Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO

# Sviluppo di un modello numerico per simulazioni CFD di sistemi di conversione del moto ondoso tipo U-OWC (Oscillating Water Column).

*T. Crescenzi, D. Nicolini, A. Fontanella, L. Sipione*

Report RdS/2013/230

# ONDOSO TIPO U-OWC (OSCILLATING WATER COLUMN)

T. Crescenzi, D. Nicolini, A. Fontanella, L. Sipione (ENEA)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA
Piano Annuale di Realizzazione 2012
Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente
Progetto: Studi e valutazioni sulla produzione di energia elettrica dalle correnti marine e dal moto ondoso
Obiettivo: Sviluppo di modellistica fluidodinamica per l'ottimizzazione di dispositivi U-OWC in funzione del dispositivo di power take-off applicato
Responsabile del Progetto: G. Sannino, ENEA

# Indice


SOMMARIO ..... 4

1 INTRODUZIONE ..... 5

2 GENERALITÀ ..... 6

2.1 UNITÀ DI MISURA ..... 6
2.2 IL CODICE DI CALCOLO ..... 6
2.3 CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DEL SISTEMA U-OWC ..... 6
2.4 CONDIZIONI OPERATIVE ..... 7

3 CALCOLI CFD ..... 9

3.1 CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DEL MODELLO CFD ..... 9
3.2 FORMA DELLE ONDE ..... 16
3.3 FLUIDI ..... 16
3.4 COMPORTAMENTO FISICO DEL FLUSSO E MODELLI NUMERICI ..... 17
*3.4.1 Flusso bifase ..... 17*
*3.4.2 Flusso turbolento ..... 17*
*3.4.3 Fluidi incomprimibili ..... 17*
3.5 IL MESH ..... 18
3.6 LE CONDIZIONI AL CONTORNO ED INIZIALI ..... 22
3.7 DATI CARATTERISTICI DELLE ANALISI CFD ..... 25

4 RISULTATI ..... 26

4.1 RISULTATI SIMULAZIONE ONDA DEL PRIMO TIPO (WIND WAVES) ..... 26
4.2 RISULTATI SIMULAZIONI ONDA DEL SECONDO TIPO (LOND SWELLS) ..... 61
4.3 ANALISI DEI RISULTATI E CONSIDERAZIONI SULLA LORO AFFIDABILITÀ ..... 96

5 CONCLUSIONI ..... 97

6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI ..... 98

## Sommario

L'ENEA ha maturato una significativa esperienza nello sviluppo tecnico-scientifico ed applicativo di diverse tecnologie energetiche rinnovabili, in particolare nel solare termodinamico, dove ha contribuito alla realizzazione del primo impianto su scala industriale con circuito interamente a sali fusi. Anche in altri settori, come il fotovoltaico, l'eolico, le biomasse, l'idrogeno, e la chimica solare l'ENEA ha fornito importanti contributi allo sviluppo delle tecnologie.

La produzione di energia dal moto ondoso rappresenta un'importante sfida, soprattutto in vista dello sviluppo di una filiera nazionale con caratteristiche di originalità e prestazioni all'avanguardia.

L'ENEA già da diversi anni fornisce importanti contributi allo studio dell'ambiente marino e alla mappatura della risorsa "moto ondoso". Con questo lavoro inizia ad occuparsi anche degli aspetti tecnologici, con l'obiettivo di approfondire alcuni aspetti critici, tra cui quelli legati all'accoppiamento ottimale tra dispositivo di cattura dell'energia in forma di flusso d'aria oscillante e dispositivo elettromeccanico per la conversione di questo flusso in energia elettrica da immettere in rete.

L'ENEA ha maturato una grossa esperienza nella simulazione numeriche di fenomeni complessi in diversi settori applicativi, soprattutto nel campo dell'energia e si avvale di ricercatori particolarmente qualificati in questo settore.

In questo rapporto è descritto il lavoro di sviluppo di un modello per la simulazione numerica CFD (Computational Fluid Dynamics) di un dispositivo U-OWC (Oscillating Water Culomn), svolto dall'ENEA nell'ambito delle attività di ricerca per lo sviluppo di nuovi e più efficienti apparati per la conversione di energia dal moto ondoso mediante dispositivi a colonna d'acqua oscillante. Il modello numerico realizzato si basa sulla geometria della sezione di prova dell'apparato U-OWC in fase di realizzazione presso l'Università Mediterranea di Reggio Calabria, costituito da una cavità riempita in parte d'acqua e in parte d'aria e dal condotto di efflusso dell'aria.

I risultati ottenuti dalle simulazioni CFD sono coerenti con quelli attesi e fanno quindi ritenere il modello in grado di descrivere in modo sufficientemente adeguato, i fenomeni fisici in gioco. Per una convalida della reale validità dei risultati bisogna prevedere una successiva fase di benchmark con i risultati di prove sperimentali, che saranno disponibili a seguito del completamento delle prove sperimentali da parte dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria.

# 1 Introduzione

L'ENEA ha maturato una significativa esperienza nello sviluppo tecnico-scientifico ed applicativo di diverse tecnologie energetiche rinnovabili, in particolare nel solare termodinamico, dove ha contribuito alla realizzazione del primo impianto su scala industriale con circuito interamente a sali fusi. Anche in altri settori, come il fotovoltaico, l'eolico, le biomasse, l'idrogeno, e la chimica solare l'ENEA ha fornito importanti contributi allo sviluppo delle tecnologie.

Poiché la produzione di energia dal moto ondoso rappresenta un'importante opportunità, soprattutto in vista dello sviluppo di una filiera nazionale con caratteristiche di originalità e prestazioni all'avanguardia, è fondamentale che il maggiore ente pubblico nazionale impegnato nella ricerca applicata sui temi dell'energia fornisca contributi tecnologici in questo campo.

L'Accordo di programma tra Ministero per lo Sviluppo Economico e l'ENEA sulla ricerca di sistema elettrico, al tema di ricerca "Energia elettrica dal mare" – punto B.1.4 del PAR 2012 prevede da parte ENEA lo svolgimento di studi e ricerche per l'ottimizzazione di dispositivi U-OWC (Oscillating Water Column) ed in particolare l'approfondimento delle caratteristiche dei sistemi U-OWC (Oscillating Water Column) e dei power take-off a loro applicabili.
L'attività svolta nel 2013 dal laboratorio UTRINN-PCI dell'ENEA si è incentrata sui seguenti argomenti:

- studio delle caratteristiche costruttive degli U-OWC, compresi i power take-off;
- sviluppo del modello fluidodinamico.

Il presente rapporto descrive il lavoro di sviluppo di un modello per la simulazione numerica CFD (Computational Fluid Dynamics) dei dispositivi U-OWC (Oscillating Water Culomn), svolto dall'ENEA nell'ambito delle attività di ricerca per lo sviluppo di nuovi e più efficienti apparati per la conversione di energia del moto ondoso mediante dispositivi a colonna d'acqua oscillante.

La simulazione CFD consente di ottimizzare il dimensionamento del dispositivo con un numero limitato di prove sperimentali e quindi di ridurre notevolmente i tempi e i costi di sviluppo, in modo da rendere economicamente sostenibile l'attività e anticipare il coinvolgimento dell'industria italiana in attività produttive, con importanti risvolti commerciali e occupazionali.

L'ENEA ha una lunga esperienza nella simulazione fluidodinamica applicata a diverse tecnologie nel campo dell'energia, ed in particolare delle energie rinnovabili. La collaborazione con l'Università Mediterranea di Reggio Calabria ha l'obiettivo di mettere a punto un modello numerico, realizzato sulla geometria della sezione di prova dell'apparato U-OWC in fase di realizzazione presso l'Università stessa, in grado di prevedere il comportamento sia dell'acqua sia dell'aria all'interno del dispositivo, in modo da consentire di individuare la conformazione geometrica ottimale con una serie limitata di prove sperimentali.

# 2 Generalità

## 2.1 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$^3$]
- Viscosità cinematica [m$^2$/s]
- Tensione superficiale [N/m]

## 2.2 Il codice di calcolo

Per le analisi fluidodinamiche (CFD) atte alle simulazioni del comportamento del sistema costituito della camera contenente la colonna d'acqua oscillante e dalla sovrastante camera d'aria spinta dalla colonna stessa all'interno del condotto della turbina, si è utilizzato il codice di calcolo OpenFOAM – The open source CFD toolbox – versione 2.2.0.

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.

## 2.3 Caratteristiche geometriche del sistema U-OWC

Presso l'Università Mediterranea di Reggio Calabria è in fase di realizzazione una sezione di prova di un sistema U-OWC il cui schema di massima è riportato nelle seguenti figure 2.3.1 e 2.3.2.

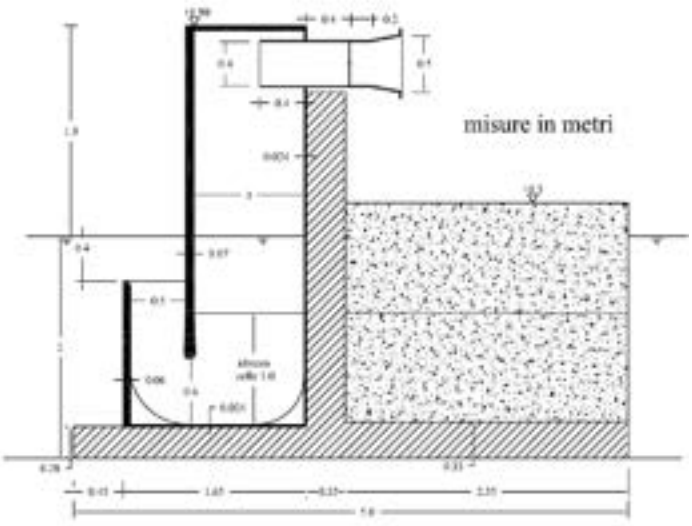


**Fig. 2.3.1 – Schema sistema U-OWC – Università Mediterranea di Reggio Calabria**

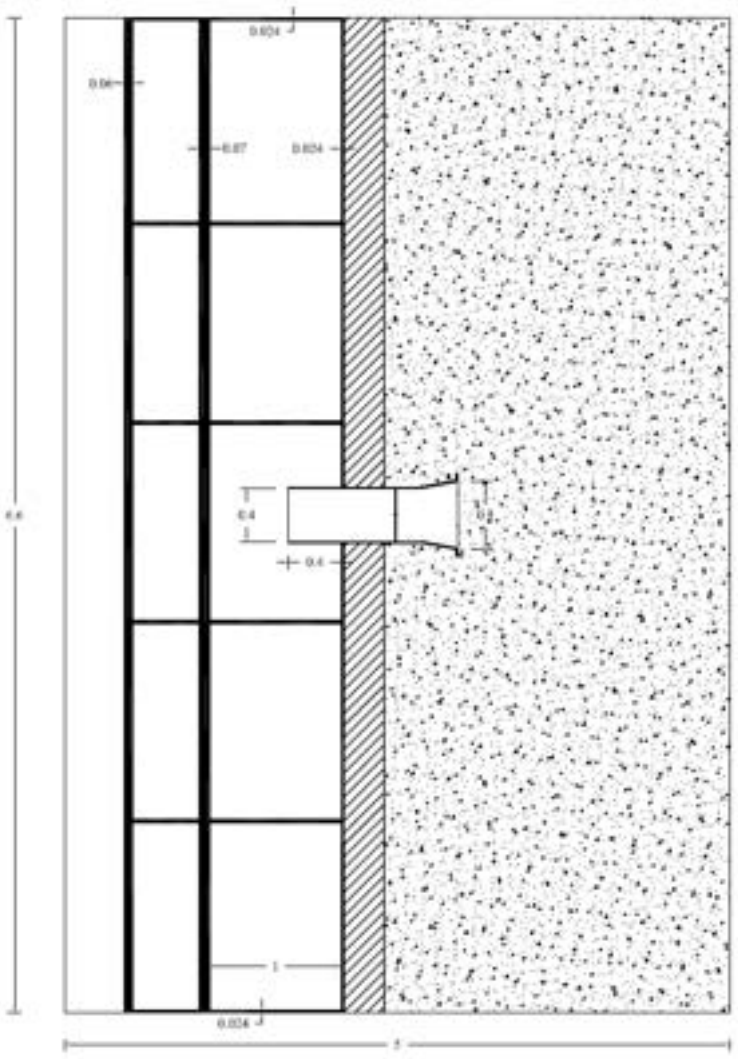

**Fig. 2.3.2 – Schema sistema U-OWC – Università Mediterranea di Reggio Calabria**

Le dimensioni riportate nelle figure sono da considerarsi puramente indicative; alla data in cui è stato realizzato il modello numerico, alcune dimensioni geometriche non erano ancora state completamente definite.

## *2.4 Condizioni operative*

Per le simulazioni numeriche sono state prese in considerazione due tipologie di onda, corrispondenti a due differenti di condizioni operative per i sistemi OWC:

- onda dovuta all'effetto del vento locale (wind waves),
- onda prodotta dalla propagazione o smorzamento del moto ondoso (long swells).

Le caratteristiche dell'onda tipo corrispondenti alla prima tipologia (wind waves) sono le seguenti:

- altezza anda (minimo/massimo) = 0.90 m,
- periodo d'onda (tempo tra due massimi) = 3 s.

Le caratteristiche dell'onda tipo corrispondenti alla seconda tipologia (long swells) sono le seguenti:

- altezza anda (minimo/massimo) = 0.50 m,
- periodo d'onda (tempo tra due massimi) = 7 s.

# 3 Calcoli CFD

## *3.1 Caratteristiche geometriche del modello CFD*

Le caratteristiche geometriche del modello utilizzato per le simulazioni CFD sono riportate nella figura 3.1.1.

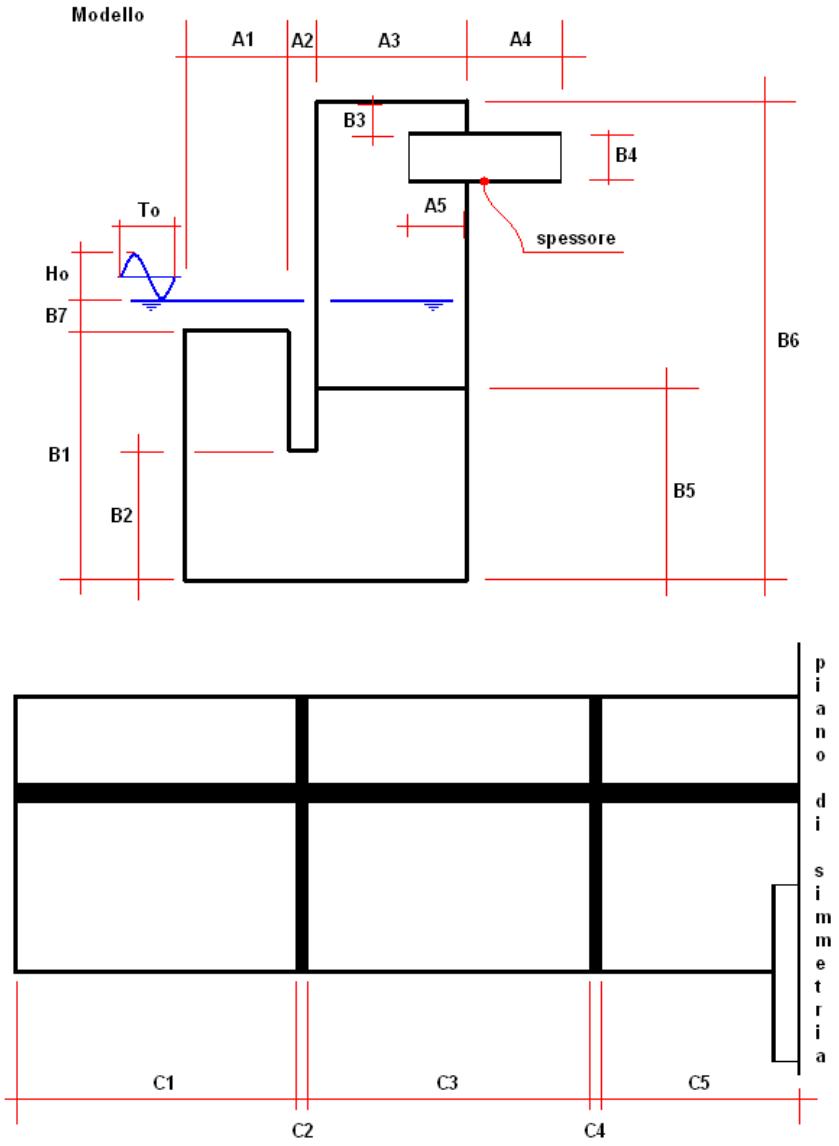


**Fig. 3.1.1 – Caratteristiche geometriche modello utilizzato per le simulazioni CFD**

Quando è stato realizzato il modello numerico, la sezione di prova, da realizzare presso l'Università Mediterranea di Reggio Calabria, non era ancora definita completamente dal punto di vista geometrico.
Le dimensioni geometriche del modello CFD sono quindi state definite, in accordo con l'università stessa, considerando valori numerici coerenti con le informazioni a disposizione.

Le dimensioni geometriche così definite sono riportate di seguito:

- A1 = 0.50 m, A2 = 0.07 m, A3 = 1.00 m, A4 = 0.86 m, A5 = 0.40 m;
- B1 = 1.30 m, B2 = 0.60 m, B3 = 0.10 m, B4 = 0.50 m (diametro interno del tubo di spessore 0.004 m contenente la turbina), B5 = 1.00 m (altezza setti interni della zona immersa), B6 = 3.60 m, B7 = 0.40 m;
- C1 = C3 = 1.50 m, C2 = C4 = 0.03 m, C5 = 0.75 m (C1 / 2).

Il tubo contenente la turbina è un tubo di diametro interno pari a 0.50 m e spessore di 0.004 m. Nel modello la parte di tubo che entra all'interno della camera deve essere simulata considerando le due pareti cilindriche e la parete a forma di corona circolare, che corrisponde alla parte finale del tubo stesso.
L'altezza di questa corona circolare, pari allo spessore del tubo impone la dimensione massima per le celle del mesh in quella zona. Come sarà esposto in seguito, nel paragrafo che tratta del mesh, la dimensione massima delle celle nella zona della parete del tubo è legata alla velocità del fluido ed alle funzioni di parete utilizzate. Poiché tale dimensione massima risulta, come si vedrà in seguito, superiore allo spessore del tubo, per evitare un mesh troppo fitto in quella zona, si è deciso di considerare lo spessore del tubo pari a 0.01 m, introducendo in questo modo un'approssimazione i cui effetti ai fini del calcolo possono essere considerati ragionevolmente trascurabili.

Nella geometria del modello non è stata considerata la presenza della turbina all'interno del tubo, ma il tubo è stato considerato completamente vuoto. Questa scelta è stata fatta poiché, nel momento in cui è stato realizzato il modello, non erano disponibili informazioni circa le caratteristiche della turbina stessa e, soprattutto, lo scopo di queste prime simulazioni è quello di valutare la bontà del modello e del codice utilizzati al fine di simulare il comportamento del sistema accoppiato acqua marina/aria. Il non considerare la presenza della turbina, pur cambiando naturalmente le condizioni di lavoro del sistema, non esclude la possibilità di valutare, attraverso opportuni confronti con dati sperimentali, la bontà dei risultati nelle condizioni di lavoro simulate.

Nelle figure 3.1.2 e 3.1.3 sono riportate due viste del modello geometrico utilizzato.

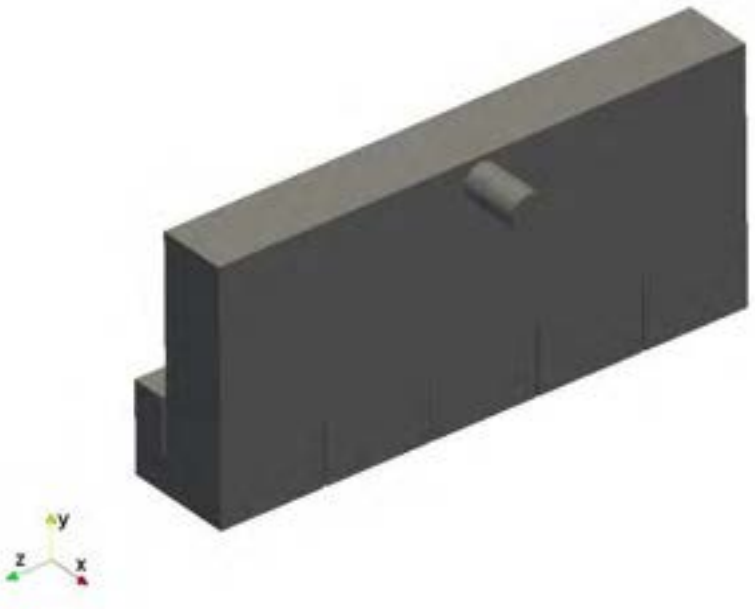


**Fig. 3.1.2 – Modello geometrico – Vista 1**

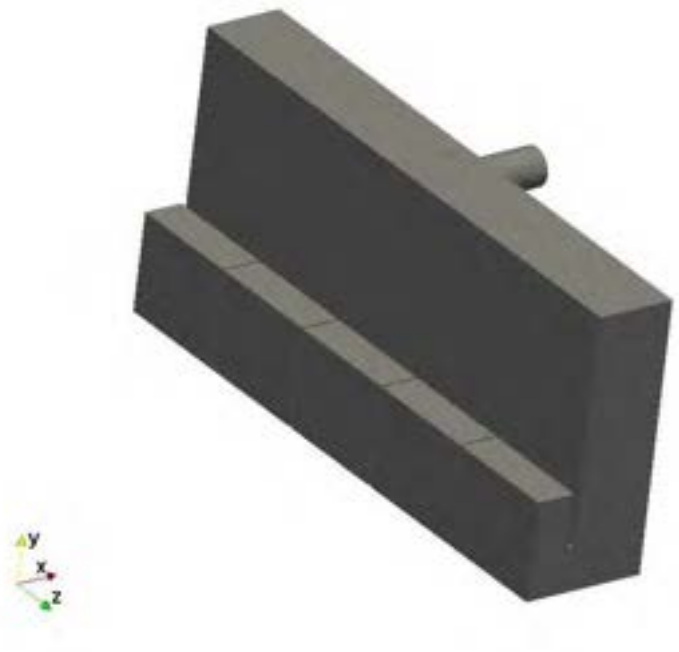


Fig. 3.1.3 – Modello geometrico – Vista 2

Nelle figure 3.1.4 e 3.1.5 sono riportate due viste del modello geometrico con l'indicazione di tre sezioni caratteristiche nel piano x-y riportate nella figura 3.1.6.

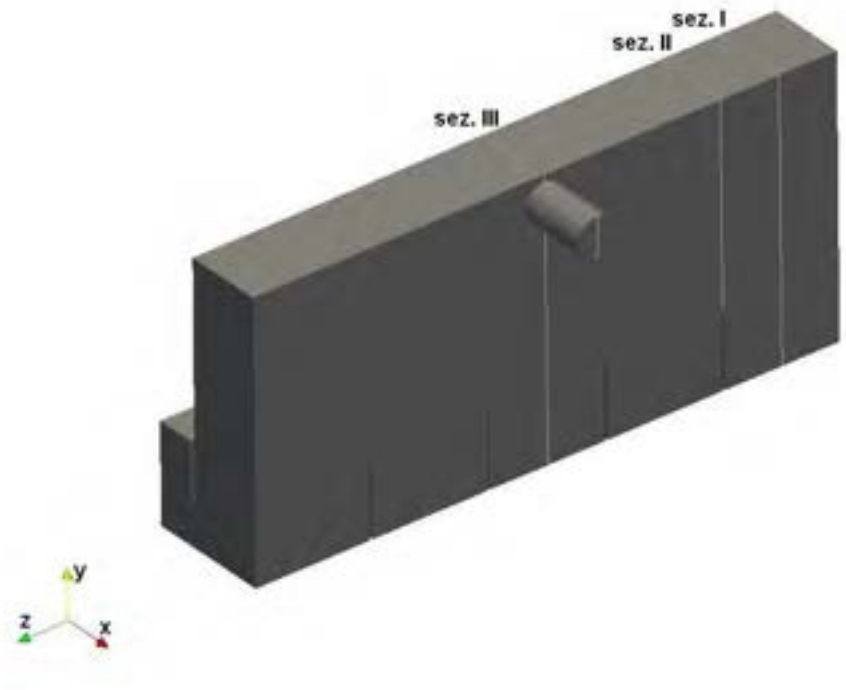


Fig. 3.1.4 – Modello geometrico con indicazione delle sezioni nel piano x-y – Vista 1

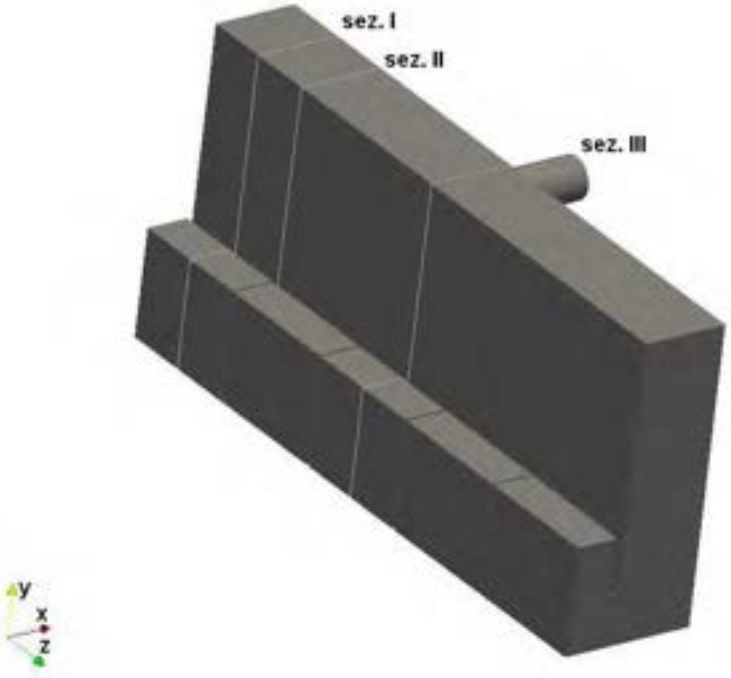


Fig. 3.1.5 – Modello geometrico con indicazione delle sezioni nel piano x-y – Vista 2

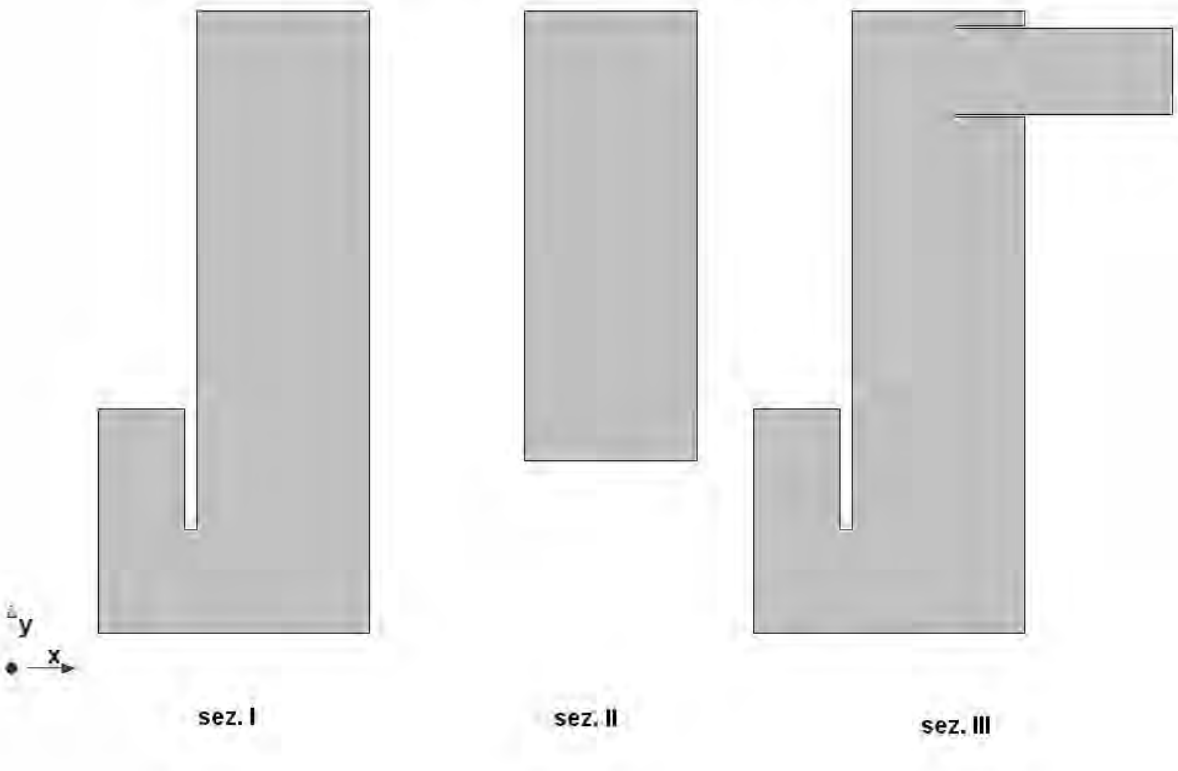


Fig. 3.1.6 – Modello geometrico – Sezioni piano x-y

Nelle figure 3.1.7 e 3.1.8 sono riportate due viste del modello geometrico con l'indicazione di cinque sezioni caratteristiche nel piano x-z riportate nella figura 3.1.9.

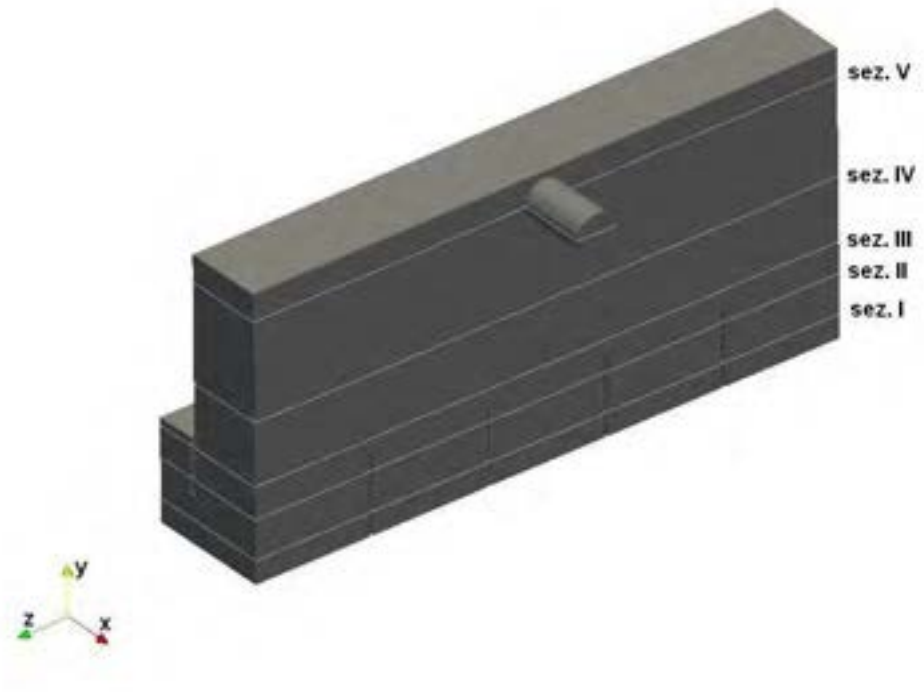


**Fig. 3.1.7 – Modello geometrico con indicazione delle sezioni nel piano x-z – Vista 1**

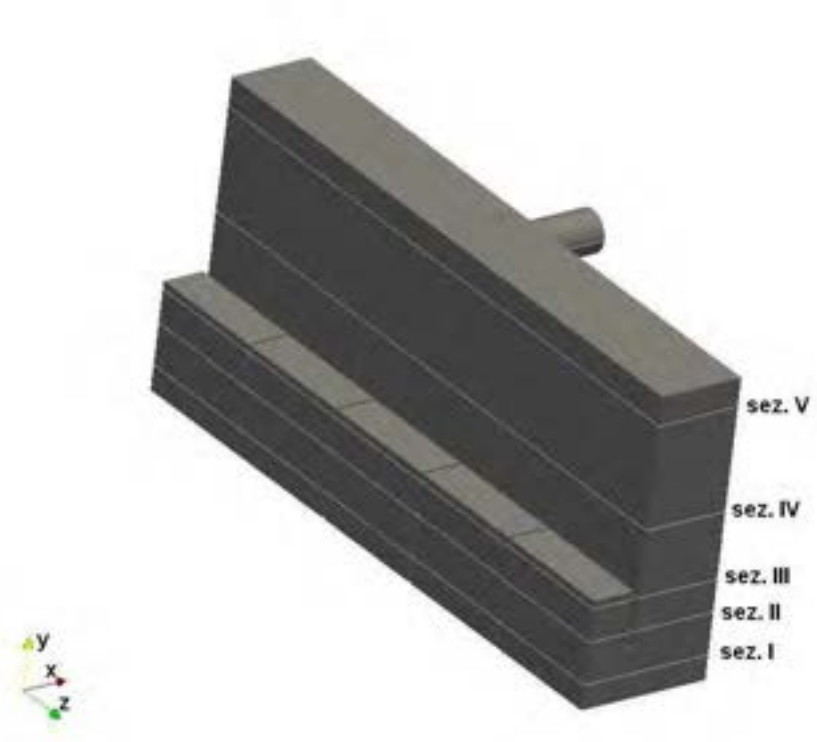


**Fig. 3.1.8 – Modello geometrico con indicazione delle sezioni nel piano x-z – Vista 2**

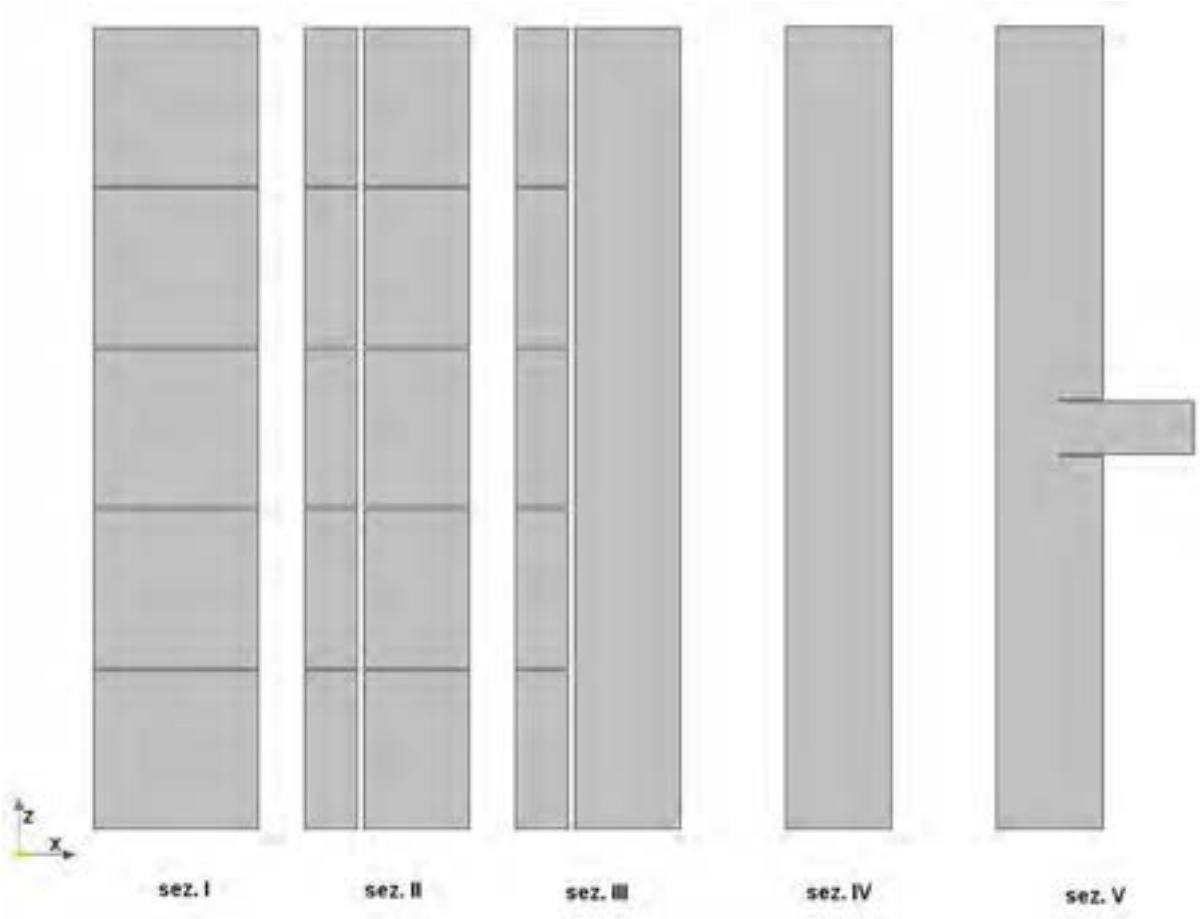


**Fig. 3.1.9 – Modello geometrico – Sezioni piano x-z**

Nelle figure 3.1.10 e 3.1.11 sono riportate due viste del modello geometrico con l'indicazione di quattro sezioni caratteristiche nel piano y-z riportate nella figura 3.1.12.

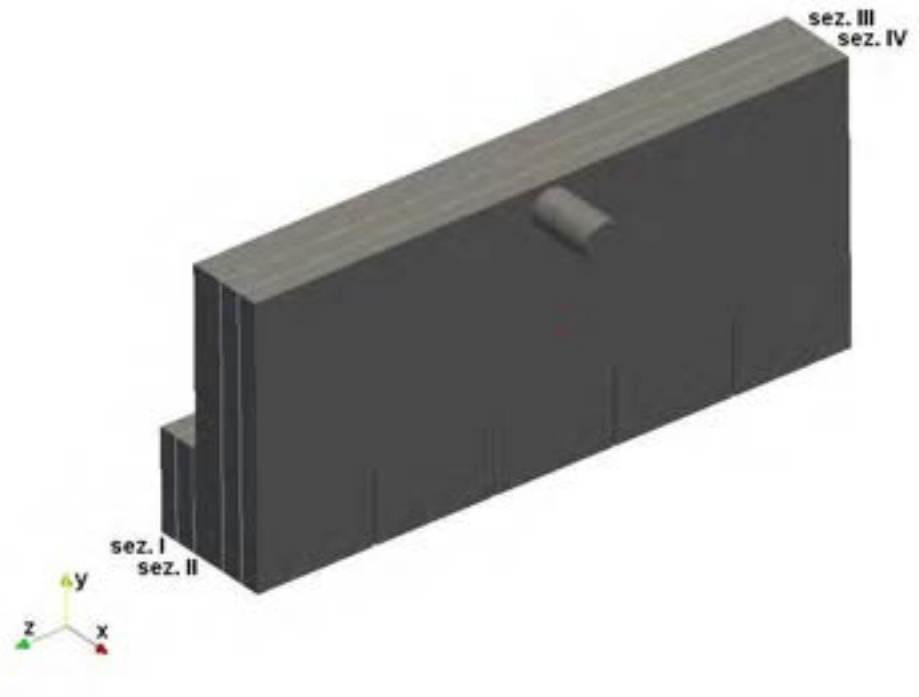


**Fig. 3.1.10 – Modello geometrico con indicazione delle sezioni nel piano y-z – Vista 1**

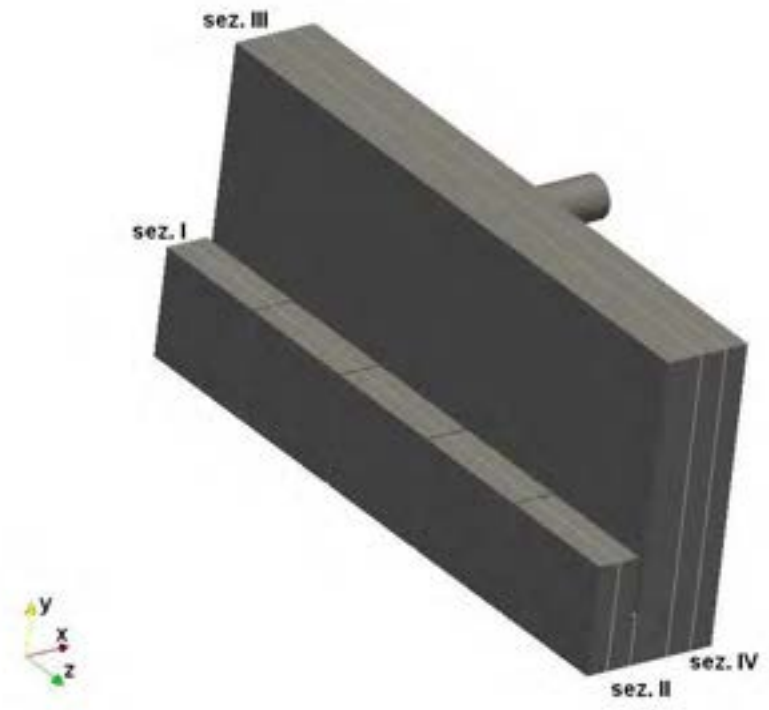


**Fig. 3.1.11 – Modello geometrico con indicazione delle sezioni nel piano y-z – Vista 2**

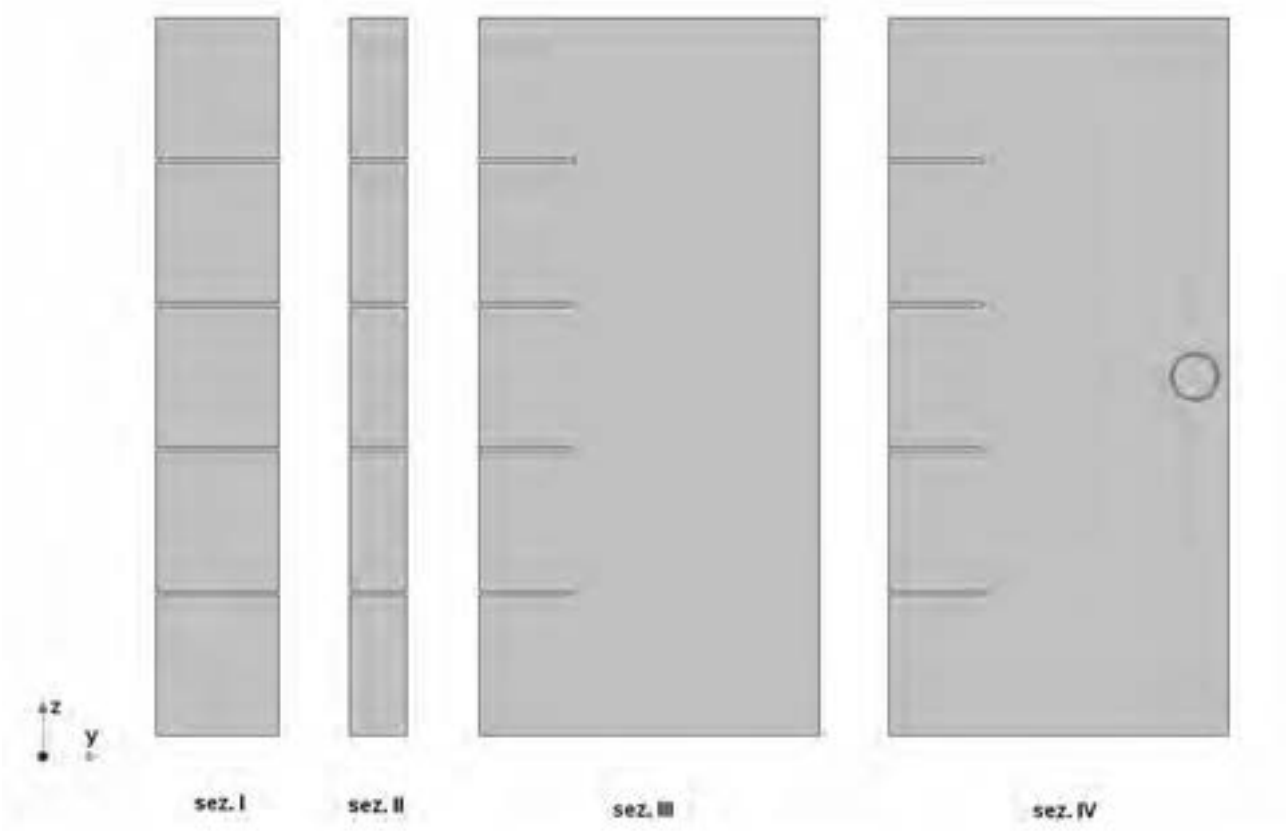


**Fig. 3.1.12 – Modello geometrico – Sezioni piano y-z**

## 3.2 Forma delle onde

In prima approssimazione si considera per le onde una forma di tipo sinusoidale.
Quindi per l'altezza delle onde, facendo riferimento alla figura 3.1.1, si usa la seguente espressione:

$h = H_0 \text{ sen } (2 \pi t/T_0)$.

## 3.3 Fluidi

I fluidi presi in considerazione nelle simulazioni CFD sono l'aria e l'acqua marina alla temperatura ambiente (293 °K) ed alla pressione ambiente (101350 Pa).

In queste condizioni le caratteristiche dei due fluidi sono:

- ARIA: densità ($\rho$) = 1.2 kg/m$^3$,
  viscosità cinematica ($\nu$) = 1.46e-5 m$^2$/s;
- ACQUA MARINA densità ($\rho$) = 1025 kg/m$^3$,
  viscosità cinematica ($\nu$) = 1.11e-6 m$^2$/s.

La tensione superficiale ($\sigma$) è uguale a 0.073 N/m.

## 3.4 *Comportamento fisico del flusso e modelli numerici*

Per poter effettuare una simulazione CFD è fondamentale individuare la reale tipologia del flusso che si instaura all'interno della zona che si vuole analizzare. Individuate le caratteristiche del flusso si procede alla scelta del miglior modello numerico a disposizione in grado di simulare questo particolare flusso.

In questo caso, come è spiegato di seguito, il flusso è bifase, turbolento e con fluidi incomprimibili.

### 3.4.1 Flusso bifase

Il particolare sistema che si vuole analizzare è caratterizzato da un flusso bifase, nel quale è presente sia la fase liquida (acqua marina) sia la fase gassosa (aria).
La simulazione di questa particolare tipologia di flussi può essere effettuata utilizzando, come algoritmo bifase, il metodo VOF (volume of fluid). Un metodo efficace e molto utilizzato.

### 3.4.2 Flusso turbolento

Per determinare se il flusso all'interno del modello numerico è di tipo laminare o turbolento si può effettuare il seguente ragionamento.

La velocità dell'aria all'interno del condotto può essere stimata in prima approssimazione considerando che, durante la fase di salita del livello del mare, all'interno della camera di compressione, il volume occupato dall'acqua di mare corrisponda al volume di aria che transita all'interno del tubo della turbina.

Nel caso dell'onda del primo tipo, questo volume corrisponde, trascurando i setti immersi, a:

$$V_1 = (1.50\ m \times 5) \times 1.00\ m \times 0.90\ m = 6.75\ m^3.$$

Poiché il tempo di salita del livello del mare corrisponde a metà periodo d'onda, la portata d'aria risulta pari a:

$$Q_1 = V_1 / (3/2\ s) = 4.50\ m^3/s.$$

Considerando il diametro interno del tubo di 0.50 m, la velocità dell'aria risulta:

$$v_1 = Q_1 / (\pi \times (0.50\ m)^2 / 4) = 22.9\ m/s.$$

In queste condizioni il numero di Reynolds vale quindi:

$$Re_1 = D \times v_1 / \nu = 0.50\ m \times 22.9\ m/s / 1.46e\text{-}5\ m^2/s = 7.85e5.$$

Nel caso dell'onda del secondo tipo si ha che:

$$V_2 = (1.50\ m \times 5) \times 1.00\ m \times 0.50\ m = 3.75\ m^3.$$

Da cui:

$$Q_2 = V_2 / (7/2\ s) = 1.07\ m^3/s.$$

Quindi la velocità dell'aria risulta:

$$v_2 = Q_2 / (\pi \times (0.50\ m)^2 / 4) = 5.5\ m/s.$$

Ed il Numero di Reynolds:

$$Re_2 = D \times v_2 / \nu = 0.50\ m \times 5.5\ m/s / 1.46e\text{-}5\ m^2/s = 1.87e5.$$

In entrambi i casi il flusso all'interno del condotto della turbina è di tipo turbolento, quindi è necessario effettuare una simulazione fluidodinamica considerando la turbolenza.
Fra i vari modelli di simulazione della turbolenza, è stato utilizzato il modello Standard K-e, che fornisce una descrizione sufficientemente realistica del flusso per tubi e condotti.

### 3.4.3 Fluidi incomprimibili

Per determinare invece se il flusso può essere simulato considerando per i fluidi un comportamento di tipo incomprimibile bisogna determinare il Numero di Mach definito dall'equazione:

$$Ma = v / c$$

dove:

- v è la velocità della corrente,

- c è la velocità caratteristica adiabatica o velocità del suono nel fluido considerato.

Poiché la velocità del suono relativa all'aria è pari a 330 m/s ed il flusso ha una velocità stimata, in prima approssimazione, di 22.9 m/s (condizioni di velocità massima tra le due tipologie d'onda), il Numero di Mach risulta:

$$Ma = 22.9 \text{ m/s} / 330 \text{ m/s} = 0.07.$$

In questo caso, poiché Ma risulta inferiore a 0.3, il comportamento del fluido può essere considerato incomprimibile.

## 3.5 Il Mesh

La discretizzazione spaziale sostituisce lo spazio continuo con un numero finito di celle, in alcuni punti caratteristici delle quali si determina il valore numerico delle variabili in gioco. L'accuratezza della simulazione numerica dipende, quindi, direttamente dalle dimensioni della mesh. La dimensione della griglia di magliatura deve essere, infatti, sufficientemente piccola per simulare tutte le caratteristiche fisiche del flusso reale.
Poiché maggiore è il numero di celle totali maggiore è il tempo di calcolo, la scelta delle dimensioni delle celle, nelle varie zone del modello, deve essere fatta in modo da ottenere la necessaria accuratezza dei risultati limitando il più possibile il numero totale delle celle e quindi il tempo di calcolo.

Nella zona del modello contente l'acqua marina e nella zona contenente l'aria, ma sufficientemente distante dal tubo della turbina, le velocità in gioco sono relativamente basse (dell'ordine del metro al secondo) in entrambe le tipologie di onda simulate. Per questo motivo la dimensione massima della cella non dipende dalla velocità dei flusso ma dall'accuratezza che si vuole avere nell'individuazione della superficie di interfaccia tra acqua marina ed aria. In questo caso, vista l'altezza della fluttuazione del pelo libero all'interno della camera, paragonabile all'altezza delle onde (90 cm e 50 cm), si possono considerare celle di forma quasi cubica di dimensione dell'ordine dei 2.5 cm.

Nella zona in prossimità del tubo della turbina la dimensione massima delle celle è invece legata alla velocità del flusso, che può raggiungere valori dell'ordine di qualche decina di metri al secondo, come visto in precedenza.
In queste zone bisogna porre particolare attenzione agli effetti delle pareti ed in particolare al profilo di velocità in prossimità delle stesse simulato, nel caso di utilizzo di modelli di turbolenza di tipo RAS, come il modello k-e, utilizzando specifiche funzioni di pareti (wall functions).
Perché questo tipo di funzioni di pareti diano risultati accettabili bisogna che sia rispettata la seguente condizione:

$$30 < y+ < 200$$

dove y+ è un paricolare parametro definito dalla seguente espressione:

$$y+ = c_t \, y / \nu$$

dove $c_t$ è una velocità di riferimento, definita come la radice quadrata del rapporto tra la tensione tangenziale alla parete $\tau_0$ e la densita $\rho$; $\nu$ è la viscosità cinematica ed y la distanza del centro della cella più vicina alla parete e la parete stessa.
Per definire la dimensione massima delle celle in prossimità delle pareti del tubo si può quindi procedere con il seguente ragionamento:

- si considera per y+ un valore di 200,
- si stima il valore del coefficiente di attrito di parete f attraverso la formula di Blasius, valida con buona approssimazione, per moto turbolento (Re circa $10^5$) all'interno dei tubi:
  $f = 0.0791 \, Re^{-0.25}$
- si individua il valore della velocità caratteristica ct
  $ct = |U| \sqrt{(f/2)}$ con U pari alla velocità media nel condotto
- e quindi si ricava la dimensione massima della cella $\Delta y$

$$\Delta y = 2y = 2\ y+ \nu / c_t$$

In questo caso, considerando le condizioni più gravose corrispondenti all'onda di tipo 1 (wind waves), si ottiene per la dimensione della cella il valore di circa 7 mm.
Questo valore giustifica le considerazioni riportate nel paragrafo precedente sulla geometria del modello (3.1) e l'approssimazione di considerare lo spessore del tubo di 10 mm al posto dei 4 mm reali.

Il mesh è stato quindi realizzato suddividendo da prima l'intero modello 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 ed estesa longitudinalmente all'intero modello, con celle di dimensione di 6/7 mm. La zona di transizione tra le due differenti dimensioni delle celle è stata realizzata di estensione pari a 15/20 cm.
In figura 3.5.1 è riportato il modello geometrico completo con l'indicazione di cinque zone di particolare interesse per il mesh riportate nelle figure da 3.5.2 a 3.5.6.

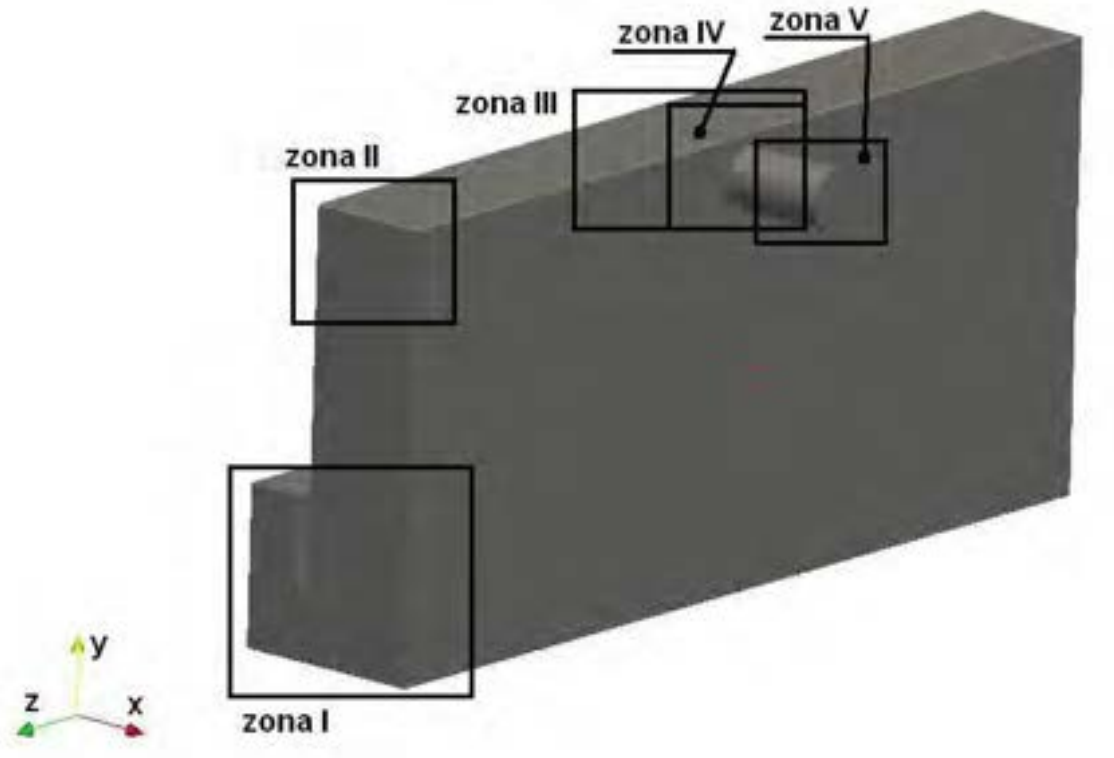


**Fig. 3.5.1 – Modello geometrico – Zone di particolare interesse per il mesh**

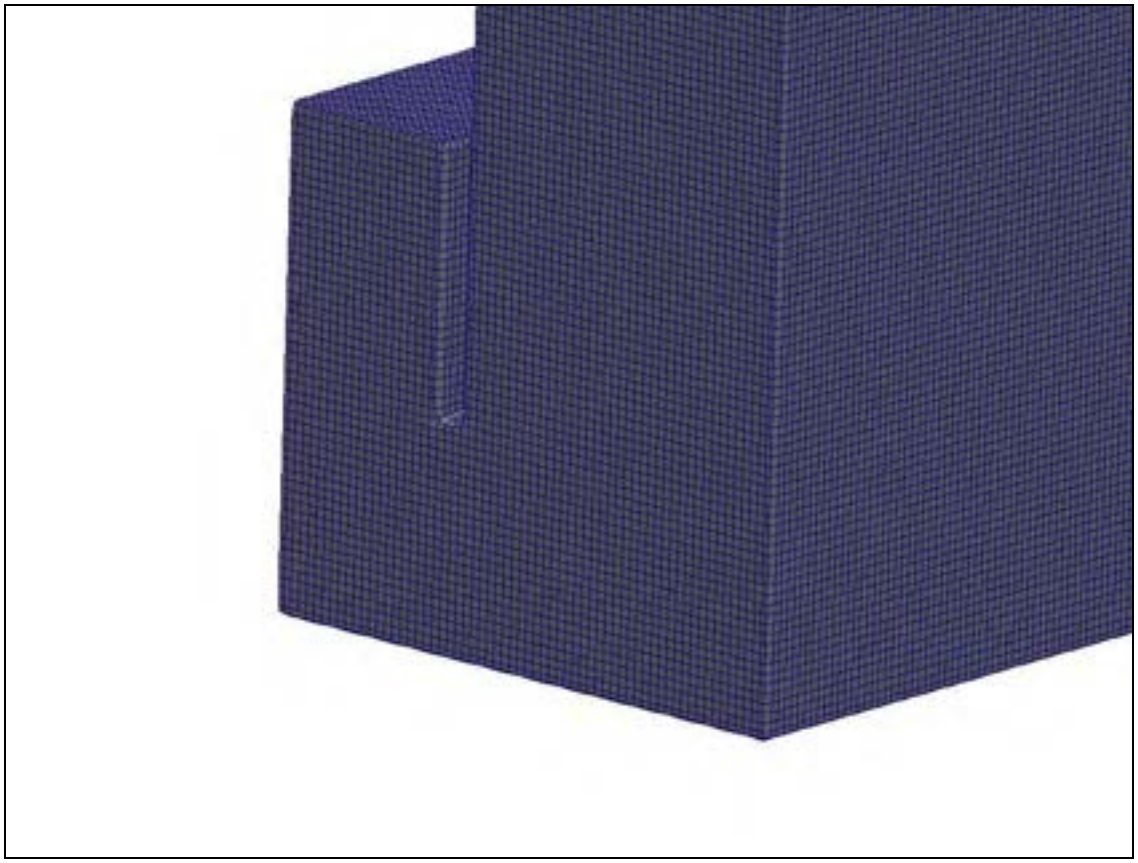

Fig. 3.5.2 – Mesh – Zona I

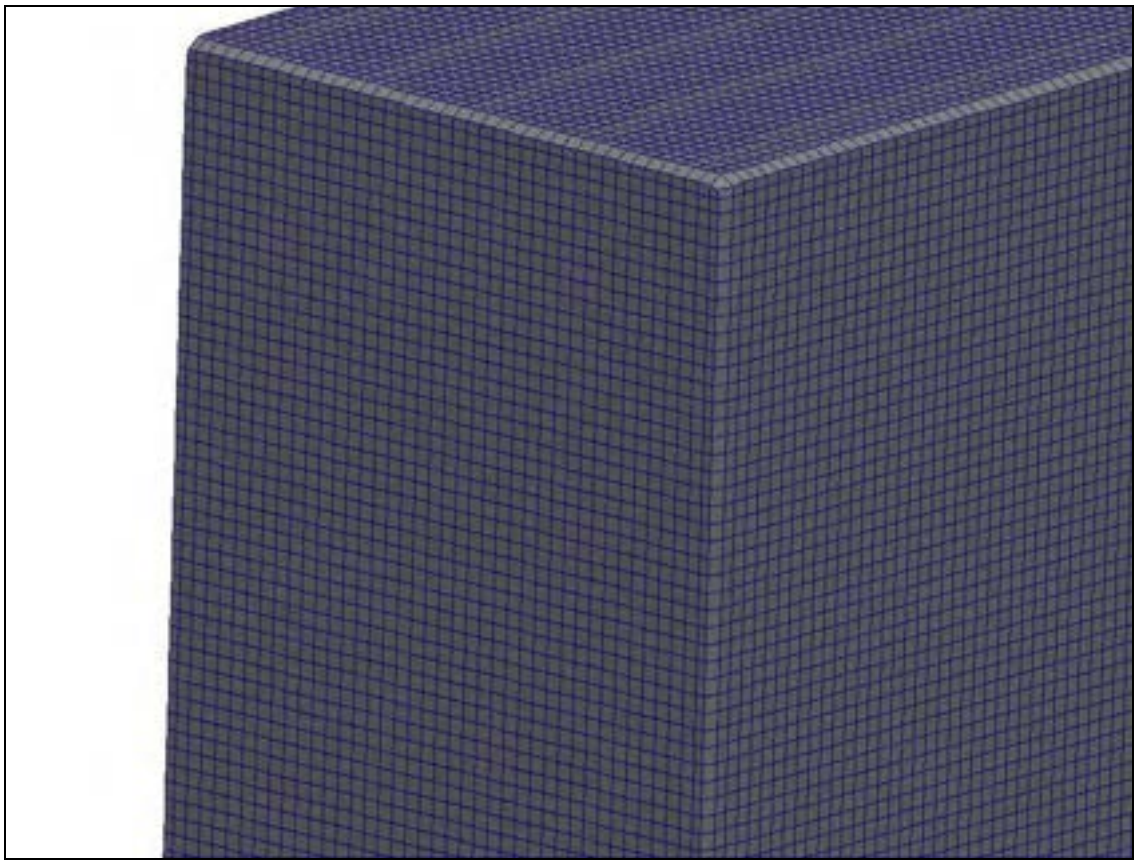

Fig. 3.5.3 – Mesh – Zona II

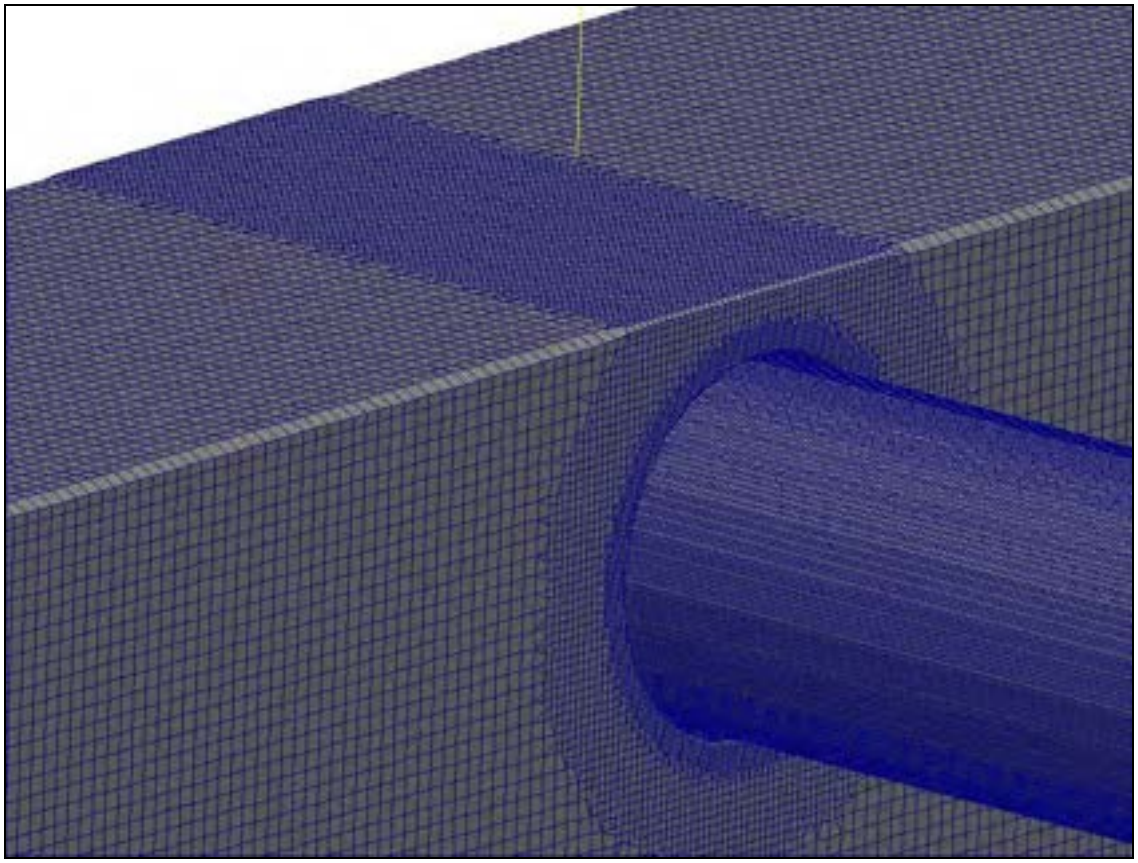

Fig. 3.5.4 – Mesh – Zona III

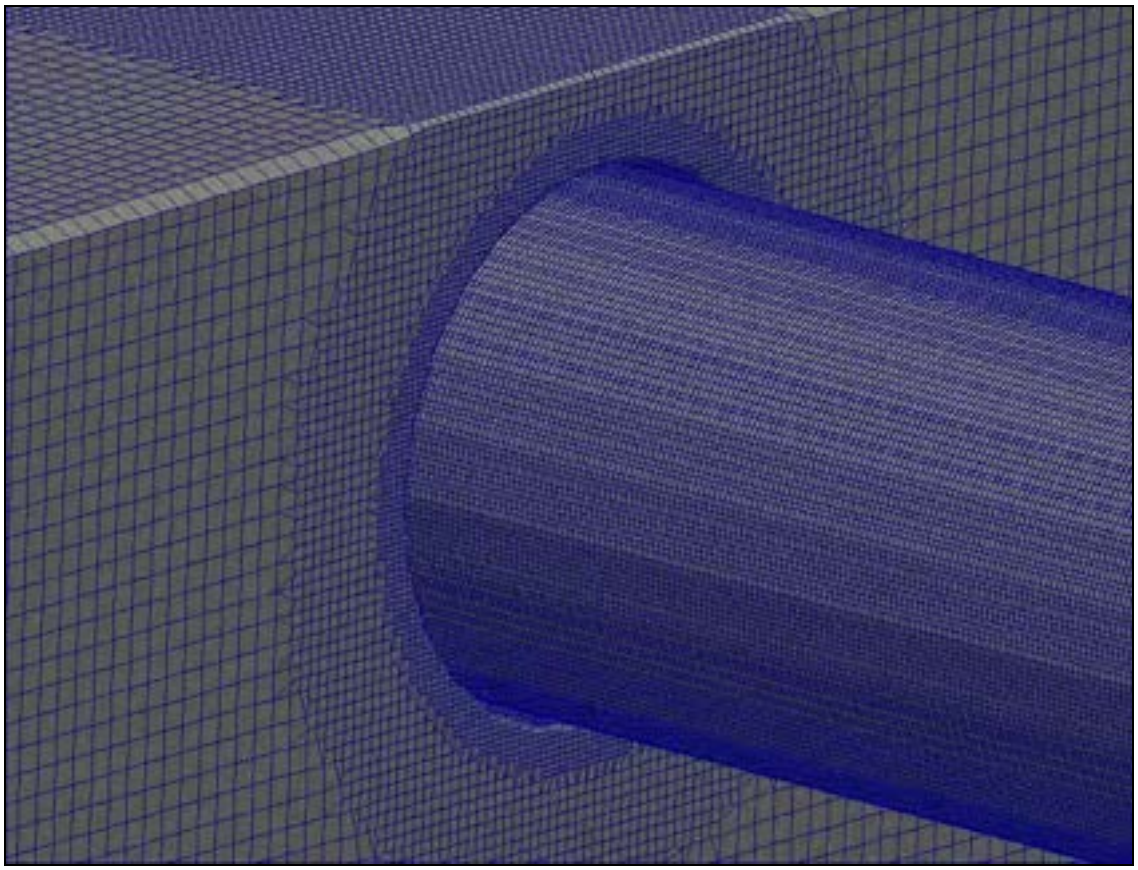

Fig. 3.5.5 – Mesh – Zona IV

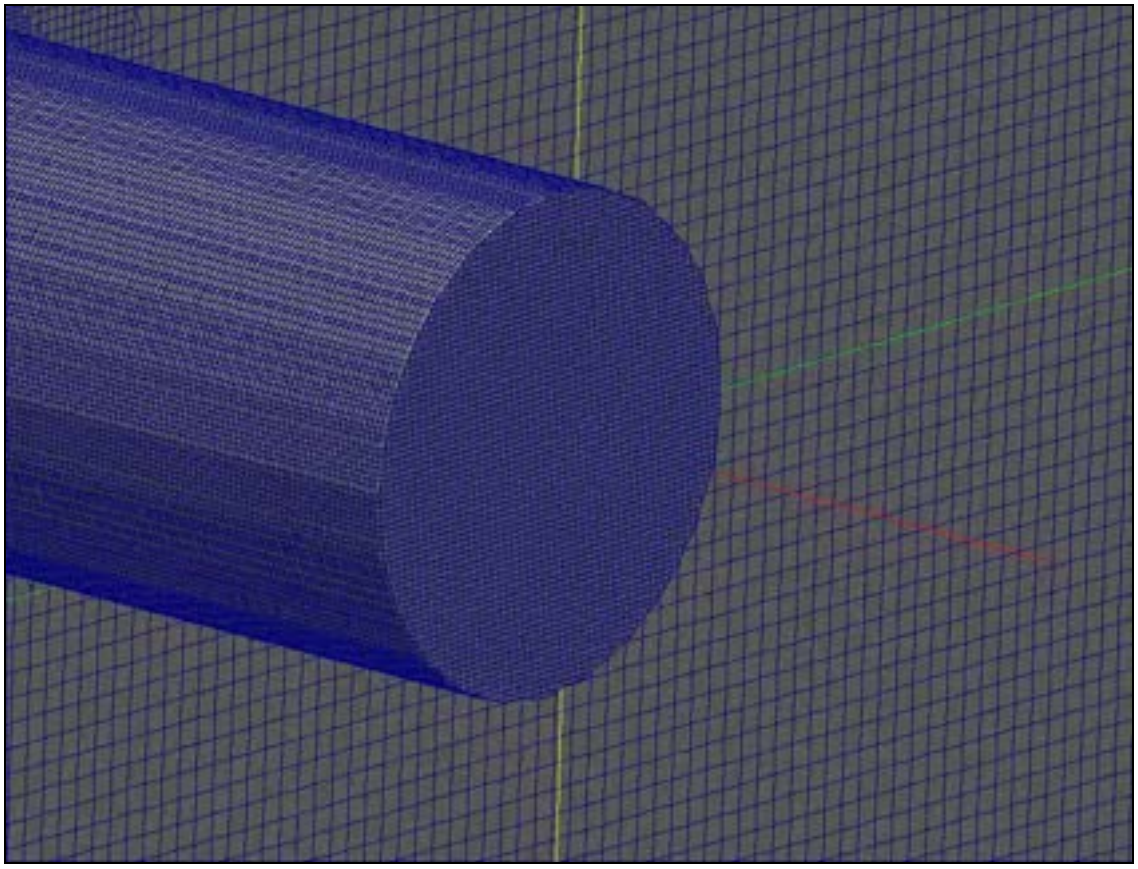

Fig. 3.5.6 – Mesh – Zona V

Il mesh così realizzato è costituito da un totale di 4482095 celle.

## *3.6 Le condizioni al contorno ed iniziali*

Nella figura 3.6.1 è riportato il modello completo (in due viste) con l'indicazione delle condizioni al contorno dell'intera superficie perimetrale.

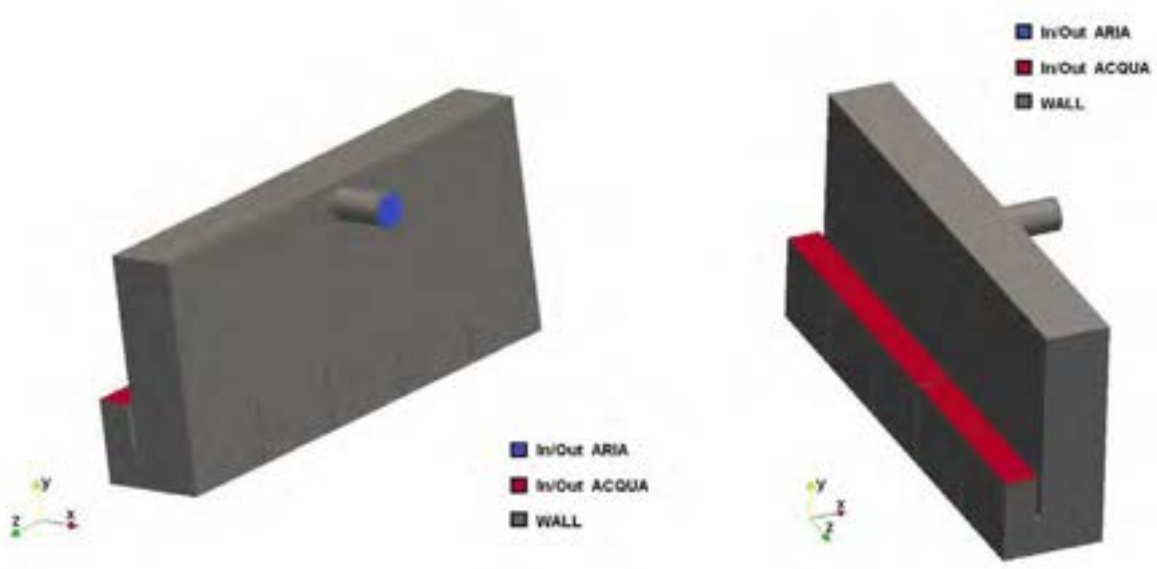


Fig. 3.6.1 – Modello geometrico – Condizioni al contorno

Come si vede dalla figura le superfici perimetrali del modello sono tutte costituite da pareti (boundary di tipo wall) ad eccezione della superficie di ingresso/uscita dell'acqua marina, costituita da cinque differenti superfici rettangolari, e della superficie circolare di uscita/entrata dell'aria.

Nell'applicazione delle condizioni iniziali ed al contorno per la pressione si è preferito, per motivi di semplicità, di imporre al posto della pressione assoluta p la pressione decurtata della componente idrostatica p-rgh.

Sulla superficie di ingresso/uscita aria sono state imposte, per le variabili velocità U e pressione p-rhg, delle condizioni al contorno (BCs) di tipo derivato (presenti nel codice OpenFOAM), che rispetto alle semplici condizioni di valore o gradiente imposto, hanno la caratteristica di preservare la stabilità del calcolo.
Per la velocità U è stata imposta la condizione *pressureInletOutletVelocity*, caratterizzata dall'applicazione della condizione di gradiente nullo sia per la componente normale sia per la componente tangenziale alla superficie nel caso di flusso in uscita, mentre nel caso di flusso in ingresso l'applicazione della condizione di valore nullo per la sola componente tangenziale.
Per la pressione p-rgh è stata imposta la condizione *totalPressure*, caratterizzata da una pressione imposta in caso di flusso in uscita ed, in caso di flusso in entrata, da una pressione calcolata a partire dalla pressione imposta modificata tenendo in considerazione anche il valore della velocità U. In questo caso è stato imposto il valore p-rgh = 0 Pa (pressione relativa).

Sulla superficie di ingresso/uscita dell'acqua di mare è stata imposta le stessa condizione al contorno per la velocità U, la condizione *pressureInletOutletVelocity*. Per quanto riguarda invece la condizione al contorno per la pressione p-rgh, è stata imposta la *uniformTotalPressure*, una particolare *totalPressure*, nella quale il valore della pressione può anche essere variabile nel tempo, condizione da imporre in queste simulazioni CFD.

Nel caso dell'onda del primo tipo (wind waves), considerando quanto riportato nel paragrafo 3.1, il livello dell'acqua varia in modo sinusoidale intorno ad un valore medio pari a B1+B7+H0/2= 2.15 m, con un oscillazione di +/- $H_0/2$ = 0.45 m e con un periodo d'onda $T_0$ = 3 s.
La pressione p-rgh varia quindi intorno ad un valore medio
p-rgh medio = 0 Pa - 1025 kg/m3 x -9.81 m/s2 x 2.15 m = 21618.8 Pa
con una variazione di
$\Delta$(p-rgh) = +/- (0 Pa - 1025 kg/m3 x -9.81 m/s2 x 0.45 m) = +/- 4524.9 Pa.
L'evoluzione sinusoidale della pressione è stato introdotto nel modello inserendo nella condizione al contorno *uniformTotalPressure* una tabella con l'andamento nel tempo della variabile p-rgh. Nella tabella 3.6.I sono riportati i primi 9 punti della tabella corrispondenti alla prima onda.

| Tempo | p-rgh |
|---|---|
| S | Pa |
| 0.000 | 21618.8 |
| 0.375 | 24818.3 |
| 0.750 | 26143.7 |
| 1.125 | 24818.3 |
| 1.500 | 21618.8 |
| 1.875 | 18419.2 |
| 2.250 | 17093.9 |
| 2.625 | 18419.2 |
| 3.000 | 21618.8 |

**Tab. 3.6.I – Andamento pressione onda del primo tipo, wind waves**

Nel caso dell'onda del secondo tipo (long swells), considerando quanto riportato nel paragrafo 3.1, il livello dell'acqua varia in modo sinusoidale intorno ad un valore medio pari a B1+B7+H0/2= 1.95 m, con un oscillazione di +/- $H_0/2$ = 0.25 m e con un periodo d'onda $T_0$ = 7 s.
La pressione p-rgh varia quindi intorno ad un valore medio
p-rgh medio = 0 Pa - 1025 kg/m3 x -9.81 m/s2 x 1.95 m = 19607.7 Pa
con una variazione di
$\Delta$(p-rgh) = +/- (0 Pa - 1025 kg/m3 x -9.81 m/s2 x 0.25 m) = +/- 2513.8 Pa.
L'evoluzione sinusoidale della pressione è stato introdotto nel modello inserendo nella condizione al contorno *uniformTotalPressure* una tabella con l'andamento nel tempo della variabile p-rgh. Nella tabella 3.6.II sono riportati i primi 9 punti della tabella corrispondenti alla prima onda.

| Tempo | p-rgh |
|---|---|
| S | Pa |
| 0.000 | 19607.7 |
| 0.875 | 21385.3 |
| 1.750 | 22121.6 |
| 2.625 | 21385.3 |
| 3.500 | 19607.7 |
| 4.375 | 17830.2 |
| 5.250 | 17093.9 |
| 6.125 | 17830.2 |
| 7.000 | 19607.7 |

**Tab. 3.6.II – Andamento pressione onda del secondo tipo, long swells**

Il livello dell'acqua di mare al tempo t = 0 è stato inserito come condizione iniziale. Nel primo tipo di onda, wind waves, è stata imposto un livello dell'acqua pari a 2.15 m, figura 3.6.2.

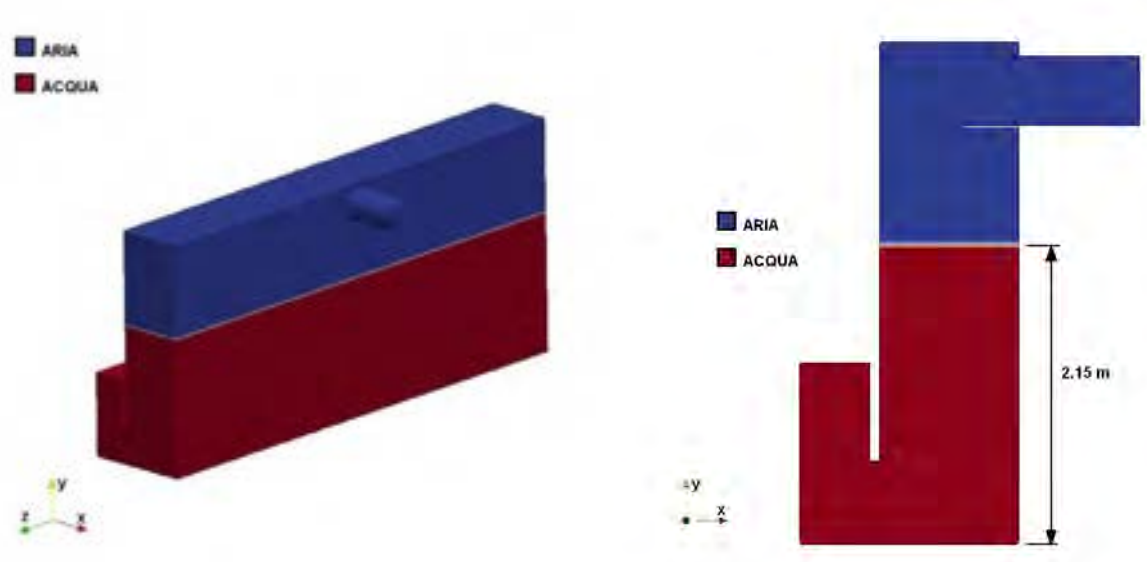


**Fig. 3.6.2 – Modello geometrico – Livello iniziale acqua onda tipo 1, wind waves**

Nel secondo tipo di onda, long swells, è stato imposto un livello dell'acqua pari a 1.95 m, figura 3.6.3.

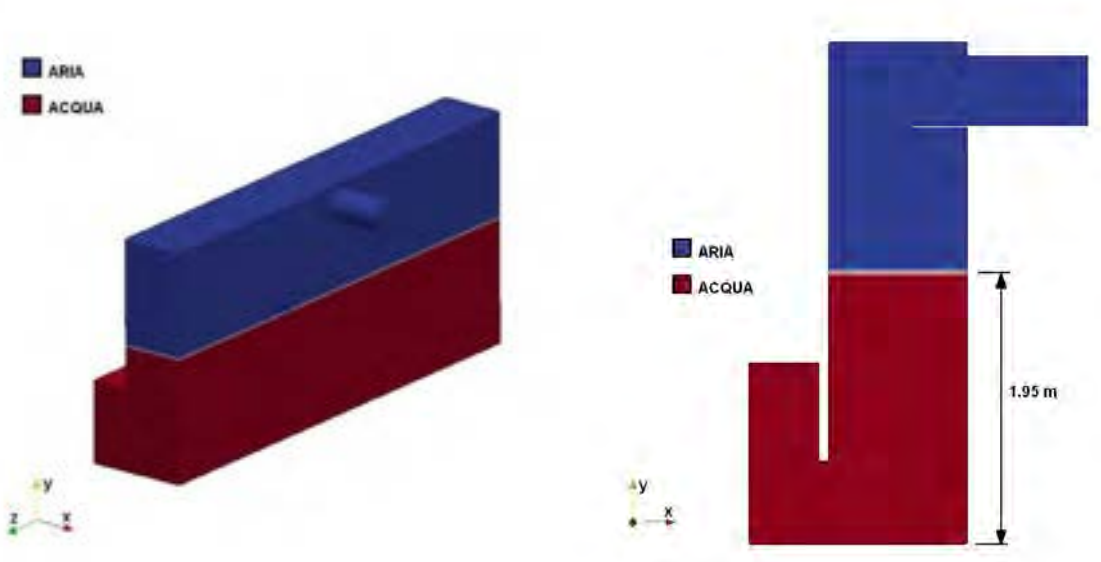


**Fig. 3.6.3 – Modello geometrico – Livello iniziale acqua onda tipo 2, long swells**

## *3.7 Dati caratteristici delle analisi CFD*

Per le simulazioni CFD è stato utilizzato il solutore interFoam. Questo appartiene al gruppo dei solutori per flussi multifase presenti all'interno del codice OpenFOAM.
In particolare è specifico per flussi bifase isotermici caratterizzati da fluidi immiscibili ed incomprimibili; ed utilizza come modello bifase il VOF (volume of fluids). Come riportato precedentemente nel paragrafo 3.4, questo è il tipo di flusso che si vuole simulare.

I due calcoli riportati nel presente lavoro, visto il notevole peso computazionale, sono stati fatti girare in multiprocessore ed in particolare sono stati utilizzati 128 processori.
Le macchine utilizzate sono quelle appartenenti al sistema di calcolo ad alte prestazioni del progetto CRESCO.

Per ogni tipologia di onda è stato simulato un tempo pari a circa tre cicli d'onda. Nel primo caso (wind waves) sono stati quindi simulati circa 9 s. Nel secondo caso (long swells) sono stati simulati quindi circa 21s. Ogni singolo calcolo ha richiesto un tempo macchina dell'ordine di 10/12 giorni.

# 4 Risultati

## *4.1 Risultati simulazione onda del primo tipo (wind waves)*

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti dalla simulazione con un onda del primo tipo (wind waves). Le caratteristiche di questa onda, facendo riferimento alla figura 3.1.1, sono un'ampiezza $H_0$ = 0.90 m ed un periodo $T_0$ = 3 s.
Sono riportati i risultati corrispondenti al terzo periodo d'onda, quindi dal tempo t = 6 s al tempo t = 9 s.

Nella figura 4.1.1 è riportato l'andamento della pressione p-rgh imposta sulla superficie di ingresso/uscita dell'acqua marina.

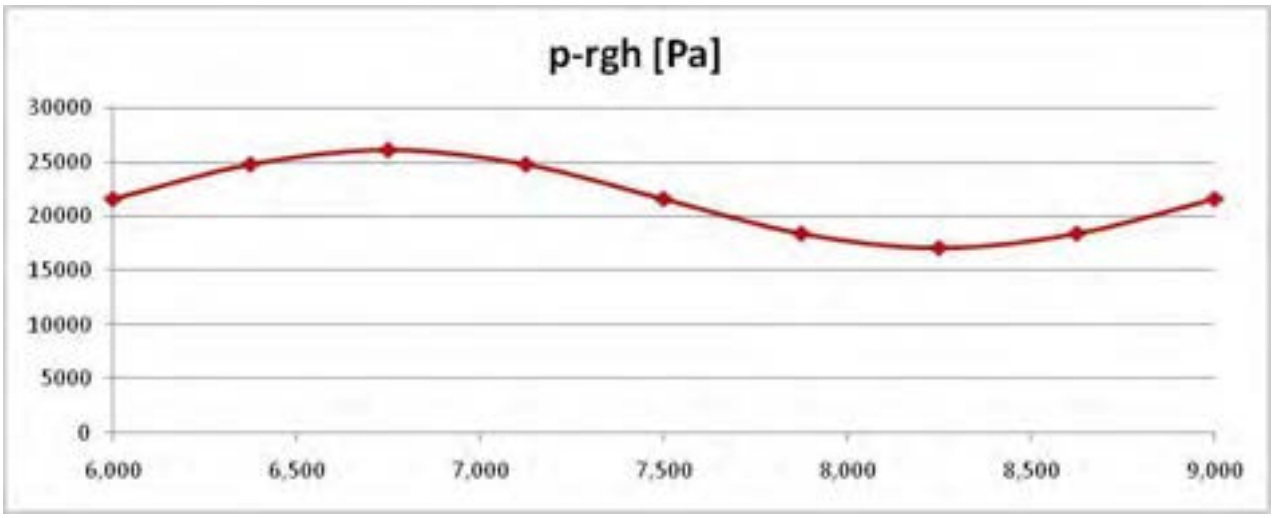


**Fig. 4.1.1 – Andamento della pressione p-rgh imposta sulla superficie In/Out acqua**

Nella figura 4.1.2 è riportato il confronto tra il livello dell'onda, corrispondente alla pressione p-rgh imposta, ed il livello dell'acqua all'interno della camera. Il livello all'interno della camera è valutato al centro della stessa, corrispondente ad un valore di x, pari a 1.07 m, figura 3.1.6 – sez.III.

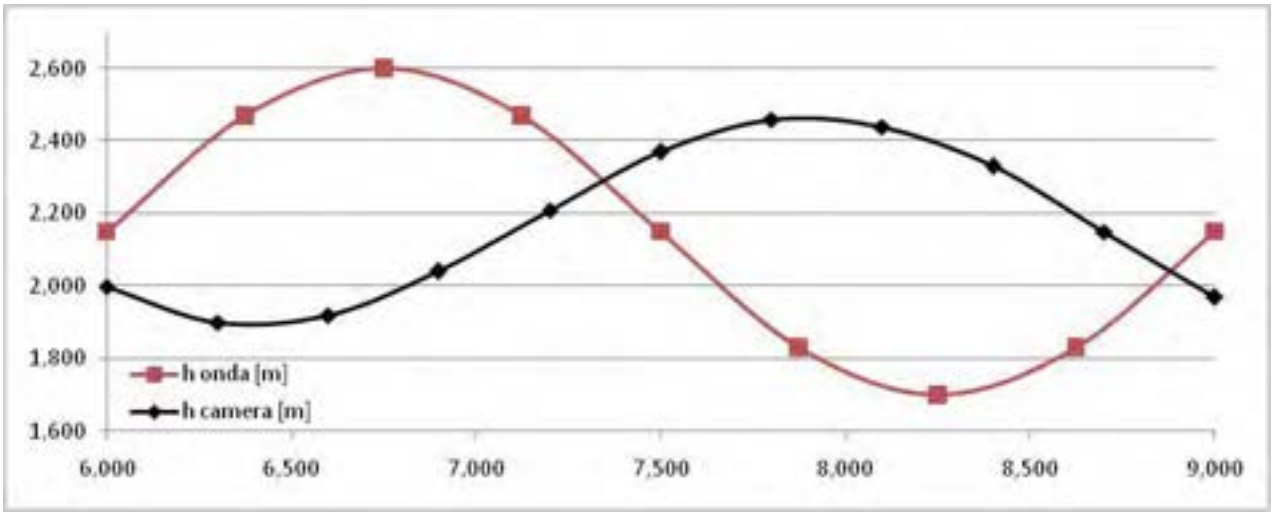


**Fig. 4.1.2 – Confronto livello onda e livello acqua all'interno della camera**

Nella figura 4.1.3 è riportato l'andamento della velocità nella direzione x (Ux), valutata al centro del tubo turbina ad una distanza dalla sezione di uscita di 0.43 m, corrispondente ad un valore della coordinata x pari a 2.00 m, figura 3.1.6 – sez.III.

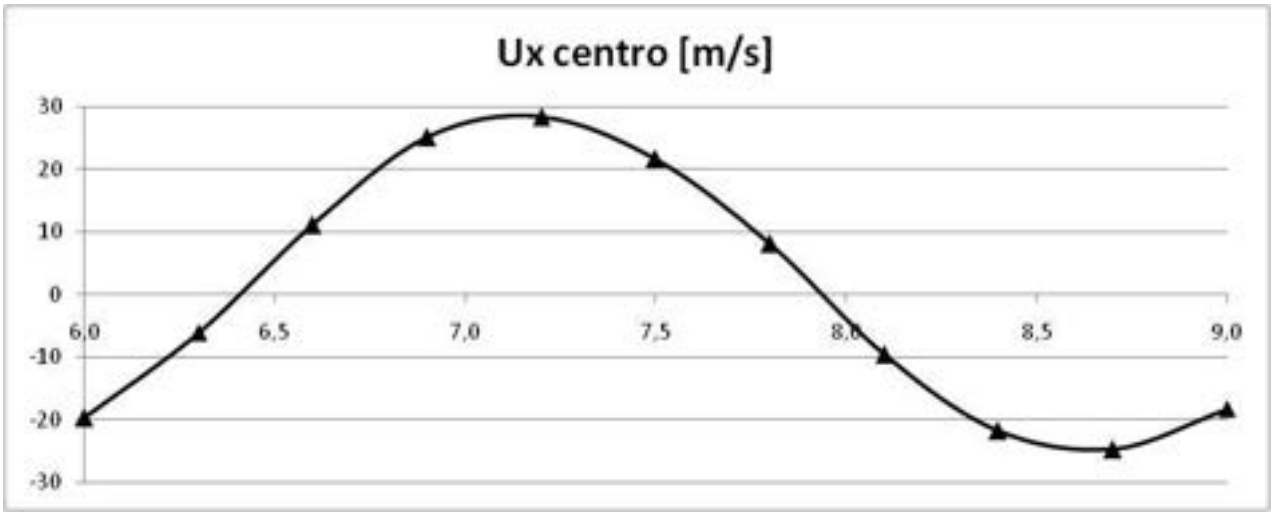


**Fig. 4.1.3 – Andamento della velocità Ux al centro del tubo turbina**

Nelle figure 4.1.4, 4.1.5 e 4.1.6 sono riportati rispettivamente il livello dell'acqua, l'andamento della velocità dell'acqua e l'andamento della velocità dell'aria, facendo sempre riferimento al piano della sez.III della figura 3.1.6, al tempo t = 6.0 s.

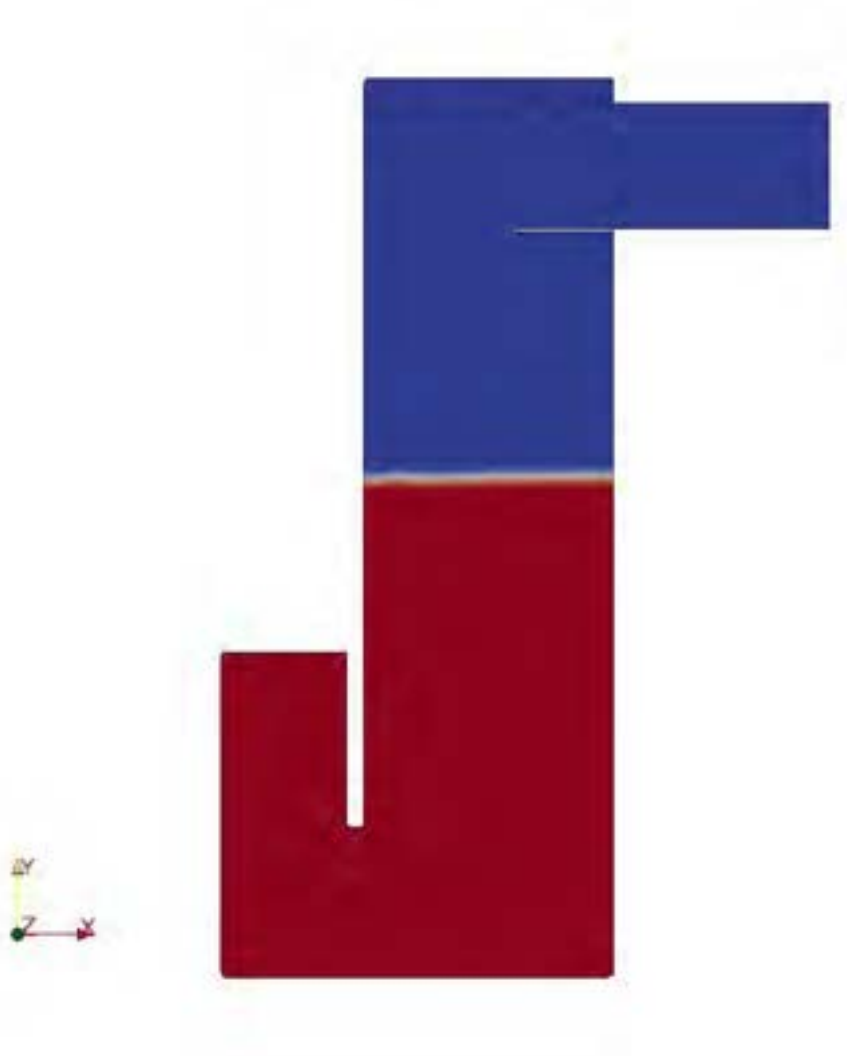


**Fig. 4.1.4 – Livello dell'acqua al tempo t=6.0s**

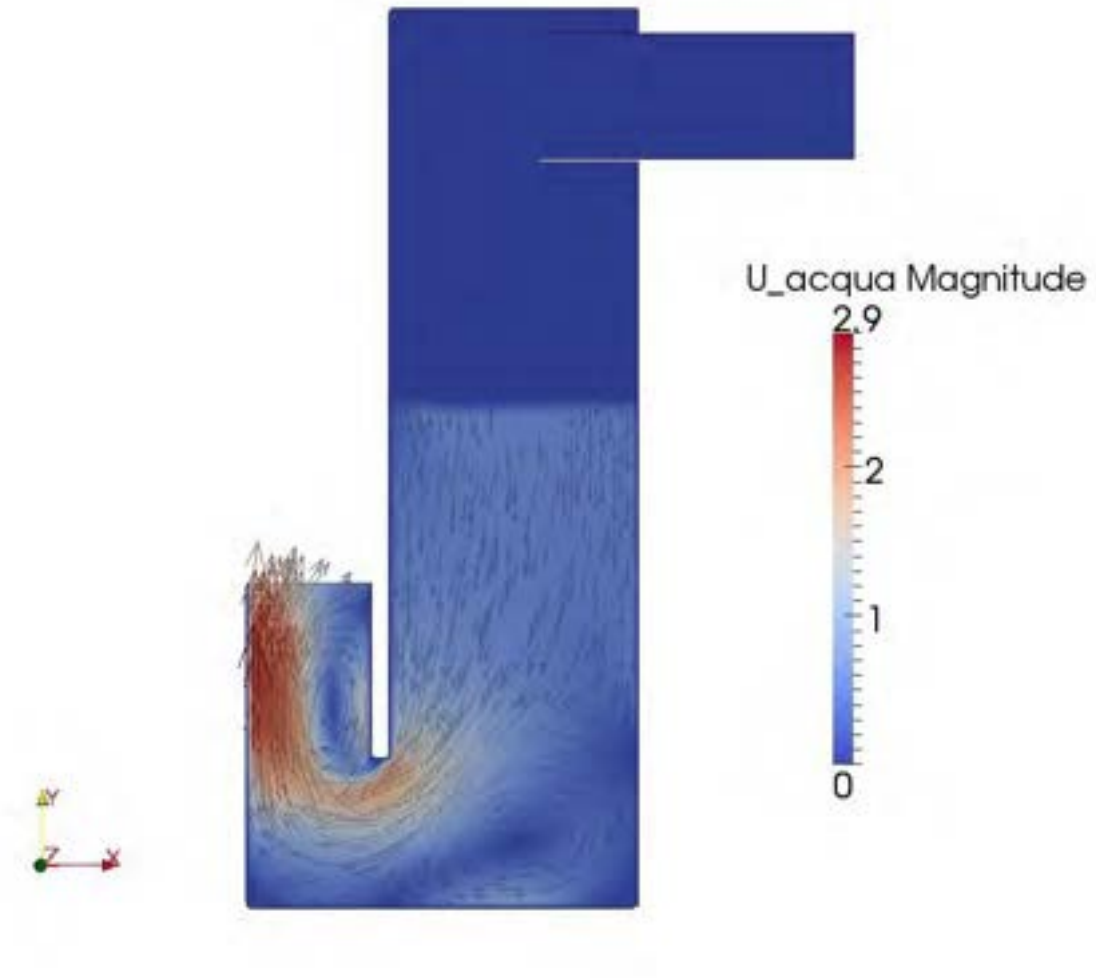


**Fig. 4.1.5 – Andamento della velocità dell'acqua al tempo t=6.0s**

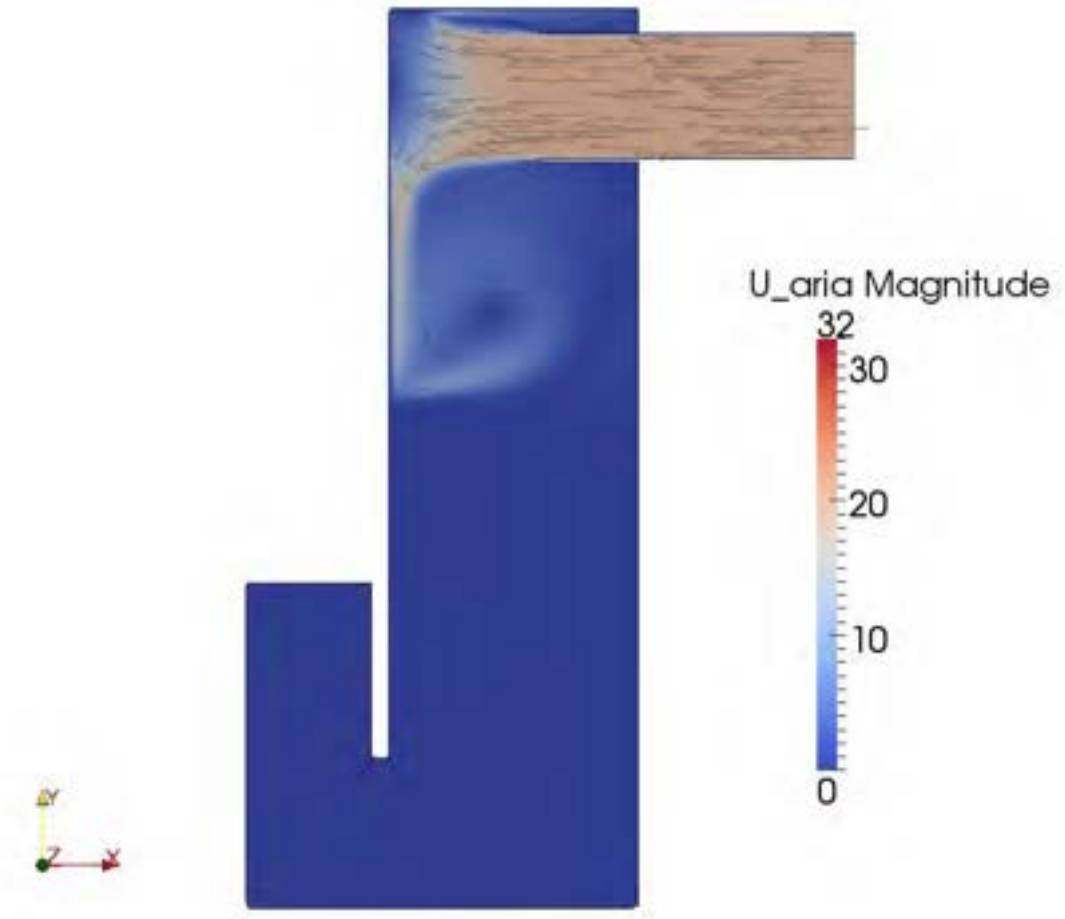


**Fig. 4.1.6 – Andamento della velocità dell'aria al tempo t=6.0s**

Nelle figure 4.1.7, 4.1.8 e 4.1.9 sono riportati rispettivamente il livello dell'acqua, l'andamento della velocità dell'acqua e l'andamento della velocità dell'aria, facendo sempre riferimento al piano della sez.III della figura 3.1.6, al tempo t = 6.3 s.

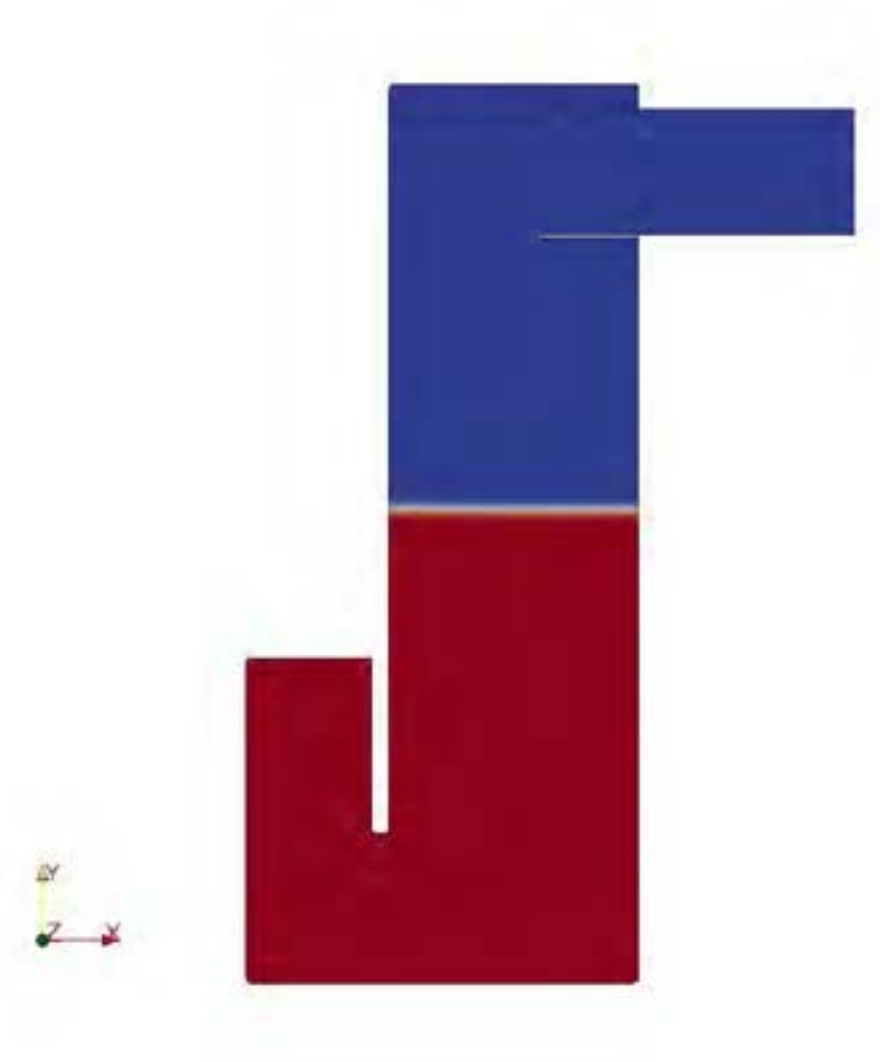

**Fig. 4.1.7 – Livello dell'acqua al tempo t=6.3s**

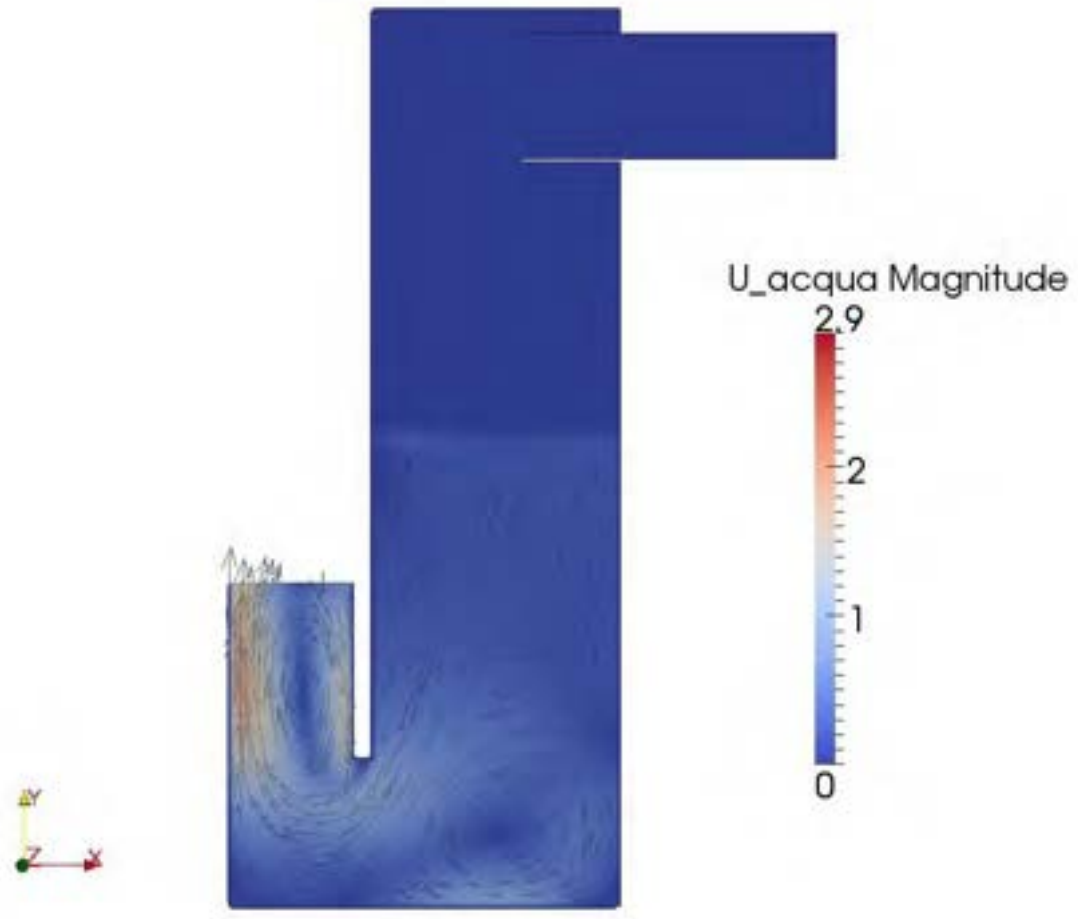


**Fig. 4.1.8 – Andamento della velocità dell'acqua al tempo t=6.3s**

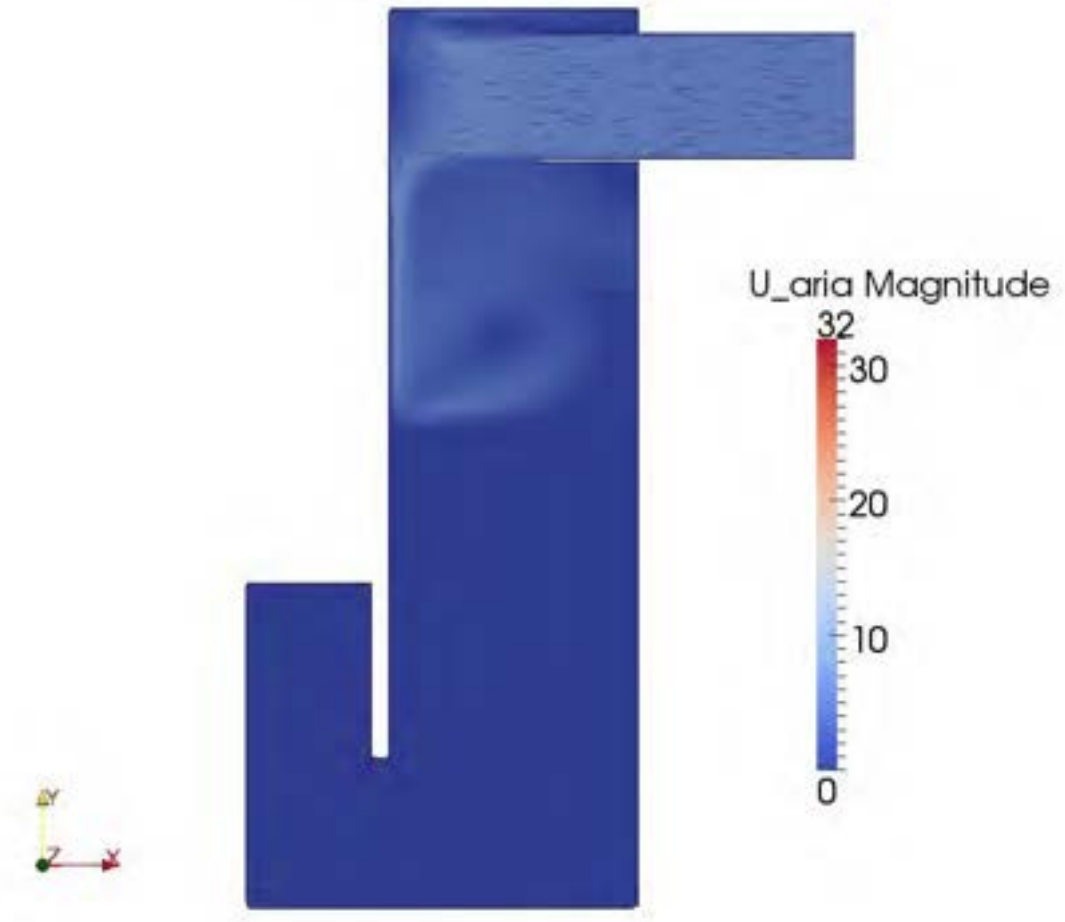


**Fig. 4.1.9 – Andamento della velocità dell'aria al tempo t=6.3s**

Nelle figure 4.1.10, 4.1.11 e 4.1.12 sono riportati rispettivamente il livello dell'acqua, l'andamento della velocità dell'acqua e l'andamento della velocità dell'aria, facendo sempre riferimento al piano della sez.III della figura 3.1.6, al tempo t = 6.6 s.

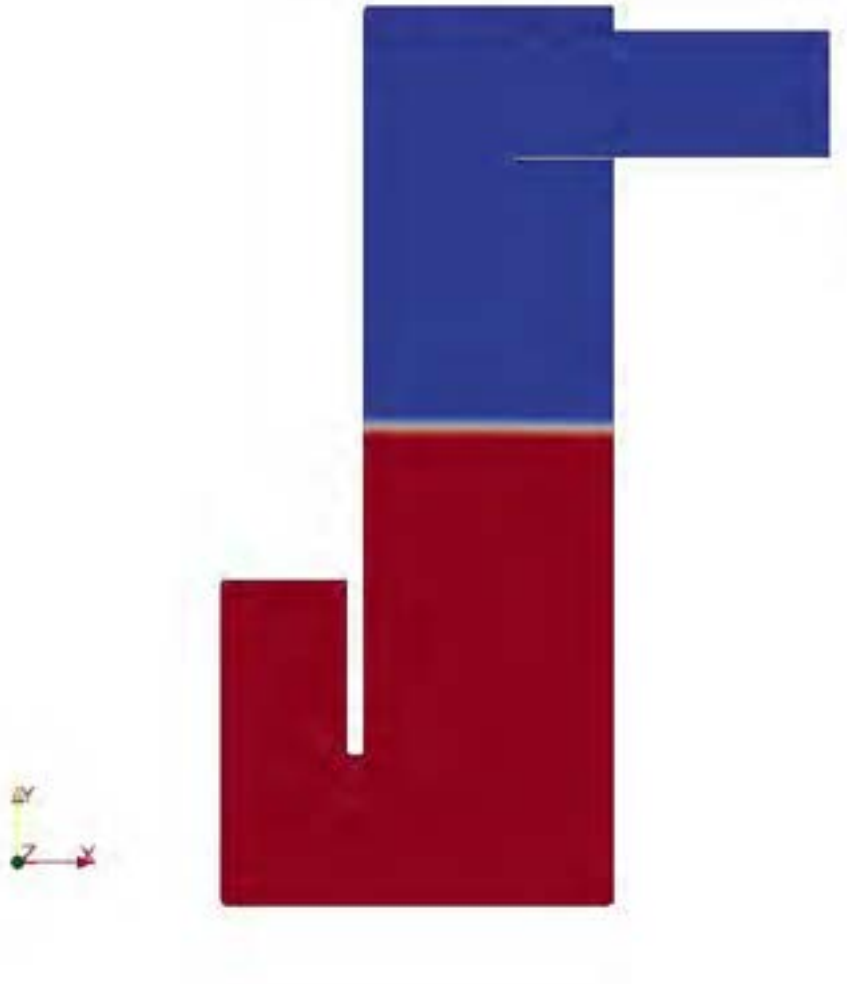

**Fig. 4.1.10 – Livello dell'acqua al tempo t=6.6s**

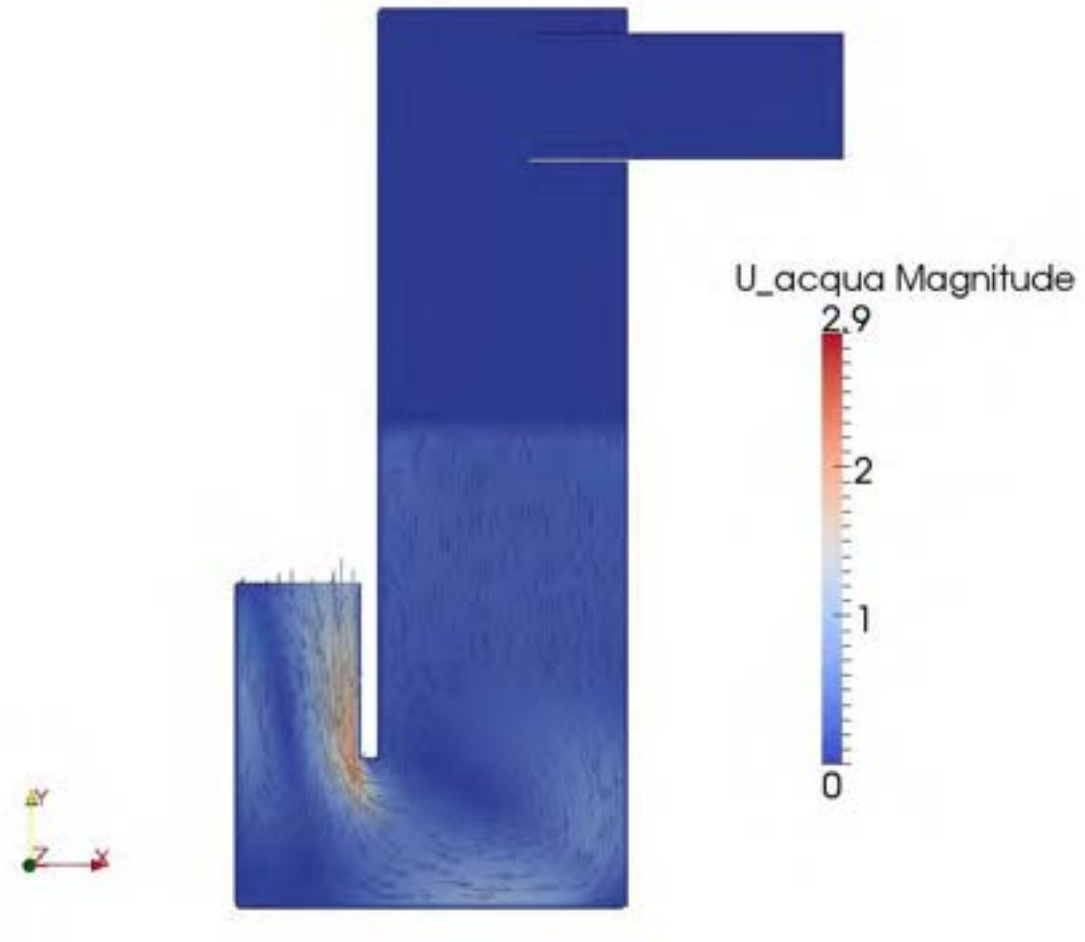


**Fig. 4.1.11 – Andamento della velocità dell'acqua al tempo t=6.6s**

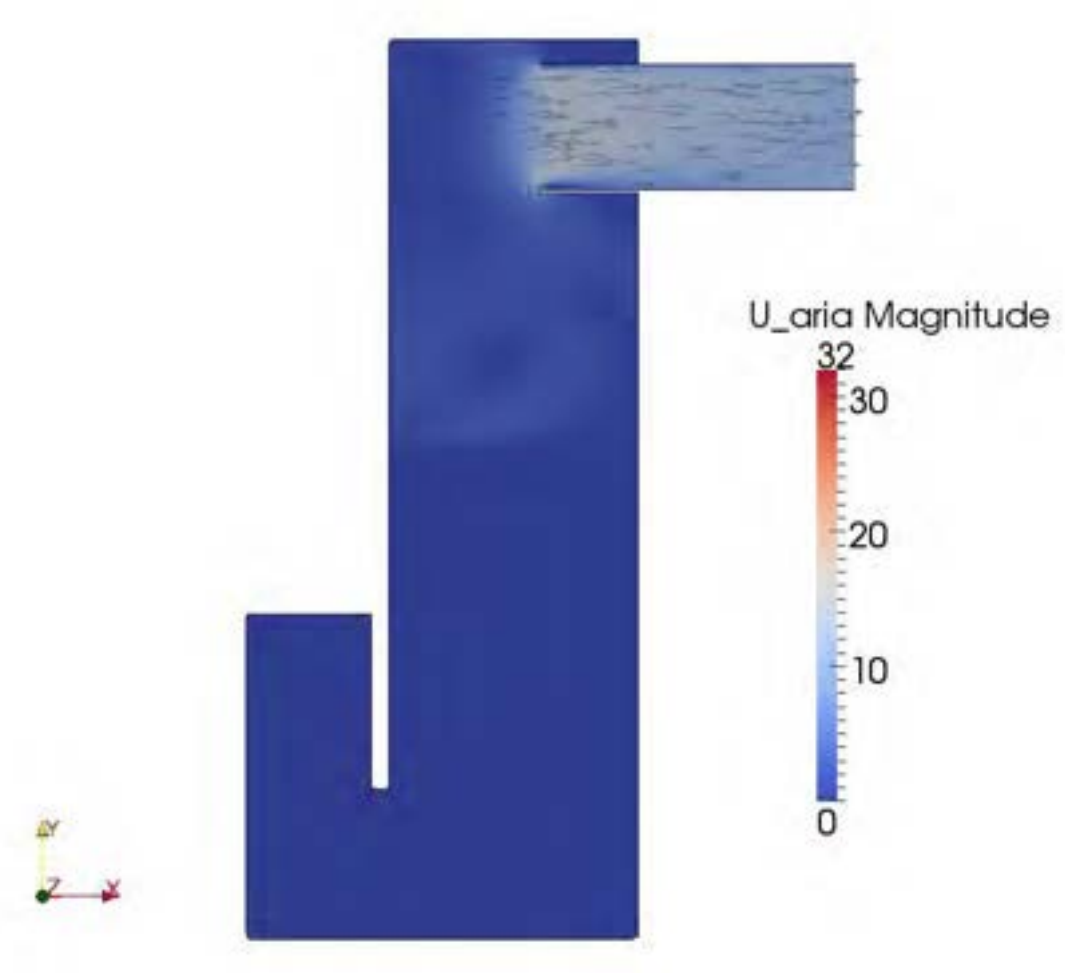


**Fig. 4.1.12 – Andamento della velocità dell'aria al tempo t=6.6s**

Nelle figure 4.1.13, 4.1.14 e 4.1.15 sono riportati rispettivamente il livello dell'acqua, l'andamento della velocità dell'acqua e l'andamento della velocità dell'aria, facendo sempre riferimento al piano della sez.III della figura 3.1.6, al tempo t = 6.9 s.

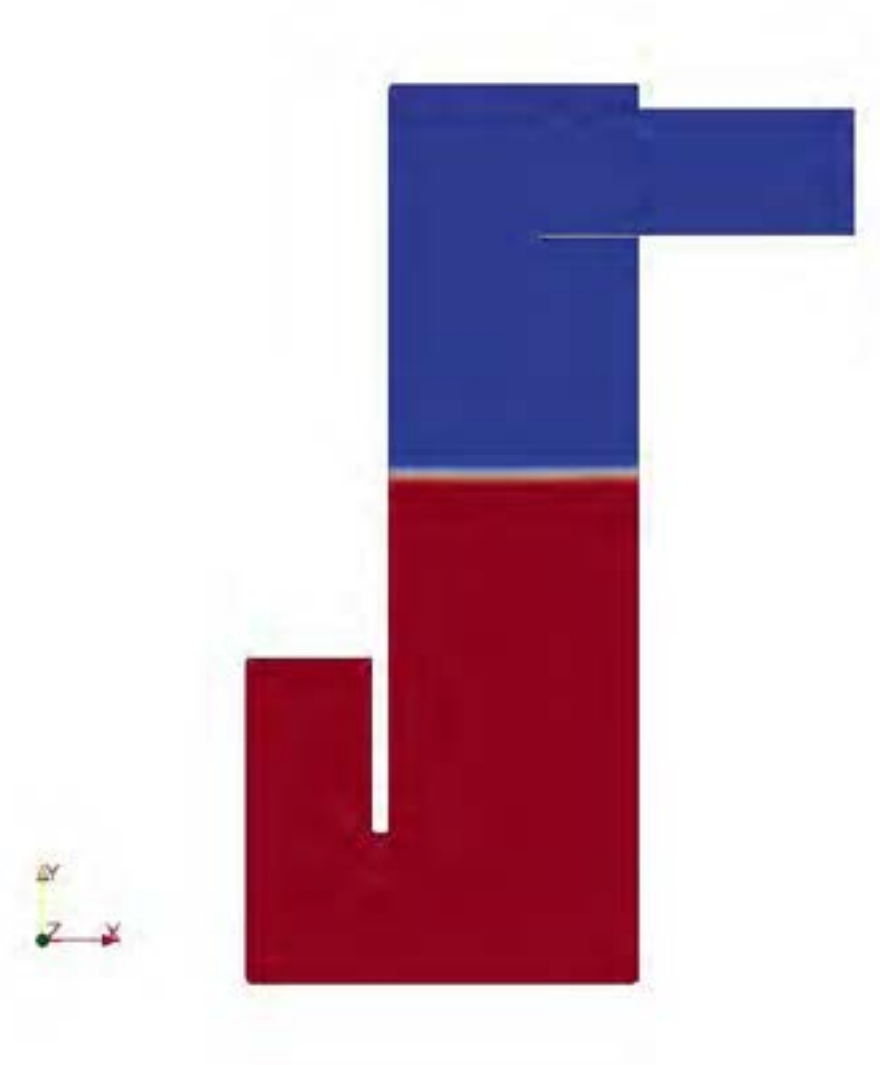

**Fig. 4.1.13 – Livello dell'acqua al tempo t=6.9s**

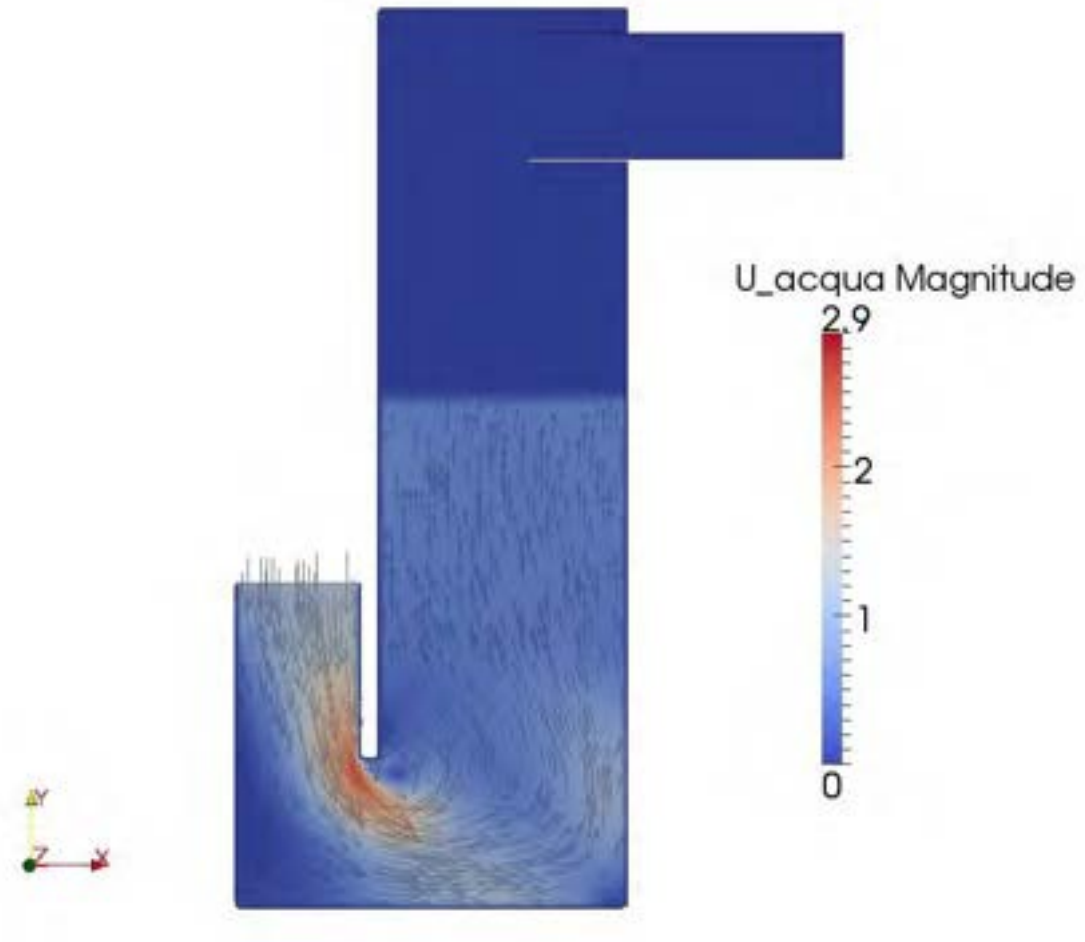


**Fig. 4.1.14 – Andamento della velocità dell'acqua al tempo t=6.9s**

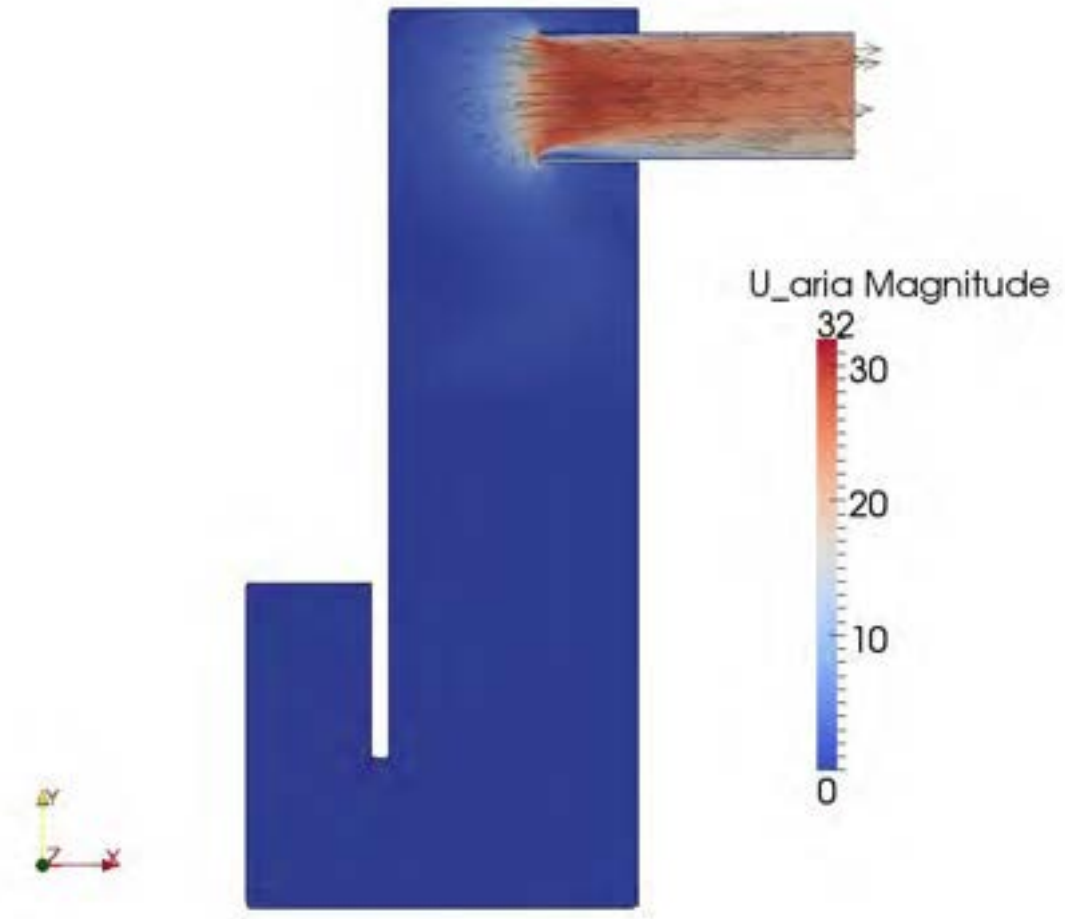


**Fig. 4.1.15 – Andamento della velocità dell'aria al tempo t=6.9s**

Nelle figure 4.1.16, 4.1.17 e 4.1.18 sono riportati rispettivamente il livello dell'acqua, l'andamento della velocità dell'acqua e l'andamento della velocità dell'aria, facendo sempre riferimento al piano della sez.III della figura 3.1.6, al tempo t = 7.2 s.

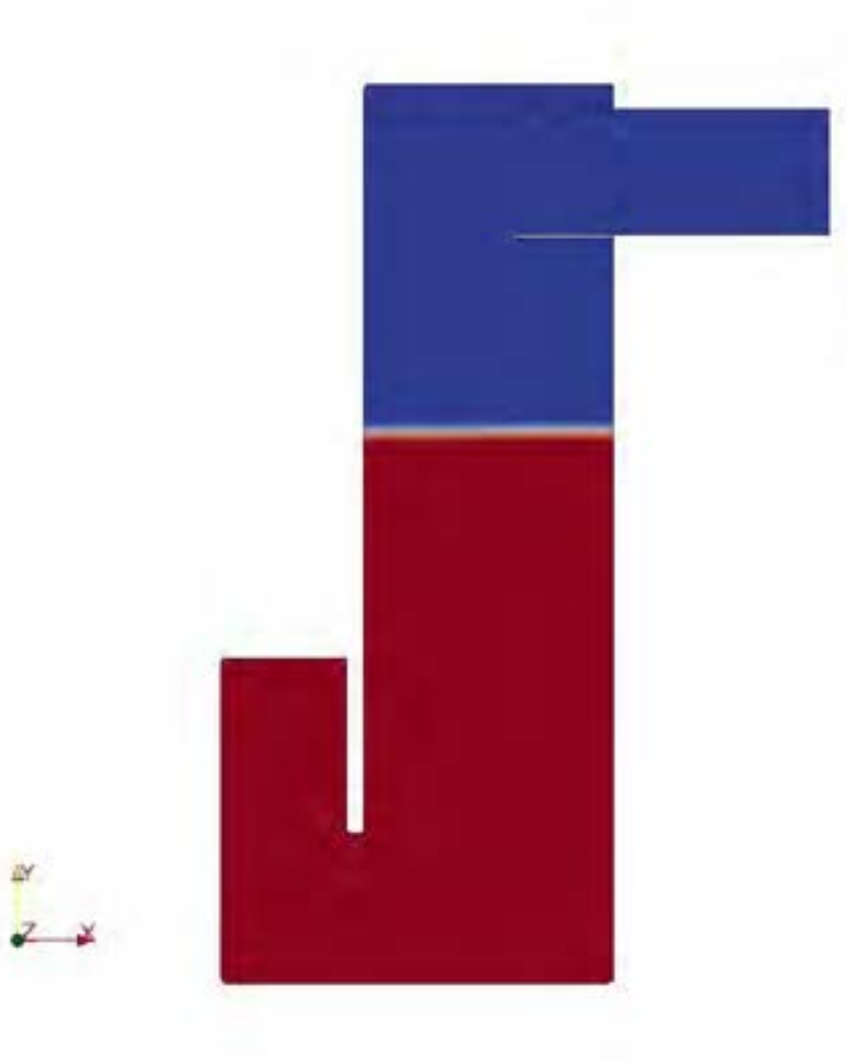

**Fig. 4.1.16 – Livello dell'acqua al tempo t=7.2s**

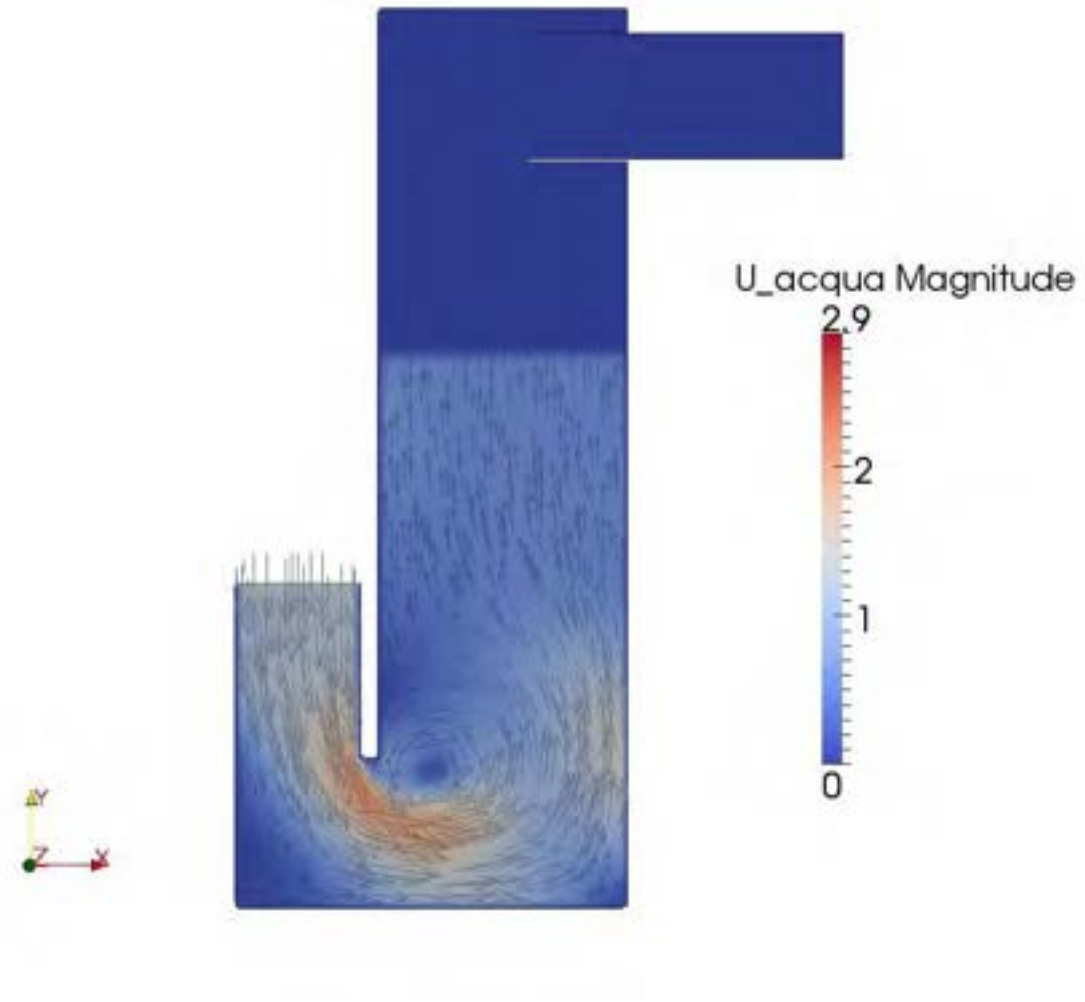


**Fig. 4.1.17 – Andamento della velocità dell'acqua al tempo t=7.2s**

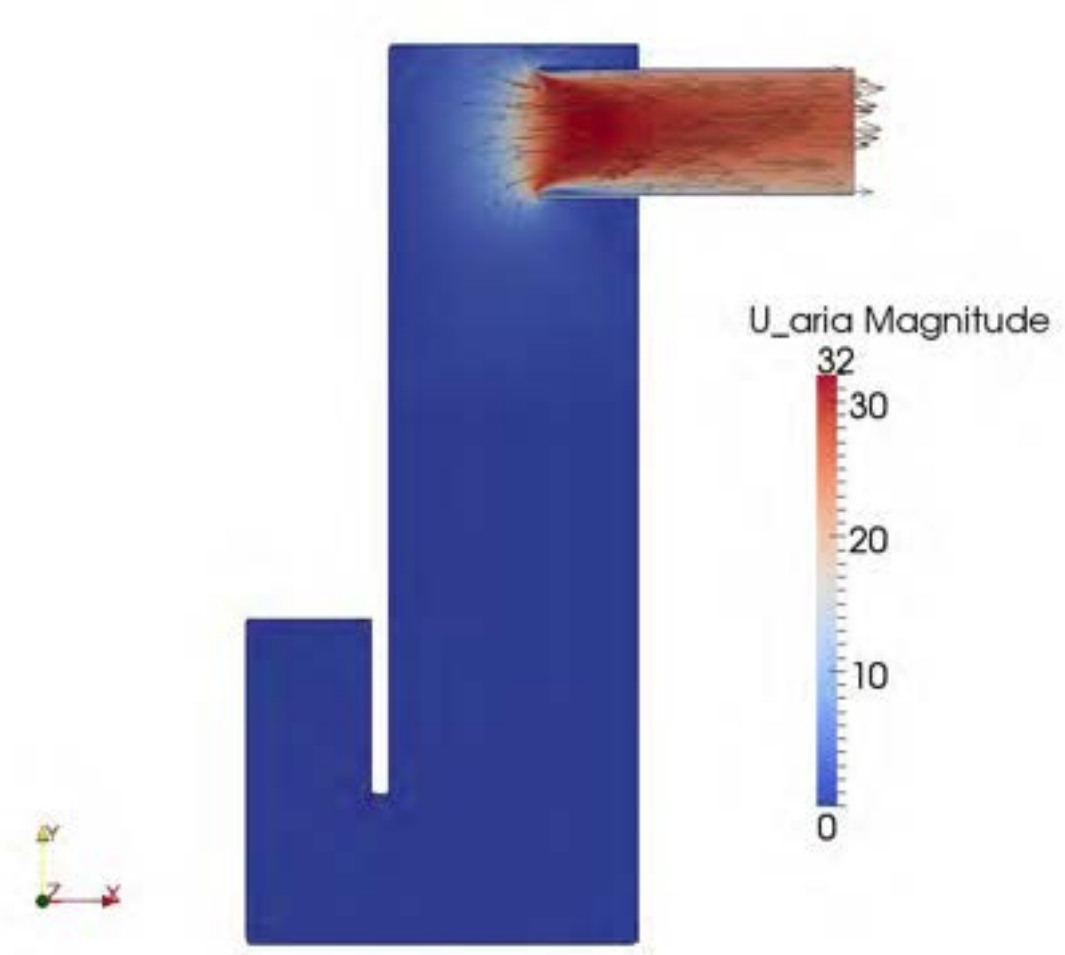


**Fig. 4.1.18 – Andamento della velocità dell'aria al tempo t=7.2s**

Nelle figure 4.1.19, 4.1.20 e 4.1.21 sono riportati rispettivamente il livello dell'acqua, l'andamento della velocità dell'acqua e l'andamento della velocità dell'aria, facendo sempre riferimento al piano della sez.III della figura 3.1.6, al tempo t = 7.5 s.

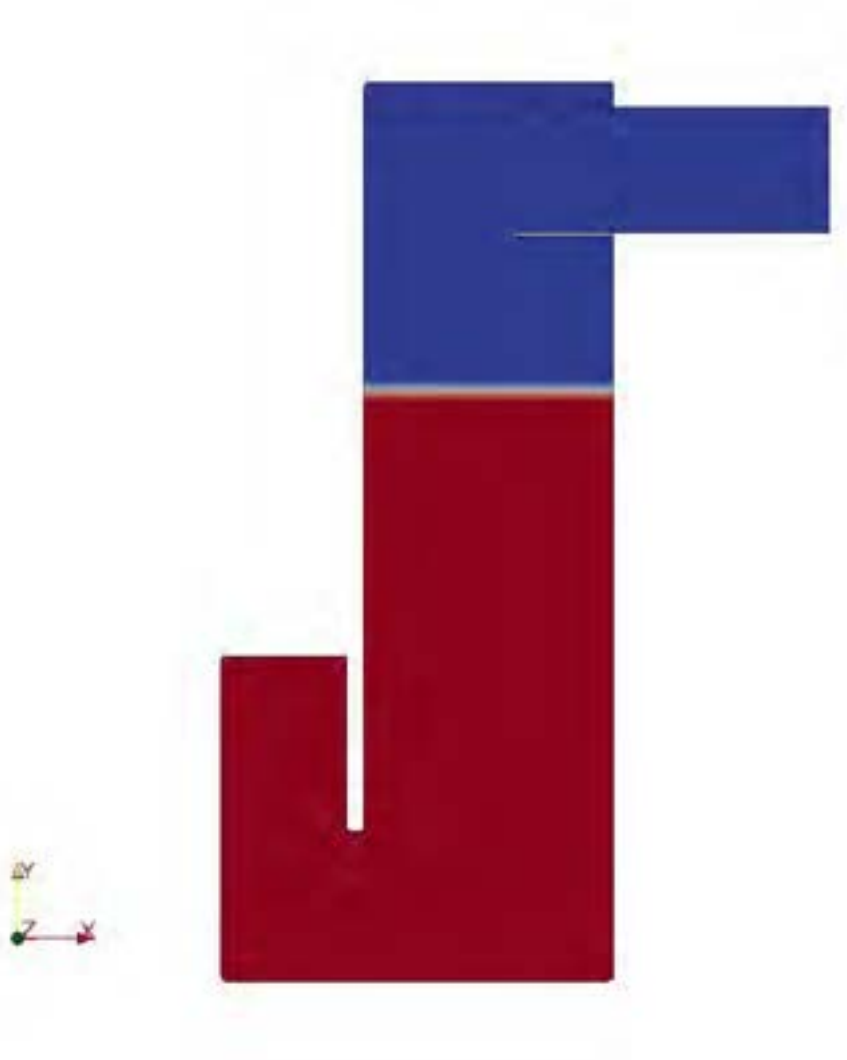

**Fig. 4.1.19 – Livello dell'acqua al tempo t=7.5s**

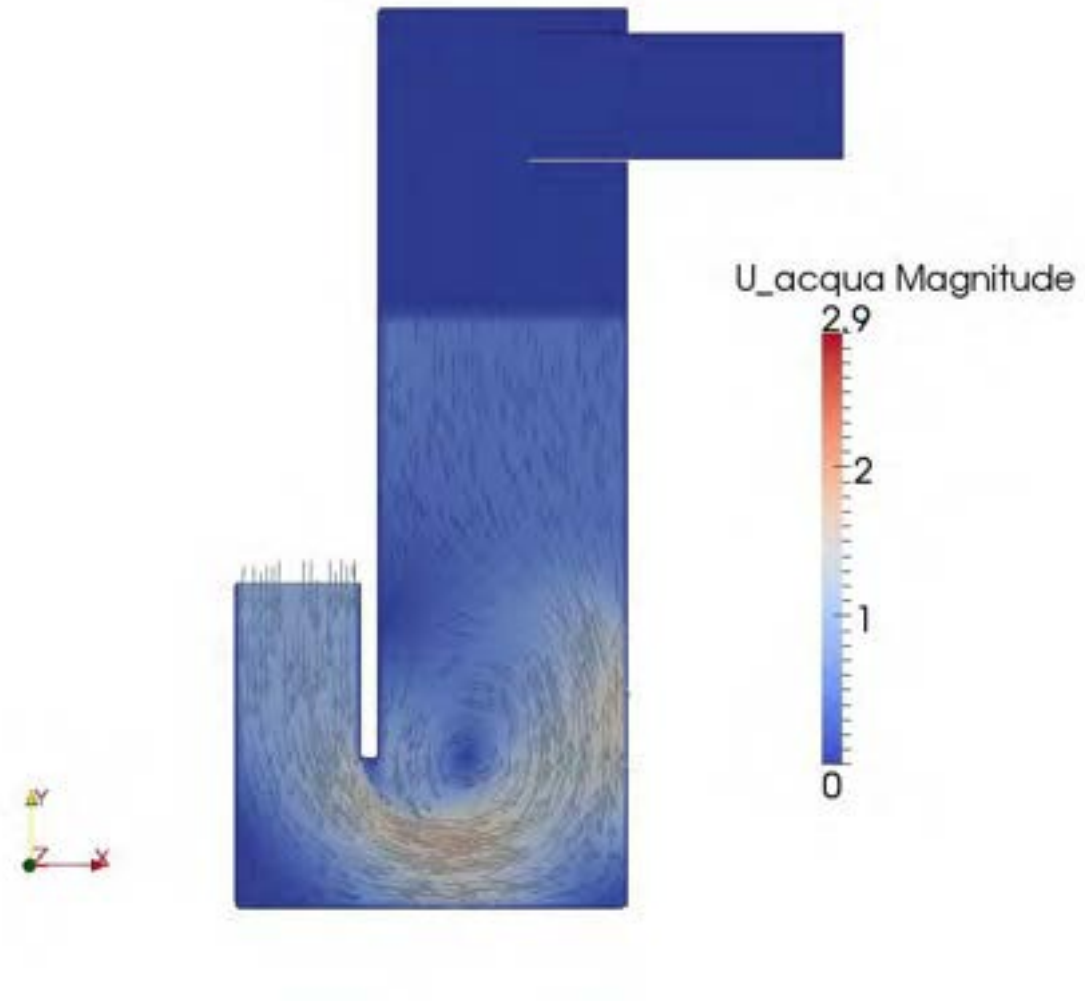


**Fig. 4.1.20 – Andamento della velocità dell'acqua al tempo t=7.5s**

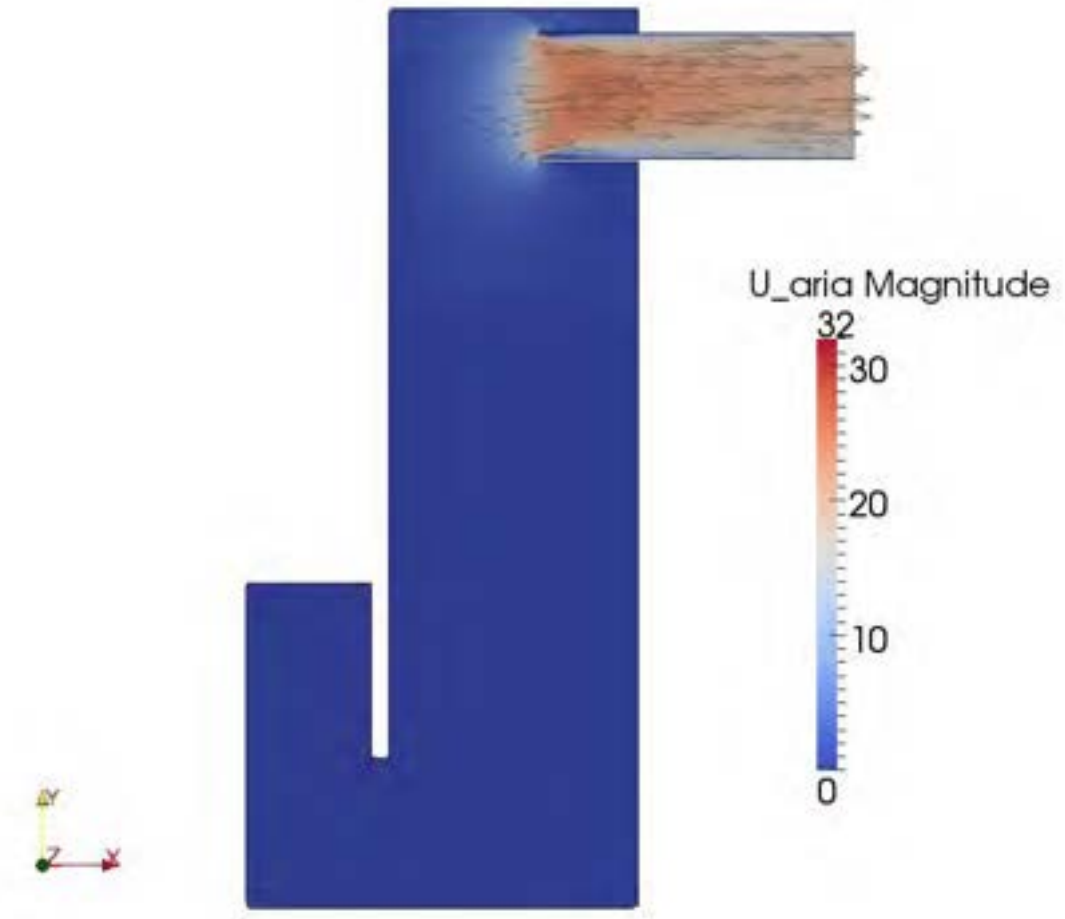


**Fig. 4.1.21 – Andamento della velocità dell'aria al tempo t=7.5s**

Nelle figure 4.1.22, 4.1.23 e 4.1.24 sono riportati rispettivamente il livello dell'acqua, l'andamento della velocità dell'acqua e l'andamento della velocità dell'aria, facendo sempre riferimento al piano della sez.III della figura 3.1.6, al tempo t = 7.8 s.

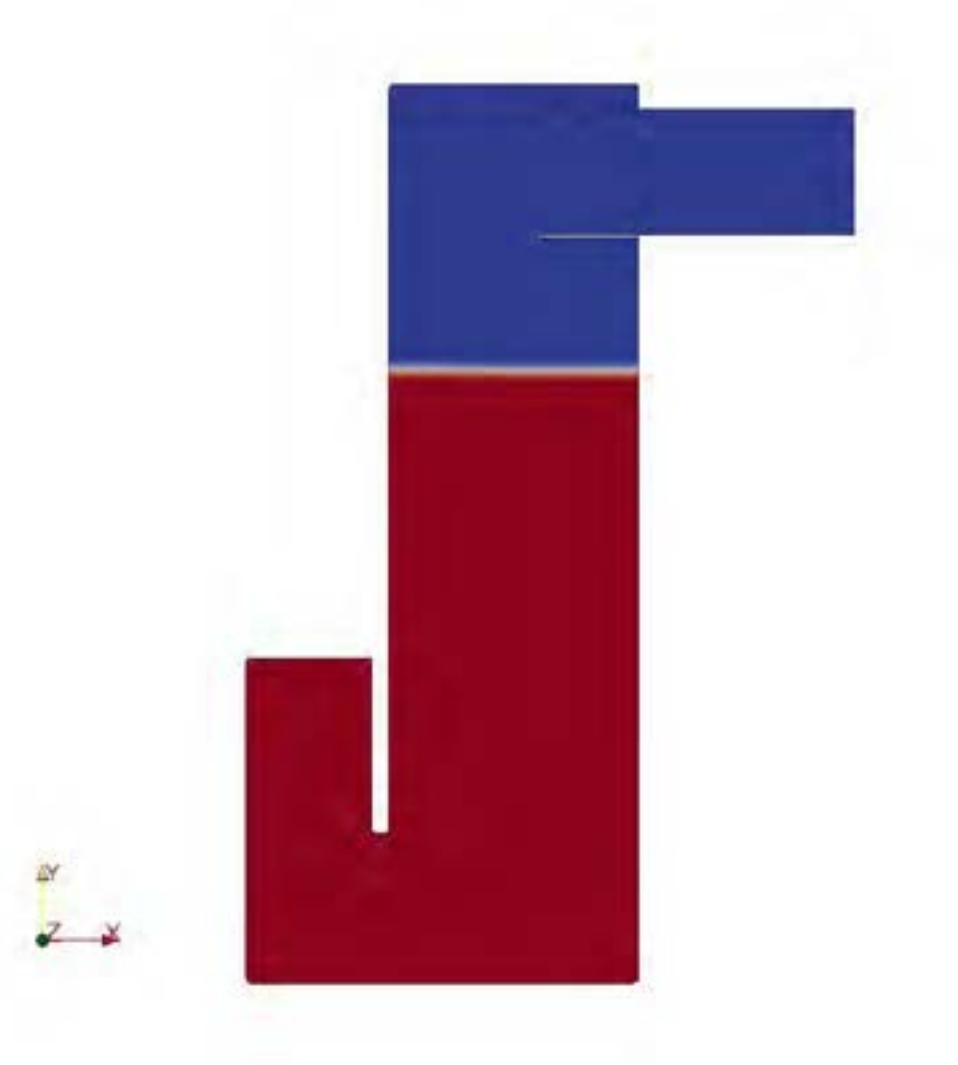

**Fig. 4.1.22 – Livello dell'acqua al tempo t=7.8s**

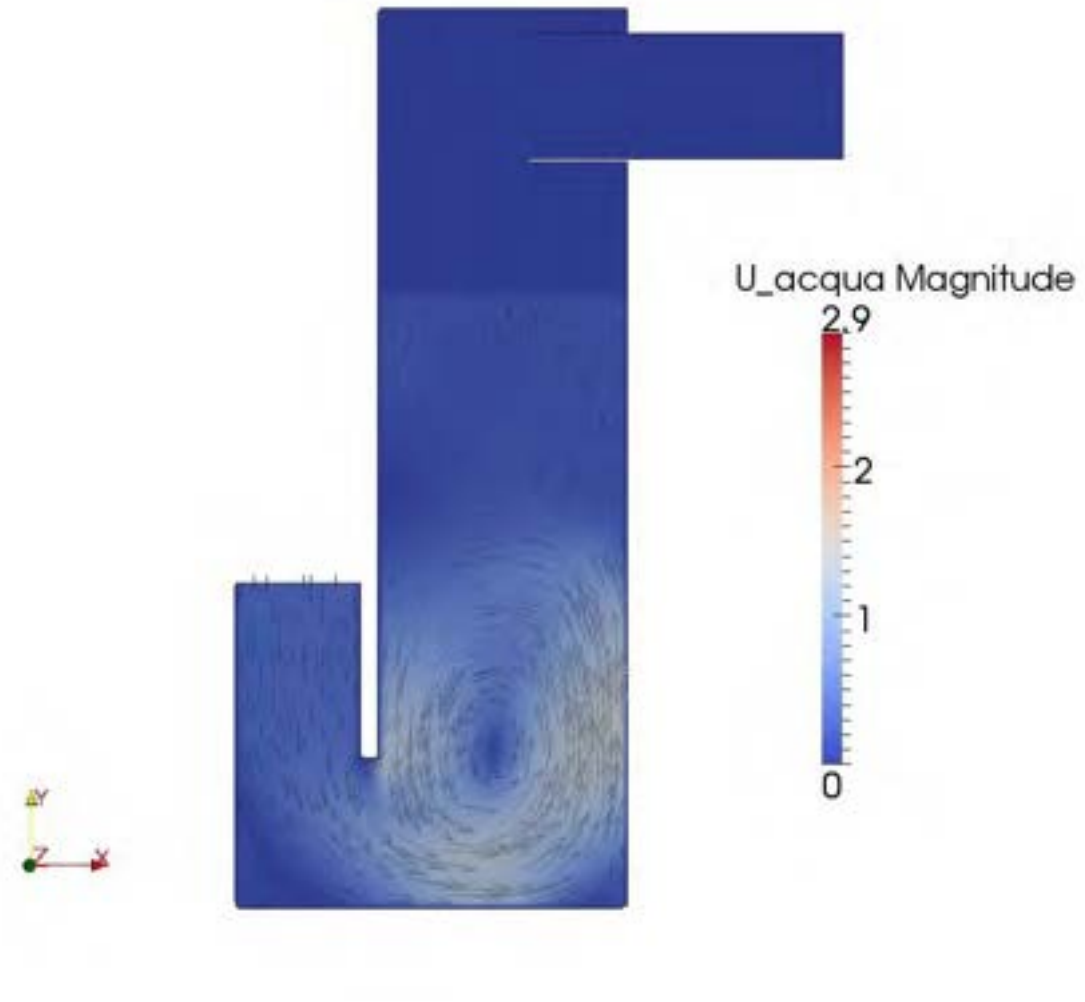


**Fig. 4.1.23 – Andamento della velocità dell'acqua al tempo t=7.8s**

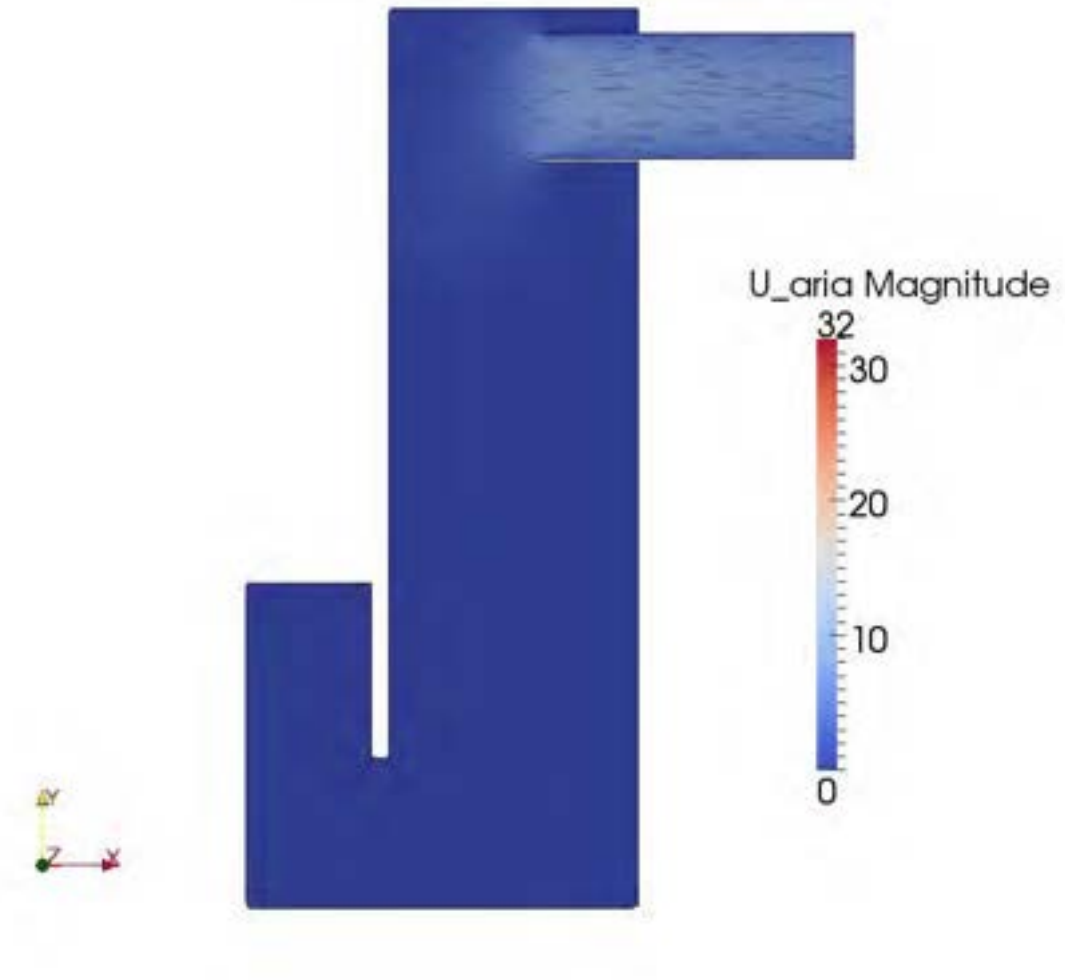


**Fig. 4.1.24 – Andamento della velocità dell'aria al tempo t=7.8s**

Nelle figure 4.1.25, 4.1.26 e 4.1.27 sono riportati rispettivamente il livello dell'acqua, l'andamento della velocità dell'acqua e l'andamento della velocità dell'aria, facendo sempre riferimento al piano della sez.III della figura 3.1.6, al tempo t = 8.1 s.

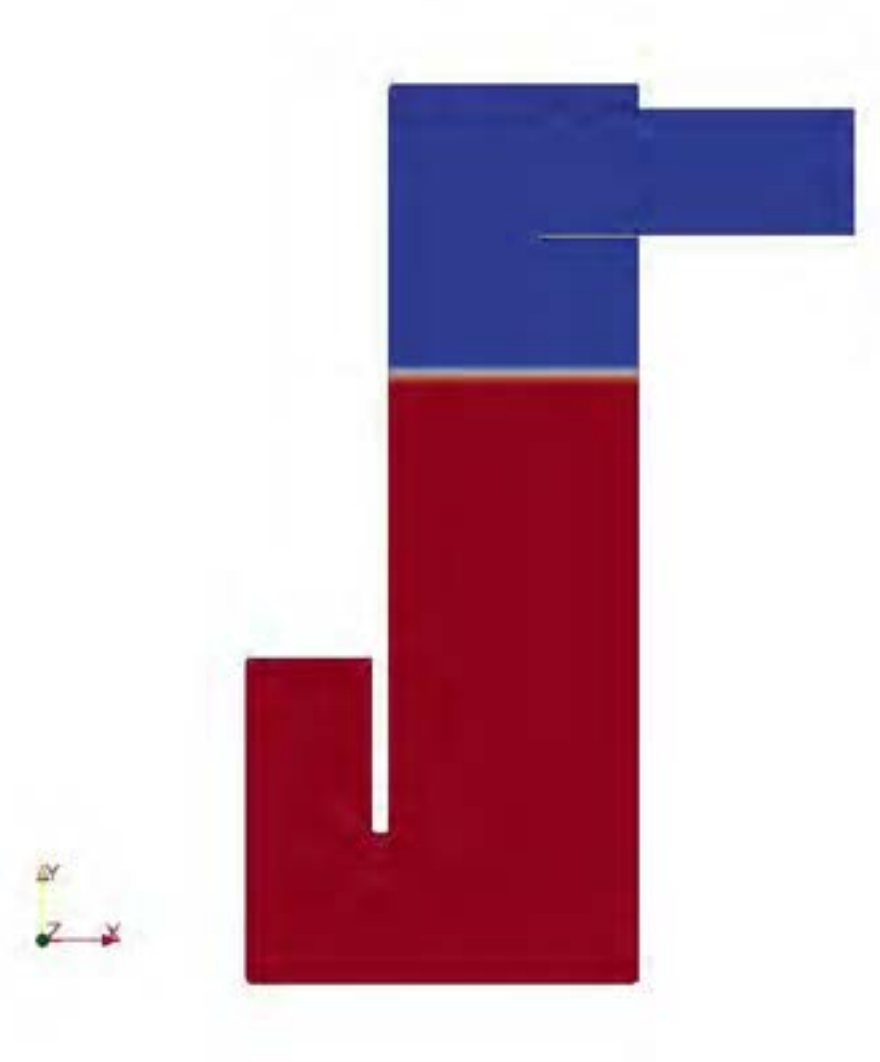

**Fig. 4.1.25 – Livello dell'acqua al tempo t=8.1s**

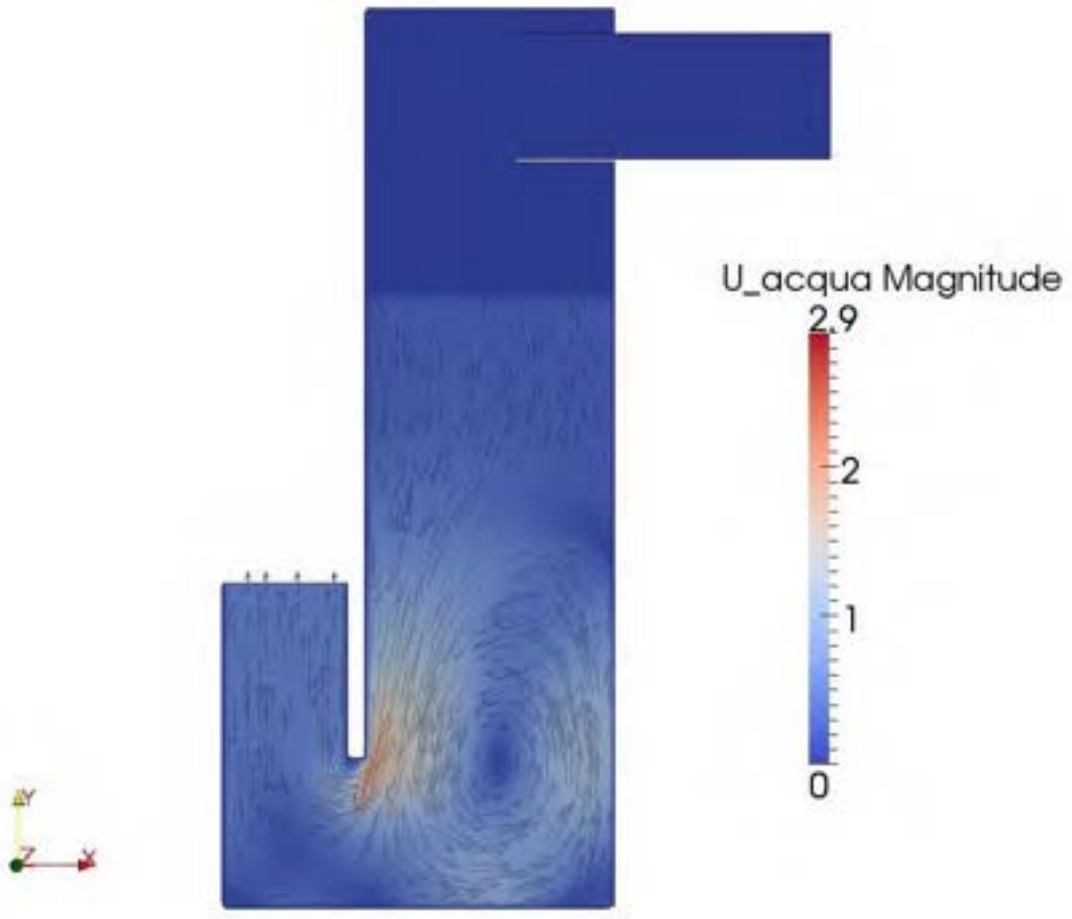


**Fig. 4.1.26 – Andamento della velocità dell'acqua al tempo t=8.1s**

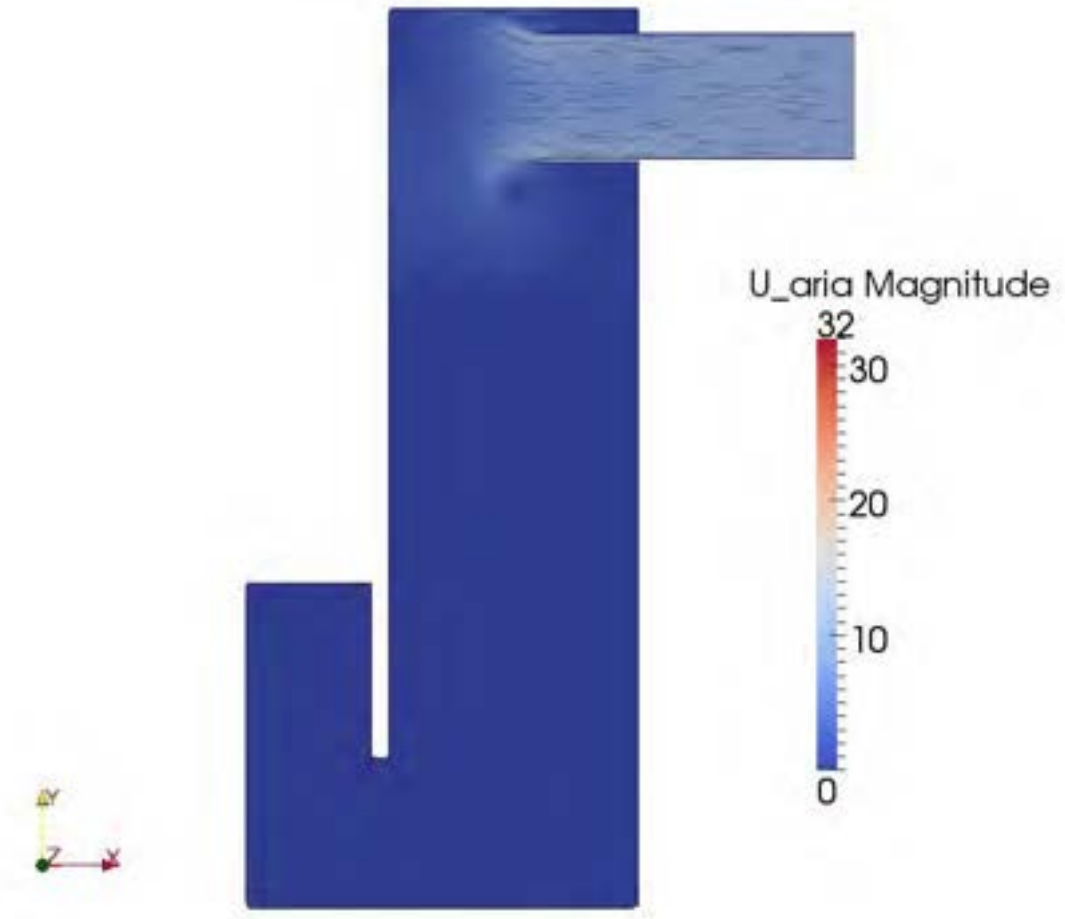


**Fig. 4.1.27 – Andamento della velocità dell'aria al tempo t=8.1s**

Nelle figure 4.1.28, 4.1.29 e 4.1.30 sono riportati rispettivamente il livello dell'acqua, l'andamento della velocità dell'acqua e l'andamento della velocità dell'aria, facendo sempre riferimento al piano della sez.III della figura 3.1.6, al tempo t = 8.4 s.

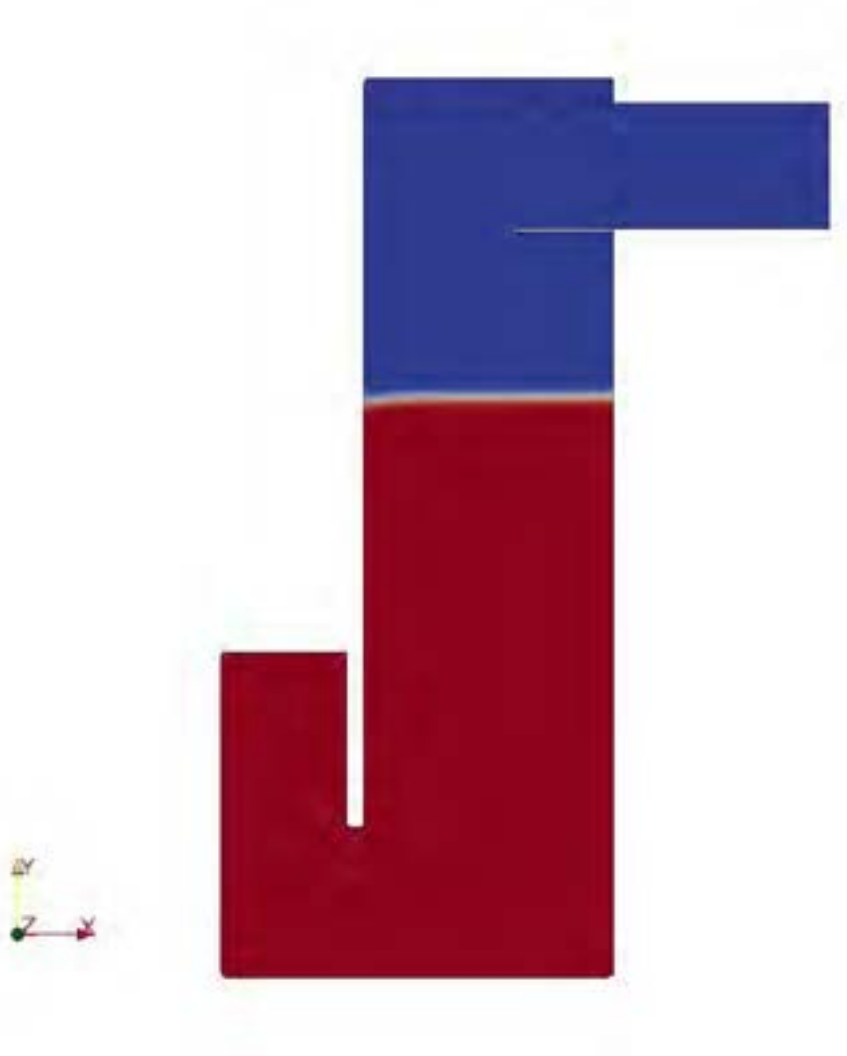

**Fig. 4.1.28 – Livello dell'acqua al tempo t=8.4s**

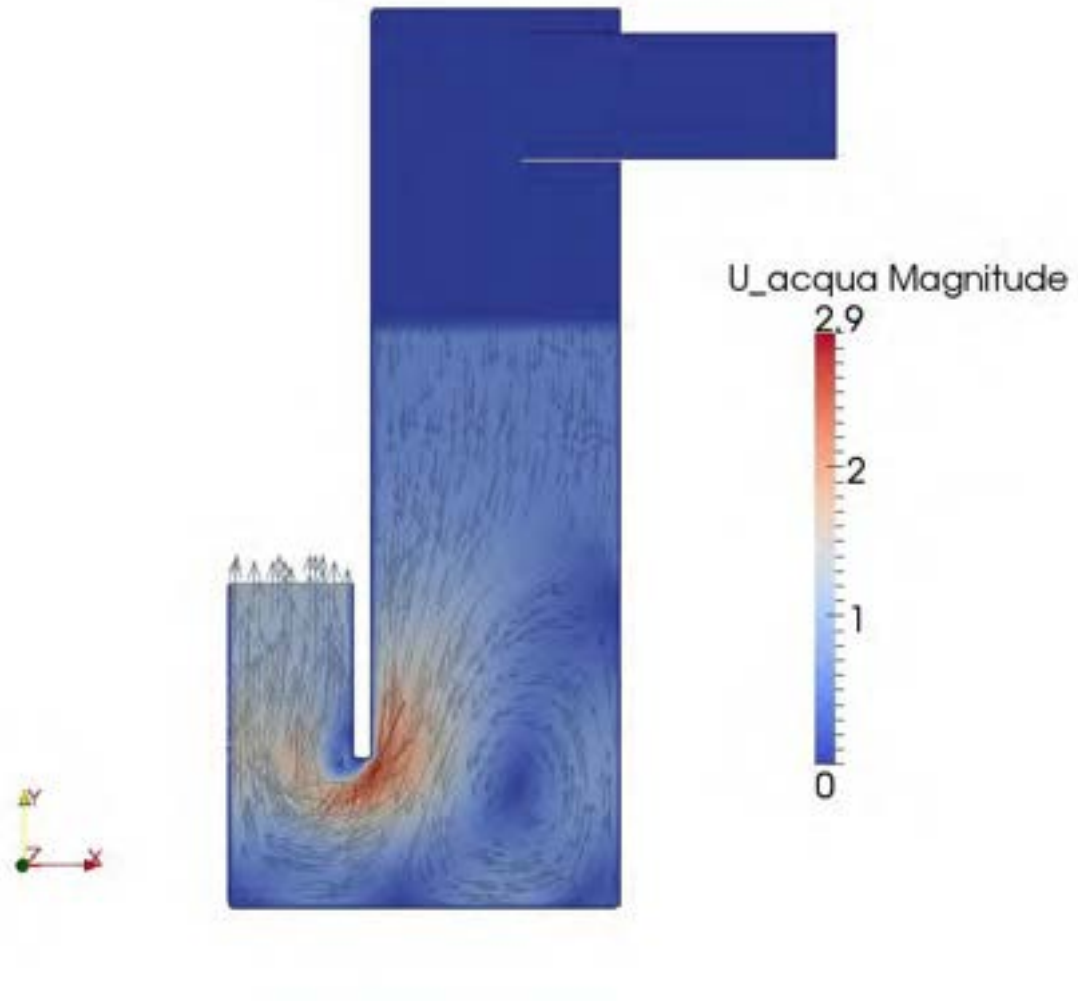


**Fig. 4.1.29 – Andamento della velocità dell'acqua al tempo t=8.4s**

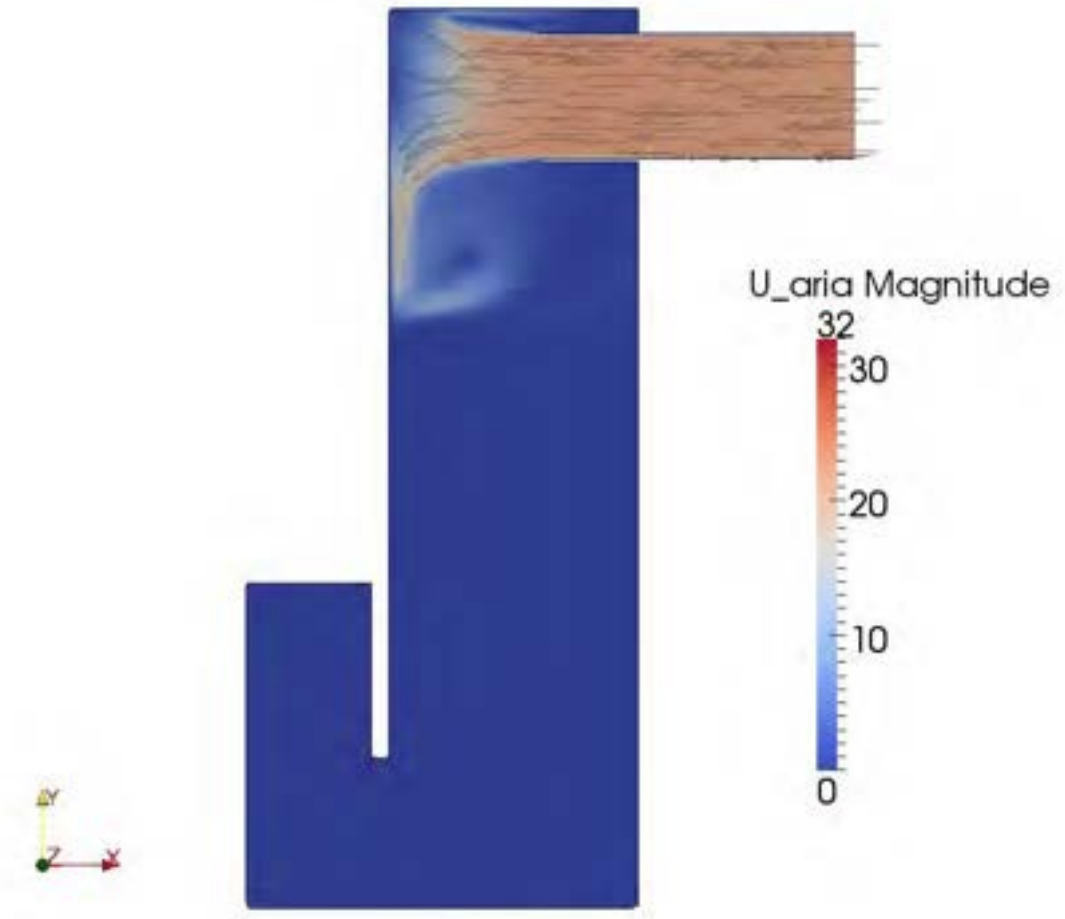


**Fig. 4.1.30 – Andamento della velocità dell'aria al tempo t=8.4s**

Nelle figure 4.1.31, 4.1.32 e 4.1.33 sono riportati rispettivamente il livello dell'acqua, l'andamento della velocità dell'acqua e l'andamento della velocità dell'aria, facendo sempre riferimento al piano della sez.III della figura 3.1.6, al tempo t = 8.7 s.

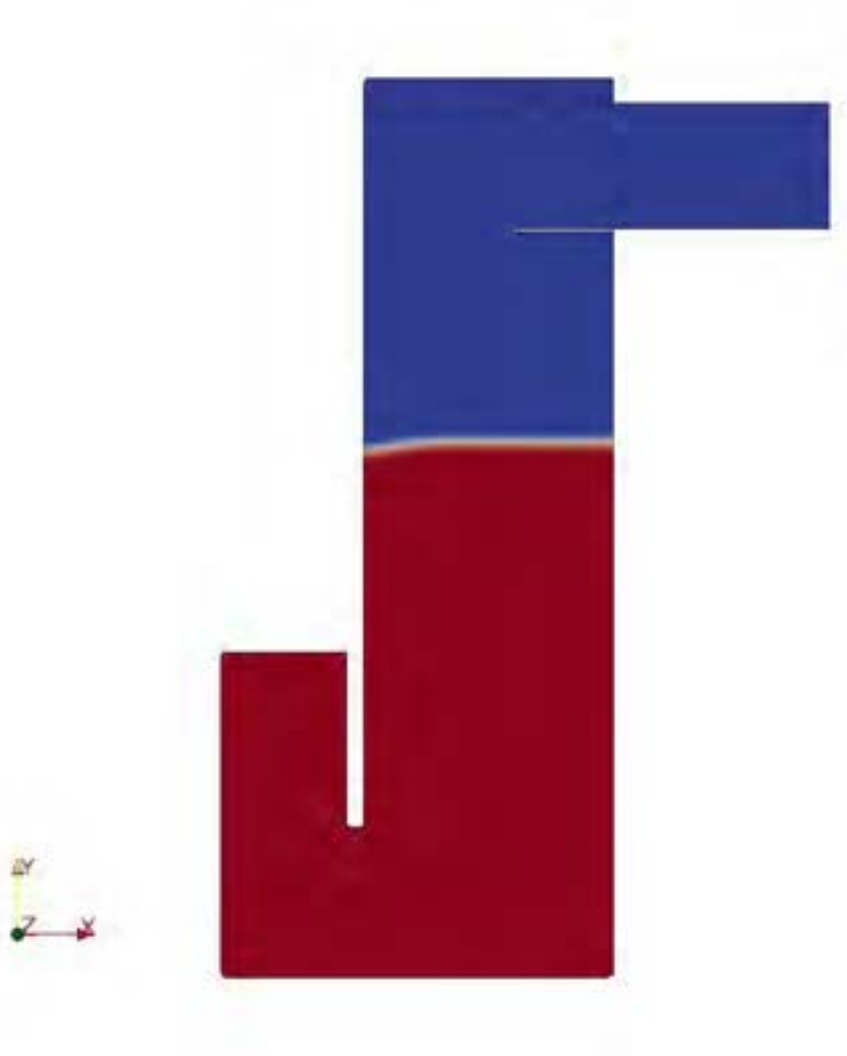

**Fig. 4.1.31 – Livello dell'acqua al tempo t=8.7s**

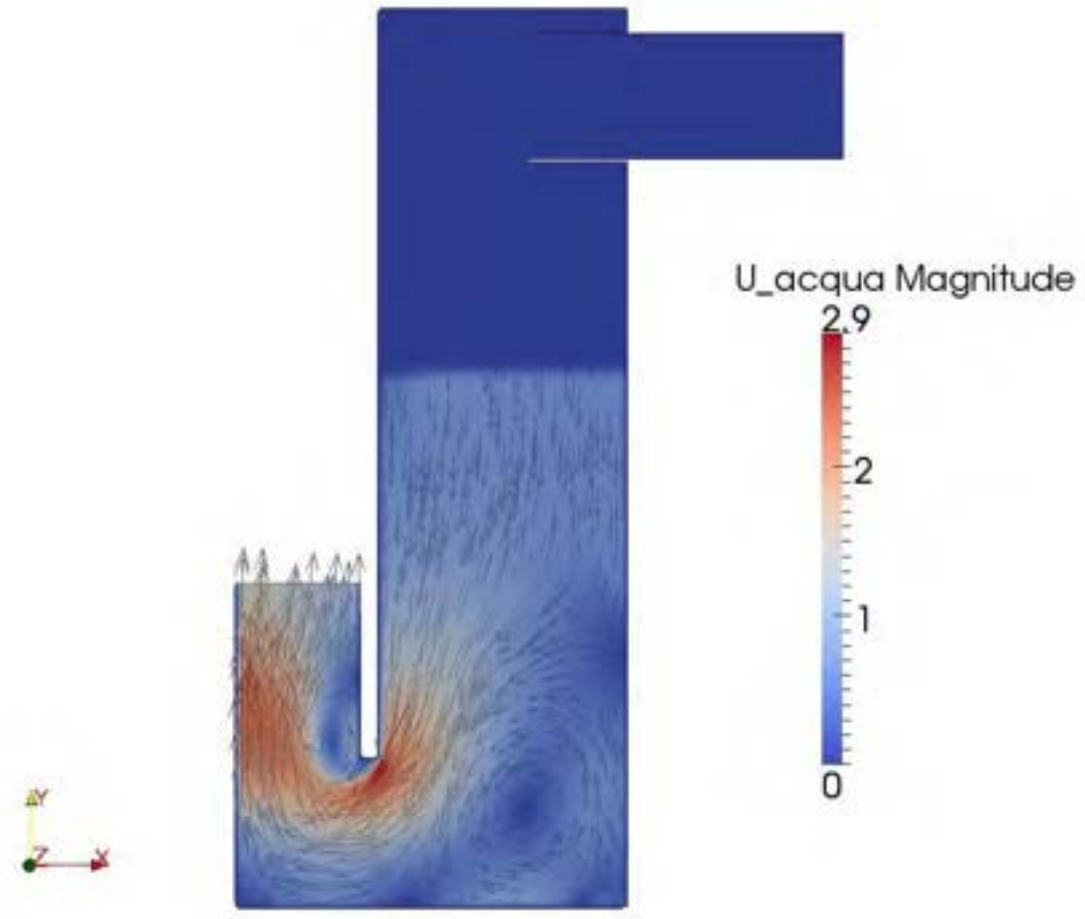


**Fig. 4.1.32 – Andamento della velocità dell'acqua al tempo t=8.7s**

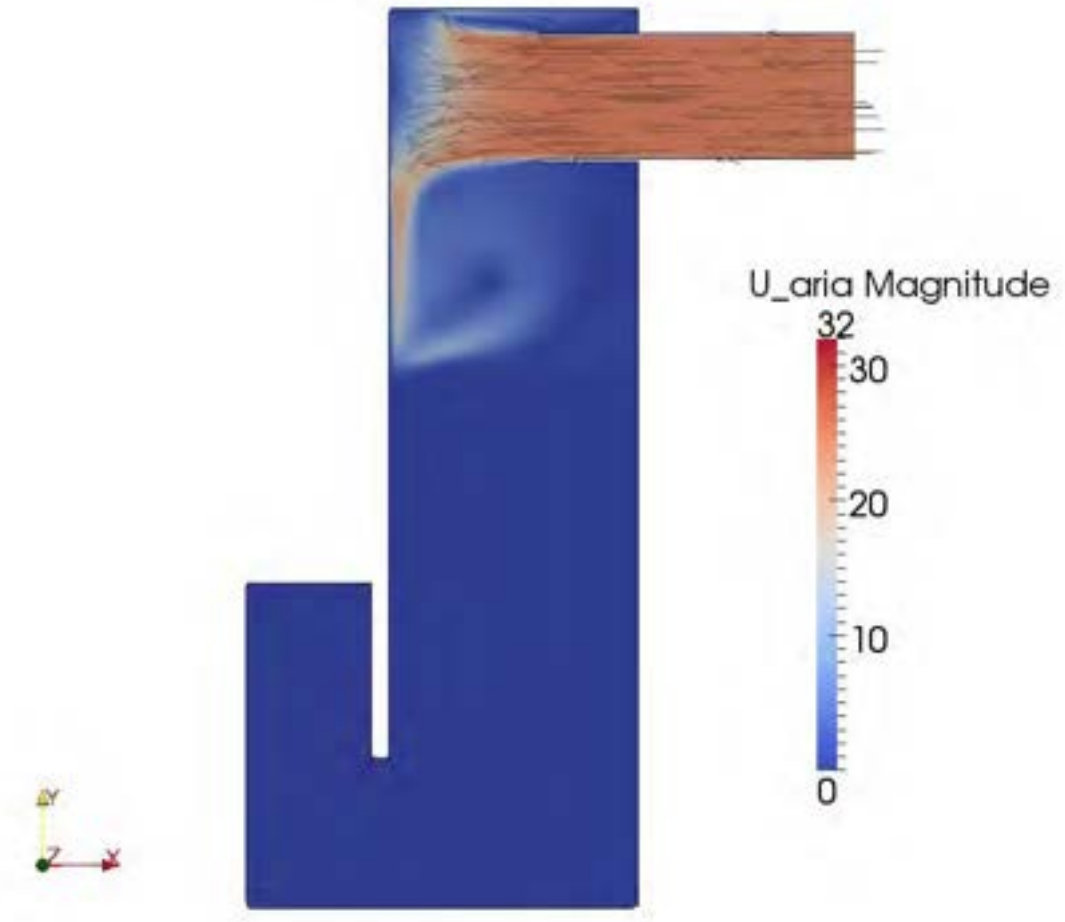


**Fig. 4.1.33 – Andamento della velocità dell'aria al tempo t=8.7s**

Nelle figure 4.1.34, 4.1.35 e 4.1.36 sono riportati rispettivamente il livello dell'acqua, l'andamento della velocità dell'acqua e l'andamento della velocità dell'aria, facendo sempre riferimento al piano della sez.III della figura 3.1.6, al tempo t = 9.0 s.

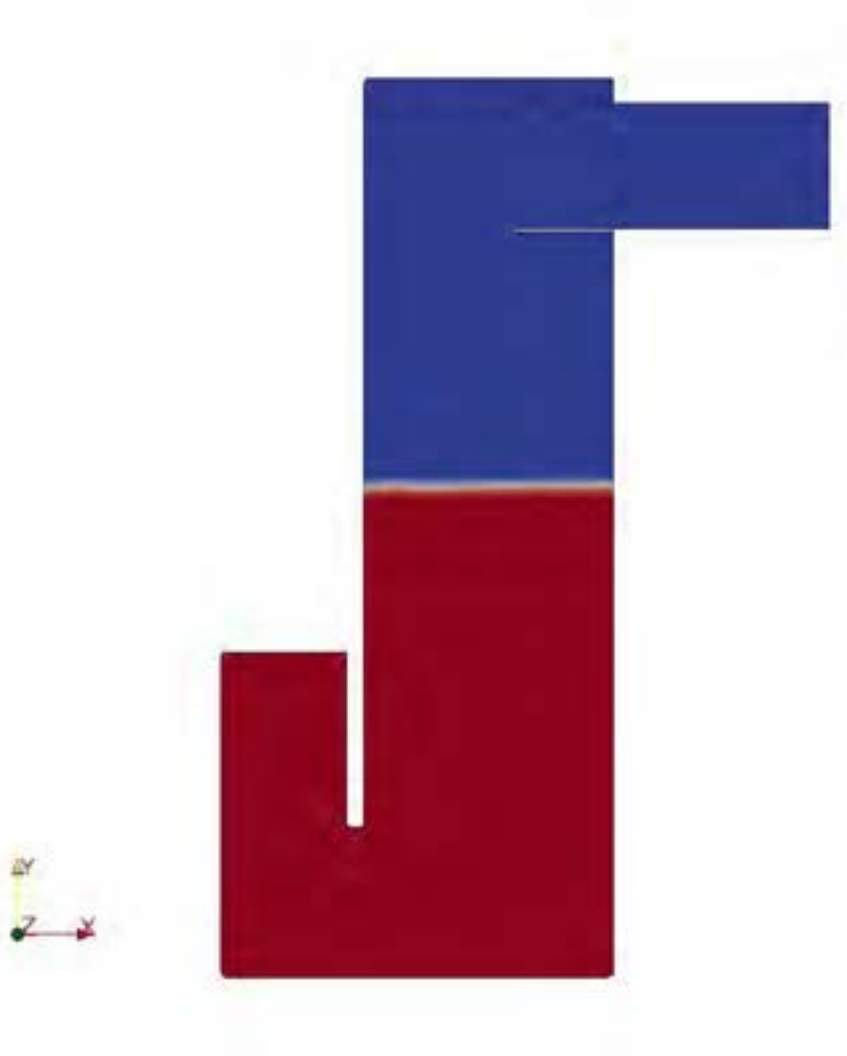

**Fig. 4.1.34 – Livello dell'acqua al tempo t=9.0s**

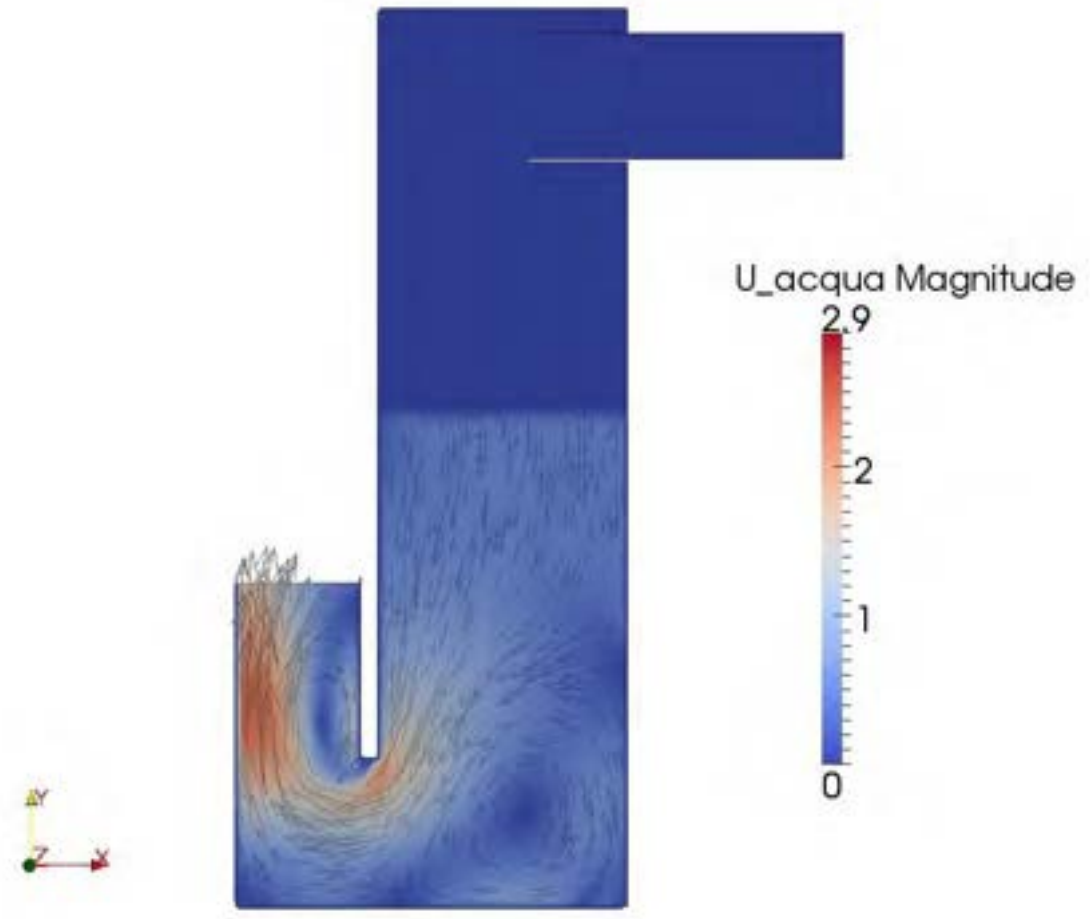


**Fig. 4.1.35 – Andamento della velocità dell'acqua al tempo t=9.0s**

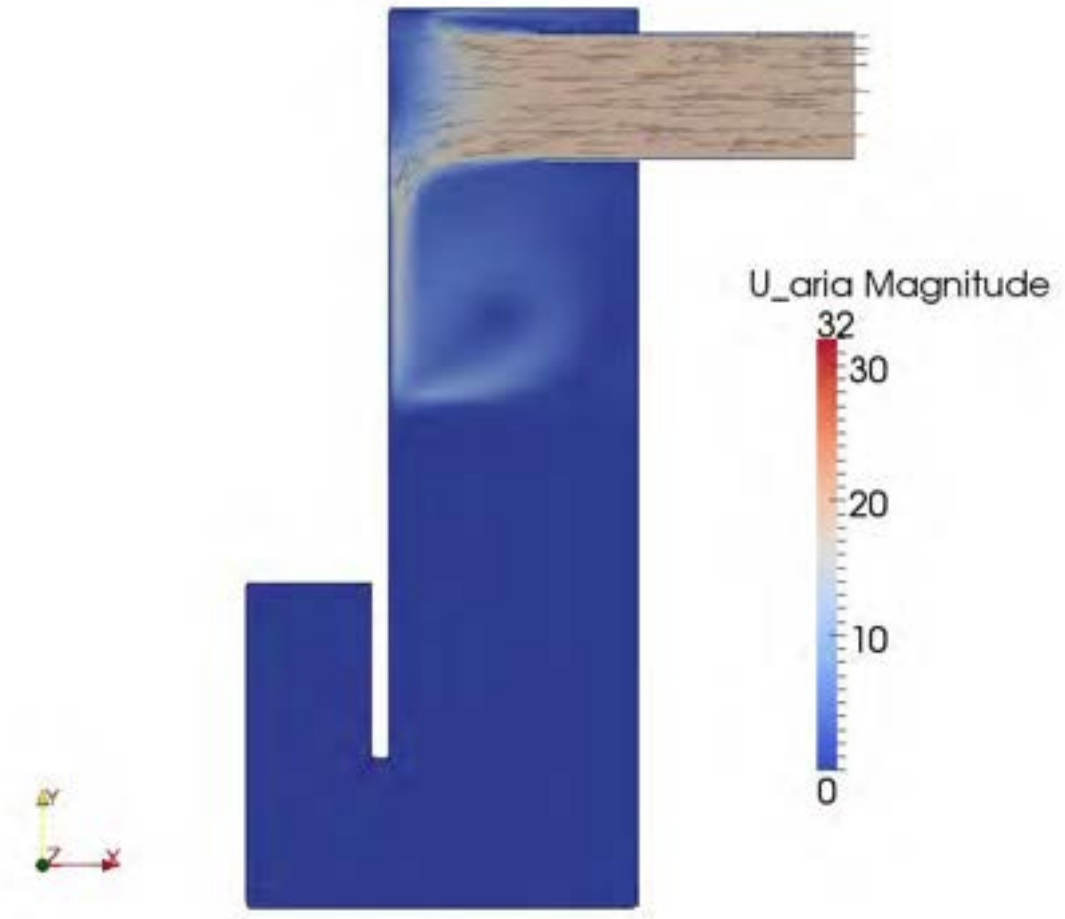


**Fig. 4.1.36 – Andamento della velocità dell'aria al tempo t=9.0s**

## 4.2 *Risultati simulazioni onda del secondo tipo (long swells)*

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti dalla simulazione con un onda del secondo tipo (long swell). Le caratteristiche di questa onda, facendo riferimento alla figura 3.1.1, sono un'ampiezza $H_0$ = 0.50 m ed un periodo $T_0$ = 7 s.
Sono riportati i risultati corrispondenti al terzo periodo d'onda, quindi dal tempo t = 14 s al tempo t = 21 s.

Nella figura 4.2.1 è riportato l'andamento della pressione p-rgh imposta sulla superficie di ingresso/uscita dell'acqua marina.

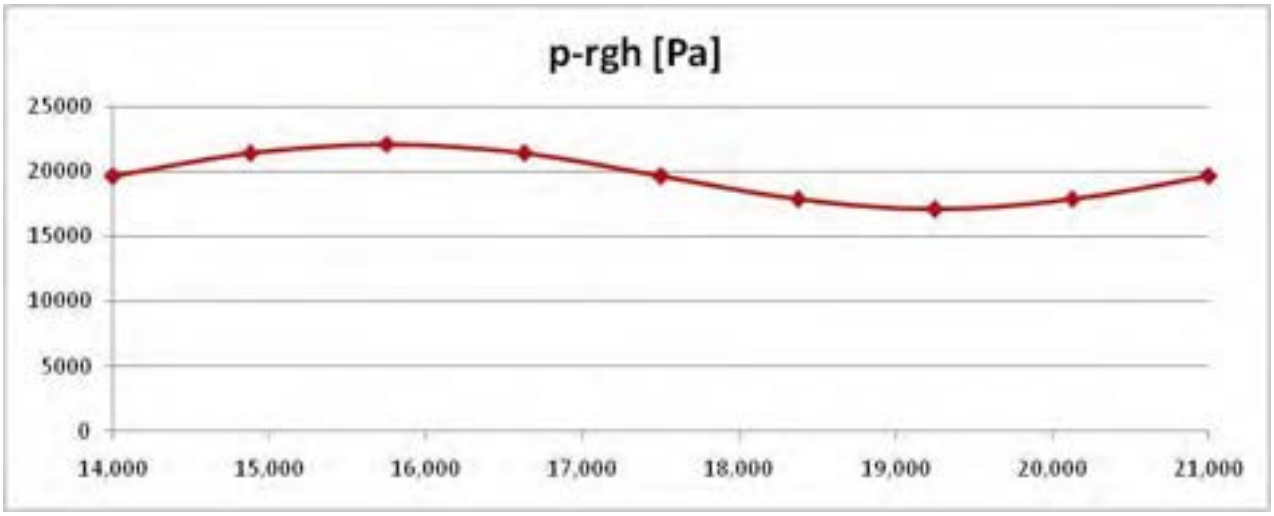


**Fig. 4.2.1 – Andamento della pressione p-rgh imposta sulla superficie In/Out acqua**

Nella figura 4.2.2 è riportato il confronto tra il livello dell'onda, corrispondente alla pressione p-rgh imposta, ed il livello dell'acqua all'interno della camera. Il livello all'interno della camera è valutato al centro della stessa, corrispondente ad un valore di x, pari a 1.07 m, figura 3.1.6 – sez.III.

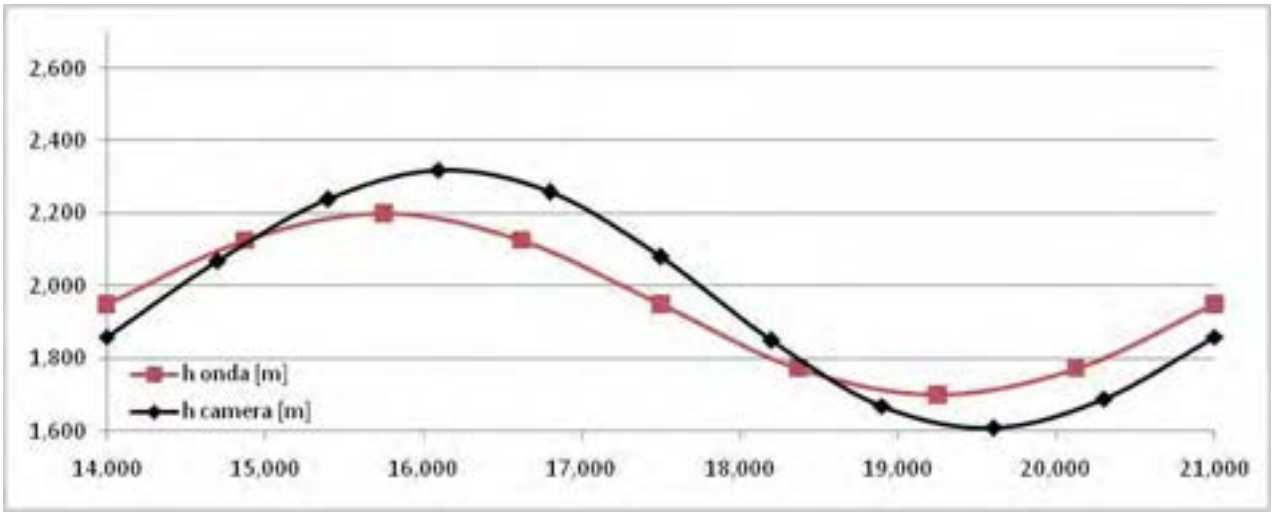


**Fig. 4.2.2 – Confronto livello onda e livello acqua all'interno della camera di compressione**

Nella figura 4.2.3 è riportato l'andamento della velocità nella direzione x (Ux), valutata al centro del tubo turbina ad una distanza dalla sezione di uscita di 0.43 m, corrispondente ad un valore della coordinata x pari a 2.00 m, figura 3.1.6 – sez.III.

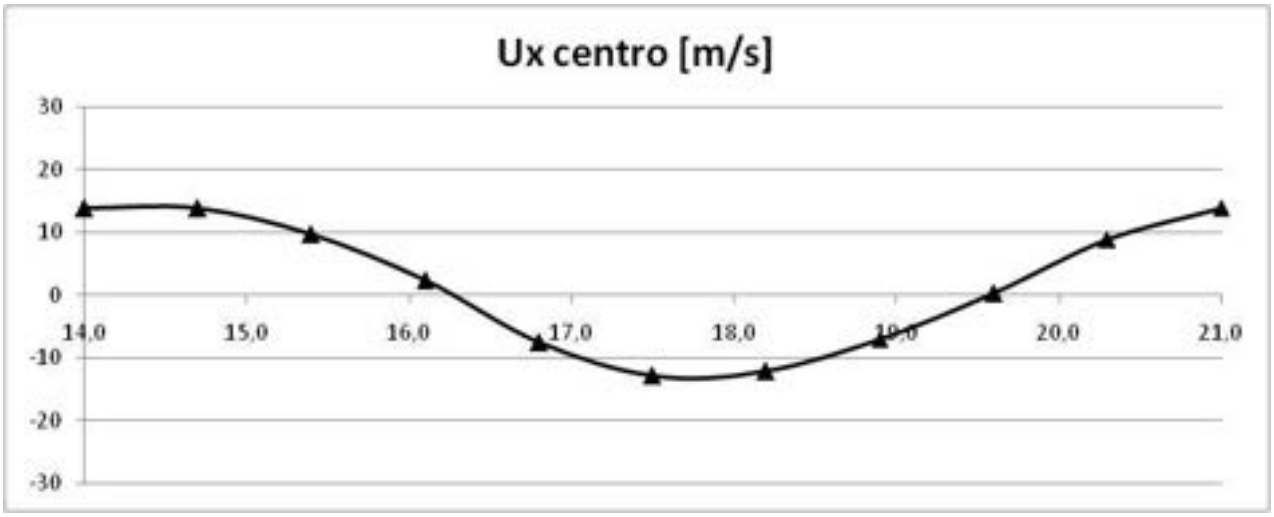


**Fig. 4.2.3 – Andamento della velocità Ux al centro del tubo turbina**

Nelle figure 4.2.4, 4.2.5 e 4.2.6 sono riportati rispettivamente il livello dell'acqua, l'andamento della velocità dell'acqua e l'andamento della velocità dell'aria, facendo sempre riferimento al piano della sez.III della figura 3.1.6, al tempo t = 14.0 s.

**Fig. 4.2.4 – Livello dell'acqua al tempo t=14.0s**

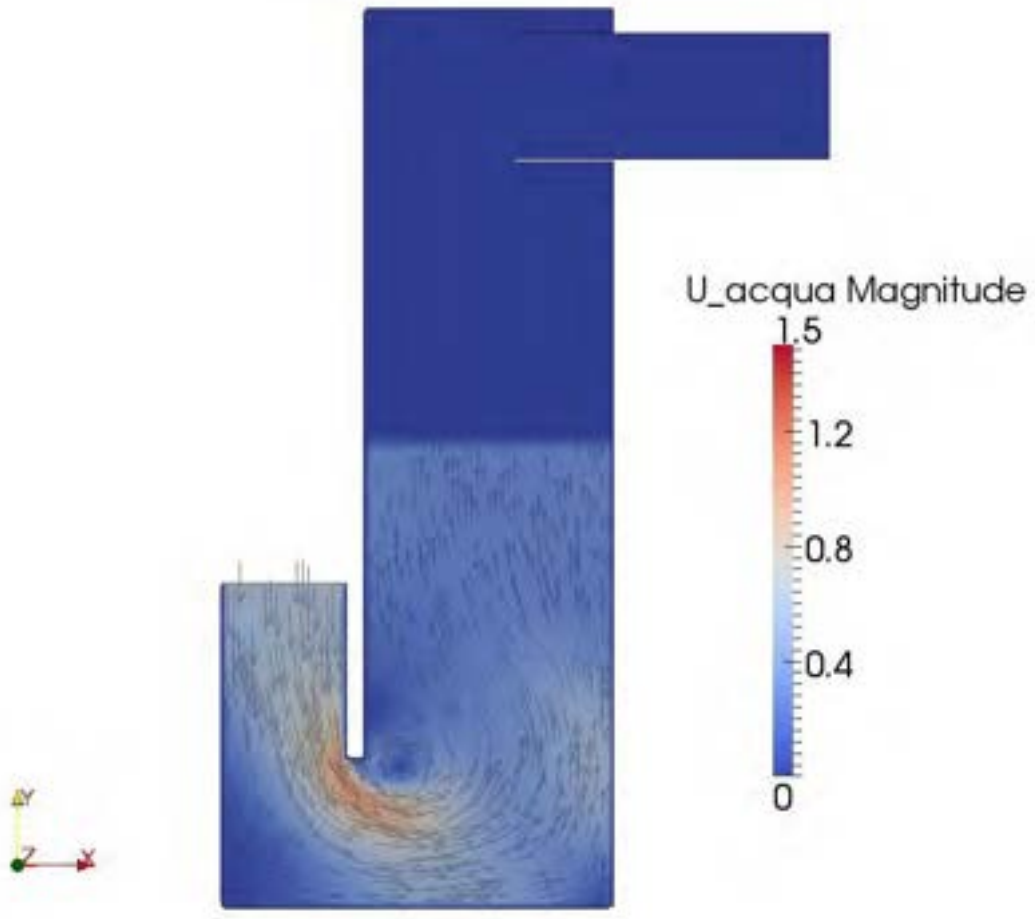


**Fig. 4.2.5 – Andamento della velocità dell'acqua al tempo t=14.0s**

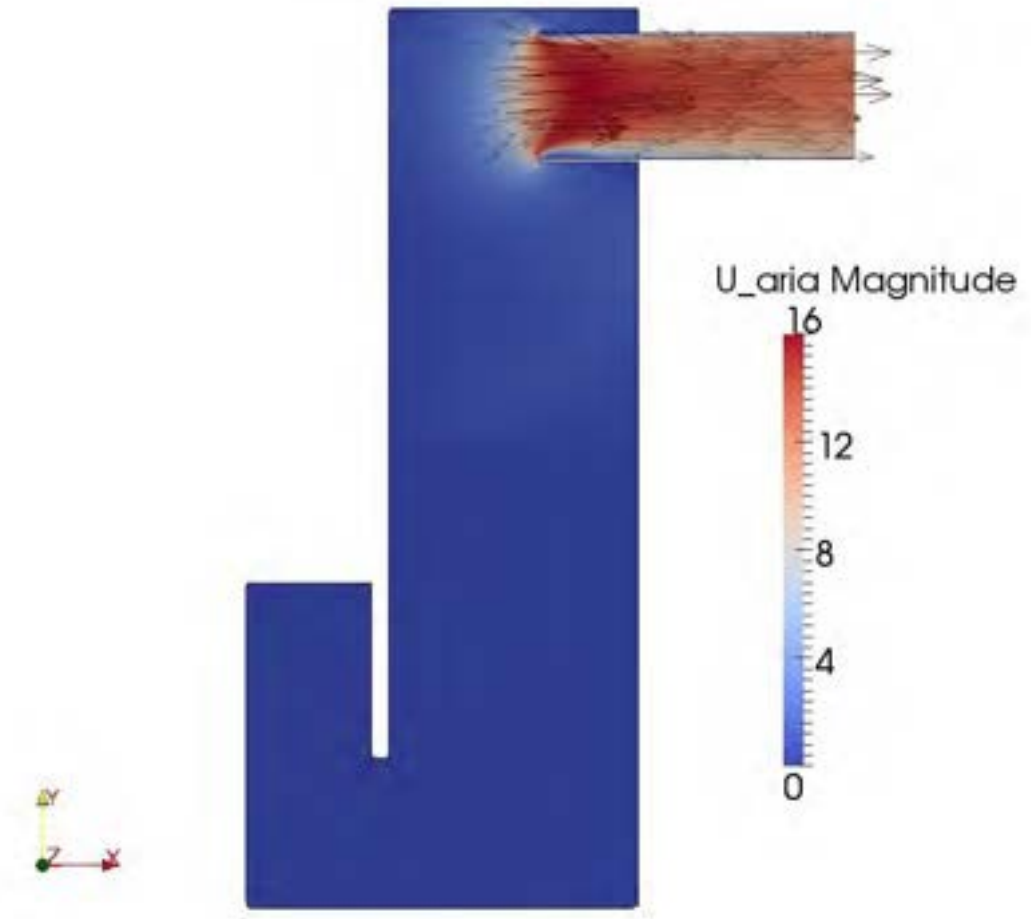


**Fig. 4.2.6 – Andamento della velocità dell'aria al tempo t=14.0s**

Nelle figure 4.2.7, 4.2.8 e 4.2.9 sono riportati rispettivamente il livello dell'acqua, l'andamento della velocità dell'acqua e l'andamento della velocità dell'aria, facendo sempre riferimento al piano della sez.III della figura 3.1.6, al tempo t = 14.7 s.

**Fig. 4.2.7 – Livello dell'acqua al tempo t=14.7s**

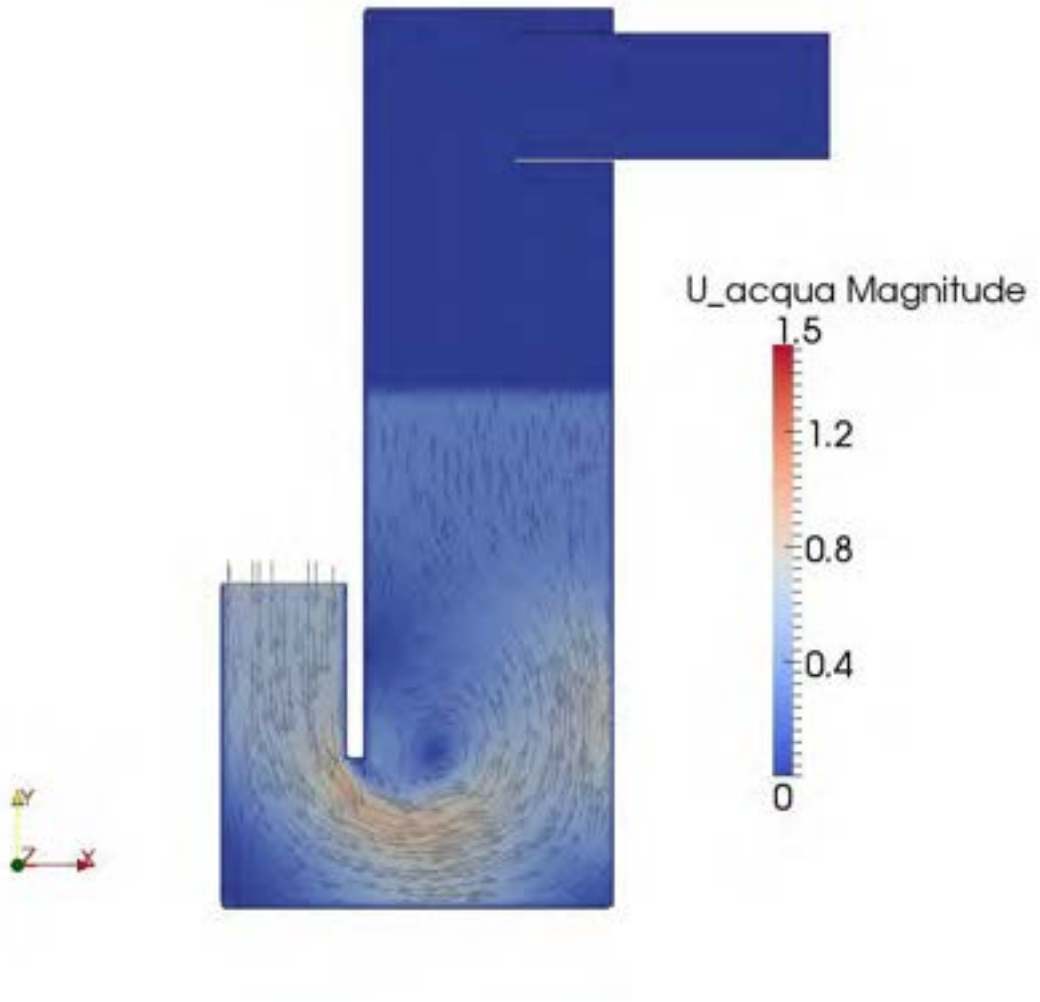


**Fig. 4.2.8 – Andamento della velocità dell'acqua al tempo t=14.7s**

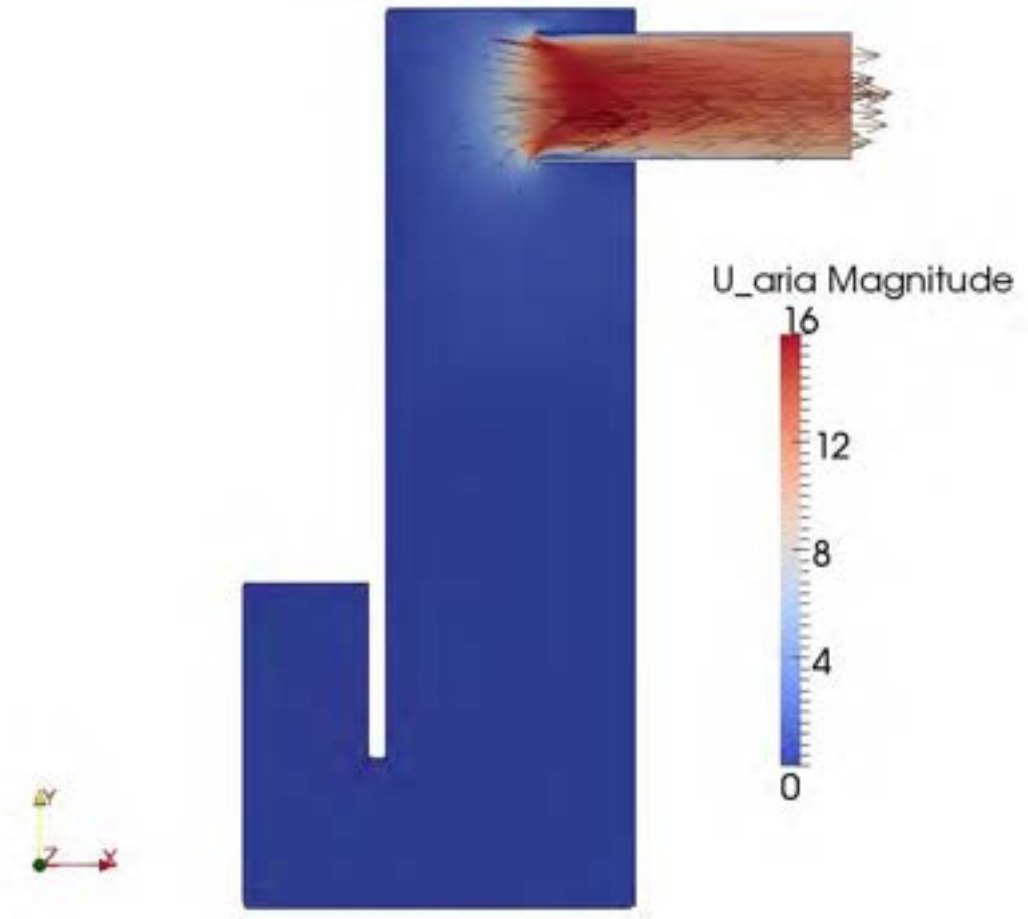


**Fig. 4.2.9 – Andamento della velocità dell'aria al tempo t=14.7s**

Nelle figure 4.2.10, 4.2.11 e 4.2.12 sono riportati rispettivamente il livello dell'acqua, l'andamento della velocità dell'acqua e l'andamento della velocità dell'aria, facendo sempre riferimento al piano della sez.III della figura 3.1.6, al tempo t = 15.4 s.

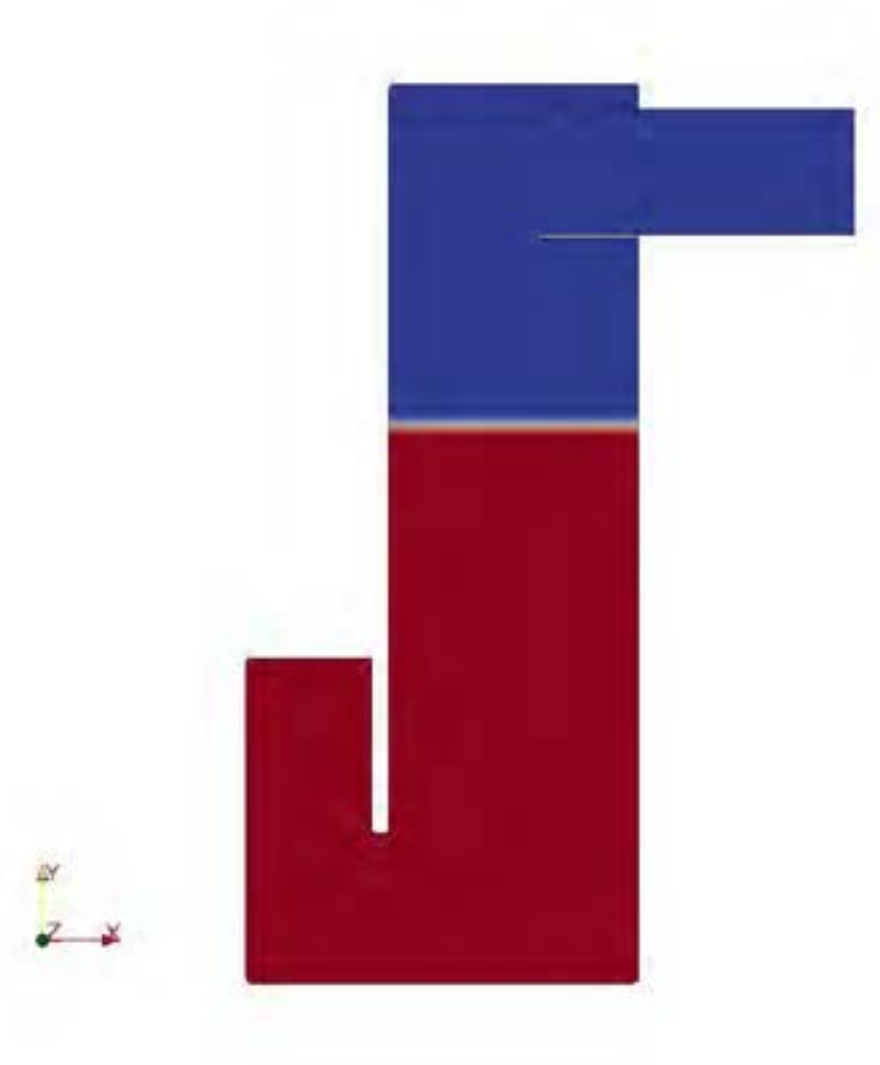

**Fig. 4.2.10 – Livello dell'acqua al tempo t=15.4s**

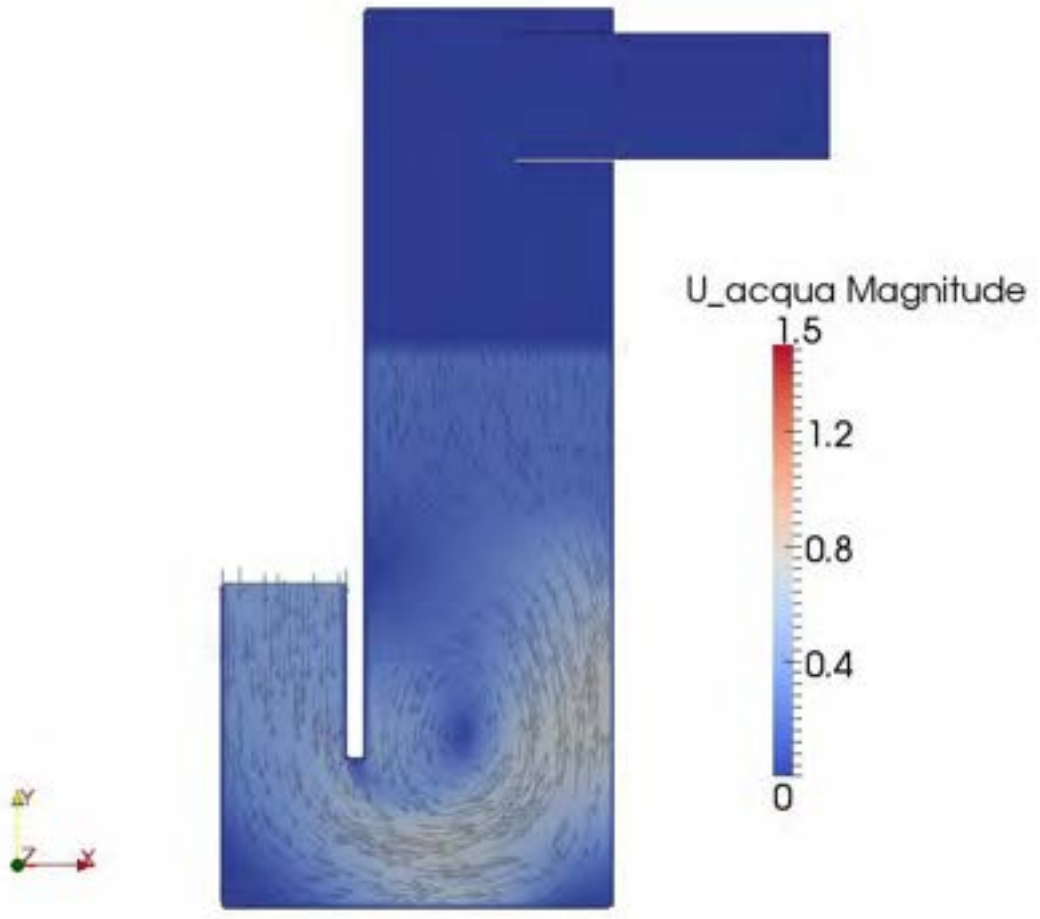


**Fig. 4.2.11 – Andamento della velocità dell'acqua al tempo t=15.4s**

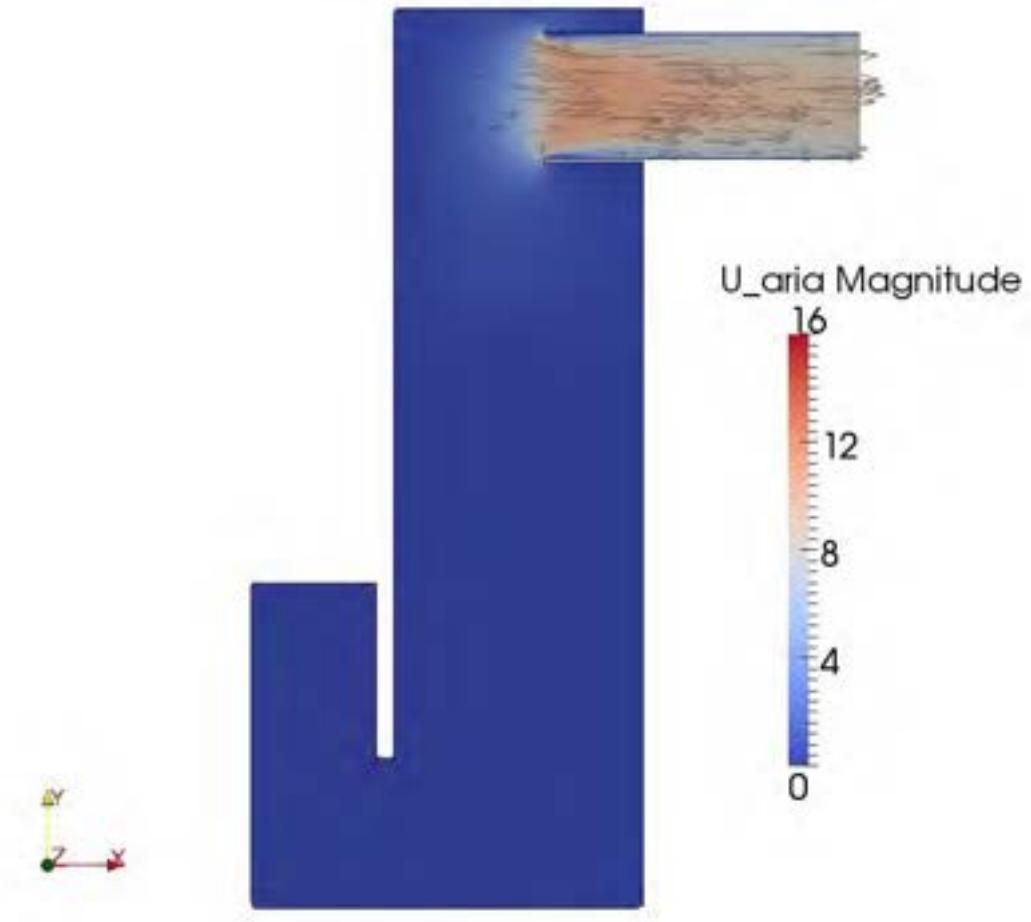


**Fig. 4.2.12 – Andamento della velocità dell'aria al tempo t=15.4s**

Nelle figure 4.2.13, 4.2.14 e 4.2.15 sono riportati rispettivamente il livello dell'acqua, l'andamento della velocità dell'acqua e l'andamento della velocità dell'aria, facendo sempre riferimento al piano della sez.III della figura 3.1.6, al tempo t = 16.1 s.

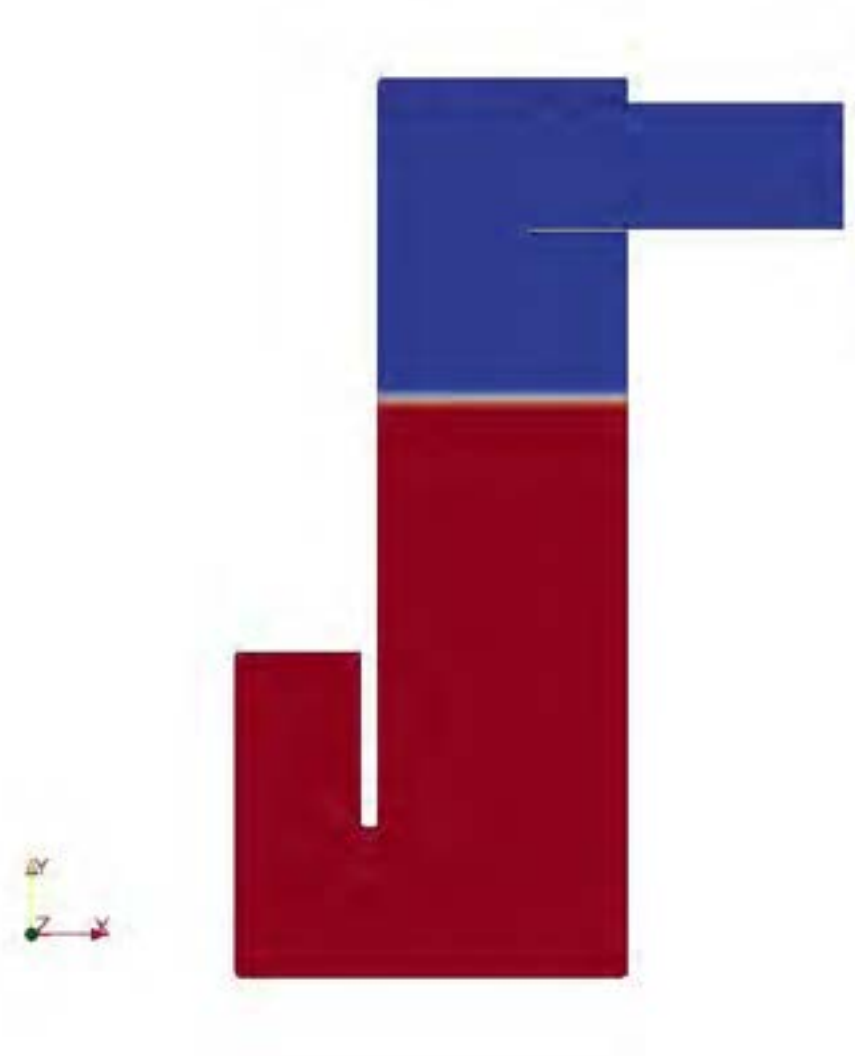

**Fig. 4.2.13 – Livello dell'acqua al tempo t=16.1s**

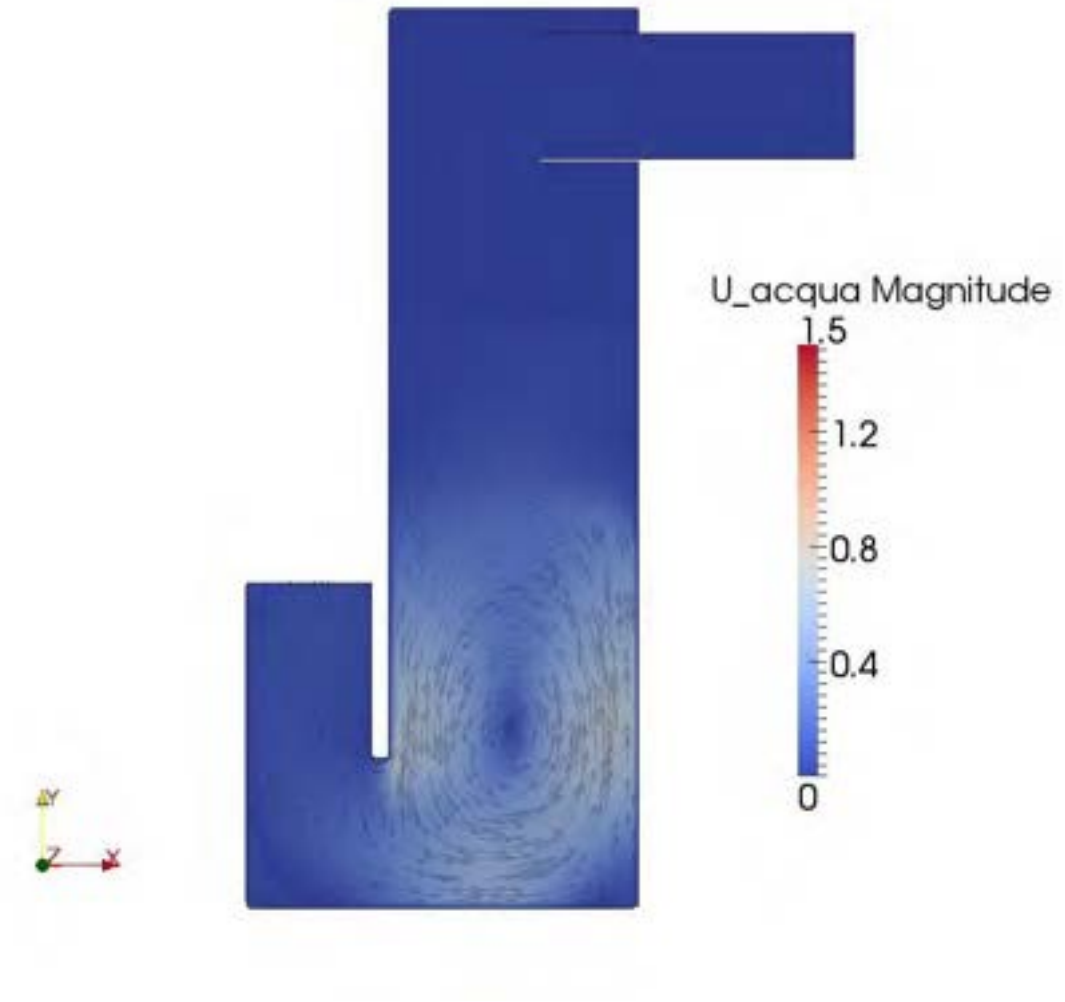


**Fig. 4.2.14 – Andamento della velocità dell'acqua al tempo t=16.1s**

**Fig. 4.2.15 – Andamento della velocità dell'aria al tempo t=16.1s**

Nelle figure 4.2.16, 4.2.17 e 4.2.18 sono riportati rispettivamente il livello dell'acqua, l'andamento della velocità dell'acqua e l'andamento della velocità dell'aria, facendo sempre riferimento al piano della sez.III della figura 3.1.6, al tempo t = 16.8 s.

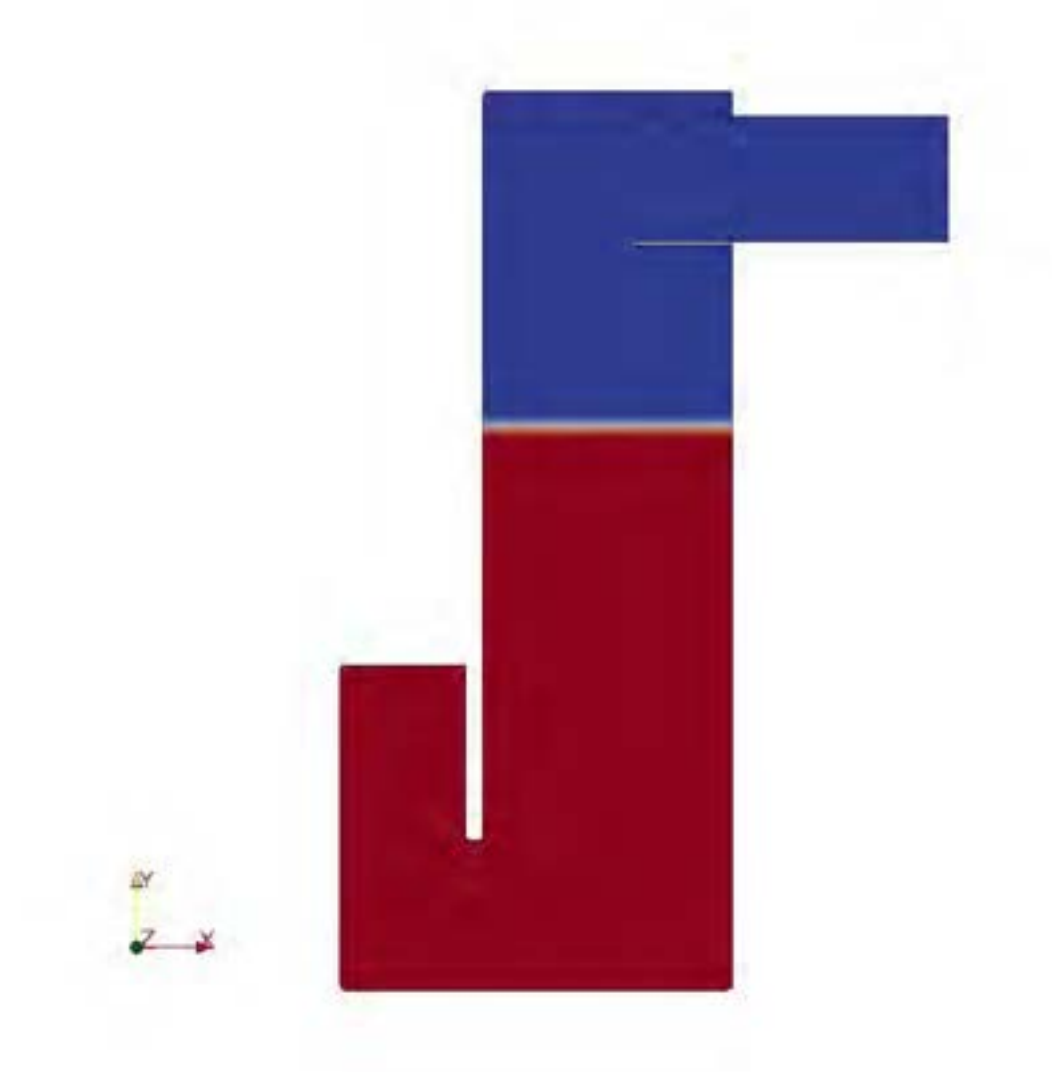

**Fig. 4.2.16 – Livello dell'acqua al tempo t=16.8s**

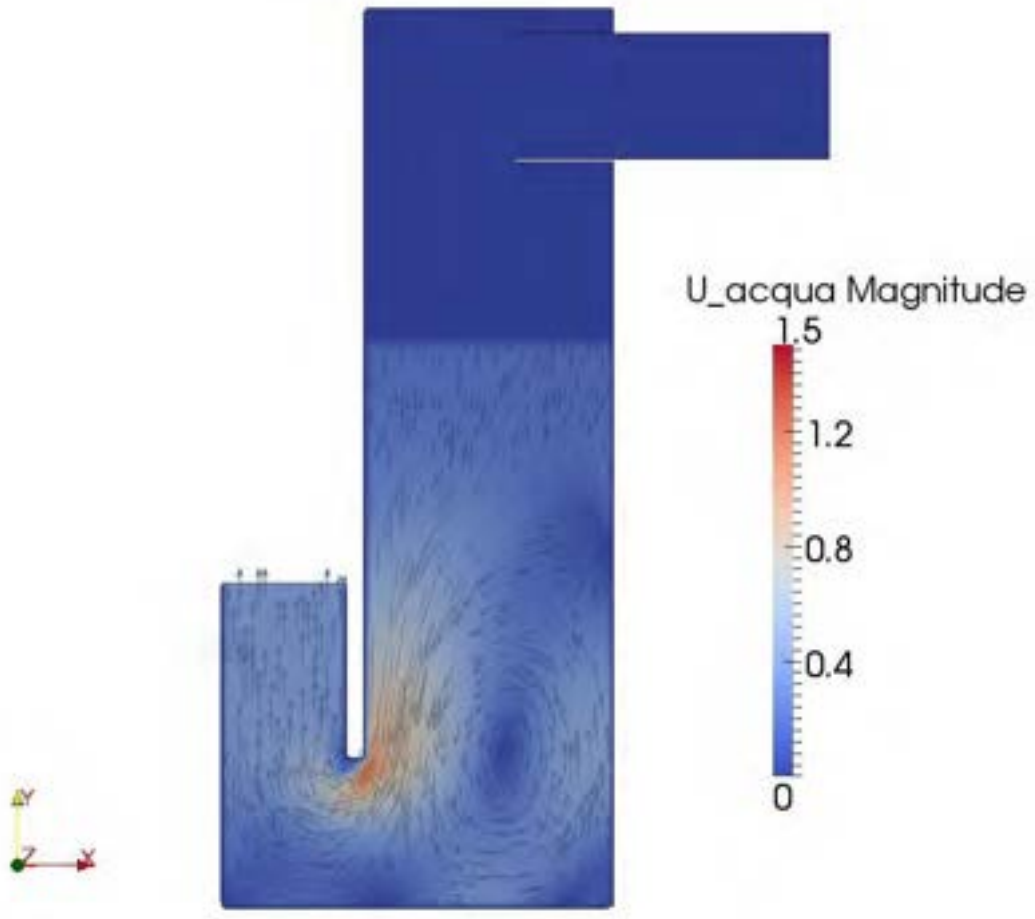


**Fig. 4.2.17 – Andamento della velocità dell'acqua al tempo t=16.8s**

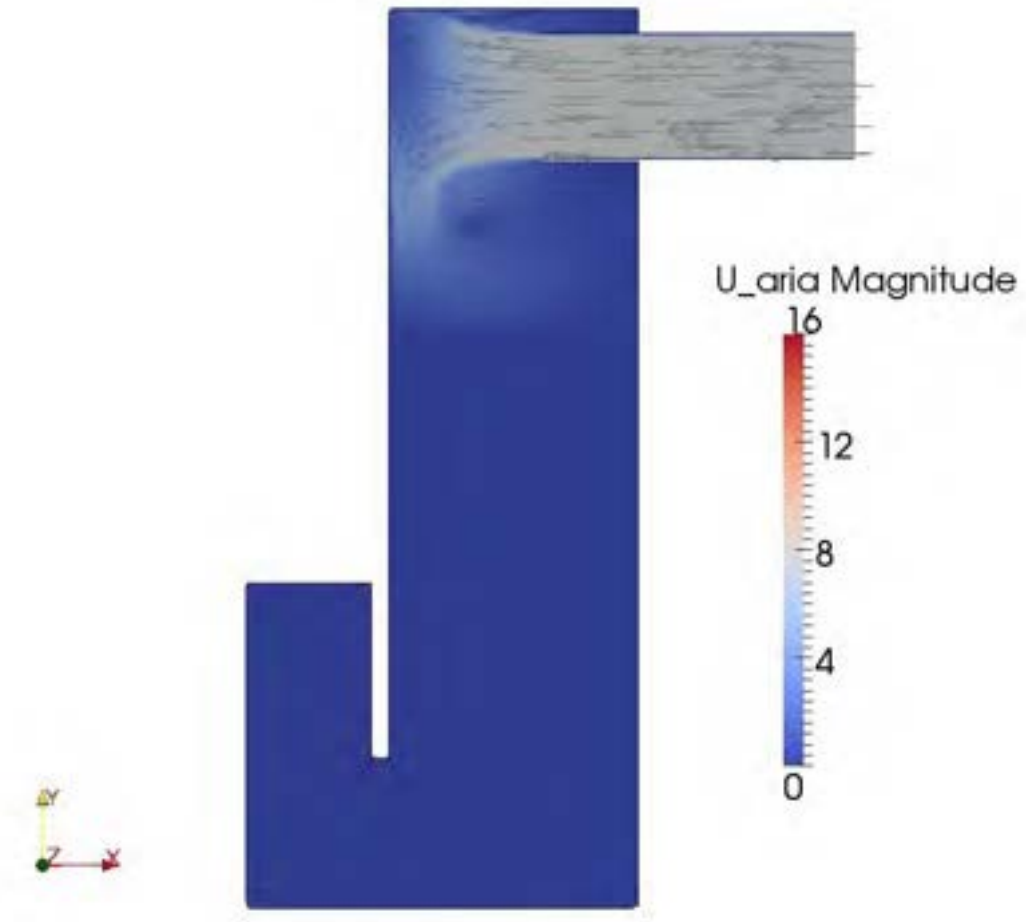


**Fig. 4.2.18 – Andamento della velocità dell'aria al tempo t=16.8s**

Nelle figure 4.2.19, 4.2.20 e 4.2.21 sono riportati rispettivamente il livello dell'acqua, l'andamento della velocità dell'acqua e l'andamento della velocità dell'aria, facendo sempre riferimento al piano della sez.III della figura 3.1.6, al tempo t = 17.5 s.

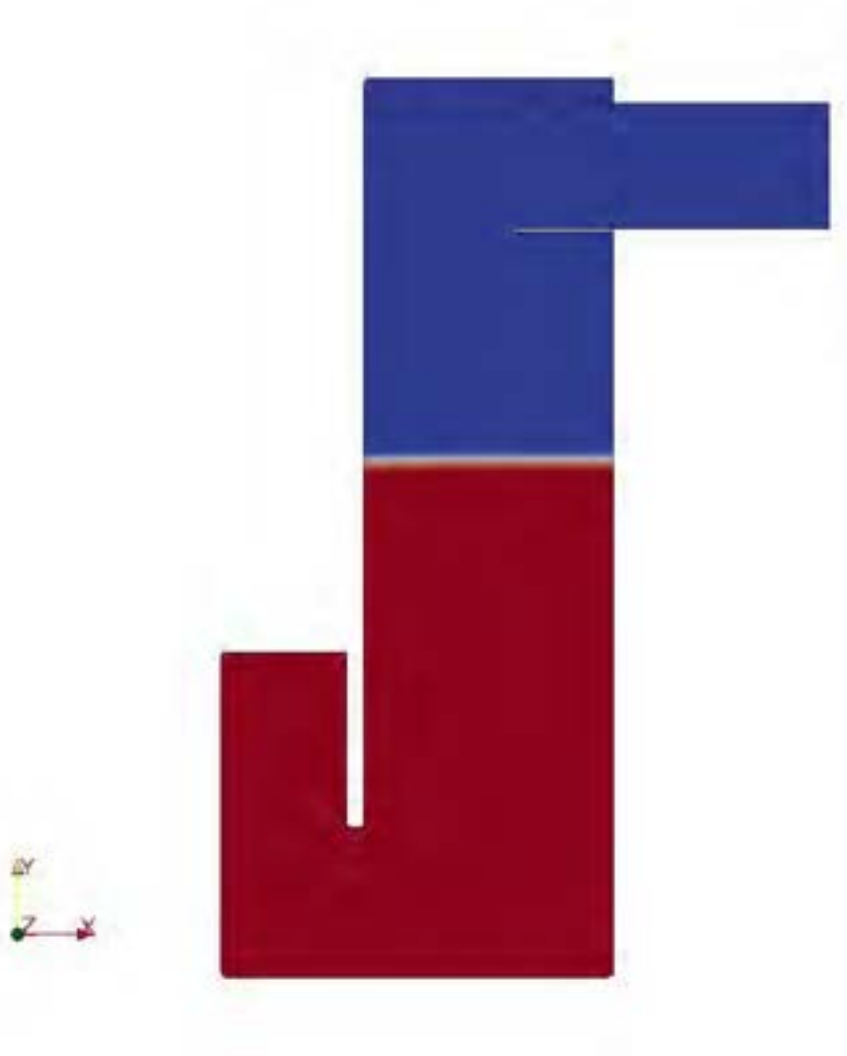

**Fig. 4.2.19 – Livello dell'acqua al tempo t=17.5s**

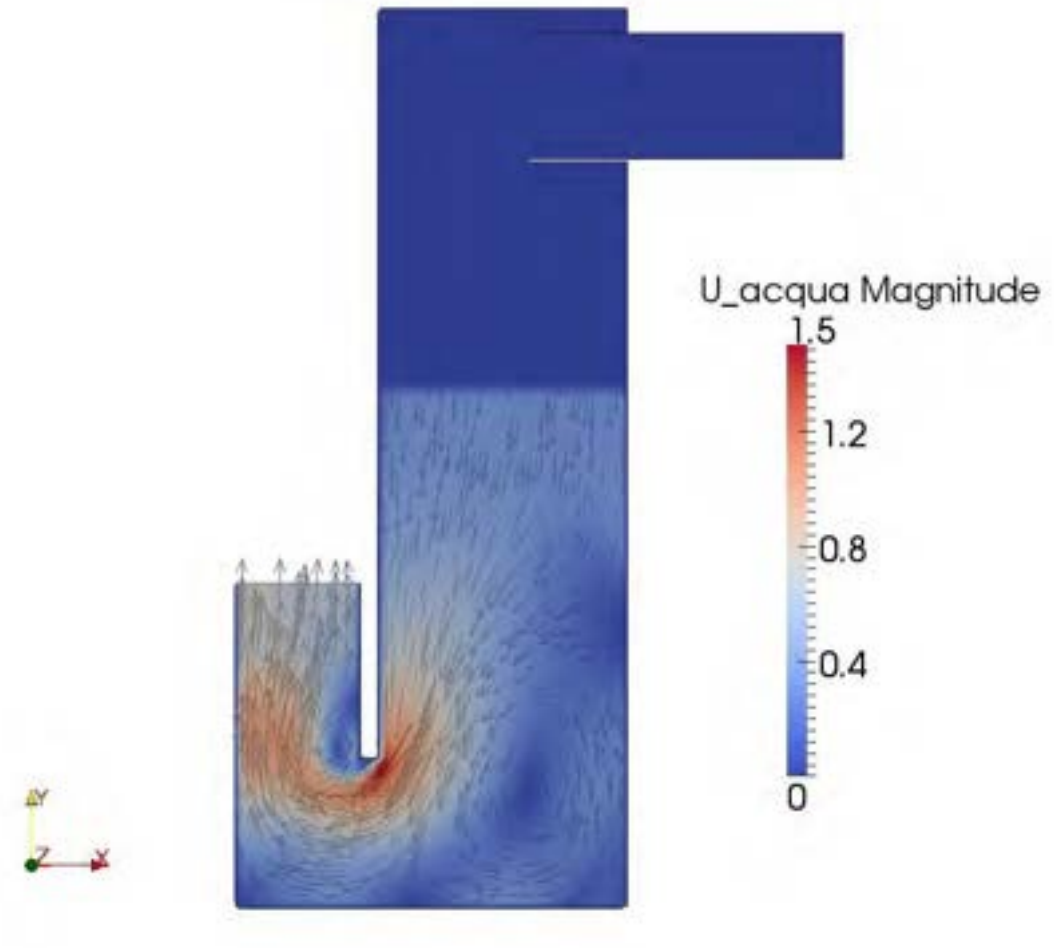


**Fig. 4.2.20 – Andamento della velocità dell'acqua al tempo t=17.5s**

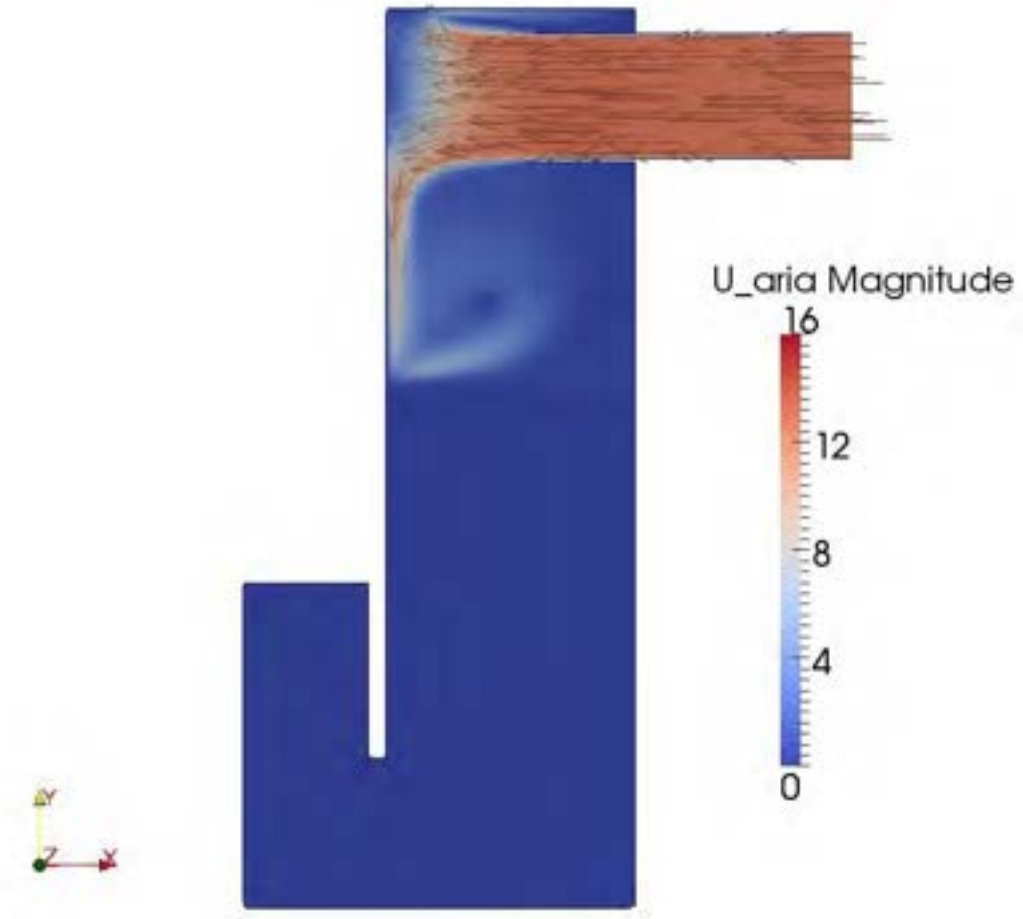


**Fig. 4.2.21 – Andamento della velocità dell'aria al tempo t=17.5s**

Nelle figure 4.2.22, 4.2.23 e 4.2.24 sono riportati rispettivamente il livello dell'acqua, l'andamento della velocità dell'acqua e l'andamento della velocità dell'aria, facendo sempre riferimento al piano della sez.III della figura 3.1.6, al tempo t = 18.2 s.

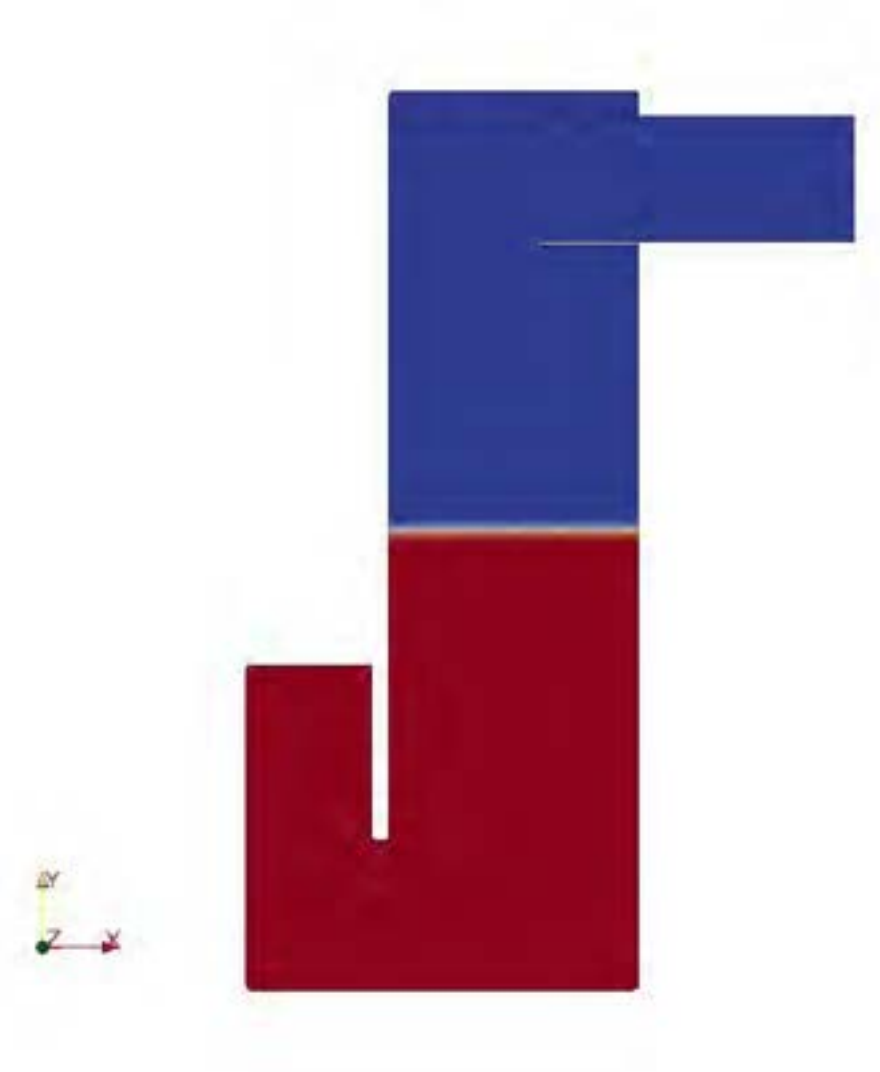

**Fig. 4.2.22 – Livello dell'acqua al tempo t=18.2s**

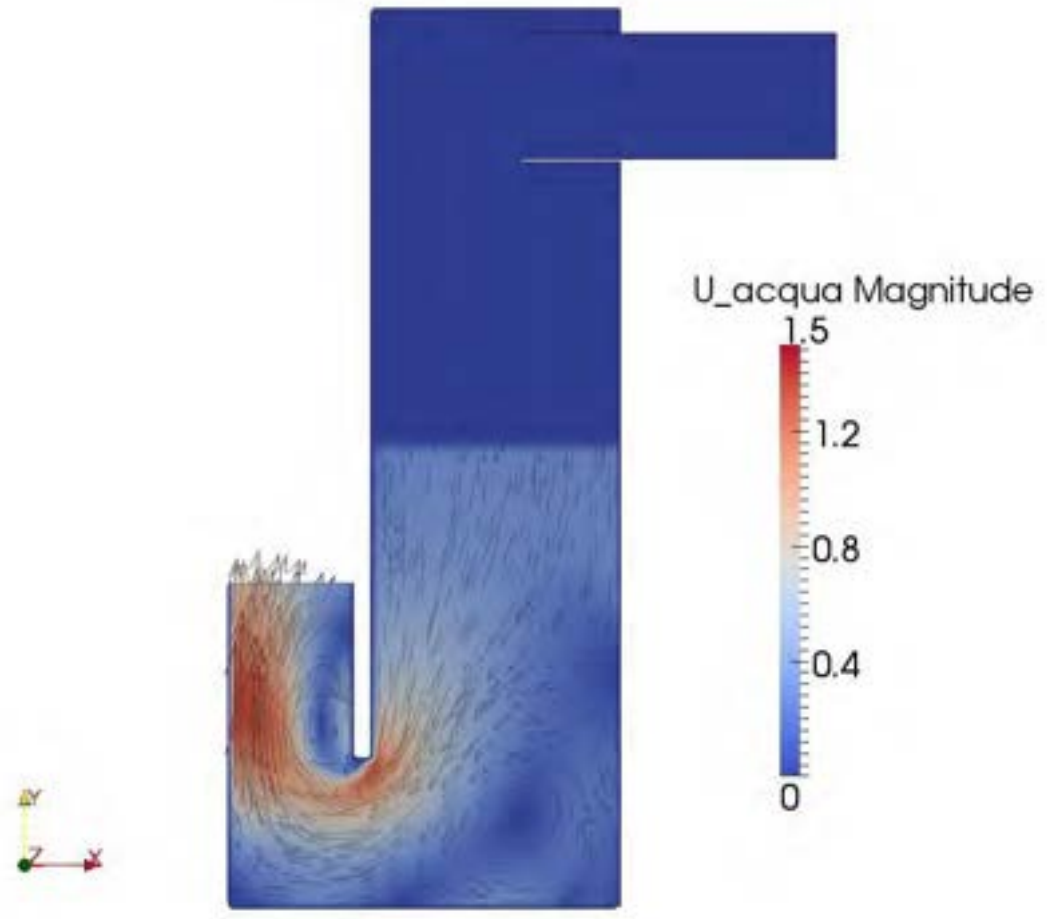


**Fig. 4.2.23 – Andamento della velocità dell'acqua al tempo t=18.2s**

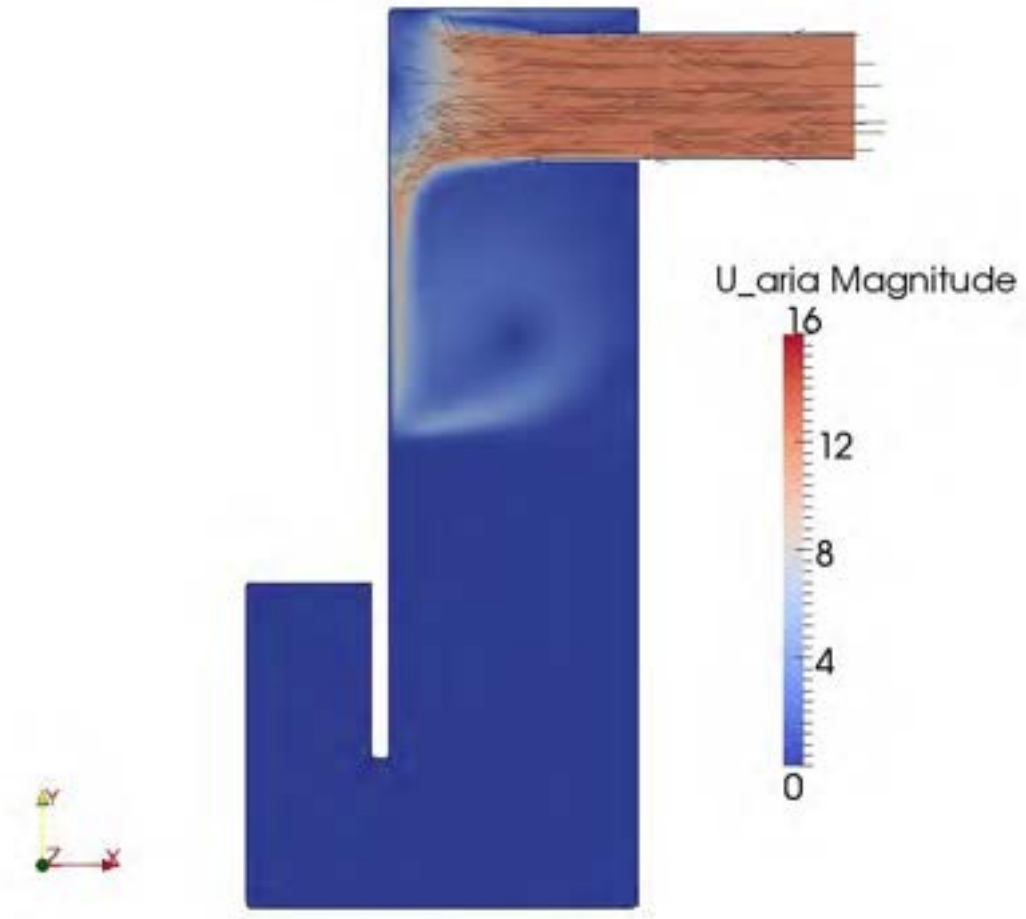


**Fig. 4.2.24 – Andamento della velocità dell'aria al tempo t=18.2s**

Nelle figure 4.2.25, 4.2.26 e 4.2.27 sono riportati rispettivamente il livello dell'acqua, l'andamento della velocità dell'acqua e l'andamento della velocità dell'aria, facendo sempre riferimento al piano della sez.III della figura 3.1.6, al tempo t = 18.9 s.

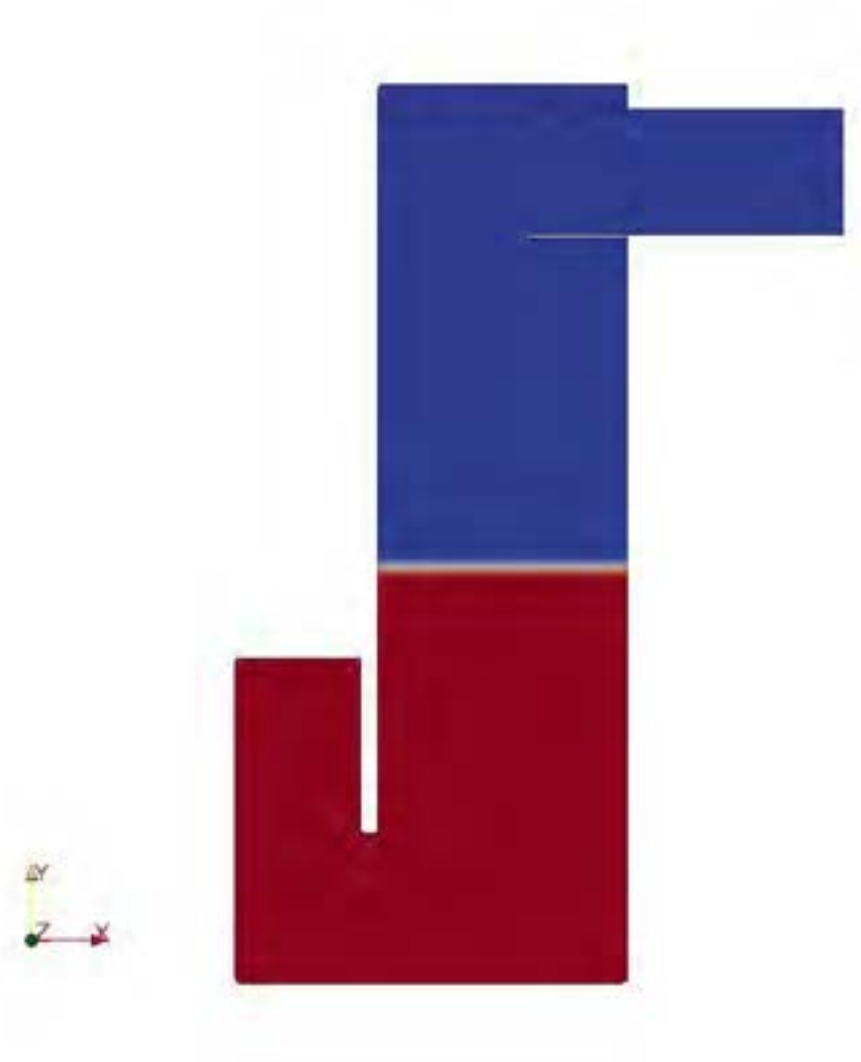

**Fig. 4.2.25 – Livello dell'acqua al tempo t=18.9s**

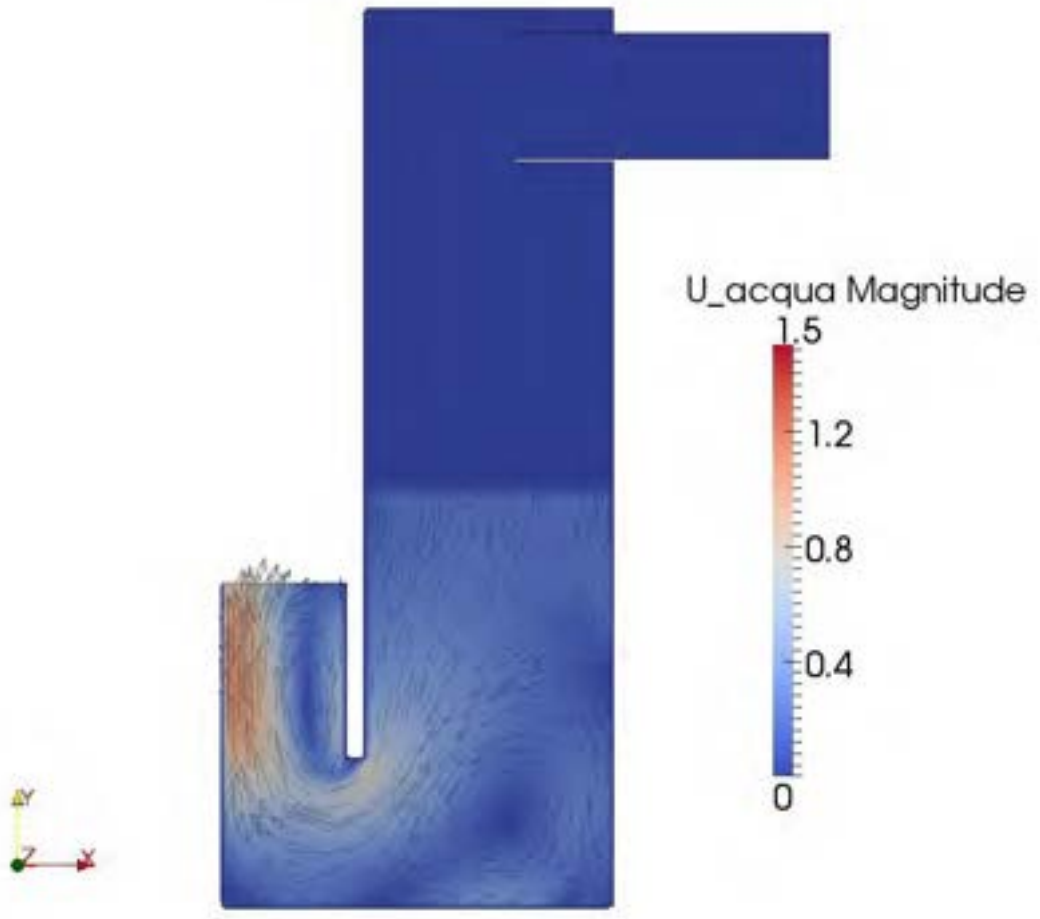


**Fig. 4.2.26 – Andamento della velocità dell'acqua al tempo t=18.9s**

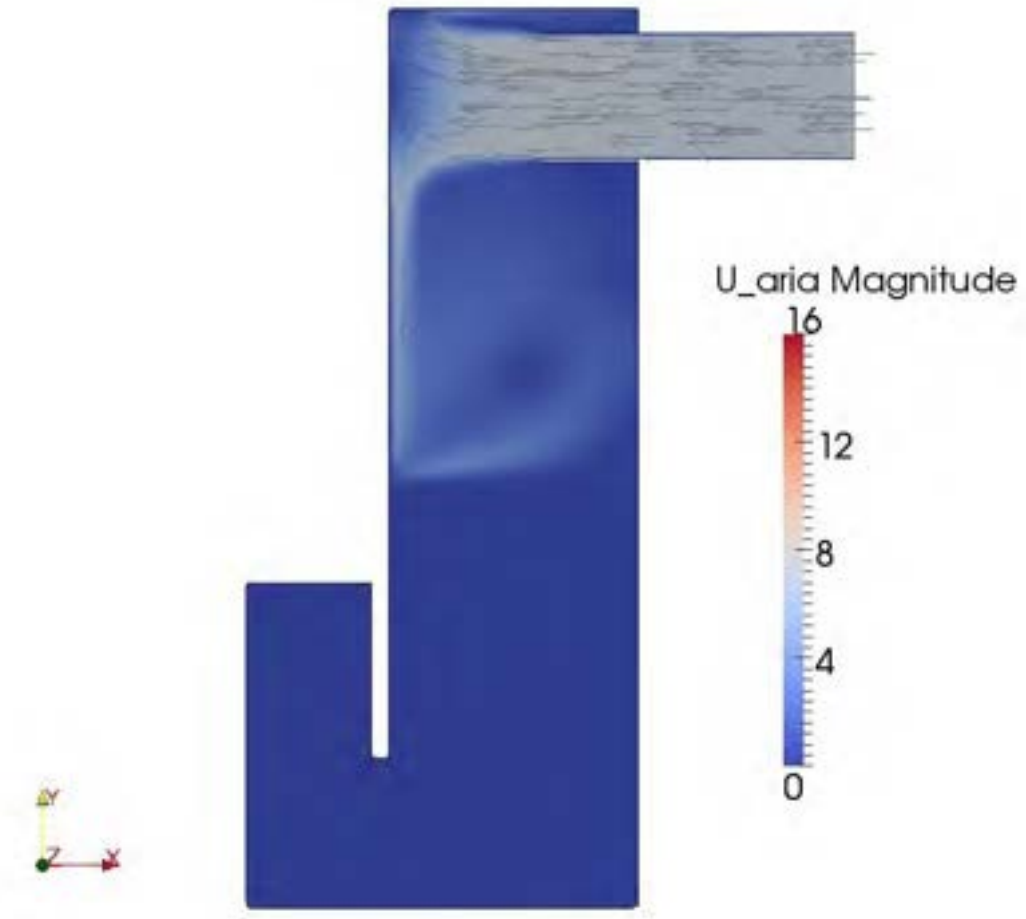


**Fig. 4.2.27 – Andamento della velocità dell'aria al tempo t=18.9s**

Nelle figure 4.2.28, 4.2.29 e 4.2.30 sono riportati rispettivamente il livello dell'acqua, l'andamento della velocità dell'acqua e l'andamento della velocità dell'aria, facendo sempre riferimento al piano della sez.III della figura 3.1.6, al tempo t = 19.6 s.

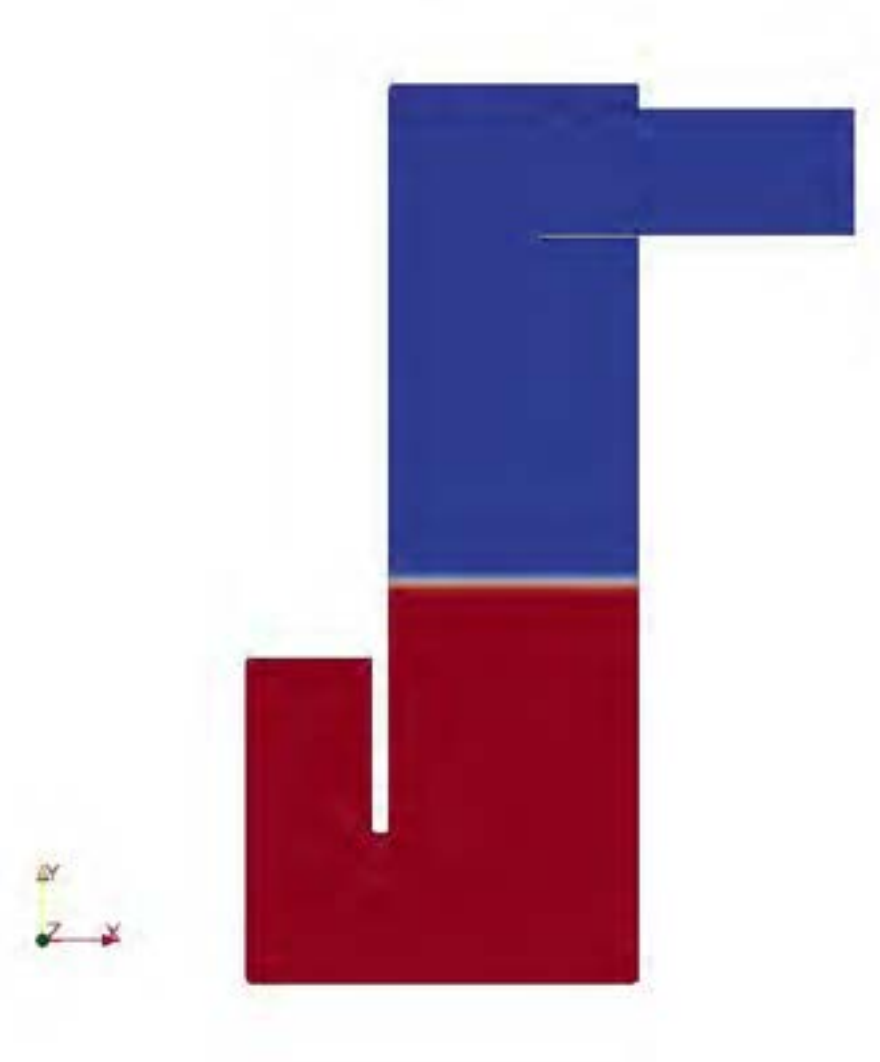

**Fig. 4.2.28 – Livello dell'acqua al tempo t=19.6s**

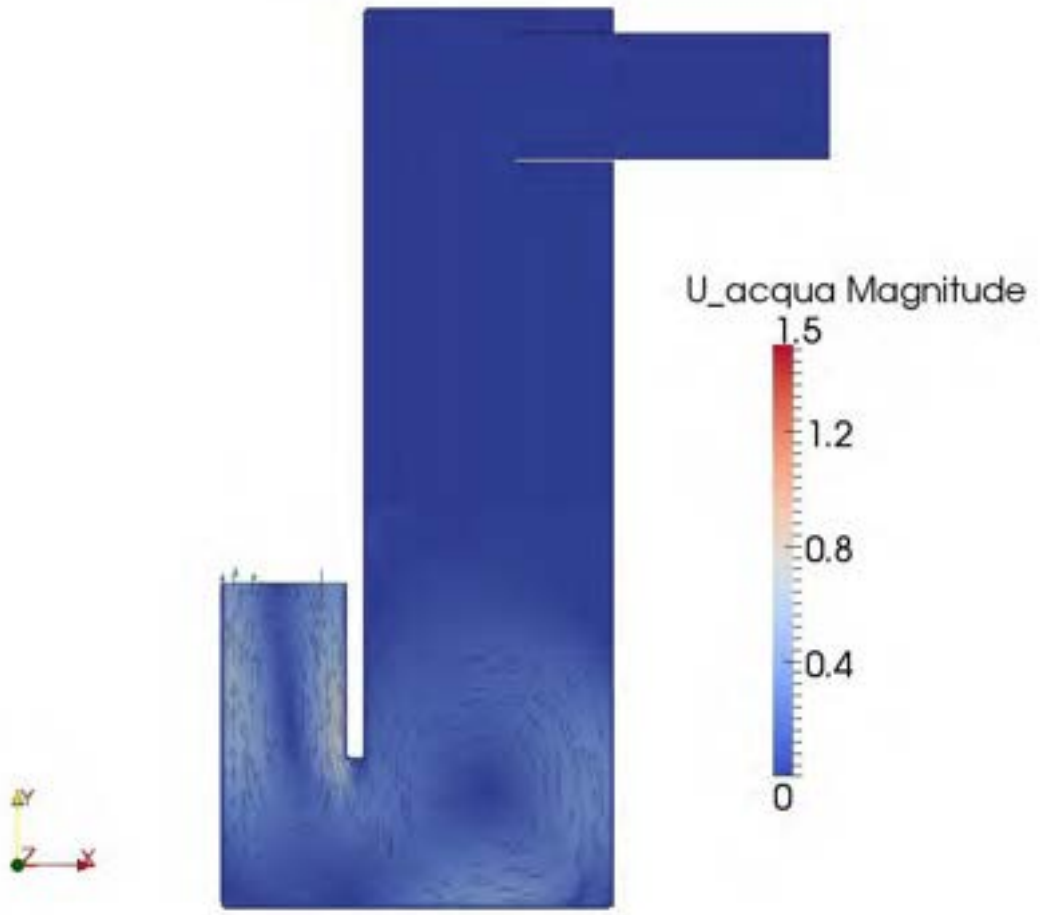


**Fig. 4.2.29 – Andamento della velocità dell'acqua al tempo t=19.6s**

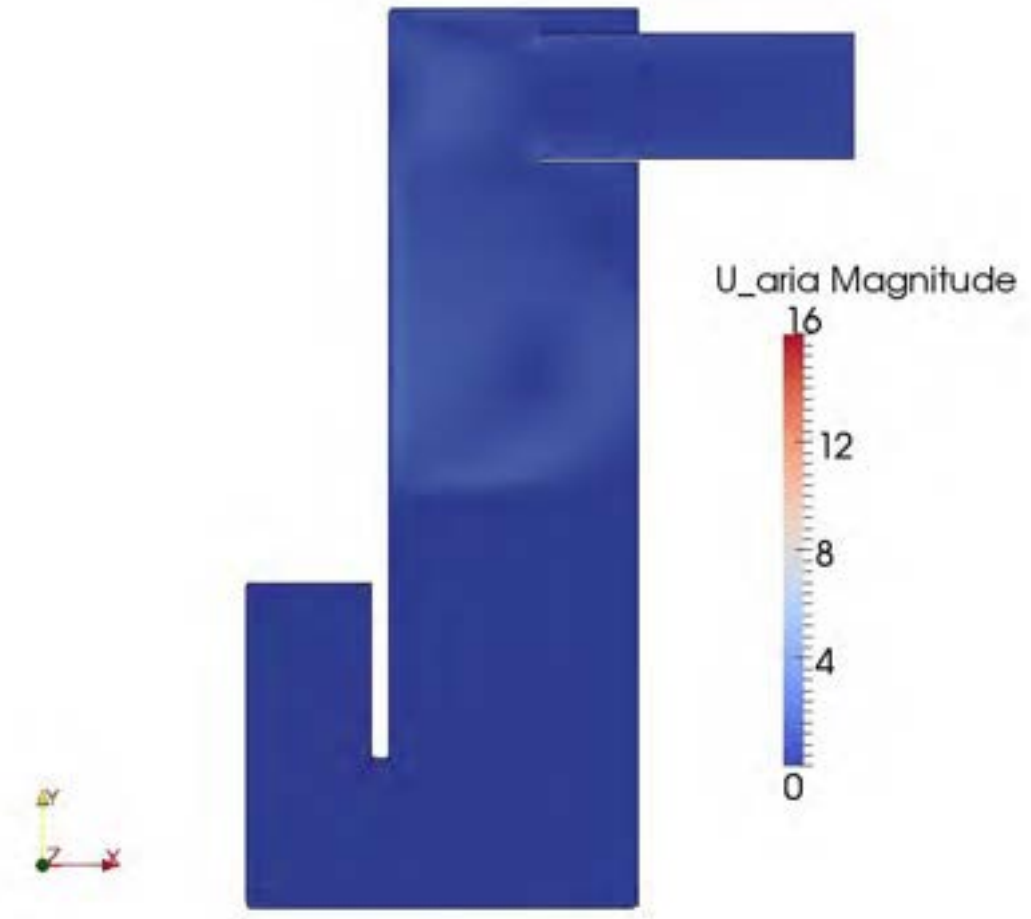


**Fig. 4.2.30 – Andamento della velocità dell'aria al tempo t=19.6s**

Nelle figure 4.2.31, 4.2.32 e 4.2.33 sono riportati rispettivamente il livello dell'acqua, l'andamento della velocità dell'acqua e l'andamento della velocità dell'aria, facendo sempre riferimento al piano della sez.III della figura 3.1.6, al tempo t = 20.3 s.

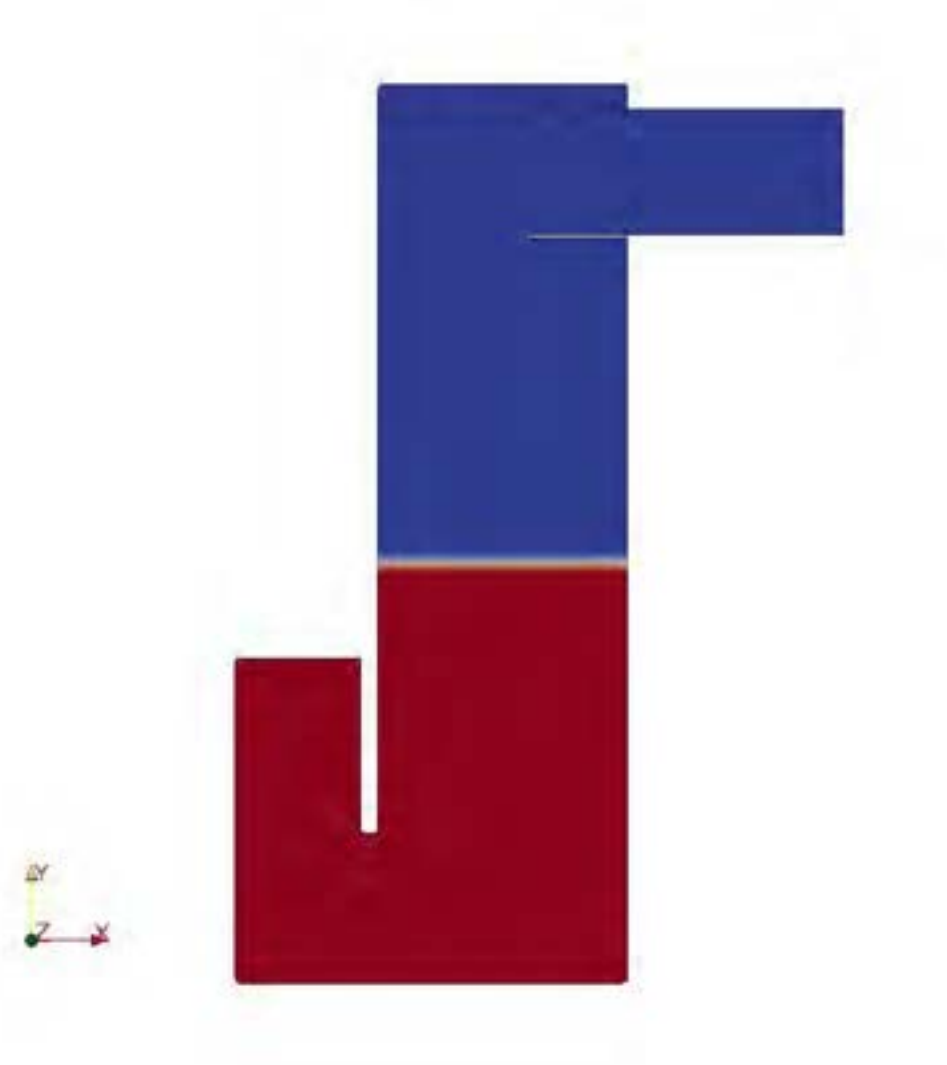

**Fig. 4.2.31 – Livello dell'acqua al tempo t=20.3s**

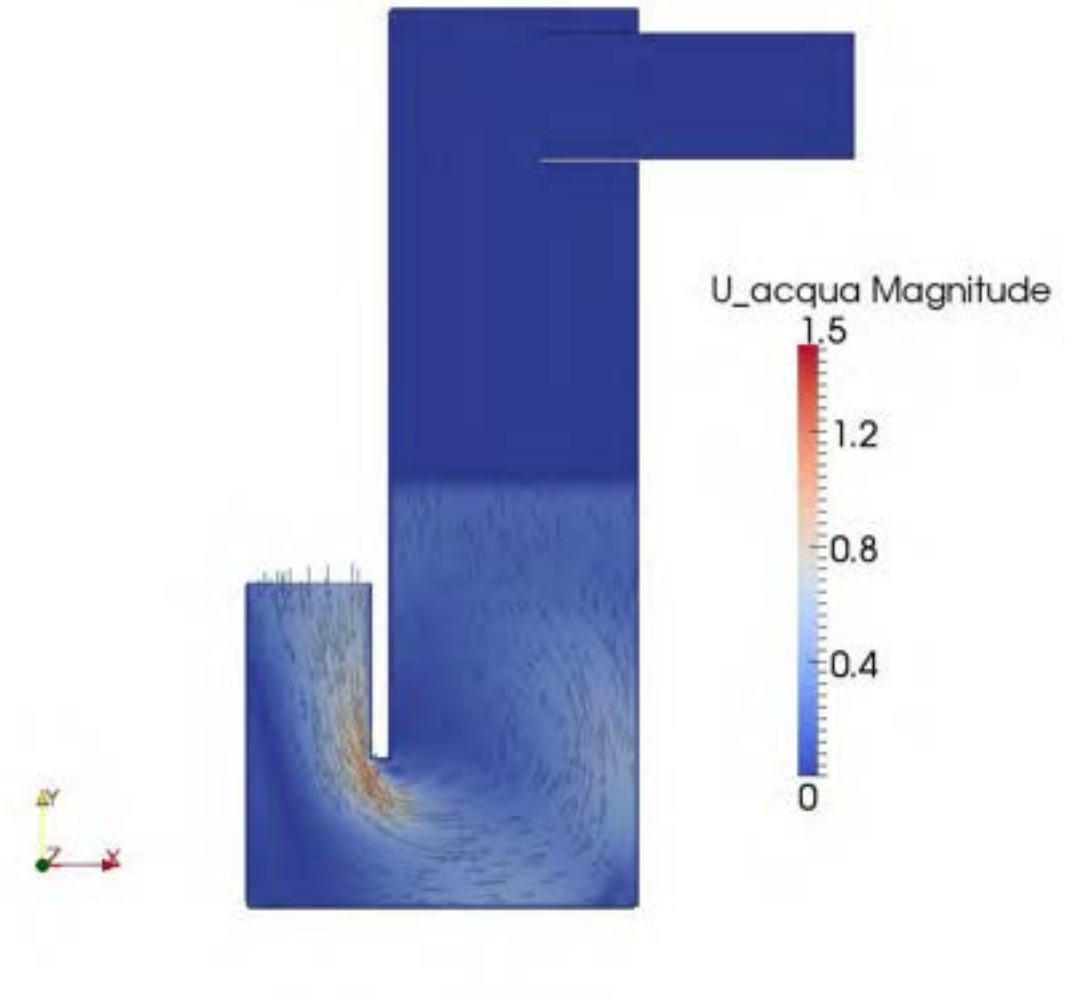


**Fig. 4.2.32 – Andamento della velocità dell'acqua al tempo t=20.3s**

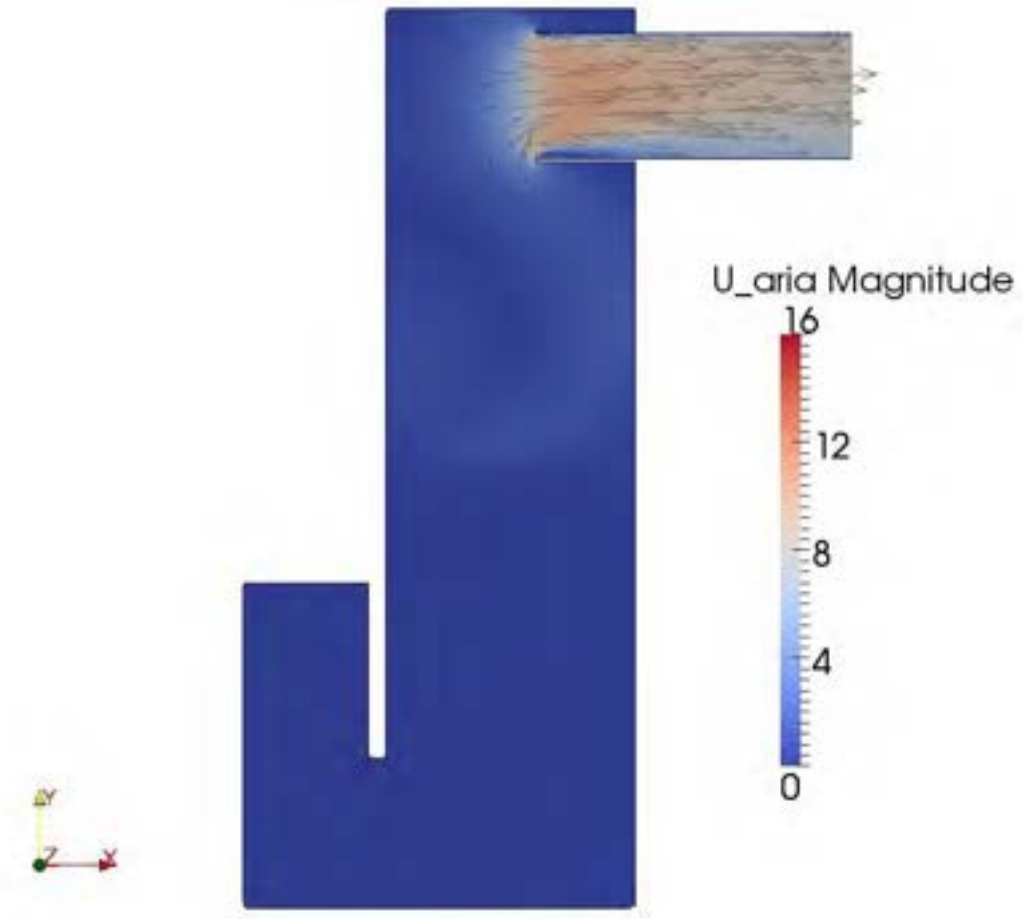


**Fig. 4.2.33 – Andamento della velocità dell'aria al tempo t=20.3s**

Nelle figure 4.2.34, 4.2.35 e 4.2.36 sono riportati rispettivamente il livello dell'acqua, l'andamento della velocità dell'acqua e l'andamento della velocità dell'aria, facendo sempre riferimento al piano della sez.III della figura 3.1.6, al tempo t = 21.0 s.

**Fig. 4.2.34 – Livello dell'acqua al tempo t=21.0s**

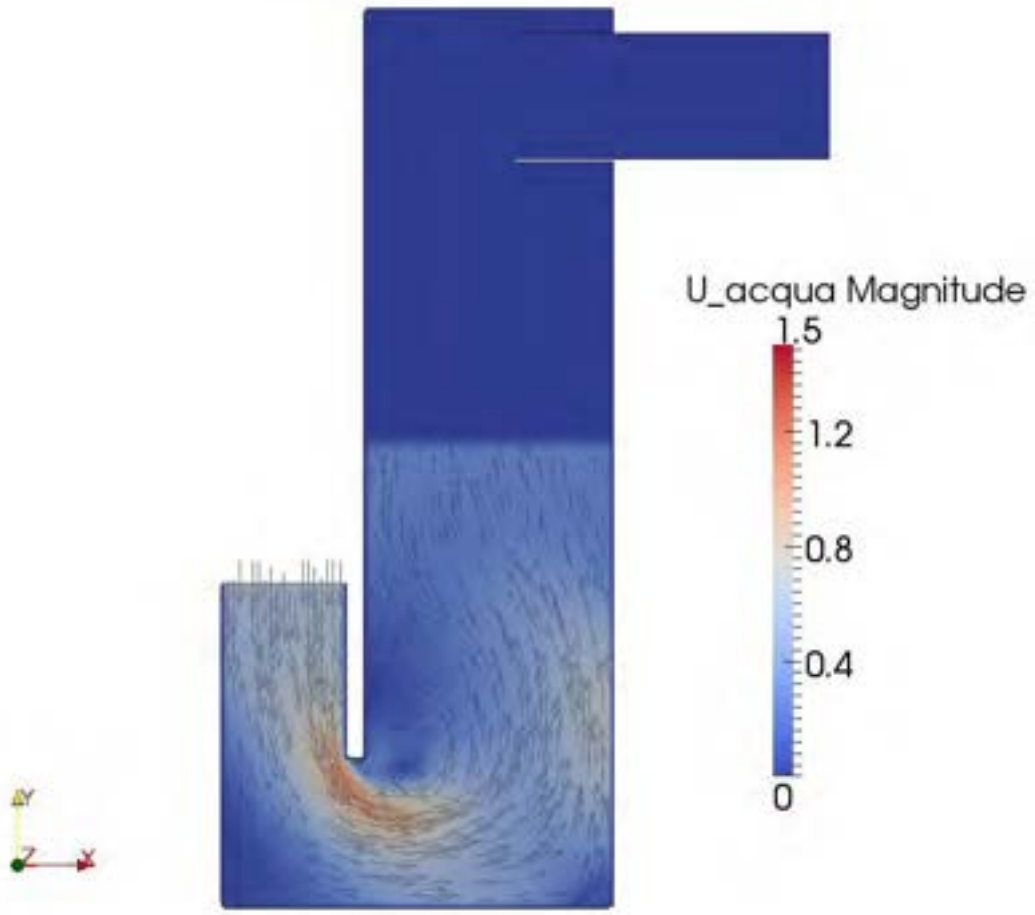


**Fig. 4.2.35 – Andamento della velocità dell'acqua al tempo t=21.0s**

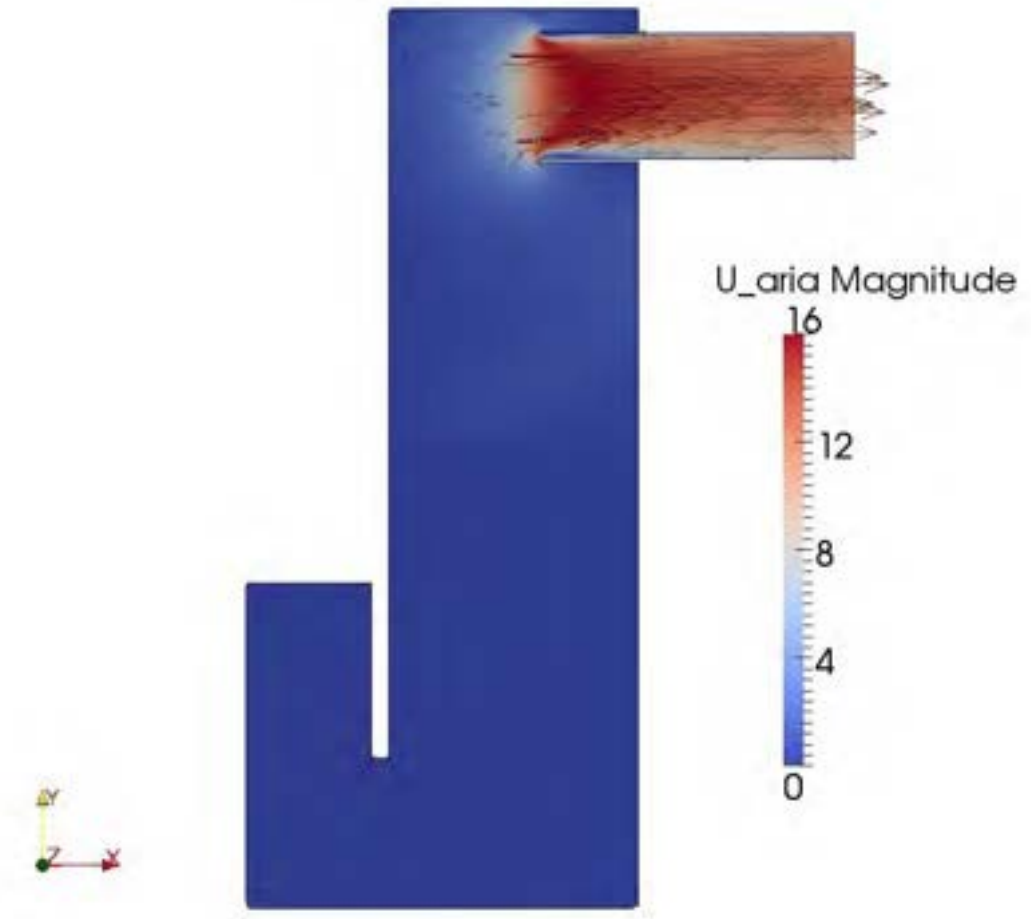


**Fig. 4.2.36 – Andamento della velocità dell'aria al tempo t=21.0s**

## 4.3 Analisi dei risultati e considerazioni sulla loro affidabilità

L'analisi dei risultati, in questa fase in cui non ci sono dati sperimentali di confronto, può essere principalmente di tipo qualitativo. Un'analisi finalizzata alla valutazione della corrispondenza dei risultati con quelli presumibilmente attesi dalla tipologia dei flussi presenti.

In entrambe le simulazioni i risultati mostrano un comportamento dei flussi coerente con i fenomeni in gioco.

Nella prima simulazione si nota un certo sfasamento tra l'andamento della pressione p-rgh, e quindi del livello dell'onda forzante esterna, e l'andamento del livello dell'acqua all'interno della camera; l'ampiezza di questo ultimo risulta anche inferiore a quella corrispondente alla forzante.

Nella seconda simulazione si nota invece un comportamento differente: le due evoluzioni, l'andamento del livello dell'onda forzante e l'andamento del livello dell'acqua all'interno della camera, risultano quasi in fase; l'ampiezza del'evoluzione del livello dell'acqua all'interno della camera risulta superiore all'ampiezza dell'evoluzione dell'onda forzante.

I risultati analizzati si riferiscono al periodo corrispondente a quello della terza onda forzante. E' importante considerare che in questa condizione il fenomeno simulato potrebbe ancora non essere sufficientemente stabilizzato e risentire ancora delle condizioni di partenza. quindi è opportuno portare ulteriormente avanti entrambe le simulazioni per verificare appunto lo stabilizzarsi del fenomeno oscillatorio.

L'analisi dell'andamento delle velocità nel tempo, sia della zona in cui è presente l'aria sia della zona in cui è presente l'acqua, evidenziano delle zone di forte ricircolo e delle zone nelle quali il flusso non possa sfruttare completamente le sezioni geometriche di passaggio. Uno studio sull'ottimizzazione della geometria di tali zone potrebbe portare ad un miglioramento delle condizioni di flusso con conseguente miglioramento dell'efficienza del sistema.

Come precedentemente accennato i limiti di queste simulazioni sono legati alla mancanza di dati sperimentali di confronto, con i quali effettuare benchmark per una convalida sia qualitativa sia quantitativa dei risultati ottenuti.

# 5 Conclusioni

Il presente rapporto riporta il lavoro di sviluppo di un modello per la simulazione numerica CFD (Computational Fluid Dynamics) di un dispositivo U-OWC (Oscillating Water Culomn), basato sulla geometria della sezione di prova in fase di realizzazione presso l'Università Mediterranea di Reggio Calabria.

La complessità dei fenomeni fisici, la dimensione degli apparati e le velocità dei flussi in gioco hanno reso piuttosto laboriosa la costruzione del modello computazionale e richiedono l'utilizzo di potenze di calcolo molto rilevanti.
Per tali simulazioni è stato quindi necessario effettuare calcoli in multiprocessore, in particolare ne sono stati utilizzati 128 per ogni calcolo, e sono state utilizzate le macchine appartenenti al sistema di calcolo ad alte prestazioni del progetto CRESCO.

Le condizioni di funzionamento analizzate considerano due situazioni: le onde prodotte dal vento locale (wind wave) e quelle prodotte dalla propagazione o smorzamento del moto ondoso (long swells).

Individuati il tipo di flusso in gioco e le condizioni al contorno ed iniziali, uno degli aspetti critici è stato la realizzazione del mesh, in conseguenza della necessità di contenere il numero di elementi e di ridurre il peso computazionale del modello, tenendo comunque adeguatamente in considerazione la necessità di limitare le dimensioni delle celle ove presente un flusso ad alta velocità.

I risultati ottenuti, dalle due simulazioni CFD effettuate, sono coerenti con quelli attesi e fanno quindi ritenere il modello in grado di descrivere, in modo sufficientemente adeguato, i fenomeni fisici in gioco. Per una convalida della reale validità dei risultati bisogna prevedere una successiva fase di benchmark con i risultati di prove sperimentali, che saranno disponibili a seguito del completamento delle prove sperimentali da parte dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria.

# 6 Riferimenti bibliografici


1. OpenFOAM, The Open Source CFD Toolbox, User Guide, Version 2.2.0, 22nd February 2013.

2. OpenFOAM, The Open Source CFD Toolbox, Programmer's Guide, Version 2.2.0, 22nd February 2013.

3. OpenFOAM, The open source CFD toolbox, Foundation Training, ESI-OpenCFD, Notes v2.1.1 rev5 12/11/2012.

4. OpenFOAM, The open source CFD toolbox, Advanced Training, ESI-OpenCFD, Notes v2.1.1 rev5 12/11/2012.

5. P. Boccotti, "Gli impianti REWEC", Editoriale BIOS - 2004.

6. P. Boccotti, p. Filianotti, V. Fiamma, F. Arena, "Caisson breakwater embodying an OWC with a small opening – Part II, A small-scale field experiment", Ocean Engineering 34 (2007) (820-841).

7. R. B. Bird, W. E. Stewart, E. N. Lightfoot, "Fenomeni di trasporto", Casa Editrice Ambrosiana – Milano (1979).

8. A.A. V.V., "Fondamenti di Termofluidodinamica Computazionale" a cura di Gianni Comini, Servizi Grafici Editoriali – Padova (2004).