è la frequenza angolare dell'onda.  $T(t)$  può anche essere espresso come una funzione di coseno o una combinazione lineare di coseno e seno, poiché la proprietà di sovrapposizione persiste, in quanto riguarda la funzione lineare di  $t$ . Per scoprire la frequenza angolare, è possibile utilizzare la condizione al contorno periodica precedentemente definita, che diventa:

$$\sin \sigma t = \sin \sigma(t + T) = \sin \sigma t \cos \sigma T + \cos \sigma t \sin \sigma T \quad (3.42)$$

Da cui deriva il fatto che  $\sigma = 2\pi / T$ . Quindi, sostituendo prima nell'equazione del potenziale di velocità e poi nell'equazione di Laplace, si ottiene:

$$\varphi(x, z, t) = X(x)Z(z) \sin \sigma t \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = \frac{d^2 X(x)}{dx^2} Z(z) \sin \sigma t + X(x) \frac{d^2 Z(z)}{dz^2} \sin \sigma t = 0$$

E dividendo per  $\varphi$ :

$$\frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} + \frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} = 0 \quad (3.44)$$

Poiché  $X$  dipende solo da  $x$  e  $Z$  solo su  $z$ , l'equazione sarebbe soddisfatta solo nel caso in cui entrambi i termini fossero uguali allo stesso parametro o costante, a parte nel cambiamento del segno. Infatti se  $x$  varia, solo il primo termine cambierebbe e non il secondo, quindi l'equazione verrebbe violata e non sarebbe più uguale a zero. Ciò aiuta anche a scomporre l'iniziale equazione differenziale parziale del secondo ordine lineare, l'equazione di Laplace, in due equazioni differenziali ordinarie lineari del secondo ordine, rendendo il problema più semplice da affrontare. Quindi il parametro  $k$ :

$$\frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} = -k^2 \quad (3.45)$$

$$\frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} = k^2$$

La costante  $k$  è un parametro che può essere sia un numero reale che immaginario. I tre casi presentati nel seguito e che possono verificarsi nella pratica, sono quelli mostrati nella Tabella 3.2, dove, a seconda del valore di  $k$  si hanno diverse soluzioni dell'equazione di Laplace. Sono previste quattro costanti relative a due ordini secondari ODE [45].

Costante k	ODE	Soluzioni
$k^2 > 0$ (numero reale)	$\frac{d^2X}{dx^2} + k^2X = 0$ $\frac{d^2Z}{dz^2} - k^2Z = 0$	$X(x) = A \cos kx + B \sin kx$ $Z(z) = Ce^{kz} + De^{-kz}$
$k = 0$	$\frac{d^2X}{dx^2} = 0$ $\frac{d^2Z}{dz^2} = 0$	$X(x) = Ax + B$ $Z(z) = Cz + D$
$k^2 < 0$ , $k = i k $ numero immaginario puro)  $ k $ is è l'ampiezza di k	$\frac{d^2X}{dx^2} -  k ^2X = 0$ $\frac{d^2Z}{dz^2} +  k ^2Z = 0$	$X(x) = Ae^{ k x} + Be^{- k x}$ $Z(z) = C \cos k z + D \sin k z$

Tabella 3.2 – Possibili valori del parametro k

### CONDIZIONI AL CONTORNO APPLICATE ALL'INSIEME DI SOLUZIONI

Per finalizzare la soluzione dell'equazione di Laplace, è necessario trovare i valori delle quattro costanti, insieme alla scelta della forma corretta della soluzione in base alla natura del parametro di separazione k (numero reale, immaginario o uguale a zero). Per fare ciò, le condizioni al contorno impostate in precedenza devono essere introdotte nelle equazioni della soluzione.

Una delle due condizioni di periodicità laterale era già stata applicata (periodicità temporale dove  $\varphi$  deve essere  $\varphi(x, t) = \varphi(x, t + T)$ ). Ciò ha permesso di scrivere il "termine" T (t) come una funzione periodica o una combinazione lineare di queste. Si introduce quindi la condizione di periodicità laterale rimanente, che richiede periodicità in x (spazialmente periodica in x):

$$\varphi(x, t) = \varphi(x + L, t) \quad (3.46)$$

Guardando Tabella 3.2, l'unica opzione perseguibile è rappresentata da un valore di k reale e diverso da 0. Infatti, se si scegliesse la soluzione di X(x) per  $k^2 < 0$ , ad esempio, X non sarebbe periodico in x (funzione esponenziale senza coseno o seno). Allo stesso modo se si selezionassero le soluzioni disponibili per  $k = 0$ , non ci sarebbe nessuna periodicità in x. Per il caso in cui k è un numero reale, allora esiste una combinazione lineare di seno e coseno a seconda di x.

Sostituendo quindi queste soluzioni nell'equazione di Laplace, risulta:

$$\varphi(x, z, t) = X(x)Z(z) \sin \sigma t = (A \cos kx + B \sin kx)(Ce^{kz} + De^{-kz}) \sin \sigma t \quad (3.47)$$

Applicando la condizione periodica spaziale, il termine  $X(x)$  deve contenere la seguente espressione:

$$\varphi \cos kx + B \sin kx = A \cos k(x + L) + B \sin k(x + L) \quad (3.48)$$

Sviluppando ulteriormente:

$$\begin{aligned} A \cos k(x + L) + B \sin k(x + L) &= A(\cos kx \cos kL - \sin kx \sin kL) \\ &+ B(\sin kx \cos kL + \cos kx \sin kL) \end{aligned} \quad (3.49)$$

L'espressione esiste quando  $\cos(kL) = 1$  e allo stesso tempo  $\sin(kL) = 0$ . Ciò accade solo quando il prodotto  $kL = 1$ . Di conseguenza  $\cos(1) \approx 1$ , quindi sufficientemente vicino a 1, e un valore di  $k = 2\pi / L$ . Da questa condizione deriva la definizione di  $k$  come numero d'onda.

Consideriamo ora il potenziale di velocità definito come segue:

$$\varphi(x, z, t) = A \cos kx (Ce^{kz} + De^{-kz}) \sin \sigma t \quad (3.50)$$

Fatto ciò, verrà poi introdotto il termine costante  $B$  applicando la proprietà della sovrapposizione.

Le condizioni al contorno della periodicità laterale sono state applicate al potenziale di velocità, è necessario quindi applicare la condizione cinematica al fondo. Si considera dunque il fondale orizzontale, la condizione da applicare è quella per  $z = -h$ ,  $w = 0$ :

$$w = -\frac{\partial \varphi}{\partial z} = -kA \cos kx (Ce^{-kh} - De^{kh}) \sin \sigma t = 0 \quad \text{valido per } z = -h \quad (3.51)$$

L'equazione è soddisfatta solo se la parentesi sopra risulti pari a zero, per qualsiasi valore di  $x$  e  $t$ .

$$(C e^{-kh} - D e^{kh}) = 0 \quad (3.52)$$

$$C = \frac{D e^{kh}}{e^{-kh}} = D e^{2kh}$$

che è condizione necessaria da applicarsi alla costante C. Sostituendo ora nell'espressione del potenziale della velocità:

$$\varphi(x, z, t) = A \cos kx (D e^{2kh} e^{kz} + D e^{-kz}) \sin \sigma t \quad (3.53)$$

Ora è possibile eseguire due ulteriori passaggi:

$$\varphi(x, z, t) = A D e^{kh} \cos kx (e^{k(z+h)} + e^{-k(z+h)}) \sin \sigma t \quad (3.54)$$

E considerando che:

$$\cosh x = \frac{e^x + e^{-x}}{2} = \frac{e^{2x} + 1}{2e^x} \quad (3.55)$$

Allora:

$$2 \cosh k(z+h) = e^{k(z+h)} + e^{-k(z+h)} \quad (3.56)$$

Quindi, sostituendo la funzione potenziale e chiamando  $G = 2AD e^{kh}$ , si soddisfa la condizione al contorno KBBC:

$$\varphi(x, z, t) = G \cos kx \cosh k(z+h) \sin \sigma t \quad (3.57)$$

Il passo successivo consiste nell'introdurre, all'interno dell'espressione del potenziale di velocità, la condizione al contorno della superficie libera dinamica. L'equazione di Bernulli è uguale a un valore costante  $C(t)$  e può essere utilizzata per determinare il valore della pressione (pressione costante) sulla superficie libera, quindi dove  $z = \eta(x, t)$ . Per esprimere l'equazione di Bernulli sulla superficie libera, è necessario partire da un punto noto (un valore

di  $z$ ). Un modo è usare la serie di Taylor, espandendo l'espressione a  $z = 0$  (livello d'acqua immobile), per ottenere l'equazione su  $z = \eta(x, t)$ . Quindi l'espressione risulta (ricordare che  $p = 0$  e  $z = \eta$ ):

$$\begin{aligned} & \left( -\frac{\partial\varphi}{\partial t} + \frac{(u^2 + w^2)}{2} + gz \right)_{z=\eta} \\ &= \left( -\frac{\partial\varphi}{\partial t} + \frac{(u^2 + w^2)}{2} + gz \right)_{z=0} \\ &+ \eta \frac{\partial}{\partial z} \left( -\frac{\partial\varphi}{\partial t} + \frac{(u^2 + w^2)}{2} + gz \right)_{z=0} + \dots = C(t) \end{aligned} \quad (3.58)$$

Una delle ipotesi del problema del valore limite è che le onde gravitazionali coinvolte siano caratterizzate da piccola ampiezza e quindi è logico affermare che  $\eta \ll 1$ . A sua volta tutte le operazioni che coinvolgono prodotti di velocità e pressione (anch'esse piccole perché di  $\eta \ll 1$ ) sono trascurabili ( $u\eta \ll \eta$  o  $w\eta \ll \eta$ ). Quindi, l'equazione di Bernulli, una volta linearizzata (i termini implicati risultano essere solo alla prima potenza), risulta essere:

$$\left( -\frac{\partial\varphi}{\partial t} + g\eta \right)_{z=0} = C(t) \quad (3.59)$$

Lo scostamento  $\eta$  risulta quindi:

$$\eta = \frac{1}{g} \frac{\partial\varphi}{\partial t} \Big|_{z=0} + \frac{C(t)}{g} \quad (3.60)$$

Lo scostamento rispetto la superficie dell'acqua  $\eta$  viene quindi espresso come variazione nel tempo del potenziale di velocità più una costante  $C(t)$ . L'espressione del potenziale di velocità può essere sostituita nell'equazione dello scostamento dalla superficie dell'acqua, a dimostrazione che:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\sigma G}{g} \cos kx \cosh k(z+h) \cos \sigma t \Big|_{z=0} + \frac{C(t)}{g} \\ &= \left( \frac{G\sigma \cosh kh}{g} \right) \cos kx \cos \sigma t + \frac{C(t)}{g} \end{aligned} \quad (3.61)$$

Considerando la definizione di  $\eta$ ,  $C(t)=0$ , e, una volta che la profondità è definita, i termini all'interno delle parentesi risultano costanti:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos kx \cos \sigma t \quad (3.62)$$

A questo punto la costante  $G$  può essere espressa in funzione dell'altezza dell'onda  $H$  ( $H = \eta_{\max} - \eta_{\min}$ ) oppure dell'ampiezza dell'onda ( $a = \eta_{\max}$ ):

$$G = \frac{Hg}{2\sigma \cosh kh} \quad (3.63)$$

Il potenziale della velocità diventa allora:

$$\varphi = \varphi(x, z, t) = \frac{Hg \cosh k(z+h)}{2\sigma \cosh kh} \cos kx \sin \sigma t \quad (3.64)$$

L'espressione coinvolge la funzione del numero d'onda, l'altezza d'onda, la profondità e la frequenza angolare delle onde. Esiste ancora la condizione cinematica della superficie libera della superficie che deve essere applicata. Anche stavolta è necessaria l'espansione di Taylor, perché l'attuale quota  $z = \eta(x, t)$  non è ancora nota, quindi la serie di Taylor è espressa nella posizione nota  $z = 0$ :

$$\begin{aligned} & \left( w - \frac{\partial \eta}{\partial t} - u \frac{\partial \eta}{\partial x} \right)_{z=\eta} \\ &= \left( w - \frac{\partial \eta}{\partial t} - u \frac{\partial \eta}{\partial x} \right)_{z=0} + \eta \frac{\partial}{\partial z} \left( w - \frac{\partial \eta}{\partial t} - u \frac{\partial \eta}{\partial x} \right)_{z=0} + \dots \\ &= 0 \quad \text{valido per } z = \eta(x, t) \end{aligned} \quad (3.65)$$

Come risultato conseguente all'assunzione delle onde di piccola ampiezza ( $\eta \ll 1$ ), i termini non lineari che coinvolgono le componenti della velocità e lo spostamento dell'acqua sono trascurabili, e quindi:

$$w = - \left. \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right|_{z=0} = \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (3.66)$$

Che riguarda la percentuale di variazione nel tempo di spostamento dell'acqua rispetto al componente di velocità lungo l'asse  $z$ . Successivamente l'espressione viene sviluppata considerando le due derivati parziali: da un lato il potenziale di velocità, derivato rispetto a  $z$  per  $z = 0$ , e dall'altro, lo spostamento istantaneo derivato rispetto al tempo  $t$ . Questo passaggio produce:

$$- \left. \frac{H g k \sinh k(z+h)}{2 \sigma \cosh kh} \cos kx \sin \sigma t \right|_{z=0} = - \frac{H}{2} \cos kx \sigma \sin \sigma t \quad (3.67)$$

Semplificando si ottiene:

$$\sigma^2 = g k \tanh kh = \omega^2 = g k \tanh(kh) \quad (3.68)$$

Questa relazione è stata precedentemente introdotta, ed è conosciuta come relazione di dispersione lineare, che mostra quale tipo di connessione c'è tra il numero d'onda e la frequenza radiante o frequenza angolare dell'onda. Un campo d'onda è caratterizzato da un ampio numero di onde diverse e quindi da un elevato numero di frequenze. I diversi componenti di frequenza viaggiano a velocità diverse. A turno, le onde si propagano e si disperdono, come conseguenza di ciò si hanno diverse celerità. La relazione di frequenza radiante misura il "grado" di dispersione del campo d'onda. Non è un'equazione algebrica; quindi richiede sia tecniche iterative che grafiche.

È possibile trovare solo una soluzione per l'equazione di cui sopra, e ciò viene dato una volta impostati sia i valori di  $k$  che di  $h$  (numero d'onda e profondità). La soluzione può essere recuperata come l'intersezione delle due curve seguenti (sostanzialmente un altro modo per scrivere l'equazione di cui sopra (Figura 3.14)):

$$\begin{aligned} \frac{\sigma^2 h}{g k h} &= 0 \\ \tanh kh &= 0 \\ \tanh kh &= \frac{\sigma^2 h}{g k h} \end{aligned} \quad (3.69)$$

Sull'asse x la quantità  $(kh)$  dipende dal termine  $(\sigma^2 h/g)$ . Per i differenti parametri sono disegnate curve diverse.

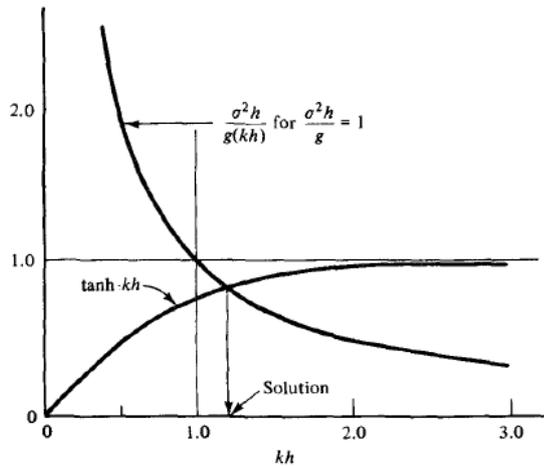


Figura 3.14 – Intersezione delle due equazioni di cui sopra

La velocità d'onda, o celerità della cresta, è definita come il rapporto tra la lunghezza d'onda  $L$  e il periodo  $T$ , quindi, in ogni periodo  $T$  l'onda gravitazionale percorrerà una lunghezza d'onda  $L$ . In precedenza, la frequenza radiante era definita come  $\sigma = 2\pi / T$  (applicando la condizione periodica al contorno laterale nel tempo) e il numero d'onda pure  $k = 2\pi / L$  (applicando l'altra condizione laterale periodica su  $x$ ). Si procede quindi semplicemente sostituendo queste definizioni nella relazione di dispersione lineare:

$$\sigma^2 = gk \tanh kh = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = g \frac{2\pi}{L} \tanh \frac{2\pi}{L} h \quad (3.70)$$

Risulta quindi possibile scrivere un'equazione per la celerità della cresta dell'onda, partendo dall'equazione precedente:

$$C^2 = \left(\frac{L}{T}\right)^2 = \frac{g}{k} \tanh kh = \frac{gL}{2\pi} \tanh kh \quad (3.71)$$

L'equazione (3.71) è quindi l'espressione generale per la celerità della cresta, tuttavia se si considera la condizione di acque profonde, il fattore  $(kh)$  tende ad essere grande e se assume un valore positivo, allora  $\tanh(kh)$  tende al suo asintoto  $\approx 1$ , quindi la relazione di dispersione lineare e la celerità dell'onda diventano rispettivamente:

$$\sigma^2 = gk$$

$$C^2 = \left(\frac{L}{T}\right)^2 = \frac{g}{k} \quad (3.72)$$

Entrambe le equazioni della celerità di cresta, espresse per il caso generale e per quella di acque profonde, mostrano come  $C$  sia effettivamente indipendente dall'altezza delle onde. Questo è vero poiché la teoria linearizzata di Airy raggiunge un'espressione di primo ordine per il potenziale di velocità.

### 3.4.2 CENNI ALLA TEORIA DI STOKES

Pubblicati nel 1847, gli studi di Stokes hanno permesso una generalizzazione della teoria lineare di Airy.

Fatte le ipotesi di fluido non viscoso, moto incomprimibile e irrotazionale, l'elevazione della superficie libera e il potenziale di velocità vengono espressi in serie di Fourier. I coefficienti di tali serie possono essere scritti mediante perturbazioni in termini di un parametro  $\varepsilon$ , che cresce con l'altezza dell'onda [46]:

$$\Phi = \Phi^{(1)} + \varepsilon \Phi^{(2)} + \varepsilon^2 \Phi^{(3)} + \dots + \varepsilon^{j-1} \Phi^j \quad (3.73)$$

$$\eta = \eta^{(1)} + \varepsilon \eta^{(2)} + \varepsilon^2 \eta^{(3)} + \dots + \varepsilon^{j-1} \eta^j \quad (3.74)$$

$$\sigma = \sigma^{(1)} + \varepsilon \sigma^{(2)} + \varepsilon^2 \sigma^{(3)} + \dots + \varepsilon^{j-1} \sigma^j \quad (3.75)$$

Con  $\varepsilon = \frac{kH}{2}$ ,  $\varepsilon \ll 1$ .

Si osserva che la soluzione del primo ordine non dipende da  $\varepsilon$  e corrisponde a quella trovata da Airy. Un'importante differenza con la teoria lineare è la dipendenza della velocità di fase  $C = \frac{\sigma}{k}$  dall'altezza dell'onda  $H$ , oltre che da  $L$  e  $h$ .

La Figura 3.15 mette in evidenza la composizione di un'onda di Stokes del terzo ordine a partire da armoniche con differente lunghezza d'onda.

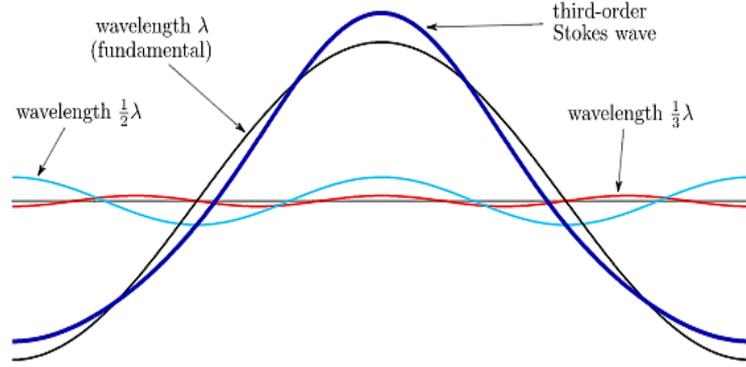


Figura 3.15 – Esempio di onda di Stokes del terzo ordine [47]

La modellazione realizzata da Stokes fornisce risultati accettabili nel campo delle medie ed elevate profondità. Per quanto riguarda le shallow waters altre teorie, come quella Cnoidale, forniscono risultati più aderenti alla realtà.

Un parametro che viene utilizzato per definire l'applicabilità dell'espansione di Stokes è il numero adimensionale di *Ursell* [46] [48]:

$$U_{rs} = \frac{HL^2}{h^3} = \frac{\text{"Non-linearità" (misura di altezza)}}{\text{"superficialità" (misura di profondità/lunghezza)}} \quad (3.76)$$

Per onde lunghe ( $L \gg h$ ) con numero di Ursell piccolo ( $U_{rs} \ll 100$ ) è possibile applicare la teoria di Stokes del secondo ordine. Invece, Nel caso di  $U_{rs} > 40$ , è necessario fare ricorso alla teoria Cnoidale.

Infine, esiste un limite sulla ripidità dell'onda: per  $\frac{H}{L} > 0,1412$  la superficie libera non risulta più periodica, pertanto le soluzioni di Stokes non risultano valide.

A titolo esemplificativo, si riporta la trattazione di Stokes relativa alle onde del second'ordine. Nella teoria di Stokes, tutte le caratteristiche delle onde, inclusi lo spostamento della superficie dell'acqua, il potenziale di velocità e la celerità della cresta, sono espresse in funzione dell'altitudine e della lunghezza d'onda:

$$\varphi = \varphi(x, z, t) = \frac{Hg \cosh k(z+h)}{2\sigma \cosh kh} \sin(kx - \sigma t) + (3\pi CH/16)(H/L) \frac{\cosh 2k(h+z)}{(\sinh kd)^4} \sin 2(kx - \sigma t) \quad (3.77)$$

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) + (\pi H/8)(H/L) \frac{\cosh kh(2 + \cosh 2kh)}{(\sinh kh)^3} \cos 2(kx - \sigma t)$$

$$C^2 = \left(\frac{L}{T}\right)^2 = \frac{g}{k} \tanh kh$$

Le espressioni ottenute attraverso la teoria di Stokes rappresentano il potenziale di velocità e dello spostamento della superficie dell'acqua. Esse sono le stesse della teoria di Airy più un termine di secondo ordine che dipende linearmente dalla ripidità dell'onda ( $H / L$ ) e le funzioni seno o coseno sono raddoppiate in ampiezza. Il rapporto di ripidità dell'onda non è necessariamente un numero elevato, tuttavia  $\ll 1$ . Se si considerano onde di ampiezza piccola o finita, allora quando l'ampiezza aumenta, il termine del secondo ordine incrementa il suo "peso" nell'equazione. La celerità della cresta mantiene ancora la sua indipendenza dall'altezza dell'onda per l'espressione del secondo ordine. Tuttavia, Stokes ha dimostrato che in una fase di terzo ordine la celerità della cresta dipende effettivamente dal rapporto di ripidità dell'onda.

La celerità della cresta può essere espressa anche come segue, sempre partendo dalla relazione di dispersione lineare:

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh \frac{2\pi}{L} h \quad (3.78)$$

Con passaggi semplici si può anche ottenere un'espressione della lunghezza d'onda:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi}{L} h \quad (3.79)$$

La lunghezza d'onda è quindi proporzionale alla seconda potenza del periodo, indipendentemente dal fatto che la velocità dell'onda dipenda linearmente dal periodo  $T$ . Per il caso di acque profonde, come notato prima,  $\tanh(kh) \approx 1$ , quindi:

$$\begin{cases} L = L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \\ C = C_0 = \frac{gT}{2\pi} \end{cases} \quad \text{valido per la condizione di acque profonde } \frac{h}{\lambda} > \frac{1}{2} \quad (3.80)$$

Pertanto,  $C$  e  $L$  possono essere espressi, nella loro forma generale, con  $C_0$  e  $L_0$ .

Finora, le onde gravitazionali studiate erano anche onde stazionarie. Considerando le equazioni precedentemente introdotte, le onde stazionarie possono quindi essere caratterizzate come segue (l'onda stazionaria significa movimento in nessuna direzione):

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi = \varphi(x, z, t) = \frac{Hg \cosh k(z+h)}{2\sigma \cosh kh} \cos kx \sin \sigma t \\ \eta = \frac{H}{2} \cos kx \cos \sigma t \\ \sigma^2 = gk \tanh kh \end{array} \right. \quad (3.81)$$

Le tre equazioni riportate in (3.81), mostrano una possibile soluzione all'equazione di Laplace. La tipica curva di spostamento dell'acqua, che è descritta per un caso generale di onda stazionaria, è mostrata appena sotto (Figura 3.16). I nodi sono rappresentati come il punto della curva in cui l'elevazione rispetto la superficie dell'acqua è zero. I nodi sono periodici per  $n\pi$ , dove  $n$  è un numero naturale. La funzione coseno è zero ogni volta che accade che l'argomento sia  $\pi/2$ , o in generale  $\pi/2 + n\pi$ . Quindi se  $\sigma t = \pi/2 + n\pi$ , allora  $\eta$  sarà zero indipendentemente dal valore di  $x$ .

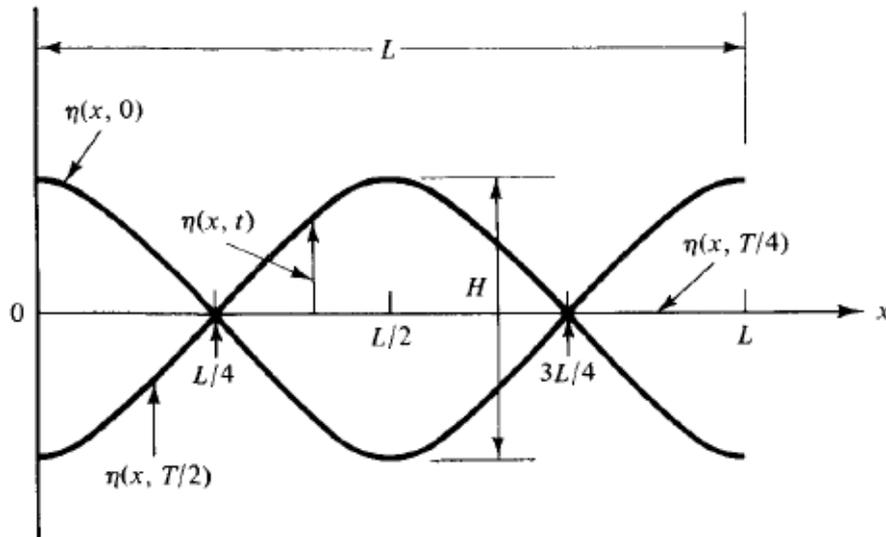


Figura 3.16 – Lo spostamento dell'acqua nel caso di un'onda stazionaria

Si prende ora in considerazione la costante  $B$ , il termine che coinvolge questo parametro non è stato infatti finora considerato. Per fare ciò, è possibile iniziare a guardare un'altra onda stazionaria, leggermente diversa dalla precedente. Nonostante ciò, il potenziale di velocità che risulta è ancora una soluzione dell'equazione di Laplace:

$$\varphi = \varphi(x, z, t) = \frac{Hg \cosh k(z + h)}{2\sigma \cosh kh} \sin kx \cos \sigma t \quad (3.82)$$

L'espressione del potenziale di velocità ottenuta differisce da quella precedente poiché gli angoli coinvolti nelle funzioni seno e coseno sono commutati: in precedenza il seno era una funzione del tempo  $t$ , ora è funzione di  $x$ . Allo stesso modo per il coseno che era funzione di  $x$  ed ora è funzione di  $t$ . A sua volta questa soluzione differisce dalla precedente perché la funzione seno e coseno di  $x$  e  $t$ , rispettivamente, sono fuori fase di  $90^\circ$ :

$$\sin kx = \cos(90 - kx) \quad \cos \sigma t = \sin(90 - \sigma t) \quad (3.83)$$

Allo stesso modo si ottiene lo spostamento della superficie dell'acqua per questo potenziale di velocità ed è espresso come segue:

$$\eta = -\frac{H}{2} \sin kx \sin \sigma t \quad (3.84)$$

Come accennato in precedenza, è possibile applicare la proprietà di sovrapposizione, scrivendo la soluzione di equazione di Laplace come una combinazione lineare di altre due delle sue soluzioni, avendo quindi una terza soluzione. È possibile sommare o sottrarre una soluzione dall'altra:

$$\varphi = \varphi(x, z, t) = \frac{Hg \cosh k(z + h)}{2\sigma \cosh kh} (\cos kx \sin \sigma t - \sin kx \cos \sigma t) \quad (3.85)$$

Seguendo i criteri imposti dalla trigonometria, l'equazione sopra diventa:

$$\varphi = \varphi(x, z, t) = -\frac{Hg \cosh k(z + h)}{2\sigma \cosh kh} \sin(kx - \sigma t) \quad (3.86)$$

Questo si ottiene sottraendo la seconda soluzione alla prima. Esattamente la stessa procedura può essere applicata per l'espressione di spostamento dell'acqua, ottenendo:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos kx \cos \sigma t - \left( -\frac{H}{2} \sin kx \sin \sigma t \right) = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \quad (3.87)$$

La soluzione dell'equazione di Laplace era in funzione del potenziale di velocità, tuttavia, come accennato prima, l'equazione di Laplace può anche essere espressa in funzione del flusso:

$$\nabla^2 \psi = \Delta \psi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial^2 z} = 0 \quad (3.88)$$

La soluzione per questa forma dell'equazione di Laplace è quindi espressa in funzione del flusso

$$\psi = \psi(x, z, t) = -\frac{Hg \sinh k(z+h)}{2\sigma \cosh kh} \cos(kx - \sigma t) \quad (3.89)$$

Vengono quindi considerate onde progressive, ovvero una combinazione lineare del prodotto di due soluzioni.

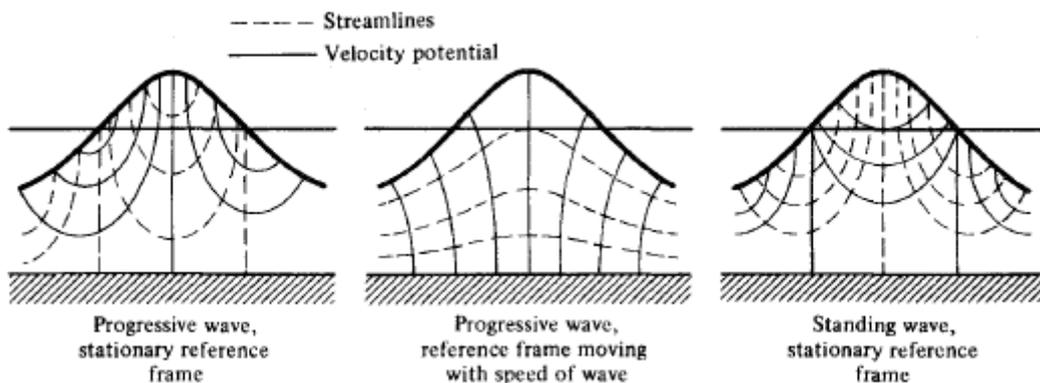


Figura 3.17 – Linee di flusso e linee equipotenziali visualizzate per diverse configurazioni di onde, considerando il movimento o il riferimento stazionario

### IL CONTRIBUTO DI FENTON

Molti studiosi, con approcci differenti, hanno esteso i risultati ottenuti da Stokes. Già nel 1914, J.R. Wilton formulò uno sviluppo al decimo ordine per onde di superficie in acque profonde. Dalla seconda metà del XX secolo, l'obiettivo divenne quello di sviluppare una teoria facilmente implementabile a computer per utilizzo ingegneristico.

Nel codice di calcolo oggetto di questa tesi viene utilizzato lo sviluppo al quinto ordine di J. D. Fenton [49]. Il potenziale di velocità e l'elevazione della superficie libera assumono la seguente espressione:

$$\eta(x, t) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^5 \varepsilon^i \sum_{j=1}^i B_{ij} \cos(j(kx - \sigma t)) \quad (3.90)$$

$$\begin{aligned} \Phi(x, z, t) &= (C - \bar{U})x \\ &+ C_0 \sqrt{\frac{g}{k^3}} \sum_{i=1}^5 \varepsilon^i \sum_{j=1}^i A_{ij} \cosh(jk(z+h)) \sin(j(kx - \sigma t)) \end{aligned} \quad (3.91)$$

Dove i termini  $A_{ij}$ ,  $B_{ij}$  e  $C_{2i}$ , determinati da Fenton in funzione  $S = \operatorname{sech}(2kh)$ , vengono riportati in Figura 3.18.

$$\begin{aligned} A_{11} &= 1/\sinh kd \\ A_{22} &= 3S^2/(2(1-S)^2) \\ A_{31} &= (-4 - 20S + 10S^2 - 13S^3)/(8 \sinh kd (1-S)^3) \\ A_{33} &= (-2S^2 + 11S^3)/(8 \sinh kd (1-S)^3) \\ A_{42} &= (12S - 14S^2 - 264S^3 - 45S^4 - 13S^5)/(24(1-S)^5) \\ A_{44} &= (10S^3 - 174S^4 + 291S^5 + 278S^6)/(48(3+2S)(1-S)^5) \\ A_{51} &= (-1184 + 32S + 13232S^2 + 21712S^3 + 20940S^4 + 12554S^5 - 500S^6 - 3341S^7 - 670S^8) \\ &\quad / (64 \sinh kd (3+2S)(4+S)(1-S)^6) \\ A_{53} &= (4S + 105S^2 + 198S^3 - 1376S^4 - 1302S^5 - 117S^6 + 58S^7)/(32 \sinh kd (3+2S)(1-S)^6) \\ A_{55} &= (-6S^3 + 272S^4 - 1552S^5 + 852S^6 + 2029S^7 + 430S^8)/(64 \sinh kd (3+2S)(4+S)(1-S)^6) \\ B_{11} &= 1 \\ B_{22} &= \coth kd (1+2S)/(2(1-S)) \\ B_{31} &= -3(1+3S+3S^2+2S^3)/(8(1-S)^3) \\ B_{33} &= -B_{31} \\ B_{42} &= \coth kd (6-26S-182S^2-204S^3-25S^4+26S^5)/(6(3+2S)(1-S)^4) \\ B_{44} &= \coth kd (24+92S+122S^2+66S^3+67S^4+34S^5)/(24(3+2S)(1-S)^4) \\ B_{51} &= -(B_{53} + B_{55}) \\ B_{53} &= 9(132+17S-2216S^2-5897S^3-6292S^4-2687S^5+194S^6+467S^7+82S^8) \\ &\quad / (128(3+2S)(4+S)(1-S)^6) \\ B_{55} &= 5(300+1579S+3176S^2+2949S^3+1188S^4+675S^5+1326S^6+827S^7+130S^8) \\ &\quad / (384(3+2S)(4+S)(1-S)^6) \\ C_0 &= (\tanh kd)^{1/2} \\ C_2 &= (\tanh kd)^{1/2} (2+7S^2)/(4(1-S)^2) \\ C_4 &= (\tanh kd)^{1/2} (4+32S-116S^2-400S^3-71S^4+146S^5)/(32(1-S)^5) \\ D_2 &= -(\coth kd)^{1/2}/2 \\ D_4 &= (\coth kd)^{1/2} (2+4S+S^2+2S^3)/(8(1-S)^3) \\ E_2 &= \tanh kd (2+2S+5S^2)/(4(1-S)^2) \\ E_4 &= \tanh kd (8+12S-152S^2-308S^3-42S^4+77S^5)/(32(1-S)^5) \end{aligned}$$

Figura 3.18 – Coefficienti di Fenton [46] [49]

Tutti i coefficienti possono essere calcolati a partire dai tre parametri fondamentali dell'onda: la lunghezza L, l'altezza H e la profondità h.

Quanto alla relazione di dispersione, che lega L con il periodo T, Fenton fornisce la seguente espressione, valida fino al quinto ordine:

$$\frac{2\pi}{T\sqrt{gk}} = C_0 + \varepsilon^2 \left( C_2 + \frac{D_2}{kh} \right) + \varepsilon^4 \left( C_4 + \frac{D_4}{kh} \right) \quad (3.92)$$

Noti h e L, è possibile determinare il periodo T corrispondente. Tuttavia, spesso risulta più conveniente avere come quantità indipendente T (ovvero la pulsazione  $\sigma$ ) al posto della lunghezza d'onda: risulta necessario risolvere l'equazione trascendentale nell'incognita k per via numerica, ad esempio con il metodo delle secanti o di bisezione.

### 3.5 COMPONENTI DELLA VELOCITÀ, SPOSTAMENTO DELLE PARTICELLE E VELOCITÀ DI GRUPPO

Le componenti della velocità delle particelle d'onda possono essere definite una volta recuperata la soluzione dell'equazione di Laplace, infatti, usando il potenziale di velocità o la funzione di flusso, è possibile definire u e w. Il potenziale di velocità e la funzione di flusso sono tali per cui:

$$\nabla\varphi \cdot \nabla\psi = 0 \quad (3.93)$$

Quindi dalle precedenti definizioni di u e w che riguardano il potenziale di velocità e le funzioni di flusso, i profili di velocità nelle direzioni x e z producono:

$$u = -\frac{\partial\psi}{\partial z} = -\frac{\partial\varphi}{\partial x} = \frac{H\sigma \cosh k(z+h)}{2 \sinh kh} \cos(kx - \sigma t) \quad (3.94)$$

$$w = \frac{\partial\psi}{\partial x} = -\frac{\partial\varphi}{\partial z} = \frac{H\sigma \sinh k(z+h)}{2 \sinh kh} \sin(kx - \sigma t)$$

Osservando le equazioni appena introdotte, possono essere visualizzati tre termini diversi, in entrambe: il primo termine è rappresentato da  $H\sigma / 2 = \pi H / T$  che è la velocità delle particelle; il secondo termine è il rapporto tra le due funzioni iperboliche, diverse per le due espressioni, ma in entrambi i casi descrive i cambiamenti di velocità delle particelle d'acqua lungo la direzione  $z$ , mostrando quindi come la velocità aumenta o diminuisce lungo la colonna d'acqua. Questo rapporto tiene conto della posizione effettiva delle particelle (l'argomento di  $\cosh$  o  $\sinh$  include  $z$ ), e del fatto che le onde possono spostarsi dalle acque profonde a quelle poco profonde. L'ultimo termine visualizzato è un coseno o una funzione seno che descrive una tendenza periodica dipendente dalla posizione e dal tempo dell'onda.

È possibile notare che le espressioni di  $u$  e  $w$  differiscono anche sulla loro fase, poiché entrambe sono sfasate di  $90^\circ$  l'una rispetto all'altra.

Vengono invece ora considerate le derivate totali delle due componenti di velocità con i termini convettivi e la variazione del tasso di tempo:

$$a_x = \frac{Du}{Dt} = u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3.95)$$

$$a_z = \frac{Dw}{Dt} = u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial t}$$

I termini convettivi, che sono le prime due derivate parziali rispetto a  $x$  e  $z$ , sono caratterizzati da una grandezza equivalente a  $(H/L)^2$  (quando si tratta di onde di ampiezza finite). Come accennato in precedenza, per le onde di ampiezza ridotta, la pendenza dell'onda è inferiore all'unità, quindi tutti i termini convettivi sono trascurabili e le derivate totali delle velocità sono esattamente uguali alle accelerazioni locali:

$$a_x = \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{H\sigma^2 \cosh k(z+h)}{2 \sinh kh} \sin(kx - \sigma t) \quad (3.96)$$

$$a_z = \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{H\sigma^2 \sinh k(z+h)}{2 \sinh kh} \cos(kx - \sigma t)$$

Le funzioni iperboliche coinvolte nella derivata totale sono ancora le stesse di quelle nelle equazioni di velocità in quanto sono indipendenti dal tempo. Per quanto riguarda le loro direzioni, è possibile recuperarle osservando come sono scritte le equazioni: i termini

periodici coseno e seno (dipendenti dalla posizione  $x$  e dalla posizione temporale) sono di nuovo commutati dalla velocità all'accelerazione, quindi la velocità e l'accelerazione, correlate agli stessi assi, sono sfasati di  $90^\circ$  tra loro. In termini di direzioni significa che  $u$  è perpendicolare ad  $a_x$  e  $w$  è perpendicolare ad  $a_z$  (Figura 3.19).

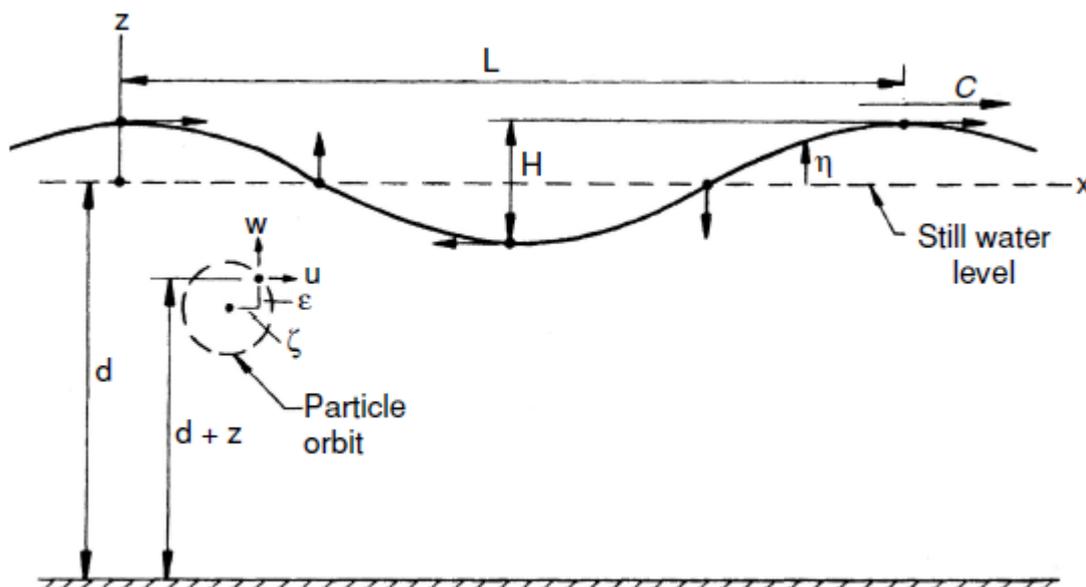


Figura 3.19 – Spostamenti di particelle d'acqua e velocità delle particelle d'onda

Per quanto riguarda Figura 3.19, la particella ha le due componenti  $u$  e  $w$ , e quindi, le direzioni  $a_x$  e  $a_z$  sono perpendicolari a quelle di  $u$  e  $w$  indicate in figura.

L'immagine mostra anche la posizione locale della particella, durante il suo movimento circolare / ellittico: lo spostamento lungo gli assi  $x$ , o la coordinata  $x$  della particella, è dato dal parametro  $\zeta$  e quello nella direzione  $z$  è dato da  $\xi$ . Questi spostamenti orizzontali e verticali sono in relazione con la posizione della media delle particelle  $(x_1, z_1)$  (Figura 3.20).

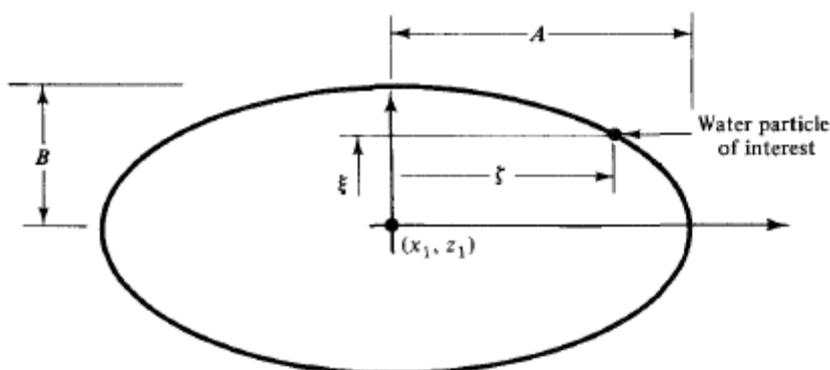


Figura 3.20 – Traiettoria ellittica descritta dalle particelle

Le particelle sono spostate dalla loro posizione media delle quantità  $\zeta$  e  $\xi$ , quindi, avendo la loro nuova posizione impostata su  $(x_1 + \zeta, z_1 + \xi)$ . Le componenti di velocità sono note in entrambe le direzioni, quindi è possibile integrare nel tempo  $dt$  e scoprire la posizione istantanea della particella dell'onda:

$$\begin{aligned}\zeta(x_1, z_1, t) &= \int u(x_1 + \zeta, z_1 + \xi) dt \cong \int u(x_1, z_1) dt \\ \xi(x_1, z_1, t) &= \int w(x_1 + \zeta, z_1 + \xi) dt \cong \int w(x_1, z_1) dt\end{aligned}\tag{3.97}$$

L'espressione di  $u$  e  $w$  può essere scritta come espansione della serie di Taylor e poiché le quantità  $\zeta$  e  $\xi$  sono piccole, i termini coinvolti sono trascurabili, potendo quindi affermare che  $(x_1 + \zeta, z_1 + \xi) \approx (x_1, z_1)$ . La diretta conseguenza di ciò sono le approssimazioni eseguite per gli integrali originali, lasciando che le componenti di velocità siano  $u(x_1 + \zeta, z_1 + \xi) \approx u(x_1, z_1)$  e similmente per  $w$ . Le integrazioni danno:

$$\begin{aligned}\zeta(x_1, z_1, t) &= -A \sin(kx_1 - \sigma t) \\ \xi(x_1, z_1, t) &= B \cos(kx_1 - \sigma t)\end{aligned}\tag{3.98}$$

Dove  $A$  e  $B$  sono i semi assi della traiettoria ellittica descritta da ciascuna particella d'acqua

$$\begin{aligned}A &= \frac{H \cosh k(h + z_1)}{2 \sinh kh} \\ B &= \frac{H \sinh k(h + z_1)}{2 \sinh kh}\end{aligned}\tag{3.99}$$

L'equazione dell'ellissi invece può essere scritta come segue:

$$\left(\frac{\zeta}{A}\right)^2 + \left(\frac{\xi}{B}\right)^2 = 1\tag{3.100}$$

Le espressioni per i due semiassi cambiano considerando l'acqua bassa piuttosto che quella profonda (Figura 3.21), per acque poco profonde, tenendo presente che  $0 < kh < \pi / 10$ , sono:

$$A = \frac{H \cosh k(h + z_1)}{2 \sinh kh} = \frac{H}{2kh} = \frac{HT}{4\pi} \sqrt{\frac{g}{h}} \quad (3.101)$$

$$B = \frac{H \sinh k(h + z_1)}{2 \sinh kh} = \frac{H}{2} \left(1 + \frac{z_1}{h}\right)$$

Queste espressioni vengono raggiunte considerando alcune ipotesi basate sulle condizioni di acque poco profonde: l'argomento del coseno iperbolico è abbastanza piccolo da poter assumere l'intero termine vicino a uno; allo stesso modo il seno iperbolico, è approssimativamente uguale al proprio argomento.

Diverse sono invece le espressioni dei semi-assi realizzati per il caso di acque profonde ( $kh > \pi$ ), dove le traiettorie delle particelle d'acqua descrivono i cerchi:

$$A = \frac{H e^{kh} e^{kz_1}}{2 e^{kh}} = \frac{H}{2} e^{kz_1} = B \quad (3.102)$$

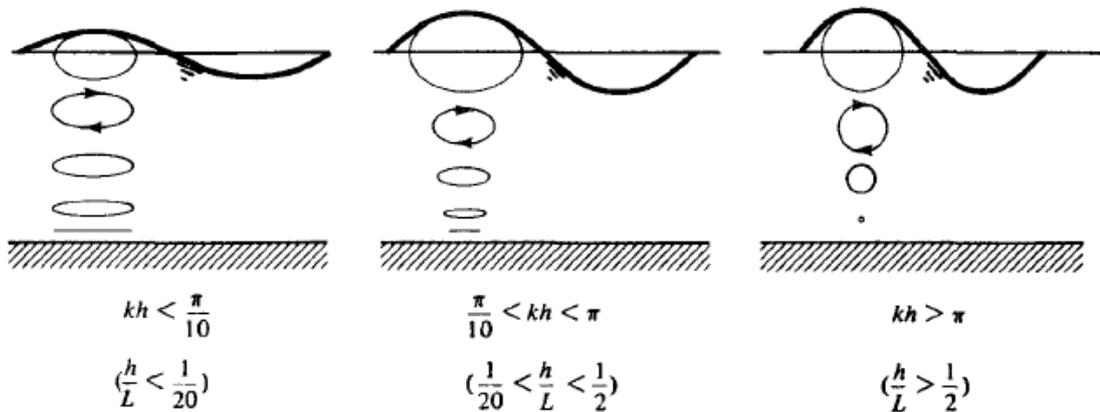


Figura 3.21 – Traiettorie di particelle d'acqua per acque poco profonde, condizioni intermedie e acque profonde

Per comprendere meglio le direzioni locali di entrambe le velocità e delle accelerazioni delle particelle d'onda, è possibile dare un'occhiata alla figura seguente (Figura 3.22), che mostra, nel corso di un periodo  $T$ , il moto delle particelle d'acqua. Le traiettorie delle particelle sono cerchi, tuttavia ciò che segue è valido come nel caso delle traiettorie ellittiche.

Alle creste, le particelle hanno la stessa direzione di movimento della propagazione dell'onda, mentre nella depressione si muovono nella direzione opposta. Da notarsi anche che alle creste e alle depressioni viene trasmesso moto dall'unica componente orizzontale della velocità. Al contrario,  $u = 0$  e  $w \neq 0$  per  $\pi / 2$  e  $3\pi / 2$  [42] [50].

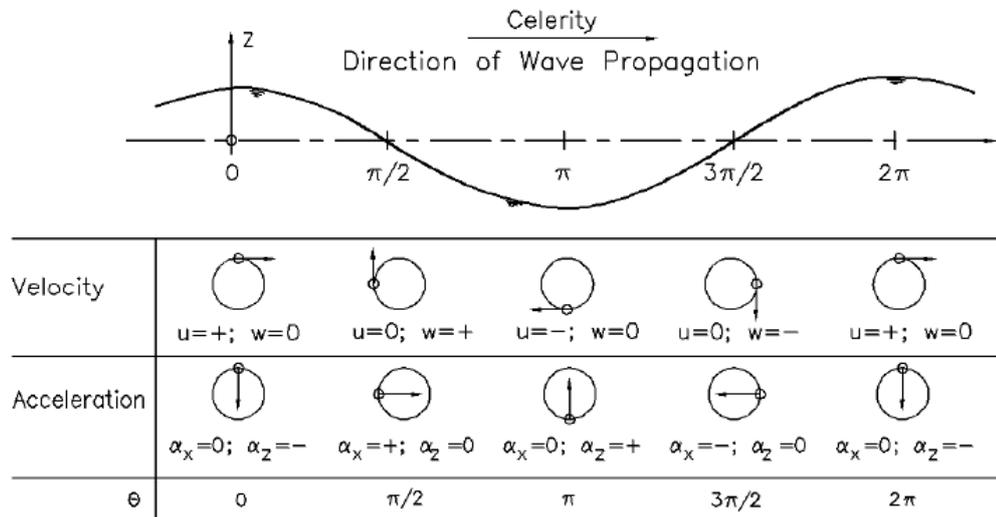


Figura 3.22 – Velocità e accelerazioni locali

Una tra le caratteristiche del moto ondoso non ancora discussa in modo appropriato, è la velocità di gruppo  $C_g$ . La velocità di gruppo è generalmente un parametro, che è associato all'energia dell'onda. In effetti è importante sapere a quale velocità si muove un prestabilito quantitativo di energia dell'onda. In generale, si fa sempre riferimento ad un gruppo o un treno di onde e mai con un solo profilo d'onda. La velocità dei treni di onde o dei gruppi di onde determina la velocità con cui l'energia ondulatoria si propaga nel tempo e nello spazio. Raramente accade che la velocità di gruppo  $C_g$  e la velocità di fase  $C$ , che è la velocità di un'onda individuale all'interno della struttura del treno d'onde, siano uguali. Una velocità di gruppo inferiore alla velocità di fase, ad esempio, caratterizza le onde gravitazionali che viaggiano in acque profonde. Al contrario, le onde capillari potrebbero avere una celerità di gruppo più veloce rispetto a quella delle onde. In questo modo è possibile impostare una relazione tra il gruppo e la velocità dell'onda:

$$C_g = nC \quad (3.103)$$

Lo scopo è di trovare il valore di  $n$ , tuttavia tale valore può essere fisicamente utilizzato per rappresentare la porzione di energia d'onda, che a sua volta è trasportata da ogni onda mentre l'onda si sposta su una lunghezza d'onda ogni periodo  $T$ . Per scoprire quale sia il valore di  $n$  e, a sua volta, definire in modo più specifico  $C_g$ , è utile considerare l'interazione tra due treni

di onde, caratterizzati da periodi e lunghezze d'onda leggermente diversi e che si propagano nella stessa direzione. Lo spostamento della superficie dell'acqua sarà quindi espresso come la somma degli spostamenti della superficie dell'acqua singola associati ai due treni d'onda considerati (sovrapposizione):

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{L_1} - \frac{2\pi t}{T_1}\right) + \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{L_2} - \frac{2\pi t}{T_2}\right) \quad (3.104)$$

L'ampiezza di entrambe le componenti viene scelta per essere la stessa. I due treni di onde saranno in fase ad un certo punto e sfasati rispetto ad altri. Alla fine l'equazione delle curve di inviluppo (Figura 3.23), che descrive il moto delle onde, è:

$$\eta_{envelope} = \pm H \cos\left[\pi\left(\frac{L_2 - L_1}{L_2 L_1}\right)x - \pi\left(\frac{T_2 - T_1}{T_2 T_1}\right)t\right] \quad (3.105)$$

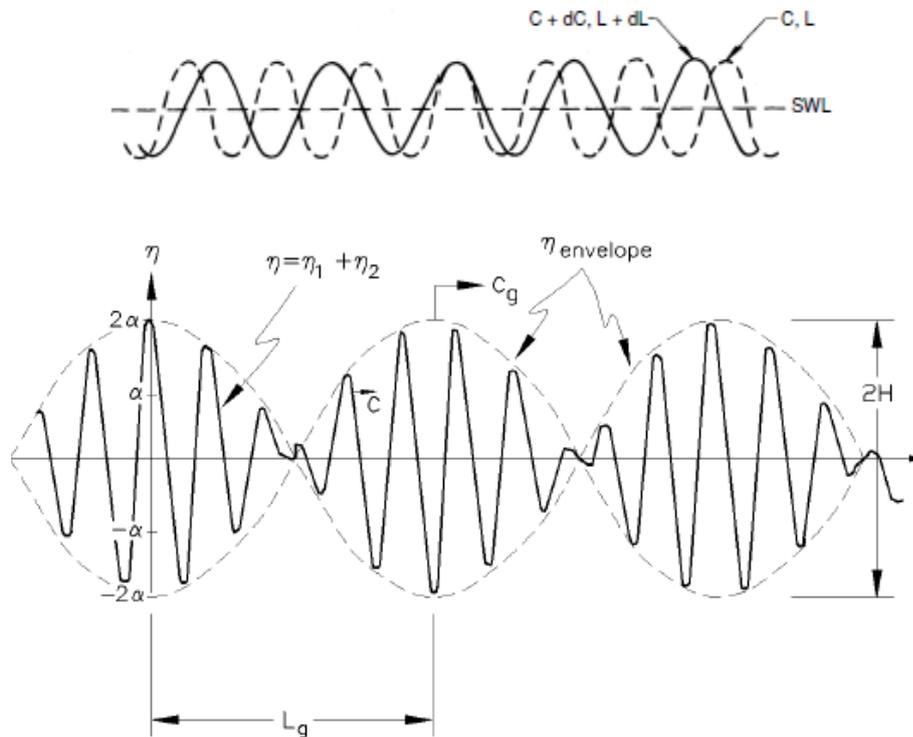


Figura 3.23 – Sovrapposizione di due treni d'onda

Si definisce quindi la differenza  $dL$  tra due treni ottenuta in un lasso di tempo  $dt$ . L'intervallo di tempo è quindi definito come  $dt = dL / dC$  (dove  $dL$  e  $dC$  sono molto più piccoli di  $L$  e  $C$ ). La velocità di gruppo è quindi il rapporto tra  $dx$  e  $dt$ , dove  $dx$  è la quantità di spazio percorsa dal gruppo entro il tempo  $dt$  meno un'intera lunghezza d'onda calata indietro dall'onda di picco precedente. Così produce:

$$x = \left( \frac{(C + dC) + C}{2} \right) dt - \frac{(L + dL) + L}{2} \approx Cdt - L \quad (3.106)$$

$$C_g = \frac{dx}{dt} = \frac{Cdt - L}{dt} = C - \frac{L}{dt} = C - L \frac{dC}{dL}$$

Inserendola nella relazione di dispersione lineare:

$$C_g = \frac{C}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \quad (3.107)$$

$$n = \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right)$$

### 3.5.1 ENERGIA E POTENZA DELL'ONDA

Durante la propria propagazione, le onde gravitazionali trasportano energia, e la totalità di questa energia meccanica può essere vista come una somma di energia cinetica e potenziale. Le due componenti sono dovute rispettivamente al movimento delle particelle d'acqua e allo spostamento superficiale senza acqua.

#### ENERGIA POTENZIALE

Si fa riferimento all'immagine nel seguito per definire la componente di energia potenziale:

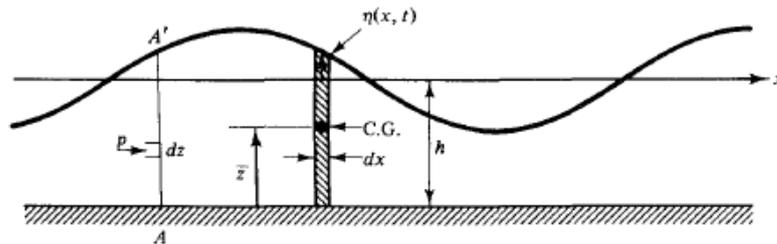


Figura 3.24 – Colonna d'acqua associata ad uno spostamento d'acqua

Figura 3.24 si riferisce ad una colonna d'acqua la cui energia potenziale considerata è quella associata alla quantità di massa d'acqua presente all'interno della colonna. L'equazione di questa energia potenziale può essere riportata come segue:

$$dE_p = gzdm \quad (3.108)$$

L'energia potenziale della colonna d'acqua è correlata al suo centro di gravità situato in posizione  $z$  rispetto alla superficie inferiore. Inoltre  $z$  è una funzione di spostamento della superficie dell'acqua, quindi varia in base alla posizione locale della colonna d'acqua. La massa d'acqua all'interno della colonna  $dm$  è espressa per unità di larghezza del fronte d'onda. Quindi la posizione del centro di gravità e la massa possono essere espresse come segue:

$$z = \frac{h + \eta(x, t)}{2} \quad (3.109)$$

$$dm = \rho(h + \eta(x, t))dx$$

Il passo successivo è quindi calcolare la quantità di energia potenziale associata a un'onda progressiva entro una lunghezza d'onda  $L$ . Per fare ciò, l'energia potenziale relativa a una colonna d'acqua di dimensione  $dx$  è integrata tra  $x$  e  $x + L$ :

$$\begin{aligned} E_{p, total} &= \frac{1}{L} \int_x^{x+L} dE_p = \frac{1}{L} \int_x^{x+L} \rho g \left( \frac{h + \eta(x, t)}{2} \right)^2 dx \\ &= \frac{\rho g}{L} \int_x^{x+L} \left( \frac{h^2 + 2h\eta + \eta^2}{2} \right) dx \end{aligned} \quad (3.110)$$

All'interno dell'integrale, solamente lo spostamento dell'acqua è funzione di  $x$ , di conseguenza:

$$\begin{cases} E_{p, total} = \frac{\rho g}{L} \left[ \frac{h^2 L}{2} + h \int_x^{x+L} \eta dx + \frac{1}{2} \int_x^{x+L} \eta^2 dx \right] \\ \eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \end{cases} \quad (3.111)$$

Una soluzione che viene presentata per tale equazione viene espressa per unità di superficie:

$$E_{p,total} = \frac{\rho g h^2}{2} + \frac{\rho g H^2}{16} \quad (3.112)$$

Una considerazione finale porta ad esprimere l'energia potenziale, relativa ad un'onda progressiva di altezza  $H$  e lunghezza d'onda  $L$ , come la differenza di energia tra una configurazione del mare in quiete ed una con l'onda presente:

$$E_{p,waves} = E_{p,total} - E_{p,no\ waves} \quad (3.113)$$

La quantità di energia potenziale dovuta a una massa d'acqua per unità di superficie, entro una lunghezza d'onda  $L$  è  $E_{p,no\ waves} = \rho g H^2 / 2$ . Conseguentemente l'energia potenziale delle onde per unità di superficie è la seguente:

$$E_{p,waves} = \frac{\rho g H^2}{16} \quad (3.114)$$

L'espressione finale dell'energia potenziale per unità di area mostra come essa dipenda solo dalla densità del fluido e dall'altezza dell'onda piuttosto che da qualsiasi altro parametro dell'onda.

#### **ENERGIA CINETICA E DEFINIZIONE FINALE DI ENERGIA**

Viene ora esaminata la componente di energia cinetica. Considerando di nuovo la stessa massa fluida per unità di larghezza  $dm = \rho dx dz$ , l'energia cinetica ad essa associata può essere espressa:

$$dE_k = \rho dx dz \frac{|v|^2}{2} = \rho dx dz \frac{u^2 + w^2}{2} \quad (3.115)$$

Come per l'energia potenziale, è necessario integrare l'energia cinetica per trovare il suo valore medio per unità di superficie entro una lunghezza d'onda:

$$E_k = \frac{1}{L} \int_x^{x+L} \int_{-h}^{\eta} \rho \left( \frac{u^2 + w^2}{2} \right) dx dz \quad (3.116)$$

In questo caso entrambe le espressioni di  $u$  e  $w$ , precedentemente raggiunte, possono essere recuperate e adattate per l'equazione appena introdotta, portando così ad una nuova espressione più complessa:

$$E_k = \frac{\rho}{2L} \left[ \frac{kHg}{2\sigma \cosh kh} \right]^2 \int_x^{x+L} \int_{-h}^{\eta \approx 0} \{ (\cosh k(h+z))^2 (\cos(kx - \sigma t))^2 + (\sinh k(h+z))^2 (\sin(kx - \sigma t))^2 \} dx dz \quad (3.117)$$

Applicando però alcune semplici relazioni trigonometriche si può ottenere:

$$E_k = \frac{\rho}{2L} \left[ \frac{kHg}{2\sigma \cosh kh} \right]^2 \int_x^{x+L} \int_{-h}^{\eta \approx 0} \frac{\{ \cosh 2k(h+z) + \cos 2(kx - \sigma t) \}}{2} dx dz \quad (3.118)$$

Che semplificando ulteriormente si trasforma in una dipendenza quadratica dell'altezza dell'onda:

$$E_k = \frac{\rho g H^2}{16} \quad (3.119)$$

È ora possibile ricavare una somma complessiva dell'energia potenziale e dell'energia cinetica al fine di delineare l'espressione di energia totale per un'onda progressiva di altezza  $H$  e lunghezza d'onda  $L$ :

$$E_A = E_{p,waves} + E_k = \frac{\rho g H^2}{8} \quad \text{per unità di superficie} \left[ \frac{J}{m^2} \right] \quad (3.120)$$

$$E_w = (E_{p,waves} + E_k)L = \frac{\rho g H^2 L}{8} \quad \text{per unità di lunghezza} \left[ \frac{J}{m} \right]$$

### POTENZA DELL'ONDA

Il flusso di energia, o potenza d'onda, è la quantità di energia trasmessa per unità di tempo lungo la direzione di propagazione delle onde. Per quanto riguarda le onde marine, la potenza d'onda può essere espressa come la moltiplicazione di una pressione per una velocità: si devono quindi considerare la pressione dinamica e la componente di velocità parallele alla direzione di propagazione. In questo modo si ottiene il seguente integrale doppio (la potenza media delle onde viene integrata in un periodo pari a  $T (= L / C)$ ):

$$P = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^{\eta \approx 0} (p(x, t) + \rho g z) u(x, t) dz dt \quad (3.121)$$

L'elemento tra parentesi rappresenta la pressione dinamica. L'ulteriore passo è quindi quello di introdurre nell'equazione l'espressione della componente  $u$  della velocità e quella della pressione. Questo porta a:

$$P = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^{\eta \approx 0} \left( \frac{\rho g \eta \cosh k(h+z)}{\cosh kh} \right) \left( \frac{g H k \cosh k(h+z)}{2\sigma \cosh kh} \cos(kx - \sigma t) \right) dz dt \quad (3.122)$$

Risolvendo l'integrale doppio, l'espressione si modifica, riuscendo a esplicitare l'energia totale per unità di superficie  $E_A$  e la velocità di gruppo  $C_g$ :

$$P_A = \left[ \frac{\rho g H^2}{8} \right] \left[ \frac{C}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \right] = E_A C_g \quad \text{potenza dell'onda per unità di area} \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (3.123)$$

L'espressione del flusso di energia può anche essere espressa come una frazione dell' $E_A$  trasportata entro un periodo  $T$  di tempo:

$$P_A = \frac{n E_A}{T} = \frac{E_A}{2T} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \quad \text{dove } n = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \quad (3.124)$$

La quantità  $n$  di  $E_A$  è stata precedentemente introdotta descrivendo la velocità di gruppo:  $n$  rappresenta la quantità di energia che viene trasportata dall'onda ogni periodo  $T$ , in altre parole la quantità di energia che non viene dissipata. Inoltre, se è possibile trascurare l'energia riflessa o dissipata, la quantità di cui sopra è una costante per uno specifico treno di onde:

$$P_A = \left( \frac{nE_A}{T} \right)_k = \left( \frac{nE_A}{T} \right)_{k+1} = \text{const} \quad (3.125)$$

Questa ipotesi è però valida per brevi distanze.

Per completare il capitolo, Tabella 3.3 riassume tutte le principali caratteristiche delle onde introdotte, considerando le condizioni di acque basse, di transizione e di acque profonde.

Profondità	Acque basse	Acque di transizione	Acque profonde
Profilo dell'onda	Come transizione	$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t)$	Come transizione
Celerità dell'onda	$C = \frac{L}{T} = \sqrt{gh}$	$C = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi} \tanh kh$	$C = \frac{L}{T} = C_0 = \frac{gT}{2\pi}$
Lunghezza dell'onda	$L = T\sqrt{gh} = CT$	$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh kh$	$L = L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} = C_0T$
Velocità di gruppo	$C_g = C = \sqrt{gh}$	$C_g = \frac{C}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right)$	$C_g = \frac{C}{2} = \frac{gT}{4\pi}$
Velocità di particella:			
-orizzontale	$u = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{h}} \cos \theta$	$u = \frac{H\sigma \cosh k(z+h)}{2 \sinh kh} \cos \theta$	$u = \frac{\pi H}{T} e^{kz} \cos \theta$
-verticale	$w = \frac{H\pi}{T} \left( 1 + \frac{z}{h} \right) \sin \theta$	$w = \frac{H\sigma \sinh k(z+h)}{2 \sinh kh} \sin \theta$	$w = \frac{\pi H}{T} e^{kz} \sin \theta$
Accelerazione di particella:			
-orizzontale	$a_x = \frac{H\pi}{T} \sqrt{\frac{g}{h}} \sin \theta$	$a_x = \frac{H\sigma^2 \cosh k(z+h)}{2 \sinh kh} \sin \theta$	$a_x = 2H \left( \frac{\pi}{T} \right)^2 e^{kz} \sin \theta$
-verticale	$a_z = -2H \left( \frac{\pi}{T} \right)^2 \left( 1 + \frac{z}{h} \right) \cos \theta$	$a_z = -\frac{H\sigma^2 \sinh k(z+h)}{2 \sinh kh} \cos \theta$	$a_z = -2H \left( \frac{\pi}{T} \right)^2 e^{kz} \cos \theta$

Spostamento di particella:			
-orizzontale	$\zeta = -\frac{HT}{4\pi} \sqrt{\frac{g}{h}} \sin \theta$	$\zeta = -\frac{H \cosh k(h+z)}{2 \sinh kh} \sin \theta$	$\zeta = -\frac{H}{2} e^{kz} \sin \theta$
-verticale	$\xi = \frac{H}{2} \left(1 + \frac{z}{h}\right) \cos \theta$	$\xi = \frac{H \sinh k(h+z)}{2 \sinh kh} \cos \theta$	$\xi = \frac{H}{2} e^{kz} \cos \theta$
Pressione sotto superficiale	$p = \rho g(\eta - z)$	$p = \rho g \eta \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} - \rho g z$	$p = \rho g \eta e^{kz} - \rho g z$
Flusso di energia	$P_A = \left[ \frac{\rho g H^2}{8} \right] C$	$P_A = \left[ \frac{\rho g H^2}{8} \right] \left[ \frac{C}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \right]$	$P_A = \left[ \frac{\rho g H^2}{8} \right] \frac{gT}{2\pi}$

Tabella 3.3 – Riassunto grandezze introdotte

### 3.6 ONDE IRREGOLARI E STATI DI MARE

Le onde sulla superficie marina non sono semplici sinusoidi ma appaiono costituite da più componenti che presentano varie lunghezze e periodi. Per descrivere le condizioni del pelo libero dell'acqua sono opportune alcune semplificazioni che riportano al concetto di spettro delle onde marine. Lo spettro fornisce la distribuzione dell'energia delle onde tra le differenti frequenze delle lunghezze delle onde sulla superficie marina.

Il concetto di spettro è basato sul lavoro di Joseph Fourier (1768 - 1830), il quale mostrò che ogni funzione può essere rappresentata come la somma di una serie infinita di funzioni sinusoidali con frequenze d'onda armoniche.

La problematica riguardante la descrizione di fenomeni ondosi è stata affrontata in differenti campagne sperimentali, effettuate prescindendo dalla locazione geografica dei test.

L'analisi delle onde oceaniche ha visto spiccare principalmente il modello di Pierson-Moskowitz [51] per semplicità e versatilità e il modello JONSWAP per la maggiore aderenza alle condizioni reali dovuta alla considerazione del *fetch*.

Nel caso di onde mediterranee invece si farà riferimento in questa trattazione allo studio costiero effettuato mediante rilevamenti RON al largo delle coste di differenti città italiane.

Una delle attività svolte durante il dottorato è stata quella di tentare di riprodurre stati di mare utilizzando il generatore di onda artificiale (descritto nel Capitolo 5) assimilabili ai profili d'onda irregolare, in particolare oceanica e mediterranea.

Per fare ciò si è fatto riferimento al rapporto tra altezza e lunghezza dell'onda (in particolare, per gli stati di mare oceanico e mediterraneo ci si è riferiti all'altezza significativa ed al periodo di picco).

Tale rapporto è legato alla tipologia ed alla forma dell'onda, chiamata "wave steepness" [9] e da ora in avanti si farà riferimento ad essa tenendo conto della definizione

$$Ws = \frac{H}{gT^2} \quad (3.126)$$

Si può notare una forte analogia tra questo valore ed il numero di Froude per stati ondosi, ampiamente utilizzato in campo navale. La differenza tra questi due numeri adimensionali è che nel numero di Froude a numeratore si trova la lunghezza d'onda anziché l'altezza.

Sulla base di questa analogia è lecito considerare il valore  $Ws$  come portante in una operazione di similitudine in scala, per la quale, analogamente a quanto viene fatto con la similitudine di Froude, si introduce un fattore di scala  $\lambda$ , grazie al quale è possibile scalare e valutare le grandezze reali secondo la seguente tabella [52]:

<b>Grandezza</b>	<b>Fattore di riduzione</b>
Altezza e lunghezza	$\lambda$
Periodo	$\lambda^{\frac{1}{2}}$
Frequenza	$\lambda^{-\frac{1}{2}}$
Massa	$\lambda^3$
Energia	$\lambda^4$
Potenza	$\lambda^{\frac{7}{2}}$

*Tabella 3.4 – Fattori di scala e similitudine di Froude -  $Ws$*

Al fine di riprodurre artificialmente stati di mare significativi e riconducibili a condizioni reali si farà riferimento alla scala di Douglas per stati di mare, riportata nella seguente tabella:

Seastate	Altezza significativa [m]
0	0
1	0 – 0.1
2	0.1 – 0.5
3	0.5 – 1.25
4	1.25 – 2.5
5	2.5 – 4
6	4 - 6
7	6 – 9
8	9 – 14
9	> 14

Tabella 3.5 – Stati di mare secondo la scala di Douglas

### 3.6.1 MODELLO PIERSON-MOSKOWITZ

Presupponendo che il vento abbia soffiato costantemente per un tempo sufficiente su una vasta area, le onde risultano essere in equilibrio con il vento rendendo possibile definire il concetto di *mare completamente sviluppato* (*fully developed sea*). Per “tempo sufficiente” si intende circa dieci-mila periodi di onda, e per vasta area cinque-mila lunghezze d'onda di lato.

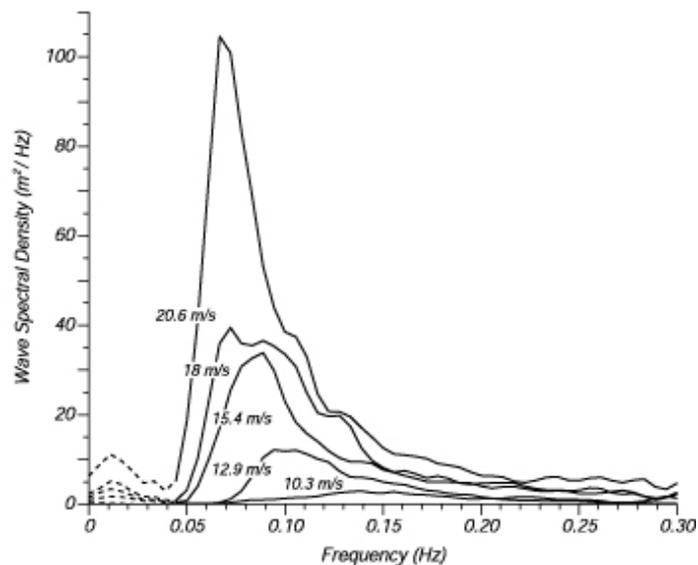


Figura 3.25 – Spettro di onde di mare completamente sviluppato per differenti velocità di vento

In Figura 3.25 si osserva lo spettro di onde oceaniche nello stato di mare completamente sviluppato con relativa densità spettrale in funzione della frequenza. Si nota l'importante contributo che la velocità del vento fornisce all'aumento dello spettro d'energia.

Per ottenere lo spettro di un mare completamente sviluppato, vennero effettuate misure di onde tramite accelerometri montati sulle navi meteorologiche britanniche nel Nord Atlantico. Dal calcolo dello spettro delle onde per le varie velocità del vento fu trovata la forma analitica in grado di descriverlo.

$$S(f) = \frac{0.0081g^2}{(2\pi)^4} \frac{1}{f^5} e^{-1.25\left(\frac{f_p}{f}\right)^4} \quad (3.127)$$

Dove:

- $f$  è la frequenza
- $f_p$  è la frequenza di picco
- $g$  è l'accelerazione gravitazionale

Integrando l'equazione (3.127) per la frequenza  $f$  si ottiene l'altezza significativa dell'onda, corrispondente all'altezza media del terzo di onde più alto tra quelle rilevate:

$$H_s = 0.21 \frac{U^2}{g} \quad (3.128)$$

Derivando sempre l'equazione (3.127) rispetto alla frequenza  $f$  si ottiene la frequenza di picco

$$f_p = \frac{0.14g}{U} \quad (3.129)$$

Dove:

- $U$  è la velocità del vento alla quota di 19,5 m sul livello del mare

Tramite le relazioni trovate è possibile verificare la dipendenza dell'altezza significativa e del periodo dalla velocità del vento per un'onda calcolata secondo il modello di Pierson-Moskowitz, aspetto visibile in Figura 3.26.

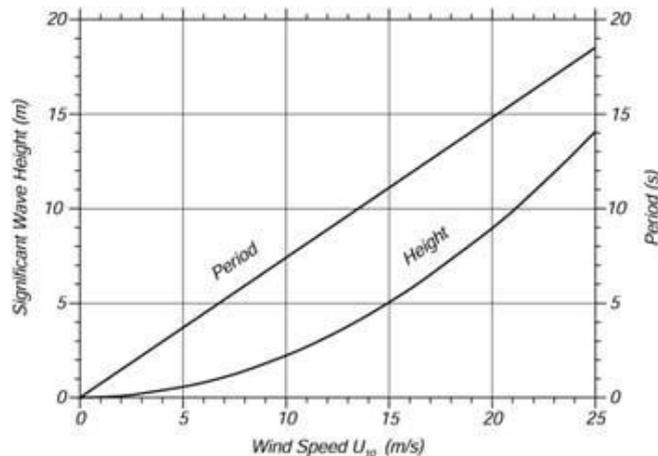


Figura 3.26 – Altezza significativa e periodo di picco in funzione della velocità del vento (mare completamente sviluppato)

La dipendenza di altezza significativa e periodo dalla velocità del vento permette di ricavare una proporzionalità tra le due grandezze identificative di un'onda, Figura 3.27.

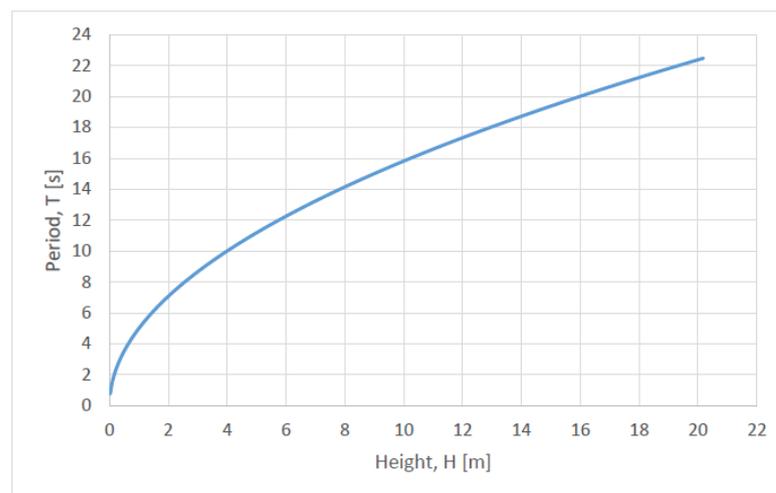


Figura 3.27 – Periodo di un'onda in funzione dell'altezza significativa

Il rapporto univoco tra altezza significativa e periodo indica per il modello Pierson Moskowitz che il numero adimensionale  $W_s$  risulti costante ed indipendente dall'altezza significativa, e pari a 0,00407.

Tale risultato è conseguenza dalla dipendenza quadratica dell'altezza significativa con la velocità del vento e la dipendenza lineare della frequenza di picco con lo stesso. Isolando il parametro velocità del vento, di fatto, si è ottenuta una relazione quadratica tra altezza dell'onda e periodo, analogamente al valore di  $W_s$ , che risulta costante.

Si può dunque associare ad ogni valore di altezza significativa un periodo corrispondente, così come mostrato nella successiva tabella, dove è stato individuato un valore significativo di altezza corrispondente ad ogni *seastate*:

	H	Ws	Periodo
Seastate	[m]	[-]	[s]
2	0,3	0,00407	2,74
3	1	0,00407	5,00
4	2	0,00407	7,08
5	3,5	0,00407	9,36
6	5	0,00407	11,19
7	8	0,00407	14,16
8	12	0,00407	17,34
9	18	0,00407	21,23

Tabella 3.6 – Stati di mare e grandezze significative secondo il modello Pierson Moskowitz

### 3.6.2 MODELLO JONSWAP

Hasselmann [53], analizzando i dati raccolti durante il progetto Joint North Sea Wave Observation Project (JONSWAP), giunse alla conclusione che lo spettro delle onde non è mai completamente sviluppato: il mare continua a svilupparsi attraverso interazioni non-lineari onda-onda, anche dopo molto tempo e lunghe distanze. Lo spettro risultante da questa analisi si presenta nella forma di Figura 3.28.

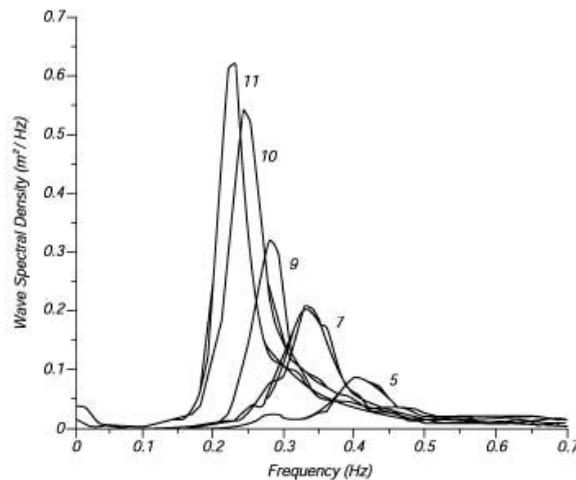


Figura 3.28 – Spettro di onde del mare per differenti fetch secondo Hasselmann

L'espressione analitica che descrive lo spettro secondo Hasselmann risulta essere:

$$S(f) = 0.076 \left( \frac{U^2}{F \cdot g} \right)^{0.22} \cdot \frac{g^2}{f^5} e \left[ -1.25 \left( \frac{f_p}{f} \right)^4 \right] \cdot 3.3^r \quad (3.130)$$

$$r = e^{-\frac{(f-f_p)^2}{0.0128f_p^2}} \quad (3.131)$$

Dove:

- F è il fetch (distanza sulla quale il vento soffia con velocità costante)

Integrando S(f) si ottiene l'altezza significativa:

$$H_s = 1.67 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{U^2}{g} F \quad (3.132)$$

e la frequenza di picco:

$$f_p = 22 \left( \frac{g^2}{U \cdot F} \right)^{0.33} \quad (3.133)$$

Si può notare che le espressioni (3.132) (3.133) dipendono non solo dalla velocità del vento U ma anche dal *fetch*, a differenza del modello Pierson-Moskowitz.

Dal confronto tra i due modelli (Figura 3.29) si può notare come la densità spettrale calcolata tramite il progetto JONSWAP sia una sovrastima del modello di Pierson-Moskowitz, aspetto dovuto alla considerazione del *fetch*.

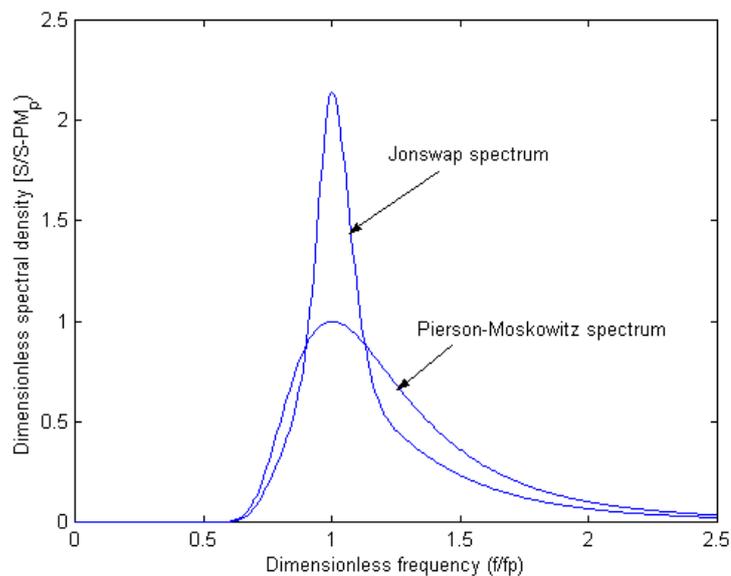


Figura 3.29 – Confronto tra spettro di Pierson-Moskowitz e di Hasselmann

### 3.6.3 ONDE MEDITERRANEO

Con l'obiettivo di ricercare una relazione tra altezza significativa e periodo d'onda applicabile al bacino del Mar Mediterraneo è stato utilizzato uno studio costiero in cui sono stati vagliati gli 89 episodi ondosi più significativi analizzati al largo delle coste di diverse città italiane, in particolare Alghero, Ancona, La Spezia, Palermo e Mazara del Vallo. I dati presi in esame sono stati raccolti in varie stazioni dalla Rete Ondametrica Nazionale (RON), in funzione dal 1989 e attualmente gestita dall'ISPRA [54]. Gli episodi vagliati presentano durata media di circa 4 ore e contenenti un numero medio di onde pari approssimativamente a 2200. Per ciascun evento sono stati calcolati altezza significativa  $H_s$ , frequenza di picco  $f_p$ , periodo di picco  $T_p$  e le grandezze da queste derivate, come visibile in un estratto del documento originale in Tabella 3.7, in cui sono presenti i dati estrapolati a La Spezia il 4/10/2003.

Stazione Evento	n° treno d'onda	n° progress. di Campionamento		Estens. Campion.	$H_s$	$f_p$	$T_p$	$\frac{H_s}{(\frac{g}{2\pi}) \cdot T^2}$
		Punto iniziale	Punto finale		[m]	[Hz]	[s]	
La Spezia 04/10/2003	1	1	5630	5630	2,35	0,1575	6,35	0,03729
	2	5629	22576	16948	3,05	0,135	7,41	0,03559
	3	22575	46374	23800	2,82	0,135	7,42	0,03298
	4	46373	61110	14738	4,22	0,11	9,09	0,03274
	5	61109	69520	8412	5,55	0,105	9,52	0,03919
	6	69519	70998	1475	2,39	0,11	9,09	0,0185

Tabella 3.7 – Estratto tabella campionamenti RON a La Spezia

in Figura 3.30 è riportato il diagramma di Le Mehauté dove sono riportati i punti relativi alla popolazione delle acquisizioni effettuate, che ricade interamente nel secondo ordine di Stokes.

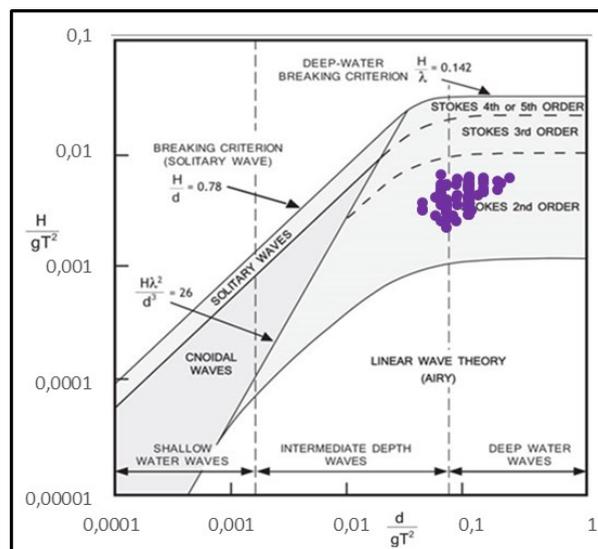


Figura 3.30 – Diagramma di Le Mehauté con onde mediterranee analizzate da RON

Come si può evincere, a seconda delle acquisizioni ad una stessa frequenza di picco sono associati più valori di altezza significativa (dipendenti dalle singole acquisizioni)

Si è proceduto a filtrare tali dati, associando ad ogni frequenza di picco un'altezza significativa media, ottenuta calcolando la media pesata degli eventi registrati durante i campionamenti.

Nel successivo grafico sono indicati con i pallini blu gli eventi registrati, mentre con le croci rosse i valori di altezza significativa ottenuti come media pesata dei valori associati ad un determinato valore di frequenza.

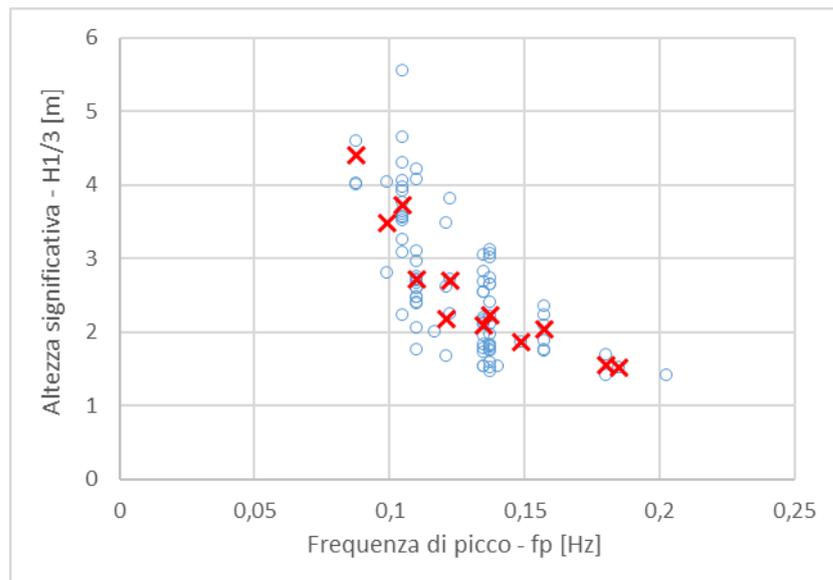


Figura 3.31 – Altezza significativa media pesata

A partire dalla relazione tra frequenza di picco ed altezza significativa media così calcolata è stato possibile ricavare l'andamento del numero  $W_s$  in funzione dell'altezza significativa.

Si è notato che per periodi dell'onda superiori a 8 s tale valore risulta approssimabile come costante (e pari a 0,003643) mentre, per periodi inferiori, si registra una dipendenza di tipo lineare tra altezza dell'onda e steepness, che risulta maggiore per periodi inferiori.

Il successivo grafico mette in evidenza tale comportamento:

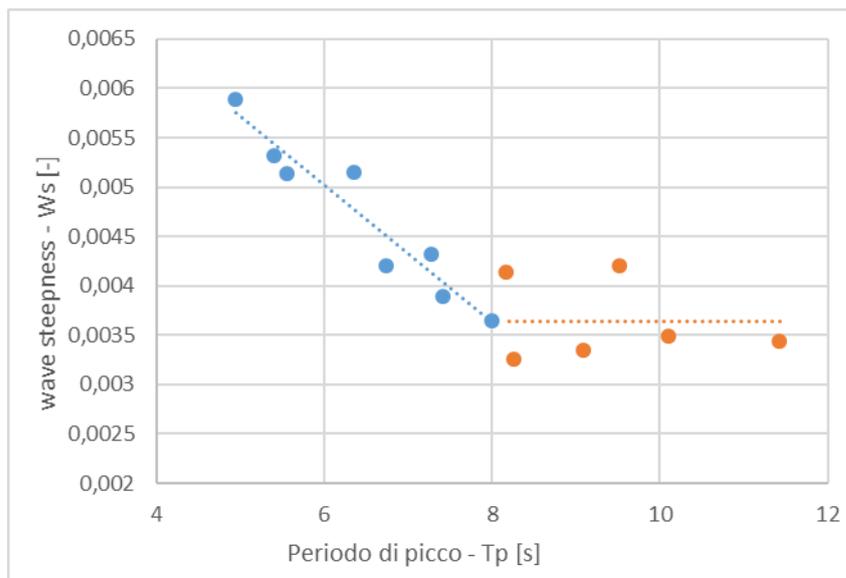


Figura 3.32 – Wave steepness in funzione del periodo di picco

La successiva tabella mostra il valore di Wave steepness associato a valori di altezza indicativi dei vari *seastate*:

Seastate	H	Ws	Periodo
	[m]	[-]	[s]
2	0,3	0,007804	1,98
3	1	0,006411	3,98
4	2	0,004514	6,72
5	3,5	0,00364	9,9
6	5	0,00364	11,83
7	8	0,00364	14,97
8	12	0,00364	18,33
9	18	0,00364	22,45

Tabella 3.8 – Stati di mare e grandezze significative mare Mediterraneo

### 3.7 TEORIA DEI WAVEMAKER

Si propone ora qualche cenno alle teorie che regolano la generazione di onde in laboratori controllati. Tale approfondimento è necessario considerando le attività che sono state alla base dei progetti presentati nel seguito, in particolare, all'interno del Capitolo 5.

La teoria della generazione di onde si basa principalmente sul principio di movimentare un volume di acqua presente in un bacino [55]. A seconda della tipologia di onda che si vuole ricreare si può ricorrere ad una specifica configurazione del sistema. Le due tecnologie di generatori di onde più diffuse sono rappresentate dai wavemaker a pala mobile e dai wavemaker a immersione (plunger wavemaker). I wavemaker a pala mobile, invece, si

possono invece suddividere a loro volta in due categorie: *piston wavemaker* e i *flap wavemaker*.

I *piston wavemaker* sono caratterizzati da una pala mobile che si muove rigidamente in direzione orizzontale. Le onde generate da questo sistema sono caratterizzate da un moto delle particelle d'acqua ellittico la cui componente orizzontale non subisce grandi variazioni scendendo in profondità. I moti orbitali avente questa traiettoria ellittica sono caratteristiche delle zone dove l'acqua è più bassa in confronto alla lunghezza dell'onda. Pertanto, questa tipologia di wavemaker è utilizzata per simulare il moto ondoso di zone costiere o portuali, con un fondale tipicamente poco profondo. Un esempio di piston wavemaker e del suo funzionamento è mostrato nella parte sinistra di Figura 3.33

I *flap wavemaker* sono generatori di onde costituiti da una pala mobile incernierata nella parte inferiore e movimentata nella parte superiore, ottenendo così un'oscillazione della pala (Figura 3.33, parte destra). Questa soluzione permette di ottenere onde dalle caratteristiche molto simili a quelle presenti in ambienti con fondali marini a elevata profondità. La traiettoria delle particelle di acqua caratterizzanti l'onda risulta circolare, ad intensità maggiore nella cresta per poi decadere scendendo in profondità.

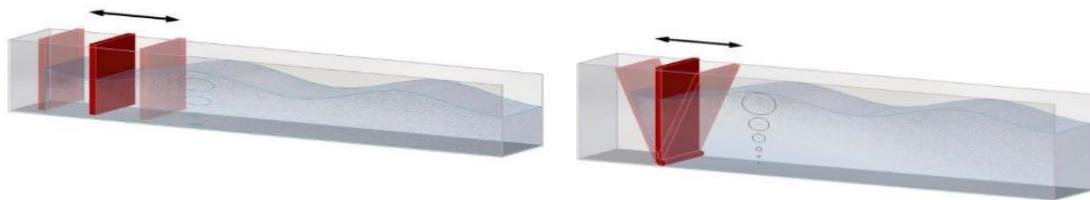


Figura 3.33 – Generatore d'onda piston type e flap type

A partire quindi dalle caratteristiche di onda che si vogliono ottenere è opportuno analizzare il contenuto energetico da trasmettere alla massa d'acqua attraverso il sistema di generazione onde.

La teoria sul tema è molto vasta e, a partire dagli anni '60, sono stati realizzati diversi manuali. Tra i testi più utilizzati per quanto riguarda la teoria dei generatori di onde si hanno quelli degli autori Madsen [56], Flick e Guza [57]. Nei loro manuali vengono descritti, ai fini pratici, i passaggi da seguire al fine di realizzare un generatore di onde: primo fra tutti il concetto base secondo il quale la quantità di acqua spazzata da un organo in movimento sarà pari al volume d'acqua compreso tra l'onda generata e l'acqua in condizioni di riposo. Considerando ad esempio un generatore di onde generico, composto da una pala rigida che movimentata una massa d'acqua di altezza  $h$  di una quantità  $S$  (Figura 3.34), si può osservare che il prodotto tra  $S$  e  $h$ , ovvero tra la corsa del pistone e la profondità dell'acqua, risulta essere uguale al volume d'acqua contenuto nella cresta dell'onda.

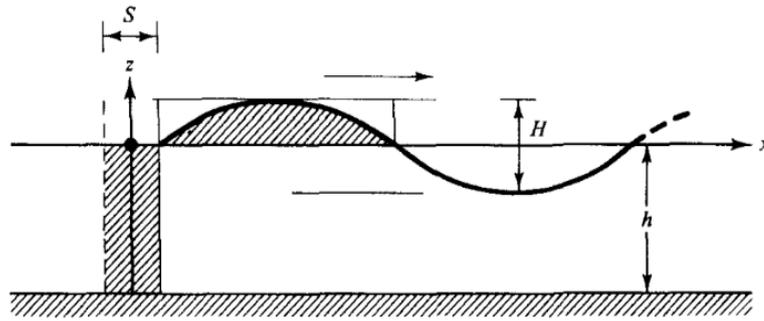


Figura 3.34 – Teoria di Galvin per un piston wavemaker

Ovviamente, per poter caratterizzare il moto ondoso in modo adeguato, è necessario passare ad un'analisi più dettagliata risolvibile attraverso il calcolo differenziale e la teoria delle onde di Stokes. Senza entrare nel dettaglio e facendo riferimento al dimensionamento che verrà discusso nel Capitolo 5 del presente elaborato, si presentano di seguito alcune delle correlazioni di maggiore interesse. Gran parte di queste sono state appositamente ottenute al fine di realizzare una progettazione più compatibile possibile con le attività che verranno descritte nel seguito. La prima relazione che viene riportata rappresenta il legame tra l'ampiezza dell'onda da generare e la corsa della pala nel caso generale:

$$\frac{a}{\xi_0} = \frac{2 \sinh(k_1 h)}{k_1 (h + l)} \frac{k_1 (h + l) \sinh k_1 h - \cosh(k_1 h) + 1}{\sinh(k_1 h) \cosh(k_1 h) + k_1 h} \quad (3.134)$$

dove:

- $a$  è la semi-altezza dell'onda
- $\xi_0$  è la semi-corsa della pala
- $k_l$  è il numero d'onda definito come  $= \frac{2\pi}{L}$
- $L$  è la lunghezza dell'onda
- $h$  è la profondità della vasca
- $h+l$  è l'altezza della pala

Da questa relazione è possibile poi estrapolare la stessa relazione adattata al caso di flap wavemaker incernierato sul fondo, nella quale, viene supposta pari a 0:

$$\frac{a}{\xi_0} = \frac{4 \sinh(k_1 h)}{\sinh(2k_1 h) + 2k_1 h} \left[ \sinh(k_1 h) \frac{1 - \cosh(k_1 h)}{k_1 h} \right] \quad (3.135)$$

A partire da questa equazione è possibile valutare le forze e le potenze in gioco per un'onda di riferimento. Da questa espressione, quindi, si arriva alla formulazione di un'espressione della potenza necessaria per generare una determinata onda:

Nota la semi-altezza (da cui l'altezza dell'onda  $H = 2*a$ ) è possibile valutare il contenuto energetico (potenza) dell'onda:

$$P_{wave} = EC_n = \left(\frac{1}{8}\rho g H^2\right) \frac{\sigma}{k_1} \left[\frac{1}{2}\left(1 + \frac{2k_1 h}{\sinh 2k_1 h}\right)\right] \quad (3.136)$$

Dove

- $\sigma = \frac{2\pi}{T}$
- $k_1 = \frac{2\pi}{L}$

L'equazione rappresenta l'energia totale per unità di superficie contenuta nell'onda e  $C_n$  la velocità alla quale viene trasmessa questa energia: di conseguenza  $P$  avrà come unità di misura W/m. Quindi, maggiore sarà il contenuto energetico di un'onda e maggiore dovrà essere la potenza che il generatore di onde dovrà trasmettere all'acqua.

Si considera che un valore di rendimento  $\eta$  del sistema pistone – pala, tale che:

$$P_{wave} = \eta P_{wave\ maker} \quad (3.137)$$

Definita la potenza necessaria che il generatore di onde deve trasmettere alla massa d'acqua è stato poi possibile definire la forza necessaria per movimentare la pala, questo è stato il dato fondamentale per effettuare il dimensionamento dell'impianto di attuazione.

La procedura utilizzata per valutare la forza esercitata dal pistone fa riferimento alla distribuzione della forza esercitata dall'acqua sulla pala a causa della sua velocità relativa, e si ottiene svolgendo un bilancio dei momenti relativo al perno inferiore.

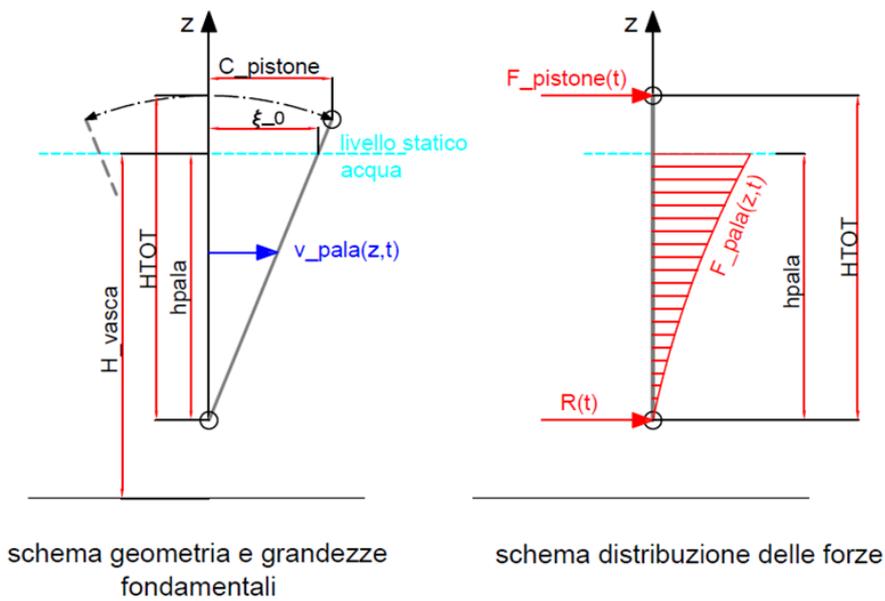


Figura 3.35 – Schema dell'ipotesi per il dimensionamento del generatore di onde

Si ottiene dunque la formulazione della forza esercitata dal pistone

$$F_{pistone} = \frac{4P_{wave\ maker}h_{pala}}{H_{TOT}\xi_0T^2[4\pi h_{pala} + Tsen\left(\frac{2\pi h_{pala}}{T}\right)]} \quad (3.138)$$

Dove  $H_{TOT}$  è la distanza tra il perno inferiore e il perno di ancoraggio del pistone e vale l'equivalenza  $h_{pala} = h + l$

Le espressioni brevemente presentate sopra sono state il punto di partenza per il corretto dimensionamento del sistema per la generazione di onde presentato di seguito. La teoria attualmente a disposizione risulta altamente dettagliata ma manca di semplicità di adeguamento a casi particolari.

# CAPITOLO 4

DISPOSITIVO WEC  
SEASPOON

## 4.1 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Il SeaSpoon, sviluppato dal Thermochemical Power Group della Scuola Politecnica (Dipartimento DIME) dell'Università di Genova, è un dispositivo per la conversione energetica del moto ondoso del tipo “point absorber”, concepito per installazioni off-shore e per operare sommerso in prossimità della superficie del mare [58] [59]. Il sistema è progettato per essere messo in rotazione dai moti orbitali che caratterizzano il moto ondoso, i quali possiedono un maggiore quantitativo di energia subito al di sotto del pelo libero dell'acqua; il SeaSpoon, perciò, presenta un asse principale parallelo all'asse dei moti orbitali, perpendicolare quindi alla direzione di propagazione delle onde. La principale differenza tra SeaSpoon e gli altri dispositivi di conversione energetica del moto ondoso ad oggi proposti, consiste nel fatto che SeaSpoon lavora direttamente con i moti orbitali delle particelle e quindi idealmente può funzionare a diversi livelli di profondità, a patto che a quella profondità i moti orbitali siano sufficienti a garantire la rotazione del dispositivo. Quest'ultimo è un aspetto molto importante, anche da un punto di vista tecnico e di integrità del dispositivo, in quanto, in caso di condizioni meteomarine di tempesta, può permettere sia di proteggere il dispositivo da danni sia di garantire il funzionamento semplicemente abbassando il SeaSpoon fino a quando i moti orbitali con cui interagisce non raggiungano le condizioni di progetto.

Una prima versione del SeaSpoon le cui fasi di ideazione e progettazione iniziarono nel 2011 prevedeva due elementi principali Figura 4.1: il rotore (1) e la pala (spoon) (6). Il rotore utilizzato era il Savonius (3), concepito per ruotare sempre nel medesimo senso, indipendentemente dal verso del flusso incidente. L'asse del rotore (2), era disposto perpendicolarmente alla direzione di avanzamento dell'onda, in modo da sfruttarne al massimo l'energia cinetica. Lo spoon, di forma rettangolare, era fissato all'asse principale di rotazione, collegato a sua volta, tramite due bracci (5), all'asse di rotazione del rotore. La funzione della pala era permettere la rotazione dell'intero dispositivo in fase con l'onda incidente (con rotore in alto in corrispondenza del cavo dell'onda e rotore in basso in corrispondenza della cresta dell'onda). In questo modo la velocità tangenziale del rotore risulta uguale a  $w_r$ , somma vettoriale di  $u_r$  e  $v$ , dove  $u_r$  è la velocità tangenziale dovuta alla rotazione del rotore intorno all'asse principale del SeaSpoon e  $v$  è la somma vettoriale delle componenti  $u$  e  $w$  della velocità dei moti orbitali associati al moto ondoso incidente. Lo scopo era quello di permettere al rotore di percepire una velocità del fluido incidente maggiore di quelle delle particelle dell'acqua, grazie al suo moto intorno all'asse principale [58].

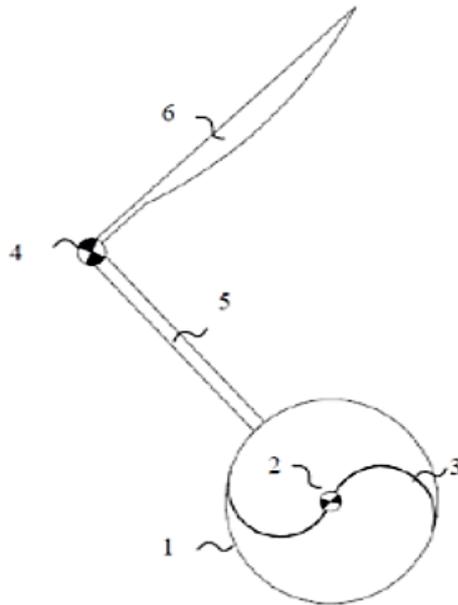


Figura 4.1 – Primo concept di SeaSpoon

A causa di difficoltà riscontrate nel riuscire ad accordare la geometria del SeaSpoon al campo di moto ondoso e della deleteria interazione tra rotore e spoon, unita alle criticità riscontrate nella trasmissione del moto ed alle inefficienze correlate (temi affrontati e trattati in precedenti lavori [60] [61]) è stato introdotto un nuovo modello di SeaSpoon costituito solamente dalla pala, con l'eliminazione del rotore, tale configurazione è denominata anche "SeaSpoon solo paletta", del quale è mostrato uno schema in Figura 4.2, dove sono numerati gli elementi principali:

sistema di ancoraggio (1), vincoli negli assi di ancoraggio e di fissaggio (2 e 3), asse principale (4), braccio oscillante mobile (5), corpo centrale (6) e cucchiaio (7)

I vantaggi ottenibili grazie a questa nuova configurazione sono diversi:

- Non necessita di un sistema di bilanciamento che ne permetta il moto in fase ma, anzi, la configurazione migliore è proprio quella costituita dalla sola lastra (la pala è leggera, ovvero può anche essere resa neutra rispetto la gravità ricavando delle sezioni cave al suo interno).
- Se correttamente dimensionata, in funzione delle caratteristiche dei moti orbitali delle onde in cui opera, può recuperare autonomamente la fase senza bloccarsi in una posizione di stallo.
- Il sistema nel suo complesso risulta molto più semplice e robusto rispetto al caso con Rotore Savonius: infatti la criticità del progetto originale del SeaSpoon risiede principalmente nel modo in cui rendere disponibile all'albero del generatore elettrico la potenza meccanica convertita, dato che il moto orbitale del rotore attorno all'asse principale non ne consente un accoppiamento diretto col generatore. Con la nuova configurazione, il generatore può essere idealmente accoppiato direttamente all'asse

di rotazione del dispositivo, eliminando in tal modo i componenti critici del sistema di trasmissione e riducendo, in ottica di un funzionamento in mare, le parti meccaniche in movimento aumentando l'affidabilità nel tempo del sistema e determinando una minore necessità di attività manutentiva.

- La lastra non deve trascinare in rotazione nessun altro componente (rotore e sistema di bilanciamento) e pertanto la coppia prodotta dalle forze idrodinamiche può essere interamente sfruttata per muovere la trasmissione.
- Il dispositivo può essere equipaggiato con profili differenti dalla lastra piana (per esempio profili concavi o convessi) – al limite con profili idrodinamici (rotore Darrieus)

Per contro:

- La sola paletta, e quindi anche l'asse del dispositivo, può ruotare al massimo con una velocità pari a 1 [giro/onda], essendo pertanto strettamente legata al periodo dell'onda dalla relazione  $n=1/T$  giri/s, ovvero  $\omega=2\pi/T$  [rad/s]. Le velocità di rotazione sono quindi estremamente basse, che implica coppie elevate.
- Il dimensionamento della lastra deve essere effettuato in funzione delle caratteristiche del moto ondoso e in particolare deve essere proporzionato ai raggi delle orbite dei moti delle particelle d'acqua, i quali dipendono dall'altezza dell'onda e dalla distanza dalla superficie marina. Per questo motivo, durante il funzionamento in mare aperto, le condizioni variabili dello stato ondoso rendono fondamentale la messa a punto di un sistema di regolazione, che permetta di adattarsi alla situazione contingente garantendo la rotazione in fase al variare delle caratteristiche dell'onda.

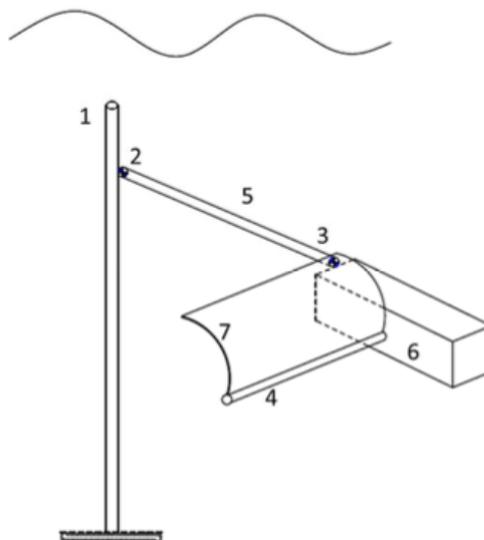


Figura 4.2 – Rappresentazione dei componenti del SeaSpoon “solo paletta”

Lo sviluppo del concept di SeaSpoon è stato nel tempo arricchito da prove sperimentali per identificare pro e contro di ogni versione. Lo scopo di parte di questo elaborato consiste nel presentare gli ultimi risultati disponibili relativi a questa tecnologia, sia da un punto di vista sperimentale che dal punto di vista numerico, con particolare attenzione alle prestazioni raggiungibili dal SeaSpoon in diverse condizioni meteomarine.

È inoltre stato condotto uno studio dedicato alla valutazione delle prestazioni di un dispositivo equipaggiato con rotore Darrieus in luogo della pala a resistenza.

## **4.2 CAMPAGNA SPERIMENTALE SU PROTOTIPO**

Nel presente paragrafo verrà illustrata l'attività sperimentale condotta su un prototipo di SeaSpoon equipaggiato con diversi set di profili, e in diverse condizioni di stato ondoso [62]. Tale attività, svolta nella vasca ondogeno realizzata presso il Campus Universitario dell'Università di Genova, situato a Savona, è stata parte dell'attività di dottorato del primo anno

### **4.2.1 DESCRIZIONE SET UP SPERIMENTALE**

Il modello infatti è costituito da una navicella chiusa in modo stagno, all'interno della quale sono contenuti tutti i sensori necessari alla rilevazione delle prestazioni di funzionamento di Seaspoon. Il moto è trasmesso dall'esterno verso l'interno attraverso un giunto magnetico che permette di garantire la condizione di impermeabilità verso i componenti sensibili. Il giunto magnetico è costituito da una campana di teflon con una serie di magneti permanenti sulla calotta della campana stessa. Quest'ultima è contenuta all'interno della navicella e riceve esternamente il moto da un disco di teflon con una serie di magneti sulla circonferenza esterna, al disco è calettato un alberino passante su cui sono calettate le due pale. Qui di seguito alcune foto del prototipo scomposto nei suoi componenti per facilitare la comprensione delle parti del giunto magnetico (sulla sinistra il disco in teflon e sulla destra la campana).



*Figura 4.3 – Dettaglio del giunto magnetico*

Il modello è equipaggiato poi di un encoder, realizzato con tre sensori di Hall che rilevano una terza serie di magneti posizionati lateralmente sulla campana interna, e da due motorini, collegati attraverso pulegge alla campana con i quali si possono effettuare valutazioni su coppie e potenze generate. Facendo riferimento alla Figura 4.4 si mostra il modello di Seaspoon privato dalle pale. Si nota, sulla parte sinistra della foto, il disco in teflon, sul quale verrà flangiata una delle due pale, inserito all'interno della campana sopra descritta.



*Figura 4.4 – Navicella centrale del modello di Seaspoon, senza pale*

I profili delle pale selezionati per i test sono stati di vario tipo così da poter confrontare le prestazioni di ciascuna di queste facendo riferimento allo stesso stato di moto ondoso. Ogni pala è stata disegnata su CAD e realizzata grazie ad una stampante 3D, ottenendo così le caratteristiche desiderate. Il materiale usato per la stampa è stato ABS (Acrilnitrile butadiene stirene) caratterizzato da una densità circa paragonabile a quella dell'acqua, in modo tale di avere un peso circo neutro in acqua.

Le pale selezionate sono state una coppia piana, una concava e una convessa. Le dimensioni della singola pala piana sono di 15 cm di larghezza e lunghezza di 7,5 oppure 10 cm. La pala curva invece è stata oggetto di uno studio per ottimizzarne la geometria, attraverso un triangolo delle velocità è stato disegnato un profilo in modo tale che il flusso relativo incidente rimanesse sempre circa parallelo. Le sue dimensioni in termini di altezza e corda sono le medesime della pala piana, mentre il raggio di curvatura medio è di circa 16 cm. Vengono riportati qui sotto i profili risultanti descritti, in particolare, pala concava e pala convessa avranno la stessa curvatura ma avranno assetto inverso rispetto l'onda incidente.



*Figura 4.5 – CAD 3D delle pale utilizzate*

Qui di seguito invece una figura della configurazione del modello Seaspoon durante i test in vasca equipaggiato con pale piane.

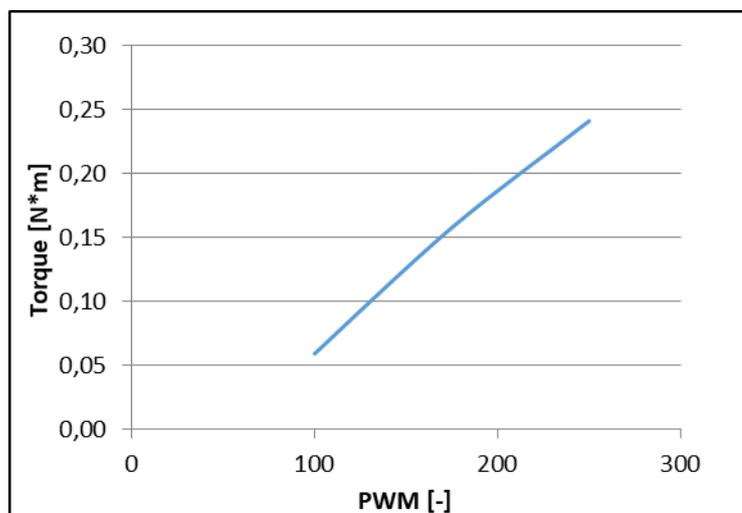


*Figura 4.6 – Modello Seaspoon in acqua*

Il prototipo è equipaggiato con un motore in corrente continua xxx operante a 12V.

Grazie ad una scheda di controllo dedicata, è stato possibile imporre al motore un segnale PWM (Pulse Width Modulation) - equivalente a una determinata tensione applicata - per modificare le sue condizioni di lavoro. La Figura 4.7 mostra la correlazione tra coppia statica e PWM, ottenuta mediante opportuna.

I sensori di Hall installati all'interno della navicella sono attivati dal passaggio di 24 magneti installati su un rotore interno. Ciò significa che la precisione delle misure di posizione è di  $\pm 7.5^\circ$ . Circa la precisione della coppia resistente imposta all'albero, è stata valutata raggiungendo le condizioni statiche per diversi valori di PWM. L'errore commesso è stimato inferiore al 5% imponendo 250 PWM e non è rilevante con 0 PWM.



*Figura 4.7 – Curva coppia resistente dispositivo*

In definitiva, la coppia resistente associata al valore di PWM imposto è riassunto nella Tabella 4.1.

Nome	PWM	Coppia resistente [N·m]
C0	0	0,06
C1	100	0,16
C2	200	0,24

*Tabella 4.1 – Coppie resistenti applicate*

#### 4.2.2 DESCRIZIONE FACILITY

In questo capitolo viene mostrata l'attività sperimentale svolta sulle tre geometrie studiate.

In particolare, in tutti e tre i casi ci si è avvalsi della vasca ondogeno presente all'interno degli spazi dello IES Lab del TPG, presso il campus di Savona, realizzata nel corso di precedenti attività e progettata a partire da esempi reperiti in letteratura [63].

Si tratta di una vasca del tipo “flap wave maker” aventi le seguenti caratteristiche dimensionali:

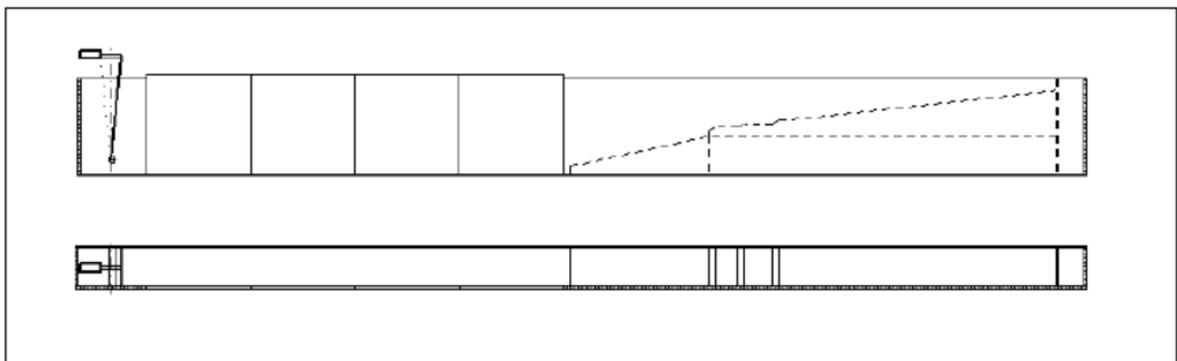
- Lunghezza = 14 m
- Altezza = 1,5 m
- Profondità = 0,5 m.

La vasca consente di lavorare con onde aventi un'altezza fino a circa 20 cm.

La misura dell'altezza dell'onda è registrata grazie a due apposite sonde di livello, che sono installate prima e dopo la zona ove viene posizionato il prototipo da studiare, ad una distanza rispettivamente ad 1 m ed 1.1 m.

Un apposito sistema di filtri posto nella parte terminale della vasca consente di filtrare le onde di riflessione, ed ottenere così un profilo d'onda pulito.

In Figura 4.8 è riportato uno schema della vasca, mentre Figura 4.9 mostra una fotografia della stessa.



*Figura 4.8 – Schema vasca ondogeno TPG presso IES Lab di Savona*



*Figura 4.9 – Ondogeno TPG presso IES Lab di Savona*

Nella sezione centrale, dove è posizionato il dispositivo, le due pareti laterali sono realizzate in vetro trasparente di 12 mm di spessore; in questa sezione sono state posizionate due sonde resistive, per misurare i parametri base dell'onda, come altezza, lunghezza e periodo.

Le sonde sono installate 1 mt a monte e 1,10 mt a valle rispetto all'asse centrale del prototipo. Il valore dell'altezza dell'acqua viene acquisito insieme a tutti i parametri del prototipo WEC, per consentire una semplice attività di post-elaborazione dei dati.

Il segnale della sonda resistiva viene acquisito e convertito in segnale digitale. La precisione della sonda resistiva è stata valutata con una campagna dedicata che mostra che l'errore commesso dipende dal livello misurato, ma non supera mai il 5%.

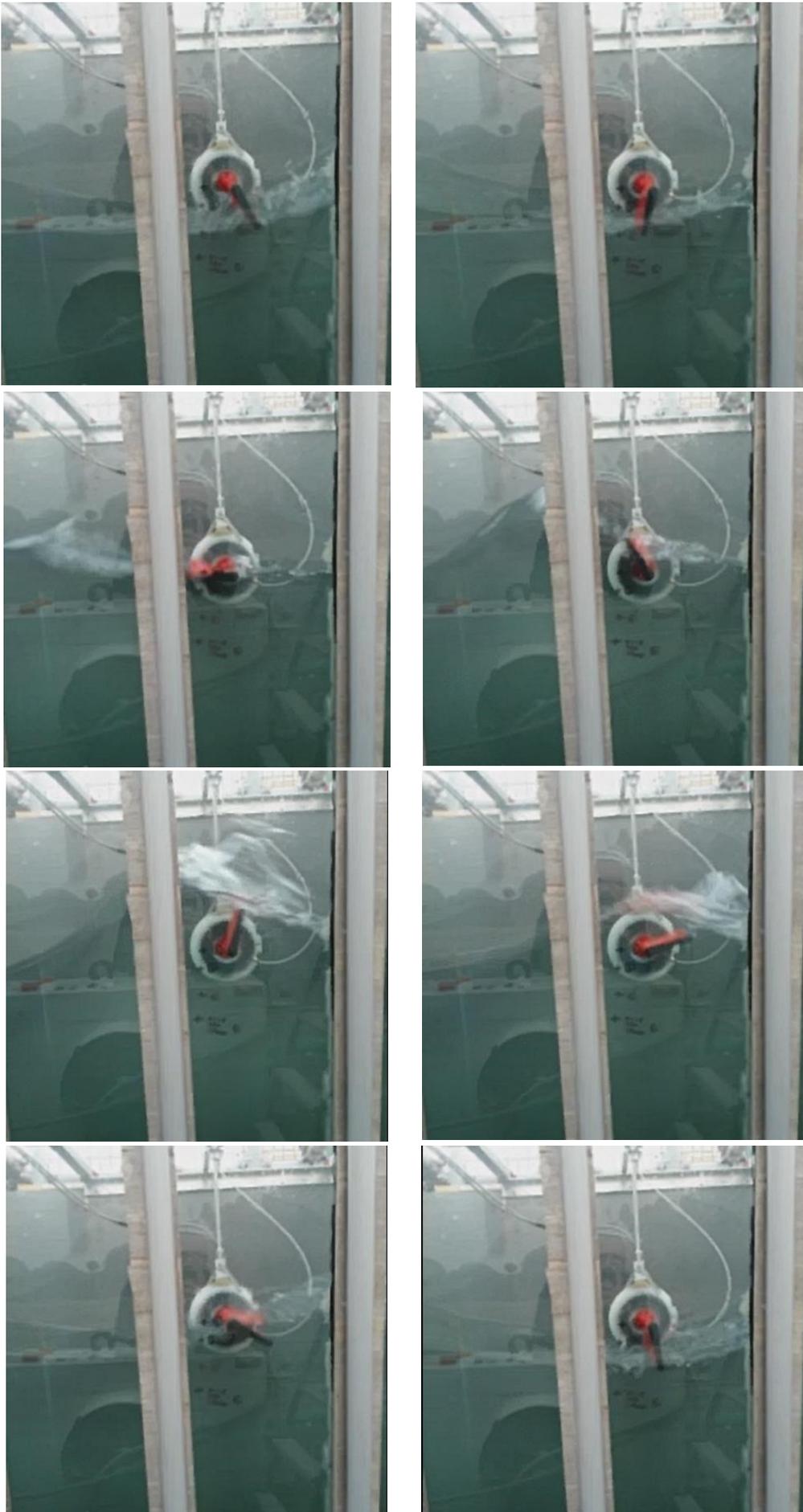
Infine, possiamo notare che la ripetibilità delle onde è molto buona grazie ad un sistema analogico molto stabile, dotato di una logica di funzionamento dedicata, che consente di riprodurre treni d'onda regolari e uniformi tra un test e l'altro.

### **4.2.3 RISULTATI SPERIMENTALI**

Sono state condotte diverse campagne sperimentali, finalizzate ad analizzare il comportamento di Seaspoon in diverse condizioni operative ed equipaggiato con diversi profili.

La campagna sperimentale iniziale si è concentrata nella valutazione qualitativa del comportamento del dispositivo.

La successiva Figura 4.10 mostra la sequenza video di un generico test in vasca:



*Figura 4.10 – Sequenza video test in vasca*

Nei grafici seguenti viene mostrato il confronto tra le posizioni assunte dalla pala e il livello dell'onda, al variare del tempo e dei PWM (come indicato in legenda). In particolare, sull'asse secondario è riportato il valore sinusoidale dell'angolo del SeaSpoon normalizzato tra 0 e 1, dove 0 coincide con  $0^\circ$  ed è il valore per il quale la pala si trova nella configurazione a massima profondità (ossia verticale rivolta verso il basso) mentre 1 coincide con  $180^\circ$  ed è il valore per il quale la pala si trova nella configurazione a massima elevazione (ossia verticale rivolta verso l'alto).

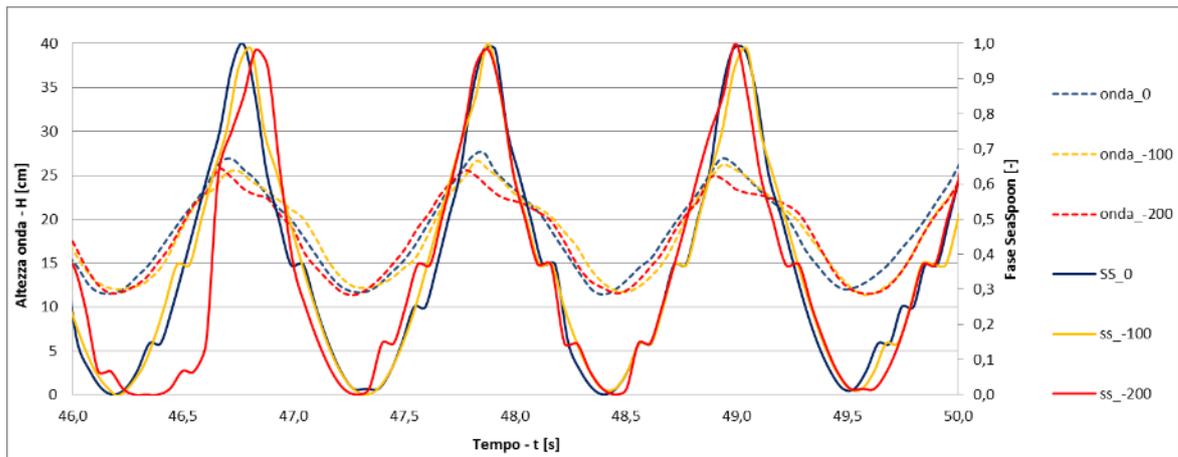


Figura 4.11 – Profili di fase SeaSpoon – Onda per diverse coppie resistenti imposte – pala piana

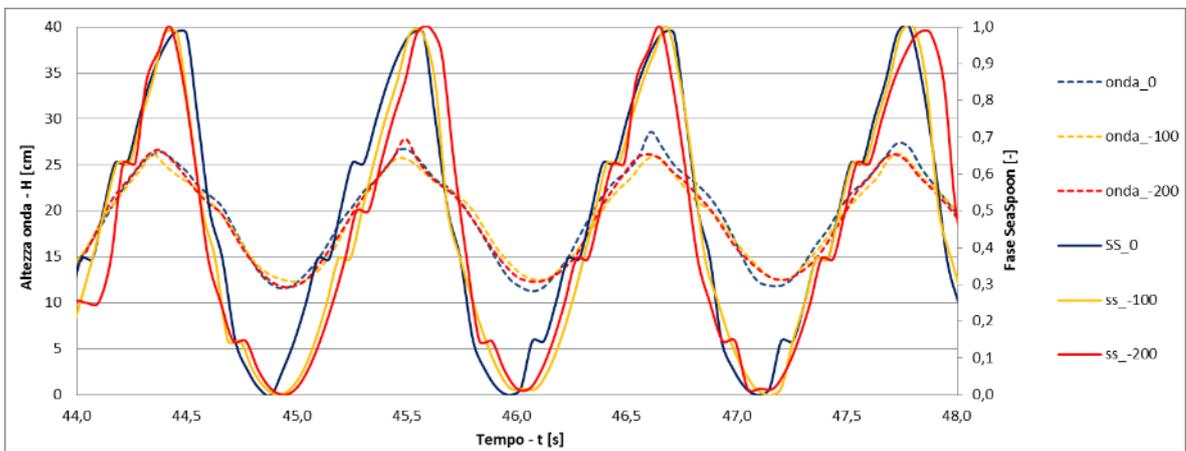


Figura 4.12 – Profili di fase SeaSpoon – Onda per diverse coppie resistenti imposte – pala curva

È interessante notare la differenza tra gli andamenti della posizione del SeaSpoon nel caso di pala piana (molto simmetrico) e nel caso di pala curva (sbilanciato verso la seconda parte della rotazione, che avviene molto più rapidamente).

Si osserva che la fase del SeaSpoon è leggermente in ritardo rispetto alla fase dell'onda: la massima altezza raggiunta dalla pala non coincide perfettamente con il picco dell'onda.

La stessa osservazione estesa alle posizioni corrispondenti alla valle dell'onda evidenzia un comportamento differente a seconda del profilo: nel caso di pala piana, infatti, la minima altezza occupata dalla pala coincide pressoché perfettamente con la valle dell'onda. Nel caso di pala curva, invece, la pala “anticipa” l'onda nel suo punto più basso.

Inoltre, come si può notare dai grafici appena riportati, relativi alle prove condotte con pala piana e pala curva, la reazione del SeaSpoon è pressoché indipendente dai diversi livelli di coppia resistente (si nota una leggera crescita dello sfasamento del SeaSpoon al crescere della coppia resistente– tuttavia quasi trascurabile).

La discriminante, come ci si aspettava, è la capacità del SeaSpoon di allinearsi alla fase dell'onda e mettersi in rotazione, capacità maggiore a bassi livelli di coppia resistente, ed inferiore all'aumentare di essa.

A questo riguardo, si faccia riferimento alla Tabella 4.1 relativamente al valore del segnale PWM imposto ed ai livelli di coppia associata durante i test.

Se, ad esempio, imponendo 0 PWM al motore il SeaSpoon riesce ad allinearsi alla fase dell'onda e a ruotare pressoché per tutta la durata del test, imponendo -200 PWM (e dunque aumentando la coppia resistente), il SeaSpoon riesce ad allinearsi alla fase dell'onda ed a ruotare solo per determinati periodi.

I grafici seguenti mostrano proprio come il SeaSpoon abbia una differente capacità di mantenersi in fase a seconda della coppia resistente imposta.

Si evidenzia che, dall'analisi eseguita sugli output dei test della durata di qualche minuto, il SeaSpoon equipaggiato con pala curva ha dimostrato una maggiore capacità di mantenersi in fase con l'onda anche al crescere della coppia resistente, rispetto al caso della pala piana.

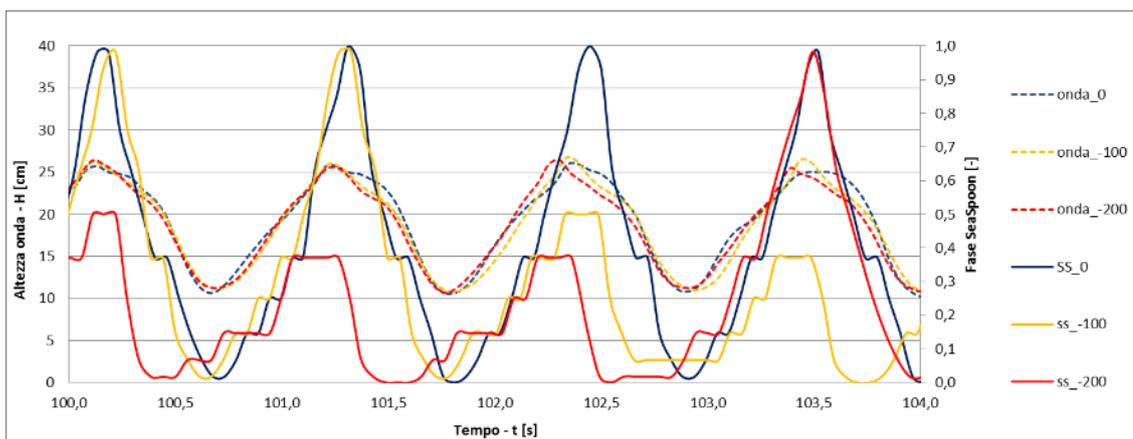


Figura 4.13 – Perdita di fase SeaSpoon al crescere della coppia resistente – pala piana

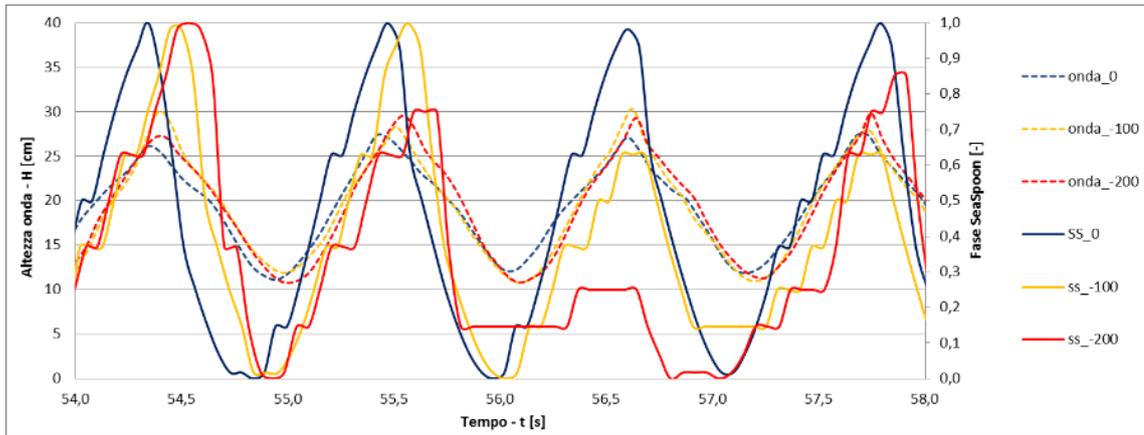


Figura 4.14 – Perdita di fase SeaSpoon al crescere della coppia resistente – pala curva

L'ultima considerazione necessaria è che il SeaSpoon, durante i test, ha evidenziato un funzionamento ottimale con determinati tipi di onda, non riuscendo però ad allinearsi alla fase di onde aventi periodo maggiore, e registrando un comportamento di “flapping”.

La successiva campagna sperimentale, strutturata in modo da riprodurre diverse combinazioni tra condizioni operative e geometria della pala, ha portato allo svolgimento di 36 test sperimentali.

Le onde generate durante questa seconda campagna sperimentale avevano le seguenti caratteristiche:

	Onda W1	Onda W2
Altezza [cm]	16	19
Periodo [s]	0,9	1,1

Tabella 4.2 – Caratteristiche delle onde

Sono stati testati sei set di pale, ciascuna composta da due pale con una larghezza di 15 cm ciascuna (per un fronte d'onda intercettato totale pari a 30 cm). Nella tabella seguente si illustrano le caratteristiche dei diversi settaggi:

Nome	Lunghezza [cm]	Forma
Set n.1	7,5	Piana
Set n.2	7,5	Concava
Set n.3	7,5	Convessa
Set n.4	10	Piana
Set n.5	10	Concava
Set n.6	10	Convessa

Tabella 4.3 – Caratteristiche delle pale

Infine, per ogni configurazione, il motore interno è stato alimentato con un diverso livello di tensione, corrispondente alla diversa coppia resistente come precedentemente mostrato nella Tabella 4.1.

Ogni test è stato eseguito per 150 s, quindi i primi 30 e gli ultimi 30 sono stati esclusi dalla post-elaborazione dei risultati, al fine di evitare errori dovuti a condizioni transitorie.

Di seguito vengono mostrati alcuni risultati della campagna sperimentale. Inizialmente sono state fatte analisi qualitative a partire dai dati elaborati con Excel per poi dare conferma di quanto riscontrato con una analisi di tipo quantitativo.

In particolare, la potenza è stata valutata come:

$$P_{seaspoon} = \frac{1}{n} \cdot \sum C_r \cdot \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad (4.1)$$

Dove

- $n$  = numero di punti considerati
- $C_r$  = coppia resistente [N·m]
- $\Delta\theta$  = variazione angolare [rad]
- $\Delta t$  = avanzamento temporale = 0,05 [s]

Considerando l'accuratezza degli strumenti utilizzati, possiamo stimare un errore percentuale tra il 9% e il 18%, dipendente dal test. Tale valutazione, unita al fatto che non si hanno informazioni relative all'effettiva coppia erogata dal motore resistivo in condizioni dinamiche, portano a valutare l'attività svolta in termini più qualitativi che quantitativi, potendo comunque contare su risultati interessanti per la comprensione del funzionamento di tali dispositivi.

La Figura 4.15 mostra il confronto della potenza media per le pale corte (Set n.1, Set n.2, Set n.3) e la Figura 4.16 mostra il confronto della potenza media per le pale lunghe (Set n. 4, Set n.5, Set n.6) tra Wave 1 e Wave 2, per un'immersione dell'albero al di sotto della superficie libera pari a 0 cm.

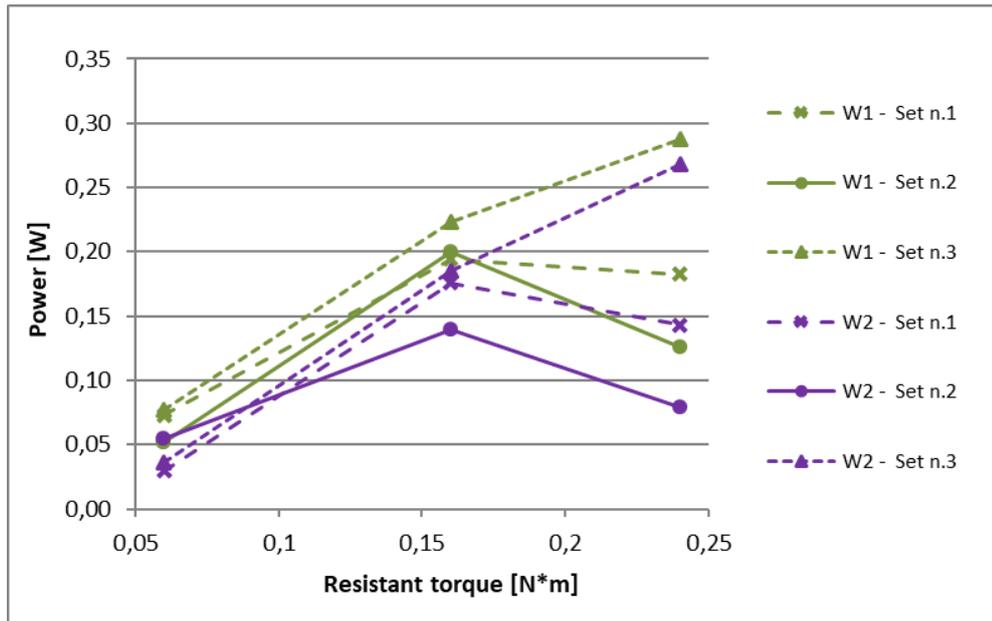


Figura 4.15 – Potenza estratta (pale corte)

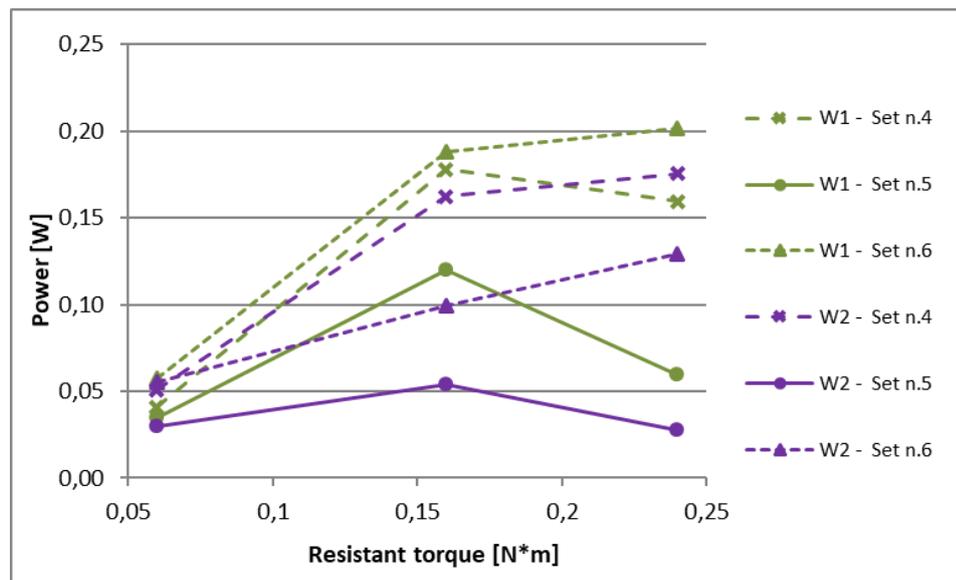


Figura 4.16 – Potenza estratta (pale lunghe)

Analizzando questi risultati possiamo notare che il SeaSpoon equipaggiato con le pale corte (Set n.1, Set n.2 e Set n.3) si comporta generalmente meglio del SeaSpoon equipaggiato con pale lunghe (Set n.4, Set n.5 e Set n.6). Ciò è probabilmente dovuto alla scala dei dispositivi rispetto alla dimensione dell'onda (le pale lunghe hanno una corda di 10 cm, più alta dell'ampiezza delle onde considerate che sono 8 e 9,5 cm): quindi, è probabile che la punta della pala produca una coppia negativa.

Non esiste una forma specifica della pala che funzioni rigorosamente bene in tutte le condizioni, tuttavia possiamo notare che quelle convesse sembrano avere prestazioni generalmente migliori rispetto a quelle piane e concave.

Il dato particolarmente interessante è che la potenza media estratta con l'onda W1 è generalmente simile o superiore a quella estratta con l'onda W2.

Questo potrebbe apparire in contraddizione con il fatto che l'onda W2 possiede un contenuto energetico superiore all'onda W1.

Tuttavia, si consideri che ad un incremento dell'altezza dell'onda corrisponde generalmente un aumento del periodo e dunque della lunghezza della stessa. Questo si traduce in una "diluizione" dell'energia cinetica dei moti orbitali su una porzione di liquido superiore, che porta ad una generale riduzione della densità cinetica dei moti orbitali all'aumentare dell'altezza dell'onda, con conseguente riduzione del rendimento del dispositivo.

## **4.3 MODELLO EXCEL-VBA**

Al fine di valutare le prestazioni di dispositivi Seaspoon in diverse condizioni marine è stato sviluppato un codice di calcolo dinamico su piattaforma Excel-VBA, in grado di riprodurre diversi stati di moto ondoso, definendo le componenti di velocità dei moti orbitali punto per punto, calcolando dinamicamente la coppia generata dall'interazione tra i vettori velocità e l'attuatore.

In particolare, il modello è suddiviso in:

- modello onde
- Seaspoon equipaggiato con pala piana
- Seaspoon equipaggiato con turbina Darrieus

In generale, i principali punti di forza del codice sono dati dalla sua semplicità, il ridotto sforzo computazionale, i tempi di simulazione relativamente contenuti e la possibilità di impostare e gestire un vasto numero di parametri in ingresso. Di contro, non si tengono in conto diversi aspetti, specialmente dal punto di vista fluidodinamico, influenza delle strutture immerse sui filetti fluidi, con conseguente scostamento dei risultati rispetto al caso reale. Per ovviare a queste problematiche è stata effettuata una calibrazione sulla base di dati sperimentali presenti in letteratura.

### **4.3.1 MODELLO EXCEL-VBA ONDE**

È possibile distinguere differenti tipi di grandezze in input. Le caselle blu rappresentano i parametri indipendenti, inseribili dall'utente. Quelle bianche contengono parametri dipendenti da quelli precedentemente inseriti

## PARAMETRI INIZIALI DI SIMULAZIONE

Questi definiscono la durata della simulazione e le condizioni iniziali di velocità di rotazione e posizione angolare dell'albero. Ulteriore parametro di fondamentale importanza è il tempo di discretizzazione  $\Delta t$ , che definisce l'intervallo di tempo tra un'iterazione e quella successiva.

Parametri iniziali simulazione	
n cicli da simulare	2 [-]
$\Delta t$	0,025 [s]
$\theta_0$	0 [°]
$\omega_0$	15,0 [RPM]

Tabella 4.4 – Parametri iniziali di simulazione

## PARAMETRI DEL FLUSSO

In Tabella 4.5 sono mostrati i parametri relativi al flusso.

Parametri onda		
Modello ONDA	Stokes III ordine	3
H - altezza onda	0,7	[m]
T - periodo onda	3,00	[s]
L - lunghezza onda	14,36	[m]
C - celerità onda	4,787	[m/s]
h - altezza fondale	8,0	[m]
k onda	0,44	[1/m]
$\sigma$ onda	2,09	[1/s]
$\rho$ - densità fluido	1000	[kg/m <sup>3</sup> ]
P_onda	1456,4	[W/m]
P teorica 1 moto	137,9	[W/m]

Tabella 4.5 – Parametri d'onda

In primo luogo, occorre scegliere tra una simulazione nel caso di flusso uniforme o di moto ondoso. Nel primo caso viene predisposta una tabella dove è possibile impostare le velocità orizzontale e verticale u e w.

Parametri flusso uniforme	
u	0,800 [m/s]
w	0,000 [m/s]

Tabella 4.6 – Parametri del flusso uniforme

Nel secondo caso la profondità del fondale, il periodo e l'altezza d'onda definiscono le caratteristiche della stessa, sulla base delle quali è necessario scegliere un determinato ordine del modello di Stokes. Questo verrà selezionato manualmente nella prima riga della Tabella 4.5, mediante un apposito menù a tendina.

In Figura 4.17 viene presentato il diagramma di Le Mehaute, in cui le coordinate del generico punto (x,y) sono rappresentate dalle seguenti grandezze caratteristiche:

- L'ascissa  $x = \frac{h}{T^2}$
- L'ordinata  $y = \frac{H}{T^2}$

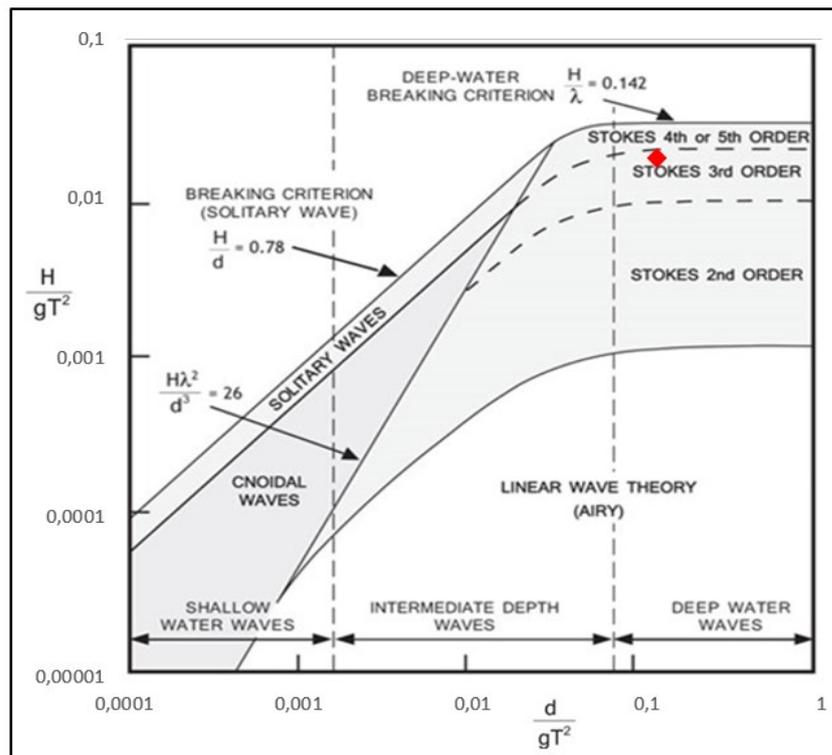


Figura 4.17 – Diagramma di Le Mehaute

Queste due quantità vengono calcolate a partire dai parametri d'onda inseriti e identificano un punto nel grafico con apposito indicatore. Quest'ultimo ricadrà all'interno di una specifica regione, corrispondente all'ordine di Stokes da impostare.

Nel codice di calcolo è stato implementato lo sviluppo di Stokes fino al V ordine realizzato da J. D. Fenton, già descritto nel Capitolo 3. All'i-esimo istante della simulazione vengono calcolati i coefficienti  $A_{ij}$ ,  $B_{ij}$  e  $C_{2i}$ , funzione del numero d'onda  $k$  e della profondità del fondale  $h$ .

COEFFICIENTI
--------------

A		B		C	
A <sub>11</sub>	0,060427	B <sub>11</sub>	1	C <sub>0</sub>	0,999089
A <sub>22</sub>	5E-06	B <sub>22</sub>	0,503656	C <sub>2</sub>	0,501376
A <sub>31</sub>	-0,03066	B <sub>31</sub>	-0,37912	C <sub>4</sub>	0,127856
A <sub>33</sub>	-5E-08	B <sub>33</sub>	0,379123		
A <sub>42</sub>	0,000918	B <sub>42</sub>	0,333291		
A <sub>44</sub>	4,1E-10	B <sub>44</sub>	0,338331		
A <sub>51</sub>	-0,09402	B <sub>51</sub>	-1,1125		
A <sub>53</sub>	4,86E-06	B <sub>53</sub>	0,780784		
A <sub>55</sub>	-2,6E-12	B <sub>55</sub>	0,331717		

*Tabella 4.7 – Coefficienti di Fenton al generico i-esimo istante*

Vengono compilate cinque tabelle, una per ciascun ordine, in cui si calcola per i tre differenti profili:

- la componente orizzontale  $u$  della velocità del fluido
- la componente verticale  $w$  della velocità del fluido
- l'elevazione della superficie libera  $Z_{lim}$

Si ha un procedimento del tipo a cascata: la tabella relativa all'ordine  $\tau$  considera i valori di quella corrispondente all'ordine  $\tau - 1$ , e aggiunge un termine della serie di Fourier. Questo metodo consente di disaccoppiare in modo elementare i valori di  $u$ ,  $w$  e  $Z_{lim}$  relativi ai cinque ordini.

Stokes I ordine			
	1	2	3
Z_lim	0,242960316	0,24823384	0,24823384
u	0,464026284	0,582546631	0,38584054
w	0,112503325	-0,06961216	-0,046104313

Stokes II ordine			
	1	2	3
Z_lim	0,269394868	0,277133287	0,277133287
u	0,464030448	0,582553505	0,385843555
w	0,112505471	-0,06961383	-0,046105044

Stokes III ordine			
	1	2	3
Z_lim	0,268249722	0,27683661	0,27683661
u	0,450899695	0,566068654	0,374925301
w	0,109321751	-0,0676438	-0,044800371

Stokes IV ordine			
	1	2	3
Z_lim	0,26989801	0,278923943	0,278923943
u	0,454471119	0,571963788	0,377511284
w	0,111161819	-0,06907316	-0,045427381

Stokes V ordine			
	1	2	3
Z_lim	0,269608105	0,27884642	0,27884642
u	0,452293413	0,569347812	0,375682045
w	0,110704263	-0,06882636	-0,045227921

Tabella 4.8 – Z\_lim, u e w per i cinque ordini di Stokes

Nella modellazione di Fenton tutti i coefficienti vengono espressi in funzione del numero d'onda angolare k. Il periodo T risulta univocamente determinato dalla relazione di dispersione:

$$\frac{2\pi}{T\sqrt{gk}} = C_0 + \varepsilon^2 \left( C_2 + \frac{D_2}{kh} \right) + \varepsilon^4 \left( C_4 + \frac{D_4}{kh} \right) \quad (4.2)$$

Questa condizione non risulta particolarmente comoda nell'ambito dello studio del moto ondoso: molto spesso, i dati sulle onde marine contengono informazioni su T piuttosto che su k. Per ovviare a questo inconveniente è stata realizzata una macro, riportata in Figura

4.18, che consente di risolvere per via numerica l'equazione 4.1 in base all'ordine di Stokes impostato.

```
If (Range("d9").Value > 3) Then
Range("CC28").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Range("C15")
ElseIf (Range("d9").Value > 1) Then
Range("CC29").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Range("C15")
Else: Range("CC30").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Range("C15")

End If
```

*Figura 4.18 – Risoluzione numerica dell'equazione (4.2)*

### **4.3.2 MODELLO EXCEL-VBA SEASPOON EQUIPAGGIATO CON PALA PIANA**

L'obiettivo del codice di calcolo è quello di fornire una panoramica di prima approssimazione delle prestazioni del dispositivo Seaspoon equipaggiato con pala piana a resistenza investito da moto ondoso. Le principali funzionalità del programma sono:

- Determinazione del modello d'onda a partire dai parametri della stessa
- **Calcolo Semplice:** consente di simulare il comportamento dinamico della pala, imponendo determinati input dimensionali della stessa ed imponendo un valore costante di coppia resistente
- **Ricerca massima potenza:** viene individuato il valore di coppia resistente ottimale per la massimizzazione della potenza estratta

In generale, i principali punti di forza del codice sono dati dalla sua semplicità, il ridotto sforzo computazionale, i tempi di simulazione relativamente contenuti e la possibilità di impostare e gestire un elevato numero di parametri in ingresso. Di contro, non si tengono in conto diversi aspetti, specialmente dal punto di vista dinamico e dell'influenza dell'interazione fluido-struttura sul fluido stesso, con conseguente scostamento dei risultati rispetto al caso reale. Per tenere conto di tali limiti è stata effettuata una calibrazione del codice sulla base di dati sperimentali ricavati in vasca.

#### 4.3.2.1 DESCRIZIONE CODICE DI CALCOLO

Gli input del codice di calcolo richiedono in primis di definire le caratteristiche della simulazione – numero di cicli, passo temporale, caratteristica dell'onda (altezza, periodo ordine di Stokes).

Relativamente alle caratteristiche della pala sono richieste le dimensioni, le caratteristiche del materiale, posizione dell'albero rispetto al pelo libero dell'acqua, posizione angolare e velocità iniziale.

La pala è considerata composta da tre elementi piani disposti in serie, aventi lunghezza pari ad un terzo della lunghezza totale

$$L = \frac{L_{TOT}}{3} \quad (4.3)$$

Per ciascun elemento viene calcolata la velocità relativa dell'acqua incidente nel punto baricentrico dello stesso, individuando, oltre al modulo del vettore velocità, anche l'angolo di incidenza.

Vengono dunque valutati i coefficienti di lift e drag secondo la trattazione individuata da [64], e del quale viene riportata la variazione degli stessi coefficienti CL e CD in funzione dell'angolo di incidenza nella successiva Figura 4.19

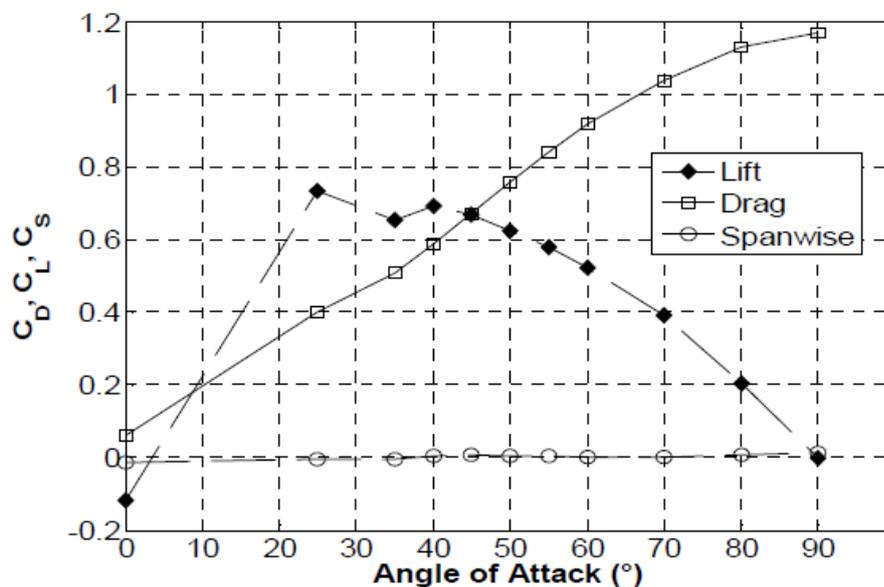


Figura 4.19 – Variazione dei coefficienti di Lift e Drag nel caso di lastra piana, al variare dell'angolo di incidenza

È possibile determinare le espressioni dei coefficienti di forza normale  $c_n$  e tangenziale  $c_t$ , a partire dai valori noti dei coefficienti di portanza  $c_L$  e di resistenza  $c_D$ , dipendenti dall'angolo di incidenza  $\alpha$  e dal numero di Reynolds.

Il procedimento è una scomposizione delle forze  $\vec{F}_d$  e  $\vec{F}_l$  lungo le direzioni normale e tangenziale alla camber line del profilo considerato

Di seguito vengono riportate le espressioni dei coefficienti:

$$c_t = c_L \sin \alpha - c_D \cos \alpha \quad (4.4)$$

$$c_n = c_L \cos \alpha + c_D \sin \alpha \quad (4.5)$$

Dopo aver determinato i coefficienti e supponendo noto il modulo della velocità relativa  $W$ , si definiscono le forze agenti sulla singola pala scomposte lungo la direzione tangenziale e normale alla camber line.

$$F_t = \frac{1}{2} \rho L h W^2 c_t \quad (4.6)$$

$$F_n = \frac{1}{2} \rho L h W^2 c_n \quad (4.7)$$

Dove:

- $\rho$  è la densità del fluido
- $L$  è la lunghezza dell'elemento, pari ad  $1/3$  della lunghezza del profilo completo
- $h$  rappresenta la profondità della pala

La coppia  $\tilde{T}$  generata dalla pala, considerata come insieme di tre elementi distinti, è data da:

$$\tilde{T}(\theta) = \sum F n_i(\theta) \cdot r_i \quad (4.8)$$

Con  $r$  distanza dall'asse di rotazione del punto centrale del singolo elemento, in particolare

$$r_1 = \frac{L}{2} \quad ; \quad r_2 = \frac{3 \cdot L}{2} \quad ; \quad r_3 = \frac{5 \cdot L}{2}$$

Viene dunque calcolata l'accelerazione angolare imposta all'albero, che si può esprimere come:

$$\alpha = \frac{\tilde{T}(\theta) - C_R}{I} \quad (4.9)$$

Dove

- $C_R$  = coppia resistente imposta alla pala
- $I$  = momento di inerzia della pala

Tale accelerazione genera uno spostamento della pala, la cui posizione angolare viene aggiornata al successivo step di calcolo congiuntamente ai parametri vettoriali dell'acqua, che vengono valutati, come già detto, in base alla posizione degli elementi stessi.

Nella successiva Figura 4.20 è mostrato un istante di una generica simulazione, dove sono evidenziati per ogni elemento della pala i vettori velocità acqua, velocità relativa, i vettori delle forze di Lift e Drag.

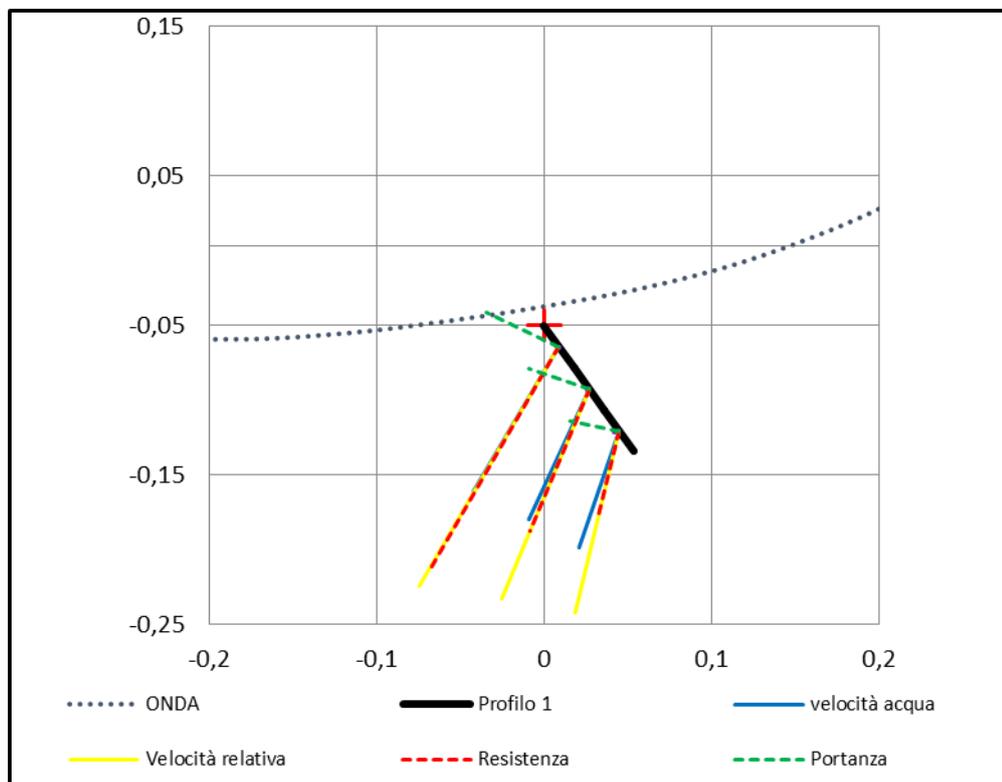


Figura 4.20 – Schermata di simulazione

La potenza estratta, dunque, è data da

$$P_e(\theta) = C_R \cdot \omega \quad (4.10)$$

Con  $\omega$  velocità angolare della pala

Per quanto riguarda la modalità “Calcolo semplice”, il valore di coppia resistente è imposto costante, e il suo segno è funzione sia del verso di rotazione della pala mentre il modulo è funzione della coppia motrice della pala stessa. Tali vincoli sono necessari per evitare che la coppia resistente applicata ad un certo istante contribuisca in maniera attiva alla dinamica della pala all’istante successivo, rendendo il calcolo instabile.

Gli output del codice vengono salvati in una matrice, dalla quale possono essere visualizzati mediante grafici specifici relativi alla grandezza di interesse, come mostrato nelle Figura 4.21, Figura 4.22, Figura 4.23:

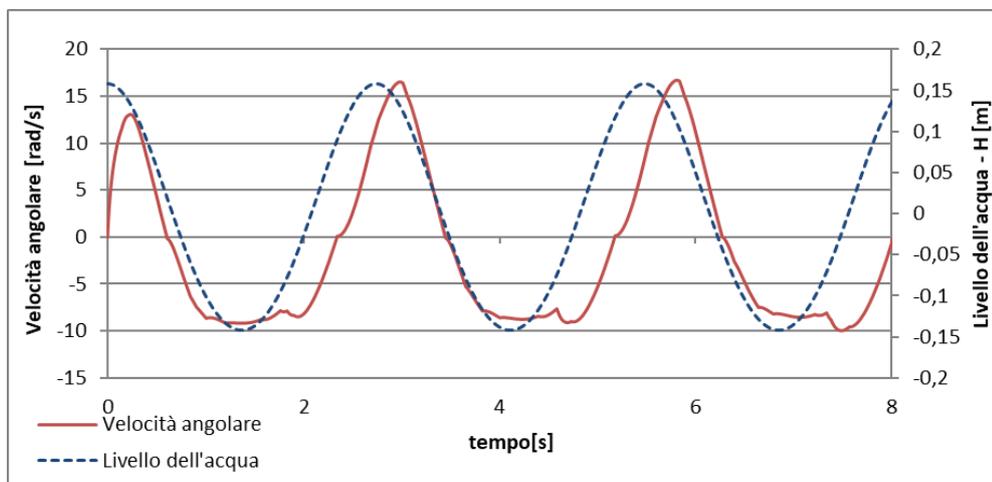


Figura 4.21 – Variazione della velocità angolare

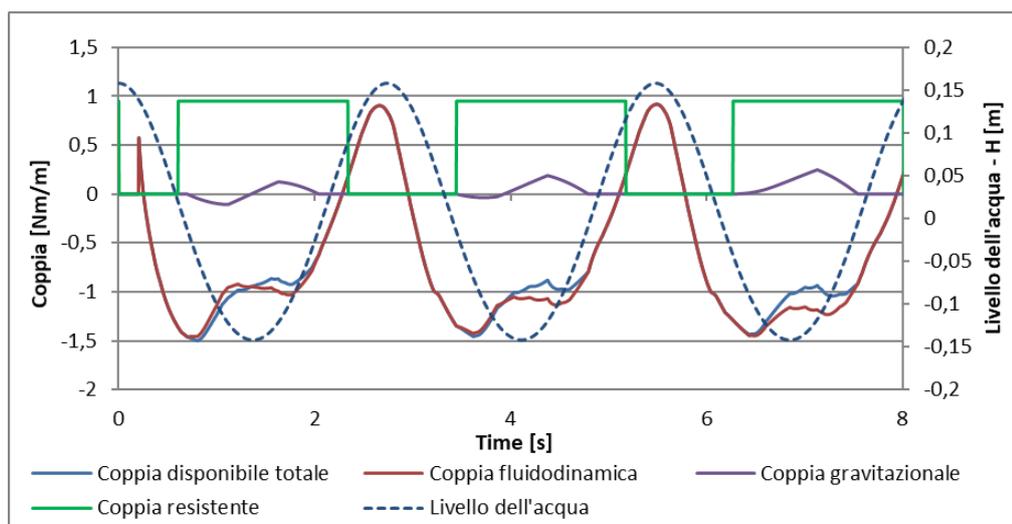


Figura 4.22 – Distribuzione delle coppie al variare del livello dell’acqua

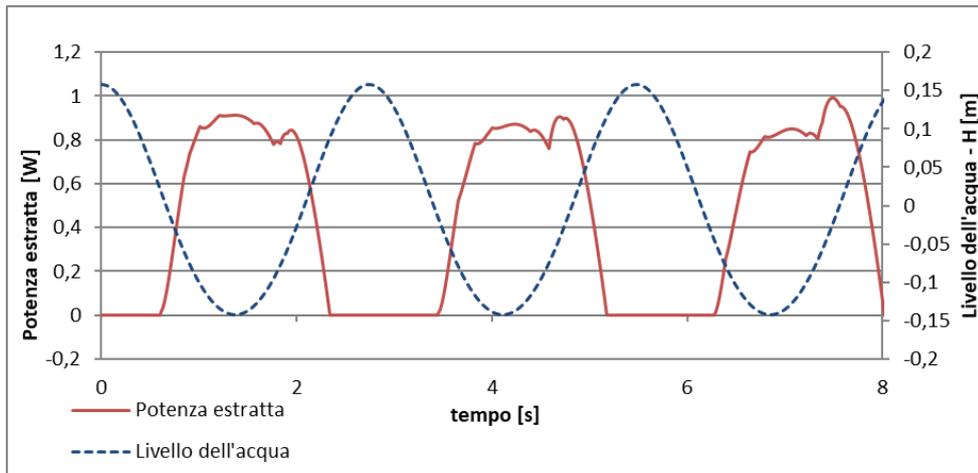


Figura 4.23 – Potenza estratta al variare del livello dell'acqua

Per quanto riguarda la modalità “Ricerca massima potenza” viene eseguita una serie di calcoli imponendo istante per istante un valore di coppia resistente come percentuale della coppia motrice della pala.

Gli output di questo calcolo sono riassunti in un'apposita tabella come mostrato nella figura successiva, dove ad ogni valore di percentuale di coppia da imporre viene associata la coppia media effettivamente applicata, la velocità media del fluido sperimentata dalla pala, la percentuale di sincronia della pala con la pulsazione propria dell'onda, la potenza estratta.

coeff.	C media	v_media	%fase	P
[-]	[N.m]	[m/s]	[%]	[W]
50	0,44	0,337396	36,59364	0,059165
55	0,54	0,331866	36,14711	0,077079
60	0,74	0,326868	33,29799	0,098782
65	0,96	0,318155	28,70795	0,129812
70	1,04	0,325641	26,84335	0,134439
75	1,48	0,304002	19,96646	0,140547
80	1,79	0,290587	13,33725	0,13259
85	2,39	0,305892	4,566146	0,087737
90	2,76	0,330984	4,851799	0,056877
95	2,98	0,336535	3,072762	0,01811

Tabella 4.9 – Output ricerca massima potenza al variare dei coefficienti di coppia resistente

I risultati possono essere rappresentati graficamente come mostrato nelle successive figure:

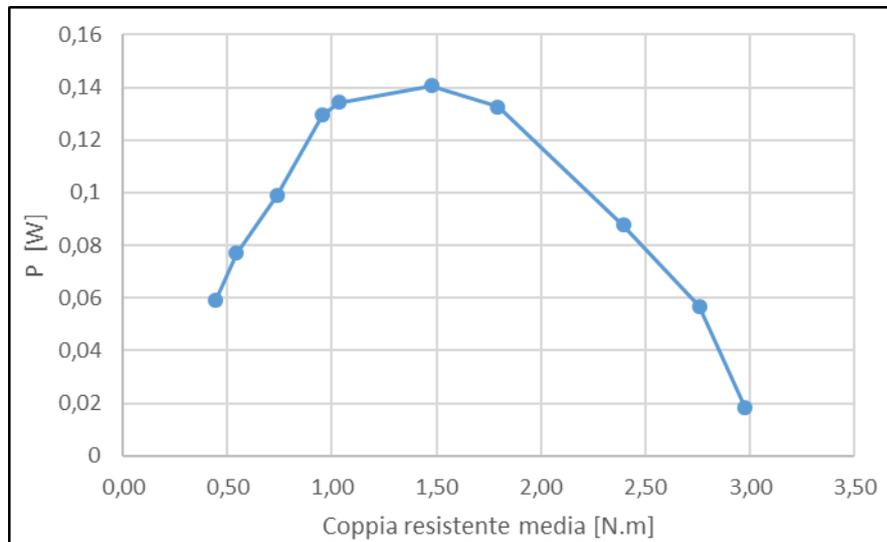


Figura 4.24 – Potenza estratta al variare della coppia resistente media

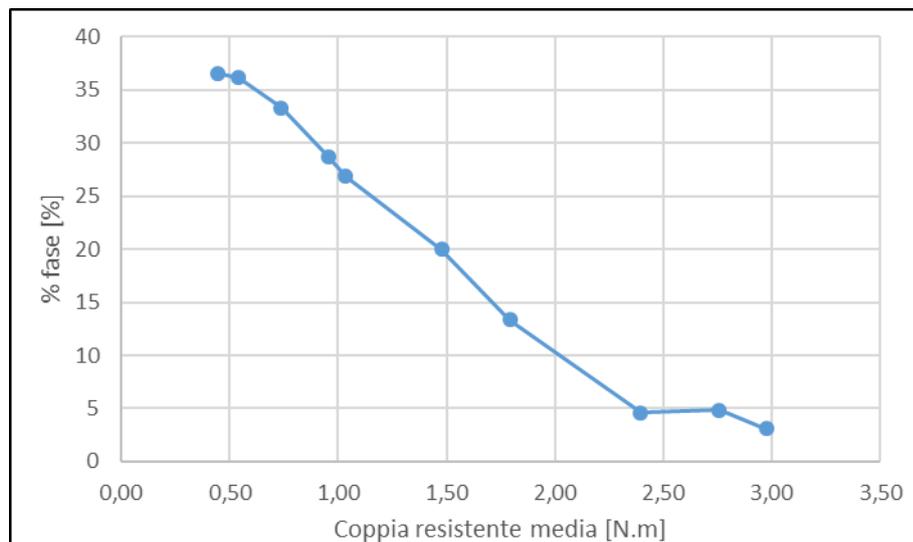


Figura 4.25 – % Fase pala al variare della coppia resistente media

Tale modalità di calcolo permette di individuare quale sia la percentuale di coppia resistente da applicare al fine di ottimizzare la potenza estratta.

Tale valore dipende dalle condizioni di mare e dalla geometria della pala (nel caso del quale sono stati riportati i risultati poc'anzi, ad esempio, si ha una potenza massima estraibile imponendo una coppia resistente pari al 75% di quella disponibile all'albero).

#### 4.3.2.2 CALIBRAZIONE DEL CODICE

A partire dai dati ottenuti durante la campagna sperimentale già descritta nel Paragrafo 4.2.3, si è proceduto alla calibrazione del codice di calcolo, attività che ha portato all'implementazione di specifici fattori correttivi applicati ai coefficienti di Lift e Drag.

Sono state condotte in 12 simulazioni, corrispondenti ad altrettanti test, in particolare riferiti ai profili piani (set n.1 e set n.4) e per ogni profilo sono stati considerati due differenti stati ondosi (W1 e W2). Per ogni condizione, infine sono stati imposti all'albero tre diversi valori di coppia resistente coerenti con quanto illustrato nel Paragrafo 4.2.3.

Per ogni simulazione è stata imposta una durata pari a 20 cicli di onda.

I risultati hanno evidenziato differenze sostanziali rispetto ai dati sperimentali, cosa che ci si aspettava, considerando che il codice di calcolo non tiene conto della fenomenologia dell'interazione fluido-struttura e potendosi dunque considerare uno strumento per una valutazione più "qualitativa" che quantitativa delle prestazioni del dispositivo.

Tali differenze hanno portato all'introduzione di fattori correttivi determinati empiricamente e relativi ai coefficienti CD e CL, i cui valori sono:

- $F_{CL} = 0.5$
- $F_{CD} = 2$

Grazie all'introduzione di questi fattori correttivi il codice di calcolo ha dimostrato la capacità di approssimare il comportamento reale del dispositivo, a meno di un errore medio di circa il 26% in eccesso sulla potenza, verificando un comportamento coerente al variare del valore di coppia resistente applicata all'albero, come evidenziato dalle successive figure

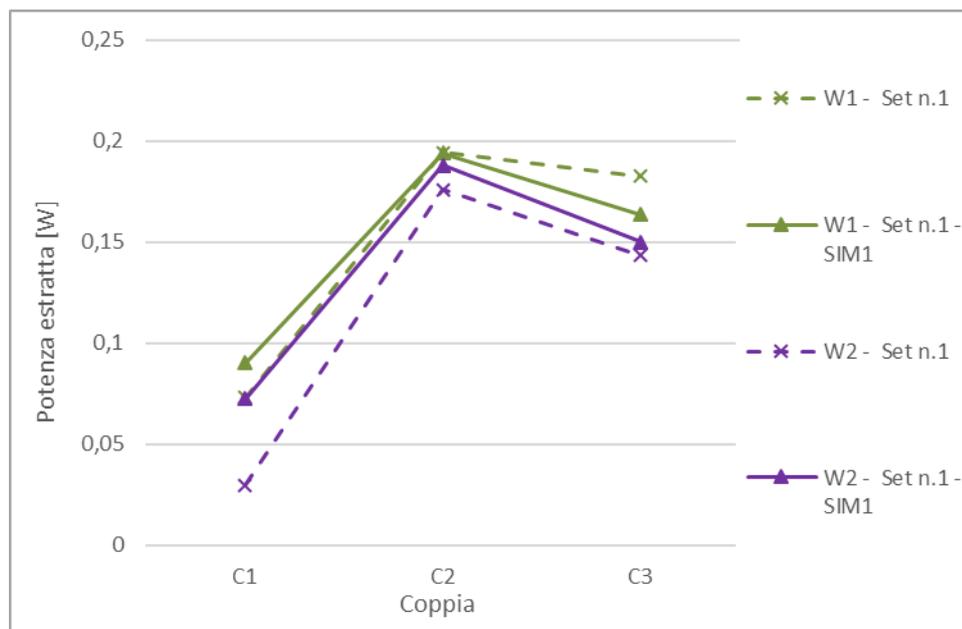


Figura 4.26 – Confronto tra la potenza estratta Seaspoon equipaggiato con pala corta

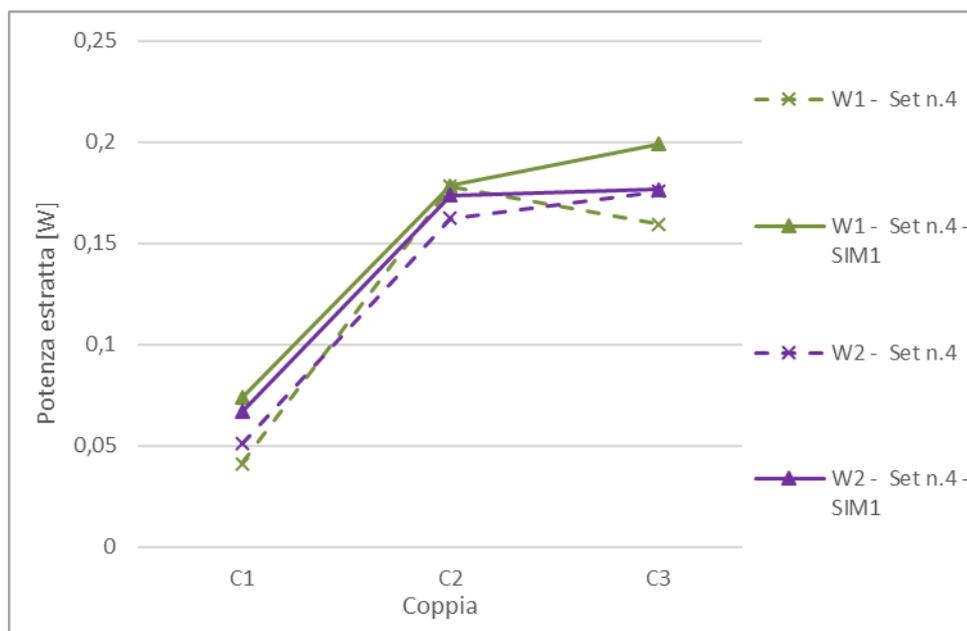


Figura 4.27 – Confronto tra la potenza estratta Seaspoon equipaggiato con pala lunga

#### 4.3.2.3 PRESTAZIONI IN DIVERSI STATI DI MARE

Al fine di valutare le prestazioni del dispositivo in diverse condizioni di mare sono state condotte simulazioni mirate a valutare la potenza estraibile dal Seaspoon equipaggiato con pala piana, per diversi valori di *seastate*.

Allo scopo sono stati considerati stati di mare caratterizzati da profilo d'onda oceanica, da *seastate* 2 a *seastate* 9, e per ogni condizione di mare sono state considerate diverse lunghezze dei profili, come indicato nella Tabella 4.10:

SS	H	T	Lunghezza pala [m]				
	[m]	[s]	0,15	0,25	0,5	0,75	1,5
2	0,3	2,74	SIM 1	SIM 2	SIM 3	SIM 4	SIM 5
3	1	5,00	SIM 6	SIM 7	SIM 8	SIM 9	SIM 10
4	2	7,07	SIM 11	SIM 12	SIM 13	SIM 14	SIM 15
5	3,5	9,36	SIM 16	SIM 17	SIM 18	SIM 19	SIM 20
6	5	11,19	SIM 21	SIM 22	SIM 23	SIM 24	SIM 25
7	8	14,15	SIM 26	SIM 27	SIM 28	SIM 29	SIM 30
8	12	17,32	SIM 31	SIM 32	SIM 33	SIM 34	SIM 35
9	18	21,22	SIM 36	SIM 37	SIM 38	SIM 39	SIM 40

Tabella 4.10 – Set-up simulazioni

Le simulazioni sono state focalizzate alla ricerca della massima potenza estraibile in ogni condizione di mare, a questo scopo è stata utilizzata la funzione “ricerca massima potenza” già descritta nel paragrafo precedente, che consente di imporre una coppia resistente variabile e funzione della massima coppia disponibile all’albero.

I risultati di questa ricerca sono riportati nelle successive tabelle

<b>Potenza [W]</b>							
SS	H	T	Lunghezza pala [m]				
	[m]	[s]	0,15	0,25	0,5	0,75	1,5
2	0,3	2,74	0,738472	1,022203	1,224761	1,479349	1,563136
3	1	5,00	0,546646	8,288235	11,62451	16,87891	23,75937
4	2	7,07	0,214248	4,557102	25,54793	58,22508	87,40213
5	3,5	9,36	0,420651	3,021575	50,60647	127,6188	194,2261
6	5	11,19	0,259329	1,860797	24,51324	150,6173	348,8429
7	8	14,15	0,140475	0,982221	14,36832	63,62775	543,2807
8	12	17,32	0,085098	0,576547	8,18138	39,84838	605,1983
9	18	21,22	0,052617	0,347443	4,762941	22,69878	319,7822

Tabella 4.11 – Risultati simulazioni (potenza)

<b>rendimento [%]</b>							
SS	H	T	Lunghezza pala [m]				
	[m]	[s]	0,15	0,25	0,5	0,75	1,5
2	0,3	2,74	0,710069	0,982888	1,177655	1,422451	1,503016
3	1	5,00	0,025907	0,392807	0,550925	0,799948	1,126037
4	2	7,07	0,001799	0,038276	0,21458	0,48904	0,734102
5	3,5	9,36	0,000871	0,006256	0,104782	0,264237	0,402149
6	5	11,19	0,00022	0,001576	0,020767	0,127601	0,295534
7	8	14,15	3,67E-05	0,000257	0,003755	0,016626	0,141964
8	12	17,32	8,1E-06	5,49E-05	0,000779	0,003795	0,057636
9	18	21,22	1,82E-06	1,2E-05	0,000165	0,000784	0,01105

Tabella 4.12 – Risultati simulazioni (rendimento)

Gli stessi risultati possono essere visualizzati nei successivi grafici:

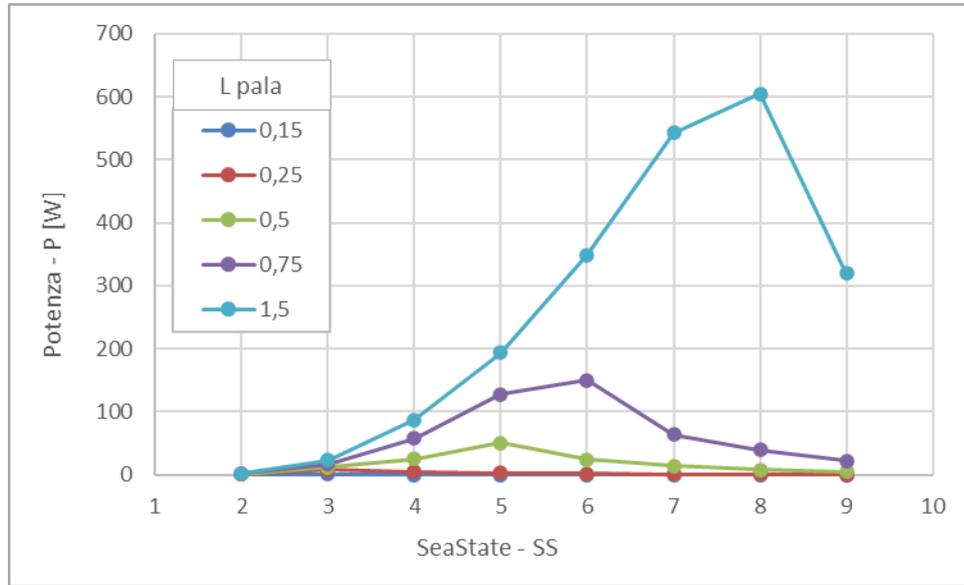


Figura 4.28 – Potenza estratta dal Seaspoon equipaggiato con pala piana al variare del seastate

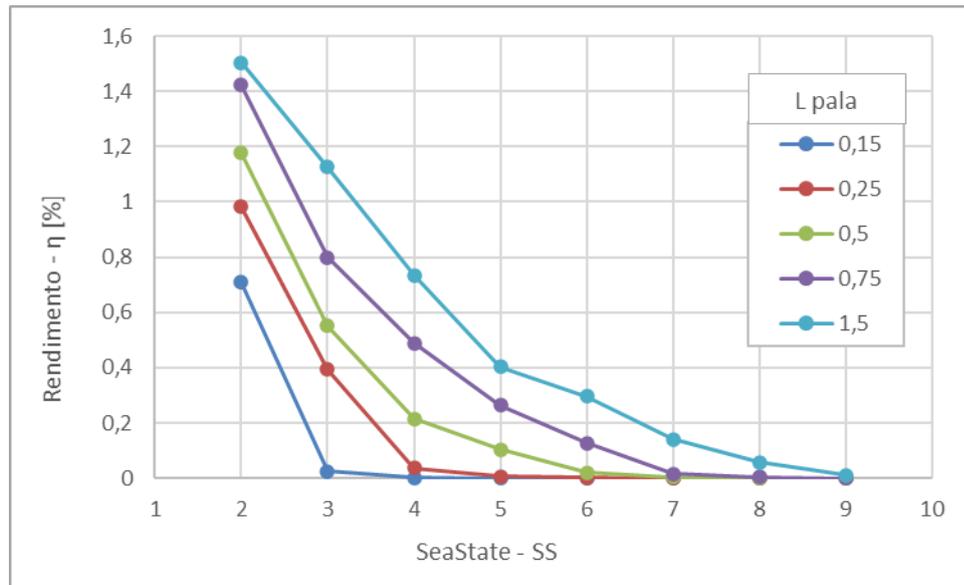


Figura 4.29 – Rendimento del Seaspoon equipaggiato con pala piana al variare del seastate

Come si può notare, al crescere del *seastate* si registra certamente un aumento della potenza estraibile, tuttavia si ha un drastico crollo del rendimento della macchina.

Tali risultati, considerando che è stato ipotizzato un generatore in grado di variare la coppia resistente e dunque la potenza estratta in funzione dell'effettiva coppia disponibile, sono da considerarsi ottimistici.

Nonostante questo, il rapido crollo dei rendimenti che si sperimenta al crescere del *seastate* non incoraggia ulteriori ricerche su dispositivi equipaggiati con profili a resistenza

### **4.3.3 MODELLO EXCEL-VBA SEASPOON EQUIPAGGIATO CON ROTORE DARRIEUS**

L'obiettivo del codice di calcolo è quello di fornire una panoramica di prima approssimazione delle prestazioni di una turbina Darrieus disposta orizzontalmente, investita da un flusso d'acqua con moto uniforme o con moto ondoso di caratteristiche note. Le principali funzionalità del programma sono:

- Determinazione del modello d'onda a partire dai parametri della stessa
- Calcolo Semplice: consente di simulare il comportamento dinamico della turbina per determinati input
- Ricerca della velocità di cut-in  $\omega_0$  della turbina
- Costruzione dei grafici  $C_p$  – TSR, potenza estratta – velocità di rotazione, coppia generata – velocità di rotazione

In generale, i principali punti di forza del codice sono dati dalla sua semplicità, il ridotto sforzo computazionale, i tempi di simulazione relativamente contenuti e la possibilità di impostare e gestire un vasto numero di parametri in ingresso. I principali limiti del codice di calcolo verranno esposti successivamente: per ovviare a queste problematiche è stata effettuata una calibrazione sulla base di dati sperimentali presenti in letteratura.

Il codice di calcolo consente di valutare le forze generate dall'interazione fluido-pala e determinare la coppia generata. Il calcolo di queste quantità è di fondamentale importanza per effettuare una previsione della potenza estraibile dal generatore in esame.

Per lo studio e la progettazione di un Darrieus occorre definire alcuni parametri fondamentali della macchina, elencati di seguito:

- Grandezze caratteristiche del profilo palare, riportate in Figura 4.30
- Numero di pale: l'analisi prestazionale verrà condotta per una configurazione tripala, schematizzata in Figura 4.31
- Solidità delle pale

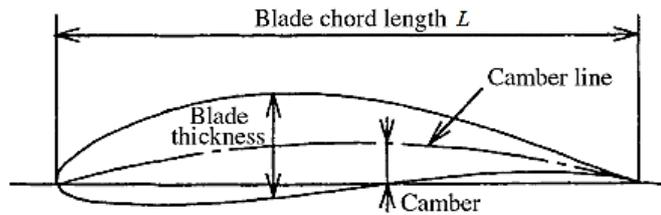


Figura 4.30 – Esempio di profilo palare

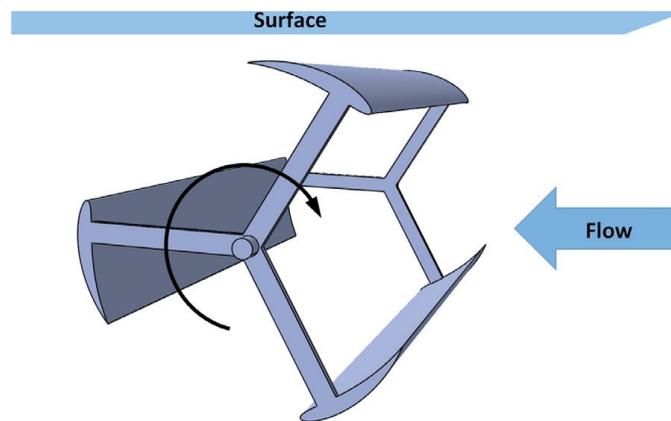


Figura 4.31 – Schema Darrieus tripala

La solidità è definita come il rapporto tra l'intera area della pala e l'area spazzata da essa.

$$\tilde{\sigma} = \frac{nc}{2\pi R} \quad (4.11)$$

Dove:

$c$  = la lunghezza della corda

$n$  = il numero di pale

$R$  = il raggio della turbina.

Questo importante parametro adimensionale tiene conto delle dimensioni, del profilo palare e del numero di pale della turbina. A livello puramente teorico, la potenza risulta proporzionale alla solidità. Tuttavia, tenendo conto degli effetti fluidodinamici che caratterizzano il comportamento reale della turbina, quali la generazione di moti vorticosi, interazione pala-scia e l'effetto del flusso curvo al diminuire del raggio, si evince che aumentare la solidità non risulta sempre la scelta più conveniente [65]. Occorre quindi andare a scegliere opportunamente la corda  $c$ , il numero di pale  $n$  e il raggio  $R$  del rotore. In letteratura sono presenti numerosi risultati di campagne sperimentali, volte a determinare la solidità ottimale per diverse condizioni operative.

#### 4.3.3.1 DESCRIZIONE MODELLO

Il modello è del tipo a parametri concentrati, ove le pale sono disposte a  $120^\circ$  tra di loro, e per ognuna di esse viene calcolato ad ogni istante la velocità relativa, l'angolo di incidenza

– da cui si ricavano i coefficienti di Lift e Drag, la forza tangenziale e la conseguente coppia attiva della turbina.

La forza agente sulla singola pala può essere scomposta in due componenti, come in figura, ortogonali tra loro:

- La forza di Drag  $\vec{F}_d$  agente lungo la direzione della velocità relativa  $\vec{W}$
- La forza di Lift  $\vec{F}_l$  ortogonale a  $\vec{F}_d$

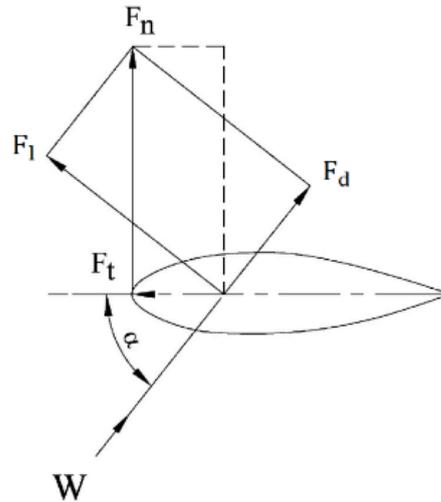


Figura 4.32 – Scomposizione delle forze agenti sulla pala

Noto l'angolo di incidenza  $\alpha$  è possibile determinare le espressioni dei coefficienti di forza normale  $c_n$  e tangenziale  $c_t$ , a partire dai valori noti dei coefficienti di portanza  $c_L$  e di resistenza  $c_D$ , dipendenti dall'angolo di incidenza  $\alpha$  e dal numero di Reynolds [66].

Il procedimento è una banale scomposizione delle forze  $\vec{F}_d$  e  $\vec{F}_l$  lungo le direzioni normale e tangenziale alla camber line del profilo palare.

Di seguito vengono riportate le espressioni dei coefficienti:

$$c_t = c_L \sin \alpha - c_D \cos \alpha \quad (4.12)$$

$$c_n = c_L \cos \alpha + c_D \sin \alpha \quad (4.13)$$

Dopo aver determinato i coefficienti e supponendo noto il modulo della velocità relativa  $W$ , si definiscono le forze agenti sulla singola pala scomposte lungo la direzione tangenziale e normale alla camber line.

$$F_t = \frac{1}{2} \rho c dh W^2 c_t \quad (4.14)$$

$$F_n = \frac{1}{2} \rho c dh W^2 c_n \quad (4.15)$$

Dove:

- $\rho$  è la densità del fluido
- $c$  è la corda palare
- $dh$  rappresenta l'altezza dell'elemento di pala

Le espressioni ottenute sono dunque dipendenti dall'angolo azimutale  $\theta$  e, nel caso di Darrieus Troposkein (quindi con raggio variabile), anche dalla distanza dell'elemento considerato dall'asse di rotazione.

In Figura 4.33 vengono riportate le curve dei coefficienti di portanza e resistenza del profilo palare utilizzato, NACA 0018, al variare dell'angolo di incidenza.

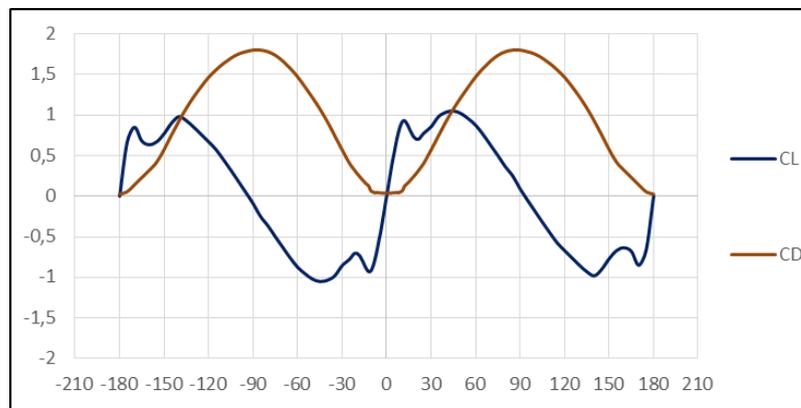


Figura 4.33 – Curve dei coefficienti di lift e di drag per profilo NACA0018

I coefficienti di lift e di drag, oltre a dipendere dall'incidenza, sono funzione del numero di Reynolds. Sulla base di valori presenti in letteratura, riportati in Tabella 4.14, è stata implementata una procedura che calcola  $C_L$  e  $C_D$  per ogni istante della discretizzazione temporale. Per ciascun profilo viene preso in input il numero di Reynolds istantaneo: mediante interpolazione dei valori in Tabella 4.13 si costruisce una nuova tabella contenente i coefficienti di lift e drag in funzione del solo angolo di incidenza. Noto il valore di quest'ultimo, sarà quindi possibile determinare i valori di  $C_L$  e  $C_D$  cercati.

In Tabella 4.13 vengono mostrati gli input e gli output della procedura, che si ripete ad ogni istante di tempo.

Profilo	Re	Incidenza		CL	CD
	[-]	[°]	[rad]	[-]	[-]
1	825344	-3,95	-0,07	-1,74	0,07
2	782317	0,06	0,00	0,03	0,07
3	1557022	2,60	0,05	1,14	0,07

Tabella 4.13 – Parametri fluidodinamici del profilo

NACA0018													
CL													
alpha		Reynolds											
[deg]		0	10000	20000	40000	80000	160000	360000	700000	1000000	2000000	5000000	50000000
-180	-3,14159	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-175	-3,05433	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66
-170	-2,96706	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
-165	-2,87979	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,6	0,68	0,68	0,68	0,68	0,6	0,68
-160	-2,79253	0,635	0,635	0,635	0,633	0,635	0,635	0,635	0,635	0,635	0,635	0,635	0,635
-155	-2,70526	0,67	0,67	0,67	0,667	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
-150	-2,61799	0,77	0,77	0,77	0,677	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77
-145	-2,53073	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
-140	-2,44346	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
-135	-2,35619	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
-130	-2,26893	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
-125	-2,18166	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76
-120	-2,0944	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
-115	-2,00713	0,575	0,575	0,575	0,575	0,575	0,575	0,575	0,575	0,575	0,575	0,575	0,575
-110	-1,91986	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
-105	-1,8326	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,328	0,32	0,32	0,32
-100	-1,74533	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185
-95	-1,65806	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
-90	-1,5708	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09
-85	-1,48353	-0,23	-0,23	-0,23	-0,23	-0,23	-0,23	-0,25	-0,23	-0,23	-0,23	-0,23	-0,23
-80	-1,39626	-0,365	-0,365	-0,365	-0,365	-0,365	-0,365	-0,365	-0,365	-0,365	-0,365	-0,365	-0,365
-75	-1,309	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5
-70	-1,22173	-0,63	-0,63	-0,63	-0,63	-0,63	-0,63	-0,63	-0,63	-0,63	-0,63	-0,63	-0,63
-65	-1,13446	-0,76	-0,76	-0,76	-0,76	-0,76	-0,76	-0,76	-0,76	-0,76	-0,76	-0,76	-0,76
-60	-1,0472	-0,875	-0,875	-0,875	-0,875	-0,875	-0,875	-0,875	-0,875	-0,875	-0,875	-0,875	-0,875
-55	-0,95993	-0,955	-0,955	-0,955	-0,955	-0,955	-0,955	-0,955	-0,955	-0,955	-0,955	-0,955	-0,955
-50	-0,87266	-1,02	-1,02	-1,02	-1,02	-1,02	-1,02	-1,02	-1,02	-1,02	-1,02	-1,02	-1,02
-45	-0,7854	-1,05	-1,05	-1,05	-1,05	-1,05	-1,05	-1,05	-1,05	-1,05	-1,05	-1,05	-1,05
-40	-0,69813	-1,035	-1,035	-1,035	-1,035	-1,035	-1,035	-1,035	-1,035	-1,035	-1,035	-1,035	-1,035
-35	-0,61087	-0,98	-0,98	-0,98	-0,98	-0,98	-0,98	-0,98	-0,98	-0,98	-0,98	-0,98	-0,98
-30	-0,5236	-0,855	-0,855	-0,855	-0,855	-0,855	-0,855	-0,855	-0,855	-0,855	-0,855	-0,855	-0,855
-25	-0,43633	-0,5775	-0,5775	-0,5798	-0,584	-0,5963	-0,6321	-0,7724	-0,9326	-1,0107	-1,1468	-1,2925	-1,2925
-22	-0,38397	-0,4172	-0,4172	-0,4198	-0,4265	-0,443	-0,5026	-0,705	-0,8867	-0,9696	-1,1127	-1,2714	-1,2714
-20	-0,34907	-0,3111	-0,3111	-0,3151	-0,3236	-0,3472	-0,4382	-0,6997	-0,8877	-0,9707	-1,1172	-1,2768	-1,2768
-19	-0,33161	-0,25905	-0,25905	-0,26355	-0,2732	-0,30375	-0,4292	-0,7158	-0,90135	-0,9833	-1,12775	-1,2853	-1,2853
-18	-0,31416	-0,207	-0,207	-0,212	-0,2228	-0,2603	-0,4202	-0,7319	-0,915	-0,9959	-1,1383	-1,296	-1,296
-17	-0,29671	-0,15605	-0,15605	-0,1617	-0,17575	-0,2315	-0,4549	-0,7663	-0,9399	-1,01805	-1,155	-1,3038	-1,3038
-16	-0,27925	-0,1051	-0,1051	-0,1114	-0,1287	-0,2027	-0,4896	-0,8007	-0,9648	-1,0402	-1,1695	-1,3067	-1,3067
-15	-0,2618	-0,0568	-0,0568	-0,0643	-0,0888	-0,21415	-0,55665	-0,8405	-0,9938	-1,0624	-1,1813	-1,3004	-1,3004
-14	-0,24435	-0,0085	-0,0085	-0,0172	-0,0489	-0,2256	-0,6237	-0,8803	-1,0175	-1,0793	-1,1813	-1,2808	-1,2808
-13	-0,22689	-0,0426	-0,0426	0,0215	-0,0314	-0,3332	-0,6923	-0,9104	-1,0289	-1,0804	-1,1662	-1,243	-1,243
-12	-0,20944	0,0767	0,0767	0,0602	-0,0139	-0,4408	-0,7488	-0,9279	-1,0245	-1,0664	-1,1296	-1,1884	-1,1884
-11	-0,19199	0,1125	0,1125	0,08025	-0,11235	-0,5531	-0,7852	-0,9249	-0,9973	-1,0284	-1,0772	-1,1211	-1,1211
-10	-0,17453	0,1423	0,1423	0,1003	-0,2108	-0,6248	-0,7949	-0,8983	-0,9541	-0,9751	-1,0111	-1,0404	-1,0404
-9	-0,15708	0,1584	0,1584	0,0682	-0,3544	-0,6606	-0,7781	-0,8526	-0,8904	-0,9067	-0,9314	-0,9525	-0,9525
-8	-0,13963	0,1501	0,1501	-0,0214	-0,4428	-0,6589	-0,7373	-0,7879	-0,8156	-0,8256	-0,8439	-0,8538	-0,8538
-7	-0,12217	0,1182	0,1182	-0,1161	-0,4758	-0,6224	-0,6724	-0,71	-0,7291	-0,7362	-0,7449	-0,77	-0,77
-6	-0,10472	0,0839	0,0839	-0,1582	-0,4573	-0,5615	-0,596	-0,6228	-0,6328	-0,66	-0,66	-0,66	-0,66
-5	-0,08727	0,0577	0,0577	-0,1788	-0,4117	-0,4154	-0,5068	-0,524	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55
-4	-0,06981	0,0368	0,0368	-0,1788	-0,3495	-0,388	-0,4114	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44
-3	-0,05236	0,0233	0,0233	-0,155	-0,2688	-0,2924	-0,3088	-0,33	-0,33	-0,33	-0,33	-0,33	-0,33
-2	-0,03491	0,0154	0,0154	-0,1135	-0,1833	-0,1935	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22
-1	-0,01745	0,0045	0,0045	-0,0607	-0,0936	-0,0889	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabella 4.14 – Valori del coefficiente di portanza in funzione di Re e incidenza

In ascisse la tabella presenta il numero di Reynolds, mentre in ordinate l'angolo di incidenza, espresso sia in gradi che radianti. Si ricorda che tutti i valori vengono determinati per un range di angoli di incidenza compreso tra  $-180^\circ$  e  $180^\circ$ : si rende quindi necessario disporre di polari che arrivino ad angoli di incidenza ben oltre lo stallo, spesso difficili da reperire.

La coppia  $\tilde{T}$  generata dalla singola pala è quindi funzione dell'angolo azimutale  $\theta$  vale:

$$\tilde{T}(\theta) = \int_0^H F_t(h, \theta) r(h) dh \quad (4.16)$$

Con  $r$  distanza dall'asse di rotazione.

Nella configurazione ad H la distanza dall'asse di rotazione  $r$  risulta essere indipendente dall'altezza, quindi questo termine può essere portato fuori dall'integrale. Allo stesso modo, anche la forza tangenziale  $F_t$  non dipende dall'altezza ma solo dall'angolo azimutale  $\theta$ .

Si può riscrivere quindi il termine  $T(\theta)$ :

$$\tilde{T}(\theta) = F_t(\theta) r \int_0^H dh = F_t(\theta) r H \quad (4.17)$$

Dove con H è indicata l'altezza della pala.

La potenza generata viene quindi definita come

$$P = \tilde{T}(\theta)\omega \quad (4.18)$$

Il coefficiente di potenza rappresenta, invece, un importante parametro prestazionale che per le turbine Darrieus eoliche ha un valore che oscilla tra il 20% e il 40% ed è determinato dalla seguente espressione:

$$C_p = \frac{P}{P_i} \quad (4.19)$$

Dove  $P_i$  è definita dalla seguente relazione:

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (4.20)$$

Questo parametro esprime il rapporto tra la potenza prodotta e la potenza fornita dal fluido in moto.

È possibile ricavare un'ulteriore espressione del coefficiente di potenza a partire dalla coppia media su un giro.

$$T_{av} = \frac{n}{2\pi} \int_0^{2\pi} T(\theta) d\theta \quad (4.21)$$

Con n pari al numero di pale.

Dalla coppia media si definisce il coefficiente di coppia  $C_M$  pari a:

$$C_M = \frac{T_{av}}{\frac{1}{2} \rho A V_\infty^2 R} \quad (4.22)$$

Dove A rappresenta l'area frontale del rotore che nel caso di pale dritte vale:

$$A = 2RH \quad (4.23)$$

Una volta definito il coefficiente di coppia è possibile scrivere:

$$C_p = \frac{P}{P_i} = \frac{T_{av} \omega}{\frac{1}{2} \rho A V_\infty^3} = C_M TSR \quad (4.24)$$

Con  $TSR = \frac{r\omega}{V} = \frac{U}{V}$

Dal grafico in Figura 4.34 è possibile analizzare la variazione del coefficiente di potenza all'aumentare del numero di pale e quindi della solidità.

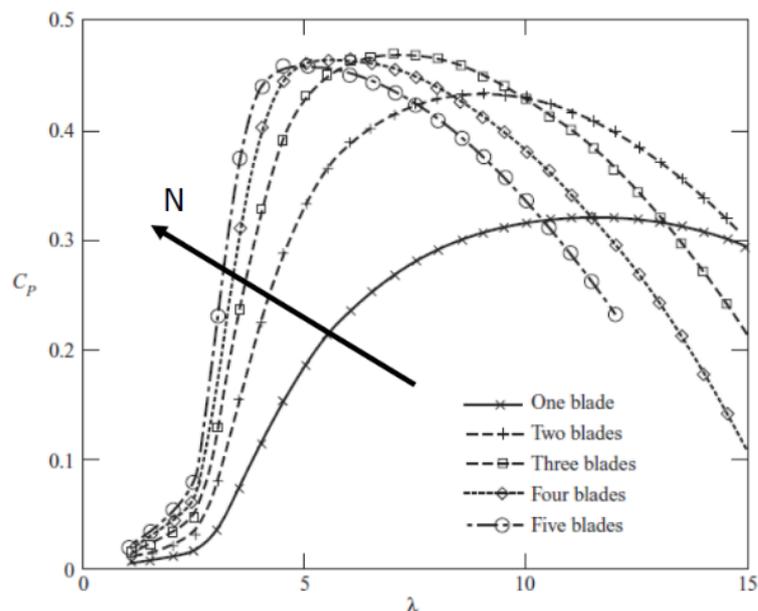


Figura 4.34 – Effetti del numero di pale sul coefficiente di potenza [67]

Fissando la dimensione delle pale per tutte le curve in figura è possibile fare alcune osservazioni.

- Per un basso numero di pale e quindi basse solidità, la curva del coefficiente di potenza risulta molto piatta intorno al massimo con valori di  $C_p$  relativamente bassi. Il risultato è dovuto alle perdite d'attrito, che sono direttamente proporzionali al cubo della velocità.

- Per un elevato numero di pale e quindi alte solidità le curve sono molto ripide, sensibili alle variazioni del TSR.
- La configurazione tripala rappresenta quindi la condizione ottimale tra le due condizioni estreme. Essa presenta una curva non eccessivamente appuntita.

### LA MODALITÀ “CALCOLO SEMPLICE”

Questa funzionalità, già presente nella prima versione del codice di calcolo, esegue una simulazione dinamica del dispositivo. Si compone di tre passaggi.

- Una prima parte che prende il nome di “Inizializzazione” in cui vengono cancellati tutti i dati generati da un calcolo precedente.
- Successivamente, nel caso di moto ondosio, viene determinato il numero d’onda angolare  $k$  mediante un’apposita procedura descritta nel paragrafo precedente.
- L’ultimo passaggio prevede il vero e proprio calcolo con la generazione degli output e dei grafici.

La macro consiste in un ciclo while che si interrompe una volta raggiunto il numero di cicli di calcolo impostati nei parametri iniziali di simulazione in Tabella 4.15

Ad ogni iterazione vengono compilate due tabelle: una per l’istante di tempo  $i$  e l’altra per l’istante  $i+1$ , riportate di seguito.

valori istante $i$	
$t_i$	9,4856 [s]
$\theta_i$	53,7 [rad]
$\omega_i$	3,74 [rad/s]
$\alpha_i$	-0,33 [rad/s <sup>2</sup> ]
$C_i$ pala	-0,37 [Nm/m]
$C_{res}$	-1,00 [Nm/m]
$C_i$	-1,368 [Nm/m]
$P_i$ pala	3,427 [W/m]
$P_i$ estratta	3,736 [W/m]

valori istante $i+1$	
$t_{i+1}$	9,5023 [s]
$\theta_{i+1}$	53,76 [rad]
$\omega_{i+1}$	3,73 [rad/s]

Tabella 4.15 – Valori istantanei

Il programma calcola per l’ $i$ -esimo istante tutte le grandezze presenti nella prima tabella, che vengono elaborate per fornire i valori nella matrice degli output. Al tempo stesso nella

seconda tabella vengono calcolati i parametri di simulazione relativi l'istante successivo: questi vengono quindi copiati nella prima tabella, generando nuovi valori di output. Il ciclo si ripete fino alla fine della simulazione.

Di seguito si riportano le relazioni per il calcolo dei parametri all'istante  $i+1$ :

$$\alpha_i = \frac{C_i}{I} \quad (4.25)$$

$$t_{i+1} = t_i + \Delta t \quad (4.26)$$

$$\theta_{i+1} = \theta_i + \omega_i \Delta t \quad (4.27)$$

$$\omega_{i+1} = \omega_i + \alpha_i \Delta t \quad (4.28)$$

La successiva Figura 4.35 mostra una schermata di una generica simulazione. Il comportamento del dispositivo, analogamente a quanto mostrato precedentemente, viene visualizzato mediante un'opportuna schermata dinamica:

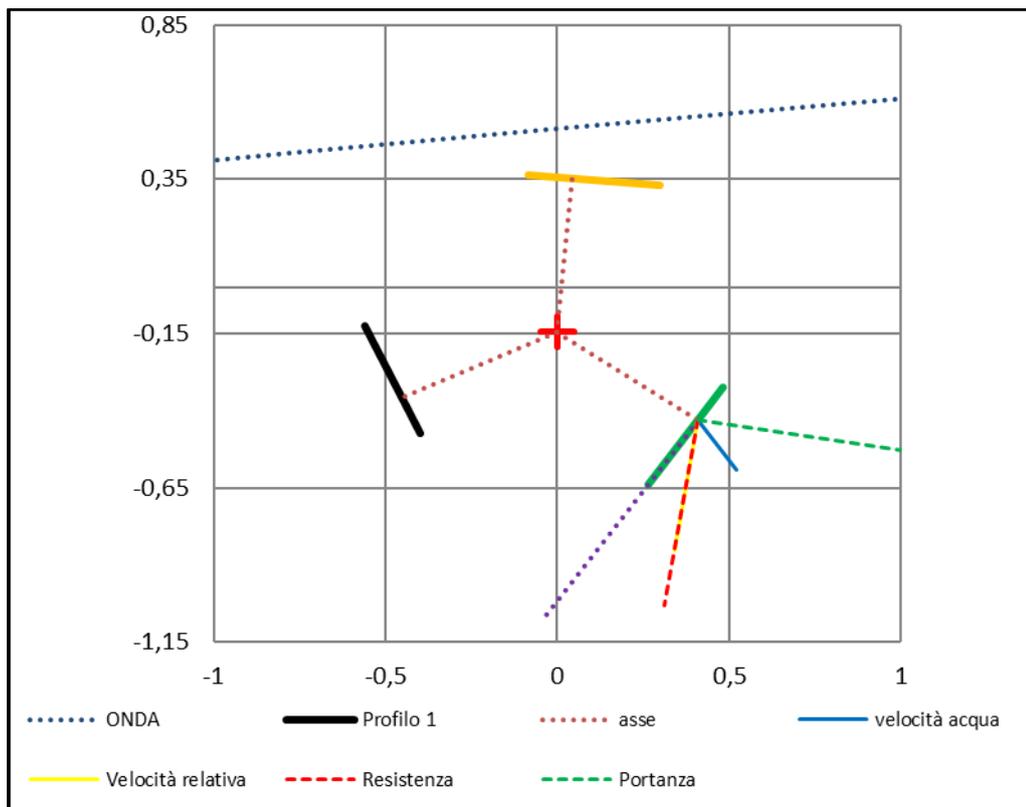


Figura 4.35 – Schermata dinamica simulazione

Gli output generati dalla procedura di calcolo vengono scritti all'interno di una matrice che presenta in ordinate gli istanti di tempo e in ascisse le differenti quantità calcolate. La matrice risulta divisa in tre parti, la prima riporta una serie di grandezze riferite all'intera turbina.

Di seguito si elencano quelle di maggiore importanza:

- La velocità angolare  $\omega$  che viene fornita sia in rad/s che in RPM, questa grandezza è necessaria per il calcolo della potenza estratta nonché per le sollecitazioni che subisce la turbina Darrieus in oggetto.
- Le coppie disponibili divise in fluidodinamica, gravitazionale e totale (data dalla somma delle due precedenti): queste rappresentano quanto viene fornito dal fluido in termini di coppia.
- Coppia e potenza estratta, parametri prestazionali di fondamentale importanza. A seguire sono presenti le caselle dedicate ai rendimenti.

La seconda parte della matrice fornisce grandezze per ciascuno dei profili. A titolo d'esempio, in Tabella 4.16 viene riportata la sola parte riferita al Profilo 1.

PROFILO 1									
angolo dell'asse	angolo di incidenza	v rel	Re	CD	resistenza	Coppia resistenza	CL	portanza	Coppia portanza
[°]	[°]	[m/s]	[-]	[-]	[N]	[N]	[-]	[N]	[N*m]
0	4,513658	2,876834	367595,5	0,07177	6,830828159	-1,021446457	1,933782522	184,0497	2,172616564
2,975912	4,401815	2,939644	375621,2	0,071603	7,115686557	-1,064204635	1,89692995	188,5118	2,170259737
5,951824	4,285058	3,000975	383457,9	0,071428	7,397562403	-1,106532547	1,857825034	192,4099	2,156492284
8,927737	4,163795	3,060757	391096,7	0,071246	7,675629801	-1,148305562	1,816593192	195,71	2,131516706
11,90365	4,038396	3,11892	398528,7	0,071058	7,949080039	-1,189401467	1,7733535	198,3817	2,095653863
14,87956	3,909197	3,175403	405745,9	0,0709	8,22133551	-1,230331099	1,720046625	199,4507	2,039646063
17,85547	3,776505	3,230143	412740,5	0,070754	8,489720188	-1,270692792	1,66166225	199,3812	1,969828306
20,83139	3,640601	3,283086	419505,4	0,070605	8,751764362	-1,310115473	1,601864358	198,5583	1,891199723
23,8073	3,501741	3,334176	426033,5	0,070452	9,006738608	-1,348488377	1,540765907	196,9751	1,804652661
26,78321	3,36016	3,383362	432318,5	0,070296	9,253937584	-1,385704266	1,47847062	194,629	1,711146656
29,75912	3,216077	3,430598	438354,2	0,070138	9,492681862	-1,421659721	1,415073987	191,5211	1,611697991

Tabella 4.16 – Esempio di output profilo 1

In questa tabella risultano di fondamentale importanza le forze di resistenza e portanza, responsabile della coppia generata.

Infine, l'ultima parte della matrice è dedicata a:

- Analisi di coppia: vengono calcolati i valori di coppia mediati su un intero ciclo
- Velocità: viene trascritta la velocità media del flusso, necessaria per il calcolo del TSR.

Alcuni dei risultati più interessanti possono essere analizzati sotto forma di grafici temporali, potendo visualizzare variabili quali la distribuzione della coppia,

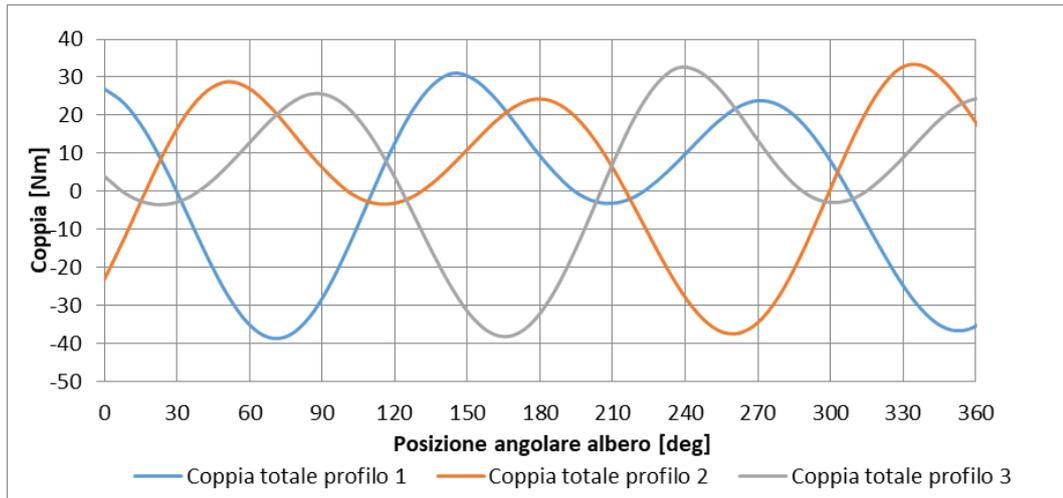


Figura 4.36 – Distribuzione delle coppie dei tre profili in funzione della posizione angolare dell'albero

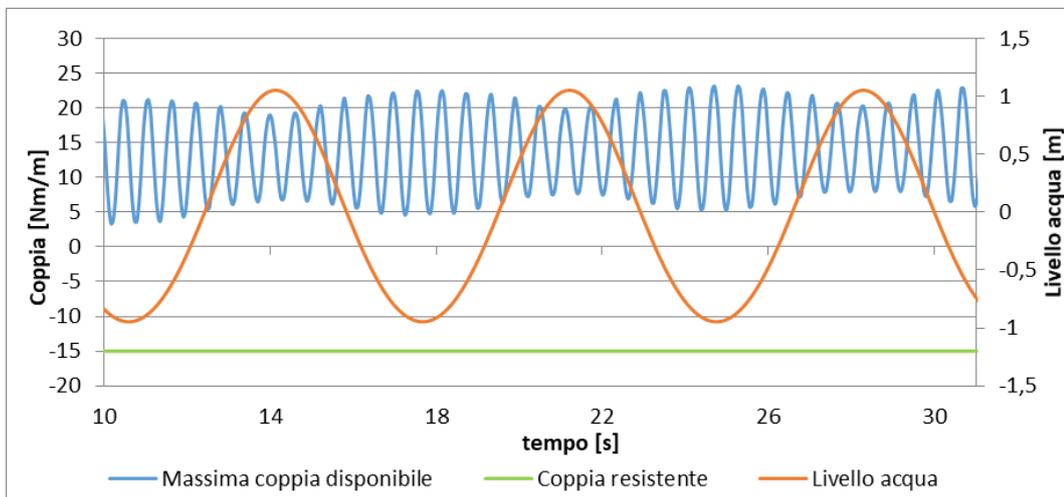


Figura 4.37 – Visualizzazione coppia motrice e coppia resistente

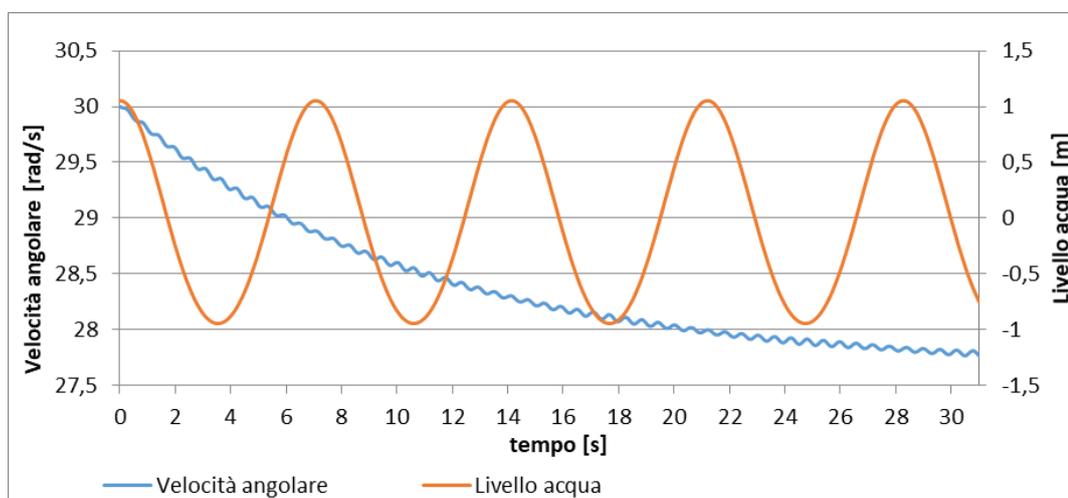


Figura 4.38 – Variazione della velocità angolare

## DETERMINAZIONE CURVE CP-TSR

La realizzazione del grafico  $C_p$ -TSR risulta fondamentale per valutare le potenzialità a regime della turbina in una data condizione operativa. Si sfrutta la possibilità di poter impostare una coppia resistente variabile, pari a quella generata istante per istante. In questo modo l'accelerazione angolare risulta nulla, e dunque la valutazione energetica viene effettuata a velocità di rotazione costante.

Il programma prevede di inserire in input gli estremi di un intervallo delle velocità di regime  $\omega_R$ , come in Tabella 4.17

<b>N_R</b>	<b>v_media</b>	<b>C_media</b>	<b>Tsr</b>	<b>P</b>	<b>Cp</b>
<b>[RPM]</b>	<b>[m/s]</b>	<b>[N*m]</b>	<b>[-]</b>	<b>[W]</b>	<b>[-]</b>
0,2	0,34353	167,1872	0,0914502	3,501561	0,05758
0,7	0,341401	127,355	0,3374085	9,780161	0,163855
1,3	0,341098	110,3673	0,5833142	14,63968	0,245924
1,8	0,342672	99,8546	0,8251147	18,82215	0,311849
2,3	0,345031	82,80574	1,0622786	20,23326	0,328398
2,9	0,346738	55,27467	1,2986618	16,59327	0,265361
3,4	0,34696	28,08618	1,5392861	10,00001	0,159614
3,9	0,345917	6,998176	1,7861136	2,882533	0,046427
4,5	0,344551	-10,2493	2,0363396	-4,79409	-0,07814
5,0	0,343764	-27,0464	2,2847008	-14,1615	-0,2324

Tabella 4.17 – Tabella Input-Output modalità “Regime”

I valori intermedi vengono automaticamente calcolati, prevedendo un gap uguale tra una velocità e la sua successiva.

La macro “Regime” per la determinazione delle curve  $C_p$ -TSR si compone di 3 passaggi fondamentali.

```
Dim velocita_pala(1 To 10) As Double

Sheets("pala_piana").Range("D31").Value = 2

Range("c4:d13").ClearContents
Range("b24:v100").ClearContents

Sheets("CP-TSR").Select

For y = 1 To 10
    velocita_pala(y) = Range("b" & y + 3).Value
Next y
```

Figura 4.39 – Prima parte macro “Regime”

Nella prima parte viene definito un array lineare, denominato “velocità\_pala”, all’interno del quale vengono scritti tutti i valori della velocità di rotazione a regime definite precedentemente.

Questo servirà da input per l’esecuzione della macro che prosegue in Figura 4.40

```

For c = 1 To 10

    Sheets("pala_piana").Range("c6").Value = velocita_pala(c)

    v_acqua_tot = 0
    coppia_tot = 0

```

Figura 4.40 – Seconda parte macro “Regime”

Ciascuna  $\omega_R$  viene utilizzata come velocità di rotazione iniziale per lo svolgimento di una simulazione di “calcolo semplice”. Al termine di ogni procedura di calcolo la macro determina, anche in questo caso, la variabile “ciclo”, definita nel paragrafo precedente, necessaria per fornire valori medi di coppia generata e velocità del flusso.

```

ciclo = Round(Sheets("pala_piana").Range("c11").Value / Sheets("pala_piana").Range("c4").Value, 0)

For k = i - ciclo To i
    v_acqua_tot = Sheets("output").Range("AZ" & (5 + k)).Value + v_acqua_tot
    coppia_tot = Sheets("output").Range("K" & (5 + k)).Value + coppia_tot
Next k

Cells(c + 3, 3).Value = v_acqua_tot / (ciclo)
Cells(c + 3, 4).Value = coppia_tot / (ciclo)

```

Figura 4.41 – Terza parte macro “Regime”

I valori determinati vengono trascritti in Tabella 4.17. È, quindi, possibile determinare il TSR, la potenza P e il coefficiente di potenza.

Il TSR è definito come il rapporto tra la velocità periferica della turbina e la velocità assoluta del flusso. Tuttavia, nella condizione di funzionamento in moto ondoso, nasce la problematica di definire un valore rappresentativo della velocità associata al flusso. È stata quindi riadattata questa quantità adimensionale considerando la velocità media calcolata sull’ultimo ciclo.

Di seguito si riportano le espressioni utilizzate per la determinazione di TSR, Potenza estratta e  $C_P$ .

$$TSR = \frac{N_R \pi R}{30 v_{media}} \quad (4.29)$$

$$P = N_R C_{media} \frac{\pi}{30} \quad (4.30)$$

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho D L V_{media}^3} \quad (4.31)$$

Con  $N_R$  velocità di rotazione a regime.

I risultati sono salvati in una tabella dedicata, dalla quale è possibile costruire le curve Cp-TSR, delle quali è mostrato un esempio nella figura seguente

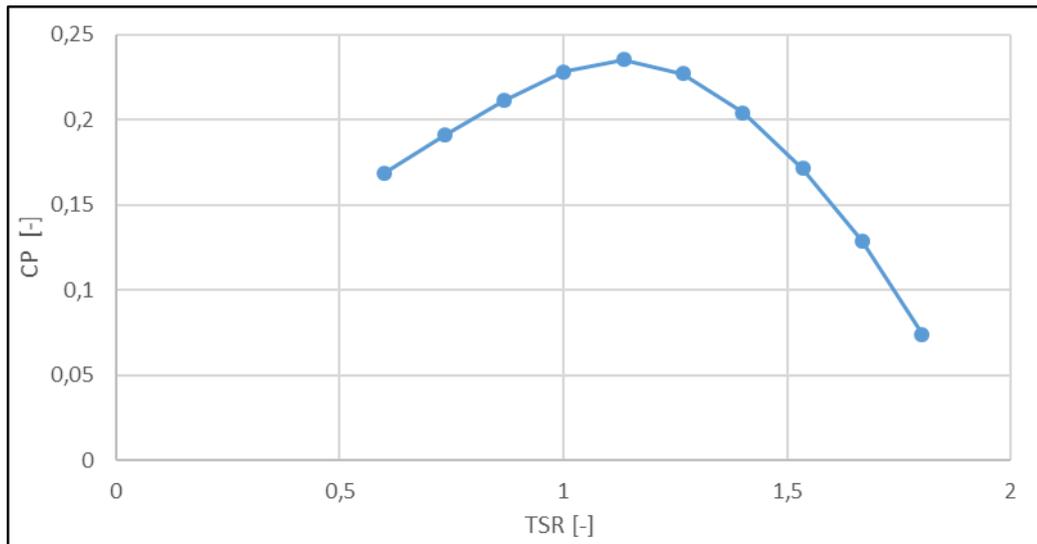


Figura 4.42 – Coefficiente di potenza al variare di TSR per una generica simulazione

#### 4.3.3.2 I PRINCIPALI LIMITI DEL CODICE DI CALCOLO

Alla semplicità costruttiva della turbina Darrieus si contrappone la notevole complessità dei fenomeni aerodinamici che si verificano durante il funzionamento della stessa. Sono state sviluppate diverse teorie che descrivono le interazioni del flusso con il rotore, modellando gli effetti secondari che ne conseguono. Tra i principali modelli aerodinamici, si citano i metodi BEM (Blade Element Momentum), i modelli a cascata, a vortici e a pannelli. Data la finalità dell'elaborato di effettuare un'analisi preliminare delle prestazioni della turbina, si è scelto di calibrare il modello sulla base di dati sperimentali presenti in letteratura: questa scelta consente di mantenere il codice di calcolo sufficientemente semplice e veloce. La calibrazione è stata effettuata nella modalità di flusso uniforme, introducendo dei coefficienti correttivi che tengono conto di una serie di fenomeni di notevole complessità, esposti nei seguenti paragrafi.

## VARIAZIONI DI VELOCITÀ DEL FLUSSO

Durante l'attraversamento della turbina, la velocità dell'acqua è tutt'altro che uniforme. Il flusso cede energia cinetica al rotore e viene quindi rallentato. In prima approssimazione, è possibile definire tre valori di velocità del flusso:

- Velocità del flusso indisturbato a sufficiente distanza dal rotore  $V_\infty$
- Velocità del flusso nell'attraversamento del rotore  $V_{blade}$
- Velocità in uscita dal rotore  $V_{\infty,wake}$

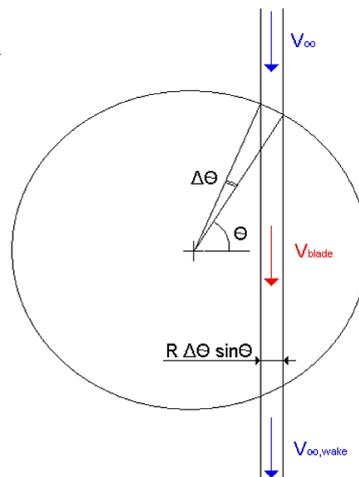


Figura 4.43 – Schematizzazione delle velocità caratteristiche del flusso [68]

Necessariamente si ha che:  $V_\infty > V_{blade} > V_{\infty,wake}$ .

Attraverso modelli BEM, come il *Single Streamtube Model*, è possibile determinare tali velocità caratteristiche, modellando il rotore come un disco attuatore e facendo considerazioni basate sulla conservazione dell'energia e della quantità di moto.

Metodi più accurati, come il *Double-Disk Multiple-Streamtube Model*, prevedono una distinzione tra la sezione anteriore, sopravento, e quella posteriore, sottovento, definendo cinque livelli di velocità:  $V_\infty > V_{blade,up} > V_{eq} > V_{blade,down} > V_{\infty,wake}$ .

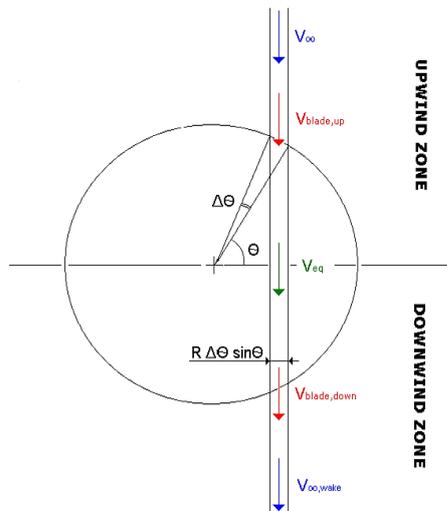


Figura 4.44 – Velocità caratteristiche secondo il Double-Disk Multiple-Streamtube Model [68]

Nella routine di calcolo non viene considerata questa variazione di velocità del flusso: in qualunque posizione si trovino, le tre pale interagiscono con un flusso la cui velocità è sempre pari a  $V_\infty$ . Questo comporta, inevitabilmente, uno scostamento degli output del calcolo rispetto al caso reale.

#### STALLO DINAMICO

Le turbine Darrieus sono caratterizzate da una rapida variazione dell'angolo di incidenza sui profili durante la rotazione. Tale fenomeno è particolarmente rilevante a bassi TSR, dove l'incidenza può superare i  $\pm 50^\circ$ , raggiungendo valori ben oltre lo stallo [66].

N. Fujisawa [69] ha condotto una campagna sperimentale volta allo studio dello stallo dinamico; le prove sono state effettuate su una turbina Darrieus monopala con profilo NACA 0018, in un canale d'acqua, con tecnica Particle Image Velocimetry (PIV). In Figura 4.45 viene mostrata la variazione dell'incidenza  $\alpha$  in funzione dell'angolo azimutale  $\theta$ . Si noti come, al diminuire del TSR, si estenda il campo di variazione di  $\alpha$ .

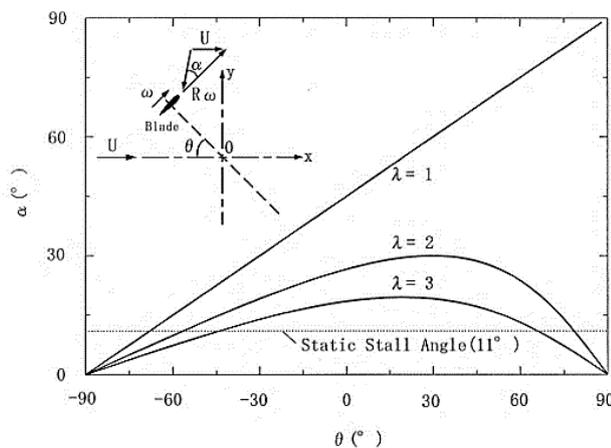


Figura 4.45 – Andamento di  $\alpha$  in funzione di  $\theta$  [69]

Lo stallo dinamico è caratterizzato dalla generazione di due coppie di vortici controrotanti. La prima si forma per valori di  $\theta$  compresi tra  $-45^\circ$  e  $0^\circ$ , la seconda per  $\theta$  che va da  $0^\circ$  a  $45^\circ$ . Il primo vortice nasce in corrispondenza del leading edge del profilo, mentre il secondo viene generato in corrispondenza del bordo d'uscita. La scia dei vortici di stallo va quindi ad impattare sul profilo che si trova nella zona sottovento, alterando gli scambi energetici fluido-pala.

Diminuendo il TSR, valori più elevati dell'incidenza comportano vortici di maggiori dimensioni: questo è chiaramente visibile in Figura 4.46

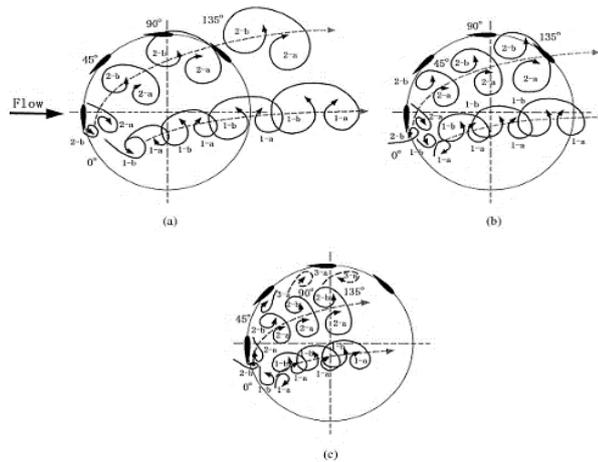


Figura 4.46 – Rappresentazione dello stallo dinamico: (a)  $TSR = 1$ , (b)  $TSR = 2$ , (c)  $TSR = 3$  [69]

Il fenomeno dello stallo dinamico comporta un aumento di rumore e di vibrazioni aeroelastiche [70], ma soprattutto modifica gli andamenti dei coefficienti aerodinamici, realizzando un'isteresi del lift e del drag. Sono stati formulati dei modelli semi empirici che permettono una correzione di  $C_L$  e  $C_D$ , considerando non solo le variazioni dell'angolo d'incidenza, ma anche della sua derivata [68].

Nel codice di calcolo, si fa riferimento a coefficienti di portanza e resistenza statici: poiché si lavora a TSR molto bassi, poco superiori all'unità, questa condizione è sicuramente oggetto di criticità. A titolo d'esempio, in Figura 4.47 si riporta l'isteresi del  $C_L$ .

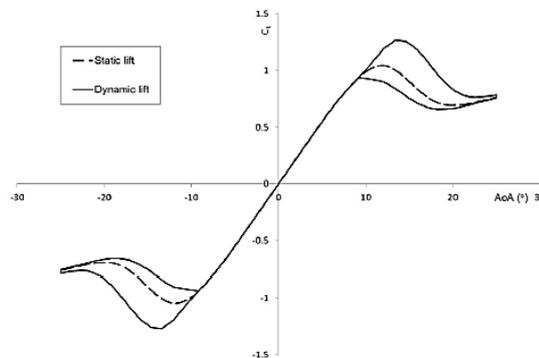


Figura 4.47 – Grafico  $C_L - \alpha$  in condizioni dinamiche

### CURVATURA VIRTUALE E PERDITE DI ESTREMITÀ

Dagli studi di Migliore et al. [71] si evince che un determinato profilo presenta un diverso comportamento aerodinamico se il flusso che lo investe è rettilineo oppure curvilineo. E' il caso della turbina Darrieus, in cui i profili seguono una traiettoria circolare. Il fenomeno può essere modellato come una curvatura del profilo stesso [66]: questa determina uno spostamento verso l'alto della curva di portanza e introduce un momento aerodinamico [70].

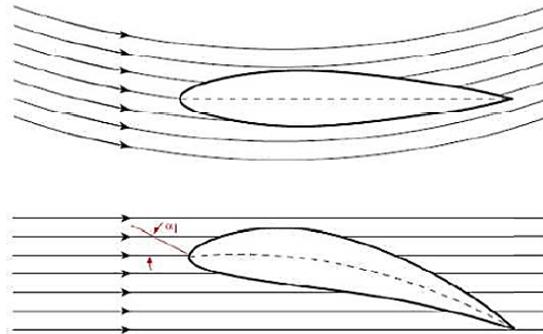


Figura 4.48 – Curvatura virtuale [22]

Un ulteriore aspetto di cui il codice di calcolo non tiene conto è dato dalle perdite di punta, associate a strutture vorticosi tridimensionali generate all'estremità della pala. Queste producono una scia che determina ulteriori perdite, alterando l'andamento del carico aerodinamico lungo il profilo.

#### 4.3.3.3 CALIBRAZIONE MODELLO

Le prove sperimentali condotte da M. Shiono et al. [72] sono finalizzate alla valutazione delle prestazioni di una turbina Darrieus per la conversione dell'energia mareomotrice. In particolare, si vuole valutare l'influenza della solidità e del numero di pale sui parametri prestazionali (potenza estratta, coppia e rendimento), per diversi valori di velocità del flusso d'acqua che investe la turbina, rispettivamente pari a 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 m/s.

In Figura 4.49 vengono illustrate le principali caratteristiche geometriche della turbina in esame. Il profilo palare è NACA 0018, mentre il valore della solidità per cui sono stati pubblicati gli output è pari a 0.366 (a cui corrisponde una corda di 115.2 mm, fissato il diametro). I test sono stati effettuati in un apposito canale d'acqua.

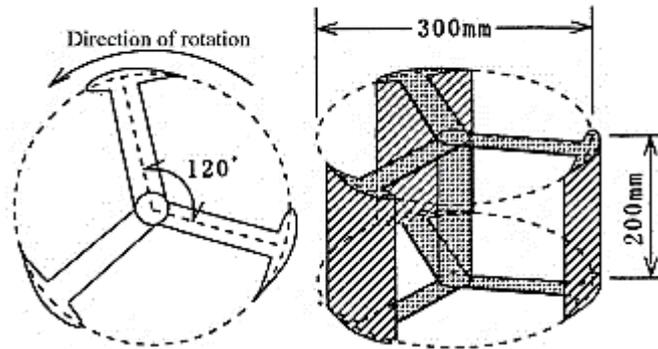


Figura 4.49 – Geometria della turbina [72]

Sono inoltre state effettuate delle misurazioni della velocità del flusso in due sezioni trasversali rispettivamente all'ingresso e all'uscita della turbina: se a monte le variazioni sono più contenute, a valle il profilo di velocità mostra disuniformità consistenti.

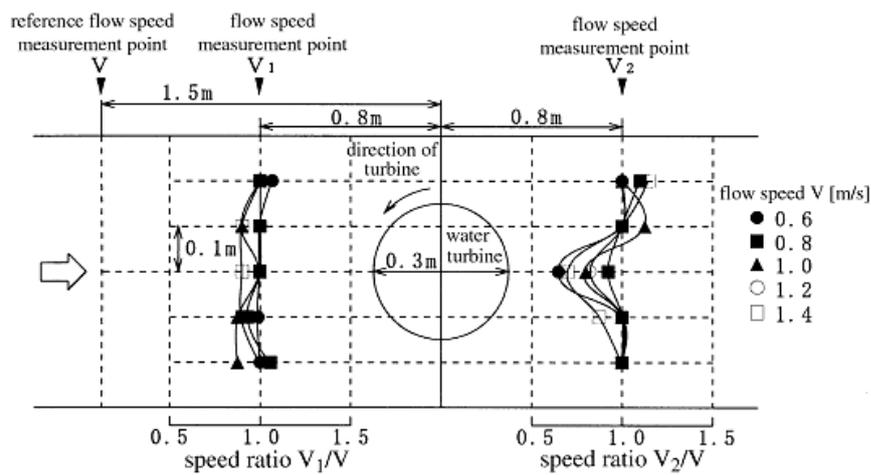


Figura 4.50 – Andamenti della velocità a monte e valle del rotore [72]

Una volta impostata la velocità del flusso, la prova è stata condotta mettendo in rotazione la turbina, applicando gradualmente un carico con un freno magnetico fino ad arrestarla. Strumentando adeguatamente il rotore, è stato possibile rilevare l'andamento della potenza erogata  $P_T$  e della coppia motrice  $T_a$  al variare della velocità di rotazione  $N$ . È stato inoltre plottato il  $C_p$  in funzione del TSR. Gli output, riportati in Figura 4.51 e Figura 4.52 mostrano che la condizione di massima efficienza si trova per valori di TSR compresi tra 1 e 1.5, per cui lo stallo dinamico ha effetti non trascurabili sui risultati.

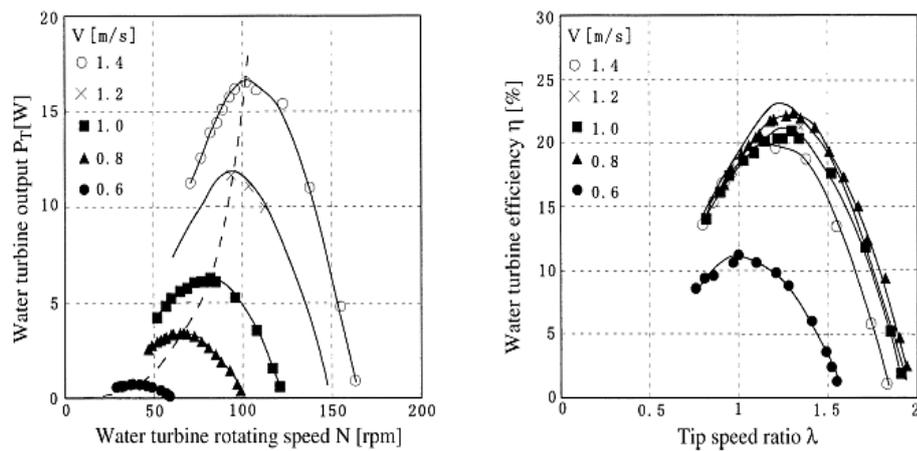


Figura 4.51 – Grafici  $P_T - N$  e  $\eta - TSR$  con solidità  $\sigma = 0.366$  [72]

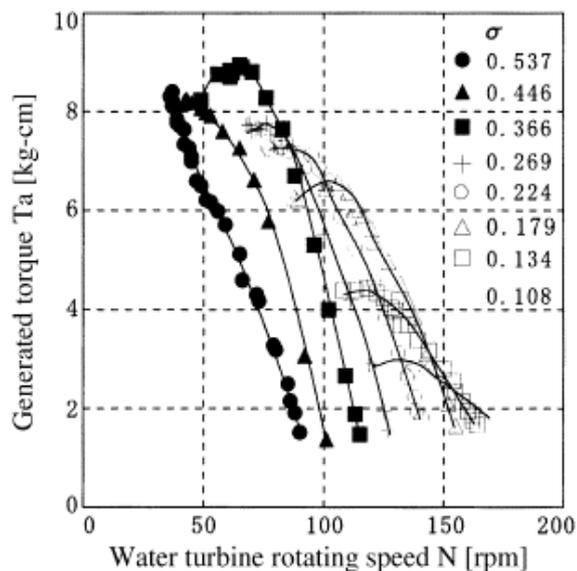


Figura 4.52 – Grafico  $T_a - N$  per velocità del flusso  $v = 1.0$  m/s [72]

Per la calibrazione del codice di calcolo sono state effettuate delle simulazioni considerando una turbina con le medesime caratteristiche di quella utilizzata da Shiono. I risultati hanno mostrato delle curve analoghe a quelle sperimentali, tuttavia traslate per velocità di rotazione più elevate. Le cause di questo scostamento sono legate ai limiti del codice, in particolare ai fenomeni di turbolenza indotta, stallo dinamico, deviazione del flusso. In questa sede si è scelto di introdurre dei coefficienti correttivi al fine di contenere gli scostamenti tra dati sperimentali ed output del codice, concentrandoci in particolare sull'angolo di incidenza  $\alpha$ .

Infatti, il rapporto tra velocità periferica e velocità indisturbata del flusso (TSR) è influenzato dalla velocità assoluta del flusso  $V$ , e tale rapporto influenza direttamente il valore di angolo di incidenza. Dunque, per rendere coerenti le velocità di rotazione calcolate tramite il codice e quelle sperimentali, si sarebbe potuta ridurre la velocità percepita dal fluido oppure scalare

l'angolo di incidenza. In questa sede si è deciso per quest'ultima soluzione, che ha portato inevitabilmente ad alterare i valori di  $C_L$  e  $C_D$  al fine di ottenere dati coerenti con i casi sperimentali.

Di seguito, si riportano i valori dei coefficienti correttivi, determinati empiricamente:

- $F_{CL} = 4$
- $F_{CD} = 1.7$
- $F_{\alpha} = 0.155$

In Figura 4.53 Figura 4.54 Figura 4.55 Figura 4.56 vengono confrontati i dati sperimentali con i risultati delle simulazioni eseguite. Gli andamenti sperimentali sono indicati con prefisso "S". Non è stato possibile ottenere un fitting perfetto di tutte curve per i diversi regimi di velocità del flusso  $v$ . Si è puntato a trovare una soluzione di compromesso, che non penalizzasse un particolare valore di  $v$ . In ogni caso, è stata ottenuta una corrispondenza compatibile con le finalità della tesi.

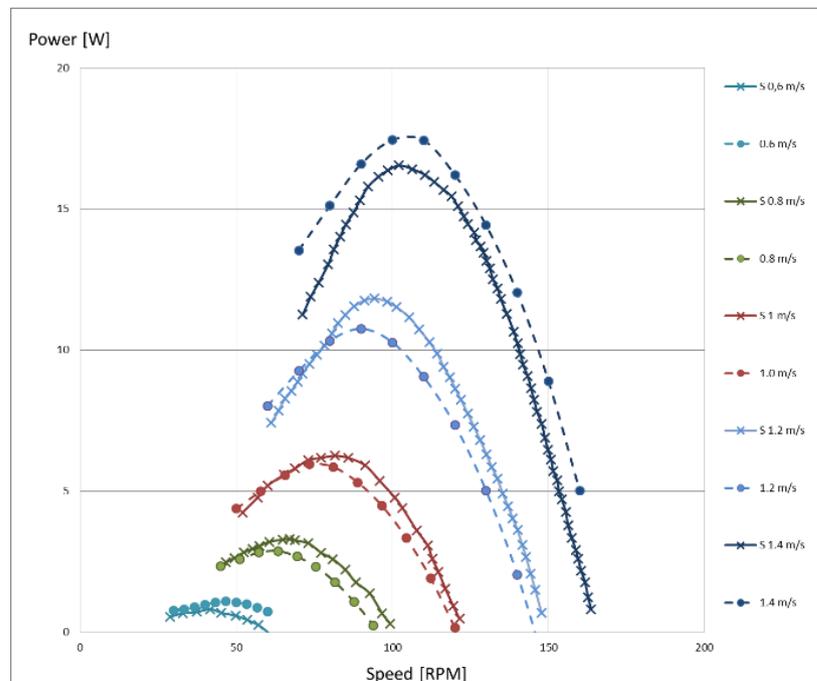


Figura 4.53 – Confronto della potenza estratta (S: dato sperimentale)

Per quanto riguarda le curve della potenza estratta:

- Per  $v = 1.4$  m/s il codice di calcolo fornisce valori di  $P$  più bassi rispetto al dato sperimentale (condizione cautelativa).
- Viceversa, per medie velocità il codice di calcolo fornisce un risultato ottimistico.
- Per  $v = 0.6$  m/s la curva della potenza estratta è nuovamente sottostante alla corrispondente sperimentale.

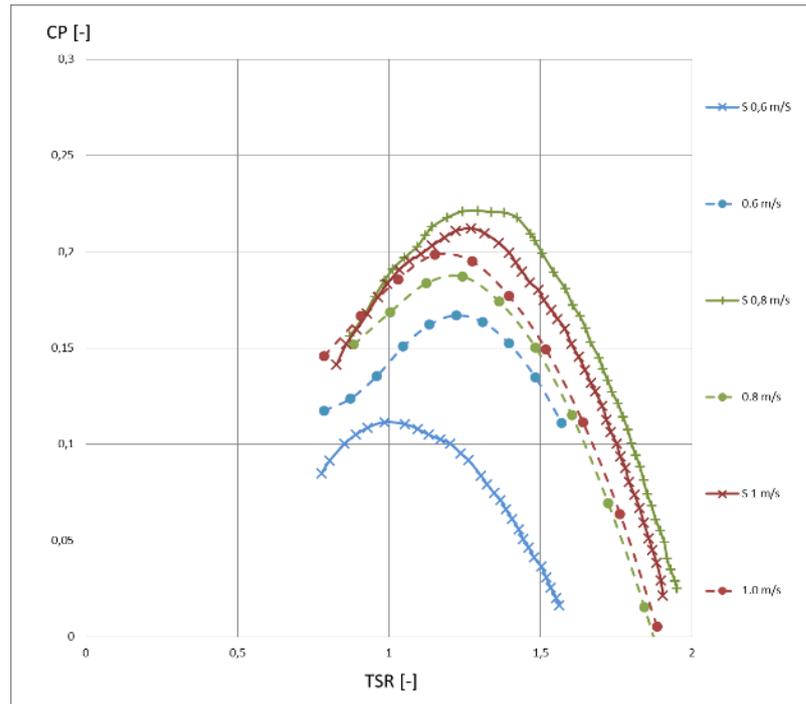


Figura 4.54 – Confronto grafico CP – TSR per  $v = 0.6, 0.8, 1.0$  m/s

Dal grafico CP – TSR è immediato notare che:

- Per  $v = 0.6$  m/s il risultato del codice di calcolo è sensibilmente migliorativo rispetto alla curva ottenuta da Shiono.
- Per  $v = 0.8$  m/s lo scostamento, seppur non trascurabile, si riduce rispetto al caso precedente.
- Per  $v = 1.0$  m/s si ha un buon fitting delle due curve, in particolare per valori del TSR intorno all'unità queste risultano sovrapposte.

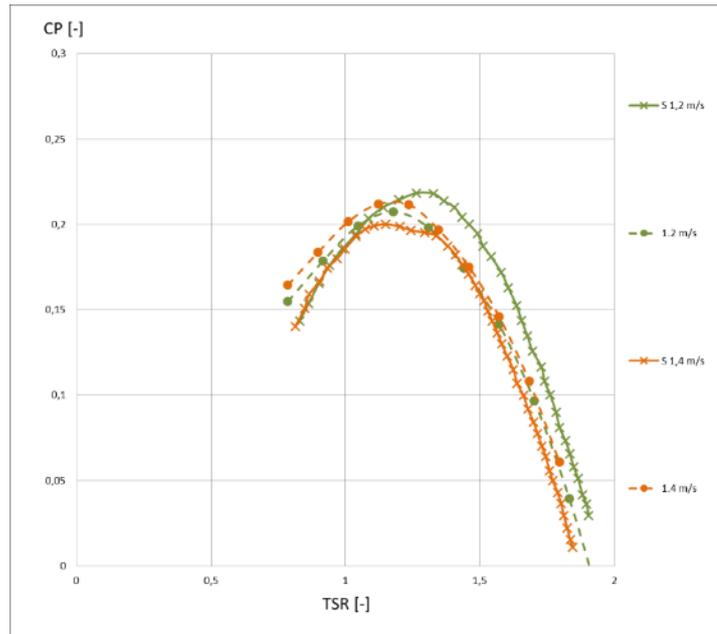


Figura 4.55 – Confronto grafico CP – TSR per  $v = 1.2, 1.4 \text{ m/s}$

- Per  $v = 1.2 \text{ m/s}$  e  $v = 1.4 \text{ m/s}$  gli andamenti forniti dal codice di calcolo risultano molto simili a quelli sperimentali.

In conclusione, si evince che, all'aumentare della velocità del flusso, si riduce lo scarto tra le curve sperimentali e quelle calcolate. Alle basse velocità occorrerà tenere presente che le simulazioni portano a risultati ottimistici.

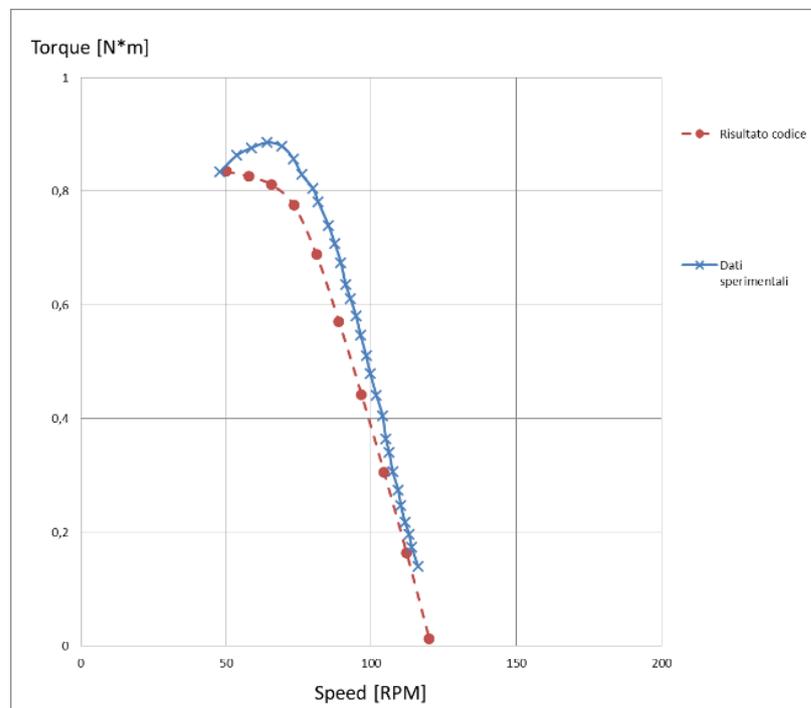


Figura 4.56 – Confronto della coppia media per  $V = 1 \text{ m/s}$

Infine, in assenza di ulteriori dati sperimentali, è stato confrontato l'andamento della coppia media per  $v = 1.0$  m/s. Lo scostamento tra le due curve risulta molto contenuto.

Nonostante la fenomenologia del problema presenti un significativo grado di complessità, l'introduzione di fattori correttivi operata in questa sede ha consentito di ottenere un codice di calcolo spendibile per valutazioni energetiche su casi di onda reali. Come si vedrà nel capitolo successivo, è stato possibile simulare tre differenti scenari operativi.

#### 4.3.3.4 PRESTAZIONI IN DIVERSI STATI DI MARE

Analogamente a quanto fatto nel Paragrafo 4.3.2.3 è stata condotta una campagna di simulazioni al fine di definire le prestazioni potenziali del dispositivo al variare del *seastate* (considerando un profilo d'onda di tipo oceanico) e del diametro della turbina.

Le simulazioni sono state focalizzate alla ricerca della massima potenza estraibile in ogni condizione di mare, a questo scopo è stata utilizzata la funzione "CP-TSR", considerando di volta in volta i valori che consentissero di ottenere la massima potenza nelle condizioni date.

In particolare, sono stati considerati i parametri riportati in Tabella 4.18

SS	H	T	Diametro turbina [m]				
	[m]	[s]	0,3	0,5	1	1,5	3
2	0,3	2,74	SIM 1	SIM 2	SIM 3	SIM 4	SIM 5
3	1	5,00	SIM 6	SIM 7	SIM 8	SIM 9	SIM 10
4	2	7,07	SIM 11	SIM 12	SIM 13	SIM 14	SIM 15
5	3,5	9,36	SIM 16	SIM 17	SIM 18	SIM 19	SIM 20
6	5	11,19	SIM 21	SIM 22	SIM 23	SIM 24	SIM 25
7	8	14,15	SIM 26	SIM 27	SIM 28	SIM 29	SIM 30
8	12	17,32	SIM 31	SIM 32	SIM 33	SIM 34	SIM 35
9	18	21,22	SIM 36	SIM 37	SIM 38	SIM 39	SIM 40

Tabella 4.18 – Set-up simulazioni

Per ogni simulazione è stata impostato un valore della corda delle pale tale da mantenere costante il valore della solidità, equivalente a quello utilizzato durante la fase di calibrazione, cioè pari a 0.366, e imponendo di volta in volta una profondità dell'asse di rotazione tale per cui la distanza tra il punto più alto assumibile dal profilo (angolo di 90° rispetto all'asse orizzontale) ed il punto più basso del livello dell'acqua (valle dell'onda) fosse pari al 10% del diametro della turbina.

I risultati, in termini di TSR, potenza massima estraibile e rendimento, calcolato come rapporto tra la potenza estratta dalla turbina e la potenza dell'onda, sono riportati nelle successive tabelle.

TSR							
SS	H	T	Diametro turbina [m]				
	[m]	[s]	0,3	0,5	1	1,5	3
2	0,3	2,74	1,307948	1,263637	1,239546	1,441841	1,467061
3	1	5,00	1,217897	1,129694	1,145128	1,180767	0,98683
4	2	7,07	1,194085	1,165923	1,134238	1,18328	1,001781
5	3,5	9,36	1,185914	1,138917	1,182509	1,051504	1,132468
6	5	11,19	1,159558	1,151395	1,123129	1,041255	1,254555
7	8	14,15	1,141713	1,079839	1,056529	1,073791	1,105875
8	12	17,32	1,162644	1,085635	1,093778	1,058721	1,066407
9	18	21,22	1,10668	1,108251	1,070745	1,100644	1,075446

Tabella 4.19 – Risultati simulazioni (TSR)

Potenza [W]							
SS	H	T	Diametro turbina [m]				
	[m]	[s]	0,3	0,5	1	1,5	3
2	0,3	2,74	0,465748	0,98109	1,683608	2,262854	3,54545
3	1	5,00	6,467144	11,7028	22,60245	30,17216	44,68127
4	2	7,07	21,66131	38,80335	77,98888	111,7178	187,117
5	3,5	9,36	54,60484	96,83519	196,6175	292,2523	526,9187
6	5	11,19	97,05286	170,806	354,3885	523,6316	929,8532
7	8	14,15	205,6955	360,0714	746,4932	1115,446	2144,531
8	12	17,32	388,7779	681,2629	1400,326	2112,847	4139,446
9	18	21,22	735,0058	1281,077	2617,676	3939,749	7848,146

Tabella 4.20 – Risultati simulazioni (Potenza)

rendimento [%]							
SS	H	T	Diametro turbina [m]				
	[m]	[s]	0,3	0,5	1	1,5	3
2	0,3	2,74	0,447834	0,943356	1,618854	2,175821	3,409087
3	1	5,00	0,3065	0,554635	1,071206	1,42996	2,117596
4	2	7,07	0,181936	0,325914	0,655038	0,938332	1,571619
5	3,5	9,36	0,113061	0,200499	0,407101	0,605115	1,090997
6	5	11,19	0,082222	0,144704	0,300233	0,443613	0,787758
7	8	14,15	0,05375	0,09409	0,195065	0,291475	0,560383
8	12	17,32	0,037025	0,06488	0,133359	0,201216	0,394218
9	18	21,22	0,025399	0,044269	0,090456	0,136141	0,271199

Tabella 4.21 – Risultati simulazioni (Rendimento)

Gli stessi risultati possono essere meglio analizzati visualizzando i seguenti grafici.

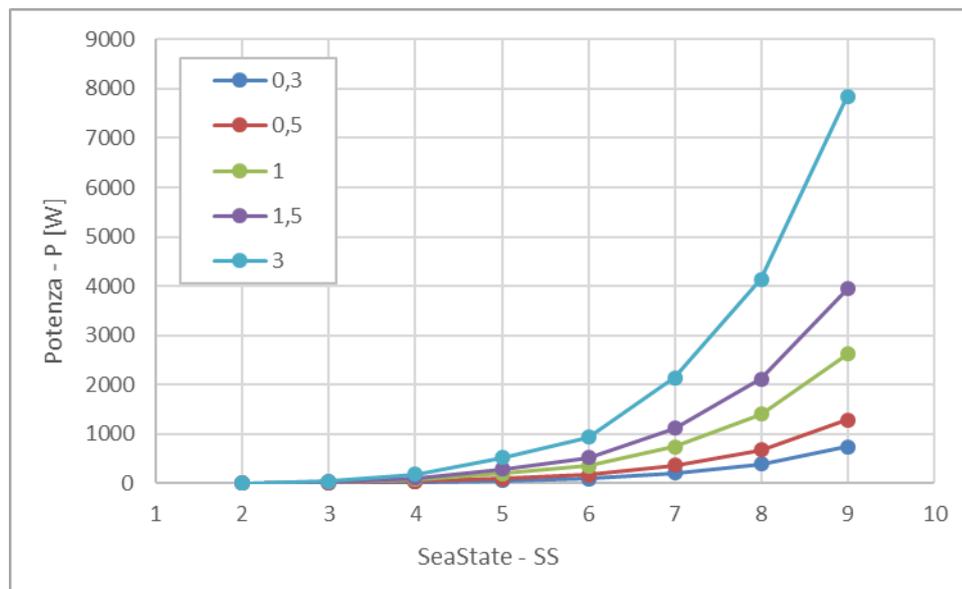


Figura 4.57 – Potenza estratta Seaspoon equipaggiato con rotore Darrieus in funzione del seastate

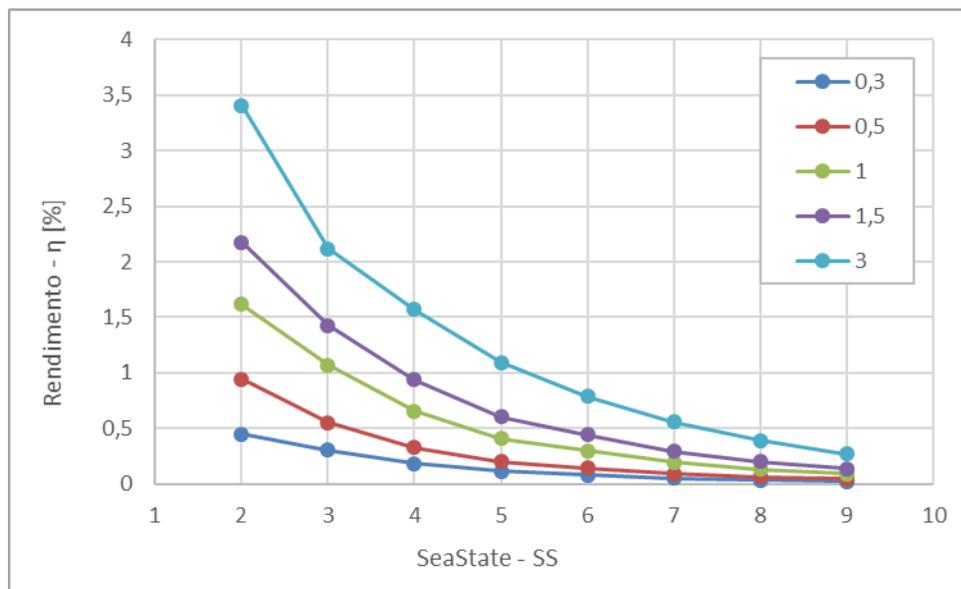


Figura 4.58 – Rendimento Seaspooon equipaggiato con rotore Darrieus in funzione del seastate

Analogamente a quanto detto per il caso di Seaspooon equipaggiato con profilo a resistenza, anche in questo caso possiamo notare un rapido decremento del rendimento all’aumento del *seastate*, che rende poco incoraggianti ulteriori indagini.

## 4.4 CONCLUSIONI

L’attività illustrata nel presente capitolo, che si è articolata nello sviluppo di modelli di simulazione dinamici e di attività sperimentali, ha portato all’evidenza che lo sfruttamento dell’energia cinetica dei moti orbitali propri delle onde, pur potendo ottenere performance di riguardo in stati di mare caratterizzati da onde basse (*seastate* < 2) non risulta essere una strada promettente per la produzione di energia su vasta scala, considerando la riduzione del rendimento del dispositivo al crescere delle dimensioni dell’onda.

Come già discusso, infatti, per *seastate* > 3 il rendimento di dispositivi che intendano sfruttare l’energia cinetica dei moti orbitali (considerando sia profili a resistenza sia profili dinamici) decresce in maniera significativa, scoraggiando altre analisi su questo settore.

Tale riduzione del rendimento è dovuto essenzialmente alla riduzione dell’energia cinetica specifica dei moti orbitali stessi al crescere del *seastate*, fenomeno causato dal fatto che, se da un lato al crescere dell’altezza dell’onda si ha un significativo aumento della potenza della stessa (si consideri il fattore quadratico tra le due grandezze), dall’altro si ha un corrispondente aumento sia del periodo che della lunghezza della perturbazione, il che implica la distribuzione dell’energia cinetica su una porzione più vasta e dunque la sua “diluizione”, a fronte di un attuatore le cui dimensioni rimangono invariate.

Di fatto, come già evidenziato, la velocità media dei moti orbitali percepita dal SeaSpoon decresce al crescere dell’altezza dell’onda, implicando una riduzione del rendimento limite di qualsiasi attuatore ipotizzabile, che non incoraggia ulteriori indagini.

# CAPITOLO 5

PROGETTO SEAWHAM  
GENERATORE DI ONDA ARTIFICIALE

## 5.1 DESCRIZIONE DEL PROGETTO SEA-WHAM

Il progetto Sea-WHAM - SeaSpoon Wave HARvesting by Microturbine, è un progetto sviluppato nell'ambito del Programma Nazionale per la Ricerca Militare (PNRM) e finanziato dal Ministero della Difesa, ed ha visto la collaborazione del gruppo di ricerca TPG - Thermochemical Power Group [73] (facente parte di ISME - Interuniversity Center of Integrated Systems for the Marine Environment [74]) e le aziende TechCom [75] e Advanced Micro Turbines [76] (spin-off dell'Istituto Italiano di Tecnologia).

Il progetto ha avuto principalmente i seguenti obiettivi:

- Progettazione, installazione e caratterizzazione di un generatore di onda artificiale, installato su una banchina collegata al mare aperto, in grado dunque di riprodurre stati di mare controllati in ambiente significativo [77]
- Sviluppo di un sistema integrato, prototipo di una stazione di ricarica off-shore per sistemi navali autonomi tramite un convertitore di energia dal moto ondoso accoppiato ad una microturbina ad aria compressa [78]

L'interesse della Marina della Difesa risiede proprio nella volontà di aumentare in modo significativo l'autonomia di mezzi marini autonomi, noti con l'acronimo AUV, nelle missioni di perlustrazione o pattugliamento. Con una stazione di ricarica off shore si potrebbe quindi rendere completamente autonomi tali mezzi per la durata delle loro missioni, aumentandone il raggio di operatività. La stazione di ricarica oggetto del progetto sarà dotata di sistemi per l'accumulo dell'energia prodotta, sia di tipo elettrochimico che attraverso stoccaggio di fluido in pressione (aria).

La soluzione utilizzata allo scopo della generazione elettrica è stata un microespansore prodotto da Advanced Microturbines S.r.l. La possibilità di operare con aria compressa consente di ottimizzare la conversione energetica del moto ondoso che per sua natura impone forti sollecitazioni con periodicità medio lunghe irregolari e a bassa frequenza (0,2 Hz) che poco si adattano ad una conversione diretta in energia elettrica.

In collaborazione con il CSSN (Centro Supporto e Sperimentazione Navale) di La Spezia, all'interno di questo progetto, è stata allestita un'area di prova capace di sfruttare la naturale conformazione di una delle banchine disponibili.

## 5.2 DESCRIZIONE INFRASTRUTTURA

L'impianto Ondogeno di La Spezia non si sviluppa all'interno di un laboratorio opportunamente allestito, bensì è posizionato sulla banchina del Centro Supporto e Sperimentazione Navale della Marina Militare (C.S.S.N), direttamente affacciato sulla zona interna della diga. In Figura 5.1 è visibile una panoramica dall'alto dell'impianto ondogeno con raffigurazione delle strutture che definiscono le aree di lavoro. L'area evidenziata n.2 definisce i confini di un container diviso in due ambienti separati. In uno dei due è presente il PLC, tramite il quale è possibile controllare la movimentazione delle paratie e le condizioni

dell'impianto oleodinamico, nell'altro un motore diesel da 55kW che aziona la pompa dell'olio da 37kW tramite la quale viene messo in pressione l'olio nella mandata dell'impianto consentendo il movimento in acqua delle paratie grazie all'azione dei pistoni. L'impianto ondogeno installato a La Spezia è un *flap wavemaker* costituito da una componente mobile, il sistema pistone-cilindro-paratia, e una fissa con ruolo di ancoraggio alla banchina e di smorzamento di vibrazioni meccaniche.



Figura 5.1 – Panoramica dell'impianto ondogeno

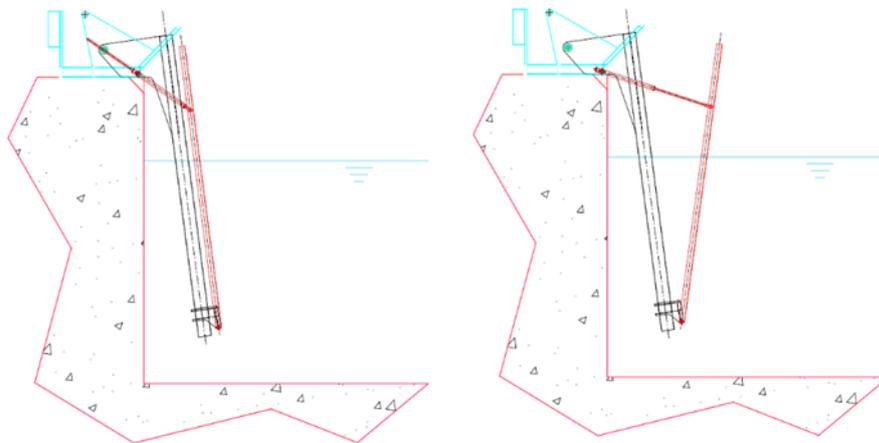
### 5.2.1 STRUTTURA MECCANICA

Il telaio della struttura è composto da cinque moduli uguali tra loro, ognuno di questi è fissato alla banchina tramite un fissaggio a bulloni. I cinque moduli sono poi fissati tra loro per dare maggiore stabilità all'impianto. Ogni modulo presenta alla base la cerniera sulla quale ruota la paratia mobile e alla sommità il sostegno del pistone idraulico che, non effettuando una corsa lineare, ruoterà su un perno. La struttura che sorregge la paratia è stata realizzata con un tubolare di 245x5 mm in grado di reggere alle sollecitazioni del pistone idraulico, su questo è stato montato un collare di cui si potrà regolare l'altezza di fissaggio. Su questo collare è stata montata la cerniera inferiore della paratia e, quindi, la paratia stessa.

Una delle peculiarità di questa struttura è quella di poter essere estratta dall'acqua nei momenti di non utilizzo molto facilmente. Ogni singolo modulo è infatti composto da due parti, una fissa a banchina, ed una seconda, il telaio della paratia, che ha la possibilità di muoversi attorno un perno di collegamento tra queste due parti. Utilizzando quindi un azionamento meccanico esterno è possibile estrarre dall'acqua la parte mobile ed evitare così di lasciarla in un ambiente aggressivo in momenti di inoperatività.

Alla parte fissa della struttura è inoltre fissata una scatola in inox per contenere tutta la strumentazione necessaria al corretto controllo del sistema, mentre la parte mobile è inoltre equipaggiata di opportuni agganci per permettere ad un muletto di inforcare la struttura e movimentarla a piacimento.

Le dimensioni principali della struttura sono date dalla profondità e dalla corsa del pistone. La paratia è quindi circa 4,5x0,98 m, e la cerniera sulla quale poggia è posizionata ad una profondità di 3 m. La corsa del pistone sul pelo libero è di circa 80 cm, perdendo quindi 20 cm dalla corsa reale del pistone. Si presentano ora alcuni dettagli della struttura per facilitare la comprensione del sistema e fornire alcune misure significative della stessa.



*Figura 5.2 – Posizioni paratia generatore onde*

In Figura 5.2 si illustra, mediante disegni costruttivi, il principio geometrico di funzionamento di impianto; a sinistra si ha l'impianto ondogeno con paratia in posizione chiusa (stelo dentro) mentre a destra la paratia in posizione aperta (stelo fuori). Si vede come il movimento della paratia sia stato pensato in modo tale da renderlo simmetrico rispetto la corsa del pistone, ciò favorisce la produzione delle onde in quanto la paratia, nel suo movimento, riesce anche a sollevare un volume d'acqua. Da evidenziare che la corsa dei pistoni e la loro rotazione intorno al proprio punto d'appoggio sarebbe andata ad interferire con lo spigolo della banchina: per non perdere ulteriore corsa utile allontanando i pistoni dalla superficie del mare, è stato fatto un intaglio alla banchina per ciascun pistone, di circa 15x15x15 cm, in modo tale che la camicia di quest'ultimo possa transitare liberamente all'interno di questa cavità.

Di seguito, invece, un disegno quotato del sistema ondogeno in vista laterale con paratia in posizione simmetrica rispetto le due posizioni estreme.

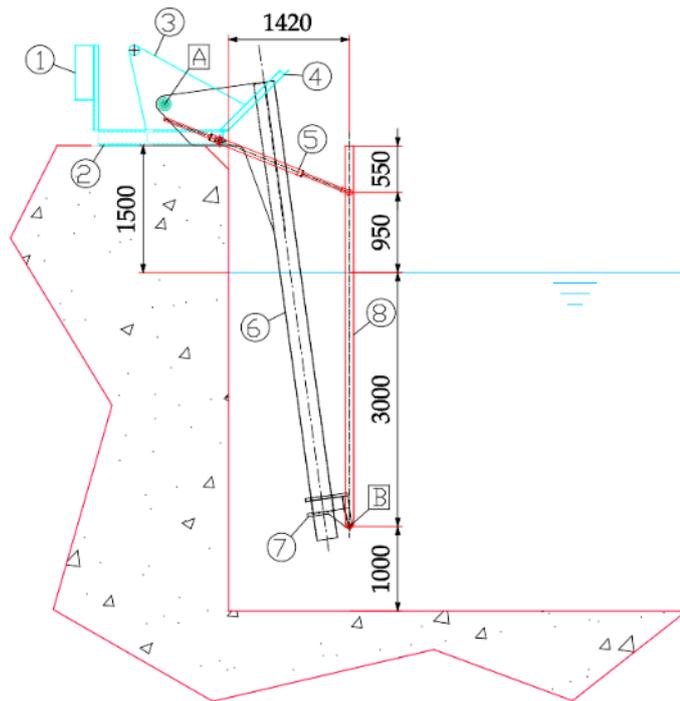


Figura 5.3 – Vista laterale struttura paratia

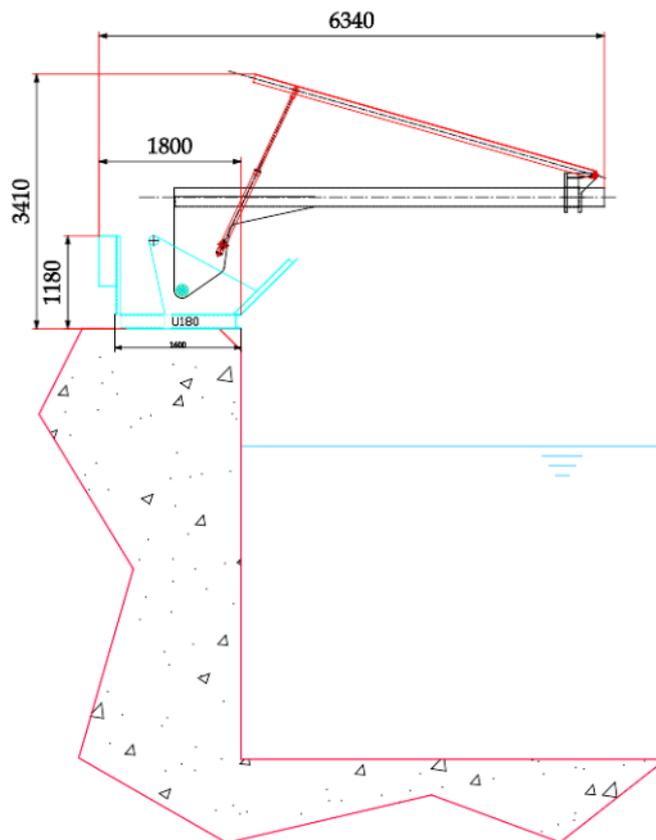
Per quanto riguarda la nomenclatura presente in Figura 5.3 si fa riferimento alla tabella che segue:

1	Cassetta elettrovalvola e elettronica
2	Telaio supporto ancorato a terra
3	Supporto del perno per ribaltamento
4	Paratia para spruzzi
5	Attuatore oleodinamico
6	Tubolare di supporto
7	Collare per cerniera
8	Pala mobile

Tabella 5.1 – Componenti struttura generatore di onde

Sempre facendo riferimento alla Figura 5.3, si evidenzia che il perno indicato con la lettera A rappresenta il perno intorno al quale la parte mobile della struttura ruota per mettersi all'asciutto, mentre il perno B è la cerniera della paratia mobile.

Si riporta ora una vista laterale della paratia emersa.



*Figura 5.4 – Vista laterale posizione emersa*

Il CAD sopra mostra la parte mobile della struttura nella posizione fuori dall'acqua: noti gli ingombri, i pesi e i baricentri è stato possibile progettare il telaio in modo tale che potesse essere movimentato da un muletto con le seguenti caratteristiche:

- Larghezza singola forca: 13 cm
- Distanza tra le forche: 70 cm
- Ingombro frontale forche: 96 cm
- Portata: 2 ton

L'operazione di estrazione dall'acqua della parte mobile della struttura viene effettuata sfruttando la potenza idraulica resa disponibile attraverso una centralina dedicata allo scopo, utilizzando quindi un pistone idraulico ad hoc, adibito unicamente a questo scopo. Tale pistone viene utilizzato per sollevare tutti e cinque i moduli, separatamente, posizionando la camicia sulla parte fissa della struttura e lo stelo sulla parte mobile, dalla posizione di corsa massima alla posizione di corsa minima, si ha il recupero dell'installazione in acqua.

Ulteriori dettagli della struttura sono dati dalle dimensioni della paratia mobile e il collare di giunzione tra la struttura e la paratia.

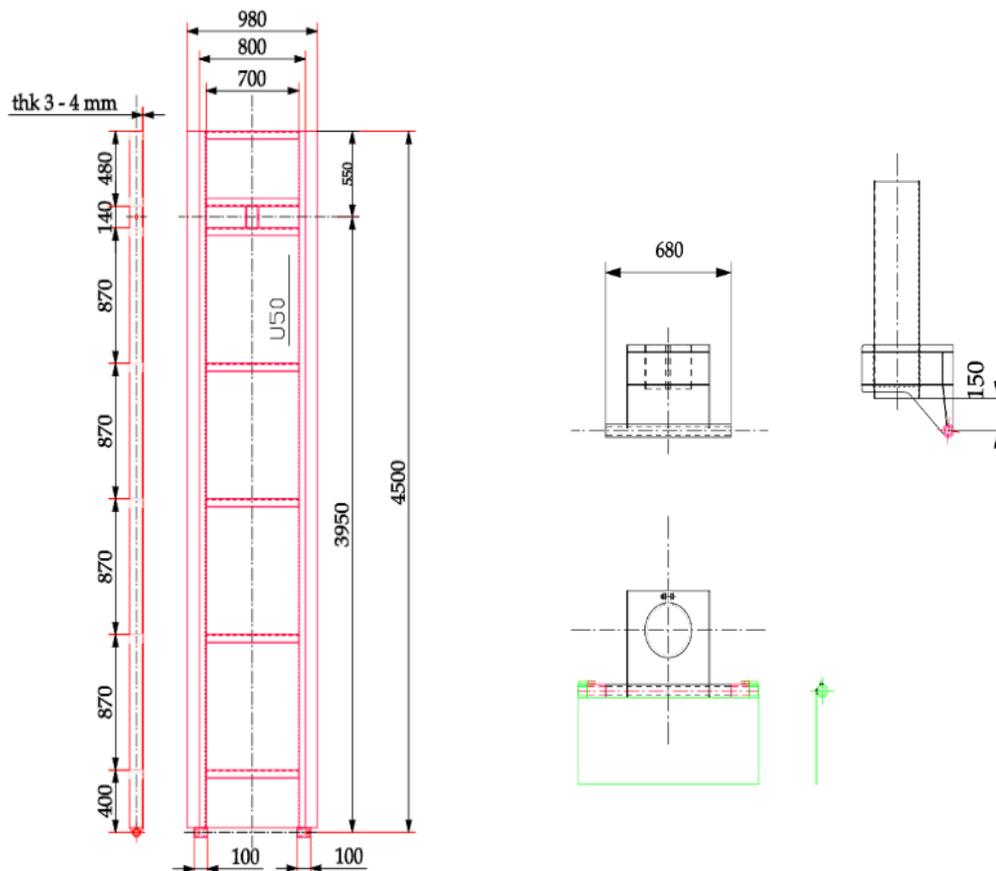


Figura 5.5 – Dettagli di paratia e collare reggi-cerniera

Per l'intera struttura è stato pensato un materiale che garantisca buone caratteristiche meccaniche ma che al contempo fosse resistente all'ambiente corrosivo marino. Il materiale selezionato è stato un acciaio strutturale con trattamento di zincatura a caldo, così da avere ottime prestazioni per quanto riguarda la resistenza alle sollecitazioni godendo allo stesso tempo dei benefici della protezione galvanica. I rivestimenti galvanici resistono infatti molto bene all'aggressività dell'acqua di mare, ciò è dovuto al fatto che la presenza degli ioni di calcio e di magnesio presenti nell'acqua inibiscono l'azione corrosiva degli ioni cloruro e favoriscono la formazione di strati protettivi. Inoltre, i principali vantaggi dei rivestimenti galvanizzati a caldo possono essere riassunti in durata eccezionale, resistenza meccanica elevata e assenza di manutenzione.

La quasi totalità della struttura è stata quindi realizzata in acciaio zincato, eccezion fatta per alcuni componenti particolarmente sollecitati quali la cerniera di collegamento tra la struttura e la paratia mobile ed il perno di sostegno della parte mobile della struttura sulla parte fissa. Questi due componenti sono stati realizzati in acciaio inox così da poter garantire anche ottime performance in termini di resistenza all'usura.

## 5.2.2 CIRCUITO IDRAULICO

Come descritto nel precedente paragrafo, l'attuazione del generatore di onde è stata affidata ad un impianto oleodinamico in grado di movimentare le 5 paratie attraverso pistoni a doppio stelo e doppio effetto. L'impianto, già descritto precedentemente, è composto dai seguenti componenti:

- un serbatoio con capacità pari a 600 l, compreso di (livello stato, termostato, termometro, livello visivo, etc. )
- una pompa a portata variabile PVPC associata ad un motore avente 40 kW di potenza.
- basamento in carpenteria metallica di supporto per serbatoio e gruppo motopompa Diesel
- quadretto elettrico comando motore Diesel con accessori
- un accumulatore oleopneumatico da 20 l e le relative valvole di sicurezza per coprire i picchi.
- cinque pistoni a doppio effetto e doppio stelo aventi alesaggio pari a 50mm, diametro interno pari a 36 mm e corsa pari a 1000 mm (ATOS CK-9- 50/36/36)
- cinque elettrovalvole proporzionali bisolenoidi
- un filtro olio in mandata di 10  $\mu\text{m}$  di maglia e un filtro al ritorno avente maglia di 25  $\mu\text{m}$ .
- uno scambiatore di calore aria olio sul ritorno.

Il funzionamento dell'impianto può essere descritto schematicamente come segue, facendo riferimento alla Figura 5.6 e alla tabella dei componenti, la portata di olio necessaria viene prelevata dal un serbatoio (1) e viene quindi lavorata da una pompa a portata variabile (14) alimentata da un motore (11). Uscita dalla pompa attraversa un filtro (19) per poi arrivare alle cinque valvole proporzionali (38) che indirizzano il fluido in una delle due camere dei pistoni (cil.1, cil.2, cil.3, cil.4, cil.5) che le succedono. Riempendo uno dei due volumi, si spinge il contenuto dell'altro volume nello scarico facendogli attraversare prima uno scambiatore di calore (29) e successivamente un altro filtro (30). Per far fronte a delle richieste momentanee di maggior energia vi è un accumulatore (25) posto in parallelo alla pompa, collegato subito dopo il filtro di mandata. In parallelo ai due filtri vi è un manometro il cui scopo è quello di controllare il grado di intasamento del filtro stesso. Un altro manometro è posto prima dell'ingresso nell'accumulatore per controllare le condizioni di lavoro di quest'ultimo.

Qui di seguito il progetto completo dell'impianto.



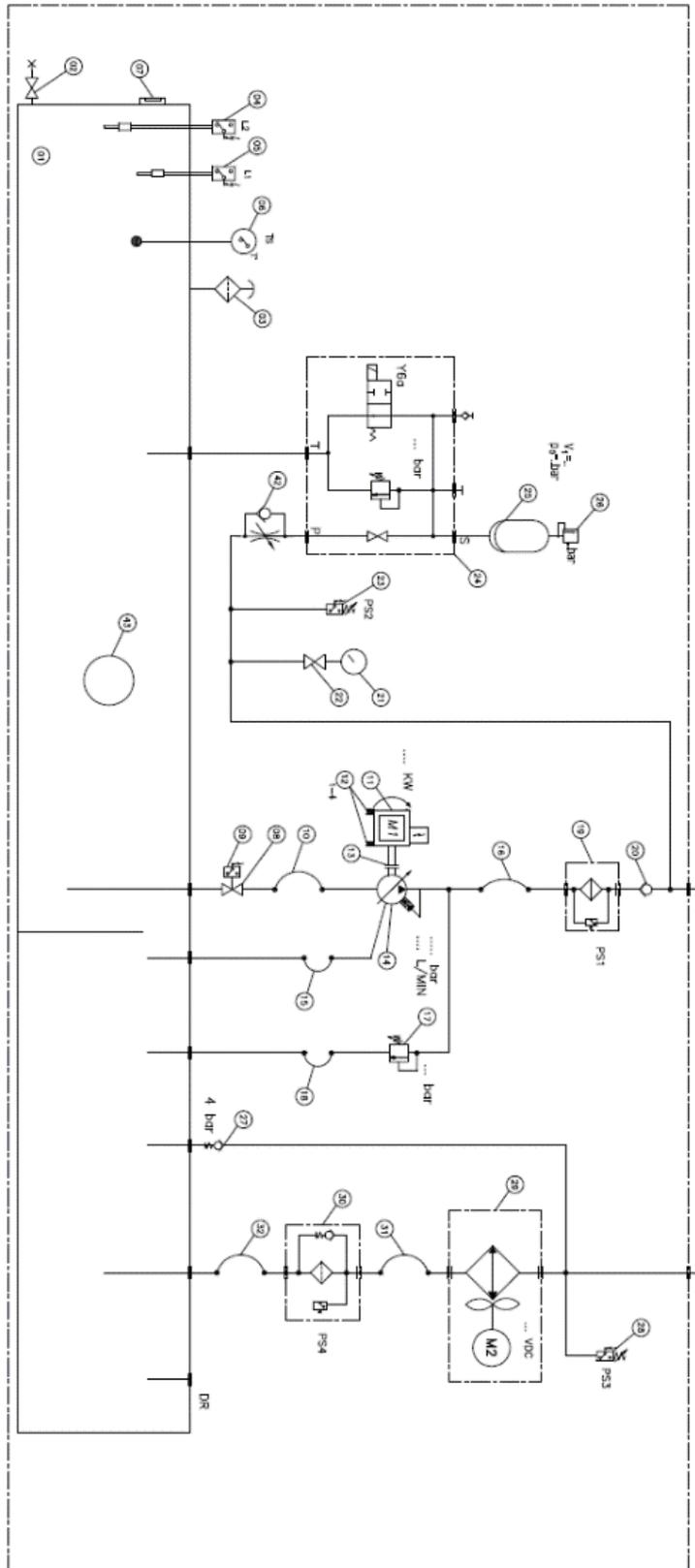


Figura 5.7 – Dettaglio impianto, componenti all'interno della sala macchine

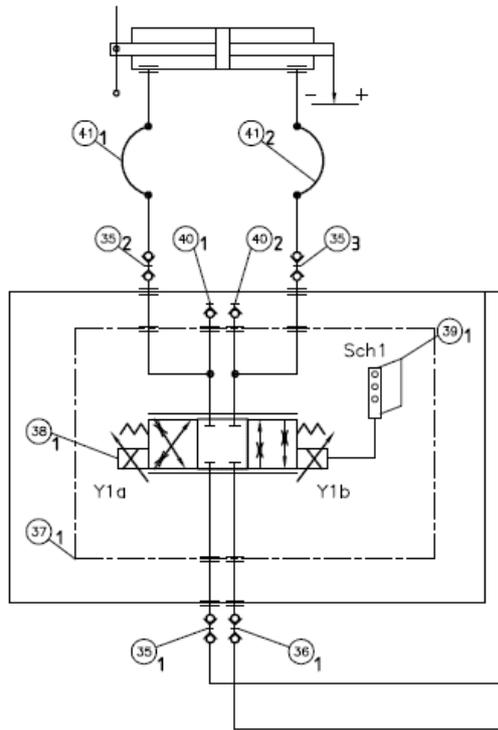


Figura 5.8 – Pistone e valvola proporzionale

Legenda Figura 5.7 e Figura 5.8			
1	Serbatoio olio	21	Manometro
2-8	Valvola a sfera	22	Rubinetto a spillo
3	Tappo di carico	23-28	Pressostato
4-5	Livellostato	24	Blocco sicurezza
6	Termostato	25	Accumulatore
7	Livello visivo	26	Valvola di sicurezza azoto
9	Microswitch	27	Valvola di ritegno 4 bar
10	Giunto compensatore	29	Scambiatore di calore
11	Motore diesel	30	Filtro ritorno
12	Antivibranti	35	Innesto rapido 1/2"
13	Accoppiamento	36	Innesto rapido 3/4"
14	Pompa	37	Blocco oleodinamico

15-18-31->34-41	Tubo flessibile	38	Elettrovalvola proporzionale
16	Tubo flessibile mandata	39	Scheda comando
17	Valvole di massima pressione	40	Presenza pressione
19	Filtro mandata	42	Regolatore di flusso
20	Valvola di ritegno	43	Oblò

*Tabella 5.2 – Componenti impianto oleodinamico*

La messa in opera dell'impianto è stata completata dopo la realizzazione dell'impianto di distribuzione dalla pompa agli attuatori attraverso tubazioni rigide in acciaio inox per circa 15 m. Il tutto composto da:

- collettore di mandata di diametro 38x3 mm (circa 24 mt.) completo di raccordi intermedi a "T" per stacco pannelli elettrovalvole
- collettore di ritorno di diametro 42x3 mm (circa 24 mt.) completo di raccordi intermedi a "T" per stacco pannelli elettrovalvole
- valvola a sfera in acciaio inox completo di raccordi diritti ed a gomito per realizzare by-pass collettori
- staffe di fissaggio al pavimento e per le strutture metalliche fissate al molo.

### **5.2.3 ATTIVITÀ DI INSTALLAZIONE GENERATORE DI ONDE**

Come definito nel precedente Lotto, il sistema ondogeno si compone di due principali parti, un telaio in carpenteria metallica e un impianto oleodinamico destinato all'attuazione.

Il telaio, realizzato in acciaio e successivamente zincato a caldo, si compone a sua volta di due elementi, il primo, fissato a banchina, e un secondo mobile e facilmente smontabile. Quest'ultima si compone della paratia mobile, responsabile della movimentazione dell'acqua. Questa infatti poggia su un perno posto nella parte più bassa dell'installazione e viene movimentata dai pistoni del sistema oleodinamico. Tale struttura, attraverso un altro perno, ha la possibilità di essere recuperata dall'acqua attraverso l'utilizzo di un secondo perno, posto sulla struttura fissa ancorata alla banchina, e di un apposito pistone. Nelle foto che seguono vengono illustrate le fasi di installazione.

Durante la prima fase sono stati effettuati degli intagli sulla banchina (Figura 5.9) in modo tale da permettere il corretto scorrimento dei pistoni (5) responsabili della movimentazione delle 5 paratie.



*Figura 5.9 – Predisposizione banchina*

Successivamente, utilizzando una gru, è stato installato il telaio fisso a banchina (Figura 5.10), sul quale poi sono state posizionate le 5 paratie (Figura 5.11). Il telaio fisso comprende ulteriori alloggiamenti per perni, in grado di assicurare le paratie mobili nella posizione di lavoro, verticale, o nella posizione di manutenzione e rimozione, orizzontale.



*Figura 5.10 – Completamento installazione telaio*



*Figura 5.11 – Installazione moduli mobili mediante gru*

Il telaio è dotato di elementi di protezione da schizzi d'acqua e un supporto per gli armadi contenenti le elettrovalvole proporzionali.

In Figura 5.12 è mostrata un'immagine dell'ondogeno, installato nella sua posizione finale e con i moduli in posizione operativa.



*Figura 5.12 – Ondogeno installato*

Per permettere un adeguato funzionamento delle paratie è stato necessario applicare nella parte inferiore un distanziale in teflon, a basso attrito, in modo tale da mantenere costante il gioco tra due moduli vicini.

Per ogni maggior dettaglio si fa riferimento agli allegati tecnici inseriti nella documentazione del seguente lotto, all'interno dei quali sono presenti tutti i disegni tecnici quotati del dispositivo

L'installazione dell'impianto oleodinamico è stata successiva alla completa messa in opera della carpenteria metallica, telaio del sistema ondogeno.

L'attività ha previsto la posa del piping dell'impianto, il cablaggio sugli armadi contenenti le valvole proporzionali, il cablaggio sui pistoni ed infine i collegamenti con la motopompa.

L'impianto, descritto dettagliatamente nel precedente Lotto, si compone dei seguenti elementi:

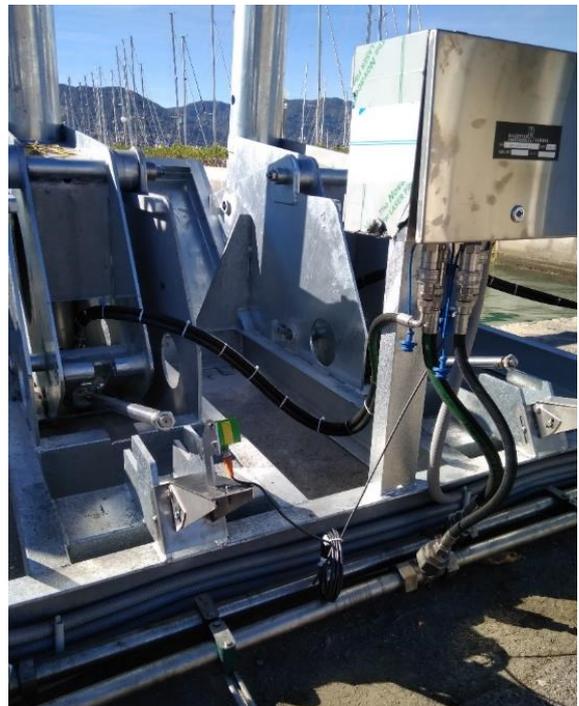
- un serbatoio con capacità pari a 600 l, equipaggiato con livellostato, termostato, termometro, livello visivo
- una pompa a portata variabile PVPC associata ad un motore avente 40 kW di potenza.
- basamento in carpenteria metallica di supporto per serbatoio e gruppo motopompa Diesel
- quadro elettrico comando motore Diesel con accessori
- un accumulatore oleopneumatico da 20 l e le relative valvole di sicurezza per coprire i picchi.
- cinque pistoni a doppio effetto e doppio stelo aventi alesaggio pari a 50mm, diametro interno pari a 36 mm e corsa pari a 1000 mm (ATOS CK-9- 50/36/36)
- cinque elettrovalvole proporzionali bisolenoidi
- un filtro olio in mandata di 10 µm di maglia e un filtro al ritorno avente maglia di 25 µm.
- uno scambiatore di calore aria olio sul ritorno.

L'installazione di tale impianto ha avuto inizio con la posa del container nella posizione delineata nei paragrafi precedenti. All'interno del container sono stati fissati stabilmente serbatoio e motore diesel (Figura 5.13), in modo tale che l'intera struttura fosse stabile e non soggetta a movimentazioni durante la fase operativa.



*Figura 5.13 – Vista dell'interno del container – motore e pompa idraulica*

Dopo aver effettuato gli opportuni collegamenti tra moto-pompa e serbatoio all'interno del container, sono iniziate le fasi di dimensionamento del sistema di distribuzione. In uscita dal container, attraverso una flangia su parete su state portate all'esterno le due linee, la mandata e il ritorno. Due tubi flessibili in uscita dal container sono stati quindi flangiati a tubazioni in acciaio inox fisse alla pavimentazione del piazzale (vedi Figura 5.14)



*Figura 5.14 – Dettaglio collegamenti idraulici*

Per la generazione dell'onda è invece fondamentale controllare il movimento delle paratie. Il primo passo per la gestione del moto della paratia è la conoscenza della posizione della stessa. Per ricostruire l'esatta posizione, si sono sfruttate le caratteristiche dei pistoni atti alla loro movimentazione; la strategia utilizzata è stata di applicare sulla testa della parte posteriore del doppio stelo del pistone una targhetta e misurare la distanza tra questa e un sensore solidale al telaio di montaggio (e quindi al molo). Il sistema realizzato è riportato in Figura 5.15.



*Figura 5.15 – Dettaglio sistema di lettura posizione*

Il sensore impiegato per lo scopo è un sensore di misura laser capace di 30 misurazioni al secondo, alimentato a 24Vcc e dotato di uscita analogica 4-20mA. La posizione delle 5 paratie è acquisita in maniera indipendente e pertanto potrà essere implementata ogni tipo di logica di moto. Per poter muovere il pistone, montata all'interno di ognuna delle scatole ancorate al telaio del sistema, è prevista una valvola proporzionale alimentata a 24Vcc e pilotabile analogicamente 4-20mA con la logica di dividere in 2 intervalli 4-12 e 12-20 l'apertura della valvola. Il sistema per la misura della posizione e l'azionamento pistone è cablato con la sala controllo attraverso 5 cavidotti in guaina armata (uno per ogni paratia) che, correndo lungo il telaio e i tubi dell'olio raggiungono l'ingresso della sala controllo.

Per implementare quest'operazione il PLC ha i seguenti I/O:

POS. SCH	INSTRUMENT TYPE	SERVICE / MEASURE	AI	AO	DI	DO	W
38.1	VALVOLA PROPORZIONALE	USCITA CILINDRO		1		1	50
38.2	VALVOLA PROPORZIONALE	USCITA CILINDRO		1		1	50
38.3	VALVOLA PROPORZIONALE	USCITA CILINDRO		1		1	50
38.4	VALVOLA PROPORZIONALE	USCITA CILINDRO		1		1	50
38.5	VALVOLA PROPORZIONALE	USCITA CILINDRO		1		1	50
	Laser 1	Misura posizione	1				
	Laser 2	Misura posizione	1				
	Laser 3	Misura posizione	1				
	Laser 4	Misura posizione	1				
	Laser 5	Misura posizione	1				
<b>I/O PLC e potenza necessaria</b>			<b>5</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>250</b>

Tabella 5.3 – Acquisizione PLC per movimentazione paratie

#### 5.2.4 INTERFACCIA PLC

L'intero generatore di onde è gestito da un PLC - *Programmable Logic Controller*, componente molto utilizzato nel campo dell'automazione industriale per caratteristiche che lo contraddistinguono quali robustezza, versatilità dovuta alla possibilità di adattarsi al processo che si sta automatizzando, modularità e, talvolta, costi contenuti. L'utilizzo di un PLC modulare permette il vantaggio dell'espandibilità delle funzioni dell'apparecchiatura stessa in caso di necessità, come la possibilità di avere uno o più moduli di Input/Output digitali e analogici.

L'architettura interna, illustrata in Figura 5.16, è composta da CPU, interfaccia di comunicazione, memorie adibite al sistema operativo, ai dati e al programma, dispositivi input/output e interfaccia di programmazione.

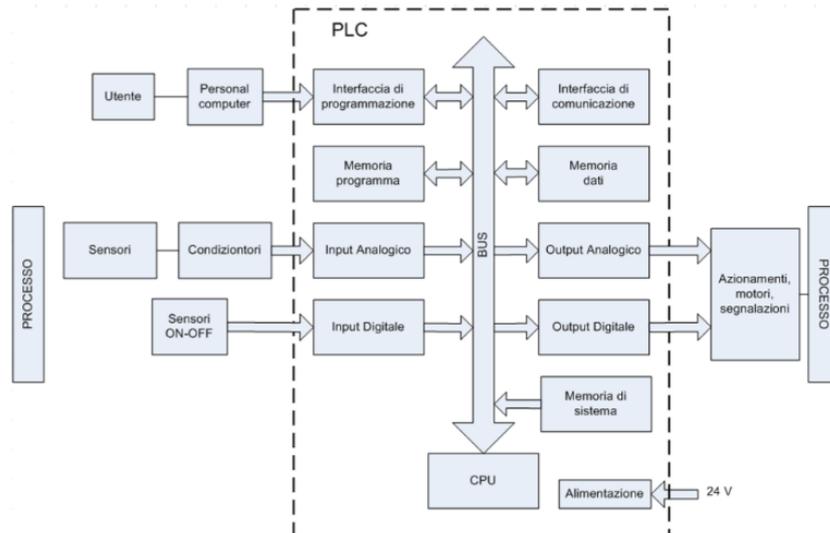
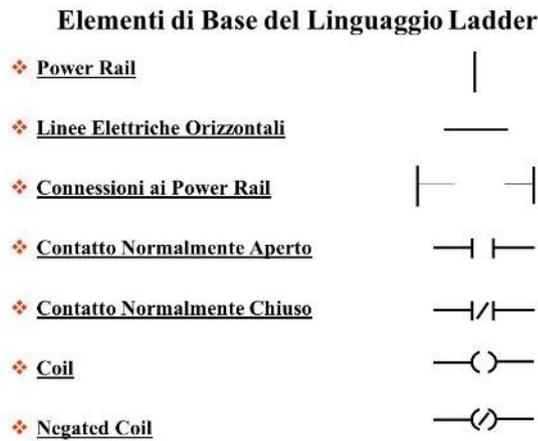


Figura 5.16 – Struttura interna di un PLC

- La CPU ha il compito di eseguire le operazioni logiche, gestire i dispositivi di ingresso/uscita e gestire le interfacce. In questo tipo di apparecchiature elettroniche si predilige l'utilizzo di un sistema operativo in *real time* che garantisce il rispetto del tempo di esecuzione di un ciclo di programma (tempo ciclo) basandosi sul *polling*, pratica con cui il processore intervista le varie componenti ciclicamente e, in caso di variazione delle istruzioni, effettua le modifiche necessarie al termine del ciclo di esecuzione del programma in corso.
- La comunicazione tra i diversi dispositivi è gestita da un BUS, che dal punto di vista hardware è composto da una linea di comunicazione e dal punto di vista software contiene tutte le specifiche e le modalità dell'impacchettamento e lo scambio dei dati. Nell'impianto in esame viene utilizzato un ProfiBus (*PROcess Fieled BUS*) che essendo una rete di comunicazione *monomaster-multislave* permette una semplificazione delle operazioni di cablaggio grazie alla presenza un solo cavo da posizionare. La trasmissione di dati può essere solo seriale.
- Le schede di ingresso digitali permettono l'analisi di grandezze elettriche traducendole, tramite l'utilizzo di soglie, in valori *booleani*, mentre le schede di uscita digitali vengono utilizzate per i comandi degli attuatori che necessitano unicamente di istruzioni *on/off*. Le schede possono controllare da 4 a 64 input/output.
- Le schede di ingresso analogiche permettono l'analisi di grandezze elettriche tramite convertitori Analogico/Digitale (A/D) mentre le schede di uscita analogiche traducono dei valori digitali in correnti/tensioni tramite convertitori Digitale/Analogico (D/A).
- L'alimentazione è solitamente pari a 24V in corrente continua.

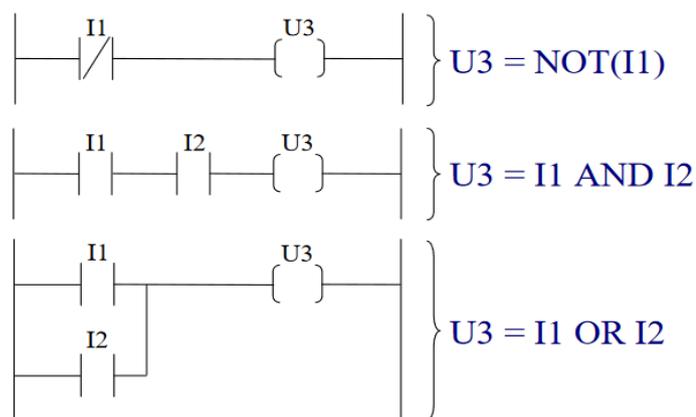
La programmazione del PLC avviene generalmente su software specializzati che consentono di caricare il programma creato direttamente in memoria. I linguaggi di programmazione per PLC sono standardizzati secondo la norma IEC 61131-3, se ne possono quindi trovare basati su diagrammi a blocchi oppure di tipo testuale come il *Structured Text* (ST).

Tra i più utilizzati vi è sicuramente il *ladder* (LD), letteralmente “scala a pioli”, che si presenta come un linguaggio grafico basato sull’analogia con un circuito elettrico. Gli elementi base che lo caratterizzano sono illustrati in Figura 5.17.



*Figura 5.17 – Elementi base del linguaggio ladder*

I contatti rappresentano le variabili di ingresso mentre le *coil*, o bobine, quelle di uscita. Altre tipologie di contatti sono i rivelatori di transizione positiva e negativa, il primo si attiva quando un segnale passa da basso ad alto (se ci troviamo in logica positiva), viceversa per il secondo. Tramite questi elementi base è possibile ricreare tutte le operazioni fondamentali dell’algebra booleana (Figura 5.18) come AND, OR e NOT.



*Figura 5.18 – Funzioni logiche di base dell’algebra booleana*

Per la programmazione del PLC che controlla l’ondogeno è stata eseguita avvalendosi del software commerciale Siemens TIA Portal [79].

## INTRODUZIONE ALL’HMI

L’Human Machine Interface, o interfaccia uomo-macchina, è il mezzo tramite il quale un operatore interagisce con la macchina. Gli HMI traducono complesse variabili di processo in informazioni immediatamente fruibili per essere convertite in azioni e consentono di visualizzare informazioni operative quasi in tempo reale. La grafica di processo permette di attribuire un contesto e un significato agli elementi dell’impianto permettendo di ottenere una comprensione approfondita dei processi, favorendone il controllo e l’ottimizzazione. In Figura 5.19 è visibile l’HMI dell’impianto ondogeno.

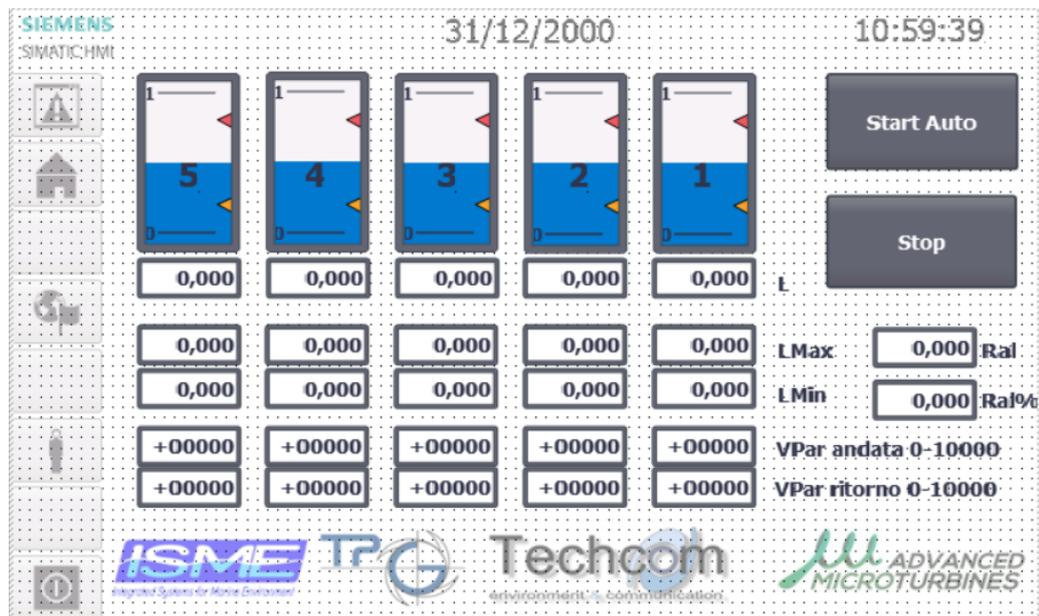


Figura 5.19 – Pagina HMI per posizionamento dei pistoni

Da questa interfaccia l’operatore può svolgere tutte le principali operazioni per controllare il moto dei pistoni:

- Inserire il Punto Morto Inferiore (PMI) e Punto Morto Superiore (PMS) dei pistoni
- Inserire la velocità di movimento del pistone (in termini di apertura della valvola proporzionale) per ogni paratia, con la possibilità di scegliere differenti velocità per l’andata e per il ritorno.
- Inserire percentuale di rallentamento (Ral%) e la distanza di inizio rallentamento (Ral) (tali parametri, pur presenti, facevano parte di una logica di controllo mai realmente implementata e testata)

Le icone numerate da 1 a 5 sono gli elementi dinamici dell’interfaccia che variano il livello di riempimento della barra in funzione della posizione del pistone in tempo reale.

Nell'impianto ondogeno è installato un PLC Siemens della serie s7-1200 che presenta moduli di espansione I/O; il sistema di controllo si sviluppa principalmente in due direzioni: il controllo del sistema oleodinamico e la gestione del movimento delle paratie.

La prevenzione dei malfunzionamenti e la gestione dei parametri dell'impianto oleodinamico è resa possibile dai moduli di espansione I/O tramite i quali si instaura una comunicazione costante tra il sistema di controllo, le condizioni termodinamiche dell'olio in pressione utilizzato per la movimentazione delle paratie ed eventuali problemi (intasamento filtri, stato dei pressostati). In Tabella 5.4 sono rappresentati le componenti I/O con cui interagisce il programma:

POS. SCH	INSTRUMENT TYPE	SERVICE / MEASURE	AI	AO	DI	DO	W
05	LIVELLO OLIO ALLARME	SEGNALAZIONE MINIMO LIVELLO			1	1	1.5
04	LIVELLO OLIO STOP	STOP MINIMO LIVELLO			1	1	1.5
05	TRASMETTITORE DI TEMPERATURA	GESTIONE TEMPERATURE	1				4
48	PRESSOSTATO DIGITALE	CONTROLLO PRESSIONE LINEA	1				5
23	PRESSOSTATO	CONTROLLO PRESSIONE LINEA			1		1.5
09	FINECORSA	CONTROLLO VALVOLA APERTA			1		1.5
19	PRESSOSTATO	INTASAMENTO FILTRO MANDATA			1		1.5
28	PRESSOSTATO	PRESSIONE LINA RITORNO			1		1.5
30	PRESSOSTATO	INTASAMENTO FILTRO RITORNO			1		1.5
50	VENTOLA	VENTOLA RAFFREDDAMENTO BOX					1.9
29	ELETTOVENTOLA SCAMBIATORE	RAFFREDDAMENTO OLIO					240
24	ELETTOVALVOLA	E/VALV. SCARICO PRESS. ACCUMULATORE				1	32
17	ELETTOVALVOLA	COMANDO PRESSIONE - AP				1	32
17	ELETTOVALVOLA	COMANDO PRESSIONE-BP				1	
17	ELETTOVALVOLA	COMANDO PRESSIONE-VENTING				1	32
<b>I/O PLC e potenza necessaria</b>			<b>2</b>	<b>0</b>	<b>7</b>	<b>6</b>	<b>357</b>

Tabella 5.4 – I/O adibiti al controllo dell'impianto oleodinamico

La gestione del movimento delle paratie può avvenire solo conoscendo la loro posizione in *real time*, ruolo adibito a sensori laser solidali al telaio dell'impianto ondogeno (e quindi alla banchina) che misurano la distanza del pistone da un riferimento fisso coincidente con il sensore stesso. Sono stati utilizzati cinque sensori indipendenti, uno per ogni paratia, alimentati a 24 Vcc, con un'uscita analogica 4-20 mA e in grado di eseguire 30 misurazioni al secondo. Il movimento di ciascun pistone avviene per mezzo di cinque valvole proporzionali, modello Dhz0-aeb-np-071-15/i10, ognuna delle quali è situata in una differente scatola ancorata al telaio; alimentate a 24 Vcc, sono utilizzabili anche analogicamente 4-20 mA. La logica su cui si basano consiste in due intervalli differenti a seconda del verso di apertura della valvola: 4-12 mA e 12-20 mA. Tramite i *data sheet* della valvola proporzionale in Figura 5.20 è visibile la relazione tra apertura della valvola (ascisse) e portata massima erogabile (ordinate).

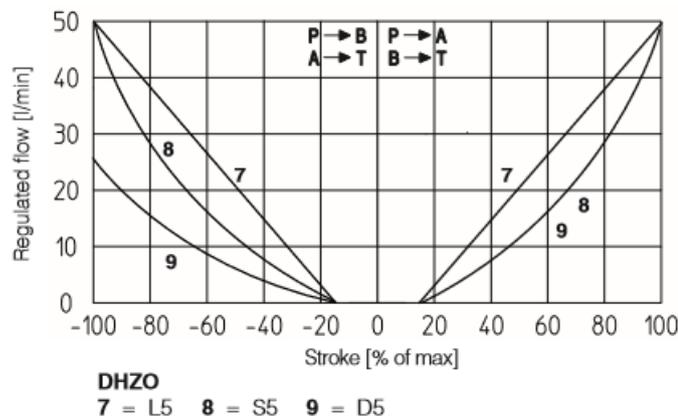


Figura 5.20 – Portata massima erogabile in relazione all'apertura della valvola

Poiché lo *stroke* è proporzionale alla corrente fornita alla valvola stessa, lo zero delle ascisse corrisponde a 12 mA forniti, mentre i due estremi a 4mA e 20 mA. Il modello di valvola implementato nell'impianto ondogeno (retta 7) presenta un comportamento lineare fino ad un massimo di 50 l/min che corrisponde a 4 mA e fino ad un minimo di 0 l/min (nessuna erogazione di portata d'olio) che corrisponde a:

$$t = 12 \text{ mA} - 15\%(8 \text{ mA}) \quad (5.1)$$

Dal punto  $(t ; 0)$  al punto  $(0 ; 0)$ , ovvero per correnti fornite relativamente basse, la valvola non eroga portata; questa particolare condizione è dovuta a una forma di isteresi che merita approfondimenti tramite campagne sperimentali in studi successivi.

In Tabella 5.5 sono presenti gli I/O del PLC per la gestione del movimento delle paratie.

POS. SCH	INSTRUMENT TYPE	SERVICE / MEASURE	AI	AO	DI	DO	W
38.1	VALVOLA PROPORZIONALE	USCITA CILINDRO		1		1	50
38.2	VALVOLA PROPORZIONALE	USCITA CILINDRO		1		1	50
38.3	VALVOLA PROPORZIONALE	USCITA CILINDRO		1		1	50
38.4	VALVOLA PROPORZIONALE	USCITA CILINDRO		1		1	50
38.5	VALVOLA PROPORZIONALE	USCITA CILINDRO		1		1	50
	Laser 1	Misura posizione	1				
	Laser 2	Misura posizione	1				
	Laser 3	Misura posizione	1				
	Laser 4	Misura posizione	1				
	Laser 5	Misura posizione	1				
<b>I/O PLC e potenza necessaria</b>			<b>5</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>250</b>

Tabella 5.5 – I/O per movimentazione delle paratie

## 5.3 CONTROLLI

### 5.3.1 CONTROLLO TRIANGOLARE

Il controllo triangolare consiste in una gestione di tipo quadratico dell'apertura valvola AV che oscilla tra un valore massimo e minimo una volta che la pala raggiunge i punti morti inferiore e superiore.

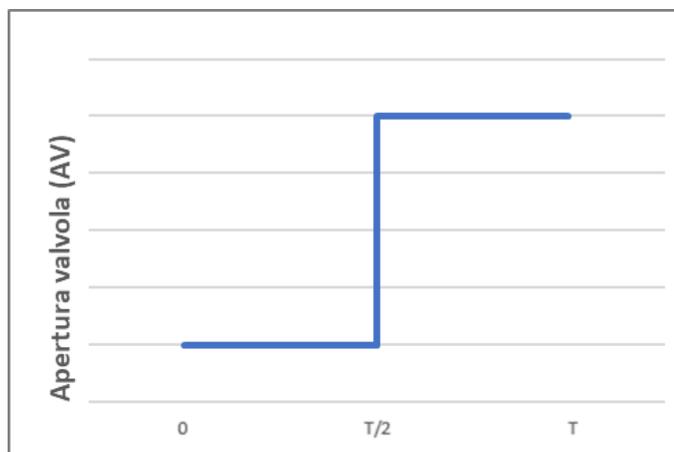


Figura 5.21 – AV in funzione del tempo per controllo triangolare

Essendo tale valore proporzionale alla velocità della pala, il profilo delle posizioni occupate dalla stessa sarà del tipo illustrato nella successiva figura:

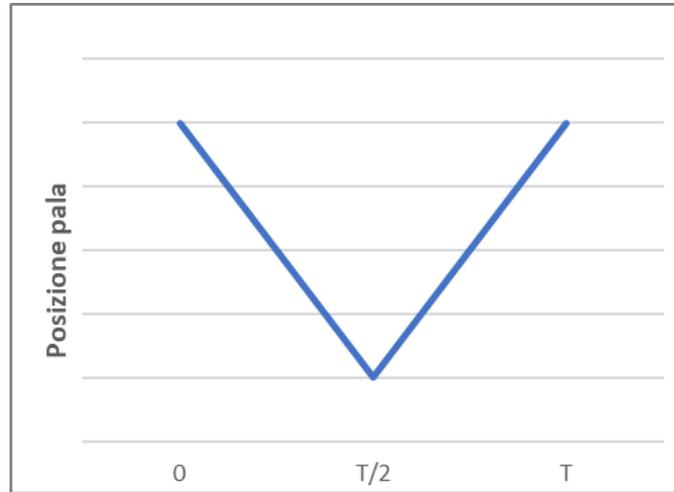


Figura 5.22 – Posizione pistone nel caso di controllo triangolare

### 5.3.2 CONTROLLO SIMMETRICO

Con l'obiettivo di ridurre gli stress meccanici sulla struttura durante il cambio di direzione di movimentazione, si è proceduto all'implementazione del controllo di tipo simmetrico, che presenta un rallentamento nel primo e nell'ultimo tratto della corsa del pistone. In Figura 5.23 è rappresentato l'andamento dell'apertura valvola in funzione del tempo per il controllo simmetrico.

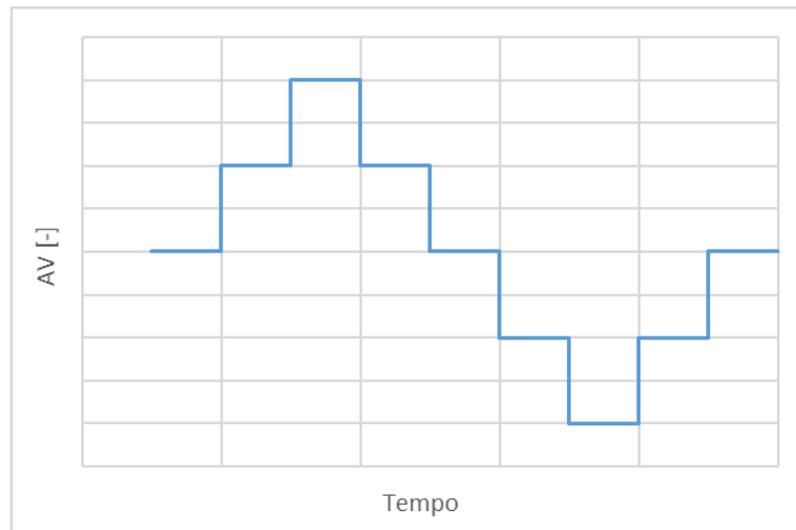


Figura 5.23 – AV in funzione del tempo per controllo simmetrico

Essendo, come noto, il valore AV proporzionale alla velocità del pistone, il profilo temporale delle posizioni assunte dalla pala, a meno di fenomeni inerziali e di velocità di commutazione della valvola, è mostrato in Figura 5.24.

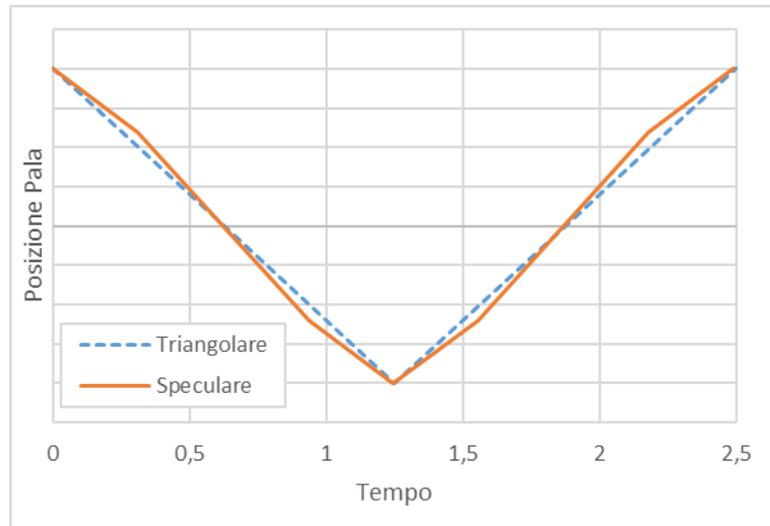


Figura 5.24 – Confronto tra posizione pistone nel caso di controllo triangolare e simmetrico

In seguito all'istruzione di *start* da parte dell'operatore, successivamente ad aver inserito gli input necessari al corretto funzionamento (velocità delle singole paratie, posizione minima e massima per ogni pistone, percentuale di rallentamento dalla velocità iniziale e posizione di inizio rallentamento), il controllo esegue un'equalizzazione delle paratie nel minimo di ogni pistone prima di iniziare la movimentazione vera e propria. Operazioni di questo tipo vengono svolte ogni volta che si raggiunge un fine corsa (o inizio corsa) per evitare che eventuali ritardi delle singole paratie, protraendosi nel tempo senza effettuare correzioni, possano falsare i risultati dei test sperimentali.

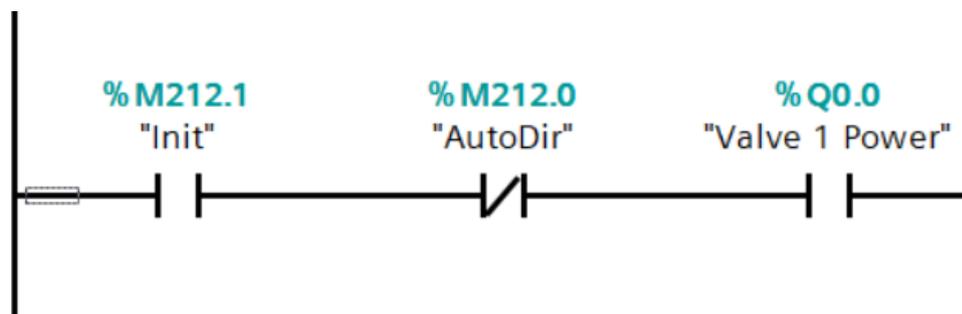


Figura 5.25 – Variabili di inizio moto comuni a tutte le paratie

I parametri in Figura 5.25 sono variabili booleane, ognuna con una funzione di controllo differente:

- **Init:** inizialmente di valore 0, al termine delle operazioni di equalizzazione successive al comando *start* viene portata a 1, valore a cui rimane fino allo *stop* della movimentazione.
- **AutoDir:** controlla che il programma esegua le istruzioni successive solo se la direzione di movimento è quella corretta. Se pari a 0 il moto corrente è quello di andata, se pari a 1 è quello di ritorno.
- **Valve 1 Power:** il programma permette di movimentare le paratie con qualsiasi combinazione possibile, non unicamente tutte insieme; questa variabile diventa 1 quando la paratia in esame (nel caso in figura la numero 1) è stata selezionata.
- Le stringhe alfanumeriche precedute dal simbolo “%” indicano in quale registro del PLC è stata memorizzata la variabile.

Quando tutte e tre le variabili in Figura 5.25 hanno valore 1 il programma esegue le istruzioni successive. Il controllo si presenta come in Figura 5.26, dove sono raffigurate alcune righe di programma che descrivono le operazioni di movimentazione per la paratia 1 nel moto di “andata” del pistone, ovvero da posizione minima a massima.

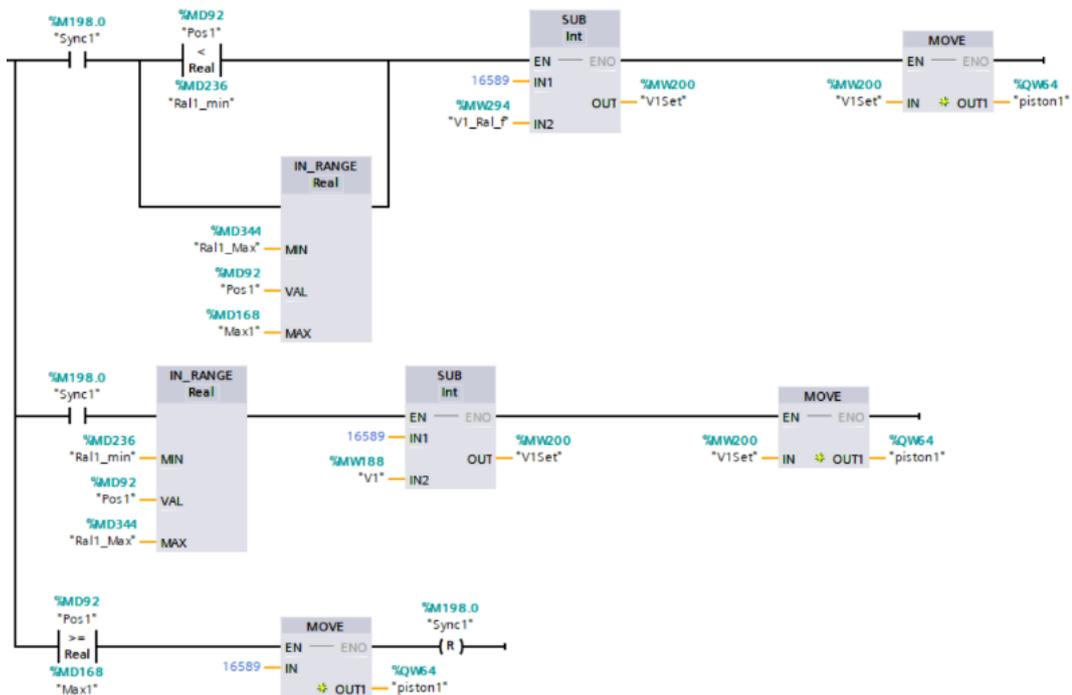


Figura 5.26 – Righe di programma con controllo simmetrico per la movimentazione della paratia 1 nel moto di andata

- Sync1: variabile booleana che diventa 1 quando le operazioni di equalizzazione durante un'inversione di direzione del moto vengono completate.
- Ral1\_min e Ral1\_max: posizioni che determinano gli intervalli di rallentamento
- V1 e V1\_Ral\_f: variabili intermedie dell'apertura valvola rispettivamente in input e già rallentata. Questi parametri vengono sottratti, nel caso di moto di andata, a 16589, valore neutro che corrisponde all'immobilità completa del pistone, e il risultato trovato viene assegnato a V1Set, variabile il cui valore viene trasferito tramite il blocco funzione MOVE al pistone. Al termine del trasferimento il pistone inizia il movimento con la velocità desiderata.
- Max1: posizione massima raggiunta dal pistone con la corsa selezionata.
- Pos1: valore elargito in *real time* dai laser solidali alla struttura ancorata alla banchina; determina la posizione attuale del pistone.

Come si può vedere in figura, il programma svolge istruzioni differenti in funzione della posizione del pistone: nella prima riga dall'alto, se sono soddisfatte le condizioni di posizionamento, avviene il rallentamento delle paratie; nella seconda riga invece sono presenti i comandi con cui la paratia si muove alla velocità impostata come input; nella terza riga, quando il pistone ha raggiunto la sua posizione massima, l'impianto si ferma per un istante per poter invertire la direzione del moto.

### 5.3.3 CONTROLLO SEMITRIANGOLARE

La configurazione Semi-Triangolare rappresenta l'ultima evoluzione delle forme implementate. L'innovazione introdotta da questo controllo risiede nel fatto che si ha un rallentamento *solo* in prossimità del punto morto, cosicché si hanno solo due rette descrittive della posizione del pistone nel tempo ed un solo punto di raccordo: nella configurazione speculare, invece, si avevano tre spezzate e due punti di raccordo. Si riporta la geometria appena discussa (Figura 5.27):

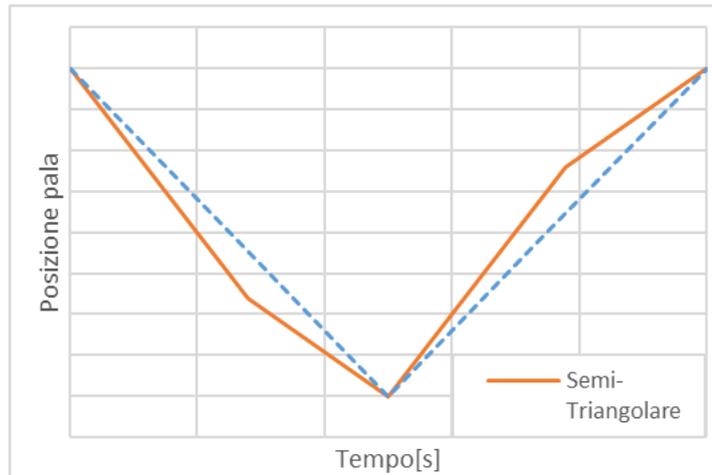


Figura 5.27 – Confronto tra posizione pistone nel caso di controllo triangolare e semi-triangolare

Tale moto è realizzato imponendo alla valvola proporzionale (ossia al parametro AV) una legge oraria del tipo mostrata in Figura 5.28.

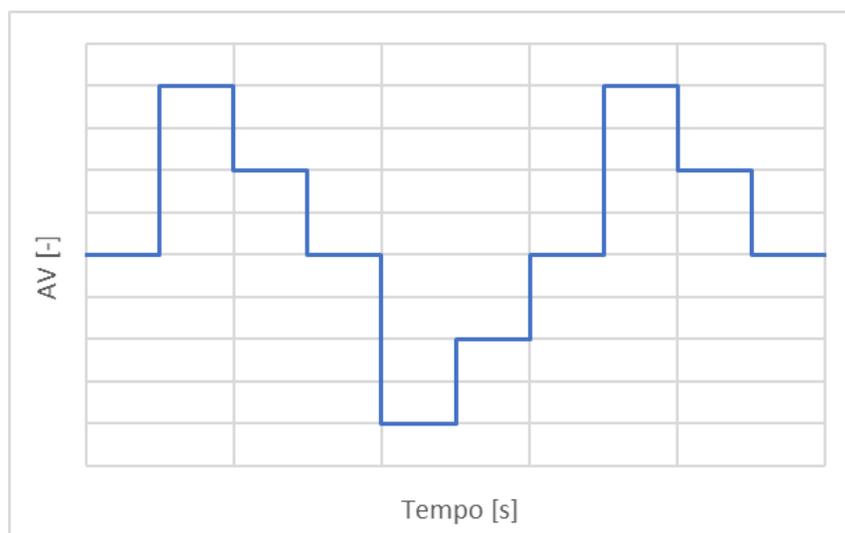


Figura 5.28 – AV in funzione del tempo per controllo semi-triangolare

Gli input sono, ovviamente, diversi dalle forme precedenti, in particolare:

- T è il periodo in secondi
- C è la corsa del pistone
- AV1 è l'apertura valvola iniziale
- %CORSA, vale a dire la percentuale di corsa cui inizia il rallentamento
- %VEL che rappresenta la percentuale di quanto deve essere ridotta la velocità
- AV2, ossia l'apertura valvola 2

Dal punto di vista software gli input rimangono i medesimi, i cambiamenti apportati alle righe di programma sono raffigurate in Figura 5.29.

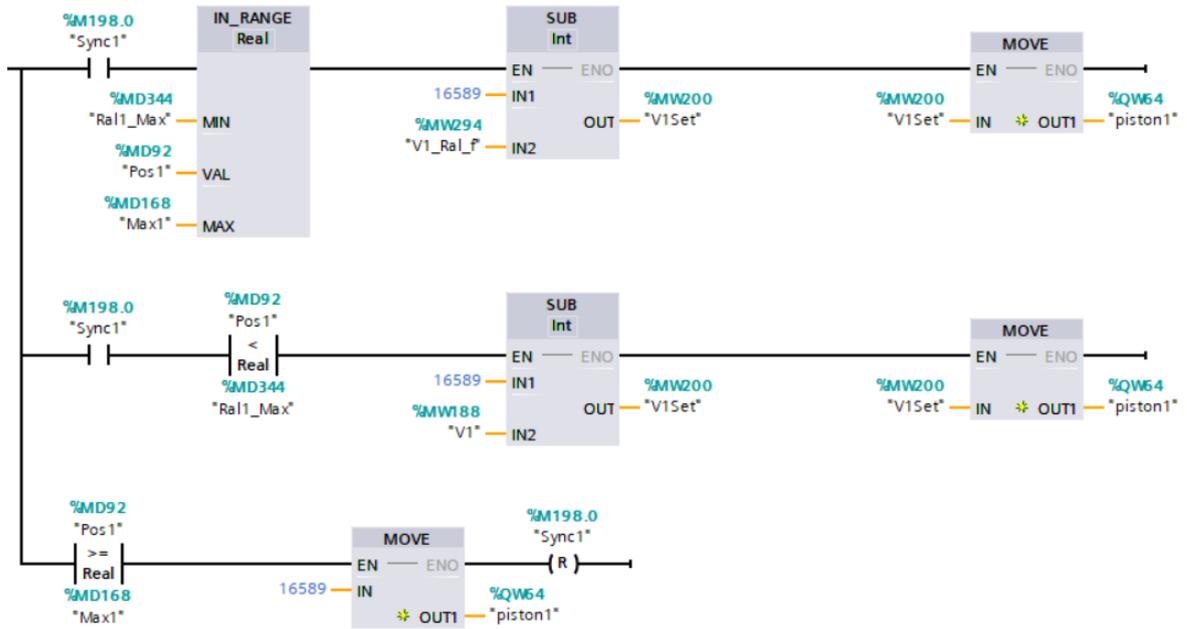


Figura 5.29 – Righe di programma con controllo semi-triangolare per la movimentazione della paratia 1 nel moto di andata

Le modifiche effettuate vertono sul range di posizionamento del pistone per l'esecuzione del rallentamento. Analogamente al controllo simmetrico la prima riga, se soddisfatte le condizioni di posizionamento, esercita il rallentamento delle paratie, la seconda riga controlla l'andamento a velocità piena e la terza arresta il pistone per permettere il cambio di direzione del moto.

## 5.4 CARATTERIZZAZIONE FACILITY

### 5.4.1 SISTEMA DI ACQUISIZIONE ED ANALISI DEI DATI

Il sistema di rilevamento costituisce una parte fondamentale nella campagna sperimentale svolta. Esso assolve il compito di campionare le perturbazioni, prodotte nelle diverse batterie di test effettuati, con lo scopo di predisporle alle successive elaborazioni. Gli elementi costituenti tale sistema sono divisibili in:

#### SENSORE A ULTRASUONI

Il sensore un cono di visibilità di 15° di semi-apertura e un'uscita analogica in corrente, con intervallo di 4-20 mA, preferita all'uscita 0-10 V, in quanto, questa soluzione permette una maggiore accuratezza della misura, soprattutto quando si opera con lunghi cablaggi e la resistenza dei cavi non è più trascurabile. Questi appartiene alla famiglia dei sensori a

diffusione diretta: la capsula ultrasonica viene eccitata mediante impulsi ad alta tensione al punto che inizia ad emettere un segnale ultrasonico. Il segnale ultrasonico viene riflesso dal target verso il sensore. Il circuito di rilevamento misura il tempo tra l'istante di emissione e quello di ricezione del segnale ultrasonico. Poiché la velocità del suono nell'aria è nota e pari a 343,3 [m/s], è facile ricavare non solo un'indicazione della presenza dell'oggetto, ma anche una misura della distanza dell'oggetto dal sensore, secondo la relazione (4.1).

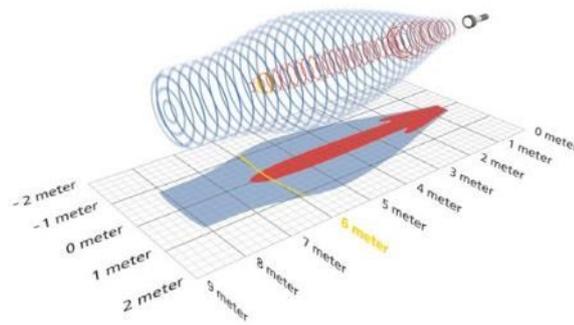
$$Distanza = \frac{1}{2} \cdot (v_s \cdot t) \quad (5.2)$$

Dove  $v_s$  è la velocità del suono mentre  $t$  è l'intervallo di tempo misurato. In questo modello, la capsula ad ultrasuoni funziona prima da generatore del fascio ultrasonico e poi da ricevitore. Fintanto che la capsula è in modalità "emissione", non può essere rilevato alcun segnale. Per questo motivo davanti al sensore si crea una "zona cieca", in cui il rilevamento degli oggetti non è possibile o affidabile, la cui dimensione dipende dalla tipologia di capsula utilizzata. Nella Figura 5.30 è riportata la versione del misuratore in dotazione all'Ondogeno di La Spezia:



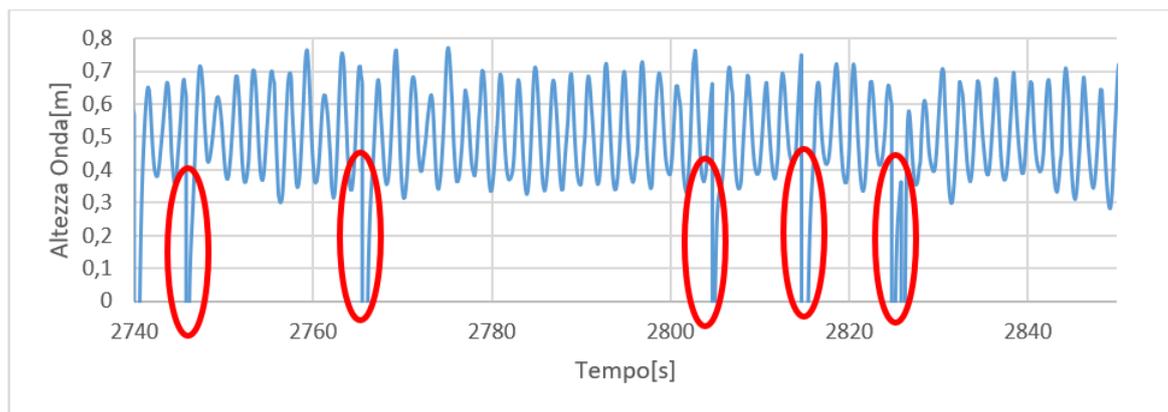
Figura 5.30 – Sensore a Ultrasuoni mic600+/iu/tc

Lo strumento in questione presenta una zona di non visibilità di 600 mm, che ha portato dei problemi in termini di rilevamenti, derivanti dalle condizioni reali di svolgimento dei test e dalla non perfetta immobilità della struttura di sostegno. Da sottolineare, l'intervallo di misurazione compreso fra 600 e 6000 mm. La frequenza di campionamento di lavoro è di 10 Hz (nella realtà, tuttavia, essa oscilla fra 8 e 9 Hz, con valori diversi per la geometria speculare e semi-triangolare). Nelle acquisizioni, inoltre, si è presentato un problema inaspettato, strettamente correlato alle condizioni di svolgimento dei test, che ha dato origine a "picchi" nelle forme d'onda: tale inconveniente è dovuto al fatto che alcuni segnali escono dal cono di visibilità, cadendo nella suddetta zona grigia di quest'ultimo. Nella Figura 5.31 è mostrata la configurazione di lavoro adottata in questa trattazione:



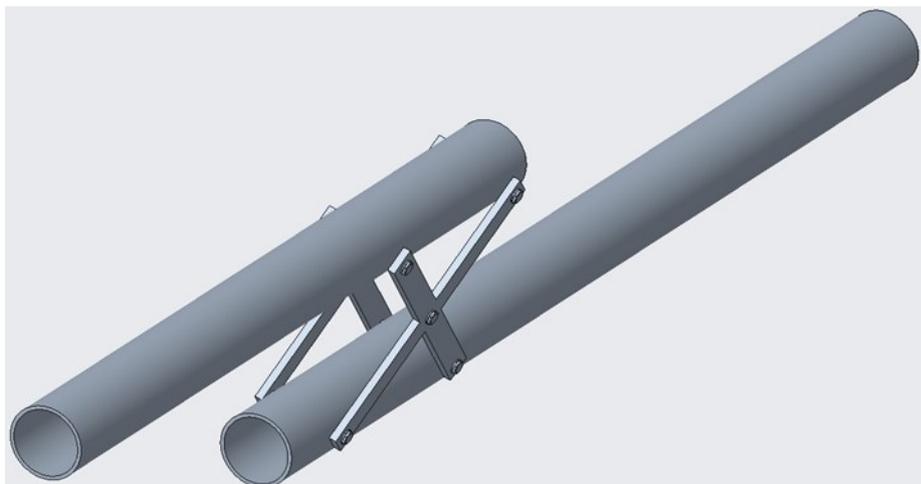
*Figura 5.31 – Cono di lavoro del Sensore*

Alcuni di essi sono captati come ingresso, e sono elaborati come punti con valori estremamente elevati, visibilmente non consistenti alle prove effettuate e che “sporcano” le forme d’onda acquisite rendendo difficile se non impossibile le successive operazioni di post-processing (Figura 5.32).



*Figura 5.32 – Esempio di picchi nelle forme d'onda*

Per ovviare a questa condizione, si è deciso di allontanare ulteriormente il sensore dal pelo libero dell’acqua, attraverso un rialzo dell’asta di sostegno, alla cui estremità era fissato il campionatore, come mostrato in Figura 5.33:



*Figura 5.33 – Sostegno del sensore*

Questa soluzione si è rivelata positiva, poiché ha diminuito sensibilmente il numero di picchi ed è stata adottata in tutte le prove successive.

Effettuando un'analisi più precisa dei dati acquisiti, si è, poi, notato che vi è una linea di separazione fra i dati attendibili e quelli da non considerare, comune a tutte le Geometrie sviluppate: tale limite è stato formalizzato per un valor di  $H$  pari a 0,2 m: i valori al di sotto di questo “confine” sono stati, dunque, trattati come rumore e filtrati.

#### **POSIZIONAMENTO DEL SENSORE**

Il sistema di acquisizione è posto a 5 metri dal sistema Ondogeno e bloccato con morsette per evitare la rotazione attorno all'asse dell'asta, come mostrato in figura. La scelta di tale posizionamento è motivata dal fatto che le rilevazioni devono essere svolte su onde pienamente sviluppate e, soprattutto, non influenzate dal moto di ritorno delle paratie. Queste ultime, infatti, nelle loro immediate vicinanze, generano “rumore” che rischia di andare a sovrapporsi ai dati di interesse.

#### **LOGICA DI ACQUISIZIONE TECHCOM S.R.L:**

Per tenere traccia delle onde prodotte, è stato utilizzato, invece, un sistema di acquisizione sviluppato da TechCom S.R.L., costituito da:

- **Batteria** da 12 Volt e 9 A·h
- **Parte HW**, con la gestione dei dati acquisiti per mezzo dei relativi circuiti integrati. Le caratteristiche sono: 8 canali ADC 16bit ottenuti con l'impiego di due chip e suddivisi in 6 di acquisizione e 2 di controllo, modulo RTC (con problematiche

relative, esposte in seguito) con batteria tampone, utile per mantenere il clock anche in assenza di alimentazione, compatibilità con i BUS TechCom TC\_Bus 1 e TC\_Bus 2 (Figura 5.34).

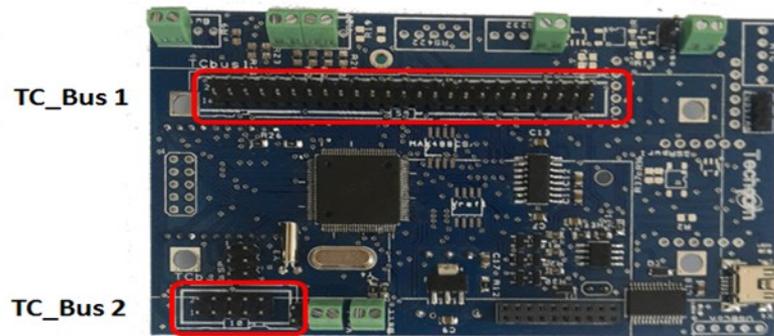


Figura 5.34 – Bus della Scheda Madre realizzata da Techcom S.R.L

Il TCNode è una scheda a microcontrollore che ospita un chip della Atmel. Questo dispositivo ospita “on board” diversi bus di interfaccia utili per l’acquisizione di molte periferiche e si presta come base ideale per i progetti di monitoraggio e controllo. La scheda completa è visibile in Figura 5.35.

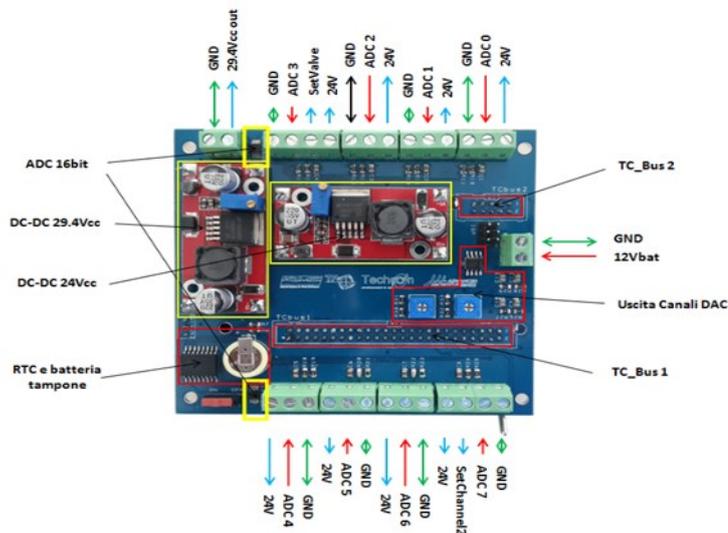


Figura 5.35 – Scheda completa, vedasi nomi produttori su scheda

- **Slot per micro-SD**, sulla quale viene salvato un file di testo, contenente le misurazioni delle onde. Esso contiene due colonne di interesse: la prima riporta il momento in cui è stata fatta la misurazione, da cui si risale al tempo trascorso fra due misurazioni successive, la seconda contiene i valori delle rilevazioni in mA. Tale file di testo, una volta trattato, viene eliminato dalla schedina, altrimenti s’incorre in

problemi di memorizzazione e sovrascrittura dei dati, dovuti alla presenza di un solo registro preposto allo svolgimento di tali passaggi.

- **Levetta analogica** per cambiare modalità di lavoro del sistema, non utilizzata in questo frangente. Essa è dotata di 3 posizioni: in questa trattazione è stata adottata quella che garantisce un funzionamento “in continua” del sistema trattato.

Problema abbastanza importante è la mancanza di un modulo nel firmware della scheda di acquisizione che aggiorni RTC (Real Time Clock). Quest’ultimo, quindi, riparte a contare daccapo ogni volta che vi è collegata la batteria e il tempo viene contato grazie all’interrupt del timer del microcontrollore, il quale è dotato di un timer caratterizzato da un quarzo con frequenza pari a 32KHz. L’RTC avrebbe dovuto avere una batteria ausiliaria per il funzionamento in assenza di alimentazione, ma per gli studi svolti, ciò non era vincolante: non interessava il tempo assoluto, ma solo per quanto si era campionato. Si è dovuto risalire alla frequenza di campionamento in modo pratico, ossia mediante la relazione approssimata (5.3):

$$f_{camp} = \frac{N^{\circ}valori}{Intervallo\ di\ tempo\ considerato} \quad (5.3)$$

Le frequenze trovate per mezzo di questo metodo differiscono, per le implementazioni testate durante questa campagna sperimentale, per non più di decimi di Hz.

#### 5.4.2 OPERAZIONI PRELIMINARI SUI DATI ACQUISITI

Il sistema misura la tensione letta su una resistenza R avente valore pari a 100  $\Omega$ , da cui è stato possibile risalire alla corrente, indicata nella formula (5.4) con i (espresso in mA).

$$d = V_s \cdot \frac{\Delta L}{\Delta i} \cdot \frac{1}{R} \quad (5.4)$$

Dove:

- d = distanza misurata [mm]
- $\Delta L$  = intervallo di distanza misurabile (pari a 5400 mm)
- $\Delta i$  = intervallo di corrente generata dal sensore (pari a 16 mA)

Si noti che i valori di d rappresentano le misurazioni rispetto alla posizione del dispositivo e, quindi, le altezze in negativo, poi trattate secondo la formula (5.5):

$$H_{real} = 2 \cdot D_s - d \quad (5.5)$$

In cui  $D_s$  rappresenta la distanza fra il punto di campionamento appartenente all'onda e la posizione del sensore stesso.

Tramite la quale sono state ottenute le misurazioni reali delle variazioni delle quote delle perturbazioni prodotte.

Ovviamente, i dati non sono ancora pronti per l'analisi, in quanto essi non costituiscono un segnale a valore medio nullo, ma si trovano traslati verso l'alto, rispetto ad un valore medio: si necessita, dunque, di un centraggio attorno all'asse dei tempi. Si è effettuato tale passaggio mediante una media matematica dei valori acquisiti, che ha consentito l'individuazione di un fattore di "abbassamento" delle forme d'onda, processo mostrato in Figura 5.36. Una volta terminata l'acquisizione, sono stati prodotti degli spettri partendo dalla documentazione ottenuta.

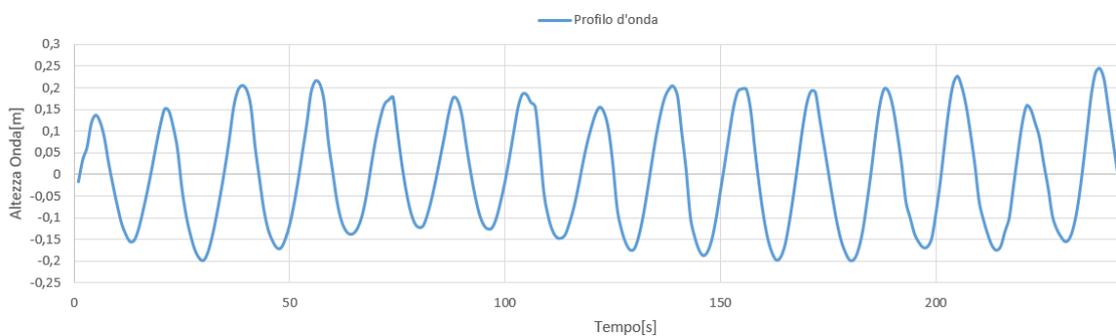


Figura 5.36 – Centraggio di una forma d'onda

La parte di analisi delle acquisizioni è stata portata avanti mediante processo automatizzato: è stato sfruttato un foglio di calcolo con l'implementazione del processo di antitrasformazione mediante la trasformata di Fourier, uno strumento matematico che permette la scomposizione di un generico segnale periodico come somma di funzioni sinusoidali, pesate su opportuni coefficienti:

$$S(t) = \sum a_i \cdot \sin(\omega_i \cdot t) \quad (5.6)$$

Dove:

- $a_i$  è l'ampiezza dell' $i$ -esima componente
- $\omega_i$  è la pulsazione dell' $i$ -esima componente

Il *modus operandi* prevede la scelta di un intervallo costituito da 256 dati che non presenti valori non consistenti, o, meglio picchi, da riportare nelle apposite locazioni, la conoscenza della frequenza di campionamento delle grandezze o Sample Rate. Il periodo di campionamento, ossia per quanto tempo il fenomeno è stato campionato, e la frequenza minima di campionamento sono ricavati automaticamente.

Sample Rate		8.438613052	Number of Samples		256	Time Period T		30.3367388	f <sub>min</sub>		0.032963332	Calc FFT	
Fourier Frequencies													
Sample	Time	Sampled signal	complex FFT coefficients		Freq. Index	Fre- quency	Fourier Coefficients		Power	Fre- quency			
			Re	Im			An (Cosine Term)	Bn (Sine Term)					
1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
2,00	0,12	-0,05	-1,52617804307	1,00	0,03	-0,01	0,00	0,01	0,00	0,03			
3,00	0,23	-0,08	-0,20792864436	2,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07			
4,00	0,35	-0,10	-0,61791865288	3,00	0,10	0,00	0,00	0,01	0,00	0,10			
5,00	0,47	-0,11	8,897831354047	4,00	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13			
6,00	0,59	-0,09	0,11906334013	5,00	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16			
7,00	0,70	-0,05	-0,5390589920	6,00	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20			
8,00	0,82	0,01	-0,77173852709	7,00	0,23	-0,01	-0,01	0,01	0,00	0,23			
9,00	0,94	0,06	0,38066280294	8,00	0,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,26			
10,00	1,06	0,11	-0,10060639503	9,00	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30			
11,00	1,17	0,12	-0,15485239131	10,00	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33			
12,00	1,29	0,08	-0,21546526896	11,00	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,36			
13,00	1,41	0,03	-1,72892812433	12,00	0,40	-0,01	0,00	0,01	0,00	0,40			
14,00	1,53	-0,03	-0,27402471356	13,00	0,43	0,00	0,01	0,01	0,00	0,43			
15,00	1,64	-0,08	-1,33969401908	14,00	0,46	-0,01	0,00	0,01	0,00	0,46			
16,00	1,76	-0,11	-0,74338702012	15,00	0,49	-0,01	0,00	0,01	0,00	0,49			
17,00	1,88	-0,12	-0,96069505637	16,00	0,53	-0,01	0,00	0,01	0,00	0,53			
18,00	1,99	-0,12	-1,41706046480	17,00	0,56	-0,01	0,00	0,01	0,00	0,56			
19,00	2,11	-0,08	-1,16193815340	18,00	0,59	-0,01	0,01	0,01	0,00	0,59			
20,00	2,23	-0,03	-0,87857081557	19,00	0,63	-0,01	0,00	0,01	0,00	0,63			
21,00	2,35	0,04	-1,72094532022	20,00	0,66	-0,01	-0,01	0,02	0,00	0,66			
22,00	2,46	0,09	-4,24952120061	21,00	0,69	-0,03	0,01	0,04	0,00	0,69			
23,00	2,58	0,13	11,52558117895	22,00	0,73	0,09	-0,02	0,09	0,01	0,73			
24,00	2,70	0,11	5,30475525636	23,00	0,76	0,03	0,00	0,03	0,00	0,76			
25,00	2,82	0,06	1,00768912555	24,00	0,79	0,01	-0,01	0,01	0,00	0,79			
26,00	2,93	-0,01	1,37337633844	25,00	0,82	0,01	0,00	0,01	0,00	0,82			
27,00	3,05	-0,06	0,39850377014	26,00	0,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,86			

Figura 5.37 – Foglio di calcolo per trasformata di Fourier

Tramite questa procedura è possibile isolare le principali componenti dell'onda generata, permettendo l'individuazione delle sue caratteristiche: altezza, periodo e ordine di Stokes. Sono, poi, stati predisposti dei grafici, basati sui risultati del precedente foglio di calcolo, sui quali visualizzare le frequenze costituenti, la loro ampiezza e avere anche un'idea del rumore di fondo, visibile come addensamento e sovrapposizione di punti.

Tale analisi permette di ricavare la distribuzione in frequenza delle componenti principali dell'onda, da cui, isolando le ampiezze principali ed individuando la frequenza di picco, è possibile ricavare l'altezza ed il periodo della stessa.

Si prenda ad esempio lo spettro della frequenza rappresentato in Figura 5.38 ottenuto considerando i risultati di un generico test: si possono individuare due picchi di ampiezza alle frequenze  $f$  e  $2f$ ; questo significa che il profilo dell'onda si può fare risalire alla somma di un'onda lineare di frequenza  $f$  e una, di ampiezza sensibilmente minore, di frequenza doppia. L'altezza della componente principale dell'onda risulta essere il doppio della somma dei valori dell'ampiezza dei due picchi mentre il periodo si ottiene come  $1/f$ . La presenza di due picchi permette di catalogare l'onda al secondo ordine di Stokes.

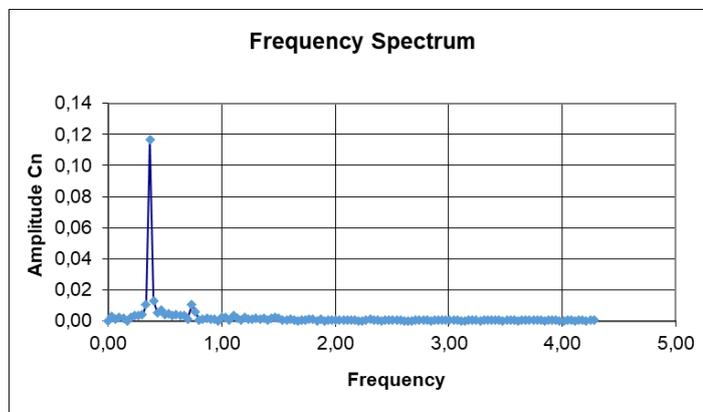


Figura 5.38 – Spettro della frequenza dell'onda ottenuta dal test 17

### 5.4.3 CARATTERIZZAZIONE CON CONTROLLO TRIANGOLARE

La corsa del pistone e l'apertura della valvola sono i parametri variabili; si è proceduto quindi variando la corsa del pistone tra 30 cm e 60 cm e la velocità di apertura della valvola tra i valori di 5000 e 11000. In Tabella 5.6 vengono riportati i parametri relativi a ogni test:

AV C	11000	10000	9000	8000	7000	6000	5000
30	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7
40	Test 8	Test 9	Test 10	Test 11	Test 12	Test 13	-
50	Test 14	Test 15	Test 16	Test 17	Test 18	Test 19	-
60	Test 20	Test 21	Test 22	Test 23	-	-	-

Tabella 5.6 – Dati dei test effettuati

I valori ottenuti da ogni prova si riferiscono al segnale misurato dal sensore da convertire con la formula (5.5) per ottenere il profilo dell'onda in esame. In Figura 5.39 viene rappresentato l'esempio del profilo d'onda ottenuto dal test 21:

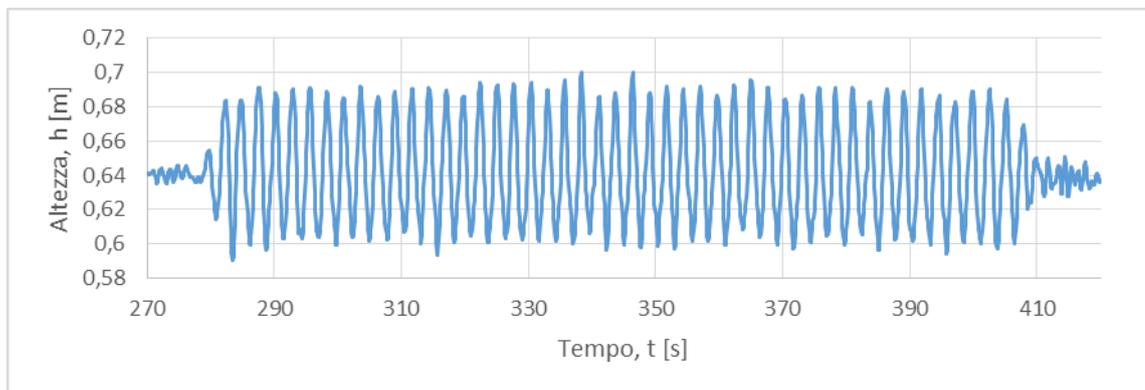


Figura 5.39 – Profilo d'onda ottenuto dal Test 21

Mediante la procedura precedentemente esposta, è stato possibile individuare la tipologia di onda (ordini di Stokes) e, soprattutto, l'altezza e il periodo della componente principale di ogni onda; questi ultimi risultati vengono riportati nella Tabella 5.7.

	<b>Tipologia d'onda</b>	<b>H[m]</b>	<b>T[s]</b>
<b>Test 1</b>	3 ordine Stokes	0,2899	1,5021
<b>Test 2</b>	3 ordine Stokes	0,3189	1,5811
<b>Test 3</b>	2 ordine Stokes	0,2579	1,6690
<b>Test 4</b>	2 ordine Stokes	0,2963	1,7672
<b>Test 5</b>	2 ordine Stokes	0,1975	2,0028
<b>Test 6</b>	2 ordine Stokes	0,1892	2,1458
<b>Test 7</b>	2 ordine Stokes	0,1775	2,7311
<b>Test 8</b>	3 ordine Stokes	0,3588	1,8672
<b>Test 9</b>	2 ordine Stokes	0,3368	1,9917
<b>Test 10</b>	2 ordine Stokes	0,3184	2,1340
<b>Test 11</b>	2 ordine Stokes	0,2435	2,2981
<b>Test 12</b>	2 ordine Stokes	0,2042	2,4896
<b>Test 13</b>	2 ordine Stokes	0,1673	2,9876
<b>Test 14</b>	2 ordine Stokes	0,4167	2,1358
<b>Test 15</b>	2 ordine Stokes	0,3688	2,3001
<b>Test 16</b>	2 ordine Stokes	0,2863	2,4918
<b>Test 17</b>	2 ordine Stokes	0,2548	2,7183
<b>Test 18</b>	2 ordine Stokes	0,1972	2,9902
<b>Test 19</b>	2 ordine Stokes	0,1397	3,3224
<b>Test 20</b>	2 ordine Stokes	0,3687	2,4877
<b>Test 21</b>	2 ordine Stokes	0,3797	2,7139
<b>Test 22</b>	2 ordine Stokes	0,3086	2,9853
<b>Test 23</b>	2 ordine Stokes	0,1707	3,3169

*Tabella 5.7 – Altezze e periodi delle componenti principali di ogni onda generata*

Gli stessi profili possono essere individuati anche sul diagramma di Le Mehauté, come mostrato in Figura 5.40.

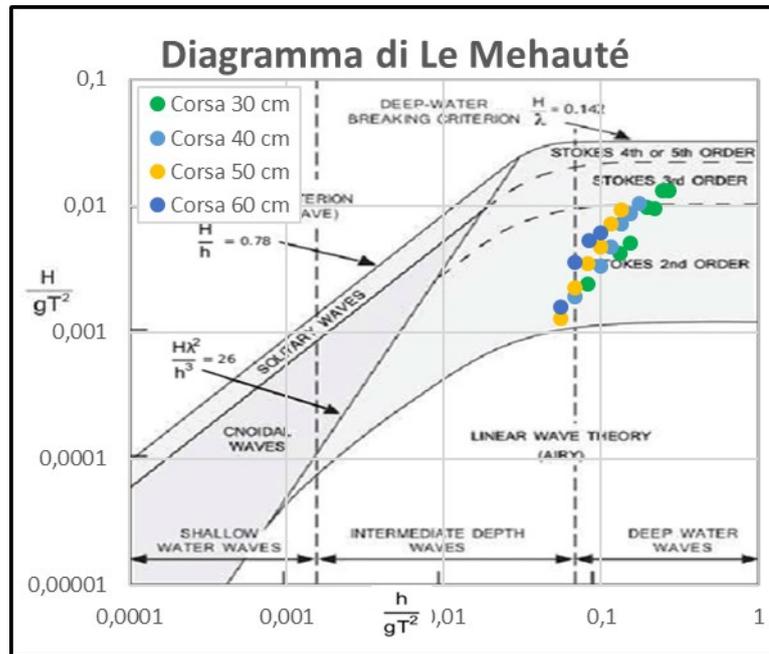


Figura 5.40 – Caratterizzazione con controllo triangolare

#### 5.4.4 CARATTERIZZAZIONE CON CONTROLLO SEMITRIANGOLARE

In quest'ultima fase della campagna sperimentale si è proceduto alla caratterizzazione del controllo semi-triangolare studiando il comportamento dell'impianto al variare della %Corsa e della corsa dei pistoni, mantenendo costante la percentuale di rallentamento a 0,5. In Tabella 5.8 è presente la batteria di test effettuata. Le prove con corsa 30 cm e %corsa pari a 0,1 e 0,2 non sono state considerate rilevanti poiché la generazione di onde che ne conseguiva non era sufficientemente sviluppata.

<b>Corsa \ %Corsa</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>
<b>30</b>	[-]	[-]	Test A	Test B	Test C
<b>40</b>	Test D	Test E	Test F	Test G	Test H
<b>50</b>	Test I	Test J	Test K	Test L	Test M
<b>60</b>	Test N	Test O	Test P	Test Q	Test R

Tabella 5.8 – Test caratterizzazione controllo semi-triangolare

Fino al test L compreso è stata impostata un'apertura valvola pari a 11000 per ogni pistone, mentre dal test M in poi sono state apportate delle modifiche alla configurazione delle velocità per problemi di disallineamento delle paratie, come mostrato in Tabella 5.9. Le paratie che hanno richiesto maggiore controllo sono risultate essere la 1 e la 2.

	Paratia 1	Paratia 2	Paratia 3	Paratia 4	Paratia 5
Test M	10400	10400	11000	10800	10400
Test N,O,P	10200	10600	11000	10800	10400
Test Q,R	10000	10600	11000	10800	10400

Tabella 5.9 – AV modificate per le singole paratie

I valori ottenuti in ogni prova si riferiscono al segnale misurato dal sensore in mV, che necessita una conversione tramite le equazioni (5.4) e (5.5). Il profilo d'onda che ne consegue assume aspetto simile a quello del test H, raffigurato in Figura 5.41.

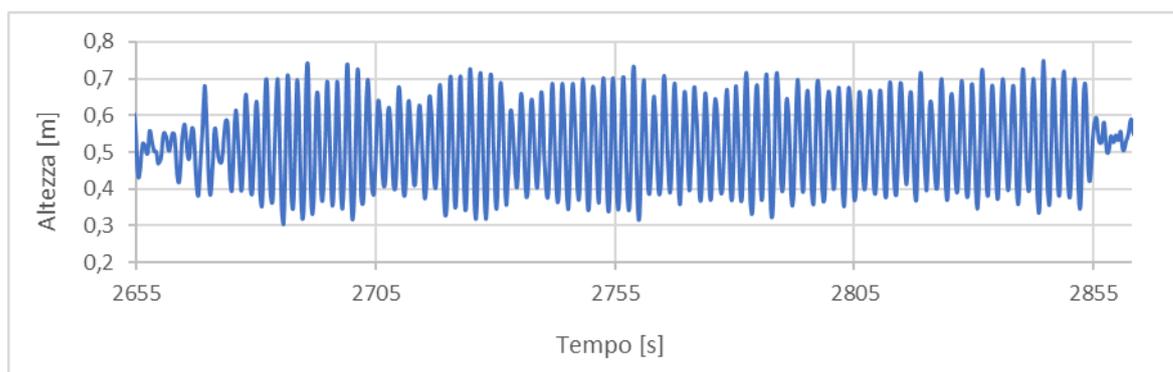


Figura 5.41 – Profilo d'onda test H

Analogamente a quanto già fatto per il controllo triangolare, i dati acquisiti durante i test sono stati postprocessati mediante lo strumento della trasformata di Fourier, consentendo l'individuazione di altezza e periodo principali per ogni profilo.

I risultati ottenuti dai test sono mostrati in Tabella 5.10.

Test	H [m]	T [s]	Ordine di Stokes
A	0,22	1,57	2
B	0,29	1,57	3
C	0,33	1,65	3
D	0,35	1,75	3
E	0,29	1,75	2
F	0,38	1,85	3
G	0,27	1,96	2
H	0,28	2,1	2
I	0,34	1,96	2

Test	H [m]	T [s]	Ordine di Stokes
J	0,3	2,1	2
K	0,29	2,25	2
L	0,27	2,62	2
M	0,27	2,86	2
N	-	-	-
O	0,37	2,62	2
P	0,31	2,86	2
Q	0,25	3,14	2
R	0,27	3,14	2

*Tabella 5.10 – Risultati test di caratterizzazione del controllo semi-triangolare*

Nei test A, D ed E è stato riscontrato che, nonostante in input fosse previsto un rallentamento del 50% rispetto alla velocità iniziale, lo sforzo meccanico a cui è sottoposta la struttura durante il cambio di direzione è ancora rilevante.

I risultati del test N sono stati omessi poiché, per via della presenza di numerosi picchi, non è stato possibile raccogliere un numero sufficiente di campioni per poter effettuare un'analisi mediante trasformata di Fourier.

In Figura 5.42 è visibile la generazione di onde effettuata nel test D; dalla particolare forma dell'onda, "appuntita", è deducibile come queste appartengano al terzo ordine di Stokes.



*Figura 5.42 – Generazione di onde test D*

Gli stessi profili possono essere individuati anche sul diagramma di Le Mehauté, come mostrato in Figura 5.43.

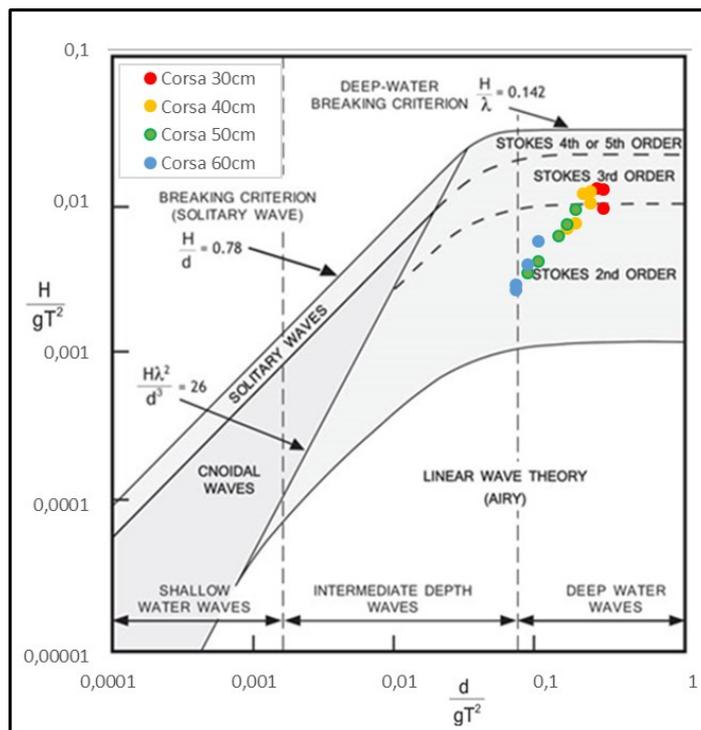


Figura 5.43 – Caratterizzazione con controllo semitriangolare

## 5.5 SIMILITUDINE PER STATO DI MARE OCEANICO / MEDITERRANEO

### 5.5.1 SIMILITUDINE CON CONTROLLO TRIANGOLARE

#### SIMILITUDINE PER ONDE OCEANICHE

Ottenuti i valori di altezza e periodo delle componenti principali è stato calcolato il valore di Wave Steepness ( $W_s$ ) già introdotto nel Capitolo 3 associato ad ogni onda prodotta, con la finalità di confrontarlo col valore associato nel caso di onde oceaniche che, secondo la trattazione di Pierson-Moskowitz, come già introdotto nel Capitolo 3, risulta avere valore costante.

Nel caso dei test condotti, invece, tale numero assume valore differente a seconda dei parametri operativi imposti, ossia in funzione della corsa e dell'apertura della valvola.

La Figura 5.44 mostra il confronto tra i valori di  $W_s$  associati agli stati di mare prodotti durante la campagna sperimentale e il valore (costante) associato agli stati di mare oceanici

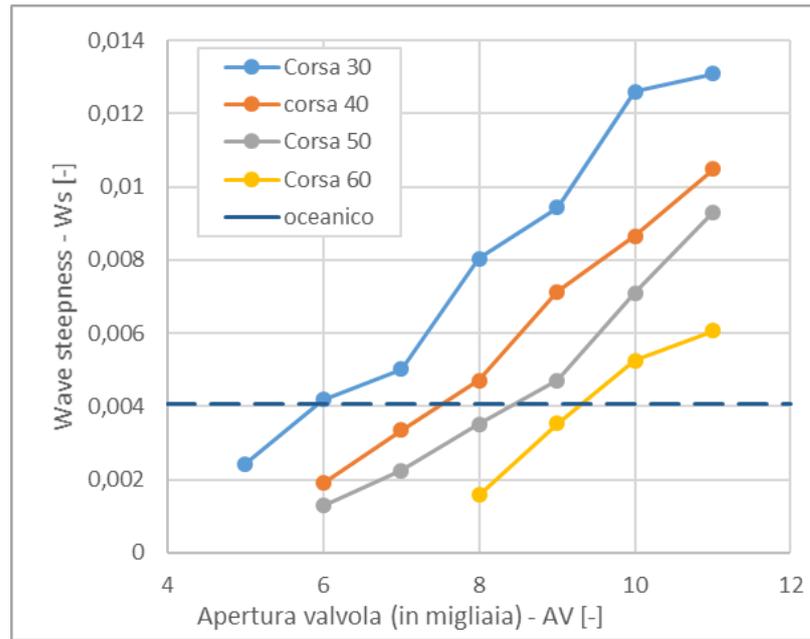


Figura 5.44 – Confronto tra Wave steepness onde oceaniche e onde generate con controllo triangolare

Come si può notare ad ogni valore di corsa del pistone esiste un valore di AV tale per cui il valore Ws associato all'onda prodotta è pari al valore Ws oceanico.

I parametri operativi da imporre alle pale e le caratteristiche delle onde generate per questi quattro punti sono riportate nella seguente Tabella 5.11:

	Corsa [cm]	AV [-] (*1000)	H [m]	T [s]	Ws
t_O1	30	6,1	0,19	2,2	0,00407
t_O2	40	7,4	0,23	2,4	0,00407
t_O3	50	8,4	0,27	2,6	0,00407
t_O4	60	9,2	0,34	2,9	0,00407

Tabella 5.11 – Onde producibili in similitudine con stato di mare oceanico

Abbiamo dunque a disposizione, in questo caso, 4 onde producibili con il generatore di onde in grado di riprodurre stati di mare oceanici, ovviamente tenendo in considerazione un opportuno fattore di scala. Confrontando le onde t\_O1, t\_O2, t\_O3 e t\_O4 con i valori riferiti agli stati del mare secondo la scala di Douglas, al variare di lambda (fattore di scala) è possibile risalire agli stati del mare che si possono riprodurre.

La successiva tabella riassume gli stati di mare riproducibili a partire dalle onde t\_O1, t\_O2, t\_O3 e t\_O4 al variare del fattore di scala  $\lambda$  tra 1 e 60. Nella Tabella 5.12 può notare che, variando tale valore, possono essere riprodotti stati di mare in similitudine da *seastate* 2 a *seastate* 9.

		Fattore di scala $\lambda$										
Seastate	H reale	1	2	5	10	15	20	25	30	40	50	60
	[m]											
2	0,19	t_O1										
	0,23	t_O2										
	0,27	t_O3										
	0,34	t_O4										
	0,39		t_O1									
	0,45		t_O2									
3	0,55		t_O3									
	0,7		t_O4									
	1			t_O1								
	1,15			t_O2								
	1,4			t_O3								
4	1,7			t_O4								
	2				t_O1							
	2,3				t_O2							
	2,8				t_O3	t_O1						
5	3,4				t_O4	t_O2						
	4					t_O3	t_O1					
	4,5						t_O2					
	4,8							t_O1				
6	5					t_O4						
	5,6						t_O3	t_O2	t_O1			
	6,8						t_O4	t_O3	t_O2			
7	8							t_O4	t_O3	t_O1		
	9									t_O2		
	9,7										t_O1	
8	10								t_O4			
	11									t_O3		
	11,5										t_O2	t_O1
	13,7									t_O4	t_O3	t_O2
9	16,5										t_O4	t_O3
	20											t_O4

Tabella 5.12 – Seastate riproducibili con onde oceaniche al variare del fattore di scala

Per esempio, imponendo un fattore di scala pari a 15 possono essere riprodotti stati di mare che variano da *seastate* 4 a *seastate* 6.

### SIMILITUDINE PER ONDE MEDITERRANEE

Analogamente con quanto fatto nel caso di onde oceaniche, è stato eseguito il confronto tra i valori di  $W_s$  ottenuti attraverso la campagna sperimentale con quelli associati agli stati di mare relativi al mar Mediterraneo. A differenza del caso oceanico, come già anticipato nel Capitolo 3 il valore del valore  $W_s$  nel caso di onde mediterranee non è costante ed assume valori maggiori al diminuire dell'altezza dell'onda.

Tale fenomeno ha permesso di individuare un valore di Wave steepness significativo per ogni *seastate*, notando che per valori di *seastate* superiori a 4 tale valore diventa costante e pari a 0,00364 (vedi Tabella 5.13)

	Wave steepness mediterraneo
Seastate	[-]
2	0,007804
3	0,006411
4	0,004514
5	0,00364
6	0,00364
7	0,00364
8	0,00364
9	0,00364

Tabella 5.13 – Valori  $W_s$  associati ai diversi stati di mare per onde mediterranee

La Figura 5.45 mostra il confronto tra i valori di  $W_s$  associati agli stati di mare prodotti durante la campagna sperimentale ed i valori associati agli stati di mare mediterranei:

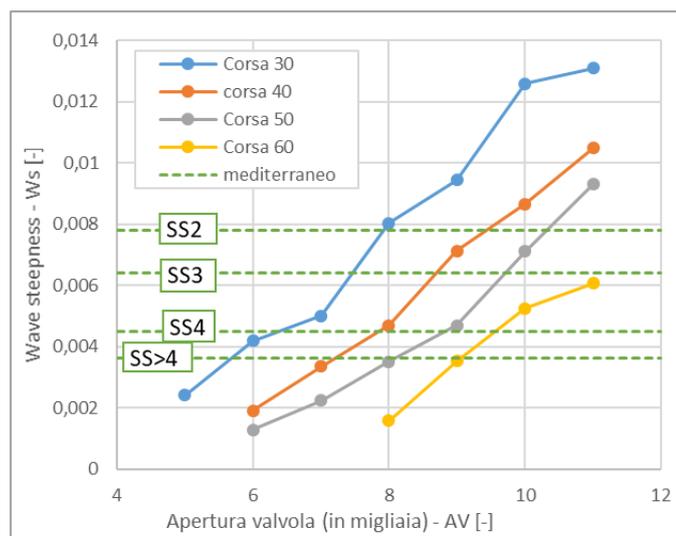


Figura 5.45 – Confronto tra Wave steepness onde mediterranee e onde generate con controllo triangolare

In questo caso abbiamo diversi valori di  $W_s$  a seconda del *seastate* considerato. Dunque, a parità di corsa del pistone, ci saranno diversi valori di AV da considerare in funzione del *seastate* che si vuole riprodurre (ad esempio, imponendo una corsa di 60 cm alla pala sarà possibile riprodurre esclusivamente *seastate* superiori a 3).

I parametri da imporre alle pale e le caratteristiche delle onde generate per i vari punti operativi sono riportati nella seguente Tabella 5.14

	Corsa [cm]	AV [-] (*1000)	H [m]	T [s]	$W_s$
<b>t_M1</b>	30	8,0	0,24	1,8	0,00780
<b>t_M2</b>	40	9,5	0,31	2,0	0,00780
<b>t_M3</b>	50	10,5	0,39	2,2	0,00780
<b>t_M4</b>	30	7,3	0,22	1,9	0,00641
<b>t_M5</b>	40	8,7	0,28	2,1	0,00641
<b>t_M6</b>	50	9,9	0,35	2,4	0,00641
<b>t_M7</b>	30	6,3	0,20	2,1	0,00451
<b>t_M8</b>	40	7,6	0,24	2,3	0,00451
<b>t_M9</b>	50	8,7	0,29	2,6	0,00451
<b>t_M10</b>	60	9,6	0,36	2,9	0,00451
<b>t_M11</b>	30	5,8	0,19	2,3	0,00364
<b>t_M12</b>	40	7,1	0,22	2,5	0,00364
<b>t_M13</b>	50	8,1	0,26	2,7	0,00364
<b>t_M14</b>	60	9,0	0,31	2,9	0,00364

Tabella 5.14 – Onde producibili in similitudine con stato di mare mediterraneo

Analogamente a quanto fatto precedentemente, considerando fattori di scala variabili tra 1 e 60 sono stati individuati gli stati di mare mediterranei riproducibili mediante queste 14 condizioni operative.

I dati relativi a questa similitudine sono riportati nella successiva Tabella 5.15

		Fattore di scala $\lambda$										
Seastate	H	1	2	5	10	15	20	25	30	40	50	60
	[m]											
2	0,24	t_M1										
	0,31	t_M2										
	0,39	t_M3	t_M1									
3	0,56		t_M5									
	0,7		t_M6									
	1,11			t_M4								
4	1,45			t_M9								
	1,8			t_M10								
	2				t_M7							
	2,35				t_M8							
5	2,7				t_M13	t_M11						
	3,2				t_M14	t_M12						
	3,8					t_M13	t_M11					
6	4,5					t_M14	t_M12	t_M11				
	5						t_M13					
	5,5							t_M12	t_M11			
	6,2						t_M14					
7	6,5							t_M13	t_M12			
	7,6							t_M14	t_M13	t_M11		
	8,6									t_M12		
8	9,4								t_M14		t_M11	
	10,5									t_M13	t_M12	
	11,3											t_M11
	12,5									t_M14	t_M13	
	13											t_M12
9	15,5										t_M14	t_M13
	18,6											t_M14

Tabella 5.15 – Seastate riproducibili con onde mediterranee al variare del fattore di scala

In questo caso, ad esempio, imponendo un fattore di scala pari a 30, mediante le onde producibili con t\_M11, t\_M12, t\_M13 e t\_M14 è possibile riprodurre stati di mare che variano da *seastate* 6 a *seastate* 8.

## 5.5.2 SIMILITUDINE CON CONTROLLO SEMITRIANGOLARE

### SIMILITUDINE PER ONDE OCEANICHE

La procedura, già introdotta nei paragrafi precedenti, ha come fine ultimo quello di individuare le onde generate grazie al controllo semitriangolare che possano essere assimilabili a profili oceanici, mediante un opportuno fattore di scala.

In Figura 5.46 è mostrato il confronto tra i valori di Wave steepness relativi ai test condotti, per diversi valori di corsa e per diversi valori di percentuale di rallentamento (%C), e quelli relativi al profilo oceanico di Pierson Moskowitz

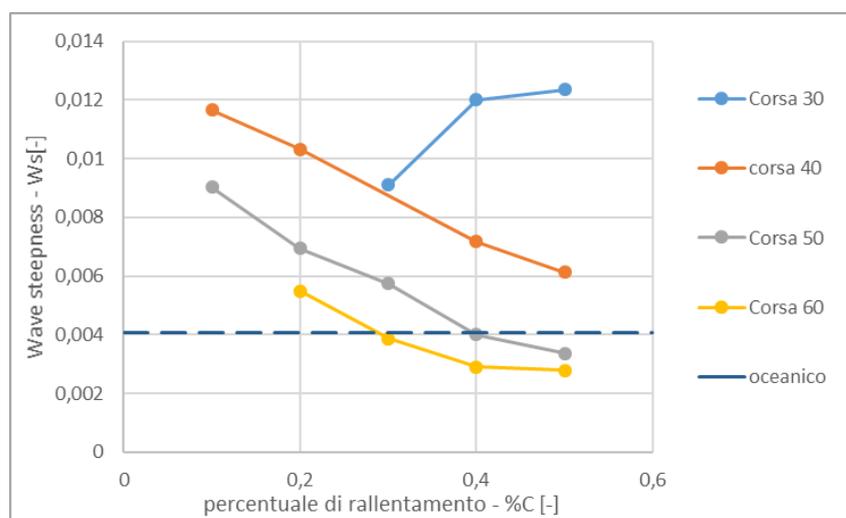


Figura 5.46 – Confronto tra Wave steepness onde oceaniche e onde generate con controllo semitriangolare

Si evince immediatamente che gli unici test che possono riprodurre uno stato di mare assimilabile al profilo di Pierson Moskowitz sono quelli eseguiti imponendo alle pale una corsa di 50 o 60 cm, ed un valore di %C specifico al fine di ottenere onde aventi il corretto valore di Ws.

In particolare, gli unici due profili spendibili per eseguire una similitudine con stato di mare oceanico, i parametri operativi e le caratteristiche relative sono riportati nella seguente Tabella 5.16:

	Corsa [cm]	%C [-]	H [m]	T [s]	Ws
st_O1	50	0,4	0,27	2,6	0,00407
st_O2	60	0,3	0,33	2,9	0,00407

Tabella 5.16 – Onde producibili in similitudine con stato di mare oceanico

Confrontando le onde st\_O1 e st\_O2 con i valori riferiti ai *seastate* secondo la scala di Douglas, facendo variare il fattore di scala  $\lambda$  da 1 a 60, è possibile ricreare tutti i 9 stati di mare ammessi da Douglas (Tabella 5.17).

		Fattore di scala $\lambda$										
Seastate	H	1	2	5	10	15	20	25	30	40	50	60
	[m]											
2	0,27	st_O1										
	0,33	st_O2										
3	0,54		st_O1									
	0,65		st_O2									
4	1,35			st_O1								
	1,6			st_O2								
5	2,7				st_O1							
	3,2				st_O2							
	4					st_O1						
	4,9					st_O2						
6	5,4						st_O1					
7	6,6						st_O2	st_O1				
	8,1							st_O2	st_O1			
	9,8								st_O2			
8	11									st_O1		
	13									st_O2		
	13,5										st_O1	
9	16										st_O2	st_O1
	20											st_O2

Tabella 5.17 – Seastate riproducibili con onde oceaniche al variare del fattore di scala

Per esempio, gli stati 6 e 7 del mare possono essere simulati con  $\lambda$  pari a 20 mentre gli stati 8 e 9 con  $\lambda$  pari a 50.

#### SIMILITUDINE PER ONDE MEDITERRANEE

Analogamente a quanto visto nei paragrafi precedenti, a differenza del caso oceanico, il profilo mediterraneo presenta un valore di Wave steepness non costante, e maggiore per stati di mare inferiori.

Si riporta nella successiva Figura 5.47 il confronto tra i valori di  $W_s$  ottenibili mediante i test e quelli associati agli stati di mare secondo profilo mediterraneo.

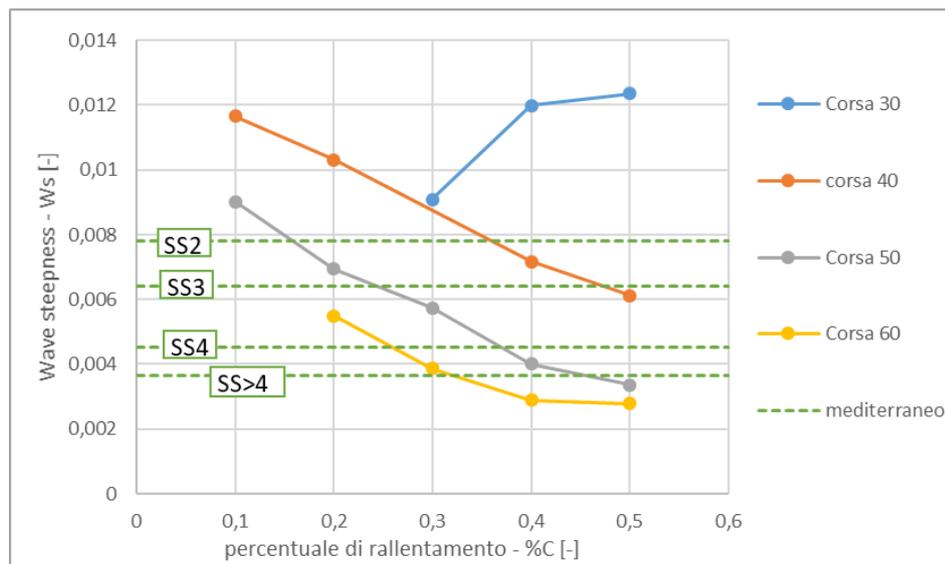


Figura 5.47 – Confronto tra Wave steepness onde mediterranee e onde generate con controllo semitriangolare

In questo caso si può notare che imponendo ai pistoni una corsa pari a 50 cm si possono riprodurre stati di mare assimilabili al profilo mediterraneo caratterizzato da qualunque livello di *seastate*, imponendo una corsa di 40 cm si potranno riprodurre *seastate* pari a 2 e 3 mentre imponendo una corsa pari a 60 si potranno riprodurre *seastate* non inferiori a 4.

Valutando il valore di  $\%C$  ricavato dall'intersezione delle curve associate ai test condotti a corsa costante con un determinato valore di  $Ws$ , si identificano le diverse condizioni operative spendibili al fine di riprodurre stati di mare in similitudine con quelli mediterranei.

I parametri da imporre alle pale e le caratteristiche delle onde generate per i vari punti operativi sono riportati nella seguente Tabella 5.18:

	Corsa [cm]	$\%C$ [-]	H [m]	T [s]	$Ws$
st_M1	40	0,4	0,27	1,89	0,00780
st_M2	50	0,2	0,32	2,04	0,00780
st_M3	40	0,5	0,27	2,05	0,00641
st_M4	50	0,2	0,29	2,2	0,00641
st_M5	50	0,4	0,27	2,5	0,00451
st_M6	60	0,2	0,35	2,8	0,00451
st_M7	50	0,5	0,27	2,7	0,00364
st_M8	60	0,3	0,30	2,9	0,00364

Tabella 5.18 – Onde producibili in similitudine con stato di mare mediterraneo

Analogamente a quanto fatto precedentemente, considerando fattori di scala variabili tra 1 e 60 sono stati individuati gli stati di mare mediterranei riproducibili mediante queste 8 condizioni operative.

I dati relativi a questa similitudine sono riportati nella successiva Tabella 5.19

		Fattore di scala $\lambda$										
Seastate	H	1	2	5	10	15	20	25	30	40	50	60
	[m]											
2	0,27	st_M1										
	0,32	st_M2										
3	0,54		st_M3									
	0,6		st_M4									
4	1,4			st_M5								
	1,8			st_M6								
5	2,7				st_M7							
	3				st_M8							
6	4					st_M7						
	4,5					st_M8						
	5,4						st_M7					
7	6						st_M8					
	6,7							st_M7				
	7,5							st_M8				
	8								st_M7			
8	9								st_M8			
	11									st_M7		
	12									st_M8		
	13,5										st_M7	
9	15										st_M8	
	16											st_M7
	18											st_M8

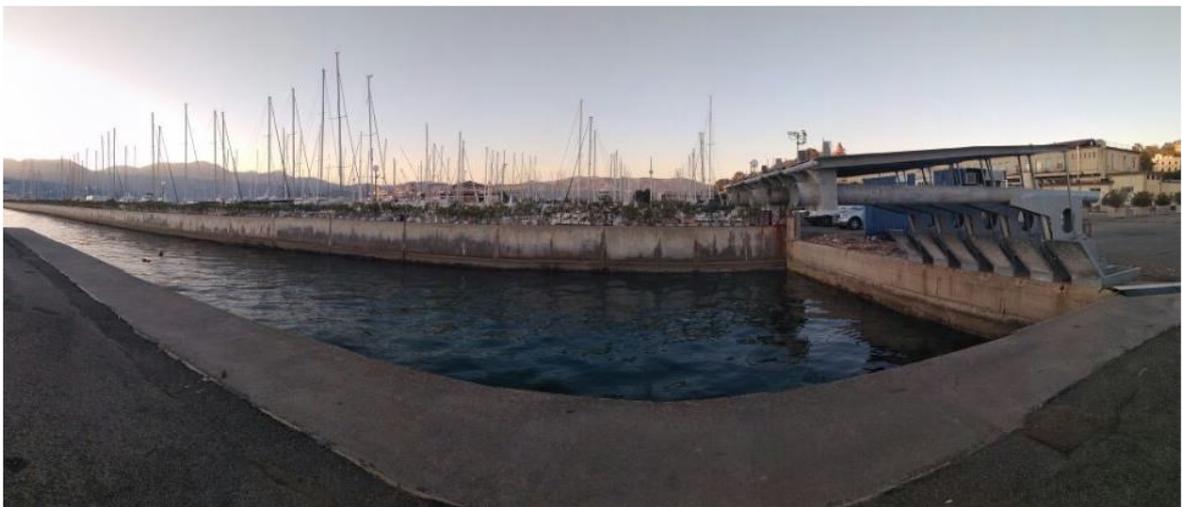
Tabella 5.19 – Seastate riproducibili con onde mediterranee al variare del fattore di scala

In questo caso, ad esempio, imponendo un fattore di scala pari a 20 possono essere riprodotti profili assimilabili a *seastate* 6 e 7, mentre imponendo un fattore di scala pari a 30 possono essere riprodotti profili assimilabili a *seastate* 7 e 8.

## 5.6 CONCLUSIONI

Le attività illustrate in questo capitolo riguardano il dispositivo di generazione di onda artificiale installato presso il CSSN di La Spezia.

La peculiarità di tale infrastruttura consiste nel fatto di essere installato su una banchina direttamente collegata al mare aperto, il che consente di eseguire test in ambiente controllato ma significativo (tenendo conto della possibilità di eventi estremi e la necessità di confrontarsi con le problematiche legate alla corrosione salina e al bio-fouling..) che rende questa infrastruttura unica in Europa, e spendibile per test che possano considerarsi intermedi tra le classiche attività sperimentali in vasca e la sperimentazione in mare aperto



*Figura 5.48 – Vista panoramica sul generatore di onde*

Come visto, durante le attività sono stati integrati diversi controlli per la movimentazione delle pale, ed è stata eseguita la caratterizzazione completa della macchina utilizzando il controllo “triangolare” ed il controllo “semitriangolare”.

È stata infine condotta un’analisi atta a individuare i parametri operativi da imporre alle pale al fine di generare treni d’onda in similitudine di con profili di tipo oceanico o mediterraneo, individuando i parametri che consentono di ottenere lo stesso valore di Wave steepness nelle varie condizioni.

Si è reso evidente come il controllo triangolare, nonostante generi sollecitazioni meccaniche superiori, risulti da questo punto di vista più versatile rispetto a quello semi-triangolare, potendo riprodurre fino a tre stati di mare differenti applicando un unico fattore di scala.

Le prossime attività relative a questa infrastruttura saranno la verifica sperimentale di tutti i punti operativi individuati per la similitudine oceanica e mediterranea, l’implementazione di ulteriori controlli, con relativa caratterizzazione, e, in ultima battuta, interventi sull’hardware della macchina che consentano di eseguire test fruibili imponendo alle pale corse superiori ai 60 cm.

# CAPITOLO 6

PROGETTO SEAWHAM  
SISTEMA INTEGRATO

## 6.1 DESCRIZIONE SISTEMA INTEGRATO

Come anticipato nel Capitolo 5, uno degli obiettivi del progetto Sea Wham ha previsto l'installazione a mare e la caratterizzazione di un convertitore dal moto ondoso ed il relativo sistema integrato dedicato alla compressione di aria, necessaria al funzionamento della microturbina [78]. Inizialmente era stata presa in considerazione la tecnologia di Seaspoon con pala piana tuttavia, anche a seguito dei risultati sperimentali e numerici già descritti nei precedenti capitoli e in precedenti attività di ricerca [80], la configurazione iniziale ha subito molteplici variazioni, fino al cambio radicale di tipologia WEC utilizzata, la cui scelta è ricaduta su un Wave Energy Converter a corpo galleggiante con PTO idraulico.

Tale configurazione infatti ha consentito il raggiungimento di determinati valori di potenza prodotta, in linea con quanto richiesto dal progetto stesso. A differenza dei sistemi già proposti in letteratura [13] [81], il sistema sviluppato non ha previsto l'utilizzo di accumulatori di alta e bassa pressione, bensì un sistema di conversione idro-pneumatico che, a partire dall'energia idraulica prodotta dal WEC, consentisse una conversione diretta in aria compressa.

Nel seguito verranno presentati dettagliatamente i sistemi che compongono il convertitore ed il sistema per la produzione di aria compressa.

Il sistema descritto, riportato schematicamente per convenienza in Figura 6.1, può essere scomposto in due parti concettualmente distinte; la prima converte l'energia del moto ondoso in aria compressa, la seconda converte l'aria compressa in energia elettrica. I due compiti vengono assolti da due Skid modulari che, data la loro indipendenza meccanica (ed elettrica), hanno bisogno di due controlli distinti. Fatte queste premesse, il sistema di acquisizione dati e controllo è stato sviluppato per poter interagire in modo indipendente sui due sistemi e pertanto è stato anch'esso diviso in due schede elettroniche distinte.

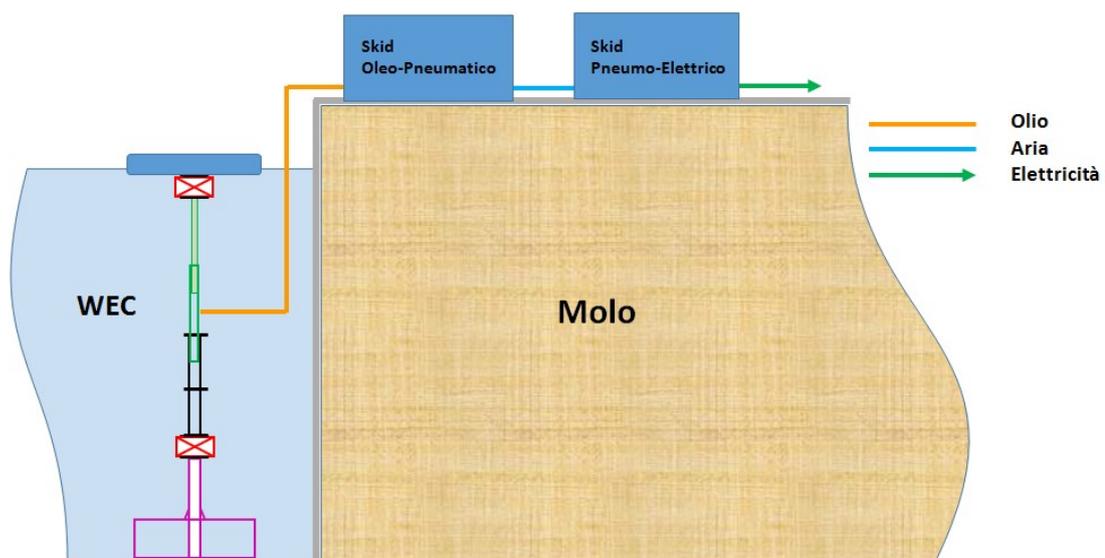


Figura 6.1 – Schema sistema SeaWHAM

Sulla parte di produzione di aria compressa l'azione dell'elettronica sviluppata è prettamente di acquisizione dati, utile per la caratterizzazione dell'impianto, e non è previsto l'azionamento di nessun attuatore.

La scheda elettronica acquisisce e salva su file il valore letto da 4 sensori di pressione, 2 della parte di circuito oleodinamico e 2 della parte pneumatica, e la posizione del pistone pneumatico misurando la distanza della testa del pistone da un misuratore Laser montato sullo skid. I valori dei sensori, acquisiti ad una frequenza di 10Hz, vengono integrati, nelle misure in molo, dal valore istantaneo dell'altezza dell'onda, misura ottenuta con un sensore ultrasonico.

In Figura 6.2 è riportato lo schema concettuale dello skid oleo-pneumatico e la posizione in esso dei sensori acquisiti.

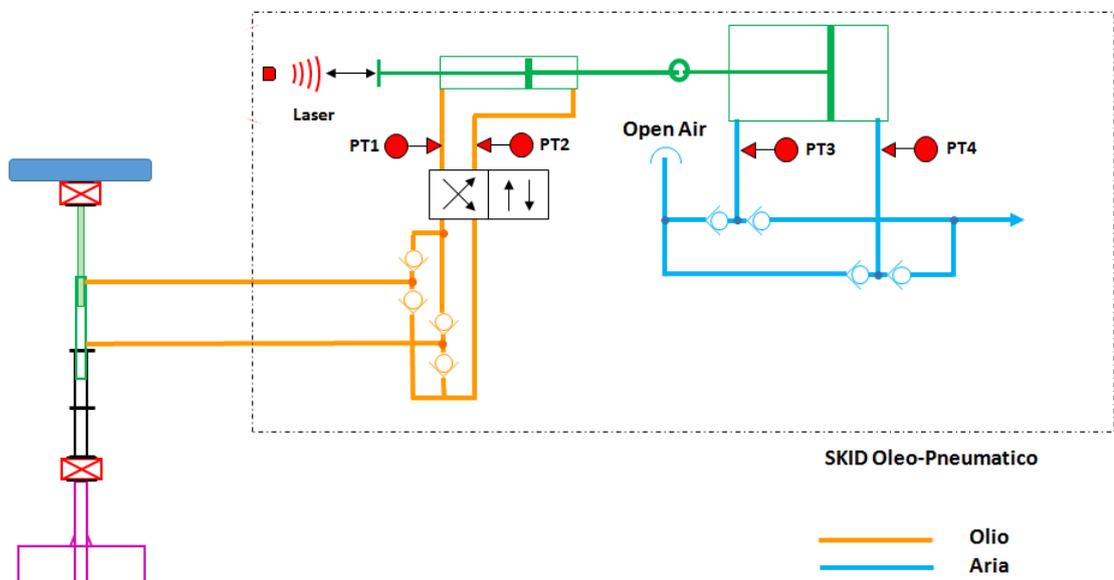


Figura 6.2 – Sistema di conversione energia meccanica da moto ondoso ad aria compressa.

Il secondo elemento del WEC converte l'aria compressa in energia elettrica. L'impianto è installato su uno skid il cui schema concettuale è riportato in Figura 6.3.

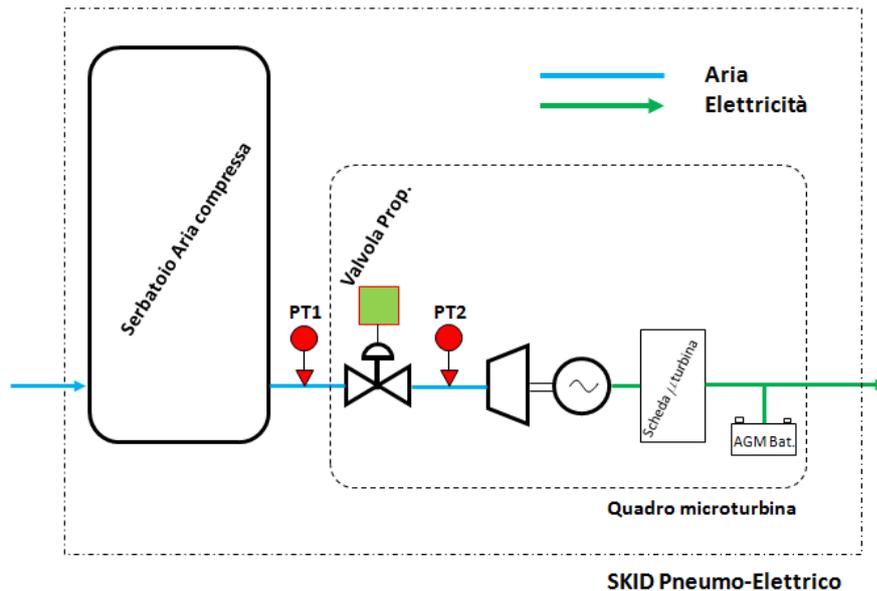


Figura 6.3 – Sistema di conversione da energia meccanica (aria compressa) in energia elettrica mediante microturbina.

La seconda scheda impiegata è stata programmata in modo da poter acquisire il valore di pressione letto da 2 sensori posti a cavallo di una valvola proporzionale e poter azionare l'apertura della stessa valvola in funzione dei valori letti dai sensori di pressione e in accordo con la pressione di lavoro scelta per la turbina.

L'uscita dello skid, tamponata da una batteria AGM da 12V nominali, viene utilizzata per alimentare e ricaricare un ultimo elemento, aggiunto al progetto durante una delle riunioni al CMRE, concettualmente interpretabile come un caricabatterie per un veicolo sottomarino di tipo Folaga. Questo è costituito da un pacco batterie al litio con in uscita un convertitore DCDC in grado di erogare 30A a 60V (specifiche caricabatterie Folaga 1.5kW@60V).

### 6.1.1 WAVE ENERGY CONVERTER

Il convertitore di energia, nella sua ultima configurazione, è composto da diversi elementi, quali:

- Peso morto movibile
- Giunto cardanico inferiore bloccabile
- Meda
- Pistone idraulico
- Giunto cardanico superiore
- Galleggiante attuatore

Gli elementi costitutivi il sistema sono rappresentati nello schema di Figura 6.4, mentre Figura 6.5 mostra i dettagli costruttivi dell'attuatore:

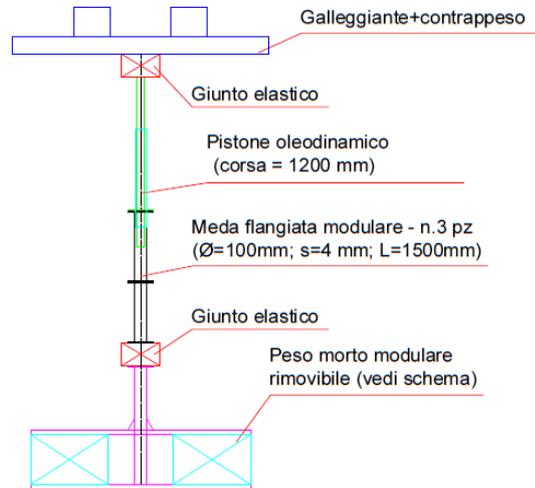


Figura 6.4 – Schema WEC con meda

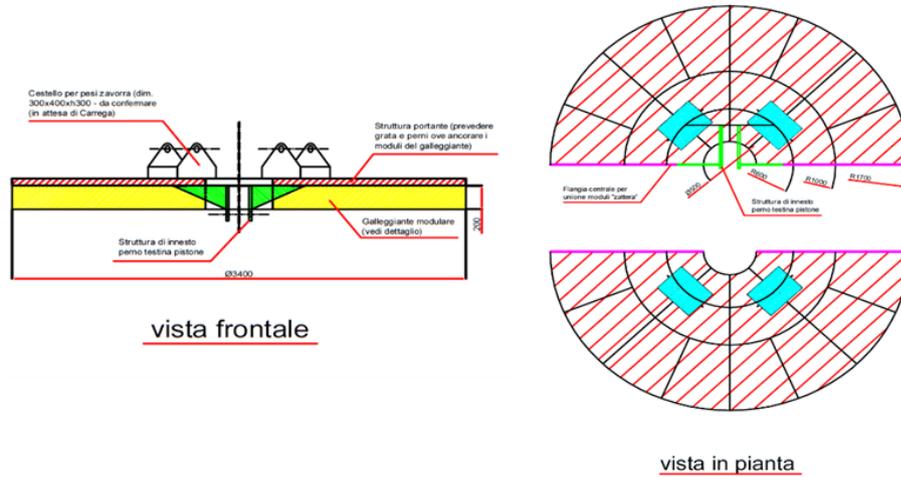


Figura 6.5 – Dettaglio galleggiante

Nella Tabella 6.1 sono riportate le principali grandezze dimensionali del dispositivo:

<b>Peso morto</b>	Massa totale	1500	kg
	Zavorra effettiva	1300	kg
	Volume	1,6	kg
	Spinta in galleggiamento	300	kg
<b>Cilindro idraulico</b>	Pistone a doppio effetto e doppio stelo		
	Materiale	INOX	
	Alesaggio	63	mm
	Diametro stelo	40	mm
	Corsa	1200	mm
	Guida di rinforzo per distribuire le sollecitazioni radiali		
<b>Galleggiante attuatore</b>	Diametro	3,4	m
	Altezza totale	0,23	m
	Altezza di spinta	0,11	m
	Zavorra	900	kg

*Tabella 6.1 – Caratteristiche WEC*

Così dimensionato, il galleggiante consente spinte di circa 900 kg in entrambe le direzioni con altezza d'onda a partire da circa 20 cm.

### **6.1.2 SKID OLEO-PNEUMATICO**

L'elemento che consente l'accoppiamento del WEC con la microturbina è lo skid oleopneumatico.

Esso è composto da diversi elementi, quali:

- Linearizzatore di flusso (olio)
- Valvola di inversione differenziale
- Cilindro oleodinamico
- Cilindro pneumatico
- Linearizzatore di flusso (aria)
- Filtri
- Sensori di pressione
- Sensore laser

Gli elementi costitutivi il sistema sono rappresentati nello schema di Figura 6.6, mentre Figura 6.7, Figura 6.8, Figura 6.9 e Figura 6.10 mostrano i dettagli realizzativi del dispositivo.

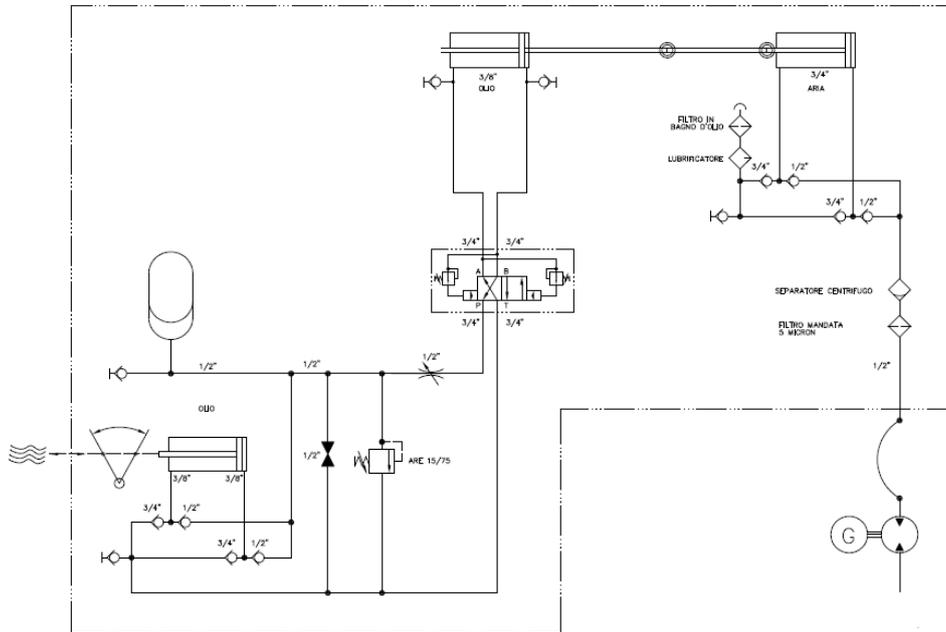


Figura 6.6 – Schema impiantistico dello skid oleo-pneumatico

Nella Tabella 6.2 sono riportate le principali grandezze dimensionali del dispositivo.

<b>Cilindro idraulico</b>	Pistone a doppio effetto e doppio stelo		
	Materiale	INOX	
	Alesaggio	50	mm
	Diametro stelo	25	mm
	Corsa	320	mm
<b>Cilindro pneumatico</b>	Pistone a doppio effetto e singolo stelo		
	Alesaggio	200	mm
	Diametro stelo	40	mm
	Corsa	320	mm
<b>Altri componenti</b>	Valvole di non ritorno - olio	1/2"	
	Valvole di non ritorno - aria	1/2"	
	Contropressione di switch - valvola di inversione differenziale	regolabile	
	Volume di accumulo	10L @ 15 bar	

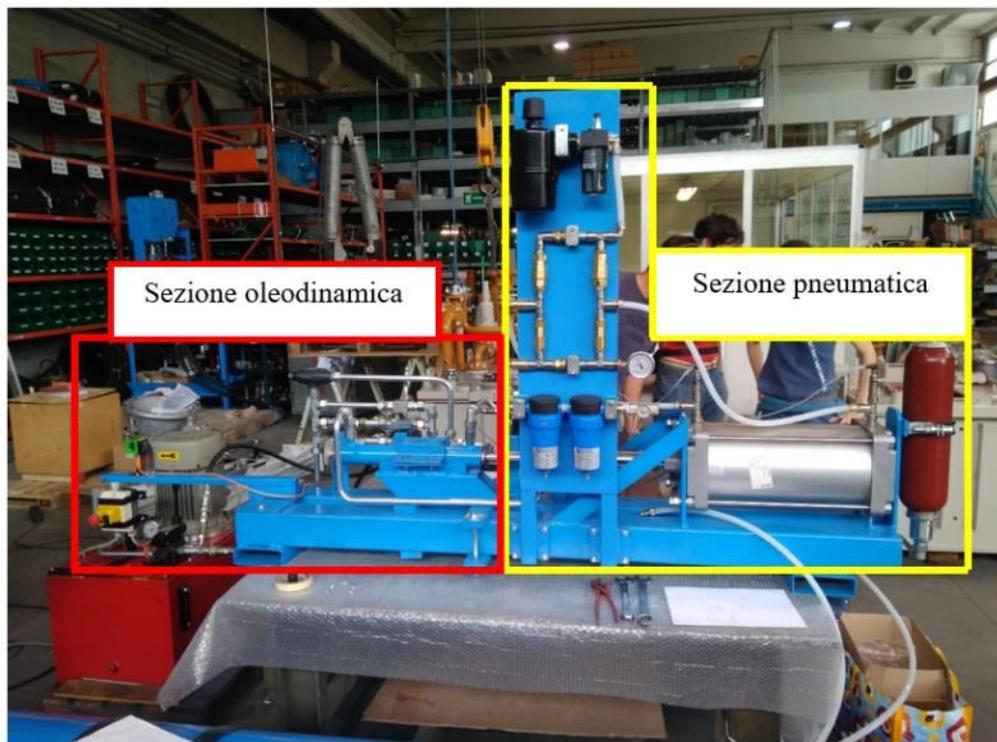
Tabella 6.2 – Caratteristiche skid oleo-pneumatico

Il dispositivo è stato realizzato presso officine specializzate in cui si è provveduto ad una prima verifica funzionale.

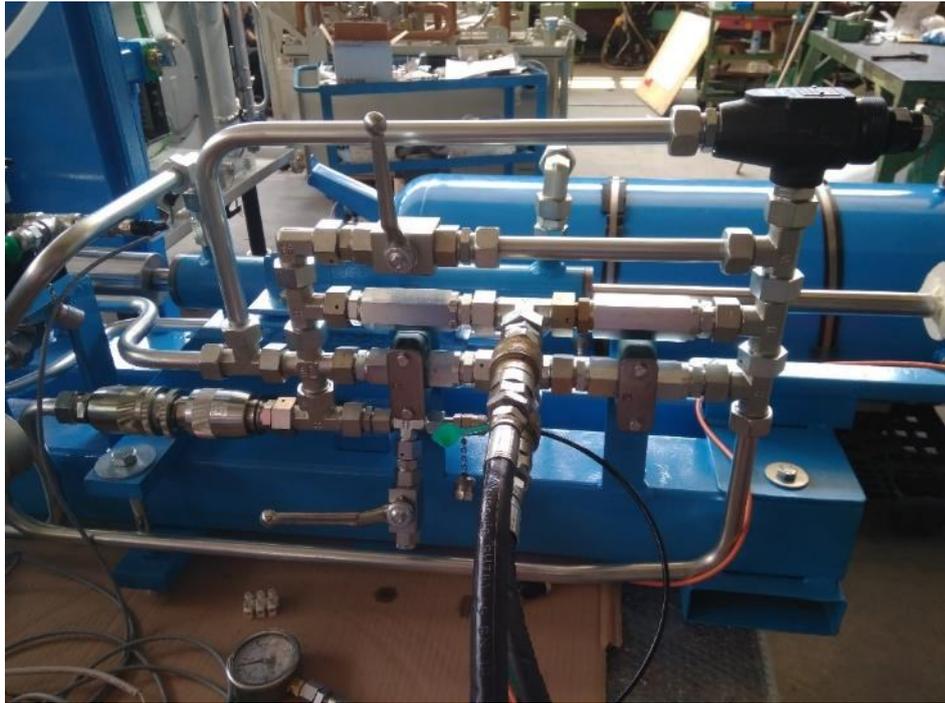
Seguono alcune immagini del dispositivo:



*Figura 6.7 – Dettaglio del sistema di filtraggio in aspirazione (sx) e del blocco di linearizzazione flusso e sistema di filtraggio in mandata (dx)*



*Figura 6.8 – Skid oleo-pneumatico*



*Figura 6.9 – Dettaglio del sistema oleodinamico*



*Figura 6.10 – Dettaglio della valvola oleodinamica di inversione*

### 6.1.3 MICROTURBINA

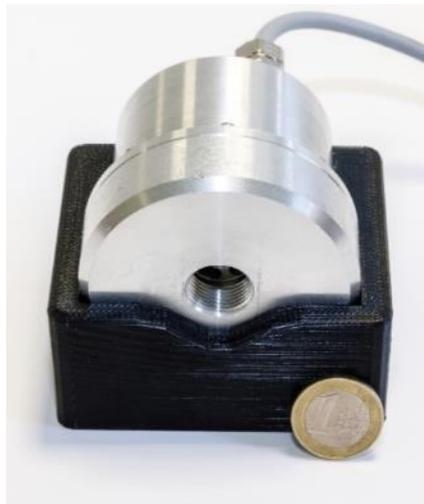
L'aria compressa prodotta dallo skid oleopneumatico andrà ad alimentare il dispositivo microturbina, per la conversione in energia elettrica. L'alimentazione elettrica e l'autonomia energetica sono un collo di bottiglia per le applicazioni "off-grid" quali, per esempio, strumentazione di monitoraggio ambientale, antenne di telecomunicazione, dispositivi mobili e, in generale, tutte quelle infrastrutture collocate in zone non raggiungibili dalla rete elettrica nazionale.

Tra le diverse fonti ambientali da cui è possibile recuperare energia si può annoverare anche quella associata ai fluidi (liquidi o aeriformi) in pressione. La microturbina con il suo generatore integrato è in grado di produrre energia elettrica a partire da un gas in pressione.

In particolare, essa trova applicazione in tutte le situazioni in cui sia presente un salto di pressione (passaggio di un fluido da una certa pressione ad una inferiore). Infatti la microturbina è messa in rotazione dal passaggio del fluido attraverso la palettatura; sulla parte rotante è presente un magnete permanente che consente di stabilire un'interazione elettromagnetica con lo statore elettrico. Quest'ultimo presenta un avvolgimento trifase in rame nel quale si inducono una tensione e una corrente alternate disponibili ai morsetti. Il sistema sopra descritto è racchiuso all'interno di un guscio in alluminio.

La potenza elettrica generata in AC viene poi raddrizzata in DC e stabilizzata e può direttamente alimentare un carico elettrico o ricaricare una batteria. La microturbina può pertanto sostituire accumuli sovradimensionati, permettendo la ricarica periodica di batterie poste in zone remote in cui la ricarica sarebbe impossibile. Questo permette di risparmiare i costi di sostituzione delle batterie in zone remote ed in generale di ridurre i cablaggi.

Alla luce di ciò i dati sperimentali presentati sono stati ottenuti con un carico resistivo che simula la condizione di alimentazione diretta e con una batteria che simula la funzione caricabatteria.



*Figura 6.11 – Modello ottimizzato della microturbina*

Figura 6.11 mostra l'attuale design della microturbina mentre, Figura 6.12, ne mostra schematicamente le dimensioni di ingombro (in millimetri)

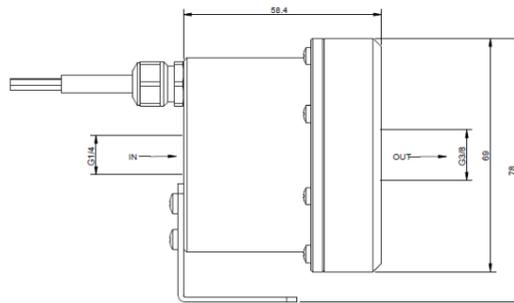


Figura 6.12 – Ingombri microturbina

Il quadro pneumatico con i componenti relativi alla microturbina è rappresentato in Figura 6.13.

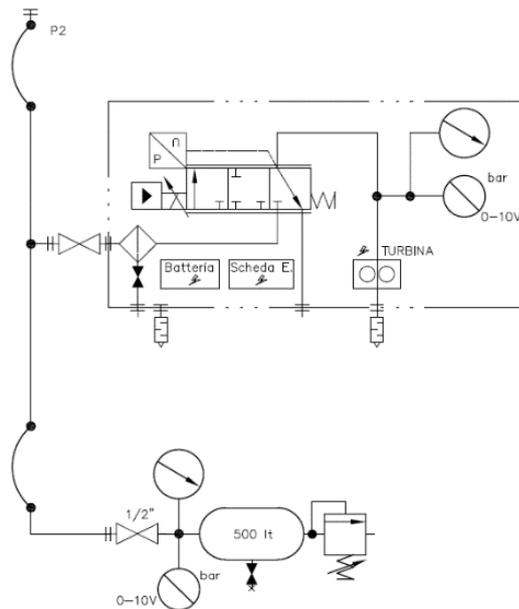


Figura 6.13 – Schema del quadro pneumatico della microturbina

L'aria compressa arriva dal sistema di accumulo visibile in basso nello schema, passa attraverso una valvola manuale utilizzata nel caso ci fosse la necessità di operare sul circuito pneumatico a valle. L'aria viene poi filtrata e indirizzata verso una valvola riduttrice di pressione che imposta il valore della pressione in ingresso alla microturbina. La valvola viene aperta o chiusa a seconda dei valori di pressione letti dai sensori posti sul sistema di accumulo e all'ingresso della microturbina stessa.

I componenti pneumatici sono stati sistemati all'interno di un quadro in acciaio inox rappresentato in Figura 6.14.

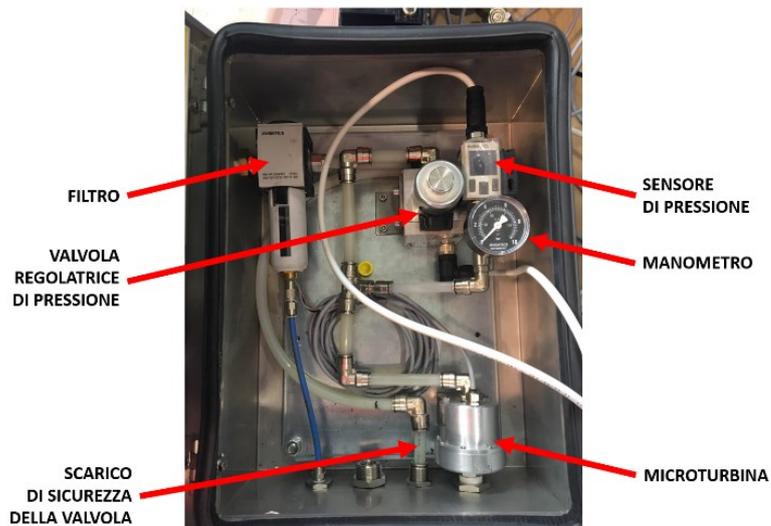


Figura 6.14 – Quadro pneumatico della Microturbina

I componenti impiegati sono i seguenti:

Filtro



**Fluido:** aria compressa, gas neutri

**Temperatura ambiente:** -10°C -50°C

**Grado di filtraggio:** 0,3 micron

Sensore di pressione Aventics PE5:



**Pressione di esercizio:** 0 - 10 barg

**Temperatura ambiente:** 0°C - 60°C

**Temperatura del fluido:** 0°C - 60°C

**Tensione di esercizio:** 17 – 30 Vdc

**Uscita analogica:** 0 – 10V

**Grado di protezione:** IP65, IP67 con attacchi montati

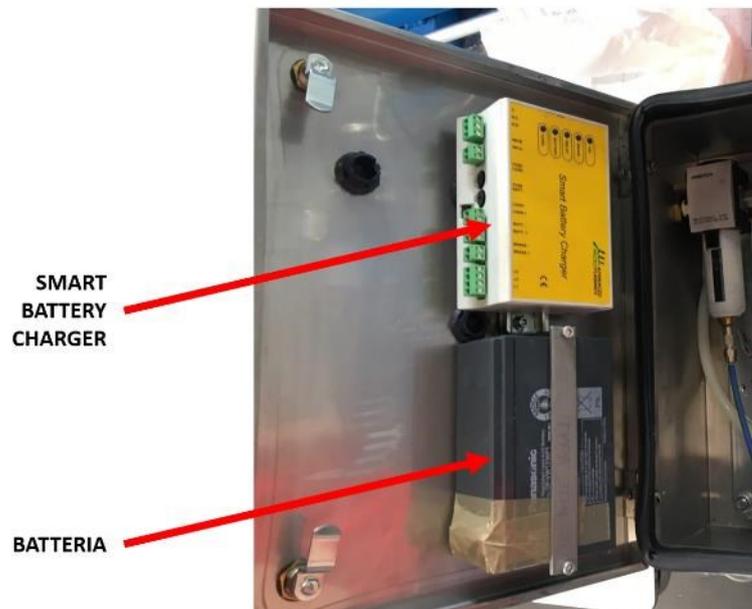
### Valvola proporzionale



<b>Pressione di esercizio max:</b>	11 bar
<b>Temperatura ambiente:</b>	0°C - 70°C
<b>Temperatura del fluido:</b>	0°C - 70°C
<b>Tensione di esercizio:</b>	24 Vdc
<b>Uscita analogica:</b>	0 – 10V
<b>Grado di protezione:</b>	IP65

Oltre a questi componenti pneumatici, sono presenti anche un manometro per il controllo analogico della pressione in ingresso alla microturbina, la microturbina stessa, una batteria da 6,6 Ah e la scheda caricabatterie.

La batteria e la scheda elettronica (Smart Battery Charger) sono state inserite nel quadro come si vede in Figura 6.15.



*Figura 6.15 – Parte elettrica del quadro*

I componenti sono stati infine assemblati all'interno di un quadro di acciaio inox.

## 6.2 PROVE A BANCO

### 6.2.1 PROVE A BANCO SKID OLEO-PNEUMATICO

I test a banco sono stati condotti presso la sede di un'Officina specializzata, che ha realizzato parte dello skid.

Il sistema è stato collegato ad una centralina idraulica in grado di garantire una portata nominale pari a 2 l/min, la cui pressione è regolabile.

Sono stati condotti quattro test, imponendo una pressione di ingresso pari a 30, 40, 50 e 60 bar, e riempiendo il volume di stoccaggio pneumatico (500 litri), acquisendo simultaneamente la pressione idraulica dei due rami in uscita dalla valvola differenziale, la pressione pneumatica delle due mandate del cilindro pneumatico, la posizione dei pistoni (corsa) da cui si è ricavata la variazione volumetrica.

Il grafico di Figura 6.16 mostra l'andamento temporale del livello di pressione all'interno del serbatoio al variare della pressione di ingresso

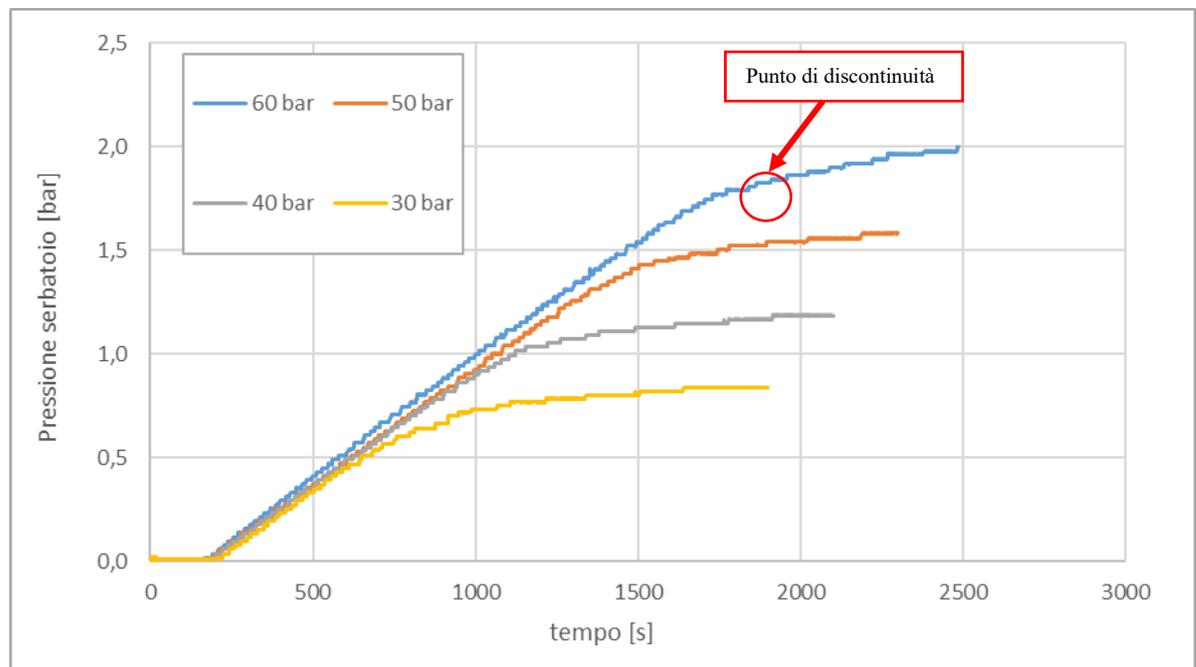
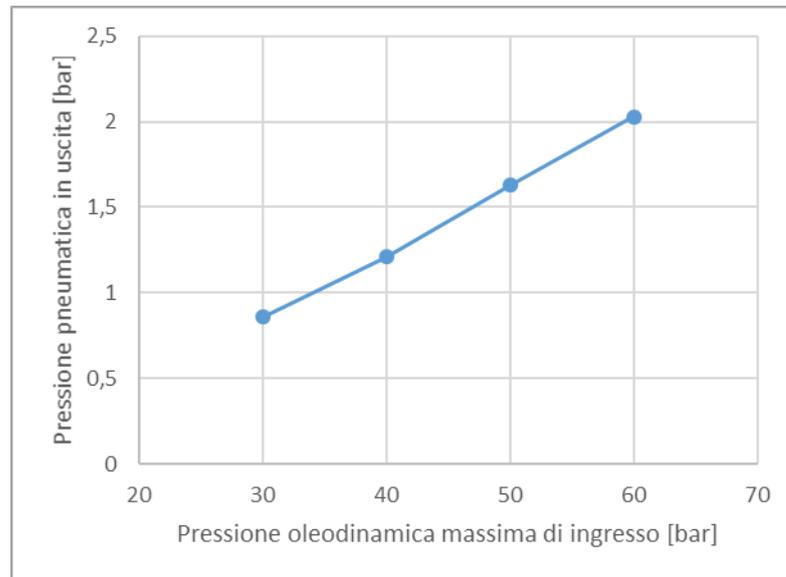


Figura 6.16 – Variazione pressione stoccaggio pneumatico al variare della pressione di ingresso

Come indicato sullo stesso grafico, le curve presentano un andamento simile, registrando una variazione di pendenza in un punto ben identificabile (punto di discontinuità) dovuto,

come vedremo più avanti, al fatto che una delle due fasi del sistema oleopneumatico non produce più potenza raggiunto un certo livello di pressione.

Per ciascun valore di pressione di ingresso la pressione all'interno del serbatoio raggiunge un valore asintotico. In particolare, questi valori sono mostrati nel grafico di Figura 6.17.



*Figura 6.17 – Pressione pneumatica massima al variare della pressione di ingresso*

I successivi grafici mostrano l'andamento della potenza pneumatica istantaneamente prodotta, in funzione dell'avanzamento temporale (Figura 6.18) e in funzione della pressione del serbatoio (Figura 6.19), calcolata come:

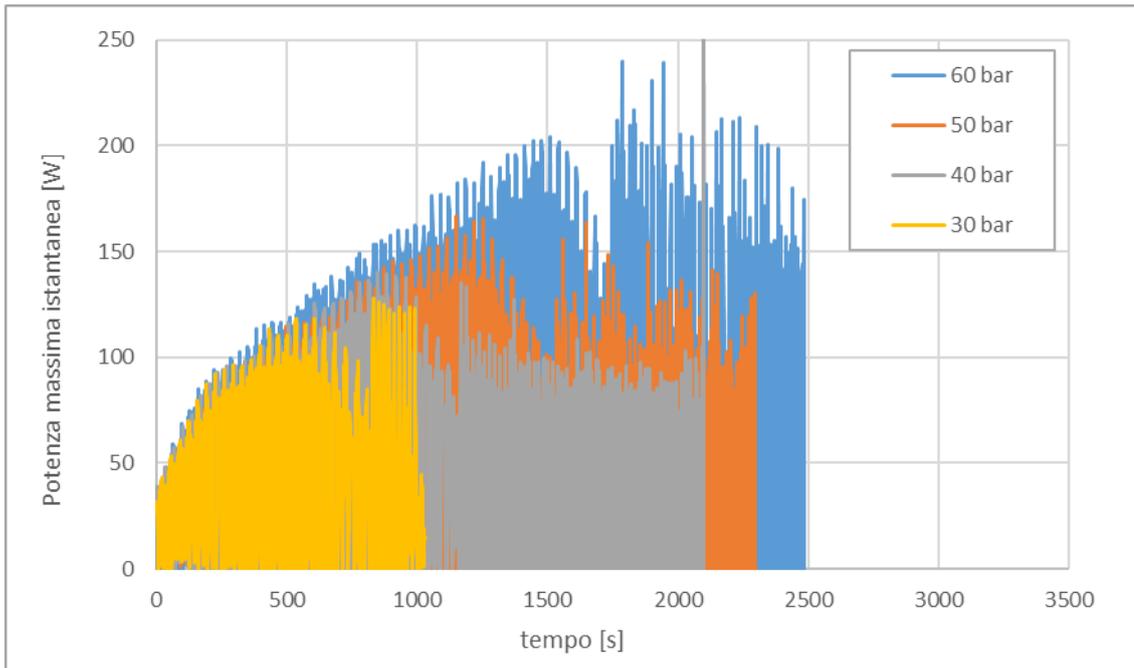


Figura 6.18 – Potenza istantanea nel tempo

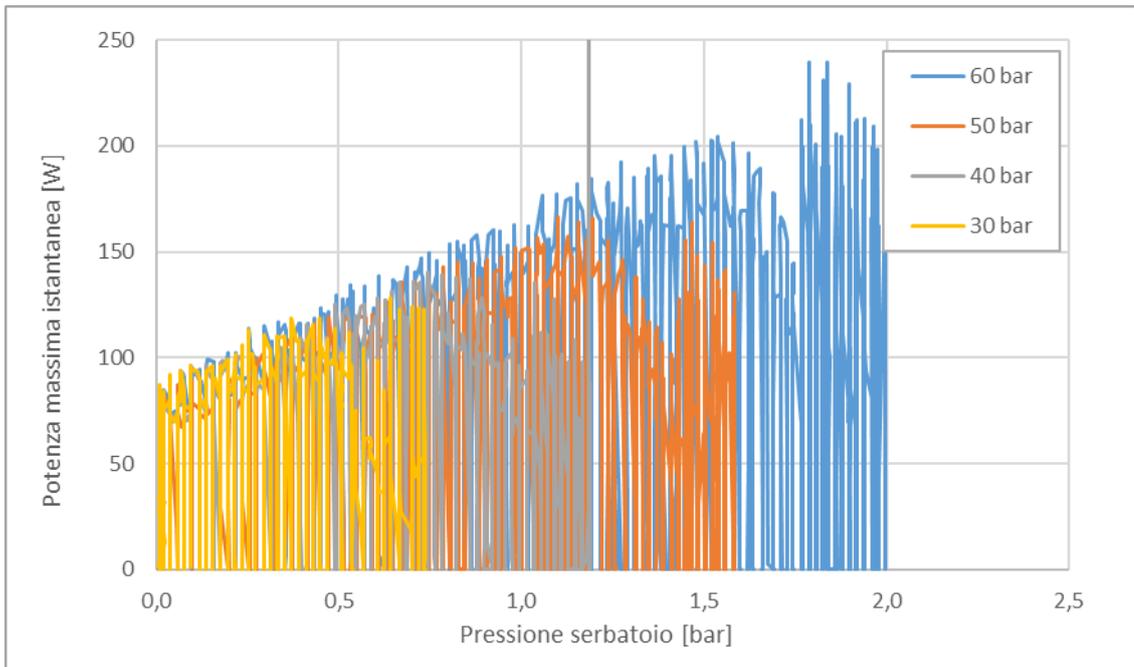


Figura 6.19 – Potenza istantanea VS pressione stoccaggio pneumatico

Come era prevedibile, l'andamento non è lineare e consiste in un insieme di picchi di produzione, dovuti al ciclo di pompaggio che può suddividersi in:

1. aumento di pressione interna del cilindro pneumatico (produzione nulla)

2. raggiungimento ed al superamento del livello di pressione del serbatoio (alla variazione volumetrica del cilindro pneumatico è associata una portata volumetrica, e dunque un determinato valore di potenza pneumatica)
3. inversione del moto del pistone (ricarica del cilindro)

Il parametro che discrimina se il sistema stia o meno producendo potenza pneumatica è, dunque, la variazione di pressione interna al cilindro: nel caso questa sia superiore ad una certa soglia, significa che non si ha portata volumetrica. Viceversa, si ha una certa portata in uscita, alla quale è associata una certa potenza pneumatica.

Questo concetto è ben evidenziato dai successivi grafici di Figura 6.20, Figura 6.21 e Figura 6.22, dove sono riportate la pressione di una delle due camere del cilindro pneumatico, la variazione di pressione dello stesso e la potenza pneumatica prodotta

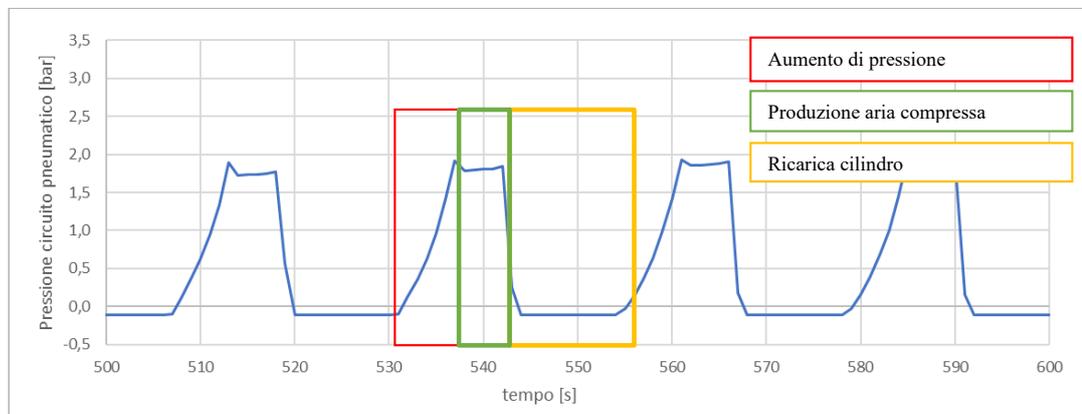


Figura 6.20 – Variazione ciclica pressione cilindro pneumatico

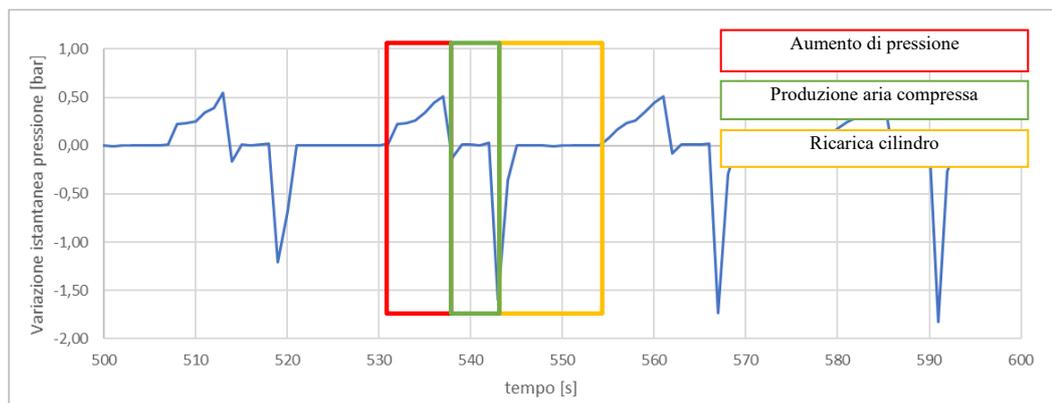


Figura 6.21 – Velocità di variazione della pressione nel cilindro pneumatico

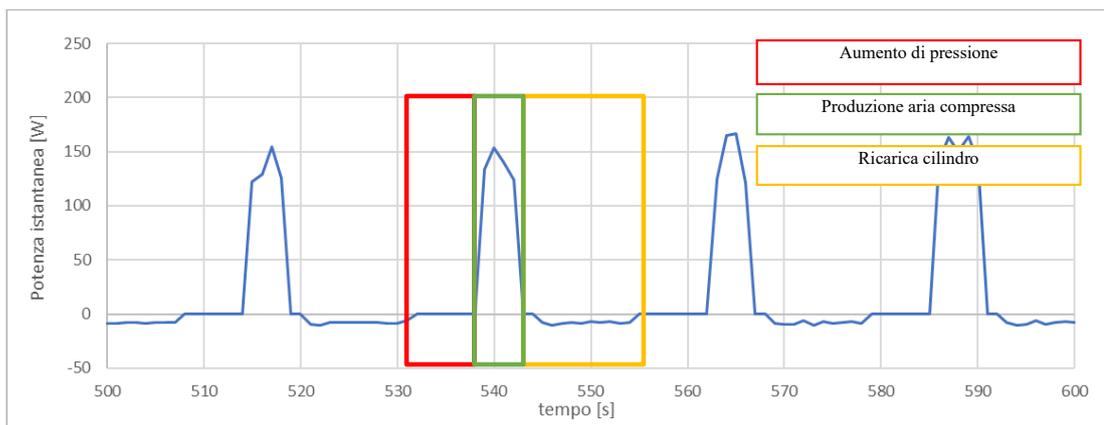


Figura 6.22 – Potenza pneumatica istantanea prodotta

Come evidenziato nei precedenti grafici, ogni ciclo può considerarsi composto da tre fasi:

- Aumento di pressione interna (evidenziato in verde): in questa fase il lavoro meccanico è utilizzato per comprimere l'aria all'interno del cilindro. Si ha una elevata variazione di pressione interna e non si ha portata volumetrica in uscita.
- Raggiungimento della contropressione esterna e produzione di potenza (evidenziato in verde): in questa fase la pressione interna del cilindro raggiunge la contropressione allo scarico. Da qui fino a fine corsa il lavoro meccanico è associato ad una portata volumetrica uscente dal cilindro, alla pressione di scarico, alla quale è dunque associata produzione di potenza pneumatica.
- Aspirazione (evidenziato in giallo): arrivato a fine corsa, il cilindro inverte il suo moto aspirando carica fresca dall'esterno. In questo caso la variazione di pressione è prossima allo zero, mentre la pressione interna è leggermente inferiore a zero: questo si traduce in un dispendio energetico necessario per vincere la caduta di pressione delle valvole di non ritorno.

In particolare, la potenza in uscita dallo skid è funzione della pressione media del serbatoio, come mostrato in Figura 6.23 e Figura 6.24, dove è riportata la potenza pneumatica in ingresso al serbatoio (anche in questo caso è indicato il valore funzione dell'avanzamento temporale e funzione della pressione del serbatoio), calcolato come

$$P_{pneu}(n) = \frac{E_{pneu}(n) - E_{pneu}(n-1)}{t(n) - t(n-1)} \quad [W] \quad (6.1)$$

Dove

- $E_{pneu} = V \cdot p_{serbatoio}$  = energia pneumatica serbatoio [J]
- $V$  = volume serbatoio [ $m^3$ ]
- $t$  = tempo [s]
- $p_{serbatoio}$  = pressione interna del serbatoio [Pa]

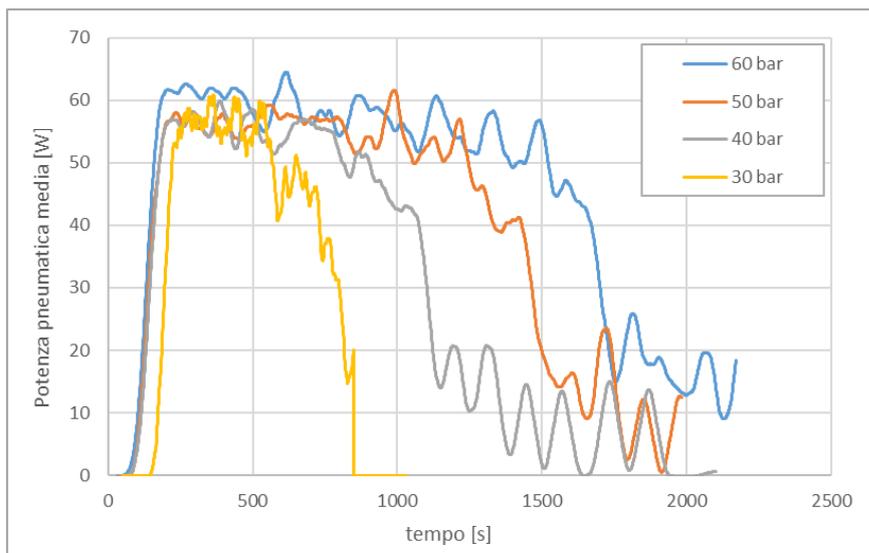


Figura 6.23 – Potenza pneumatica nel tempo

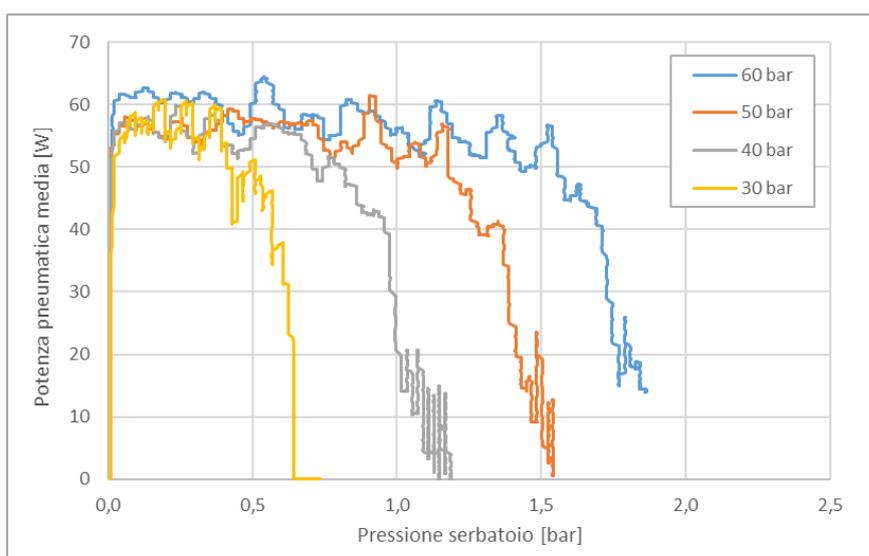


Figura 6.24 – Potenza pneumatica VS pressione stoccaggio pneumatico

Un'analogia considerazione può essere estesa alla potenza oleodinamica, calcolata come:

$$P_{oleo}(n) = \frac{E_{oleo}(n) - E_{oleo}(n-1)}{t(n) - t(n-1)} \quad [W] \quad (6.2)$$

Dove

- $E_{oleo} = \sum C \cdot (p_{oleo1} - p_{oleo2}) \cdot A =$  energia idraulica elaborata dal cilindro [J]
- $C =$  corsa del cilindro oleodinamico [m]

- $p_{oleo}$  = pressione di una delle due fasi del cilindro oleodinamico [Pa]
- $A$  = superficie del pistone oleodinamico [ $m^2$ ]
- $t$  = tempo [s]

Le successive Figura 6.25 e Figura 6.26 mostrano l'andamento della potenza idraulica elaborata in funzione del tempo e della pressione di accumulo pneumatico:

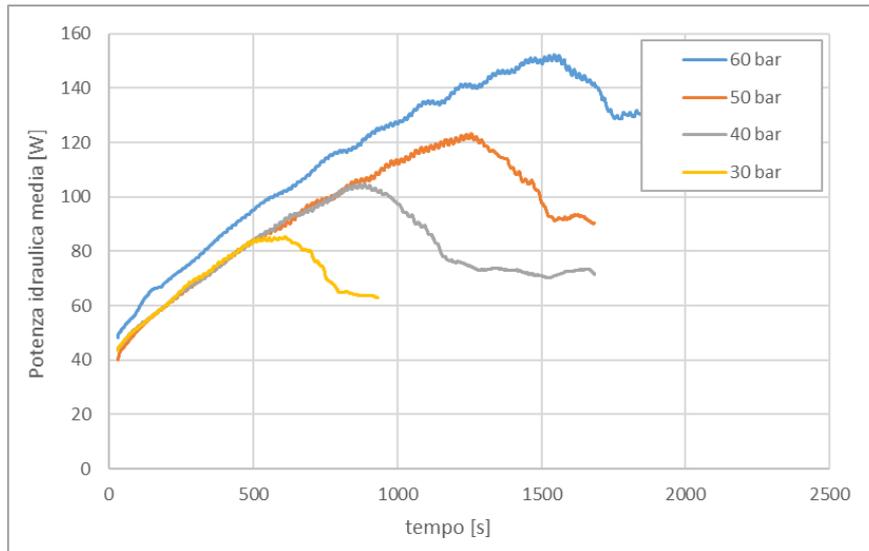


Figura 6.25 – Potenza idraulica nel tempo

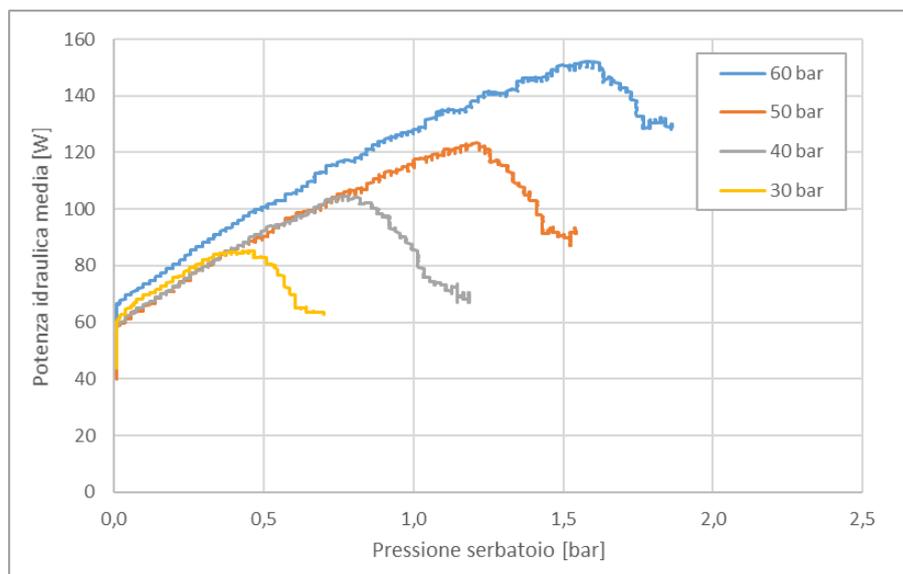


Figura 6.26 – Potenza idraulica VS pressione stoccaggio pneumatico

In Figura 6.27 e Figura 6.28 è infine riportata la variazione del rendimento dello skid, sempre in funzione del tempo e della pressione del serbatoio, calcolato come

$$\eta(n) = \frac{P_{pneu}(n)}{P_{oleo}(n)} \quad [W] \quad (6.3)$$

Dove

- $P_{pneu}$  = potenza pneumatica in uscita – precedentemente definita [W]
- $P_{oleo}$  = potenza idraulica in ingresso – precedentemente definita [W]

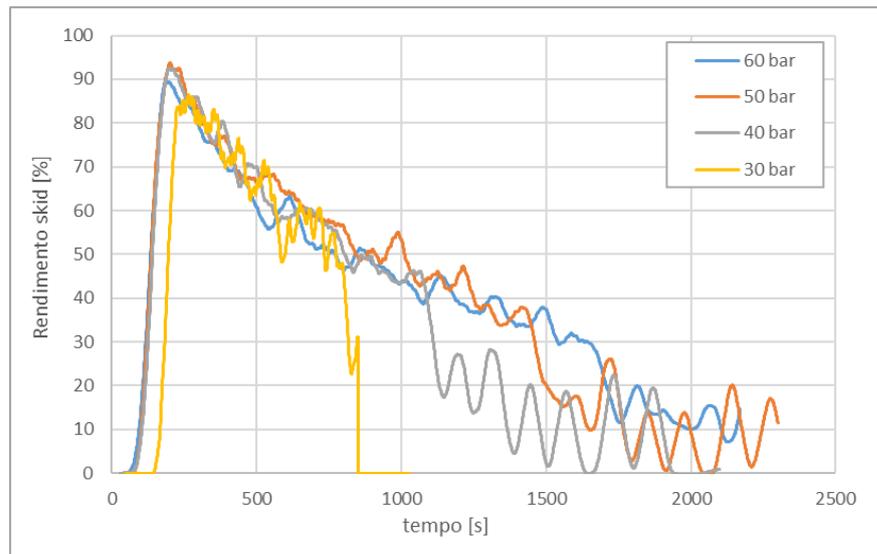


Figura 6.27 – Rendimento skid nel tempo

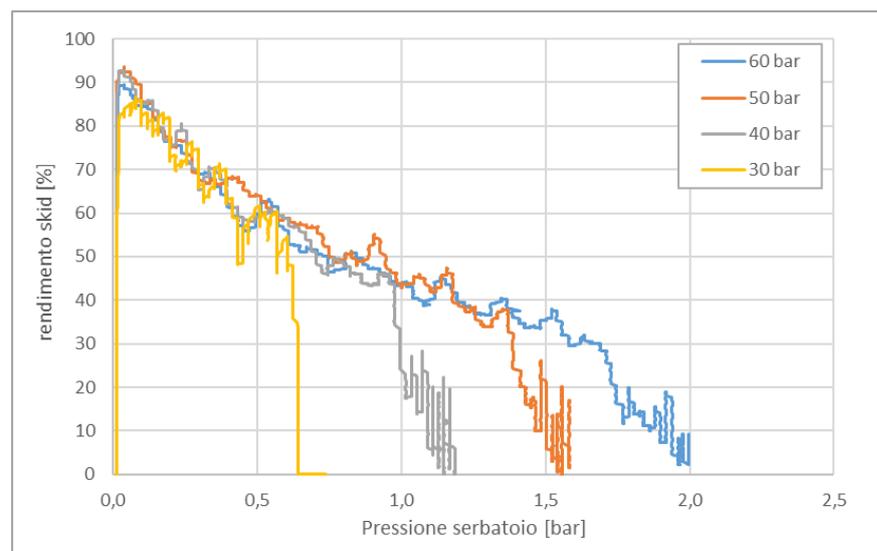


Figura 6.28 – Rendimento skid VS pressione stoccaggio pneumatico

Si noti che per bassi livelli di pressione dell'accumulo pneumatico il rendimento dello skid raggiunge livelli ragguardevoli, nell'intorno del 90%, per poi decrescere progressivamente all'aumentare della pressione del serbatoio. Questo fenomeno non stupisce: all'aumento della contropressione allo scarico del cilindro pneumatico, la forza resistente esercitata dalle valvole di non ritorno pneumatiche, così come quella esercitata dalle valvole di non ritorno del circuito oleodinamico, cresce in maniera significativa, costituendo una fonte di irreversibilità crescente dell'intero sistema.

Analizziamo ora in dettaglio la sorgente idraulica con la quale sono stati eseguiti i test: la pressione massima è stata impostata pari a livelli che vanno da 30 a 60 bar, tuttavia la pressione media effettiva sarà più bassa, a causa del funzionamento ciclico del sistema.

Anche la portata della centralina oleodinamica, nominalmente pari a 2 l/min, varia a seconda del test condotto e a seconda della contropressione pneumatica del serbatoio, come si può notare nelle successive Figura 6.29, Figura 6.30, Figura 6.31 e Figura 6.32 dove sono riportati i valori in funzione del tempo ed in funzione della pressione interna del serbatoio pneumatico.

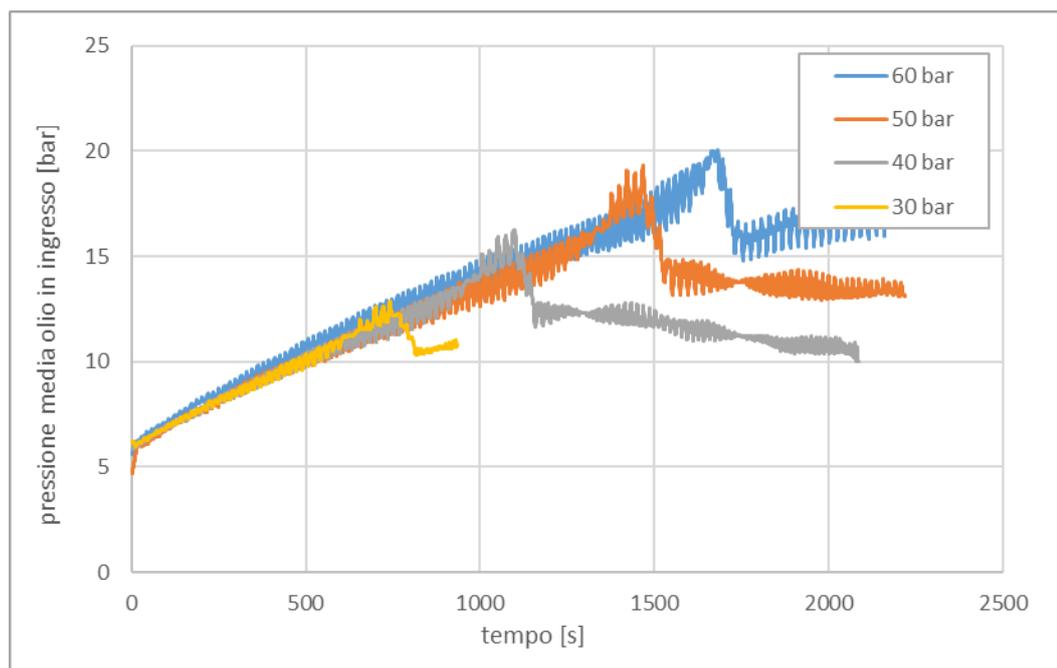


Figura 6.29 – Pressione media olio nel tempo

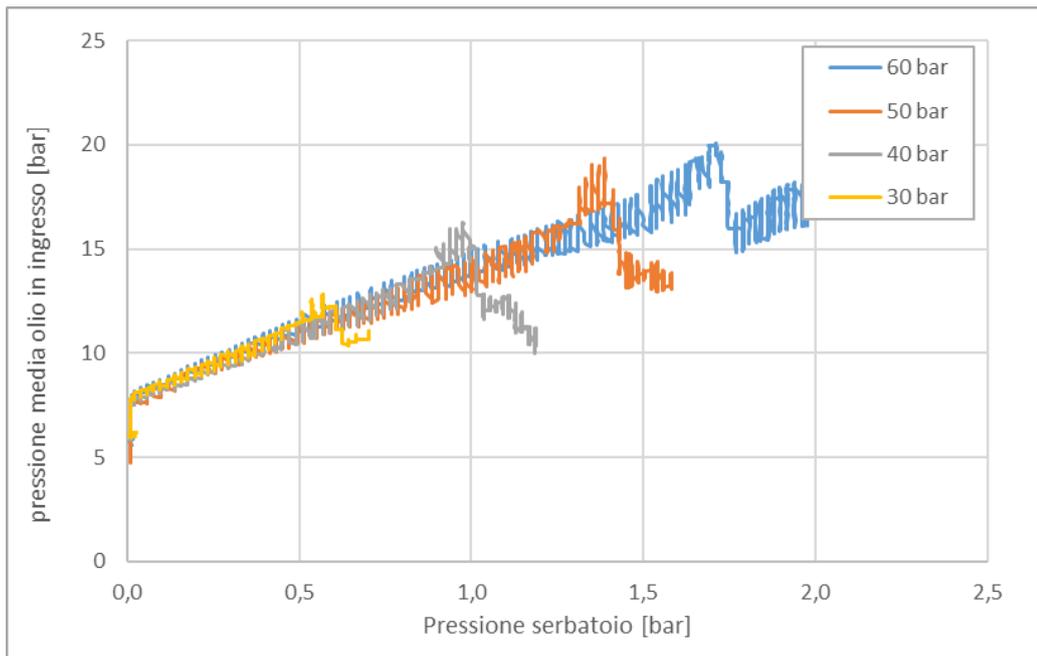


Figura 6.30 – Pressione media olio VS pressione stoccaggio pneumatico

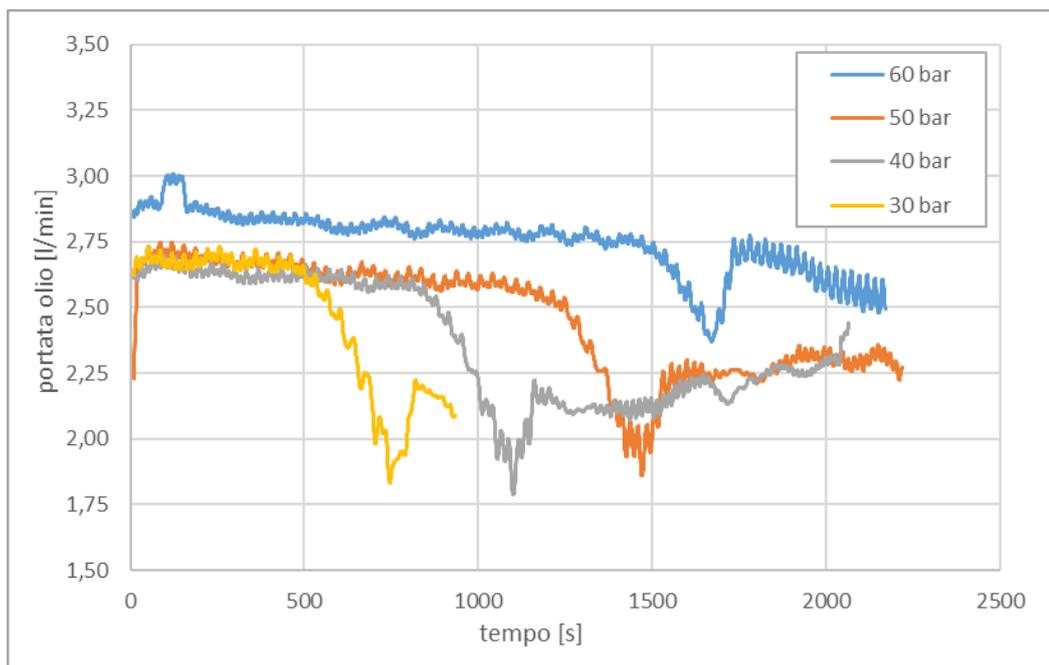


Figura 6.31 – Portata olio nel tempo

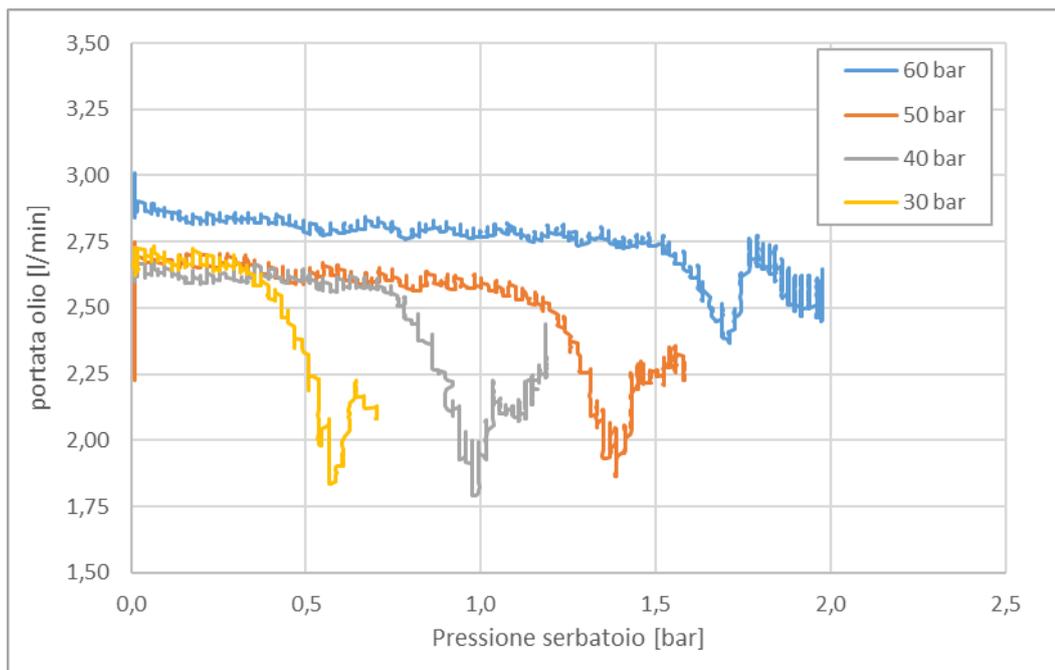


Figura 6.32 – Portata olio VS pressione stoccaggio pneumatico

Concentrandosi sui test condotti con pressione di ingresso dell'olio pari a 50 bar (che è la pressione di design del sistema) vengono riportati i grafici relativi alla pressione del circuito aria, la pressione del circuito olio e la potenza istantanea prodotta delle due fasi del pistone pneumatico.

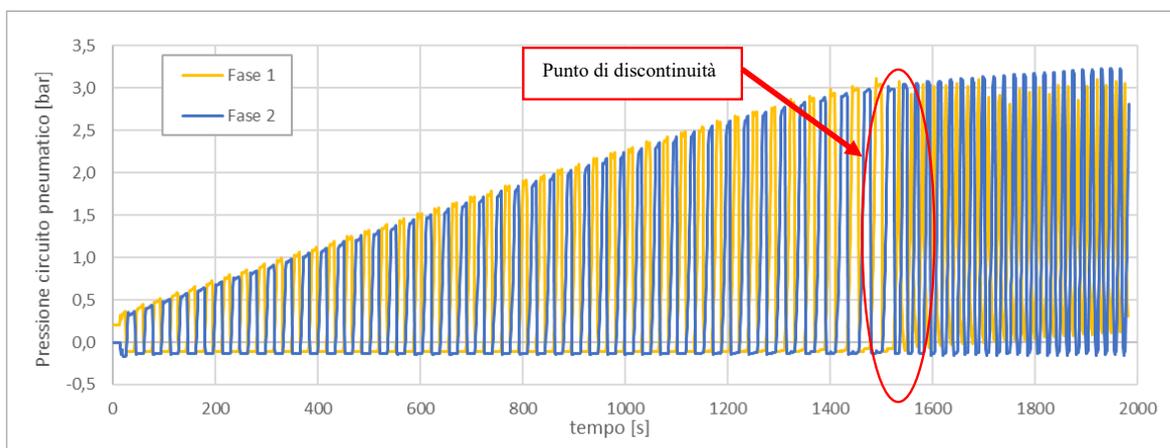


Figura 6.33 – Andamento pressione circuito pneumatico ( $P_{in} = 50 \text{ bar}$ )

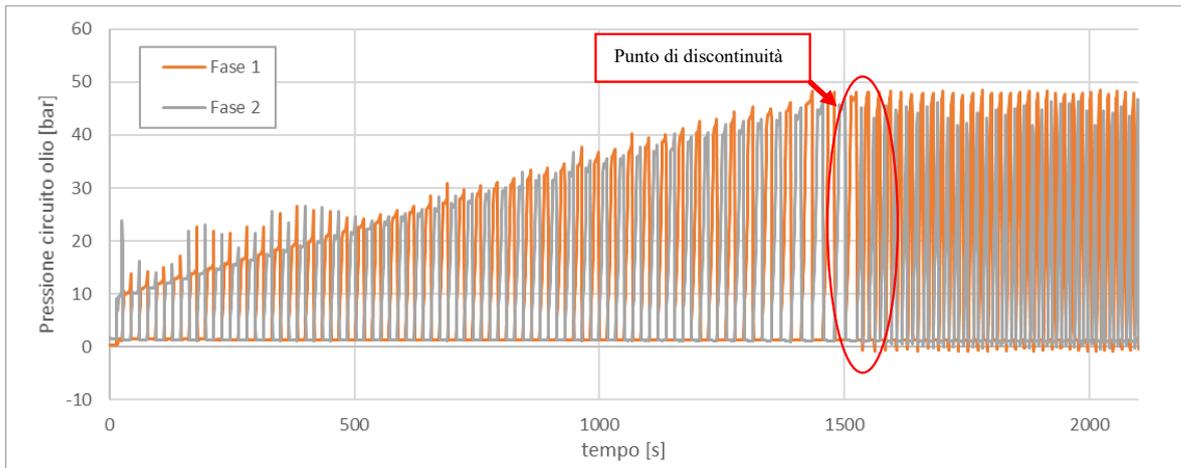


Figura 6.34 – Andamento pressione circuito oleodinamico ( $P_{in} = 50 \text{ bar}$ )

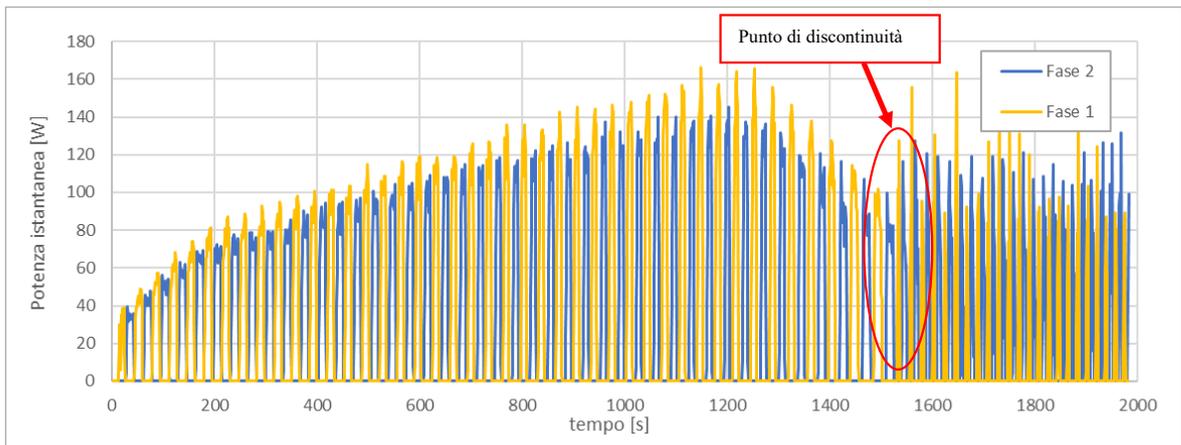


Figura 6.35 – Andamento potenza prodotta ( $P_{in} = 50 \text{ bar}$ )

Si noti che dopo 1500 secondi una delle due fasi (Fase 2) raggiunge il livello di pressione per il quale l'inversione del moto si verifica prima di produrre portata volumetrica: da questo punto in poi una delle due fasi non produce più potenza pneumatica.

Analizzando nel dettaglio questo fenomeno, si faccia riferimento ai seguenti grafici di Figura 6.36 e Figura 6.37:

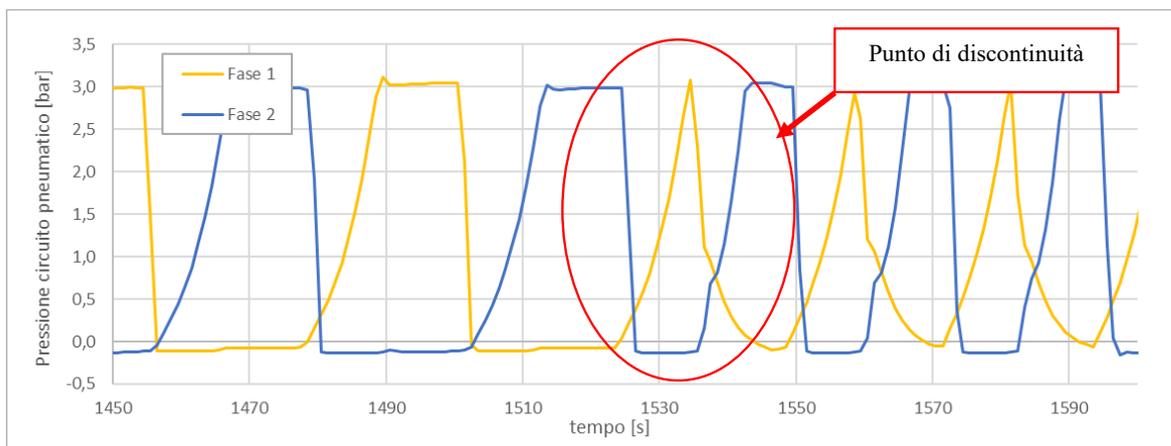


Figura 6.36 – Dettaglio pressione circuito pneumatico ( $P_{in} = 50 \text{ bar}$ )

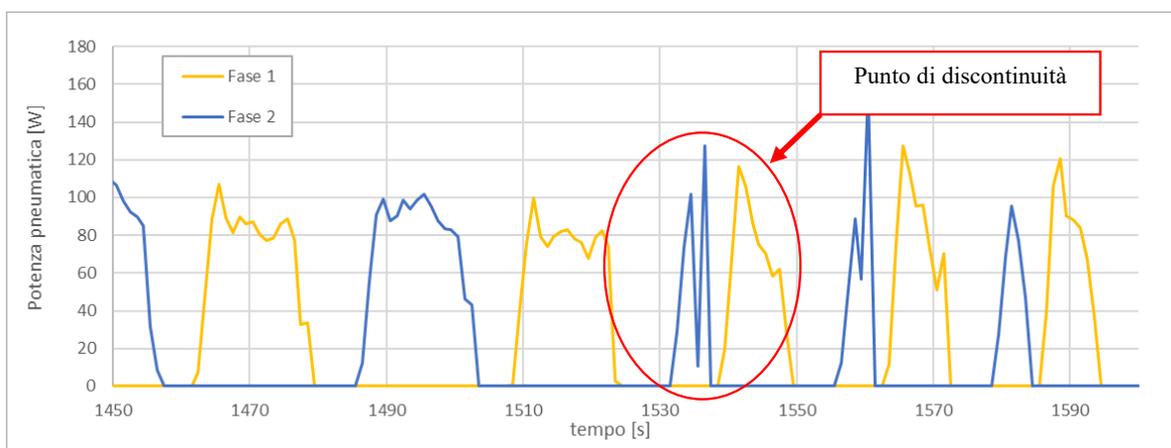


Figura 6.37 – Dettaglio potenza istantanea pneumatica prodotta ( $P_{in} = 50 \text{ bar}$ )

Questo sbilanciamento è dovuto alla differente superficie che si ha nelle due camere del cilindro pneumatico.

Infatti, mentre il cilindro idraulico è a doppio stelo, e dunque si ha la stessa superficie sia in una camera che nell'altra, il cilindro pneumatico è a singolo stelo. Questo significa che la superficie del pistone della Fase 1 è maggiore di quella della Fase 2, e questo comporta il fatto che, a parità di pressione idraulica e dunque di forza esercitata dal cilindro idraulico sulle due fasi, la pressione raggiungibile dalla Fase 2 del cilindro pneumatico è inferiore rispetto a quella della Fase 1.

In definitiva, gli output dei test a banco relativi alla potenza massima istantanea pneumatica registrata ed attualizzata (cioè tenendo conto del rapporto tra la portata della centralina, e la portata attesa del WEC, pari a  $35 \frac{1}{\text{min}}$  medi) sono riassunti nella seguenti Tabella 6.3 e Tabella 6.4:

Pressione massima in ingresso	Pressione media	Portata media centralina	Potenza pneumatica istantanea massima	Potenza pneumatica media massima	Rendimento massimo skid
[bar]	[bar]	[l/min]	[W]	[W]	[%]
60	20	3	220	63	90
50	18	2,75	160	58	92
40	15	2,75	130	58	92
30	12	2,75	120	60	88

*Tabella 6.3 – Output prove a banco*

Pressione massima in ingresso	Potenza pneumatica istantanea massima	Potenza pneumatica media massima	Rendimento massimo skid
[bar]	[W]	[W]	[%]
60	2500	735	90
50	2000	740	92
40	1650	740	92
30	1500	760	88

*Tabella 6.4 – Output attualizzati con la portata reale attesa*

Come si può notare, nelle condizioni di progetto (pressione di ingresso massima 50 bar) la potenza pneumatica istantanea raggiunge i 2000 W, ben oltre il target prefissato.

Considerando invece la produzione media, per lo stesso livello di pressione di ingresso si raggiunge una potenza pneumatica intorno ai 750 W con un rendimento massimo superiore al 90%, che è coerente con gli obiettivi del progetto se si considera la potenza istantanea, mentre è inferiore alle attese considerando la potenza media massima raggiungibile.

Questo è dovuto essenzialmente alla forte decrescita del rendimento dello skid al crescere della pressione del serbatoio, e dunque delle potenze in gioco.

Questo è uno degli aspetti da affrontare nell'ambito di un potenziale intervento migliorativo del sistema.

## 6.2.2 PROVE A BANCO MICROTURBINA

Sono stati condotti 5 test a differenti pressioni del serbatoio riassunti nella Tabella 6.5:

Test	Pressione serbatoio [barg]	Pressione di apertura valvola (del serbatoio) [barg]	Pressione di chiusura valvola (ingresso alla turbina) [barg]
1	3,0	3	0,3
2	2,5	2,5	0,3
3	2,0	2,0	0,3
4	1,8	1,8	0,3
5	1,5	1,5	0,3

*Tabella 6.5 – Test sulla microturbina*

Le grandezze misurate sono:

- P\_tank: pressione sul serbatoio
- P\_turb: pressione in ingresso alla microturbina
- I\_carica: corrente di carica della batteria
- P\_set: pressione di setting della valvola proporzionale

In Figura 6.38 si riportano gli andamenti di tutte le grandezze misurate durante i test e per il test 1 sono evidenziate, a titolo di esempio, le fasi di riempimento e svuotamento del serbatoio e le grandezze misurate.

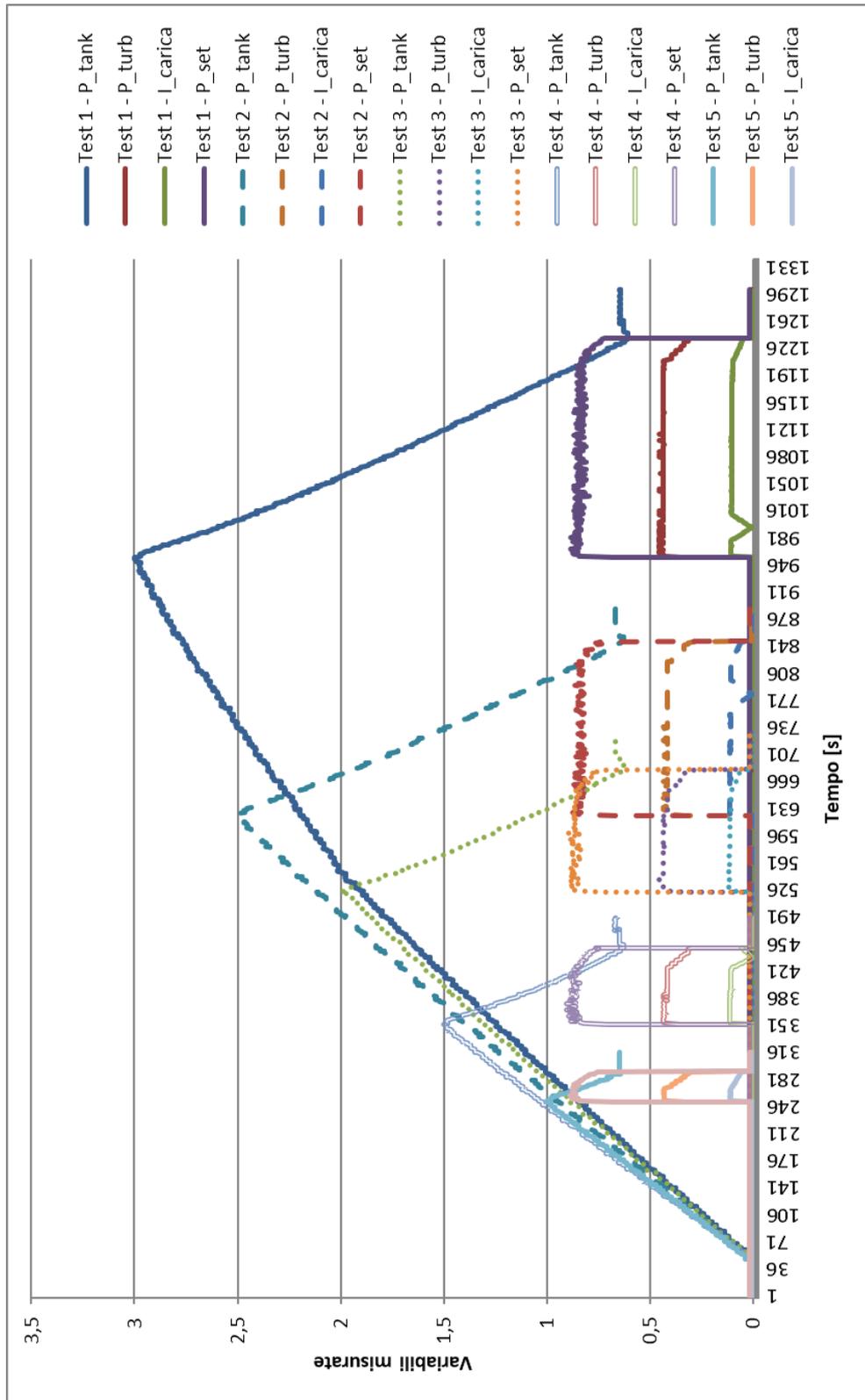


Figura 6.38 – Grandezze acquisite nei test

Nella fase di riempimento del serbatoio si può notare che gli andamenti della pressione nei diversi test non sono sovrapposti come ci si aspetterebbe ma tendono a divergere. Questo andamento è da imputarsi al fatto che non è stato possibile controllare la fase di riempimento a causa della presenza di elementi variabili quali tubi flessibili e valvole manuali. Tuttavia i dati raccolti permettono comunque di avere una stima dei tempi di riempimento del serbatoio ed eventualmente determinare quale condizione risulti essere la migliore nel bilancio fra tempo di riempimento e svuotamento ed energia prodotta.

Di seguito si riportano alcune considerazioni relative agli andamenti delle grandezze misurate durante il test 3, che ci si aspetta essere il più simile alle condizioni di funzionamento reali.

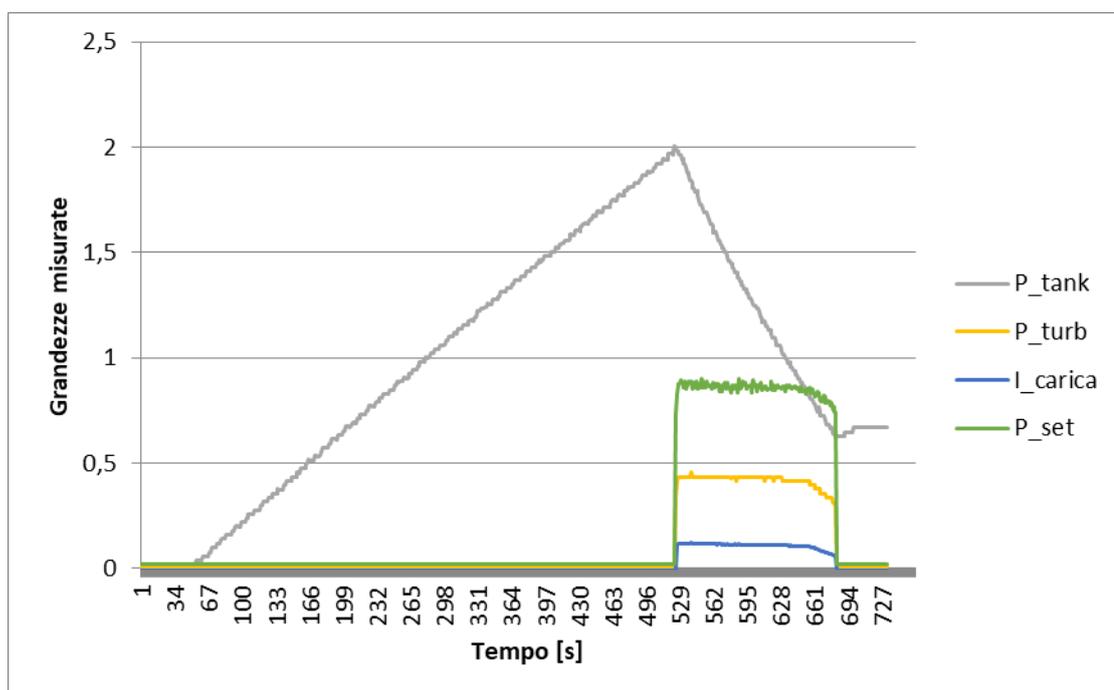


Figura 6.39 – Grandezze acquisite nel singolo test

È importante osservare che la corrente di carica della batteria è stata acquisita attraverso un partitore resistivo per cui il valore misurato visibile nei grafici precedenti deve essere opportunamente convertito.

In Figura 6.40 si riporta quindi il grafico della corrente di carica della batteria.

Come si può osservare la corrente rimane nulla fintanto che la turbina non comincia a funzionare; in seguito si attesta su un valore di circa 0,5 [A] per una durata di 2,6 minuti.

Dal momento che la microturbina genera una quantità di energia rilevante solo a partire da 0,3 [barg] in ingresso, si è deciso di interrompere il flusso d'aria agendo sulla valla valvola proporzionale quando la pressione in ingresso alla microturbina stessa è pari a 0,3 [barg]. Pertanto, al termine dello svuotamento, all'interno del serbatoio rimane una pressione

residua intorno a 0,6 [barg] (vedi Figura 6.39). Di conseguenza, nei cicli successivi al primo, occorrerà un tempo minore per raggiungere la pressione massima.

In considerazione di questo fatto, riportandolo i dati su base giornaliera, si osserva che in 24 ore si possono effettuare 162 cicli di riempimento e svuotamento del serbatoio durante i quali viene prodotta un'energia di 3,5 [Ah].

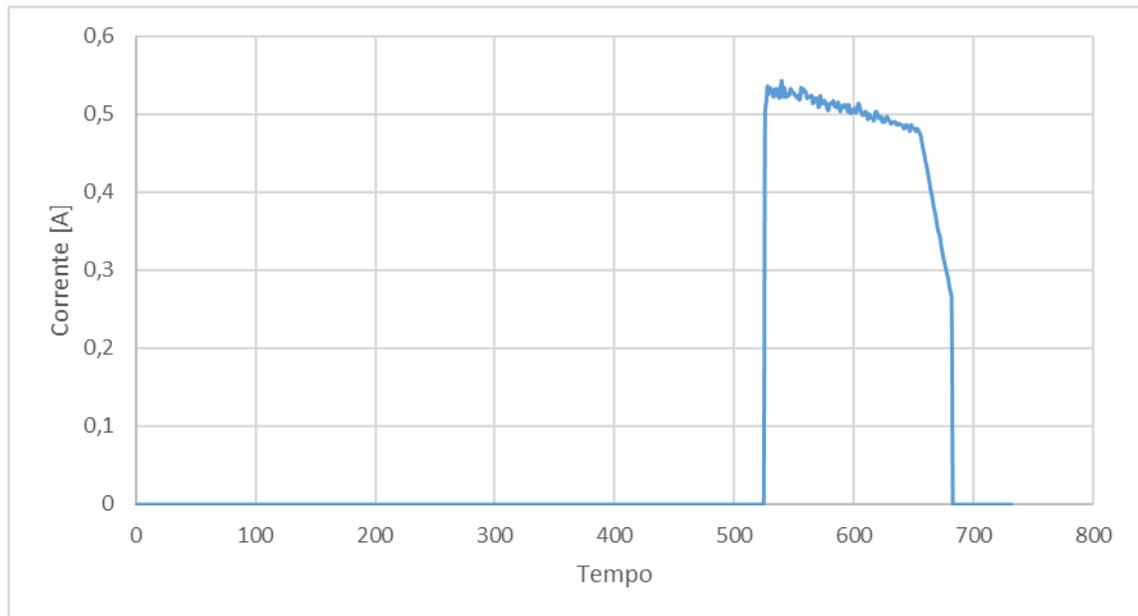


Figura 6.40 – Andamento della corrente di carica

Considerando più nel dettaglio l'andamento della corrente di carica della batteria si può osservare che nella fase di produzione di energia la corrente parte da un valore massimo di circa 0,55 [A] fino ad arrivare ad un valore intorno ai 0,48 [A], per poi ridursi sensibilmente fino a 0,27 [A]. Ciò conferma il fatto che il valore di pressione (0,3 [barg]) a cui viene interrotto il flusso di aria compressa è il più opportuno poiché al di sotto di esso la corrente prodotta sarebbe troppo bassa se rapportata al tempo impiegato per produrla. Inoltre, il fatto che la corrente abbia un andamento discendente rientra nella norma poiché, durante questo periodo di tempo, la pressione nel serbatoio continua a diminuire e pertanto la velocità della turbina tende anch'essa a diminuire lievemente. Una diminuzione della velocità comporta una riduzione della tensione prodotta e, dunque, una riduzione della differenza di potenziale fra la tensione della microturbina e la tensione della batteria, la quale, in ultima analisi, provoca una diminuzione della corrente prodotta.

### 6.3 CAMPAGNA SPERIMENTALE

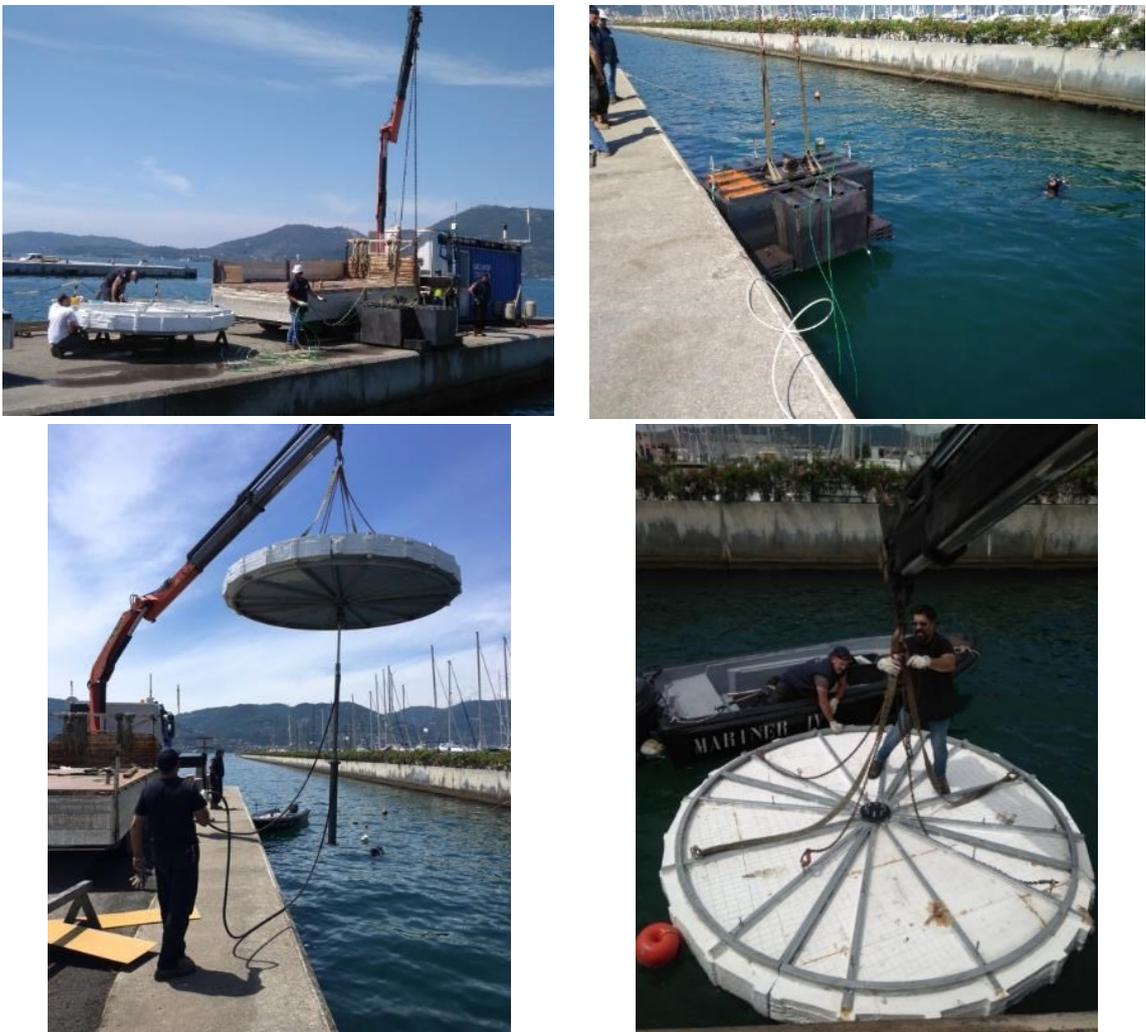
La campagna sperimentale condotta presso la wave-facility del SeaLAB ha consentito di verificare le prestazioni e le potenzialità del dispositivo, confrontare i risultati sperimentali

con i risultati teorici e valutare gli eventuali miglioramenti da apportare per incrementare le prestazioni del dispositivo.

Il prototipo di WEC con PTO idraulico è stato installato eseguendo una precisa sequenza di operazioni, in particolare:

- Immersione e posizionamento del peso morto nella posizione ottimale (attività subacquea)
- Giunzione dei quattro moduli dell'attuatore
- Assemblaggio giunto cardanico e pistone all'attuatore
- Sollevamento e posizionamento del sistema in acqua
- Unione tramite flange del sistema al peso morto (attività subacquea)

Di seguito alcune immagini che testimoniano l'attività svolta:



*Figura 6.41 – Attività di installazione WEC*



*Figura 6.42 – Configurazione finale*

Il dispositivo così installato rispecchia la configurazione attesa, ed è stato possibile condurre i test sperimentali così come descritto nei successivi paragrafi.

Lo skid è stato posizionato sulla banchina adiacente il WEC, e collegato correttamente allo stesso, come mostrato in Figura 6.43.



*Figura 6.43 – Sistema integrato installato a banchina*

### 6.3.1 CONDIZIONI OPERATIVE

Grazie al generatore di onda è stato possibile condurre test su diversi profili, in particolare nell'ambito di questa trattazione ci si concentrerà su tre test specifici, denominati onda\_1 , onda\_2 e onda\_3, condotti rispettivamente su stati ondosi aventi le caratteristiche riportate nella successiva Tabella 6.6.

Test	Altezza Hs	Periodo	Lunghezza	Potenza
	[m]	[s]	[m]	[W/m]
Onda_1	0,44	2,8	13	560
Onda_2	0,42	3,0	14	530
Onda_3	0,32	3,1	15	320

Tabella 6.6 – Caratteristiche profili d'onda generati

In Figura 6.44 sono riportati i profili di tali onde, mentre in Figura 6.45 sono mostrati gli spettri di tali profili nel diagramma delle frequenze, ottenuti mediante la FFT.

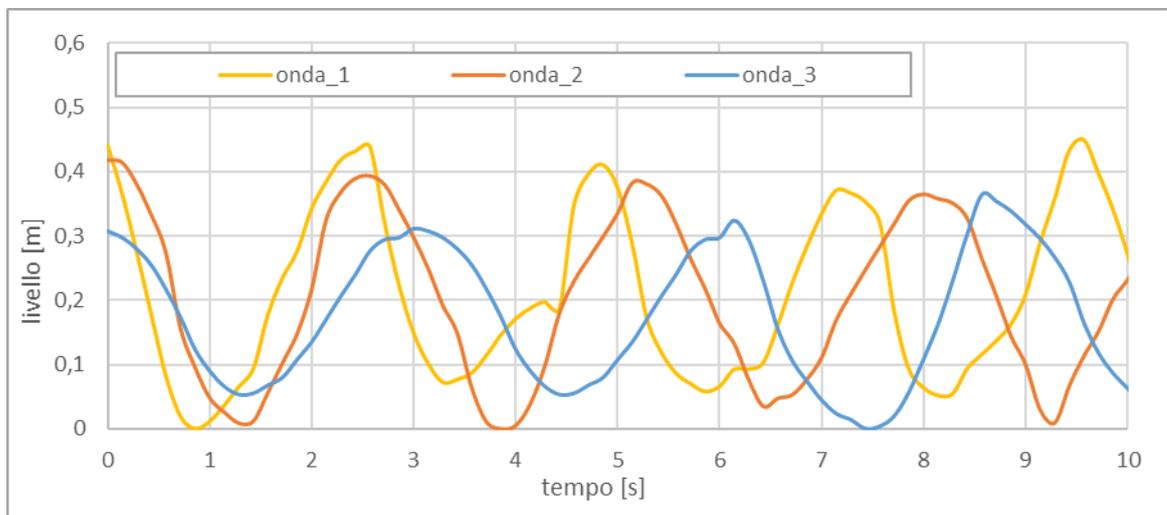


Figura 6.44 – Profili d'onda nel dominio del tempo

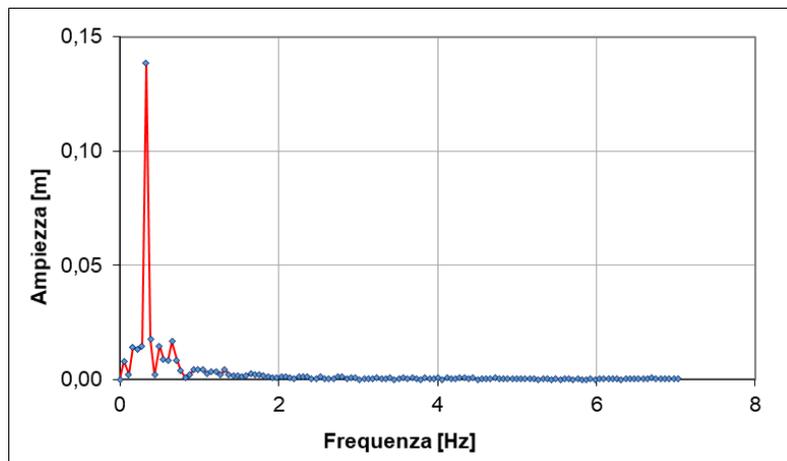
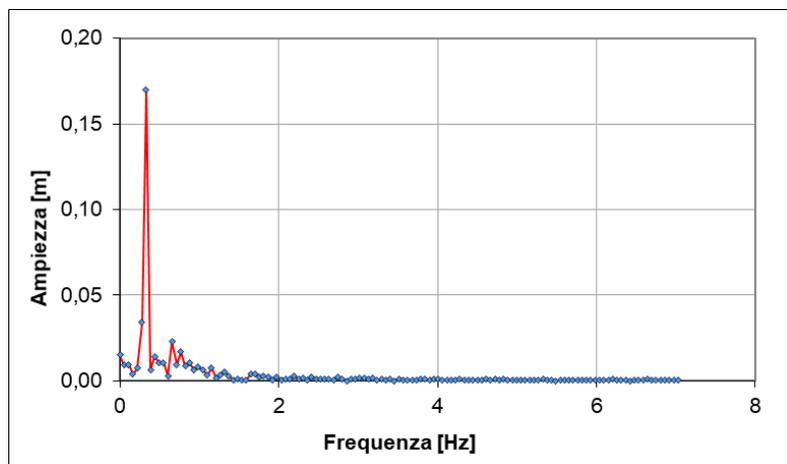
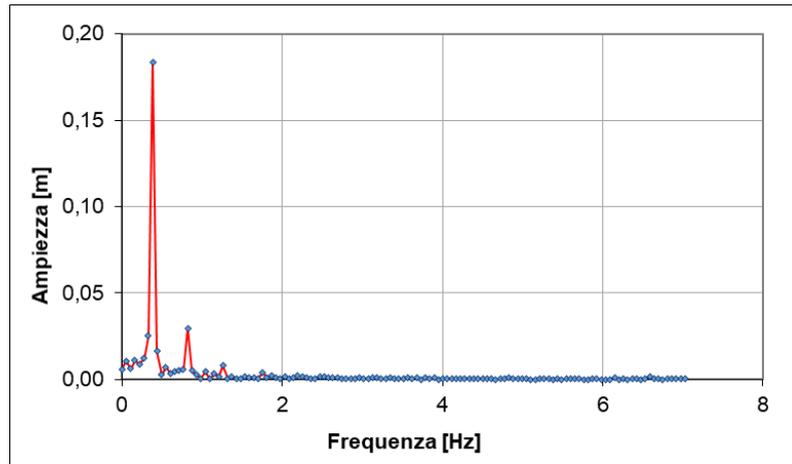


Figura 6.45 – Profili d'onda nel dominio delle frequenze: onda\_1 (sopra), onda\_2 (centro), onda\_3 (sotto)

### 6.3.2 RISULTATI

Analogamente a quanto già esposto, è stata condotta un'analisi relativa alla potenza oleodinamica in ingresso allo skid (cioè in uscita dal WEC), alla potenza pneumatica in uscita dallo skid (in ingresso all'accumulo), al rendimento dello skid, con dettagli relativi alla portata di olio prodotta dal floating WEC, la massima pressione oleodinamica istantanea e media raggiunta dal sistema, l'evoluzione della pressione massima e media pneumatica in uscita dallo skid.

Il grafico di Figura 6.46 mostra l'andamento del livello di pressione interno al serbatoio durante i test.

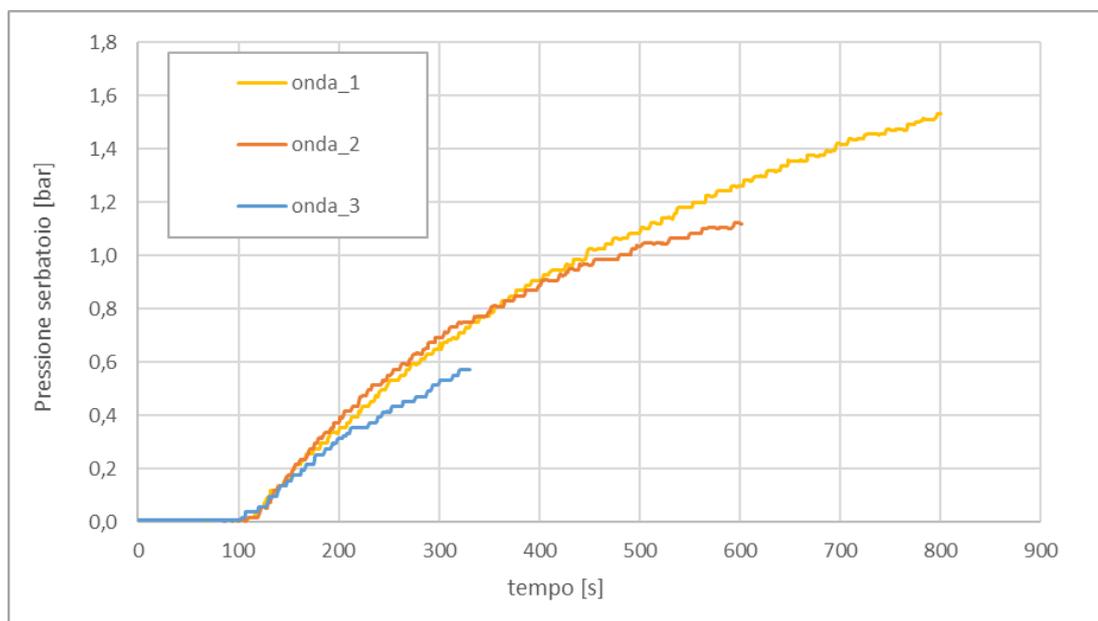


Figura 6.46 – Variazione pressione stoccaggio pneumatico al variare della pressione di ingresso

I grafici delle prossime figure (da Figura 6.47 a Figura 6.58) mostrano gli andamenti delle grandezze misurate ed elaborate, analogamente a quanto già esposto nei precedenti paragrafi.

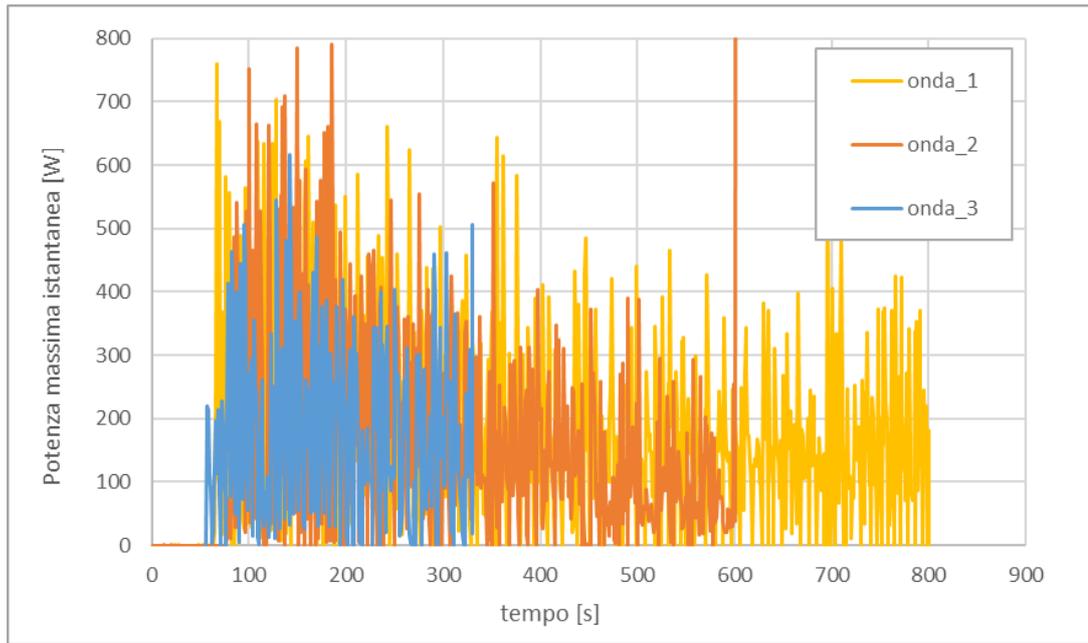


Figura 6.47 – Potenza pneumatica istantanea VS avanzamento nel tempo

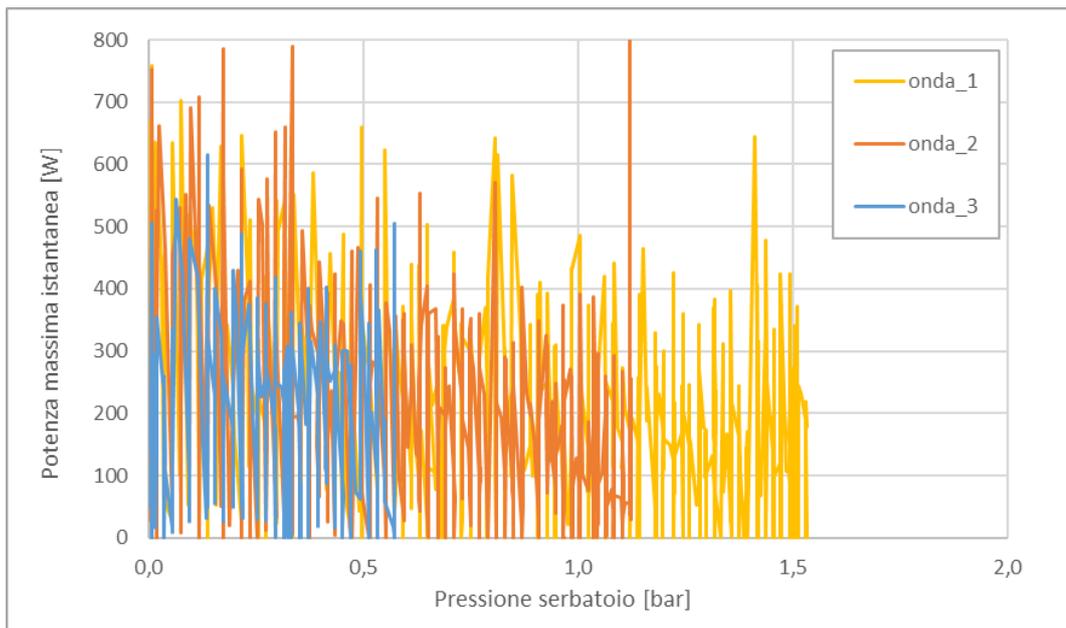


Figura 6.48 – Potenza pneumatica istantanea VS pressione stoccaggio pneumatico

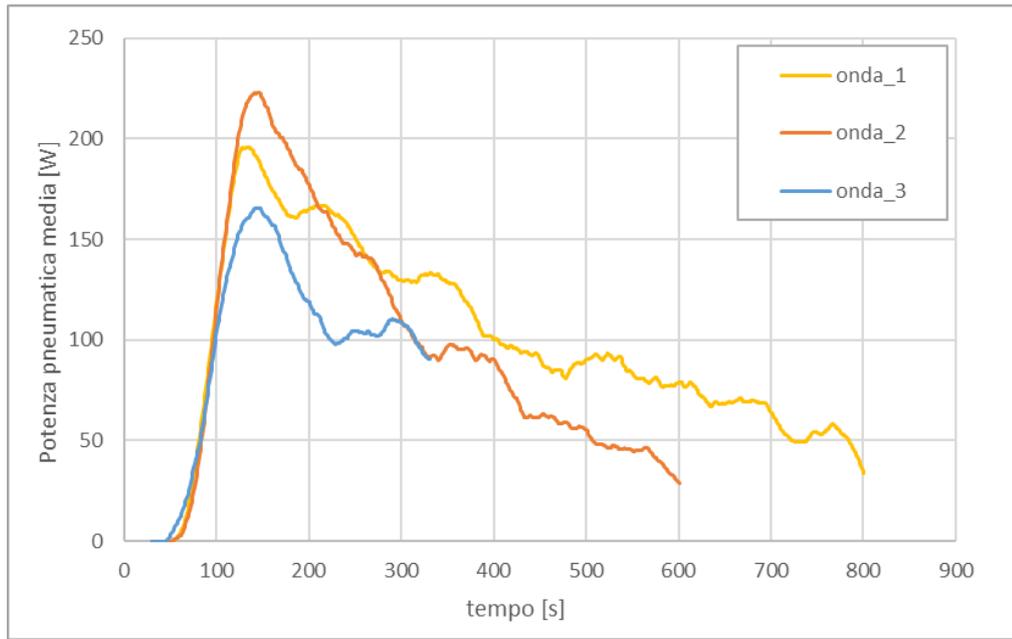


Figura 6.49 – Variazione temporale potenza pneumatica media

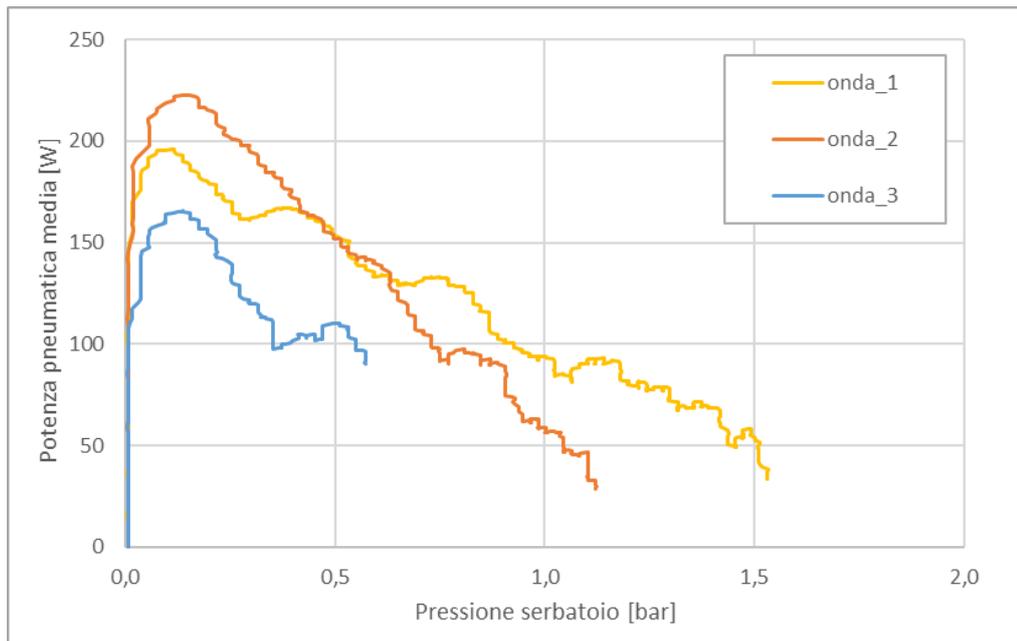


Figura 6.50 – Potenza pneumatica media VS pressione stoccaggio pneumatico

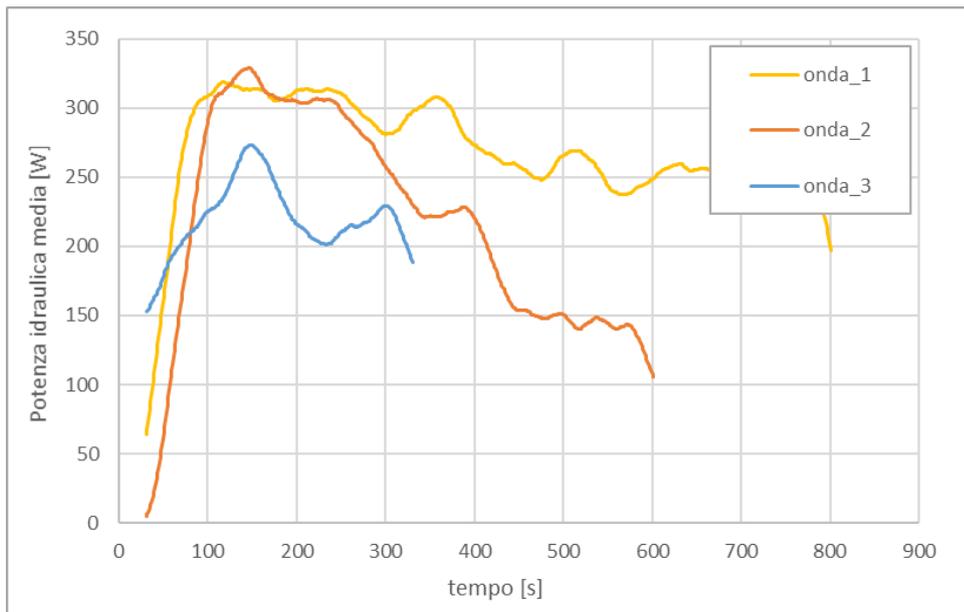


Figura 6.51 – Variazione temporale potenza idraulica

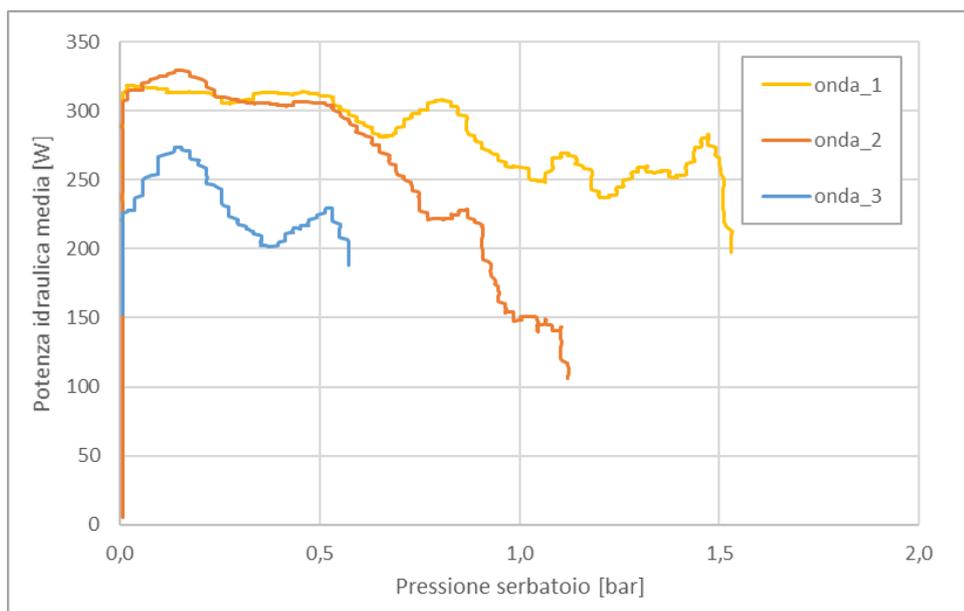


Figura 6.52 – Potenza idraulica VS pressione stoccaggio pneumatico

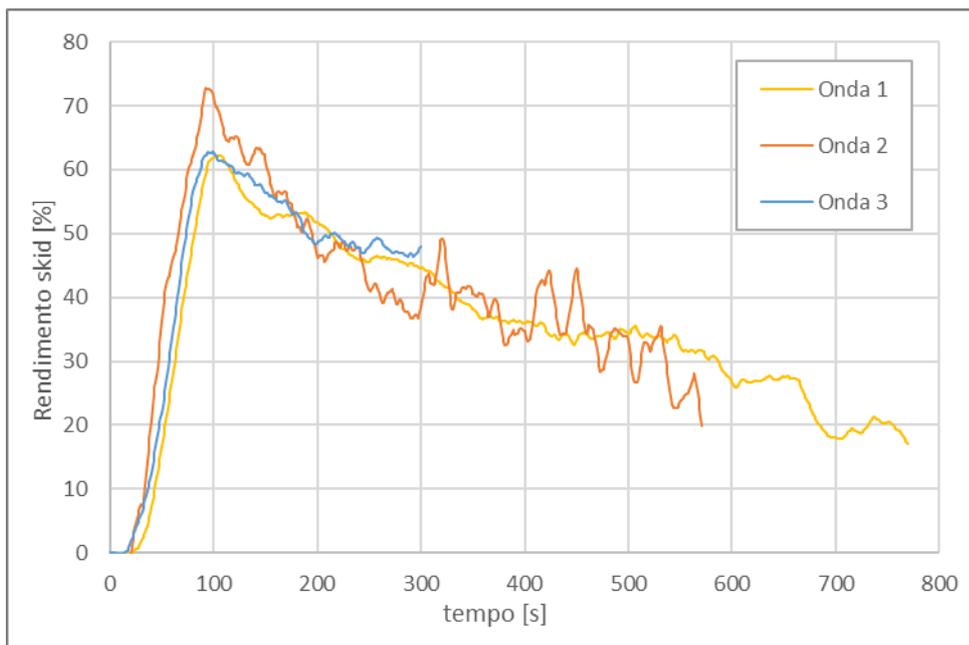


Figura 6.53 – Variazione temporale rendimento skid

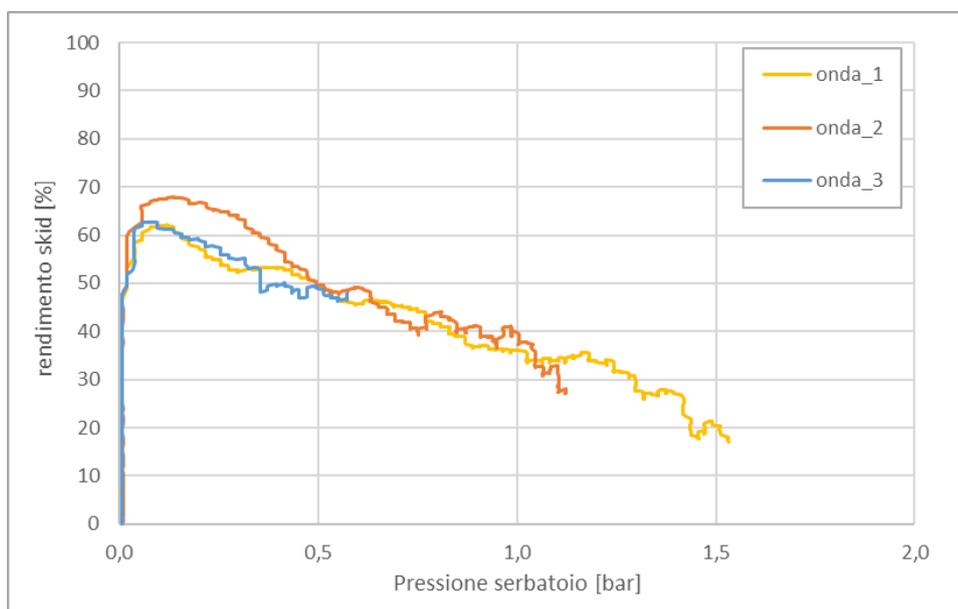


Figura 6.54 – Rendimento skid VS pressione stoccaggio pneumatico

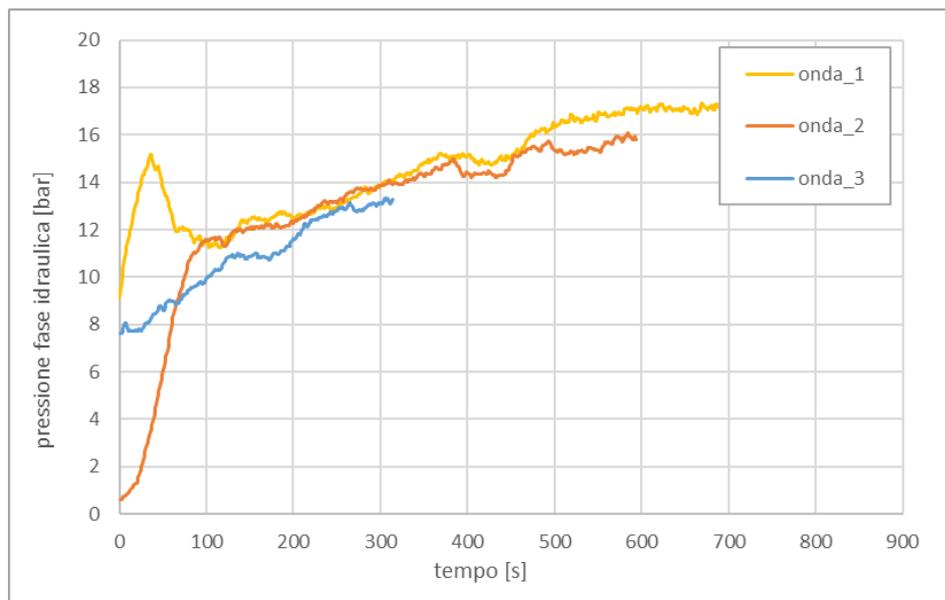


Figura 6.55 – Variazione temporale pressione media olio

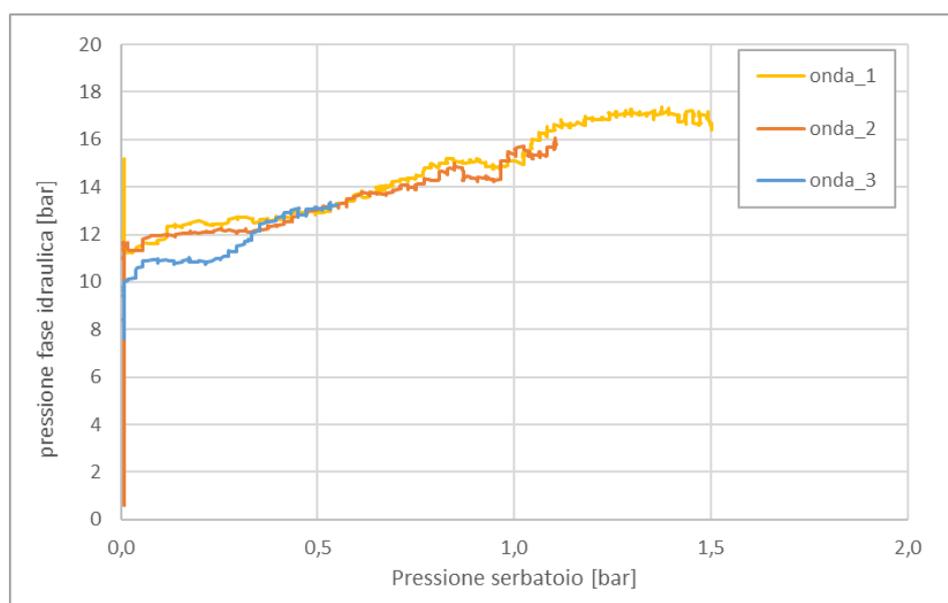


Figura 6.56 – Pressione media olio VS pressione stoccaggio pneumatico

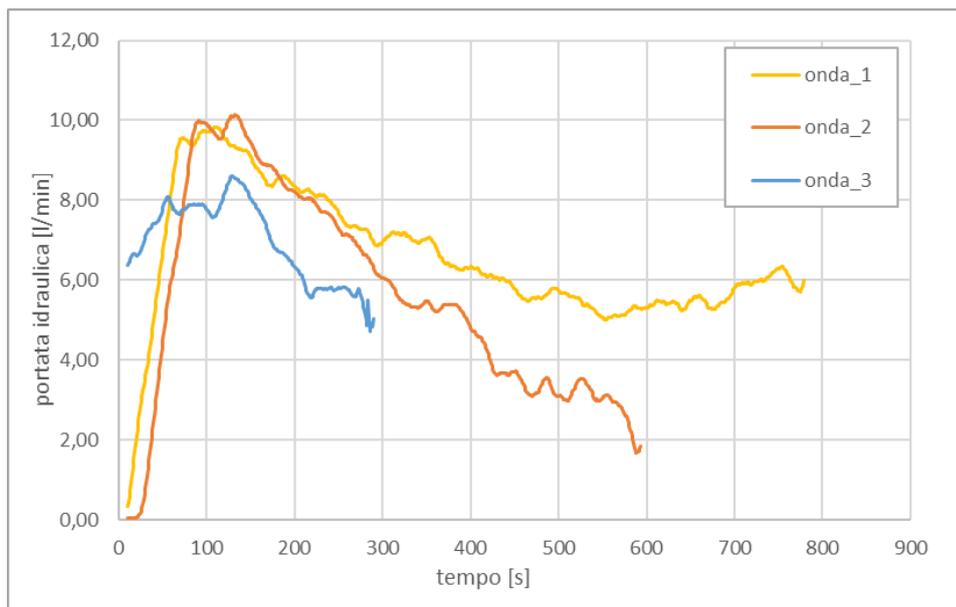


Figura 6.57 – Variazione temporale portata olio

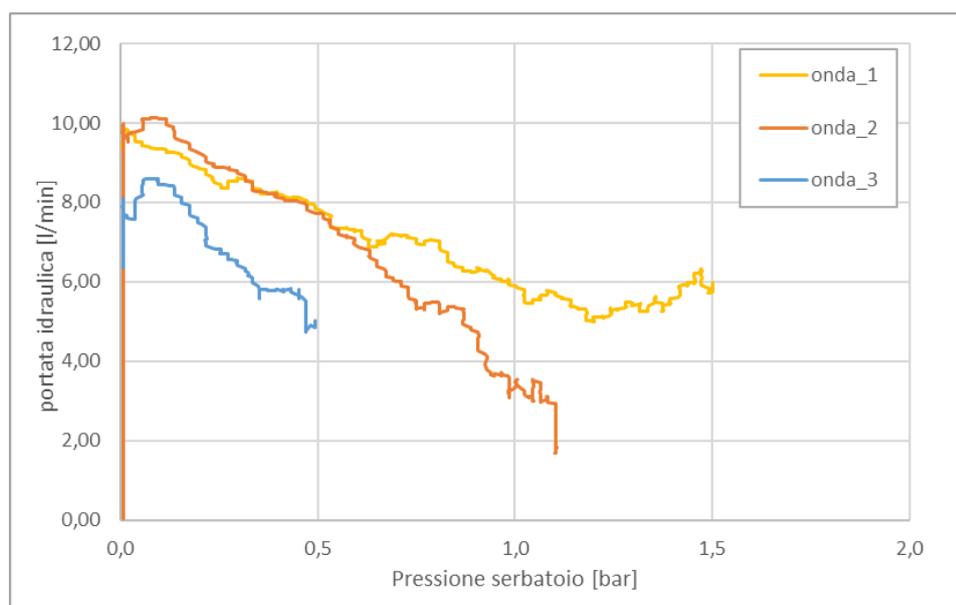


Figura 6.58 – Portata olio VS pressione stoccaggio pneumatico

Di seguito si riportano due tabelle che riassumono gli output ottenuti durante i vari test.

In particolare, per analizzare le performance del WEC, è riportato il coefficiente di conversione,  $C_f$ , definito come

$$C_f = \frac{P_{out}}{P_W \cdot L} \quad [-] \quad (6.4)$$

Dove:

- $P_{out}$ : potenza estratta dal WEC (in questo specifico caso si farà riferimento alla potenza idraulica) [W]
- $P_w$  – potenza incidente dell’onda [W/m]
- $L$  – fronte d’onda intercettato (in questo caso pari al diametro del galleggiante) [m]

test	Pressione idraulica media massima	Portata idraulica media massima	Potenza idraulica media massima	Coefficiente di conversione massima
	[bar]	[l/min]	[W]	[%]
Onda_1	17	9	320	8
Onda_2	16	10	320	9
Onda_3	13	8,5	270	12

Tabella 6.7 – Output test – dettaglio grandezze oleodinamiche

test	Potenza pneumatica istantanea massima	Potenza pneumatica media massima	Rendimento massimo skid
	[W]	[W]	[%]
Onda_1	700	190	60
Onda_2	650	220	70
Onda_3	500	160	60

Tabella 6.8 – Output test – dettaglio grandezze pneumatiche

Come si può notare i test dimostrano la capacità del WEC con PTO idraulico di generare fino a 700 W pneumatici di picco (conservativamente, in realtà le figure precedenti mostrano picchi anche superiori agli 800W), mentre la potenza pneumatica media prodotta arriva a 220 W, per effetto del periodo dell’onda.

Le prestazioni potenziali del dispositivo sono inficiate da diversi fenomeni, quali:

- Onda utilizzata inferiore a quella di progetto: inizialmente era prevista la possibilità di produrre onde con altezza pari a 70 cm, mentre nell’ambito della campagna sperimentale condotta sono state utilizzate onde di un’altezza pari a 40 cm massimi. Dato che il dispositivo inizia a produrre potenza utile con un’onda alta almeno 20 cm, questo significa che l’altezza utile è stata di soli 20 cm, a fronte dei 50 cm di altezza di onda utile previsti. Non è stato possibile eseguire test con onde di altezza

maggiore a causa della significativa apertura del ventaglio di onde generate e alla conseguente dissipazione energetica;

- Lunghezza dell'onda incompatibile con il corretto funzionamento del galleggiante attuatore: durante i test si è notato un funzionamento fortemente oscillante del sistema, dovuto essenzialmente ad una lunghezza di onda insufficiente, che si è tradotta in una riduzione della corsa utile del cilindro attuatore, e dunque una riduzione della portata;
- I due fenomeni precedentemente esposti hanno fatto sì che la portata di olio prodotta fosse inferiore alle attese: la portata prevista era di circa 35 l/min, mentre è stata misurata una portata idraulica media massima pari a 10 l/min.
- Il funzionamento fortemente discontinuo del dispositivo ha causato una generale riduzione del rendimento dello skid: nei test a banco questo ha raggiunto valori fino al 90%, mentre nei test sperimentali in ambiente reale il rendimento non ha superato il 70%, scendendo fino alla soglia del 40% al crescere della contropressione allo scarico del cilindro pneumatico.

I fenomeni sopra elencati, che sono stati evidenziati nella fase sperimentale in mare, potranno essere facilmente superati da opportuni accorgimenti impiantistici da adottare in fase progettuale per le evoluzioni future del sistema.

## 6.4 CONCLUSIONI

A valle dell'analisi svolta possiamo dire che la strategia di produzione migliore, basandosi sui dati disponibili (WEC + skid oleo-pneumatico + microturbina AMT), si evince che, per migliorare l'efficienza del sistema, convenga lavorare con pressioni di serbatoio basse. Con i dati in nostro possesso un ottimo compromesso si può raggiungere con pressioni di innesco della microturbina nell'intorno dei 0.9 bar. Valutati questi valori e ricordando che il sistema, anche in fase di scarica della turbina, continua l'azione di riempimento del serbatoio, si raggiungono duty cycle di funzionamento superiori al 30% (40s ON - 130s OFF).

Le seguenti tabelle riassumono gli output in termini di potenza di picco e di energia elaborata in un ciclo di carica scarica dai vari elementi che costituiscono l'intero sistema integrato.

<b>Dispositivo</b>	<b>Potenza media prodotta [W]</b>	<b>Forma</b>
WEC	320	Oleodinamico
Skid	220	Pneumatico
Microturbina	6	Elettrico

*Tabella 6.9 – Potenza media prodotta dai dispositivi del sistema integrato*

<b>Dispositivo</b>	<b>Energia prodotta [Wh]</b>
WEC	8,4
Skid	3,5
Microturbina	0,07

*Tabella 6.10 – Energia elaborata dai dispositivi del sistema integrato in un ciclo di carica-scarica*

Infine, considerando il duty cycle del sistema pari a 170 s, possiamo dire che in un'ora possono essere realizzati circa 21 cicli consecutivi.

L'energia complessivamente elaborata dai vari dispositivi del sistema integrato in un'ora di lavoro è mostrata nella successiva Tabella 6.11.

<b>Dispositivo</b>	<b>Energia prodotta [Wh]</b>
WEC	176,4
Skid	73,5
Microturbina	1,5

*Tabella 6.11 – Energia elaborata dai dispositivi del sistema integrato in un'ora di lavoro*

In forza di tali risultati il è stata riconosciuta la validità scientifica del progetto da parte del committente [82].

Soffermandosi sul dispositivo WEC con PTO idraulico, come già detto esso è del tipo *bottom-referenced heaving buoy (Bref-HB)*. Confrontando le prestazioni ottenute, in particolare in termini di coefficiente di conversione per quanto riguarda il WEC, si può dire che siano stati ottenuti risultati in linea con quelli ottenuti da dispositivi analoghi [83], già in fase di commercializzazione. Tali risultati complessivi mostrano, da un lato, l'effettivo funzionamento del sistema per potenze significative, incoraggiando ulteriori ricerche, da compiersi a fronte di un ulteriore sforzo di progettazione finalizzato all'incremento dell'affidabilità delle parti sommerse.

# CAPITOLO 7

## CONCLUSIONI

L'attività di ricerca svolta nel corso del triennio ha consentito di approfondire le tematiche legate alla conversione dell'energia dal moto ondoso del mare.

In particolare, l'attività della prima parte del percorso di dottorato è stata focalizzata sullo studio della possibilità di sfruttare l'energia cinetica dei moti orbitali delle stesse mediante un dispositivo innovativo, il SeaSpoon, sviluppato dal gruppo Thermochemical Power Group del dipartimento DIME dell'Università di Genova.

Tale attività si è articolata nello sviluppo di modelli di simulazione dinamici e di attività sperimentali, condotti su prototipi equipaggiati con pale di differenti forme (pala piana, pala concava e pala convessa) e diverse lunghezze (corda pari a 7.5 e 10 cm) ed ha portato all'evidenza che lo sfruttamento dell'energia cinetica dei moti orbitali propri delle onde, pur potendo ottenere performance di riguardo in stati di mare caratterizzati da onde basse ( $seastate < 2$ ) non risulta essere una strada promettente per la produzione di energia su vasta scala, considerando la riduzione del rendimento del dispositivo al crescere delle dimensioni dell'onda.

Come già discusso nel capitolo 4, il rendimento di dispositivi che intendano sfruttare l'energia cinetica dei moti orbitali (considerando sia profili a resistenza sia profili dinamici) decresce in maniera significativa al crescere dell'altezza dell'onda, con valori inferiori all'1% per  $seastate$  3 ma che non raggiungono lo 0.4% per  $seastate$  superiori a 6, scoraggiando ulteriori analisi su questo settore.

Tale riduzione del rendimento è dovuto essenzialmente alla riduzione dell'energia cinetica specifica dei moti orbitali stessi al crescere del  $seastate$ , fenomeno causato dal fatto che, se da un lato al crescere dell'altezza dell'onda si ha un significativo aumento della potenza della stessa (si consideri il fattore quadratico tra le due grandezze), dall'altro si ha un corrispondente aumento sia del periodo che della lunghezza della perturbazione, il che implica la distribuzione dell'energia cinetica su una porzione più vasta e dunque la sua "diluizione", a fronte di un attuatore le cui dimensioni rimangono invariate.

Di fatto, come già evidenziato, la velocità media dei moti orbitali percepita dal SeaSpoon decresce al crescere dell'altezza dell'onda, implicando una riduzione del rendimento limite di qualsiasi convertitore ipotizzabile, che non incoraggia ulteriori indagini.

La seconda parte del percorso di dottorato è stata incentrata nell'ambito del progetto seaWHAM, che ha consentito lo sviluppo di un generatore di onda artificiale installato su una banchina connessa al mare aperto ed alla progettazione ed analisi di un sistema integrato basato su un dispositivo di conversione energetica da moto ondoso del tipo "point absorber" in grado di convertire l'energia delle onde in energia idraulica, pneumatica, elettrica.

Per quanto riguarda le attività legate al generatore di onda artificiale, discusse nel capitolo 5, è stata condotto un dimensionamento a partire dalle teorie presenti in letteratura, sono stati seguiti i lavori di realizzazione ed installazione del dispositivo a cui è seguita l'attività di caratterizzazione della macchina.

Sono stati sviluppati diversi controlli per la gestione della posizione e della velocità delle pale, a cui sono seguite campagne di test per la caratterizzazione della macchina.

Attualmente i controlli disponibili consentono la riproduzione di treni d'onda con altezza fino a 42 cm, consentendo di riprodurre diversi stati di mare, sia considerando un profilo di onda oceanico completamente sviluppato che un profilo mediterraneo, previa opportune considerazioni relative a fattori di scala da utilizzare. Ad esempio, utilizzando il controllo triangolare ed imponendo un fattore di scala pari a 15 possono essere riprodotti profili d'onda equivalenti a quella oceanica caratterizzati da *seastate* 4 e *seastate* 5, mentre imponendo un fattore di scala pari a 30 ci si può spingere a riprodurre stati di mare equivalenti caratterizzati da *seastate* 8.

Le attività hanno evidenziato il potenziale dell'infrastruttura, unica in Europa nel suo genere dal momento che consente di svolgere test in ambiente controllato ma reale e significativo, tuttavia sono emerse diverse criticità relative alla struttura che, a causa dell'aggressività dell'ambiente marino, ha necessitato di diverse attività manutentive.

Ulteriori sviluppi dell'infrastruttura sono legati alla sostituzione di alcuni elementi rivelatisi critici (attuatori oleodinamici), lo sviluppo di un nuovo sistema di controllo delle pale che consenta una movimentazione con profilo sinusoidale delle stesse, e la realizzazione di un nuovo sistema di acquisizione integrato per la misurazione real time delle onde generate.

La facility è integrata all'interno del SeaLAB, infrastruttura dedicata ad attività di ricerca in ambiente marino in forza al Centro di Supporto Sperimentale Navale (CSSN) della Marina Militare italiana, con sede a La Spezia.

Per quanto riguarda la seconda parte del progetto SeaWHAM, che è coincisa con l'ultima parte del percorso di dottorato, essa ha riguardato lo sviluppo di un sistema integrato in grado di convertire l'energia del moto ondoso in diverse altre forme di energia, in particolare idraulica pneumatica, elettrica.

Per completare il progetto sono stati progettati e realizzati diversi elementi quali l'attuatore, il convertitore e lo skid oleopneumatico, alla cui realizzazione sono seguite prove a banco dei singoli componenti.

La campagna sperimentale, condotta presso il SeaLAB e costituendo dunque anche un banco di prova per il generatore di onda artificiale, ha evidenziato il potenziale della tecnologia basata su attuatori a spinta idrostatica, mettendone in luce però anche le criticità.

Se da un lato si hanno avuto buoni risultati, soprattutto per quanto riguarda la conversione in energia idraulica e pneumatica la cui potenza ha raggiunto valori medi di 320 W e 220 W con onde la cui altezza era inferiore a 40 cm, si sono riscontrati diversi problemi legati all'affidabilità ed alla resistenza degli elementi dell'impianto, in particolare l'attuatore idraulico sommerso, che ha subito un danneggiamento irreversibile dopo poche settimane dall'installazione



## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] H. Ritchie e M. Roser, «Energy Production & Changing Energy Sources,» OurWorldinData.org, 2018.
- [2] IEA, World Energy Investment 2018.
- [3] Bloomberg, «NEF,» [Online]. Available: <https://about.bnef.com/>.
- [4] L. K. Johnson, «Tracking SDG7: The energy progress report 2018,» worldbank.org , 2018.
- [5] R. Kempener e F. Neumann, «Wave Energy, Technology Brief,» irena.org, 2014.
- [6] IRENA, Marine Energy Capacity and Production, 2015.
- [7] V. Mendi, S. Rao e J. Seelamjaya, «Tidal Energy: A Review,» International Conference on Hydraulics, Water Resources, Coastal and Environmental Engineering, 2016.
- [8] AquaRET, «AquaRET Text Book,» [www.aquaret.com](http://www.aquaret.com).
- [9] A. Pecher e J. P. Kofoed, «Handbook of Ocean Wave Energy,» Ocean Engineering & Oceanography, 2017.
- [10] K. Gunn e C. Stock Williams, «Quantifying the global wave power resource,» Renewable Energy, 2012.
- [11] C. f. R. E. S. CRES, «Wave energy utilization in Europe,» EESD, 2002.
- [12] M. A. Peviani, F. Carli e S. Bonamano, «European wave energy and studies for Italy's potential,» International Journal on Hydropower and Dams, 2011.
- [13] B. Drew, A. Plummer e M. Sahinkaya, «A review of wave energy converter technology,» Power and energy, 2009.
- [14] B. Hamedni, C. Mathieu e C. Ferreira, «Generic WEC System Breakdown,» SDEWED, 2014.
- [15] AEA, «Review and Analysis of Ocean Energy Systems Development and Supporting Policies,» AEA Energy and Environment, 2006.
- [16] M. Esteban, J. López Gutiérrez e V. Negro, «Classification of Wave Energy Converters,» Juniper pulisher, 2017.

- [17] M. Folley e T. Whittaker, «Analysis of the nearshore wave energy resource,» *Renewable Energy*, 2009.
- [18] RenewableUK, «Marine energy in the UK: state of the industry report,» 2012.
- [19] J. Brooke, «Wave Energy Conversion,» Ocena engineering Series edition, 2009.
- [20] J. Frandsen e P. Rodriguez, «Technical assessment of the Pelamis wave energy converter concept,» Abengoa research, 2012.
- [21] H. Sørensen e W. Knapp, «Wave Dragon,» IMECHE Symposium, 2005.
- [22] A. Henry e K. Doherty, «Advances in the Design of the Oyster Wave Energy Converter,» *Marine Renewables and Offshore Wind Conference*, 2010.
- [23] WAVESTAR. [Online]. Available: <http://wavestarenergy.com/>.
- [24] CorPower. [Online]. Available: <http://www.corpowerocean.com/>.
- [25] C. BIG, «Blue Italian Growth,» [Online]. Available: <http://www.clusterbig.it/>.
- [26] F. Arena, A. Romolo, G. Malara, V. Fiamma e V. Laface, «The first worldwide application at full-scale of the U-OWC device in the port of Civitavecchia: initial energetic performances,» in *Proceedings of the ASME 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2017-62036*, Trondheim),, 2017.
- [27] G. Malara, A. Romolo, V. Fiamma e F. Arena, «On the modelling of water column oscillations in U-OWC energy harvesters.,» *Renew. Energy*, pp. 101, 964–972., 2017.
- [28] F. Strati, G. Malara e F. Arena, «Performance optimization of a U-Oscillating-Water-Column wave energy harvester,» *Renewable Energy*, n. 99, pp. 1019-1028, 2016.
- [29] M. Peviani, A. Danielli, A. Amicarelli, G. Agate, L. Serri e E. Lembo, Sviluppo dispositivo WaveSAX: prove in vasca del modello scala 1:5 conturbina Wells e sistema digenerazione e controllo, 2016.
- [30] J. Roomezhkaksari, D. Borello, G. Colicchio, I. Santic, A. Danelli, M. Peviani, A. Giacomi e A. Colucci, «Analytical and numerical investigation of an innovative Oscillating Water Column device with immersed turbine,» in *OWEMES*, Bari, 2017.
- [31] N. Pozzi, Numerical Modelling and Experimental Testing of a Pendulum Wave Energy Converter (PeWEC), Torino, 2018.
- [32] G. Bracco, E. Giorcelli e G. Mattiazzo, «ISWEC: A gyroscopic mechanism for wave power exploitation,» *Mechanism and machine theory*, pp. 46, 1411–1424, 2011.

- [33] SEAPOWERSRCL, «Gel: Clean Energy From the Sea,» 2017. [Online]. Available: <http://www.seapowersrcl.com/ocean-and-river-system/gel>.
- [34] L. Holthuij, «Wave in Oceanic and Costal waters,» Cambridge University press, 2007.
- [35] C. Bretschneider, «Generation of waves by wind State of Art,» National Engineering Science , 1965.
- [36] K. Sadeghi e G. Dzayi, «An overview of generation, theories, formulas and application of sea waves,» Academic Research International, 2017.
- [37] B. Le Mehaute, «An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves,» Springer Study Edition, 1976.
- [38] K. Hasselmann, «On the non-linear transfer in a gravity wave spectrum,» Journal of Fluid Mechanics, 1962.
- [39] H. Mitsuyasu, F. Tsai, T. Subara e S. Mizuno, Observation of the directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy, Journal of Physical Oceanography, 1975.
- [40] K. B. Dysthe, Water Waves and Ocean Currents. Nordfjordeid, Lectures, 2004.
- [41] R. Dean e R. Dalrymple, Review of Hydrodynamics and Vector Analysis, Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists, 1991.
- [42] R. Dean e R. Dalrymple, Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists, Engineering Wave Properties, 1991.
- [43] D. Cartwright, Laplace and 19th Century Hydrodynamics, Cambridge University Press, 1992.
- [44] A. Craik, The Origins of Water Wave Theory, Annual Review of Fluid Mechanics, 2004.
- [45] R. Dean e R. Dalrymple, Small-Amplitude Water Wave Theory Formulation and Solution, Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists, 1991.
- [46] J. D. Fenton, «Nonlinear Wave Theories,» in *The Sea, Vol.9: Ocean Engineering Science*, New York, Eds. B. Le Méhauté and D.M. Hanes, Wiley, 1990.
- [47] «Stokes Theory,» [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Stokes\\_wave](https://en.wikipedia.org/wiki/Stokes_wave).
- [48] F. Ursell, «The long-wave paradox in the theory of gravity waves,» *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, vol. 49, n. 685–694, 1953.

- [49] J. D. Fenton, «A Fifth-Order Stokes Theory for Steady Waves,» *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 1985.
- [50] R. Sorensen, Two-Dimensional Wave Equations and Wave Characteristics, Basic Coastal Engineering, 2006.
- [51] W. Pierson e L. Moskowitz, «Proposed Spectral Form for Fully Developed Wind Seas Based on the Similarity Theory of S. A. Kitaigorodskii,» *Journal of Geophysical Research*, pp. Vol. 69, p.5181-5190, 1964.
- [52] L. Chair, R. Parker e D. Tafti, *Hydrodynamic Design Optimization and Wave Tank Testing of a Self-Reacting Two-Body Wave Energy Converter*, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2017.
- [53] K. Hasselmann, T. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D. Cartwright, K. Enke, J. Ewing, H. Gienapp, D. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P. Miller, D. Olbers, K. Richter, W. Sell e H. Walden, «Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP),» *Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift Reihe*, pp. Nr. 12 -.95,, 1973.
- [54] V. Milano e D. Bertilorenzi, «Spettri del moto ondoso dedotti dalle registrazioni della rete Ondametrica Nazionale,» in *Studi Costieri Vol. 54*, Università di Pisa, 2013.
- [55] S. Hughes, Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering, Advanced series on ocean engineering, 1993.
- [56] O. Madsen, On the generation of long waves, *Journal of geophysical research*, 1971.
- [57] R. Guza e R. Flick, Paddle Generated Waves in Laboratory Channels, *Journal of the waterway port coastal and ocean division*, 1980.
- [58] L. Di Fresco e A. Traverso, The Seaspoon Innovative Wave Energy Converter, Proceedings of OCEANS '13 MTS/IEEE, San Diego., 2013.
- [59] L. Di Fresco e A. Traverso, «Seaspoon: dispositivo per la conversione energetica del moto ondoso del pelo libero di liquidi». Brevetto Italian patent 1405004 GE2011A000020, 2011.
- [60] F. Roncallo, V. Santamaria, A. Traverso e C. Carraro, «The Seaspoon wave orbital motion converter: prototype development and open sea installation,» Genova, 2016.
- [61] L. Di Fresco, The Seaspoon: a new converter of sea wave orbital motion, Doctorate Course in Fluid Machinery Engineering, 2013.

- [62] T. Reboli, F. Roncallo, V. Santmaria, E. Canepa e A. Traverso, «The Seaspoon Wave Energy Converter: performance characterization of different blade geometries,» in *Oceans '17 MTS/IEEE conference*, Aberdeen (UK), 2017.
- [63] B. Holmes, «Tank testing of wave energy conversion system,» Marine renewable energy guides, EMEC, Londra, 2009.
- [64] X. Ortiz, D. Rival e D. Wood, «Forces and Moments on Flat Plates of Small Aspect Ratio with Application to PV Wind Loads and Small Wind Turbine Blades,» *Energies*, vol. 8, n. 2438-2453, 2015.
- [65] G. Suarato e D. Ciliberti, *Analisi numerica con linea portante e setup sperimentale di turbine ad asse verticale non convenzionali*, Napoli, 2008.
- [66] L. Carnelli, *Sviluppo di strumenti per l'analisi e la progettazione preliminare di aerogeneratori ad asse verticale*, Genova, 2017.
- [67] M. Fleisinger, M. Vesenjsek e M. Hribersek, «Flow Driven Analysis of a Darrieus Water Turbine,» *Journal of Mechanical Engineering*, 2014.
- [68] M. Raciti Castelli, A. Fedrigo e E. Benini, «Effect of Dynamic Stall, Finite Aspect Ratio and Streamtube Expansion on VAWT Performance Prediction using the BE-M Model,» *Engineering and Technology International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering*, pp. Vol. 6, 1410-1412, 2012.
- [69] N. Fujisawa e S. Shibuya, «Observations of dynamic stall on Darrieus wind turbine blades,» *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, pp. Vol. 89, 201-214, 2001.
- [70] S. Colladet, *Studio di una turbina ad asse verticale per la conversione delle perdite aerodinamiche dei veicoli in energia eolica*, Padova, 2014.
- [71] P. Migliore, W. Wolfe e J. Fanucci, «Flow Curvature Effects on Darrieus Turbine Blade Aerodynamics,» *Energy*, vol. 4, n. 2, 1980.
- [72] M. Shiono, K. Suzuki e S. Kiho, «An Experimental Study of the Characteristics of a Darrieus Turbine for Tidal Power Generation,» *Electrical Engineering in Japan*, pp. Vol. 132, 38-45, 2000.
- [73] «Termochemical Power Group,» [Online]. Available: [www.tpg.unige.it](http://www.tpg.unige.it).
- [74] «ISME,» [Online]. Available: [www.isme.unige.it](http://www.isme.unige.it).
- [75] «TechCOM,» [Online]. Available: [www.techcom.it](http://www.techcom.it).

- [76] «Advanced Micro Turbines,» [Online]. Available: [www.microturbines.it](http://www.microturbines.it).
- [77] T. Reboli, F. Roncallo e A. Traverso, «Open sea facility design and testing for wave energy converters,» in *Renew conference*, Lisbon, 2018.
- [78] T. Reboli, F. Roncallo, A. Traverso, C. Carraro e E. Guglielmino, «Sea–W.H.A.M. – A Novel Energy Harvesting Technology for Off-shore Applications,» in *SUPEHR conference*, Savona, 2019.
- [79] Siemens, «Totally Integrated Autoation,» [Online]. Available: <https://new.siemens.com/global/en/products/automation/industry-software/automation-software/tia-portal.html>.
- [80] TPG, «Seaspoon: verso la nuova energia del mare 2, Relazione Tecnica - OR2,» 2014.
- [81] P. Beirão e C. Malça, «Hydraulic Power Take-off and Buoy Geometries Characterisation for a Wave Energy Converter,» *Energy and Power Engineering*, pp. vol 5 - pag 72-77, 2013.
- [82] T. S. A. M. S. Thermochemical Power Group, *Relazione progetto SeaWHAM (confidenziale)*, Genova, 2018.
- [83] A. Barbarit, J. Hals, M. Muliawan, A. Kurniawan, T. Moan e J. Krokstad, «Numerical benchmarking study of a selection of wave energy converters,» *Renewable Energy*, vol. 41, pp. 44-63, 2012.