



Ricerca di Sistema elettrico

## Modellazione e simulazione CFD di un cassone di tipo REWEC3-GV

D. Nicolini, V. Russo, L. Sipione, E. Giovannini, F. Arena, F. Strati

## MODELLAZIONE E SIMULAZIONE CFD DI UN CASSONE DI TIPO REWEC3-GV

D. Nicolini , V. Russo , L. Sipione, E. Giovannini (ENEA),  
F. Arena, F. Strati (Univ. Reggio Calabria)

Settembre2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Poduzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Studi e valutazioni sulla produzione di energia elettrica dalle correnti marine a dal moto ondoso

ObiettivoEsecuzione di prove sperimentali e numeriche CFD su prototipo in scala 1:8 del dispositivo a colonna d'acqua oscillante  
REWEC3-GV

Responsabile del Progetto: G. Sannino, ENEA

Responsabile del Progetto: G. Sannino, ENEA

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 STATO DELL'ARTE.....	6
2.1 ANSYS CFD.....	6
2.2 ADINA CFD.....	7
2.3 CFD++.....	7
2.4 CFD-ACE+.....	7
2.5 FLOEFD.....	7
2.6 PHOENICS.....	8
2.7 OPENFOAM.....	8
2.8 CODE SATURNE.....	8
2.9 REEF3D.....	8
3 GENERALITÀ.....	9
3.1 UNITÀ DI MISURA.....	9
3.2 CODICE DI CALCOLO.....	9
3.3 MACCHINE UTILIZZATE PER LE SIMULAZIONI CFD.....	9
4 CARATTERISTICHE FORZANTI SINUSOIDALI.....	10
5 MODELLI CFD.....	11
5.1 GEOMETRIA.....	11
5.2 CONDIZIONI AL CONTORNO ED INIZIALI.....	14
5.3 MESH.....	18
6 RISULTATI SIMULAZIONI CFD CON FORZANTI SINUSOIDALI.....	21
6.1 PRIMO MODELLO – PRIMA FORZANTE CON ANGOLO DI INCIDENZA $\alpha = 0^\circ$ .....	21
6.2 PRIMO MODELLO – PRIMA FORZANTE CON ANGOLO DI INCIDENZA $\alpha = 45^\circ$ .....	23
6.3 PRIMO MODELLO – SECONDA FORZANTE CON ANGOLO DI INCIDENZA $\alpha = 0^\circ$ .....	27
6.4 SECONDO MODELLO – PRIMA FORZANTE CON ANGOLO DI INCIDENZA $\alpha = 0^\circ$ .....	30
7 CONFRONTO SIMULAZIONE CFD – DATI SPERIMENTALI.....	33
7.1 DATI SPERIMENTALI.....	33
7.2 SIMULAZIONI CFD.....	34
7.3 CONFRONTO.....	36
8 CONCLUSIONI.....	49
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	50

## Sommario

Il Piano Annuale di Attuazione 2014 (PAR 2014) dell'Accordo di Programma tra Ministero per lo Sviluppo Economico e l'ENEA per la Ricerca sul Sistema Elettrico, relativamente al progetto B.1.4 "Studi e valutazioni sulla produzione di energia elettrica dalle correnti marine e dal moto ondoso" e all'Obiettivo c) "Esecuzione di prove sperimentali e numeriche CFD su prototipo in scala 1:8 del dispositivo a colonna d'acqua oscillante REWEC3-GV", prevede l'emissione dei seguenti due rapporti:

1. Report sugli esperimenti condotti in situ sul prototipo OWC in scala 1:8;
2. Report sulle attività di modellazione e simulazione CFD di un cassone di tipo REWEC3-GV.

Il presente documento si riferisce al secondo rapporto, e descrive le attività svolte dall'ENEA e dall'Università di Reggio Calabria, in particolare il Laboratorio NOEL, per la realizzazione di modelli numerici CFD per lo studio e l'ottimizzazione delle performance idrodinamiche in differenti configurazioni geometriche e con differenti condizioni del moto ondoso del REWEC3-GV.

Il lavoro ha comportato un significativo impiego di risorse di calcolo, ed ha reso necessario l'utilizzo delle risorse del sistema di calcolo ad alte prestazioni del progetto CRESCO, ma rappresenta un passo fondamentale nello sviluppo di modelli CFD con cui migliorare e rendere più conveniente l'impiego della tecnologia U-OWC nella produzione di energia elettrica.

## 1 Introduzione

Lo sviluppo delle moderne tecnologie energetiche non può prescindere dall'utilizzo di modelli di calcolo sempre più sofisticati. In particolare nel campo della fluidodinamica i codici CFD e i sistemi di calcolo ad alte prestazioni consentono di affrontare problemi di notevole complessità e soprattutto consentono di approcciare il problema in modo più aderente alla realtà, secondo le tre dimensioni spaziali, oltre che nella sua evoluzione nel tempo.

Nel presente documento sarà riportato, all'inizio, uno studio dello stato dell'arte sull'utilizzo delle simulazioni CFD utilizzate nella progettazione dei dispositivi OWC.

Successivamente sarà riportato il lavoro di studio ed ottimizzazione delle performance idrodinamiche del REWEC3-GV, in diverse configurazioni geometriche e con differenti condizioni di moto ondoso, attraverso lo sviluppo di modelli CFD. In dettaglio saranno realizzati due modelli CFD del sistema con differenti griglie di calcolo, per tener conto delle possibili modifiche nella geometria del cassone e poter quindi analizzare la risposta del sistema in presenza di differenti configurazioni geometriche. Verranno quindi effettuate delle simulazioni, sulle differenti geometrie, utilizzando forzanti sinusoidali incidenti sul cassone con differenti angolazioni in modo da poter simulare delle onde provenienti da diverse direzioni.

Infine saranno utilizzati i dati ottenuti dalle prove sperimentali, che verranno svolte presso il laboratorio NOEL dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria, per effettuare un'ulteriore simulazione CFD in condizioni di lavoro reali, e saranno quindi confrontati i dati sperimentali con i risultati della simulazione CFD.

## 2 Stato dell'arte

Nella progettazione dei dispositivi a colonna d'acqua oscillante per una corretta valutazione della validità e dei rendimenti è importante una buona conoscenza dei valori delle grandezze ambientali, tipo forze e movimenti, in cui questi operano.

La descrizione matematica dell'ambiente complesso in cui questi impianti lavorano non è semplice e pertanto per la risoluzione di questi problemi di natura fluidodinamica è necessario l'utilizzo di metodi computazionali.

La fluidodinamica computazionale o numerica (brevemente detta CFD, Computational Fluid Dynamics) è quella branca della fluidodinamica che permette lo studio dei problemi di fluidodinamica mediante l'utilizzo del computer.

Esiste una varietà di programmi CFD. Ci sono quelli di uso generale oppure quelli specializzati per particolari applicazioni, ci sono programmi commerciali che si possono acquistare e programmi non commerciali utilizzabili gratuitamente, ci sono poi quelli prodotti da dipartimenti di ricerca soprattutto per uso interno.

I programmi CFD presentano generalmente delle caratteristiche comuni.

La struttura tipica consiste in tre blocchi: il blocco di pre processamento, quello di calcolo CFD e quello di post processamento

Nella fase di pre processamento la geometria dell'elemento da analizzare può essere definita sia con gli strumenti forniti dal programma che importando i dati da un programma CAD. La geometria è poi convertita nel mesh (bidimensionale per superfici, tridimensionale per volumi). Infine viene definita la fisica del problema: si impongono le condizioni al contorno, si sceglie il tipo di modello di turbolenza, ecc.

Quindi i dati vengono trasferiti al blocco computazionale dove viene eseguita l'analisi CFD.

I risultati ottenuti dai calcoli CFD vengono trattati utilizzando le funzioni di post processamento per la presentazione agli utilizzatori dei dati in forma grafica (oltre che in quella numerica). Inoltre i dati possono essere trasformati in formati esportabili, utilizzabili in altri programmi.

Lista di programmi commerciali

- ANSYS CFD (ANSYS CFX e ANSYS Fluent)
- ADINA CFD
- CFD++
- CFD-ACE++
- FloEFD
- PHOENICS

Lista di programmi liberi

- OpenFOAM
- Code Saturne
- REEF3d

### 2.1 ANSYS CFD

ANSYS CFD, prodotto della ANSYS, comprende i due programmi ANSYS Fluent e ANSYS CFX acquistabili insieme oppure separatamente. Entrambi sono completamente integrati nella ANSYS Workbench platform. Questa è una struttura che integra tutte le fasi di lavoro (pre-processing, simulazione e post-processing) ed ha come fine il miglioramento della produttività.

ANSYS Fluent è stato acquistato da ANSYS nel 2006.

Esso è un programma CFD basato sul metodo ai volumi finiti ed è in grado di simulare un'ampia gamma di fenomeni termo-fluidodinamici e fornisce un set completo di modelli fisici avanzati:

- flussi incomprimibili e comprimibili
- scambio termico
- turbolenza
- terne rotanti
- flussi multi-fase
- flussi reagenti e combustione
- radiazione
- mesh mobili
- interazione fluido-struttura
- calcolo parallelo

ANSYS CFX è stato acquistato da ANSYS nel 2003.

Utilizza per discretizzare il dominio un metodo ibrido elementi finiti / volumi finiti.

Anche questo programma offre una ampia scelta di modelli fisici.

Ambedue i programmi supportano i sistemi operativi Linux e Microsoft Windows

## 2.2 ADINA CFD

ADINA CFD è prodotto dalla ADINA R & D.

Esso è parte del software ADINA System, che consiste in un insieme di moduli per l'analisi agli elementi finiti di strutture, fluidi, e flussi con interazione con la struttura.

ADINA CFD è un strumento di calcolo agli elementi finiti e ai volumi finiti.

Esso funziona con i sistemi operativi Linux, Unix e Microsoft Windows

Le assunzioni di base utilizzate per la modellizzazione dei flussi sono:

- Equazioni di Navier-Stokes o di Eulero.
- Flusso incompressibile o pienamente compressibile.
- Analisi in stazionario o in transitorio.
- Flussi laminari o turbolenti.
- Flussi con o senza scambio termico.
- Trasferimento di massa

## 2.3 CFD++

CFD++ è prodotto da Metacomp Technologies. Software general purpose che può essere personalizzato per applicazioni in campi specifici. Supporta diversi sistemi operativi, tra cui Linux e Windows. Utilizza il metodo dei volumi finiti.

## 2.4 CFD-ACE+

CFD-ACE+ è un solutore computazionale di fluidodinamica commerciale sviluppato da ESI Group. Risolve le equazioni di conservazione della massa, della quantità di moto, dell'energia, delle specie chimiche e altre equazioni di trasporto scalare con il metodo dei volumi finiti. Queste equazioni consentono simulazioni accoppiate di fenomeni di *fluidi*, termici, chimici, biologici, elettrici e meccanici

## 2.5 FloEFD

FloEFD è un software CFD general purpose prodotto da Mentor Graphics.

Si trova incorporato in importanti sistemi MCAD (Mechanical CAD) come Creo di PTC, CATIA V5 e SolidWorks di Dassault Systems e NX di Siemens e si integra strettamente con i software CAD 3D Inventor della Autodesk e SolidEdge della Siemens.

## 2.6 PHOENICS

PHOENICS è stato il primo software commerciale 'general purpose' per la fluidodinamica computazionale (CFD) ed è stato messo sul mercato da CHAM (Concentration, Heat and Momentum Limited) nel 1981.

Esso utilizza il metodo dei volume finiti ed è applicabile a flusso in stazionario o in transitorio, monodimensionale bidimensionale o tridimensionale, turbolento o laminare, multifase, compressibile o incompressibile, utilizzando coordinate cartesiane, polari o curvilinee.

## 2.7 OpenFOAM

OpenFOAM (Open Field Operation And Manipulation) è un software CFD libero "open source", rilasciato sotto la licenza GNU GPL, licenza che permette il libero utilizzo e la modifica del software.

E' sviluppato da OpenCFD Ltd, società controllata dal 2012 da ESI Group, ed è distribuito da OpenFOAM Foundation.

Attualmente OpenFOAM opera unicamente con il sistema operativo LINUX. È stato concepito ed è utilizzato soprattutto per risolvere problemi di fluidodinamica, ma è anche usato in altri campi, tipo l'analisi delle sollecitazioni, l'elettromagnetica e la finanza, essendo fondamentalmente uno strumento per la risoluzione delle equazioni differenziali alle derivate parziali, piuttosto che un software CFD tradizionale.

OpenFOAM è prima di tutto una libreria C ++, utilizzata principalmente per creare eseguibili, noti come applicazioni. Le applicazioni si dividono in due categorie: solutori, che sono progettati per risolvere un problema specifico nella meccanica dei continui; e programmi di utilità, che sono progettati per eseguire attività che comportano la manipolazione dei dati.

La distribuzione OpenFOAM contiene numerosi solutori e programmi di utilità che coprono una vasta gamma di problemi

Sono attualmente disponibile per gli utilizzatori oltre 80 solutori, che sono in grado di simulare vari problemi di ingegneria, e oltre 170 applicazioni di utilità che svolgono attività di pre e post elaborazione, ad esempio, meshing, visualizzazione dei dati, etc.

Una delle caratteristiche di OpenFOAM è che nuovi solutori e programmi di utilità possono essere creati dagli utenti che siano forniti delle necessarie conoscenze del metodo sottostante, di fisica e di tecniche di programmazione.

OpenFOAM è fornito con ambienti di pre e post elaborazione. L'interfaccia per il pre e post processing sono essi stessi programmi di utilità OpenFOAM, garantendo in tal modo un coerente trattamento dei dati in tutti gli ambienti.

## 2.8 Code Saturne

Code Saturne è un programma CFD 'general purpose' libero, distribuito sotto licenza GNU GPL, licenza che permette l'utilizzo e la modifica del software.

E' stato sviluppato a partire dal 1997 dal servizio R&D di EDF (Électricité de France). Nel marzo 2007 è stato reso disponibile sotto la licenza GNU GP.

È basato su un approccio ai volumi finiti in grado di accettare mesh con qualsiasi tipo di cella (tetraedrica, esaedrica, prismatica, piramidale, poliedrica ...) e di struttura reticolare (non strutturata, strutturata a blocchi, ibrida ... ). Risolve le equazioni di Navier-Stokes per flussi 2D, 2D-assialsimmetrici e 3D, stazionari o non stazionari, laminari o turbolenti, incomprimibili o comprimibili, con o senza scambio termico.

## 2.9 Reef3d

Reef3d è un programma CFD libero "open source". Utilizza la libreria MPI per il calcolo parallelo. Il software è sempre in fase di sviluppo e nuove funzionalità vengono aggiunte ad un ritmo sostenuto.



## PARTE A

### 3 Generalità

#### 3.1 Unità di misura

Il sistema di misura adottato è il sistema internazionale (SI): di conseguenza le unità di misura delle principali grandezze fisiche utilizzate nel presente documento sono:

- Lunghezza [m]
- Tempo [s]
- Velocità [m/s]
- Forza [N]
- Pressione [Pa]
- Densità [kg/m<sup>3</sup>]

#### 3.2 Codice di calcolo

Per le analisi fluidodinamiche (CFD), si è utilizzato il codice di calcolo OpenFOAM – The open source CFD toolbox – versione 2.2.1.

OpenFOAM è un free, open source software concesso in licenza sotto GNU General Public Licence e prodotto dalla OpenCFD Ltd.

Il codice è in grado di effettuare simulazioni termo-fluidodinamiche (CFD) di problemi reali in 3 dimensioni sia per applicazioni scientifiche sia per applicazioni ingegneristiche, oltre ad altre simulazioni di meccanica del continuo.

In particolare è stato utilizzato il solutore interFoam. Questo solutore è specifico per flussi bifase isotermici caratterizzati da fluidi immiscibili ed incompressibili; ed utilizza come modello bifase il VOF (volume of fluids).

#### 3.3 Macchine utilizzate per le simulazioni CFD

Le cinque simulazioni CFD, che costituiscono oggetto del presente lavoro, sono state fatte girare sulle macchine appartenenti al sistema di calcolo ad alte prestazioni del progetto CRESCO. L'utilizzo del sistema di calcolo ad alte prestazioni, è stato necessario a causa del notevole peso computazionale delle simulazioni stesse.

Le risorse computazionali ed il relativo supporto tecnico utilizzato per questo lavoro sono stati forniti dalle risorse di calcolo ad alte prestazioni del progetto CRESCO/ENEAGRID e dal suo staff (per informazioni vedere <http://www.cresco.enea.it>).

Il Sistema di calcolo ad alte prestazioni CRESCO/ENEAGRID è stato realizzato dall'ENEA, Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile, e da programmi di ricerca nazionali ed europei.

## 4 Caratteristiche forzanti sinusoidali

Per le prime quattro simulazioni numeriche sono state prese in considerazione le stesse due forzanti sinusoidali considerate nel caso del lavoro svolto l'anno scorso per il PAR 2013<sub>[2]</sub>, corrispondenti a due tipologie di onde realistiche per il sito nel quale è stato realizzato l'apparato sperimentale.

Anche in questo caso le onde sono state schematizzate, in prima approssimazione, senza per questo nulla togliere alla validità del lavoro svolto, con andamenti sinusoidali.

Le caratteristiche della prima forzante sono le seguenti:

- altezza onda (minimo/massimo):  $H_0 = 0.438$  m,
- periodo d'onda (tempo tra due massimi):  $T_0 = 2.75$  s,
- lunghezza spaziale dell'onda (distanza tra due massimi):  $L_0 = 9.5$  m.

Le caratteristiche della seconda forzante sono le seguenti:

- altezza onda (minimo/massimo):  $H_0 = 0.232$  m,
- periodo d'onda (tempo tra due massimi):  $T_0 = 7.10$  s,
- lunghezza spaziale dell'onda (distanza tra due massimi):  $L_0 = 28.3$  m.

## 5 Modelli CFD

Nel presente capitolo sono descritti i due nuovi modelli CFD realizzati sulla base della geometria dell'apparato sperimentale realizzato presso il laboratorio NOEL dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria nel corso dello scorso anno<sup>[4]</sup>.

### 5.1 Geometria

L'apparato sperimentale, per la descrizione del quale si rimanda al documento Report RdS/PAR2013/176<sup>[4]</sup>, è stato realizzato in modo che il volume interno possa essere modificato attraverso l'inserimento di paratie interne.

Partendo dai disegni costruttivi dell'apparato sperimentale, realizzato presso il laboratorio NOEL dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria, sono stati estrapolati i due volumi che costituiscono i domini geometrici delle simulazioni CFD.

Il primo modello è stato realizzato considerando la condizione di assenza delle paratie interne, questa configurazione corrisponde alla condizione di volume operativo totale.

Nelle figure 5.1.1 e 5.1.2 sono riportate due viste del primo modello geometrico utilizzato.

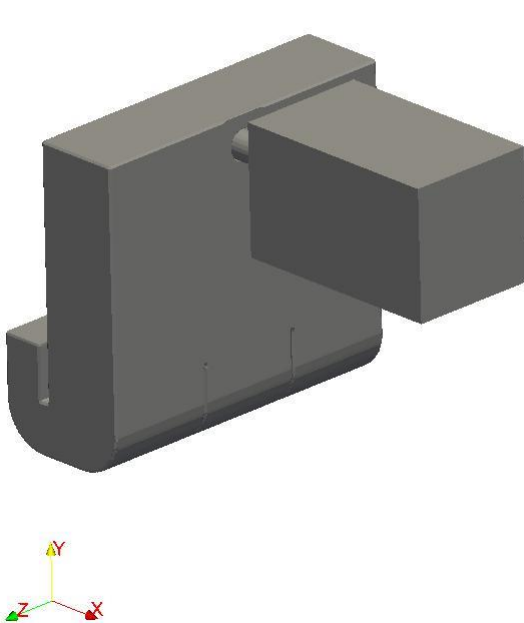


Fig. 5.1.1 – Primo modello geometrico – Vista 1

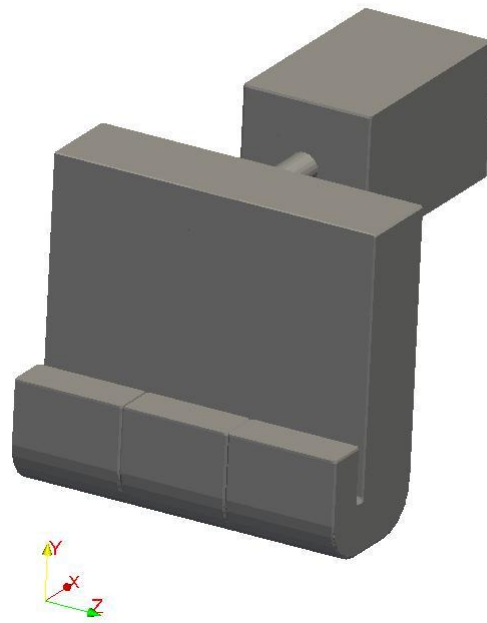


Fig. 5.1.2 – Primo modello geometrico – Vista 2

Nelle figure 5.1.3 e 5.1.4 sono riportate due sezioni caratteristiche del primo modello, nella figura 5.1.3 è riportata la sezione verticale (piano x-y) passante per l'asse del tubo turbina, e nella figura 5.1.4 è riportata la sezione orizzontale (piano x-z) passante per l'asse del tubo turbina.

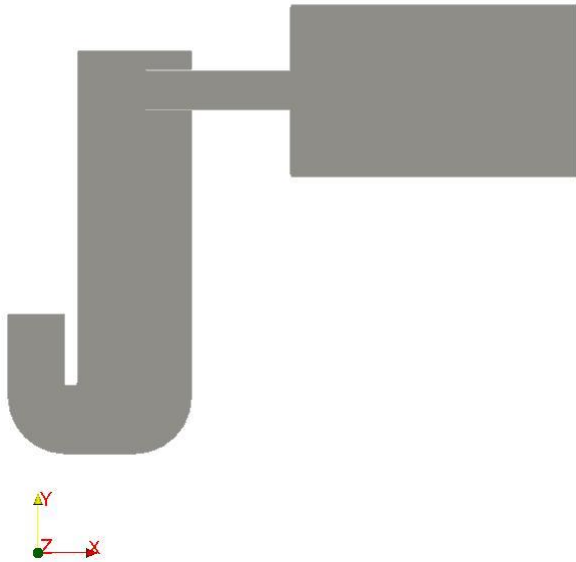


Fig. 5.1.3 – Primo modello geometrico – Sezione verticale (piano x-y) passante per l'asse del tubo turbina

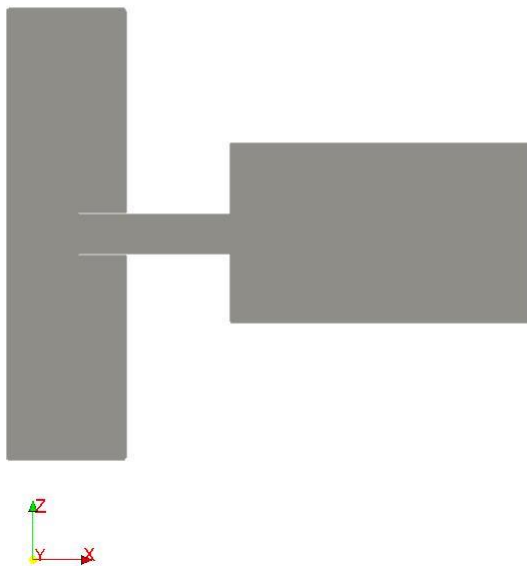


Fig. 5.1.4 – Primo modello geometrico – Sezione orizzontale (piano x-z) passante per l'asse del tubo turbina

Il secondo modello è stato realizzato considerando la condizione di presenza delle due paratie interne che dividono il volume in tre sezioni, questa configurazione corrisponde alla condizione nella quale il volume operativo è solo la parte centrale dell'apparato sperimentale.

Nelle figure 5.1.5 e 5.1.6 sono riportate due viste del secondo modello geometrico utilizzato.

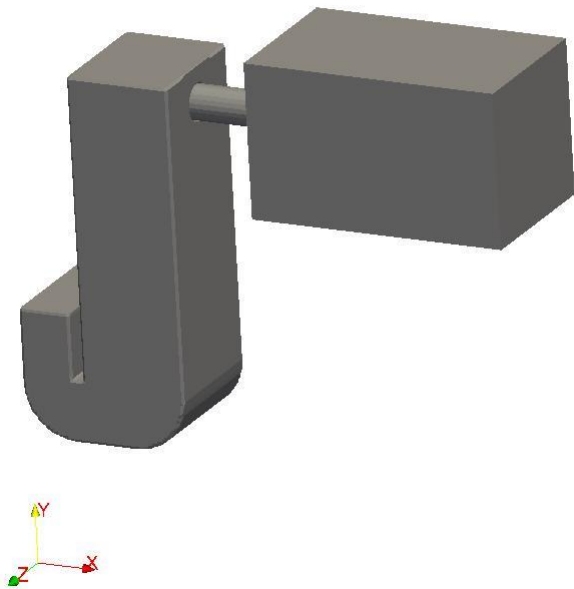


Fig. 5.1.5 – Secondo modello geometrico – Vista 1

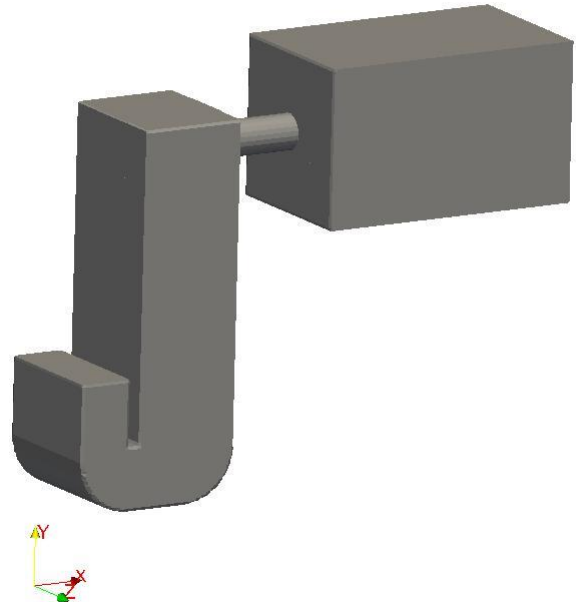


Fig. 5.1.6 – Secondo modello geometrico – Vista 2

Nelle figure 5.1.7 e 5.1.8 sono riportate due sezioni caratteristiche del secondo modello, nella figura 5.1.7 è riportata la sezione verticale (piano x-y) passante per l'asse del tubo turbina, e nella figura 5.1.8 è riportata la sezione orizzontale (piano x-z) passante per l'asse del tubo turbina.

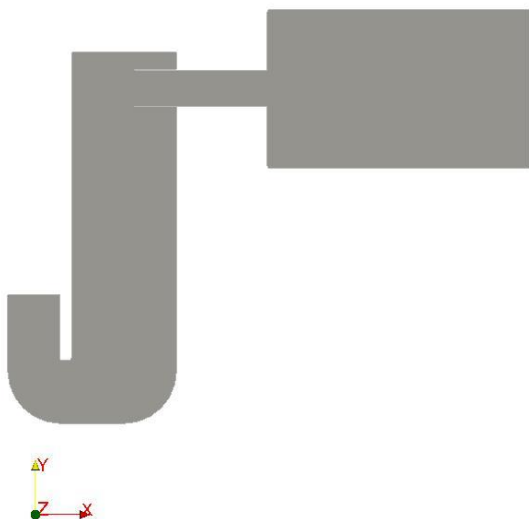


Fig. 5.1.7 – Secondo modello geometrico – Sezione verticale (piano x-y) passante per l'asse del tubo turbina

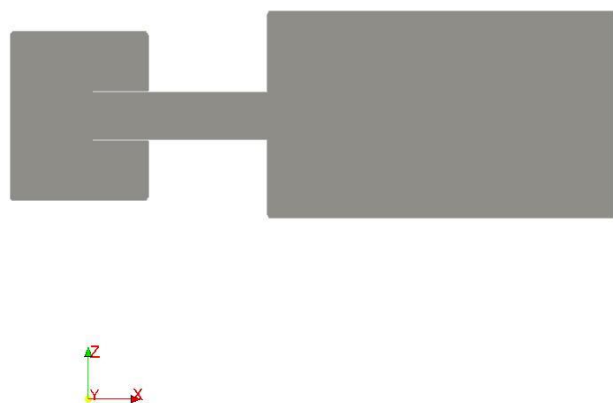


Fig. 5.1.8 – Secondo modello geometrico – Sezione orizzontale (piano x-z) passante per l'asse del tubo turbina

### 5.2 Condizioni al contorno ed iniziali

Nelle figure 5.2.1 e 5.2.2 sono riportati rispettivamente il primo ed il secondo modello (in due viste) con l'indicazione delle condizioni al contorno dell'intera superficie perimetrale.

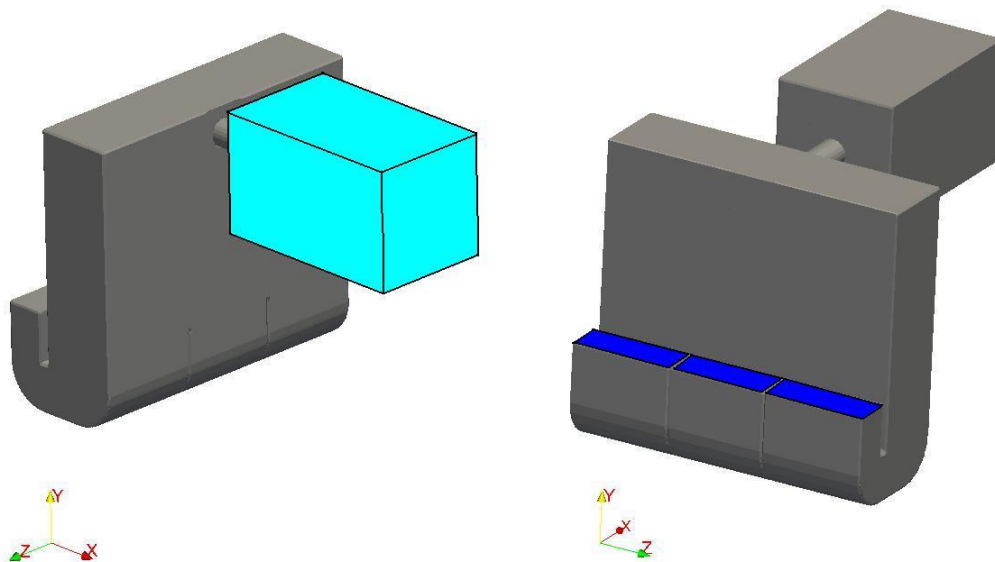


Fig. 5.2.1 – Primo modello geometrico – Condizioni al contorno

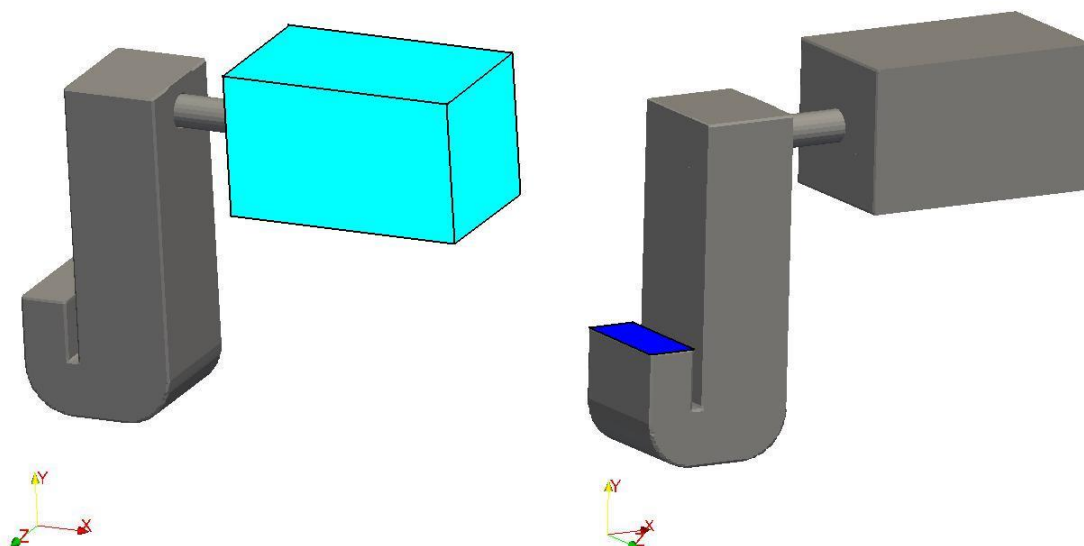


Fig. 5.2.2 – Secondo modello geometrico – Condizioni al contorno

Come si vede dalle figure, come nel caso dei modelli utilizzati negli anni precedenti (PAR 2012 e PAR 2013<sub>[1][2][3]</sub>), le superfici perimetrali dei due modelli sono tutte costituite da pareti (boundary di tipo wall, colore grigio) ad eccezione della superficie di ingresso/uscita dell'acqua (colore blu), costituita nel primo modello da tre differenti superfici rettangolari e nel secondo modello da una sola superficie rettangolare; mentre, per entrambi i modelli, la condizione al contorno di uscita/ingresso dell'aria (colore celeste) è stata applicata alle superfici perimetrali di un volume di forma parallelepipedica applicato all'uscita del tubo per

meglio approssimare le condizioni reali di uscita/ingresso dell'aria, come nel caso del modello utilizzato per il PAR 2013.

Nell'applicazione delle condizioni iniziali ed al contorno per la pressione, anche in questi nuovi modelli, si è assegnato al posto della pressione assoluta  $p$  la pressione decurtata della componente idrostatica  $p-rgh$ .

La tipologia di condizioni al contorno ed iniziali applicate al nuovo modello sono le stesse dei modelli precedenti, si rimanda quindi ai rispettivi documenti<sup>[1][2][3]</sup> per la descrizione delle stesse e per le caratteristiche dei fluidi considerati.

Le condizioni di forzante sono applicate, come nel caso dei modelli precedenti, sotto forma di pressione variabile (in questo caso  $p-rgh$ ) sulla superficie di ingresso/uscita dell'acqua; anche in questo caso si è considerato per la pressione atmosferica il valore di 0 Pa (pressione relativa).

Nel caso di forzanti sinusoidali il livello dell'acqua varia in modo sinusoidale intorno ad un valore medio, pari a 1.622 m rispetto alla base del modello, con un'oscillazione di  $\pm H_0/2$  e con un periodo d'onda  $T_0$ . La pressione  $p-rgh$  varia quindi intorno ad un valore medio

$$p-rgh \text{ medio} = P_{atm} - (\rho_{acqua} \times g \times (1.622)),$$

con una variazione di

$$\Delta(p-rgh) = \pm (P_{atm} - (\rho_{acqua} \times g \times H_0/2)).$$

Per il primo modello sono state prese in considerazione tre differenti condizioni di forzante. Nella figura 5.2.3 è riportato uno schema del sistema con l'indicazione delle superfici di ingresso/uscita dell'acqua e l'indicazione della direzione di incidenza delle onde.

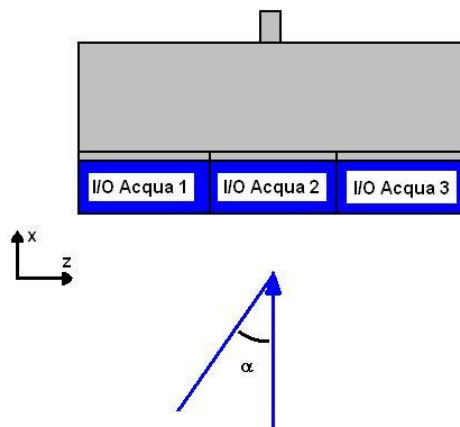


Fig. 5.2.3 – Rappresentazione schematica del sistema con indicazione della direzione di incidenza delle onde

La prima corrisponde ad una condizione di onda del primo tipo (prima forzante, Cap. 4), che incide normalmente rispetto all'asse trasversale dell'apparato sperimentale (asse  $z$ , figura 5.2.3), quindi un'onda il cui asse forma un angolo con l'asse  $x$  del modello pari a  $\alpha = 0^\circ$ . Questo corrisponde ad applicare la stessa condizione di forzante alle tre superfici di ingresso/uscita dell'acqua.

Nella figura 5.2.4 è riportato l'andamento della pressione  $p-rgh$  imposta sulle tre superfici di ingresso/uscita dell'acqua, corrispondente al primo ciclo d'onda, per questa prima simulazione CFD.

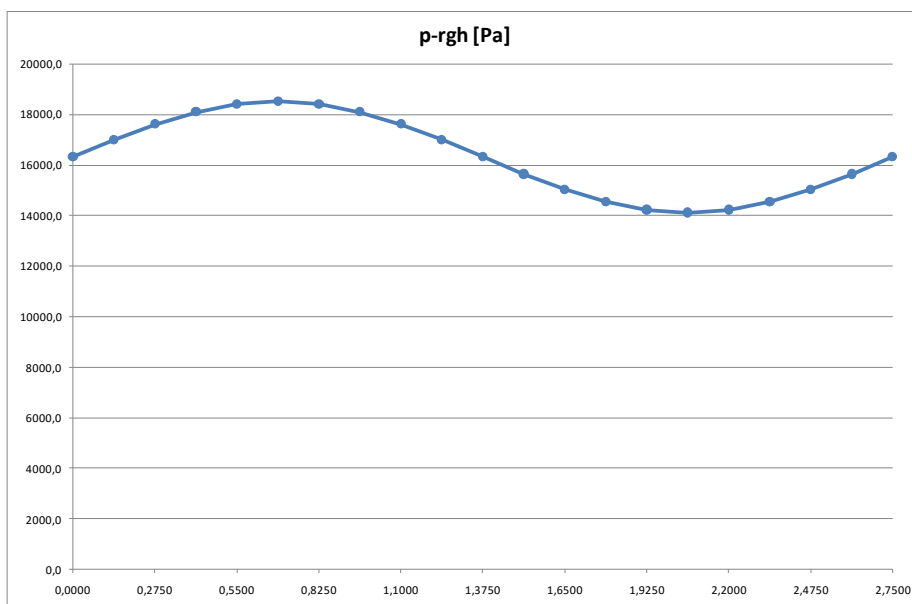


Fig. 5.2.4 – Andamento della pressione p-rgh imposta sulle tre superfici In/Out acqua – primo modello, prima forzante e  $\alpha = 0^\circ$

La seconda corrisponde ad una condizione di onda del primo tipo (prima forzante, Cap. 4), che incide con un angolo di  $45^\circ$  rispetto all’asse trasversale dell’apparato sperimentale (asse z, figura 5.2.3), quindi un onda il cui asse forma un angolo con l’asse x del modello pari a  $\alpha = 45^\circ$ . Questo corrisponde ad applicare tre differenti forzanti alle tre superfici di ingresso/uscita dell’acqua. Le tre forzanti, quindi, a causa dell’inclinazione della direzione di incidenza del moto ondoso, risultano sfasate.

Nella figura 5.2.5 sono riportati gli andamenti delle pressioni p-rgh imposte sulle tre superfici di ingresso/uscita dell’acqua, corrispondenti al primo ciclo d’onda, per questa seconda simulazione CFD.

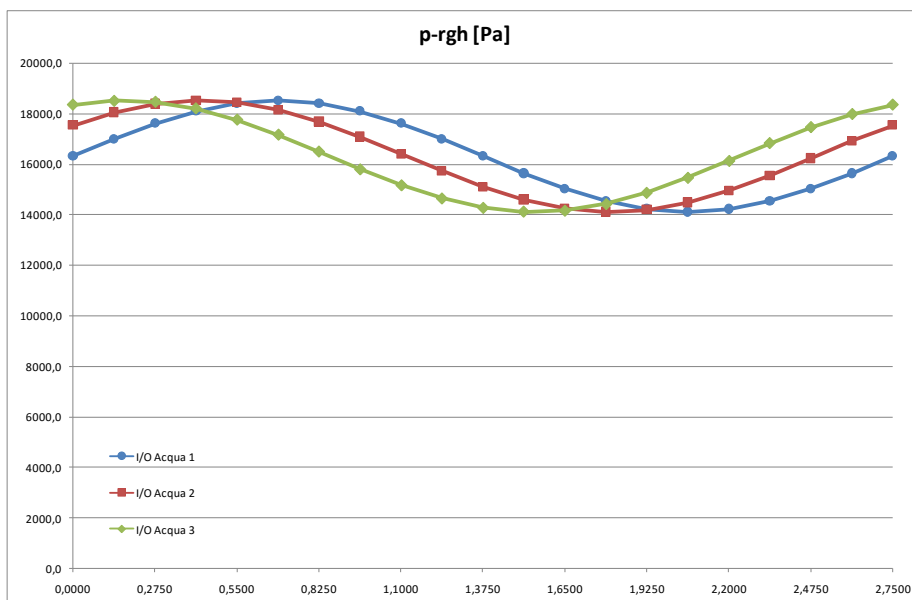


Fig. 5.2.5 – Andamenti delle pressioni p-rgh imposte sulle tre superfici In/Out acqua – primo modello, prima forzante e  $\alpha = 45^\circ$

La terza corrisponde ad una condizione di onda del secondo tipo (seconda forzante, Cap. 4), che incide normalmente rispetto all’asse trasversale dell’apparato sperimentale, quindi un onda il cui asse forma un



angolo con l'asse x del modello pari a  $\alpha = 0^\circ$  (figura 5.2.3). Questo corrisponde ad applicare la stessa condizione di forzante alle tre superfici di ingresso/uscita dell'acqua.

Nella figura 5.2.6 è riportato l'andamento della pressione p-rgh imposta sulle tre superfici di ingresso/uscita dell'acqua, corrispondente al primo ciclo d'onda, per questa terza simulazione CFD.

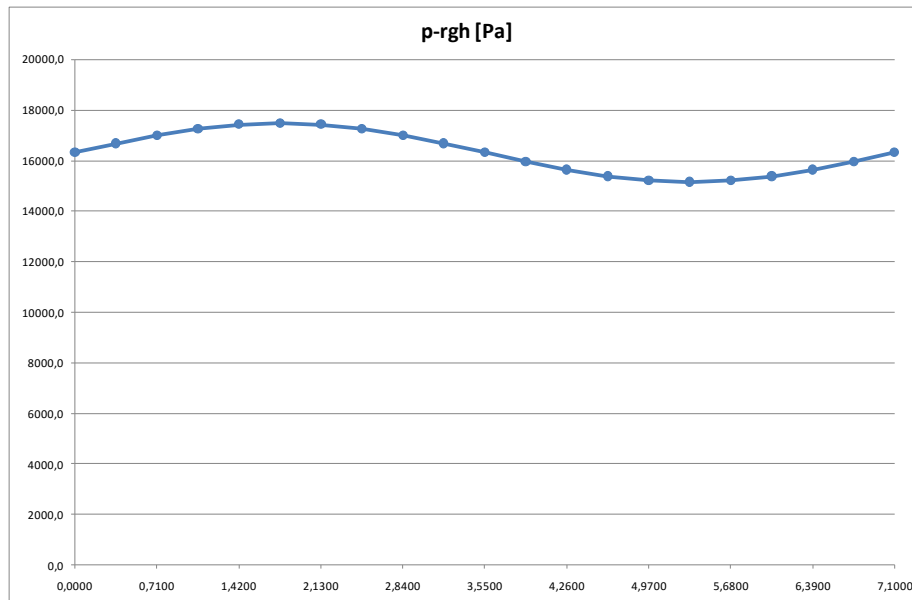


Fig. 5.2.6 – Andamento della pressione p-rgh imposta sulle tre superfici In/Out acqua – primo modello, seconda forzante e  $\alpha = 0^\circ$

Per il secondo modello, nel quale è presente una sola superficie di ingresso/uscita dell'acqua, è stata considerata una sola condizione di forzante, che corrisponde ad un'onda del primo tipo (prima forzante, Cap. 4), che incide normalmente rispetto all'asse trasversale dell'apparato sperimentale, quindi un'onda il cui asse forma un angolo con l'asse x del modello pari a  $\alpha = 0^\circ$  (figura 5.2.3).

Nella figura 5.2.7 è riportato l'andamento della pressione p-rgh imposta sulla superficie di ingresso/uscita dell'acqua, corrispondente al primo ciclo d'onda, per questa quarta simulazione CFD.

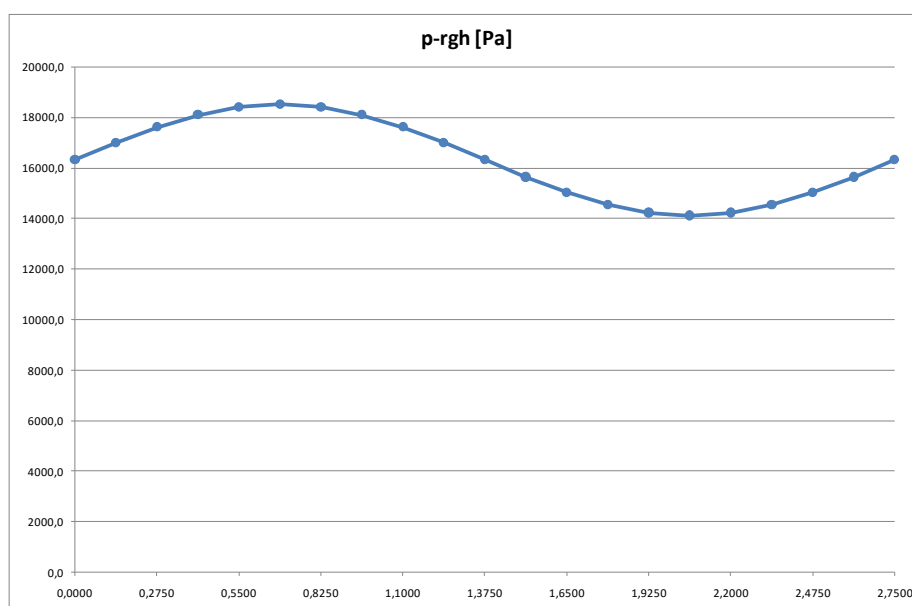


Fig. 5.2.7 – Andamento della pressione p-rgh imposta sulla superficie In/Out acqua – secondo modello, prima forzante e  $\alpha = 0^\circ$

Il livello dell'acqua di mare al tempo  $t = 0$  s, che corrisponde al livello medio pari a 1.622 m, è stato inserito come condizione iniziale per il livello dell'acqua all'interno del modello per tutte le simulazioni CFD con forzante sinusoidale.

### 5.3 Mesh

Per la discretizzazione spaziale dei nuovi modelli valgono le stesse considerazioni fatte a suo tempo per la realizzazione del mesh dei modelli precedenti, si rimanda quindi ai relativi documenti<sup>[1],[2]</sup> per la descrizione delle scelte che hanno portato alla definizione del mesh.

Il mesh, anche per questi modelli, è stato quindi realizzato suddividendo da prima l'intero dominio in elementi approssimativamente cubici di dimensione di circa 25 mm. Successivamente si è proceduto ad infittire una zona cilindrica di diametro pari a 0.60 m contenente il tubo turbina, ed estesa longitudinalmente all'intero modello ed anche all'esterno del tubo, all'interno del volume aggiuntivo, con celle di dimensione di 6/7 mm. La zona di transizione tra le due differenti dimensioni delle celle è stata realizzata, anche in questo caso, di estensione pari a 15/20 cm.

In figura 5.3.1 è riportato il primo dei due nuovi modelli geometrici con l'indicazione di due zone di particolare interesse per il mesh riportate nelle figure da 5.3.2 a 5.3.3.

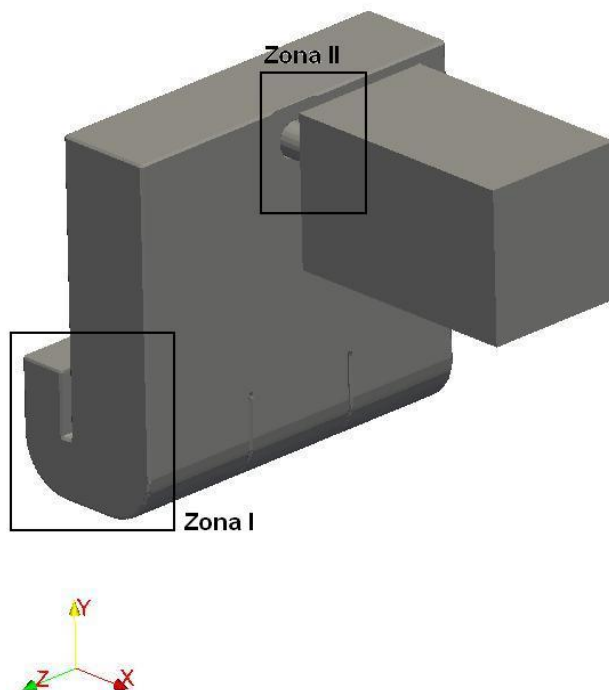


Fig. 5.3.1 – Primo modello geometrico – Zone di particolare interesse per il mesh

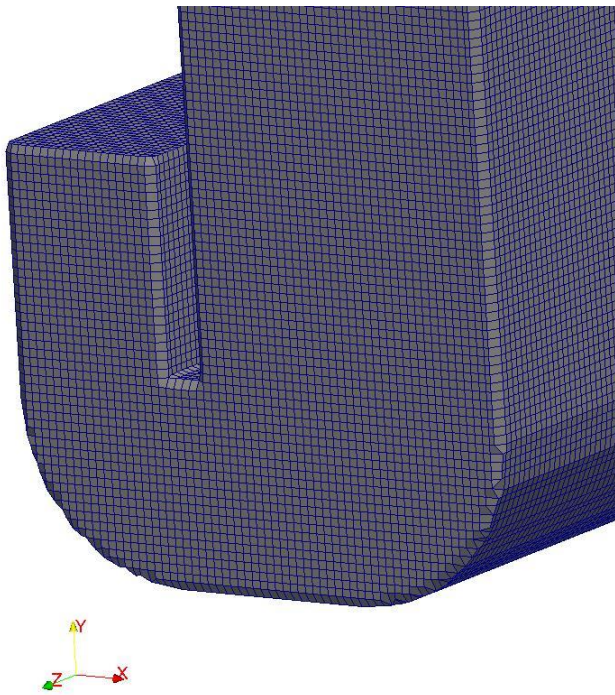


Fig. 5.3.2 – Mesh primo modello – Zona I

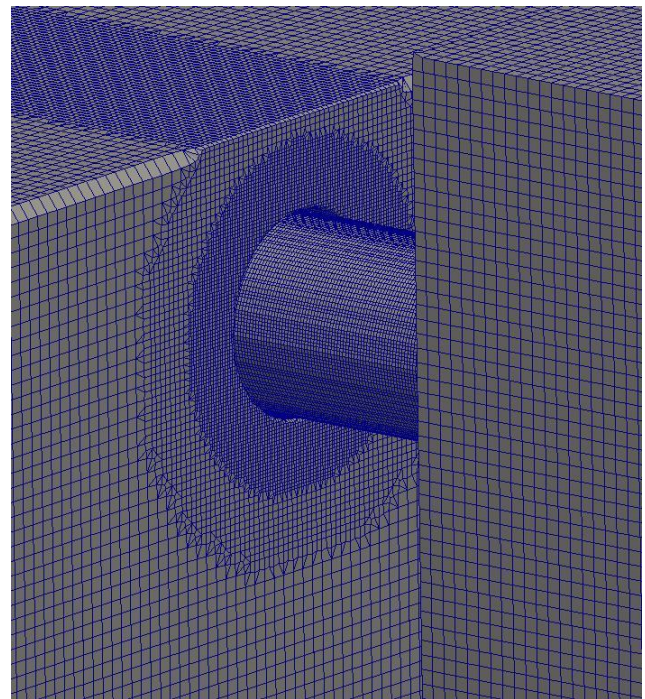


Fig. 5.3.3 – Mesh primo modello – Zona II

Il mesh del primo modello così realizzato è costituito da un totale di circa 3.6 milioni di celle.

In figura 5.3.4 è riportato il secondo dei due nuovi modelli geometrici con l'indicazione di due zone di particolare interesse per il mesh riportate nelle figure da 5.3.5 a 5.3.6.

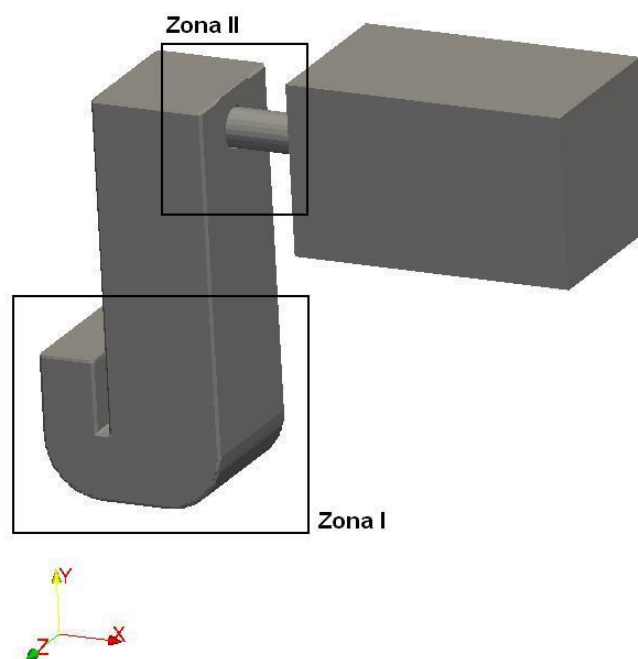


Fig. 5.3.4 – Secondo modello geometrico – Zone di particolare interesse per il mesh

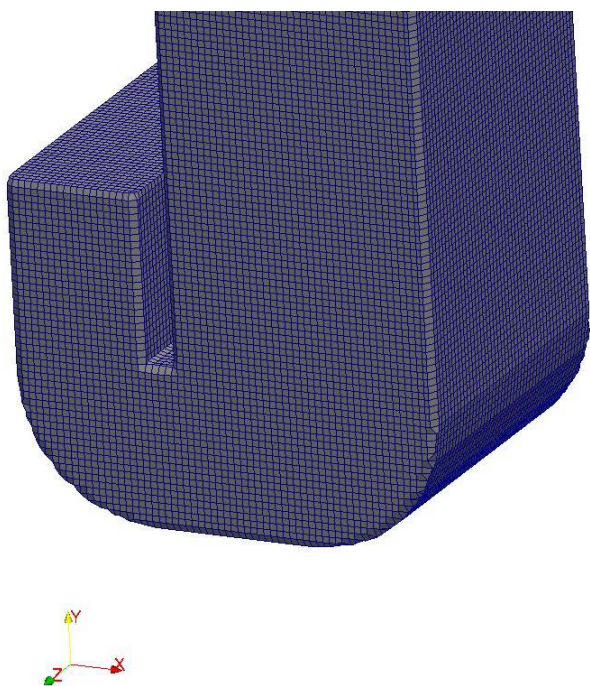


Fig. 5.3.5 – Mesh secondo modello – Zona I

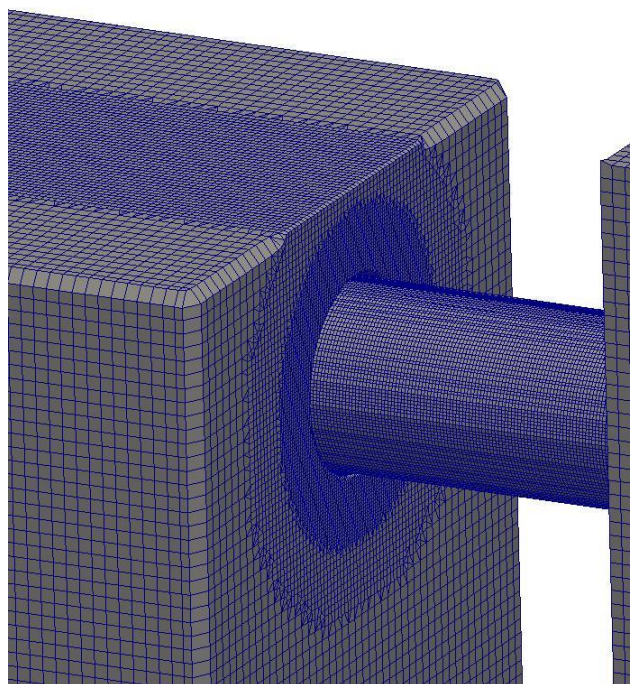


Fig. 5.3.6 – Mesh secondo modello – Zona II

Il mesh del secondo modello così realizzato è costituito da un totale di circa 2.9 milioni di celle.



## 6 Risultati simulazioni CFD con forzanti sinusoidali

In questo paragrafo sono riportati i risultati delle prime quattro simulazioni CFD ottenuti applicando ai due nuovi modelli le sole forzanti sinusoidali. Di seguito si riportano le caratteristiche delle quattro simulazioni:

- primo modello con prima forzante incidente con un angolo  $\alpha = 0^\circ$ ;
- primo modello con prima forzante incidente con un angolo  $\alpha = 45^\circ$ ;
- primo modello con seconda forzante incidente con un angolo  $\alpha = 0^\circ$ ;
- secondo modello con prima forzante incidente con un angolo  $\alpha = 0^\circ$ .

Questi primi quattro calcoli sono stati eseguiti simulando, per ognuno, un tempo corrispondente a dieci cicli d'onda, questo è stato fatto per ottenere un fenomeno ciclico stabilizzato verso la fine delle simulazioni stesse.

### 6.1 Primo modello – prima forzante con angolo di incidenza $\alpha = 0^\circ$

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti dalla simulazione CFD del primo modello con la prima forzante di tipo sinusoidale ( $H_0 = 0.438\text{m}$ ,  $T_0 = 2.75\text{s}$  e  $L_0 = 9.5\text{m}$ ) incidente con un angolo  $\alpha = 0^\circ$ .

In considerazione sono stati presi gli ultimi due periodi d'onda simulati, corrispondenti al nono e al decimo e quindi dal tempo  $t = 22.0\text{s}$  al tempo  $t = 27.5\text{s}$ .

Nella figura 6.1.1 è riportato il confronto tra il livello dell'onda, corrispondente alla pressione p-rgh imposta sulle superfici di ingresso/uscita dell'acqua, ed il livello dell'acqua all'interno della camera. Il livello all'interno della camera è valutato, in riferimento alla coordinata x (figura 5.1.1), al centro della stessa.

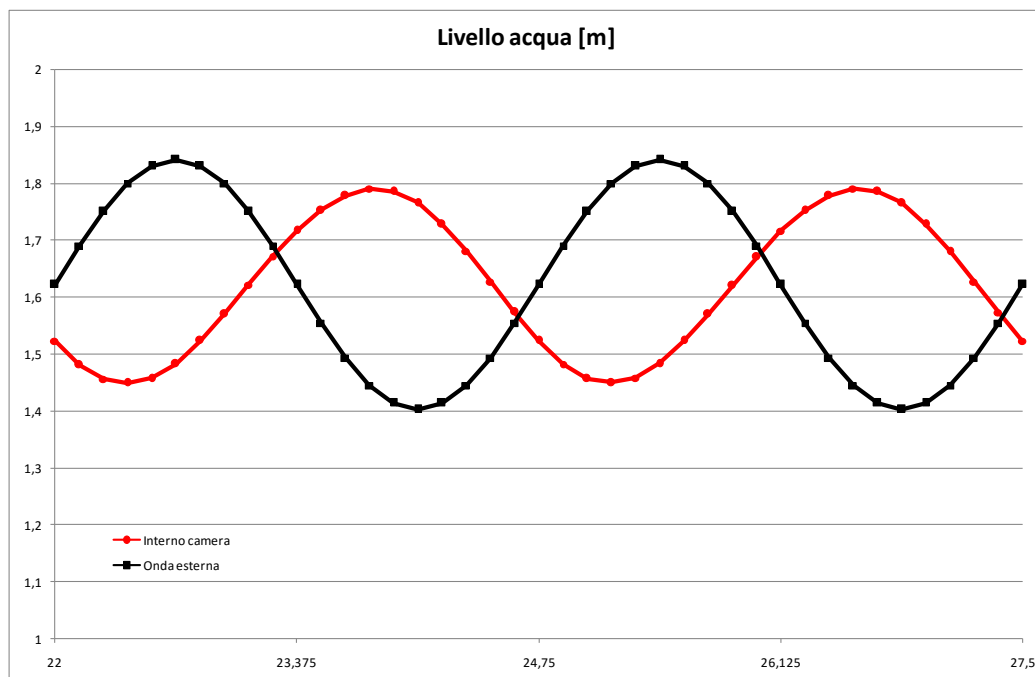


Fig. 6.1.1 – Confronto livello onda e livello acqua all'interno della camera

Nella figura 6.1.2 è riportato l'andamento della componente della velocità nella direzione x ( $U_x$ ), valutata al centro del tubo turbina ad una distanza dalla sezione di uscita di 0.50 m.

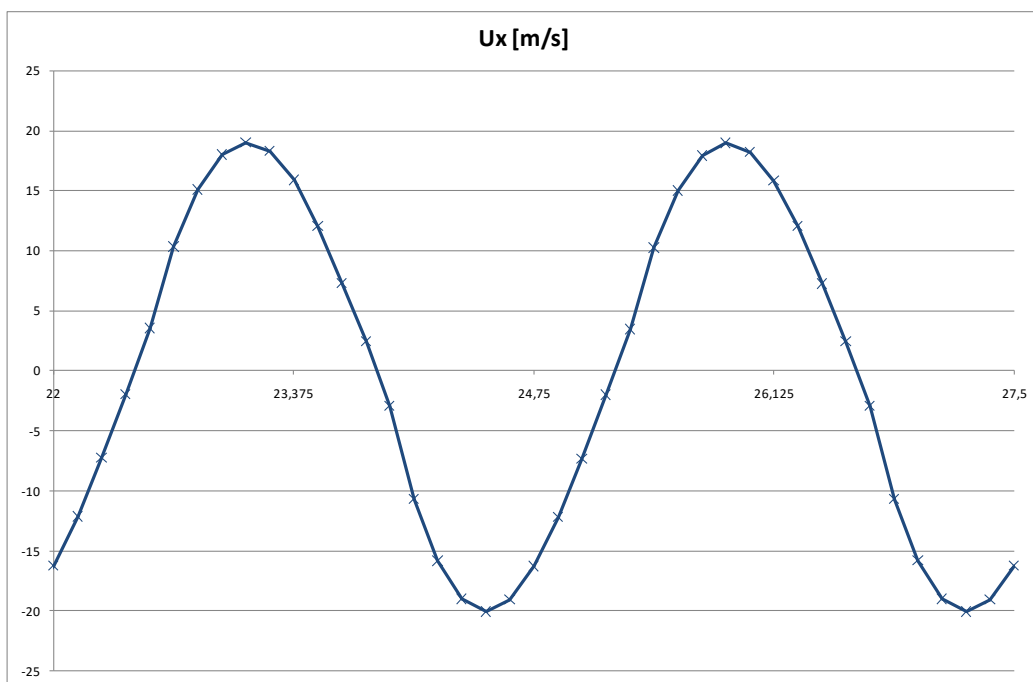


Fig. 6.1.2 – Andamento della componente Ux della velocità dell’aria al centro del tubo turbina.

Nelle figure 6.1.3, 6.1.4, 6.1.5 sono riportati rispettivamente il livello dell’acqua, l’andamento della velocità dell’acqua e l’andamento della velocità dell’aria in una sezione verticale (piano x-y) passante per l’asse del tubo turbina, e nella figura 6.1.6 è riportato l’andamento della velocità dell’aria in una sezione orizzontale (piano x-z) passante per l’asse del tubo turbina, al tempo t = 25.85s.

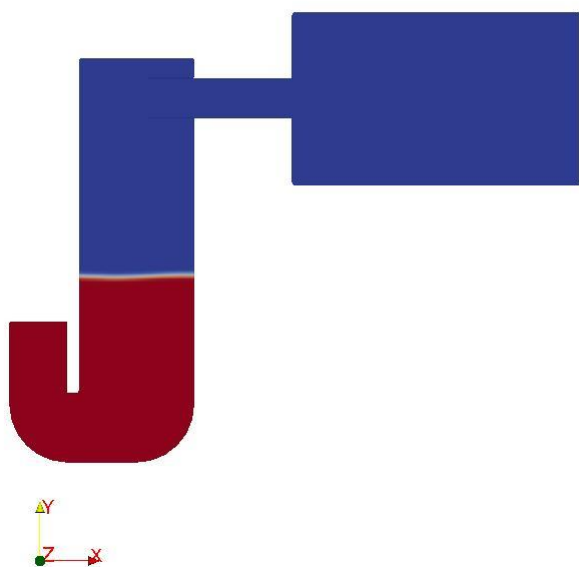


Fig. 6.1.3 – Livello dell’acqua al tempo t = 25.85s (sez. piano x-y)

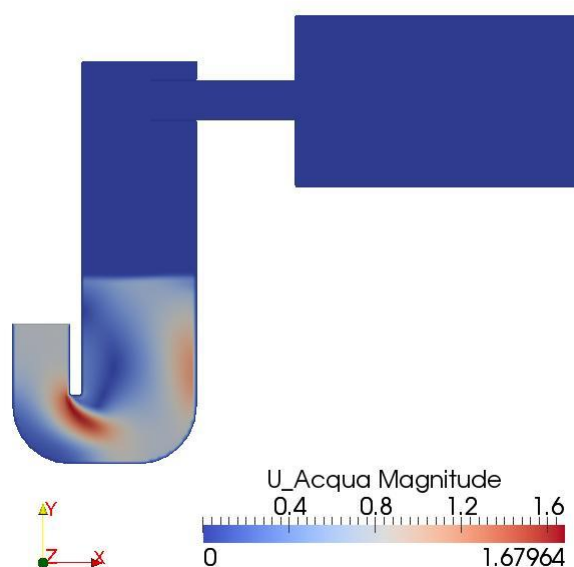


Fig. 6.1.4 – Andamento della velocità dell’acqua al tempo t = 25.85s (sez. piano x-y)

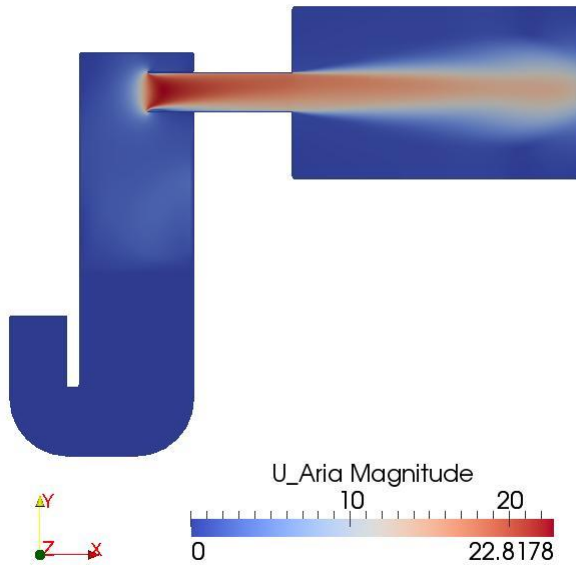


Fig. 6.1.5 – Andamento della velocità dell’aria al tempo  $t = 25.85s$  (sez. piano x-y)

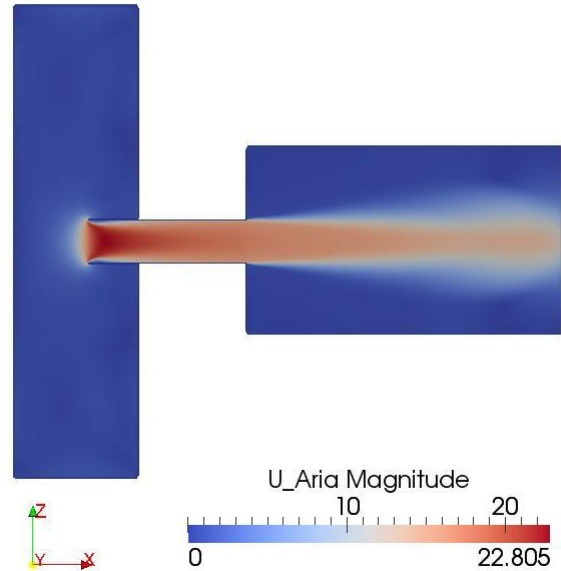


Fig. 6.1.6 – Andamento della velocità dell’aria al tempo  $t = 25.85s$  (sez. piano x-z)

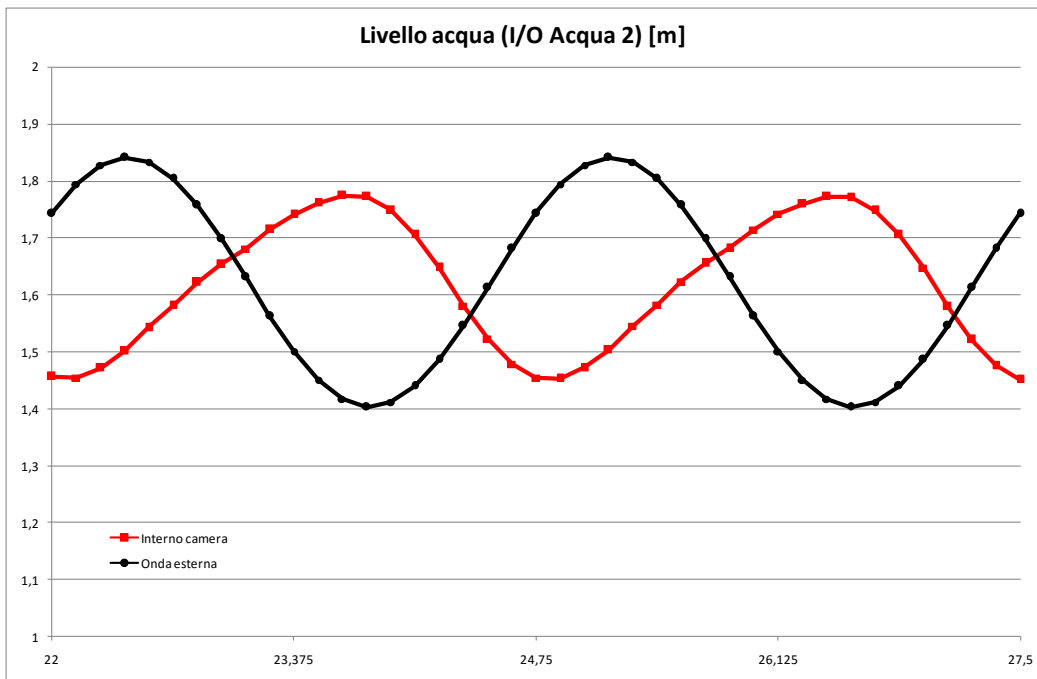
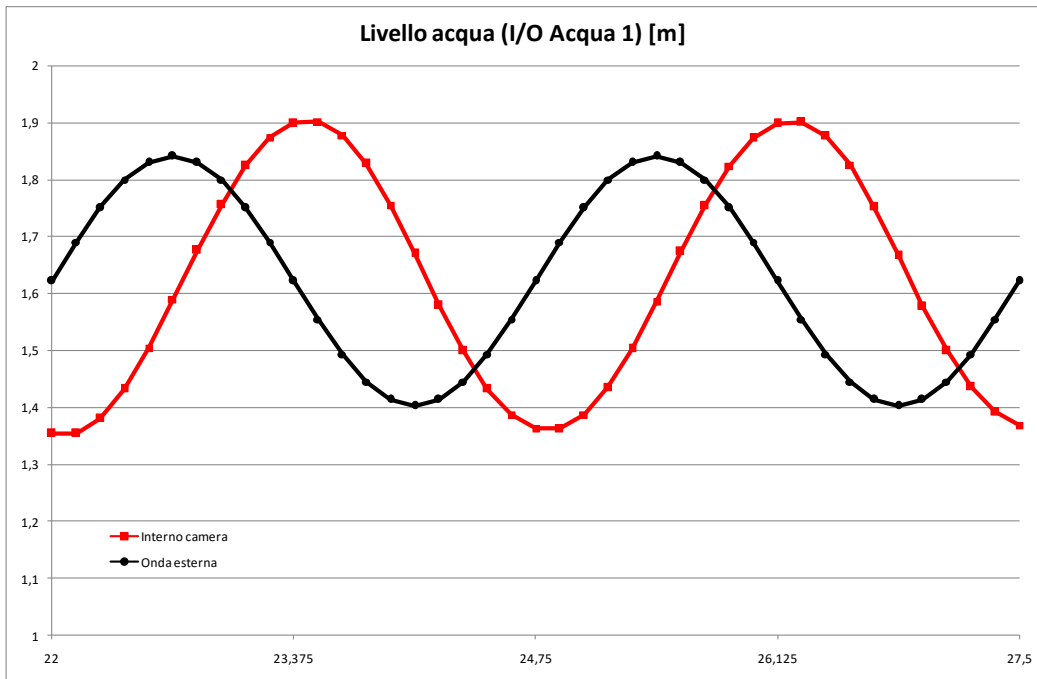
In questa prima simulazione si nota un certo sfasamento tra l’andamento dell’onda forzante esterna e l’andamento del livello dell’acqua all’interno della camera. Inoltre l’ampiezza dell’oscillazione dell’acqua all’interno della camera risulta inferiore a quella della forzante.

## 6.2 Primo modello – prima forzante con angolo di incidenza $\alpha = 45^\circ$

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti dalla simulazione CFD del primo modello con la prima forzante di tipo sinusoidale ( $H_0 = 0.438m$ ,  $T_0 = 2.75s$  e  $L_0 = 9.5m$ ) incidente con un angolo  $\alpha = 45^\circ$ .

In considerazione sono stati presi gli ultimi due periodi d’onda simulati, corrispondenti al nono e al decimo e quindi dal tempo  $t = 22.0s$  al tempo  $t = 27.5s$ .

Nella figura 6.2.1 è riportato il confronto tra i livelli dell’onda, corrispondenti alle pressioni p-rgh imposte sulle tre superfici di ingresso/uscita dell’acqua, valori differenti tra loro in considerazione dello sfasamento delle onde incidenti, ed i livelli dell’acqua all’interno della camera, valutati, in riferimento alla coordinata z (figura 5.1.1), in corrispondenza del centro delle superfici di ingresso/uscita dell’acqua. Il livello all’interno della camera è valutato, in riferimento alla coordinata x (figura 5.1.1), al centro della stessa.





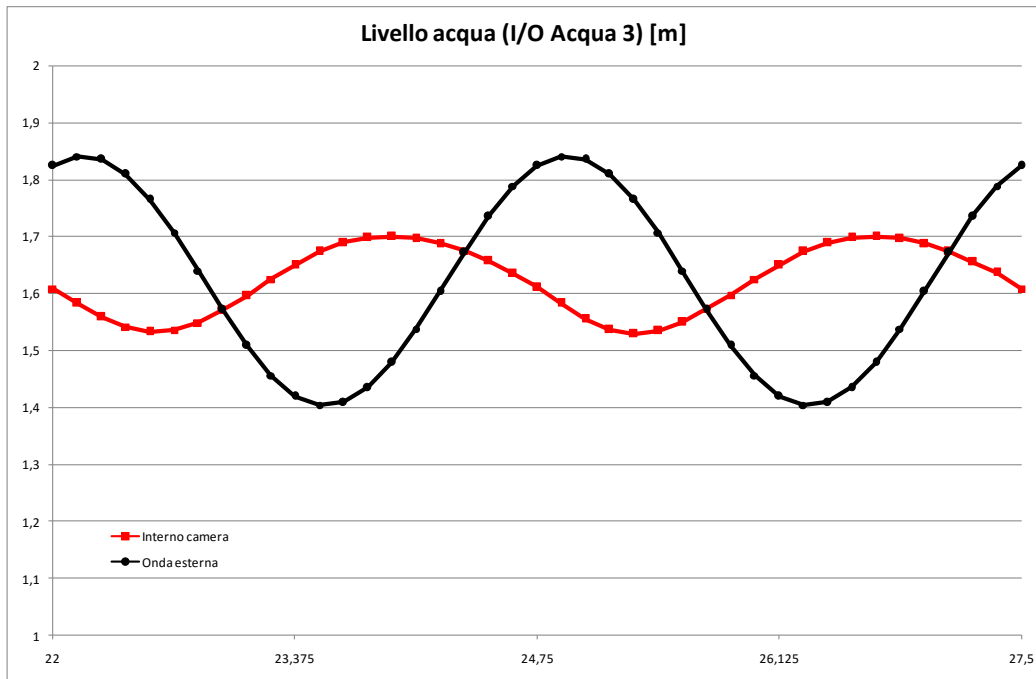


Fig. 6.2.1 – Confronto livelli onda e livelli acqua all'interno della camera

Nella figura 6.2.2 è riportato l'andamento della componente della velocità nella direzione x ( $U_x$ ), valutata al centro del tubo turbina ad una distanza dalla sezione di uscita di 0.50 m.

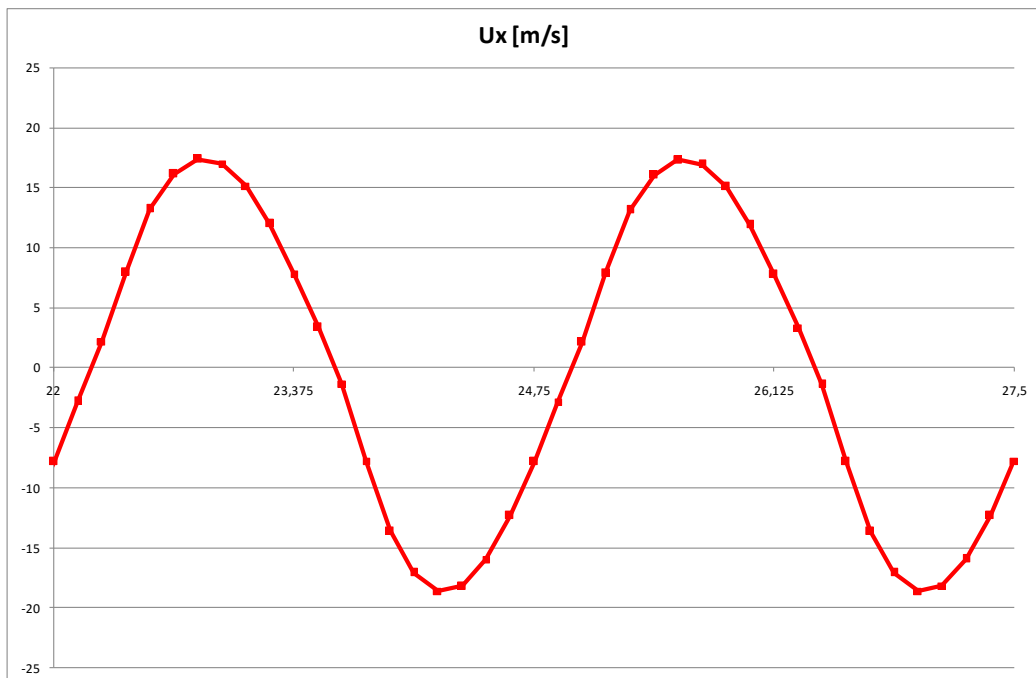


Fig. 6.2.2 – Andamento della componente  $U_x$  della velocità dell'aria al centro del tubo turbina.

Nelle figure 6.2.3 e 6.2.4 è riportato il livello dell'acqua rispettivamente in una sezione verticale (piano x-y) passante per l'asse del tubo turbina ed in una sezione verticale (piano y-z) passante per il centro della camera interna, al tempo  $t = 25.575s$ .

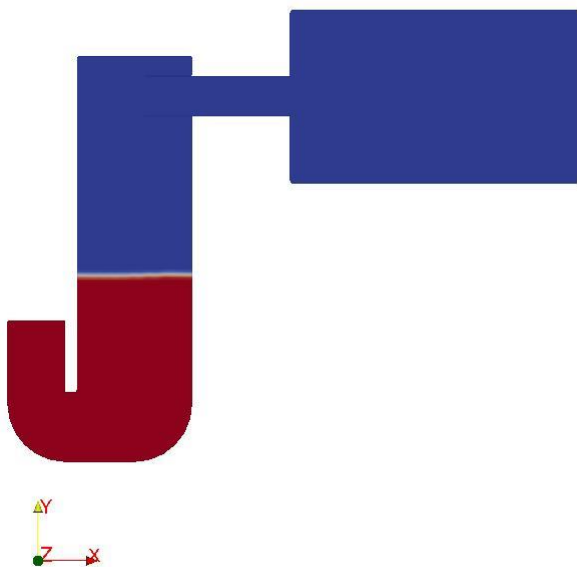


Fig. 6.2.3 – Livello dell'acqua al tempo  $t = 25.575s$  (sez. piano x-y)

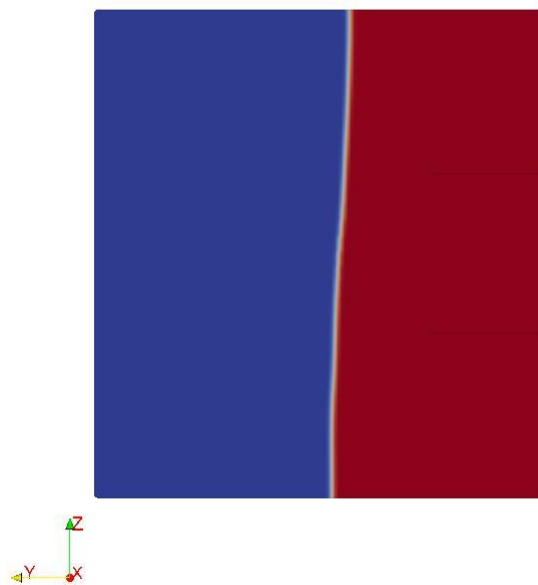


Fig. 6.2.4 – Livello dell'acqua al tempo  $t = 25.575s$  (sez. piano y-z)

Nelle figure 6.2.5 e 6.2.6 è riportato l'andamento della velocità dell'acqua rispettivamente in una sezione verticale (piano x-y) passante per l'asse del tubo turbina, e in una sezione verticale (piano y-z) passante per il centro della camera interna, al tempo  $t = 25.575s$ .

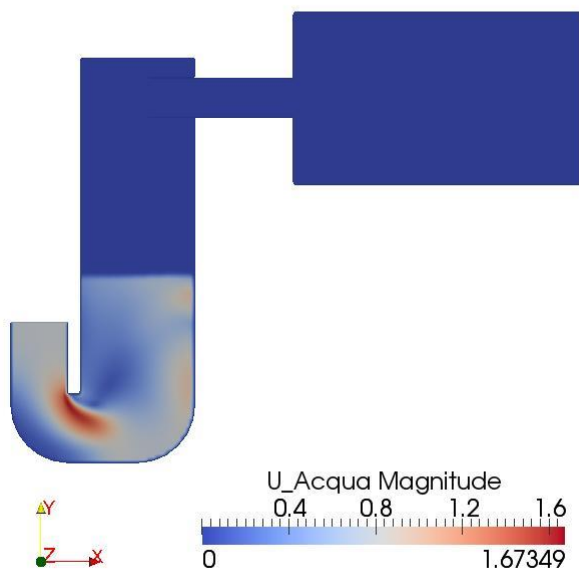


Fig. 6.2.5 – Andamento della velocità dell'acqua al tempo  $t = 25.575s$  (sez. piano x-y)

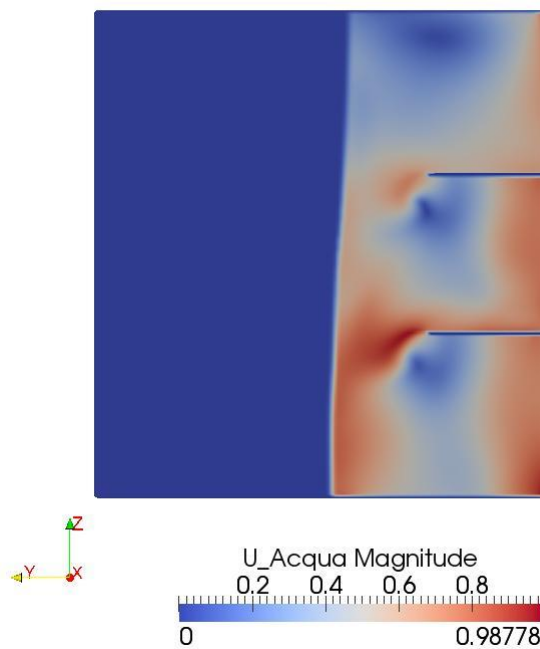


Fig. 6.2.6 – Andamento della velocità dell'acqua al tempo  $t = 25.575s$  (sez. piano y-z)

Nella figura 6.2.7 è riportato l'andamento della velocità dell'aria in una sezione verticale (piano x-y) passante per l'asse del tubo turbina, e nella figura 6.2.8 è riportato l'andamento della velocità dell'aria in una sezione orizzontale (piano x-z) passante per l'asse del tubo turbina, al tempo  $t = 25.575s$ .

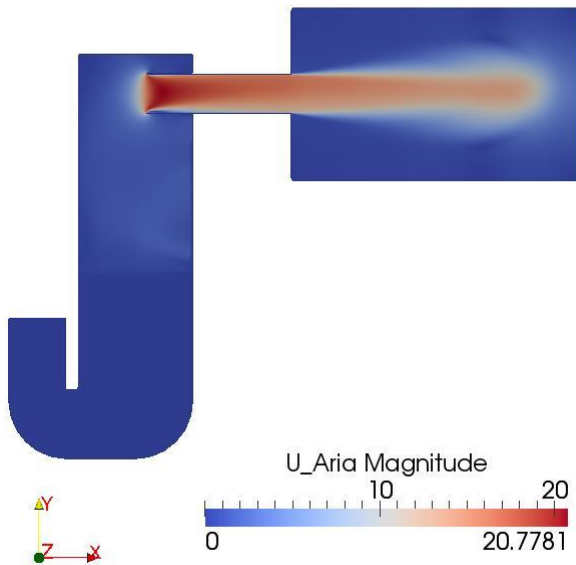


Fig. 6.2.7 – Andamento della velocità dell'aria al tempo  $t = 25.575s$  (sez. piano x-y)

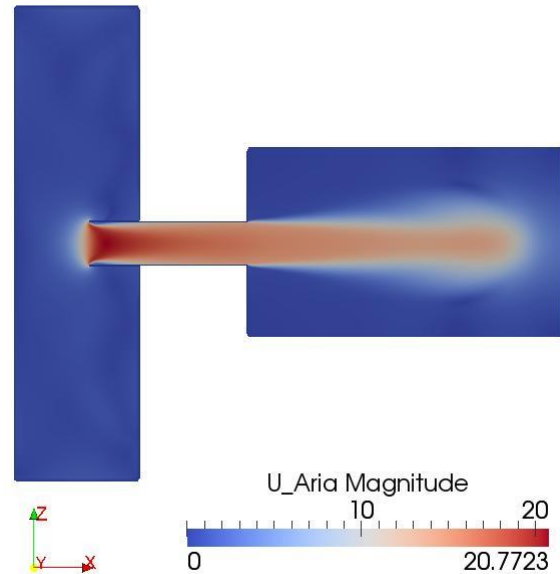


Fig. 6.2.8 – Andamento della velocità dell'aria al tempo  $t = 25.575s$  (sez piano x-z)

In questa simulazione si nota la presenza all'interno della camera dell'instaurarsi di fenomeni di vorticosità nel piano y-z, che comportano una leggera diminuzione delle velocità dell'aria all'interno del tubo turbina rispetto al caso precedente.

### 6.3 Primo modello – seconda forzante con angolo di incidenza $\alpha = 0^\circ$

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti dalla simulazione CFD del primo modello con la seconda forzante di tipo sinusoidale ( $H_0 = 0.232m$ ,  $T_0 = 7.10s$  e  $L_0 = 28.3m$ ) incidente con un angolo  $\alpha = 0^\circ$ .

In considerazione sono stati presi gli ultimi due periodi d'onda simulati, corrispondenti al nono e al decimo e quindi dal tempo  $t = 56.8s$  al tempo  $t = 71.0s$ .

Nella figura 6.3.1 è riportato il confronto tra il livello dell'onda, corrispondente alla pressione p-rgh imposta sulle superfici di ingresso/uscita dell'acqua, ed il livello dell'acqua all'interno della camera. Il livello all'interno della camera è valutato, in riferimento alla coordinata x (figura 5.1.1), al centro della stessa.

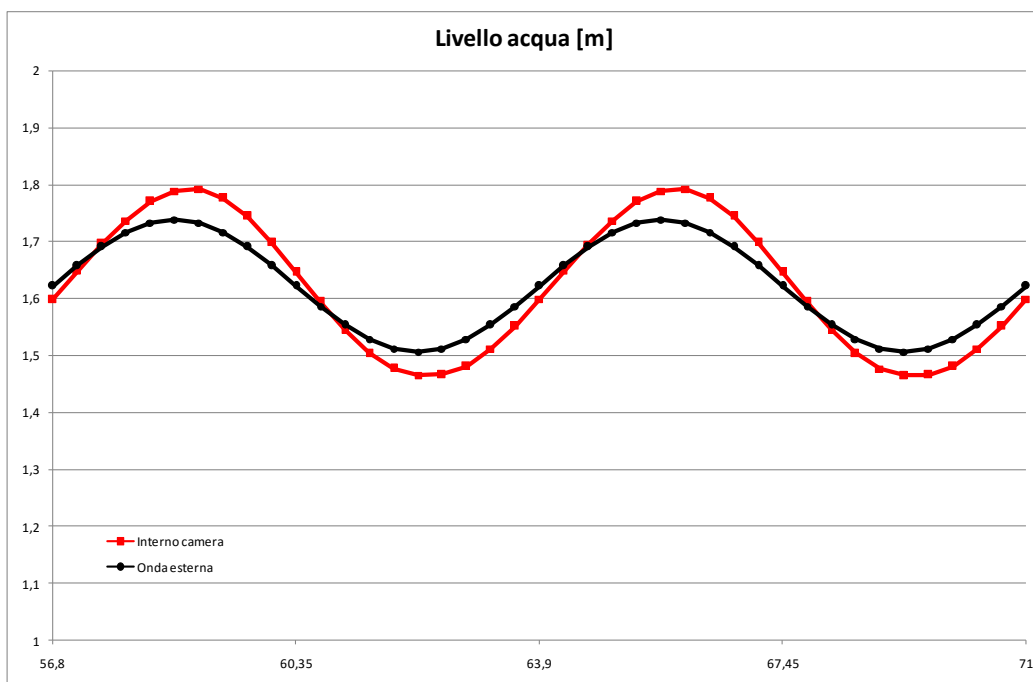


Fig. 6.3.1 – Confronto livello onda e livello acqua all’interno della camera

Nella figura 6.3.2 è riportato l’andamento della componente della velocità nella direzione x ( $U_x$ ), valutata al centro del tubo turbina ad una distanza dalla sezione di uscita di 0.50 m.

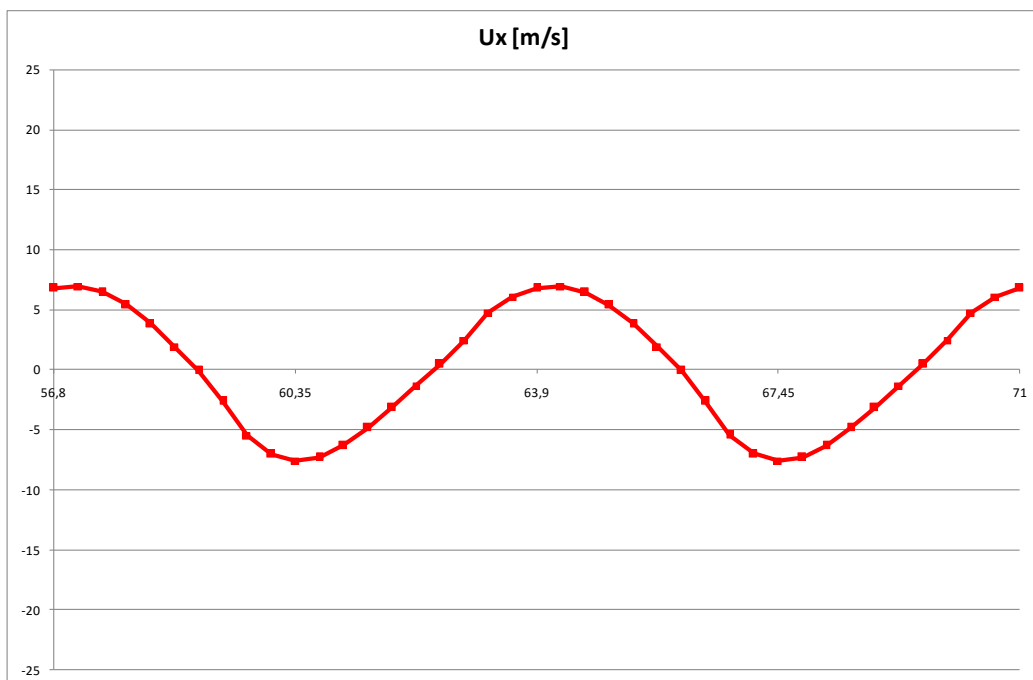


Fig. 6.3.2 – Andamento della componente  $U_x$  della velocità dell’aria al centro del tubo turbina.

Nelle figure 6.3.3, 6.3.4, 6.3.5 sono riportati rispettivamente il livello dell’acqua, l’andamento della velocità dell’acqua e l’andamento della velocità dell’aria in una sezione verticale (piano x-y) passante per l’asse del tubo turbina, e nella figura 6.3.6 è riportato l’andamento della velocità dell’aria in una sezione orizzontale (piano x-z) passante per l’asse del tubo turbina, al tempo  $t = 64.255s$ .

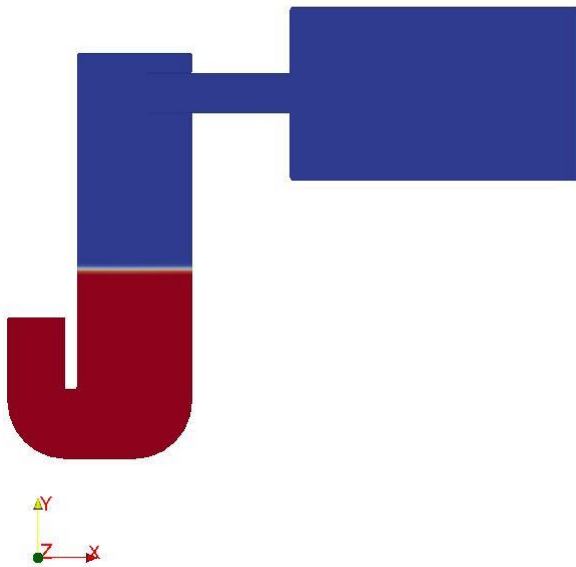


Fig. 6.3.3 – Livello dell’acqua al tempo  $t = 64.255s$  (sez. piano x-y)

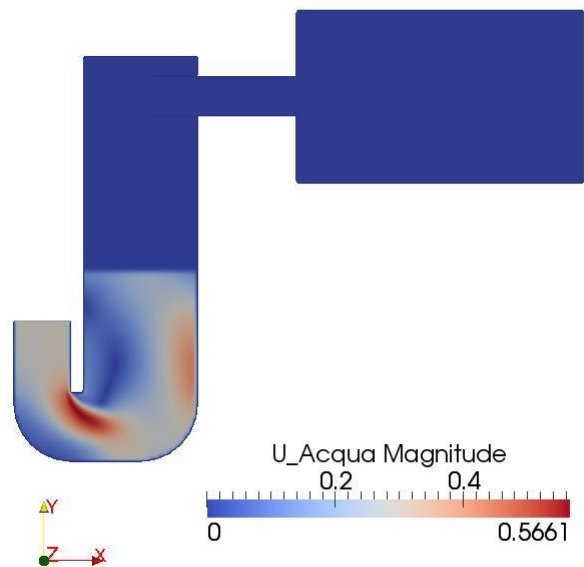


Fig. 6.3.4 – Andamento della velocità dell’acqua al tempo  $t = 64.255s$  (sez. piano x-y)

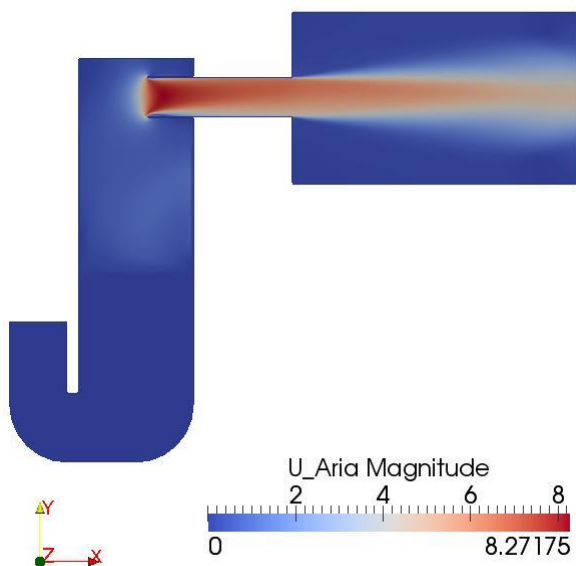


Fig. 6.3.5 – Andamento della velocità dell’aria al tempo  $t = 64.255s$  (sez. piano x-y)

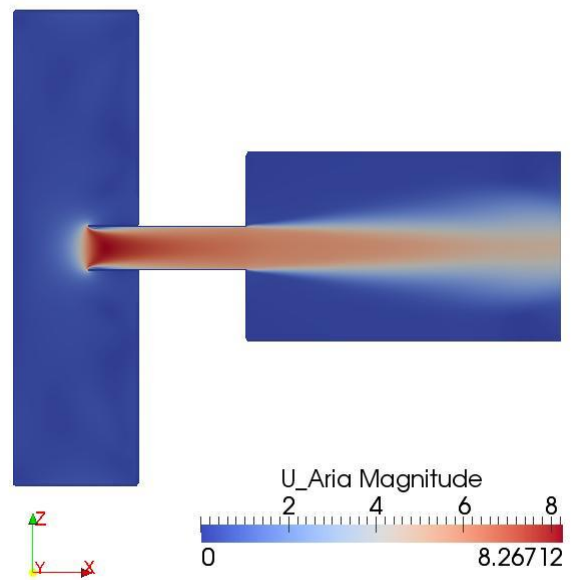


Fig. 6.3.6 – Andamento della velocità dell’aria al tempo  $t = 64.255s$  (sez. piano x-z)

In questa simulazione si nota, confrontandola con la prima, un comportamento differente: le evoluzioni, l’andamento dell’onda forzante e l’andamento del livello dell’acqua all’interno della camera, risultano quasi in fase. Inoltre l’ampiezza dell’evoluzione dell’acqua all’interno della camera risulta superiore all’ampiezza dell’onda forzante.

### 6.4 Secondo modello – prima forzante con angolo di incidenza $\alpha = 0^\circ$

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti dalla simulazione CFD del secondo modello con la prima forzante di tipo sinusoidale ( $H_0 = 0.438\text{m}$ ,  $T_0 = 2.75\text{s}$  e  $L_0 = 9.5\text{m}$ ) incidente con un angolo  $\alpha = 0^\circ$ .

In considerazione sono stati presi gli ultimi due periodi d’onda simulati, corrispondenti al nono e al decimo e quindi dal tempo  $t = 22.0\text{s}$  al tempo  $t = 27.5\text{s}$ .

Nella figura 6.4.1 è riportato il confronto tra il livello dell’onda, corrispondente alla pressione p-rgh imposta sulla superficie di ingresso/uscita dell’acqua, ed il livello dell’acqua all’interno della camera. Il livello all’interno della camera è valutato, in riferimento alla coordinata x (figura 5.1.1), al centro della stessa.

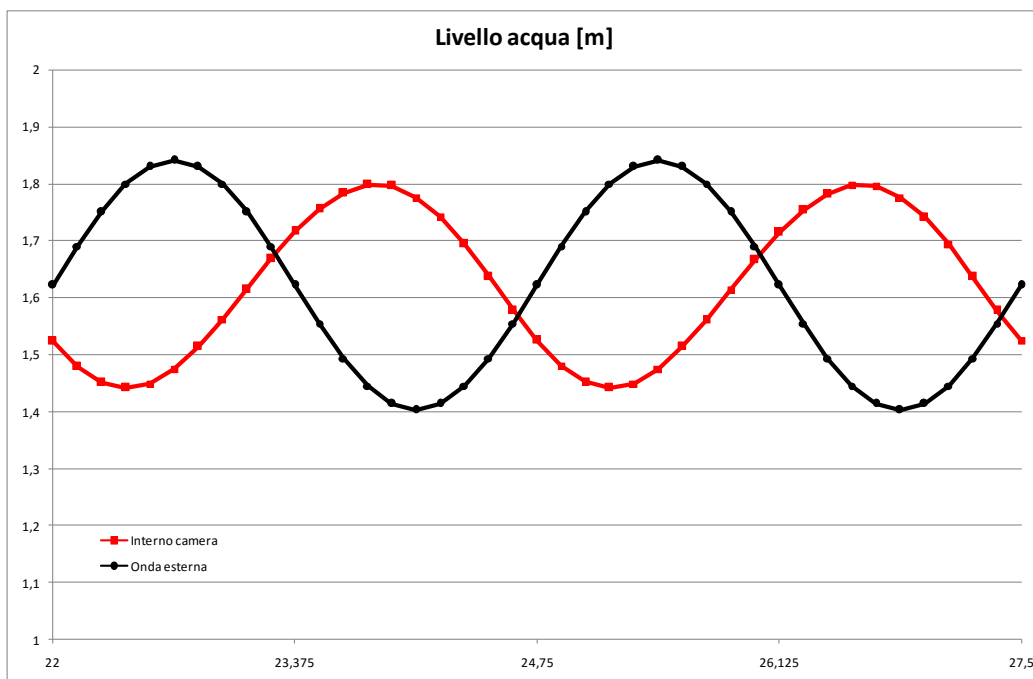


Fig. 6.4.1 – Confronto livello onda e livello acqua all’interno della camera

Nella figura 6.4.2 è riportato l’andamento della componente della velocità nella direzione x ( $U_x$ ), valutata al centro del tubo turbina ad una distanza dalla sezione di uscita di 0.50 m.

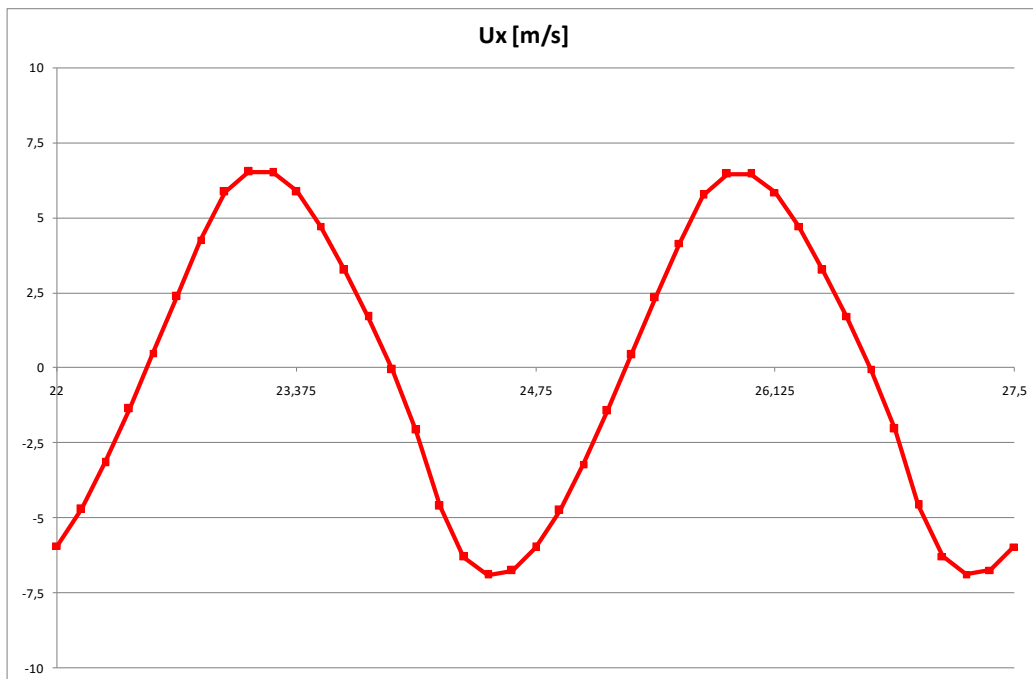


Fig. 6.4.2 – Andamento della componente Ux della velocità dell’aria al centro del tubo turbina.

Nelle figure 6.4.3, 6.4.4, 6.4.5 sono riportati rispettivamente il livello dell’acqua, l’andamento della velocità dell’acqua e l’andamento della velocità dell’aria in una sezione verticale (piano x-y) passante per l’asse del tubo turbina, e nella figura 6.4.6 è riportato l’andamento della velocità dell’aria in una sezione orizzontale (piano x-z) passante per l’asse del tubo turbina, al tempo  $t = 25.9875s$ .

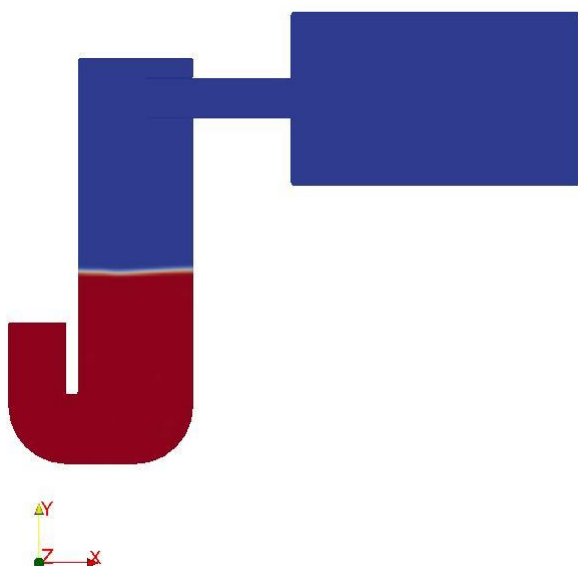


Fig. 6.4.3 – Livello dell’acqua al tempo  $t = 25.9875s$  (sez. piano x-y)

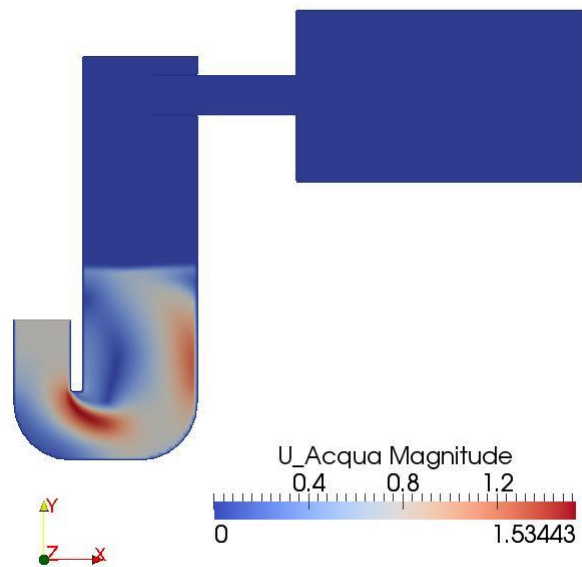


Fig. 6.4.4 – Andamento della velocità dell’acqua al tempo  $t = 25.9875s$  (sez. piano x-y)

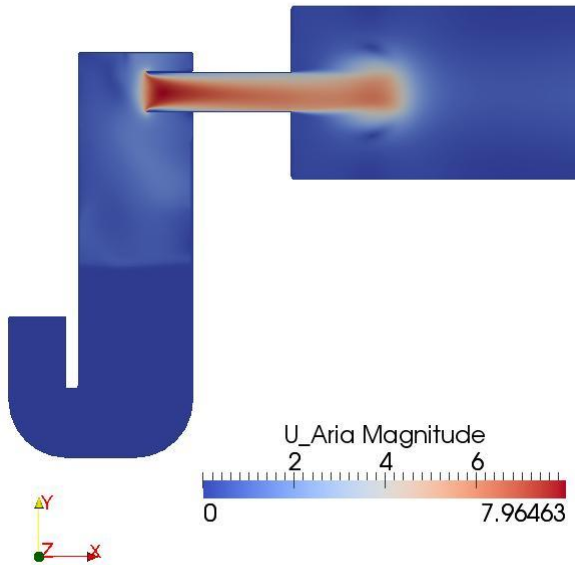


Fig. 6.4.5 – Andamento della velocità dell'aria al tempo  $t = 25.9875s$  (sez. piano x-y)

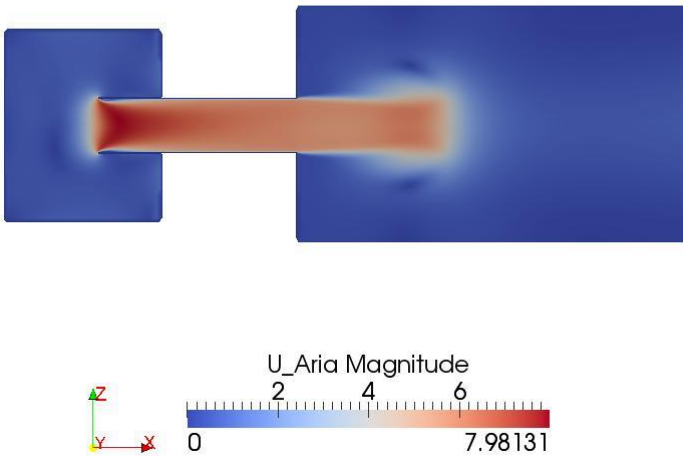


Fig. 6.4.6 – Andamento della velocità dell'aria al tempo  $t = 25.9875s$  (sez. piano x-z)

In questa quarta simulazione si nota, come nella prima simulazione, un certo sfasamento tra l'andamento dell'onda forzante esterna e l'andamento del livello dell'acqua all'interno della camera. Inoltre, anche in questo caso, l'ampiezza dell'oscillazione dell'acqua all'interno della camera risulta inferiore a quella della forzante.



## 7 Confronto simulazione CFD – dati sperimentali

In questo capitolo viene descritta l'attività di confronto tra i risultati sperimentali e quelli ottenuti dalla simulazione CFD del sistema.

Partendo da una prova sperimentale, condotta presso il laboratorio NOEL dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria, si è effettuata una simulazione CFD utilizzando, come forzante, il dato di pressione registrato sperimentalmente sulla superficie di ingresso/uscita dell'acqua di mare. Successivamente sono stati confrontati i dati sperimentali con i risultati ottenuti dalla simulazione CFD.

### 7.1 Dati sperimentali

La prova sperimentale considerata è stata condotta utilizzando il sistema REWEC3-GV con le paratie interne inserite. Questo corrisponde al secondo modello CFD sviluppato (figura 5.1.5).

I dati sperimentali, utilizzati per il confronto con la simulazione CFD sono la registrazione dell'evoluzione della pressione in corrispondenza della superficie di ingresso/uscita dell'acqua di mare, che quindi corrisponde alla forzante da inserire nella simulazione, e la registrazione dell'evoluzione del livello dell'acqua all'interno della camera.

Nella figura 7.1.1 è riportato l'andamento nel tempo della pressione registrata dal trasduttore di pressione posizionato sulla superficie di ingresso/uscita dell'acqua di mare.

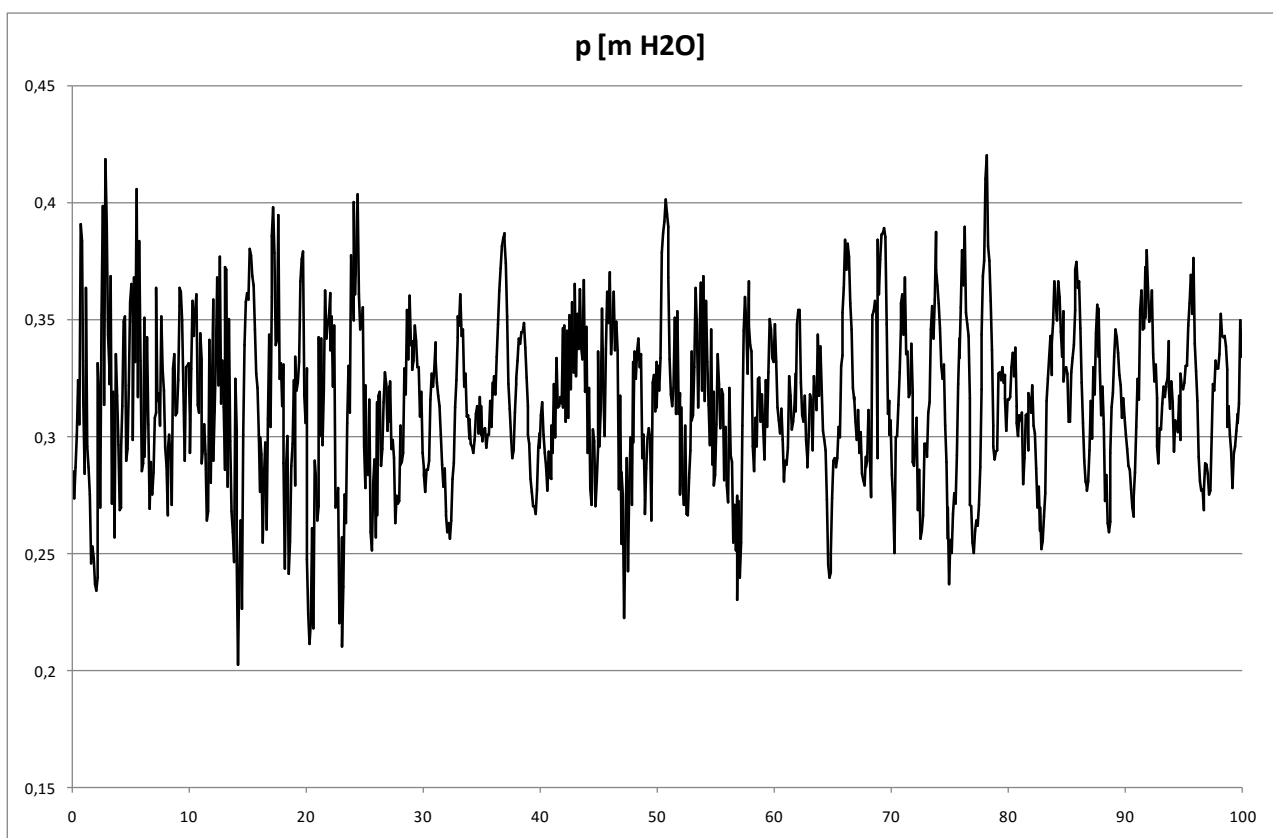


Fig. 7.1.1 – Andamento nel tempo di p registrata dal trasduttore di pressione sulla superficie di In/Out dell'acqua di mare

Nella figura 7.1.2 è riportato l'andamento del livello dell'acqua all'interno della camera, registrato dal misuratore ad ultrasuoni, misurato come distanza della superficie dell'acqua dalla copertura della camera interna.

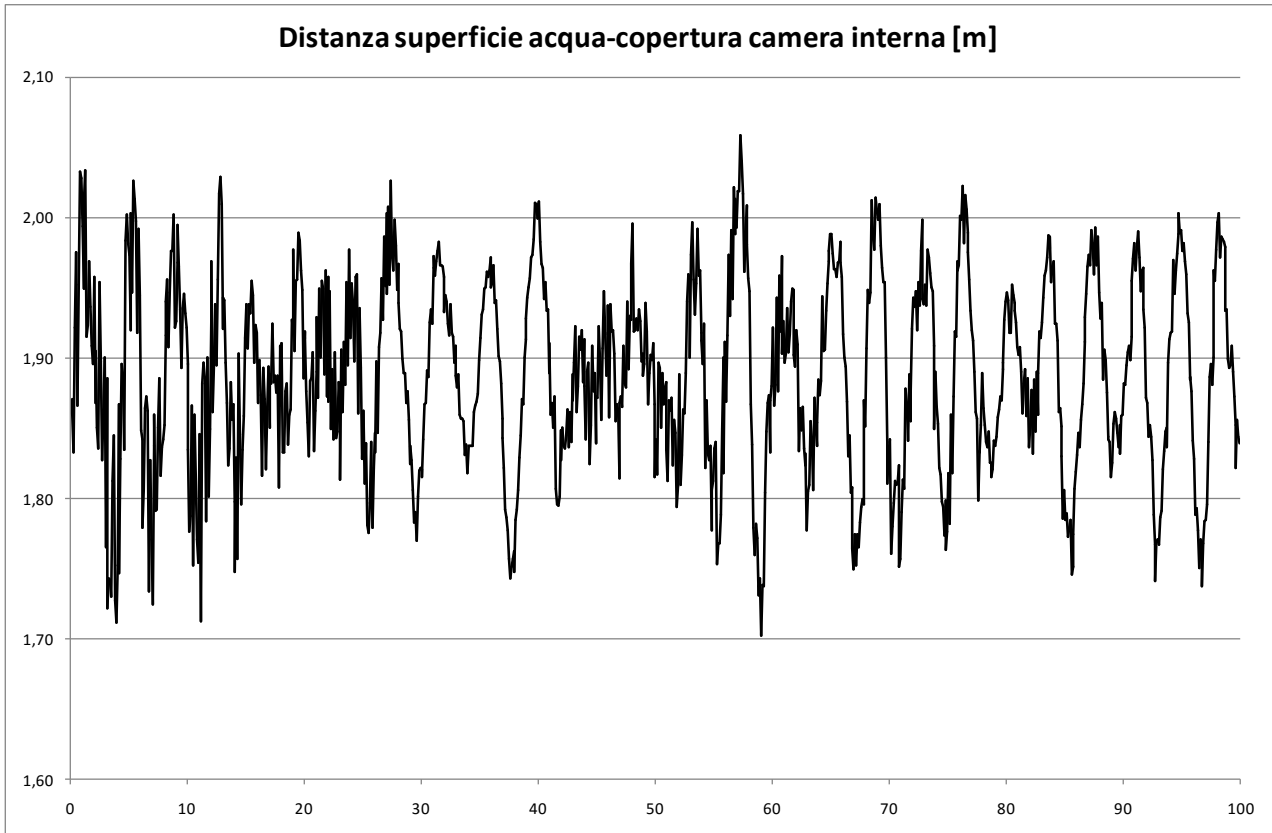


Fig. 7.1.2 – Andamento nel tempo del livello dell'acqua all'interno della camera registrato dal misuratore ad ultrasuoni

## 7.2 Simulazioni CFD

Nel presente capitolo sono riportati i risultati ottenuti dalla simulazione CFD utilizzando il secondo modello sviluppato e simulando le condizioni sperimentali riportate nel precedente paragrafo 7.1.

La prova sperimentale ha fornito l'andamento nel tempo della pressione sulla superficie di ingresso/uscita dell'acqua. Questo dato è stato utilizzato per ottenere la forzante per la simulazione CFD.

Come ampiamente descritto nei documenti precedenti<sup>[1][2][3]</sup>, nel modello numerico la forzante è introdotta come evoluzione nel tempo della variabile p-rgh, quindi partendo dalla pressione p, ottenuta sperimentalmente, si è calcolato l'andamento nel tempo della variabile p-rgh:

$$p\text{-rgh} = P_{\text{sperimentale}} - (\rho_{\text{H}_2\text{O mare}} \times g \times h) \quad \text{Pa}$$

dove  $\rho_{\text{H}_2\text{O mare}}$  è la densità dell'acqua di mare, g è l'accelerazione di gravità e h è la quota del trasduttore di pressione rispetto alla base del modello.

Nella figura 7.2.1 è riportato l'andamento di p-rgh, in Pa, sulla superficie di ingresso/uscita dell'acqua così ottenuto, per chiarezza sono riportati solo i valori per gli ultimi 10s di registrazione (tempo t da 90s a 100s).

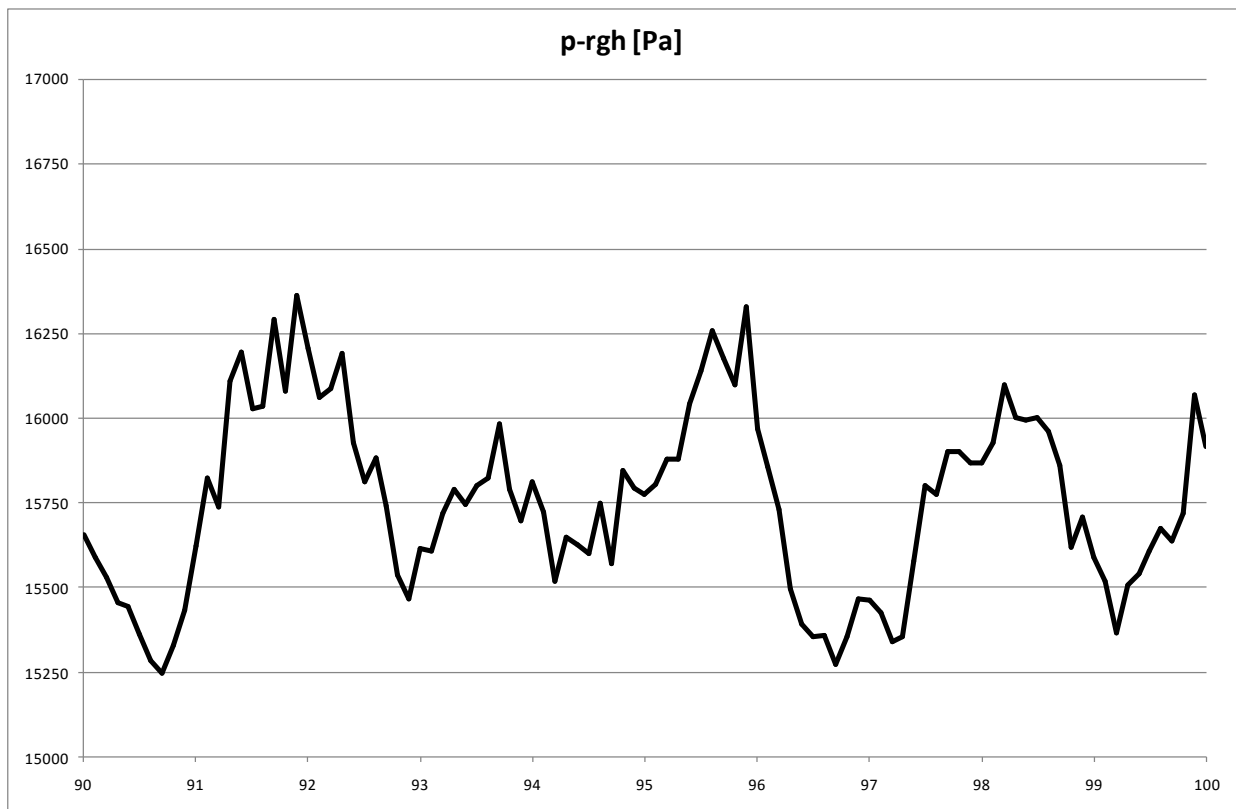


Fig. 7.2.1 – Andamento di p-rgh

Nella figura 7.2.2 è riportato l'andamento del livello dell'acqua all'interno della camera, calcolato nella simulazione CFD, nel punto centrale della camera stessa, sempre nell'intervallo di tempo da 90s a 100s.

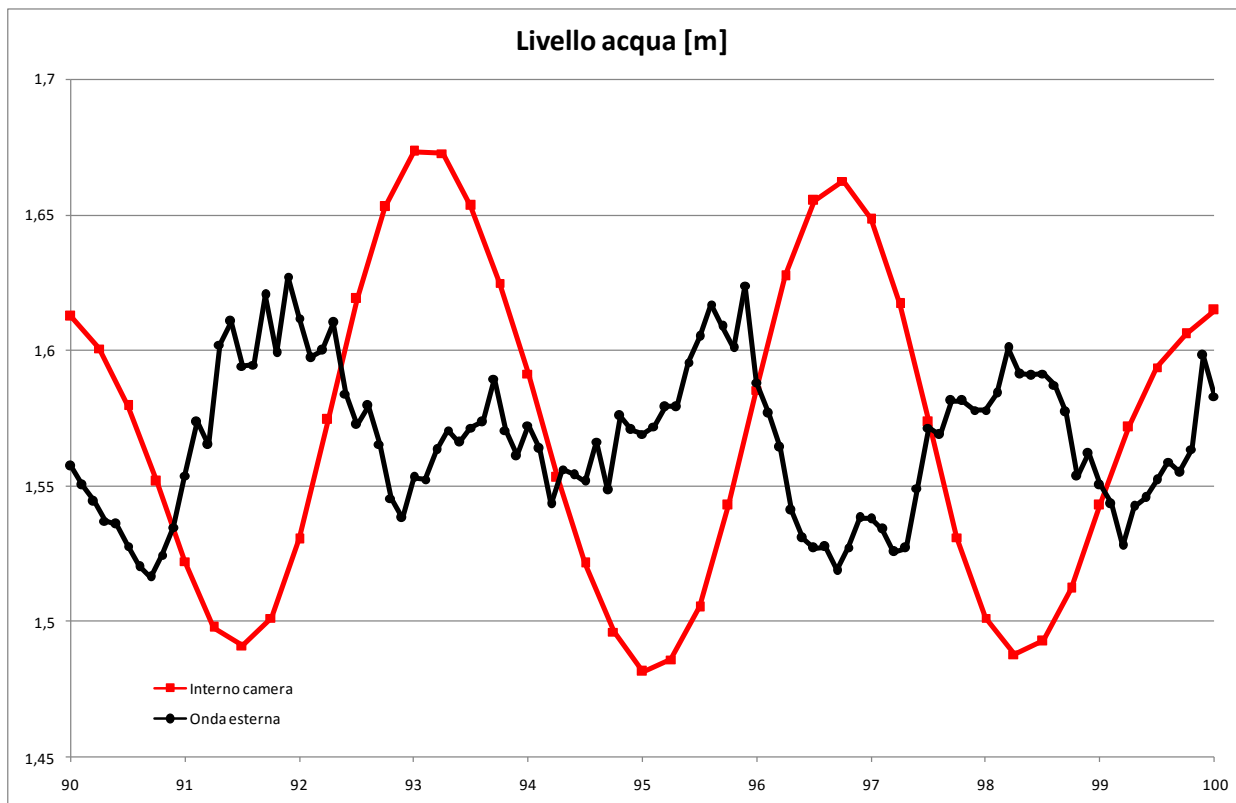


Fig. 7.2.2 – Andamento del livello dell'acqua all'interno della camera, calcolato numericamente

Nella figura 7.2.3 è riportato l'andamento della componente lungo l'asse x della velocità ( $U_x$ ) dell'aria calcolata al centro del tubo turbina, ad una distanza di 0.5 m dalla sezione di uscita dell'aria. Questo dato è stato riportato al solo scopo di mostrare il comportamento dinamico del modello numerico, ottenuto nella simulazione CFD.

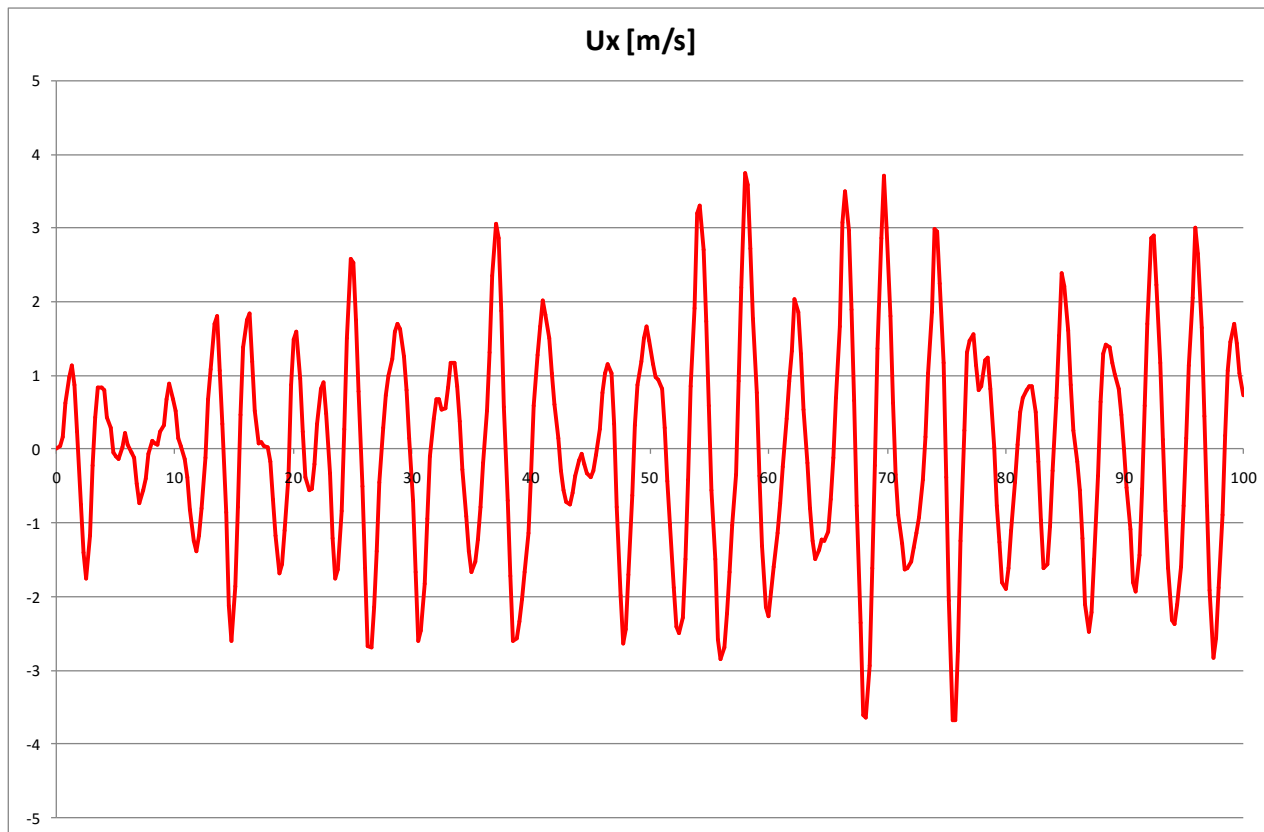


Fig. 7.2.3 – Andamento della componente lungo l'asse x della velocità ( $U_x$ ) dell'aria a 0.5 metri dalla sezione di uscita del tubo turbina

### 7.3 Confronto

Nel presente paragrafo è riportato il confronto tra il dato sperimentale disponibile e il corrispondente risultato ottenuto dalla simulazione CFD.

Nella figura 7.3.1 sono riportate le evoluzioni del livello dell'acqua all'interno della camera, quella ricavata sperimentalmente, in colore nero, e quella calcolata numericamente, in colore rosso, nell'intervallo temporale che va da 90 s a 100 s, corrispondente quindi agli ultimi 10 s di prova.

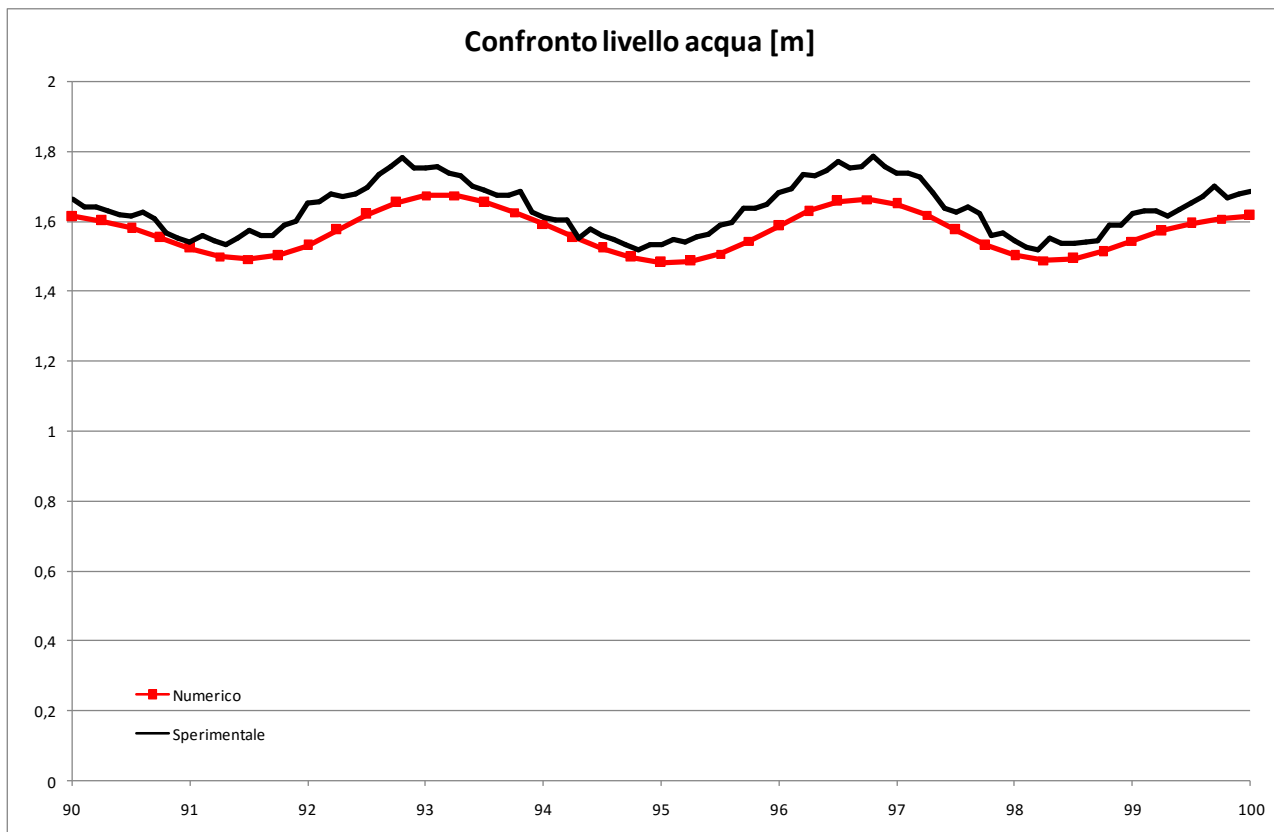


Fig. 7.3.1 – Confronto tra l'andamento nel tempo del livello dell'acqua all'interno della camera, calcolato numericamente (rosso), ed il corrispondente andamento valutato sperimentalmente (nero), nell'intervallo di tempo da 90s a 100s

Dall'analisi dei risultati si può affermare che esiste un buon accordo tra i dati sperimentali ed i dati ottenuti dai calcoli CFD sia dal punto di vista qualitativo, andamento del fenomeno di oscillazione del livello dell'acqua interna, che dal punto di vista quantitativo, ampiezza delle oscillazioni.

## PARTE B

### 8 Analisi CFD

#### 8.1 *Scopo della simulazione numerica*

Il presente report si pone come obiettivo la risoluzione di un modello numerico applicato ad un dispositivo di conversione dell'energia ondosa in energia elettrica.

Nel campo dell'ingegneria, il bisogno di prodotti sempre più innovativi e sofisticati hanno spinto la ricerca allo sviluppo di tecniche avanzate per indagare questioni di dettaglio in merito alla risposta dinamica delle strutture di interesse. E' in questo ambito di ingegneria della precisione che la simulazione numerica trova la sua collocazione.

Quando si parla di analisi numerica, si intende la risoluzione delle equazioni che governano il moto del continuo di interesse per mezzo di modelli matematici applicati che prevedono la discretizzazione del dominio, coinvolgendo il concetto di approssimazione numerica. Nell'ambito dell'ingegneria marittima, due sono le applicazioni che prevedono la risoluzione numerica delle equazioni in gioco: i metodi basati sulla Teoria Potenziale, e quelli basati sulle equazioni di Navier Stokes. Nello specifico, i modelli basati sulla risoluzione numerica delle equazioni di Navier Stokes costituiscono la base della Computational Fluid Dynamic. I vantaggi di questa tecnica, rispetto la risoluzione delle equazioni in gioco nella Teoria Potenziale, sono molteplici; in primo luogo, è richiesto un numero minore di approssimazioni; in più la fisica del sistema è descritta in modo particolarmente accurato. Tra gli svantaggi è da menzionare il tempo richiesto per la risoluzione delle equazioni. In aggiunta, quando un metodo di risoluzione numerica della fisica in gioco è coinvolto, l'attenta valutazione dei risultati ottenuti diventa cruciale. Nella situazione ottimale tale verifica coinvolge differenti livelli di indagine: il confronto tra simulazioni ottenute dal medesimo software, impostando differenti settaggi in merito ai modelli matematici utilizzati per la risoluzione delle equazioni di Navier Stokes; il confronto tra i risultati ottenuti da software differenti; il confronto tra la risoluzione numerica della fisica del problema e quella teorica dei modelli che la descrivono; il confronto tra i dati numerici e quelli sperimentali ottenuti a valle di una appropriata attività sperimentale, che riproduca il dominio risolto con la CFD. Quando queste attività sono effettuate congiuntamente, l'applicazione di un modello CFD fornisce tutti gli strumenti necessari per indagare con precisione gli aspetti più dettagliati che descrivono la fisica del problema

#### 8.2 *Software : Ansys Fluent*

Il codice numerico scelto per la presente simulazione è il modulo FLUENT della piattaforma Ansys. Il codice risolve l'approssimazione numerica delle equazioni di Navier Stokes, ovvero: conservazione della massa, del momento lineare e dell'energia. Questo set di equazioni alle differenze parziali è risolto dal software con il metodo dei volumi finiti (FVM – Finite Volume Method). In aggiunta, la presente applicazione prevede la risoluzione di un dominio multifase, data la presenza simultanea di aria ed acqua nel dominio analizzato. In letteratura, differenti tecniche sono state sviluppate per il calcolo dell'interfaccia tra le due fasi. Il codice FLUENT implementa il metodo Volume of Fluid (VOF). Questo assegna una frazione di aria od acqua in corrispondenza alla cella di interesse.

## **COSTRUZIONE DEL DOMINIO**

La costruzione del modello CFD richiede la definizione del dominio del continuo da discretizzare, la definizione della griglia, nota come *mesh* in letteratura, sui cui nodi FLUENT approssima la soluzione delle equazioni differenziali, la definizione delle condizioni al contorno (Boundary Condition) che rendono chiusa la soluzione del modello matematico, la definizione dell'input, ed infine le specifiche in merito ai settaggi degli algoritmi di risoluzione delle equazioni.

### **Geometria**

La figura 8.2.1. mostra il dominio implementato in FLUENT. Per prima approssimazione, si è scelto di modellare una geometria bidimensionale. Questa scelta permette la riduzione dei tempi computazionali di risoluzione degli algoritmi numerici. In aggiunta, la semplicità del modello permette una più immediata individuazione di errori ed incertezze legate alla definizione del dominio modellato. Si sottolinea che il modello implementato riproduce il caso di sistema U-OWC con camera aperta. Tale configurazione permette di apprezzare con maggiore precisione la risposta dinamica della componente acqua del sistema, senza includere effetti dovuti alla componente accoppiata alle fluttuazioni dell'aria all'interno della camera pneumatica. Per la presente applicazione, si è scelto di modellare un ampio dominio rappresentate il fluido antistante la struttura. Sebbene questa impostazione possa, da un lato, appesantire il dominio, essa presenta un immediato vantaggio che trova definizione nelle condizioni di input al sistema. Infatti, la sollecitazione al sistema sarà costituita dalle componenti della velocità dell'onda all'estremità del dominio. Questo approccio elimina eventuali inesattezze legate alla fisica della propagazione delle onde di mare dalla condizione di alti fondali a quella di bassi fondali.

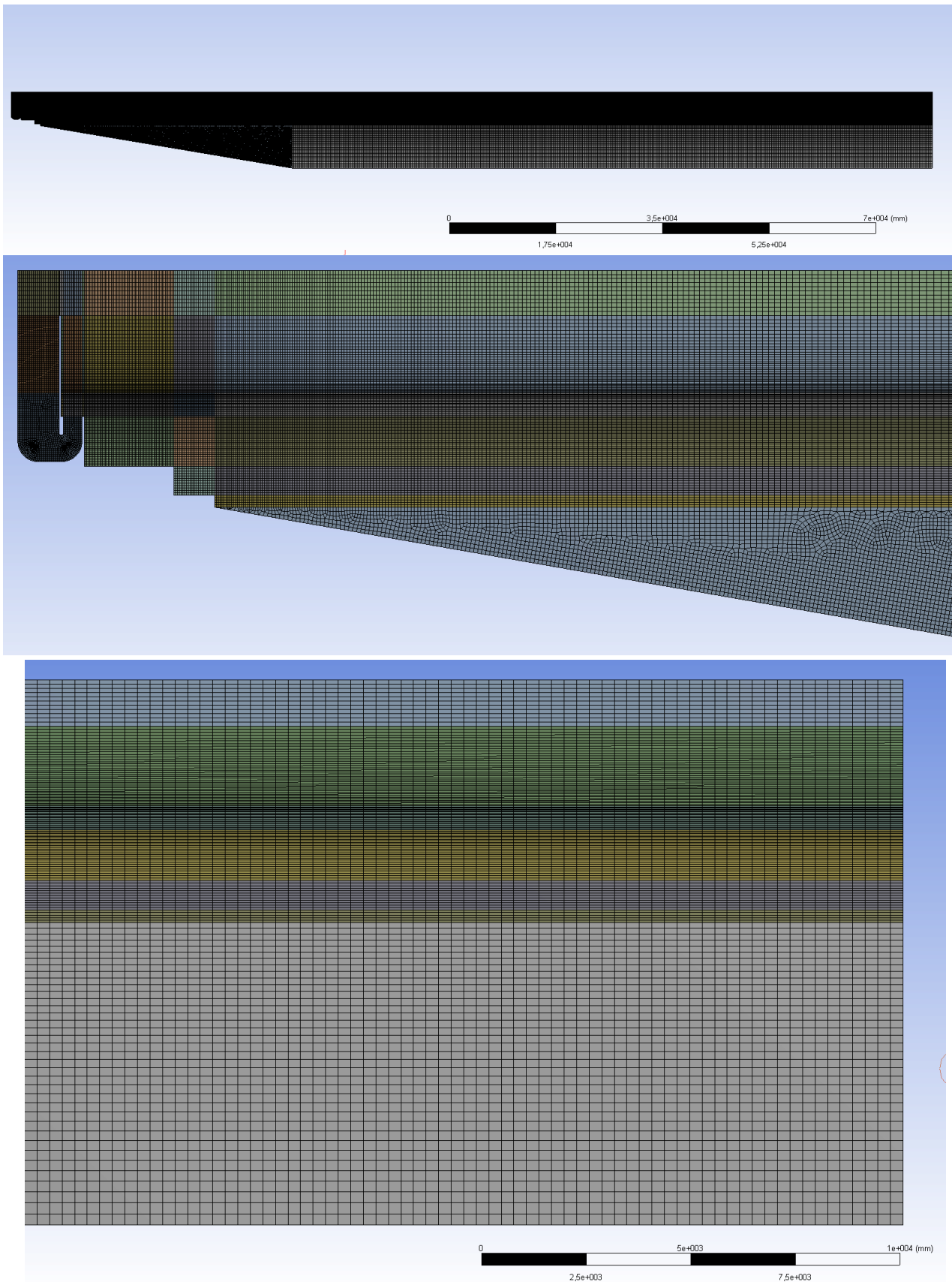


Figura8.2.1. Dominio discretizzato della geometria 2D implementata in FLUENT. Dall'alto verso il basso: dominio globale del modello; particolare discretizzazione del dominio in prossimità del sistema U-OWC; particolare del dominio discretizzato all'estremità del dominio.



### Mesh

La definizione di un appropriato dominio di discretizzazione del continuo rappresenta la fase cruciale ai fini della buona riuscita del modello CFD. Essa influenza i criteri di convergenza della soluzione dell'approssimazione matematica delle equazioni di NS. La figura 1. mostra la discretizzazione della geometria costruita. La tabella1 sintetizza le proprietà statistiche degli indici di qualità usualmente verificati in letteratura.

min ORTOGONAL QUALITY	4.955 10 <sup>-2</sup>
max SKEWNESS	4.955 10 <sup>-2</sup>
max ASPECT RATIO	17.813

Tabella1. Statistiche degli indici di qualità della griglia.

### Condizioni al Contorno

Le condizioni al contorno rappresentano la condizione necessaria al fine di ottenere una soluzione chiusa al sistema di equazioni differenziali che dominano la fisica del sistema. Nello specifico, si definiscono le superfici di input (*inlet*) ed output (*outlet*) del sistema e la condizione matematica da rispettare al contatto con le superfici solide (*wall*). Le condizioni al contorno applicate al modello sono di seguito elencate:

- Inlet. La superficie di inlet è rappresentata dalla porzione di fluido all'estremità del dominio. Nello specifico, si definiscono componenti di velocità dell'onda che sollecita il sistema (*velocity inlet*), le cui caratteristiche sono specificate nel paragrafo successivo.
- Outlet. Le superfici di outlet sono rappresentate dal perimetro esterno della porzione di aria rappresentata. Al fine di ottenere la convergenza della risoluzione numerica del problema accoppiato pressione-velocità delle equazioni di NS, la condizione di outlet richiede la definizione della pressione (*pressure outlet*). Tale valore è inizializzato alla pressione atmosferica su tutto il dominio di outlet.
- Wall. La *no-slip condition* è imposta su tutto il contorno solido del dominio.

### Input

L'input alla modellazione CFD del dominio descritto è costituito da un'onda periodica. La tabella 2 ne riassume le caratteristiche.

H [m]	L[m]
1.0	30

Tabella2. Caratteristiche onda di input

### Solver

FLUENT mette a disposizione una vasta gamma di algoritmi per la risoluzione delle equazioni che governano la fisica del sistema. Nello specifico, il problema accoppiato tra velocità e pressioni nella approssimazione numerica delle equazioni di NS è risolta con l'algoritmo PISO (*Pressure Implicit with Splitting of Operator*). La

discretizzazione dei termini di convezione e diffusione è effettuata col il metodo *Green-Gauss Cell-Based Gradient Evaluation*. L'interpolazione della soluzione ottenuta per i termini convettivi in corrispondenza al centro delle celle costituenti la griglia è ottenuta col lo schema QUICK.

Per la descrizione completa della risposta dinamica del fluido, è necessario definire un modello per la risoluzione delle incognite aggiuntive dovute alla modellazione della turbolenza. Questo passaggio è fondamentale, poiché la particolare configurazione della geometria del sistema comporta la comparsa di vortici localizzati in corrispondenza dell'imboccatura esterna del sistema e del restringimento ( o allargamento, in funzione del verso del flusso di acqua) all'ingresso della camera d'aria. In questo caso si è adottato il modello SST k- $\omega$ . Esso risulta quello più comunemente utilizzato nella pratica delle applicazioni dell'Ingegneria Marittima.

La risoluzione prevede l'impostazione delle condizioni iniziali del problema. L'inizializzazione prevede l'assegnazione della fase di pertinenza alle celle che costituiscono il dominio. A tal fine, la funzione *Path* permette l'individuazione della posizione della superficie libera all'istante iniziale.

$\Delta t$ [s]	N° iterazioni
0.001	40000

Tabella 3. Dettagli simulazione. Nello specifico  $\Delta t$  indica il passo temporale.

**Postprocessing dei dati**

I risultati della simulazioni vengono elaborati al fine di ottenere la statistica delle grandezze fisiche di interesse. La Figura 8.2.2 mostra la distribuzione delle fasi e la distribuzione delle velocità a tre differenti istanti di tempo. Come già anticipato, considerazioni in merito alla bontà delle simulazioni effettuate dovrebbero prevedere confronti con differenti tecniche. A tal fine, si sceglie di analizzare la distribuzione delle pressioni in 4 punti definiti all'interno del dominio modellato. Tali punti corrispondono al posizionamento di altrettanti trasduttori di pressione nel modello in scala ridotta testato presso il laboratorio "NOEL" dell'Università di Reggio Calabria. La Figura 8.2.3 mostra la serie temporale delle pressioni ottenute dalla simulazione.

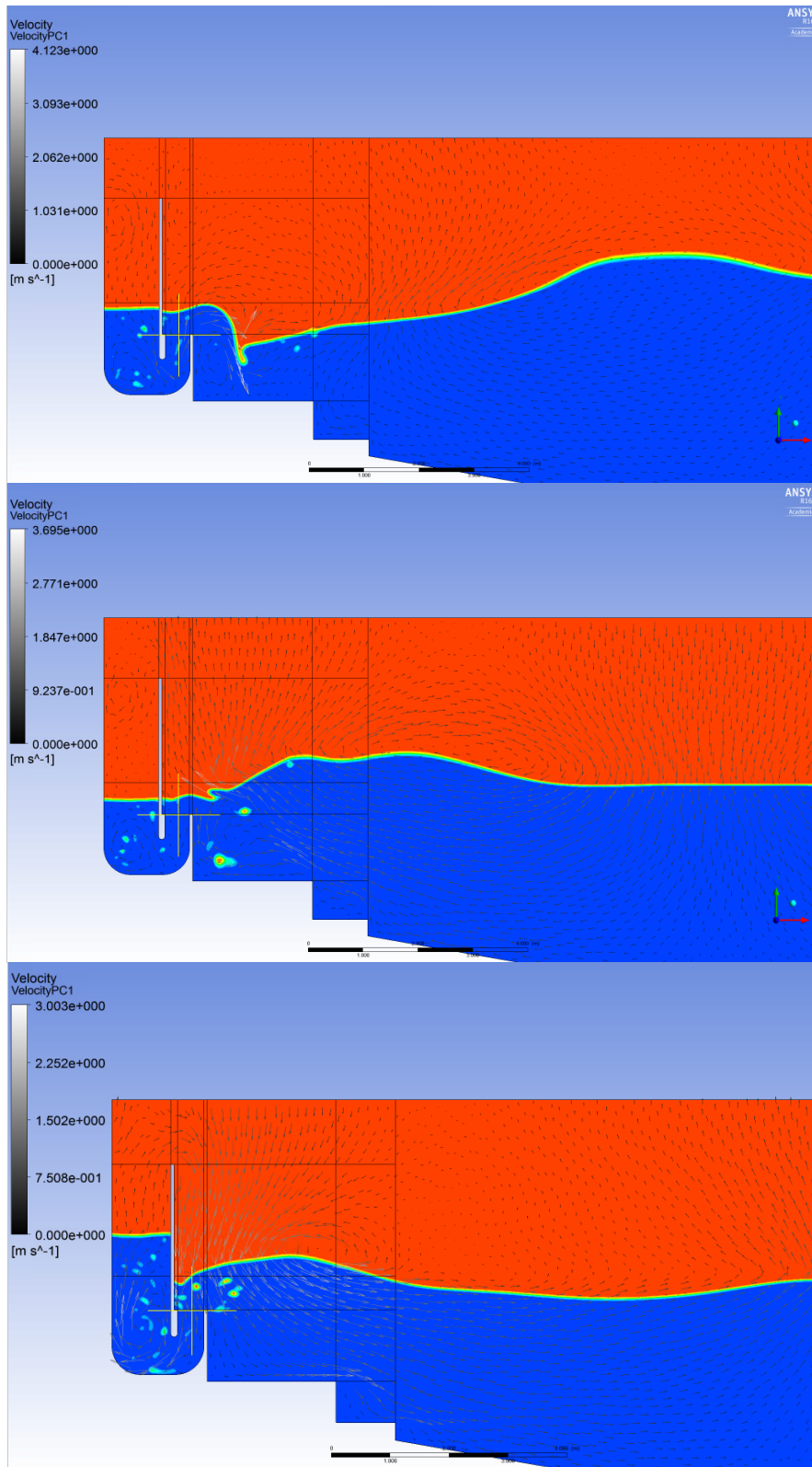
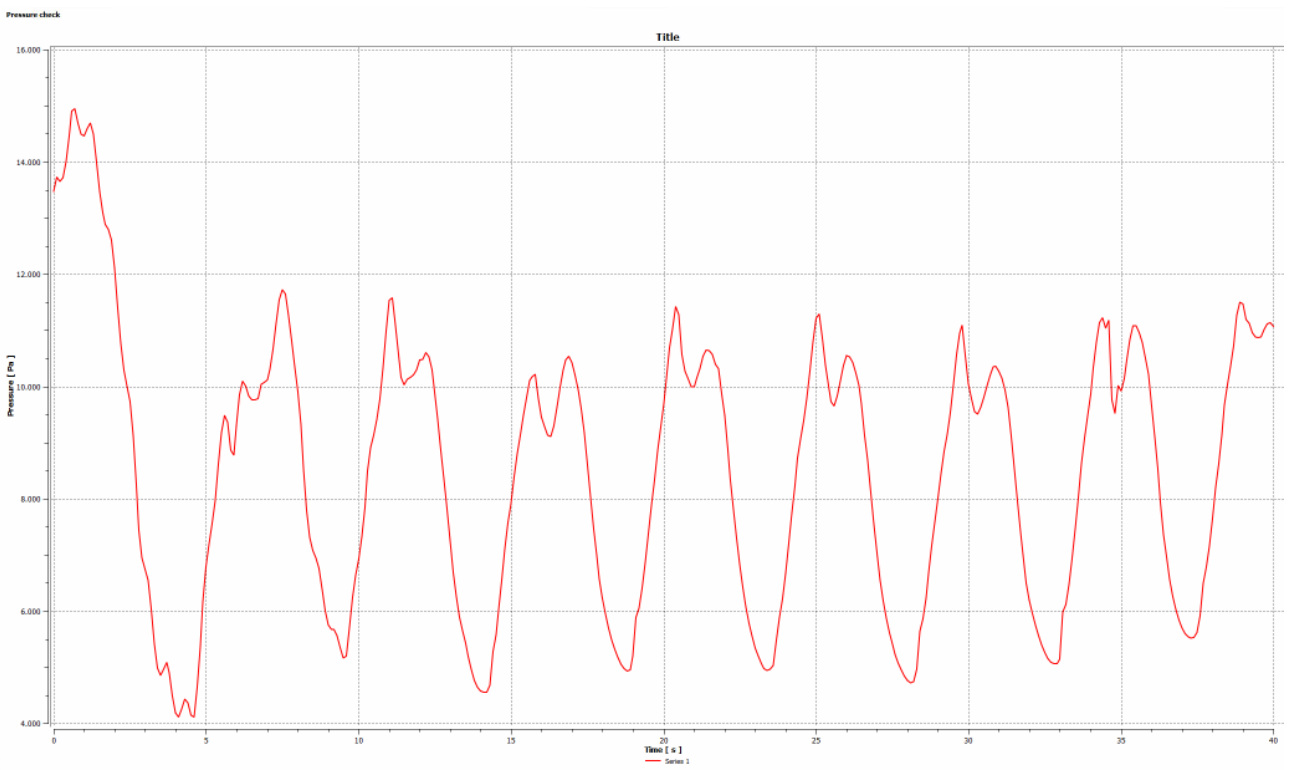
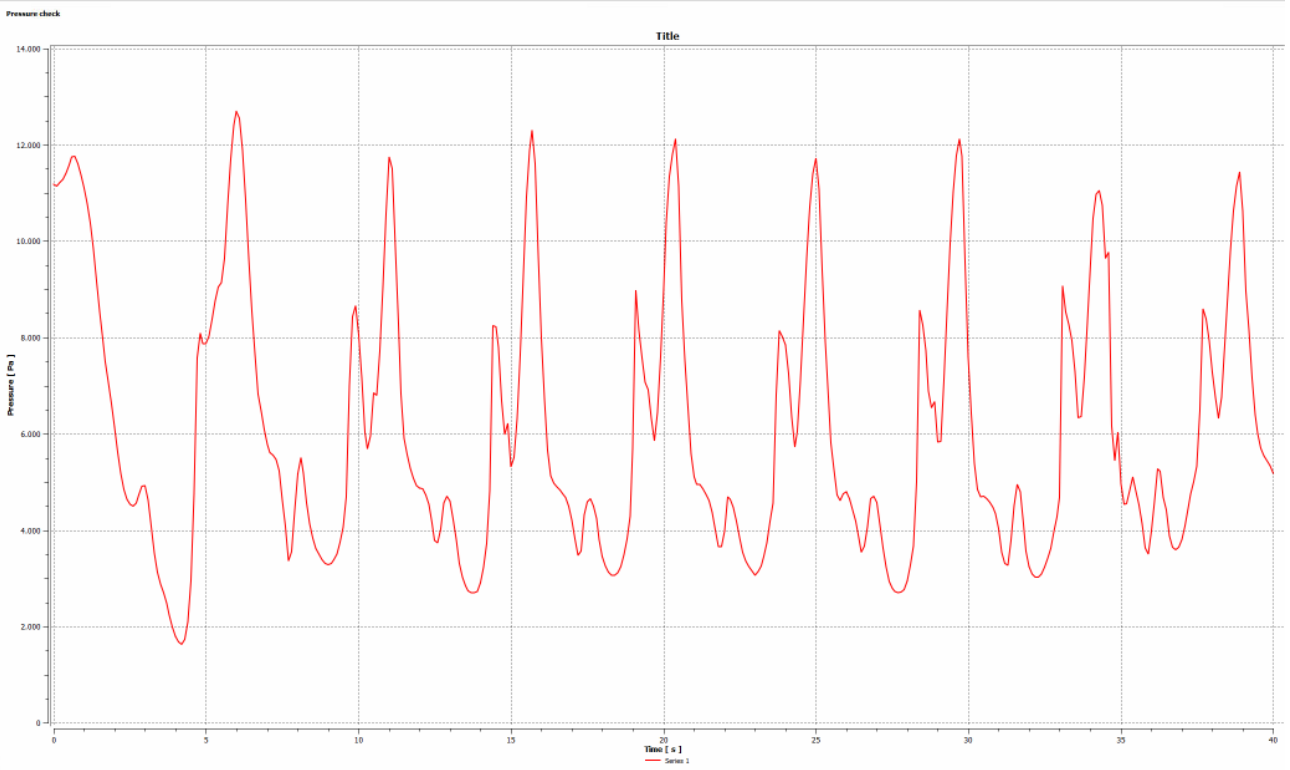


Figura 8.2.2. Distribuzione di fasi e velocità agli istanti: t= 27s; t=28s; t=29 s.



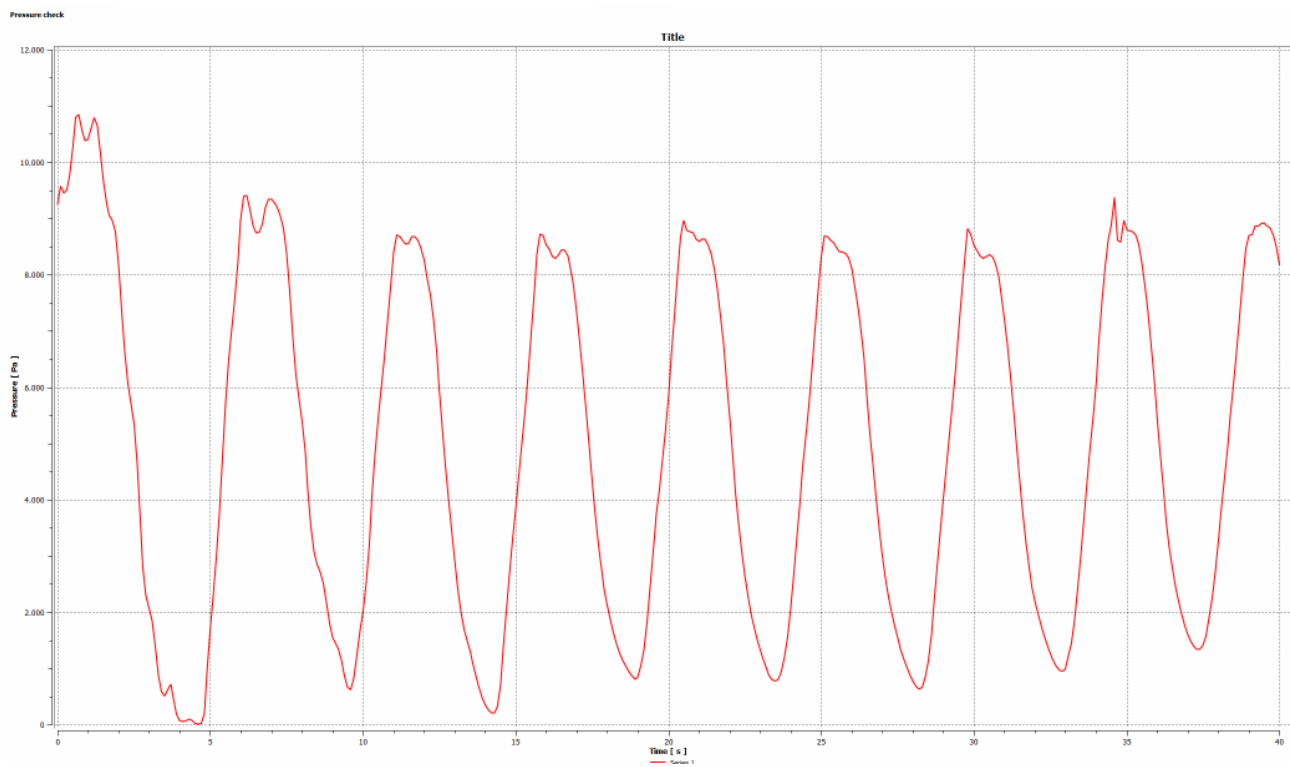
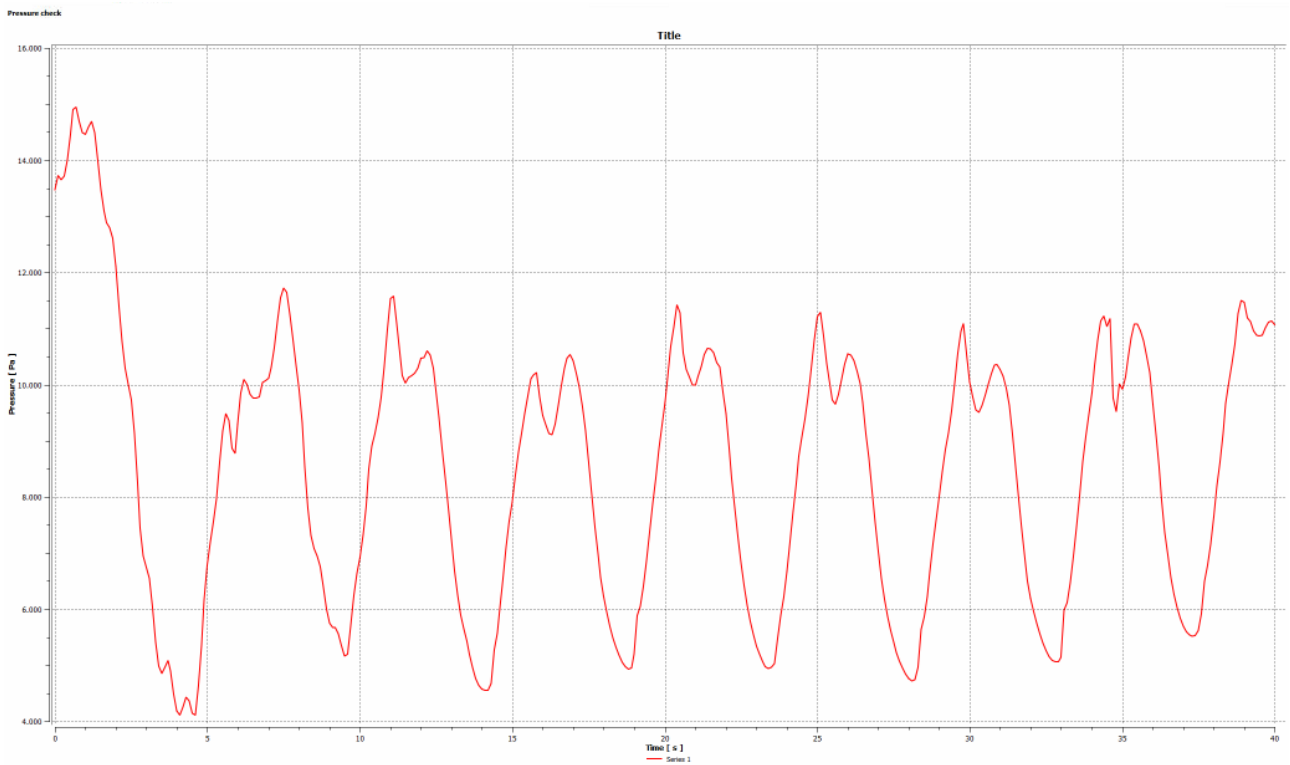


Figura 8.2.3. Serie temporale delle pressioni. Con riferimento alla Figura 4 procedendo dall'alto verso il basso, i grafici fanno riferimento ai punti: 1, 2, 3, 4.

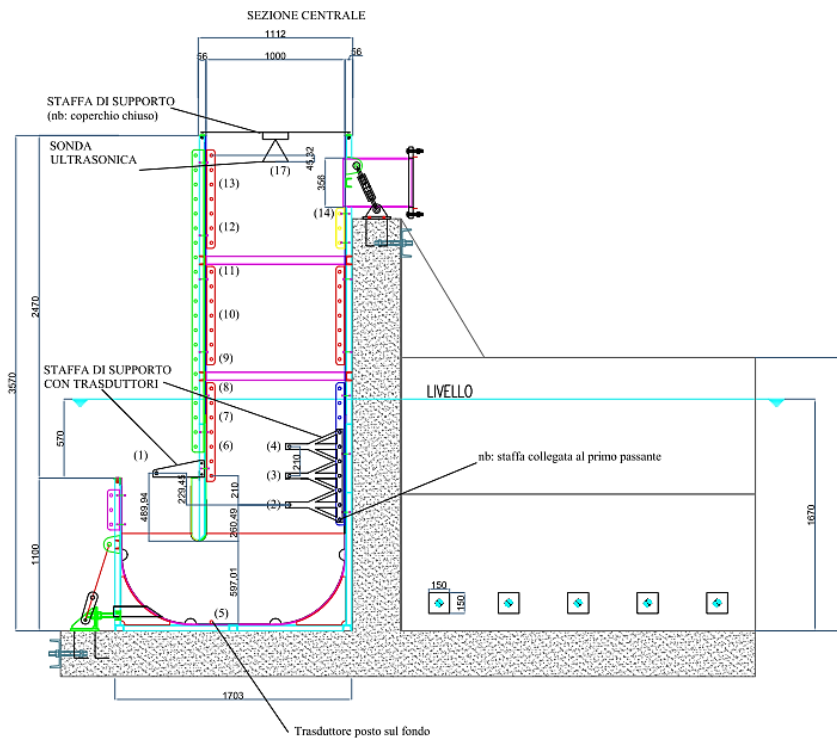


Figura 8.2.4. Posizionamento trasduttori di pressione.

**CONFRONTO CON LA SIMULAZIONE ANALITICA**

Il problema della formulazione analitica del calcolo della dinamica dell'oscillazione della colonna d'acqua all'interno dell'U-OWC, accoppiato con le fluttuazioni della pressione dell'aria all'interno della camera pneumatica, è stato risolto da Boccotti (2003), e successivamente integrato da Malara & Arena (2007). Tale formulazione ha trovato una validazione sperimentale per mezzo di una vasta gamma di prove effettuate su modelli in scala ridotta presso il laboratorio NOEL. In questa sezione si propone un confronto tra l'approccio numerico perseguito da FLUENT e quello teorico ottenuto tramite l'implementazione della formulazione teorica codificata su MATLAB.

**CONFRONTO CON I DATI SPERIMENTALI**

In questa sezione si analizzano i dati ottenuti dalle registrazioni effettuate presso il laboratorio NOEL dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria.

La tabella 4 riassume le caratteristiche della registrazione. Trattandosi il NOEL di un laboratorio che opera direttamente in mare, il confronto tra quanto ottenuto dalla simulazione numerica e i dati misurati dai trasduttori di pressione non è immediato. In aggiunta, la simulazione numerica analizzata prevede come dato di input al modello un'onda periodica.

$\Delta t$ [s]	T[min]	Hs [m]	L [m]
0.1	5	1.00	30

Tabella 4. Caratteristiche dello stato di mare registrato presso il laboratorio NOEL.

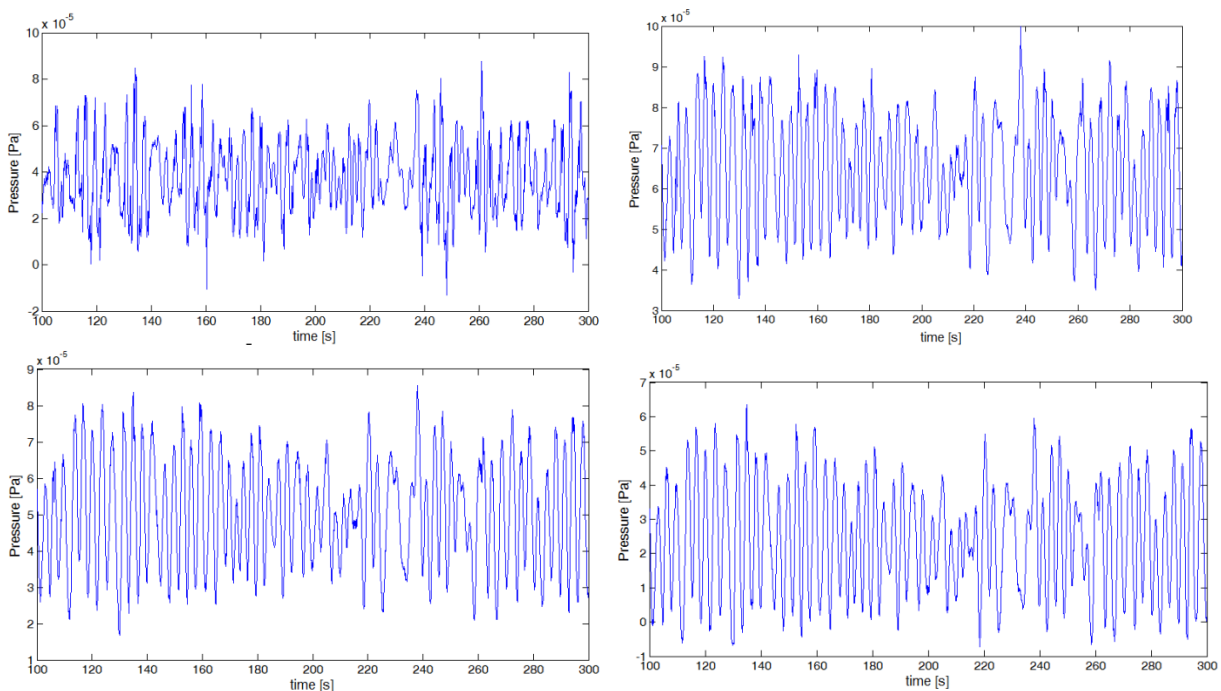


Figura 8.2.5. Serie temporale delle pressioni registrate dai trasduttori di pressione.

Con riferimento alla Figura 8.2.4, i grafici in alto indicano le pressioni nei punti 1 (sinistra) e 2 (destra) ; in basso, 3(sinistra) e 4 (destra).

Punto1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
1.559e-05	1.359e-05	1.507e-05	1.631e-05

Tabella 5. Deviazioni standard delle pressioni calcolate nei punti: 1, 2, 3, 4.

### MODELLO 3D

Sebbene la modellazione del dominio bidimensionale sia utile per chiarire aspetti legati ai fenomeni in gioco nella fisica all'interno del sistema U-OWC, ai fini di un confronto rigoroso tra la risoluzione numerica e i dati ottenuti dall'attività sperimentale risulta necessario l'implementazione della medesima geometria che riproduce il modello in scala testato presso il NOEL. Per tale configurazione, i tempi computazionali richiesti dal software risultano nettamente superiori. Il dominio 3D è stato creato e discretizzato come mostrato in figura 8.2.6. Come si osserva, solo la geometria riprodotta il dispositivo è inclusa nel dominio computazionale, escludendo la porzione di fluido esterna. Questa scelta permette la riduzione dei tempi di calcolo. Come conseguenza, le impostazioni che definiscono le condizioni al contorno saranno:

- Inlet. L'input al sistema sarà definito dalla serie temporale delle pressioni in corrispondenza all'imboccatura del dispositivo (*pressure inlet*).
- Outlet. Al fine di ottenere una soluzione chiusa al set di equazioni di NS, la condizione di outlet è definita dalle componenti di velocità dell'aria in uscita dal tubo d'aria (*velocity outlet*), a distanza tale da potere considerare ripristinate le condizioni di flusso indisturbato.

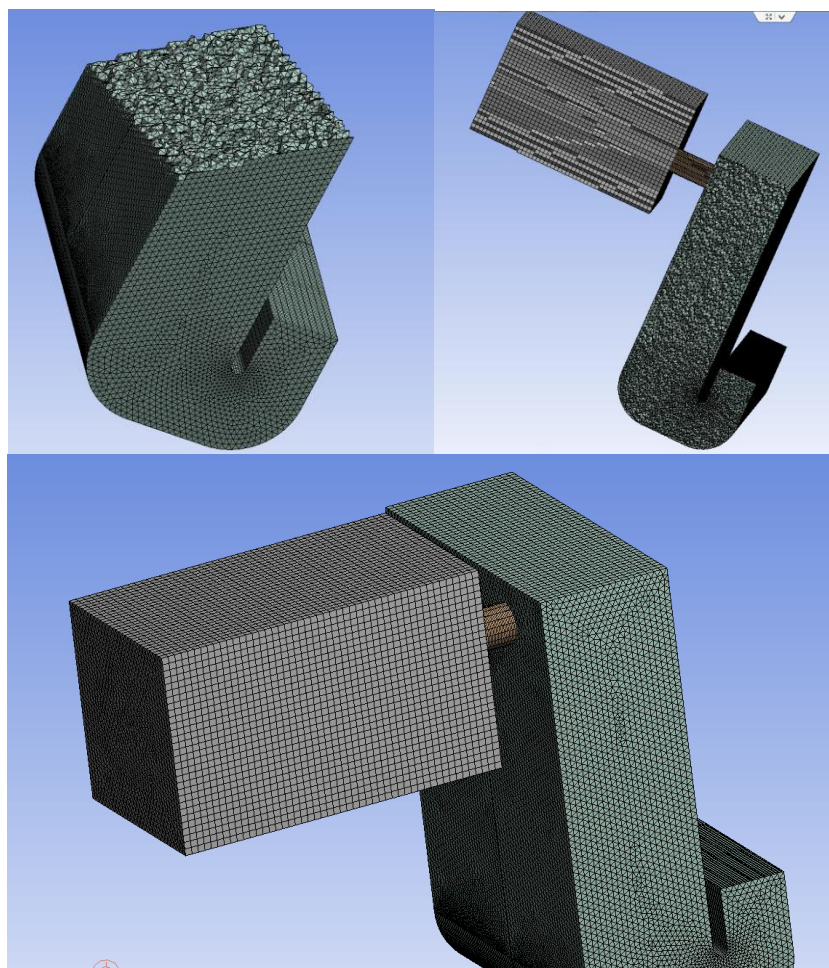


Figura 8.2.6. Dominio e mesh del modello 3D.



## 9 Conclusioni

Nel presente documento inizialmente è stato riportato uno studio dello stato dell'arte sull'utilizzo delle simulazioni CFD nella progettazione dei dispositivi OWC.

Successivamente è stato esposto il lavoro di studio ed ottimizzazione delle performance idrodinamiche del REWEC3-GV, in diverse configurazioni geometriche e con differenti condizioni di moto ondoso, attraverso lo sviluppo di modelli CFD. In dettaglio sono stati realizzati due modelli CFD del sistema per tener conto delle possibili modifiche nella geometria del cassone e poter quindi analizzare la risposta del sistema in presenza di differenti configurazioni geometriche. Sono state effettuate delle simulazioni, sulle differenti geometrie, utilizzando forzanti sinusoidali incidenti sul cassone con differenti angolazioni in modo da poter simulare delle onde provenienti da diverse direzioni.

Infine sulla base delle prove sperimentali svolte presso il laboratorio NOEL dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria è stata eseguita una simulazione delle condizioni reali del mare al fine confrontare il comportamento del modello con i risultati sperimentali.

Il modello ha mostrato una buona capacità di simulare il comportamento reale del sistema.

## Riferimenti bibliografici

1. T. Crescenzi, D. Nicolini, A. Fontanella, L. Sipione - "Sviluppo di un modello numerico per simulazioni CFD di sistemi di conversione del moto ondoso tipo U-OWC (Oscillating Water Column)" - Report Ricerca di Sistema Elettrico, Report RdS/2013/230, Settembre 2013.
2. D. Nicolini, A. Fontanella, E. Giovannini – “Analisi fluidodinamica CFD su dispositivi a colonna d’acqua oscillante OWC – Fase 1 : Messa a punto del modello CFD sulla base della geometria definitiva dell’apparato U-OWC sperimentale” – Report Ricerca di Sistema Elettrico, Report RdS/PAR2013/173.
3. D. Nicolini, A. Fontanella, E. Giovannini – “Analisi fluidodinamica CFD su dispositivi a colonna d’acqua oscillante OWC – Fase 2 : Confronto tra risultati numerici e risultati sperimentali” – Report Ricerca di Sistema Elettrico, Report RdS/PAR2013/174.
- 4 F.Arena, V. Fiamma, R. Iannolo, G. Malara, A.Romolo, A. Fontanella, E. Giovannini, G. Sannino – “Progettazione, costruzione e installazione di un OWC a geometria modificabile in scala 1:8” – Report Ricerca di Sistema Elettrico, Report RdS/PAR2013/176