

# Analisi di fattibilità di un ricevitore solare “windowless” con sistema di isolamento aerodinamico a lama d’aria

---

Studente/i

Samuel Selva

Relatore

Simone Zavattoni

---

Correlatore

Maurizio Barbato

---

Committente

Laboratorio TFD

---

Corso di laurea

Ingegneria meccanica

Modulo

M-P6070 Progetto di diploma

---

Anno

2020/2021

PAGINA BIANCA

# Dedica

*A te,  
che nei tanti momenti di sconforto  
mi hai dato la forza di non abbattermi,  
di continuare ed andare avanti.*

*A te,  
che sei l'angioletto più bello di tutti.*

## Abstract

Nei ricevitori solari a cavità, per isolare l'ambiente esterno da quello interno del ricevitore, viene spesso utilizzata una finestra realizzata in quarzo. La radiazione, concentrata dal campo di eliostati, passa attraverso quest'ultima e riscalda l'interno del ricevitore. La finestra tuttavia risulta fragile agli shock termici a causa degli sbalzi di temperatura al quale sono soggetti i ricevitori. Essa infatti passa da una temperatura ambiente, per esempio di notte quando il ricevitore non è in funzione, a temperature molto elevate prossime ai 1000/1500 °C.

Il progetto in questione si basa sullo studio di una nuova tecnologia atta ad isolare la cavità del ricevitore. Si tratta di un'innovativa tecnologia aerodinamica a lama d'aria.

Il sistema a lama d'aria, oltre ad isolare la cavità termicamente, deve anche impedire che il fluido termovettore (vapore acqueo), che scorre all'interno del ricevitore, venga disperso nell'ambiente esterno al di fuori della cavità.

In questo progetto si è ricorso all'utilizzo del pacchetto Ansys Fluent e sono state effettuate circa 150 simulazioni in due dimensioni; queste sono finalizzate a comprendere il funzionamento del ricevitore con l'integrazione del sistema a lama d'aria e a trovare la configurazione che riesce ad isolare al meglio la cavità. In particolare è stata riposta l'attenzione all'aspetto fluidodinamico del ricevitore.

Le prime simulazioni sono servite a formulare delle conclusioni sull'andamento del ricevitore in funzione e sul settaggio da usare con il software Fluent, così da poter proseguire nel lavoro cercando la configurazione di getto d'aria che offre la miglior efficienza.

Il sistema a lama d'aria è stato testato da 3 posizioni differenti ed è stata identificata la soluzione più vantaggiosa in termini di perdite di fluido termovettore. La configurazione più efficiente è stata inoltre esaminata in presenza di condizioni di vento, in entrambe le direzioni (da sinistra verso destra e da destra verso sinistra) ed è stato valutato come questo elemento naturale influisce sull'efficienza del ricevitore. La configurazione migliore è risultata essere quella in cui viene utilizzato un flusso d'aria alla velocità di 20 m/s e ad una angolazione di 45° rispetto alla parete del ricevitore. È stata ottenuta un'efficienza dell'84,72 %; questo indica che comunque, anche con la soluzione migliore, una quantità di fluido termovettore viene comunque dispersa nell'ambiente esterno.



# Indice generale

<b>Dedica</b> .....	<b>2</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>3</b>
<b>Indice generale</b> .....	<b>5</b>
<b>Progetto assegnato</b> .....	<b>8</b>
<b>Pianificazione del progetto</b> .....	<b>10</b>
<b>1 Stato dell'arte</b> .....	<b>11</b>
1.1 Ricevitori solari a cavità.....	11
1.2 Sistemi a lama d'aria .....	14
1.3 Sistemi a lama d'aria applicati ai ricevitori solari "windowless".....	16
1.3.1 Approfondimenti sperimentali sul meccanismo delle perdite di calore di un ricevitore cilindrico a cavità solare dotato di una cortina d'aria [1].....	17
1.3.2 Riduzione delle perdite di calore convettivo nei ricevitori a cavità solare attraverso l'utilizzo di un sistema a cortina d'aria [2] .....	18
1.3.3 Controllo attivo del flusso d'aria per ridurre le perdite di calore di un ricevitore a cavità [3] .....	21
1.3.4 Utilizzo di una cortina d'aria per ridurre le perdite di calore di una cavità aperta inclinata [4] ....	24
1.4 Modulo di deflessione.....	25
1.5 Tabelle riassuntive .....	26
<b>2 Ricevitore solare "windowless"</b> .....	<b>28</b>
2.1 Funzionamento.....	28
2.2 Problematiche e soluzione.....	29
2.3 Dimensioni e generalità.....	29
<b>3 Nomenclatura</b> .....	<b>31</b>
<b>4 Prime simulazioni</b> .....	<b>32</b>
<b>5 Ricerca Varianti</b> .....	<b>34</b>
5.1 Variante 1.....	34
5.2 Variante 2.....	35
5.3 Variante 3.....	35
<b>6 Analisi CFD e Settaggio definitivo Fluent</b> .....	<b>36</b>
6.1 Geometry.....	36
6.2 Meshing.....	36
6.3 Fluent.....	37
6.3.1 Setup.....	37
6.3.2 Solution.....	42
<b>7 Calcoli e settaggio delle boundary conditions</b> .....	<b>44</b>
<b>8 Condizione all'Outlet 1</b> .....	<b>50</b>

<b>9</b>	<b>Studio della soluzione più efficace.....</b>	<b>59</b>
9.1	<i>Variante 1.....</i>	59
9.2	<i>Variante 2.....</i>	64
9.3	<i>Variante 3.....</i>	69
<b>10</b>	<b>Simulazioni in presenza di vento .....</b>	<b>76</b>
<b>11</b>	<b>Sviluppi futuri .....</b>	<b>85</b>
<b>12</b>	<b>Conclusioni .....</b>	<b>86</b>
	<b>Bibliografia .....</b>	<b>89</b>
	<b>Fonti di immagini e grafici .....</b>	<b>89</b>
	<b>Appendici.....</b>	<b>90</b>
	<b>Allegati .....</b>	<b>90</b>
	<b>Indice delle figure.....</b>	<b>91</b>
	<b>Indice delle tabelle .....</b>	<b>95</b>
	<b>Indice dei grafici .....</b>	<b>95</b>



# Progetto assegnato

## Perfezionamento, strumentazione e collaudo di un impianto CAES da laboratorio

### Persone coinvolte

---

Proponente	Laboratorio TFD
Relatore	Simone Zavattoni
Correlatore	Maurizio Barbato
Studente	Samuel Selva
Studente	--

### Dati generali

---

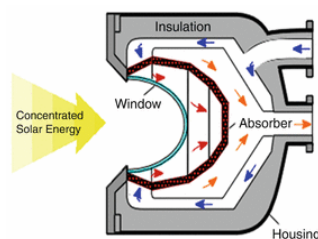
Codice	C10401
Anno accademico	2020/2021
Semestre	Primaverile
Corso di laurea	Ingegneria Meccanica
Opzione	Nessuna
Tipologia del progetto	Diploma
Stato	Proposta
Confidenziale	No
Pubblicabile	Sì

### Descrizione

Negli impianti a concentrazione solare a torre vengono utilizzate una serie di superfici riflettenti (eliostati) per convogliare e concentrare la radiazione solare verso un ricevitore posizionato sulla sommità di una torre. All'interno del ricevitore, la radiazione solare concentrata viene convertita in energia termica e trasportata, mediante l'utilizzo di un fluido termovettore, verso un blocco di potenza per la produzione di energia elettrica. In ottica di efficienza di questa tipologia di impianti, il ricevitore è un componente chiave. Oggigiorno ne esistono differenti soluzioni tecnologiche tra cui, quella a cavità, risulta essere molto promettente specialmente per i vantaggi che offre nel caso di applicazioni ad alta temperatura.

Come rappresentato nell'immagine sottostante (Figura 1), in questo tipo di ricevitore, viene normalmente utilizzata una finestra in quarzo per separare la cavità dall'ambiente esterno. Il problema è che si tratta di un componente molto delicato che necessita di una meticolosa gestione del carico termico al fine di evitare problemi strutturali. Un importante passo avanti in questa tecnologia sarebbe quello di sviluppare un sistema di isolamento alternativo del ricevitore che consenta di fare a meno della finestra. I sistemi di isolamento aerodinamici a lama d'aria potrebbero rappresentare una possibile soluzione.

Lo scopo del presente lavoro di diploma è quello di valutare criticamente la possibilità di realizzare un ricevitore a cavità "windowless" mediante un sistema di isolamento aerodinamico a lama d'aria.



### Compiti

---



- 
- Pianificazione del progetto di diploma.
  - Raccolta dei requisiti (End User Requirements), analisi e stesura del quaderno dei compiti dettagliato contenente le specifiche di progetto.
  - Preparazione dello stato dell'arte relativo ai ricevitori "windowless" e ai sistemi di isolamento aerodinamici a lama d'aria.
  - Proporre delle possibili soluzioni utilizzando una o più lame d'aria al fine di isolare al meglio la cavità del ricevitore in esame dall'ambiente esterno.
  - Valutare l'efficacia della soluzione più promettente tramite simulazioni CFD sia in condizioni di funzionamento ideale che in caso di condizioni metereologiche avverse (e.g. vento in direzione dell'apertura).
  - Analisi critica dei risultati ottenuti al fine di valutare la fattibilità della soluzione proposta.
  - Stesura del rapporto finale.

### **Obiettivi**

---

- Acquisire conoscenza sui ricevitori solari a cavità (nella configurazione con e senza finestra) e sui sistemi di isolamento aerodinamici a lama d'aria individuando i parametri che ne governano il funzionamento.
- Proporre una possibile soluzione di isolamento a lama d'aria applicata al ricevitore solare di riferimento.
- Valutare criticamente le prestazioni della soluzione proposta tramite simulazioni CFD.
- Documentare il lavoro svolto.

### **Tecnologie**

---

- CFD.
- Termodinamica.
- Fluidodinamica.
- CAD.

### **Contatto esterno**

---

-

### **Documenti allegati**

---

-

## **Pianificazione del progetto**

Per la pianificazione del progetto fare riferimento all'allegato [C1].

Lo sviluppo di tale pianificazione è stato effettuato coerentemente con la mole di lavoro per ogni singola attività, di comune accordo con relatore e correlatore.

# 1 Stato dell'arte

## 1.1 Ricevitori solari a cavità

I ricevitori solari sono dei dispositivi utilizzati per assorbire l'energia solare concentrata e vengono utilizzati negli impianti a concentrazione solare. In particolare, negli impianti solari a torre, vi sono degli eliostati posti a terra e accuratamente orientati, che hanno il compito di convogliare la radiazione solare in un punto chiamato fuoco. Nel fuoco vengono posti i ricevitori solari che ricevendo la radiazione solare concentrata, raggiungono elevate temperature. Un fluido termovettore passa attraverso il ricevitore scaldandosi, per poi proseguire il percorso all'interno di un ciclo termodinamico con lo scopo di produrre energia elettrica.

I ricevitori solari a cavità, devono necessariamente avere una disposizione degli specchi a nord della torre solare. Questo perché la radiazione solare viene concentrata in un solo punto della torre, nella cavità; al contrario il campo di eliostati, nel caso di ricevitori solari a torre senza cavità, è orientato a 360° intorno alla torre in quanto tutto il ricevitore può assorbire la radiazione.



Figura 1: Impianto solare Noor 3 (Quarzazate, Marocco) con campo a 360° intorno alla torre [P. 1]

Gli impianti solari a torre sono caratterizzati da valori di rendimenti piuttosto bassi; vanno dal 10 % al 28 % negli impianti più evoluti.

Essi sono dovuti a molteplici fattori che combinati tra loro portano i rendimenti a diminuire.

Tra le varie cause che limitano il rendimento di questi impianti, alcune di queste sono legate proprio al ricevitore solare:

1. Bersaglio non colpito perfettamente, parte degli eliostati non colpisce il ricevitore;
2. Assorbanza del ricevitore, parte della radiazione viene riflessa;
3. Irraggiamento del ricevitore, dovuto alle elevate temperature raggiunte da quest'ultimo;
4. Convezione, si innescano moti convettivi tra l'aria esterna e il ricevitore che tendono a raffreddarlo;
5. Conduzione, parte del calore accumulato dal ricevitore viene dissipato lungo le componenti a contatto con il ricevitore ma non di interesse.

Il primo punto è legato al fatto che il ricevitore non viene colpito in maniera ottimale; questo può essere dovuto ad una errata posizione degli eliostati ed al tracking non eseguito in maniera ottimale. Il tracking è il percorso che descrivono gli eliostati durante la giornata seguendo il sole. Utilizzando dei motori, gli eliostati riescono ad orientarsi per poter concentrare la radiazione solare nel fuoco a seconda della posizione del Sole.

Gli altri fattori sono invece dovuti ad aspetti legati alla termodinamica, per i quali si stanno cercando alcune tecnologie per eliminarli o quantomeno ridurli.

Nonostante la produzione di energia degli impianti con il campo di eliostati a nord sia minore, date le dimensioni più contenute del campo e quindi la possibilità di concentrare minore, l'efficienza energetica di questi impianti risulta maggiore in quanto si riesce a dissipare meno calore attraverso un ricevitore solare a cavità.

Questo è dovuto al fatto che, in primis, un ricevitore a cavità riesce a disperdere meno radiazioni dovute all'irraggiamento e all'assorbanza del ricevitore; infatti solo parte dei raggi riflessi dal ricevitore riescono ad uscire dalla cavità, mentre gli altri vengono ribalzati sempre all'interno senza che fuoriescano. (figura 3).



Figura 2: Impianto solare PS10 (Siviglia, Spagna) con campo a nord della torre [P.2]

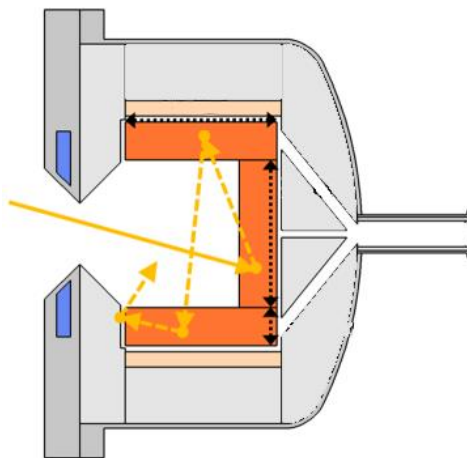


Figura 3: Esempio di ricevitore solare a cavità; le frecce gialle indicano il percorso di un generico raggio solare; si può notare come il raggio ribalza sulle pareti del ricevitore senza però uscire [P.3]

Attraverso delle sofisticate soluzioni, è possibile migliorare ulteriormente il rendimento dei ricevitori solari a cavità, isolando la zona dove è posto l'elemento assorbitore del ricevitore.

Tra le tecniche maggiormente utilizzate per creare questa configurazione, vi è quella di usare una finestra (figura 4), realizzata in quarzo, che permette di isolare termicamente il ricevitore ed inoltre riesce a riflettere parte di radiazione riemessa dall'assorbitore.

Questa tecnologia ha tuttavia delle grosse problematiche cui risulta difficoltoso trovare soluzione; la finestra appare trasparente all'ingresso dei raggi solari (superficie esterna) e opaca all'uscita (superficie interna) in quanto la radiazione cambia lunghezza d'onda. La finestra ha entrambi le superfici (esterna e interna) uguali; dato che però la radiazione solare riemessa dall'assorbitore possiede una lunghezza d'onda differente

rispetto a quella in entrata, la finestra risulta come fosse una superficie opaca e riesce quindi a trattenere parte della radiazione al suo interno. Una parte della radiazione viene riflessa all'interno della zona isolata dalla finestra, una parte viene assorbita dalla finestra mentre una parte non viene schermata in quanto possiede una lunghezza d'onda visibile e quindi esce dal ricevitore.

L'aspetto più critico risulta essere la parte di radiazione che viene assorbita dalla finestra. A causa di questo fenomeno e allo scambio termico conduttivo e convettivo, la temperatura della finestra raggiunge valori molto elevati e, dato che viene realizzata in quarzo, è facilmente soggetta a cedimenti.

Solitamente la finestra viene raffreddata, ma nonostante questo si fatica a controllare i gradienti di temperatura che si instaurano sulle varie zone di quest'ultima.

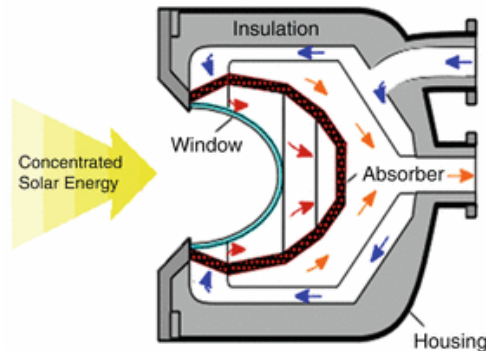


Figura 4: Ricevitore solare a cavità con finestra (window) [P.4]

Un'alternativa all'utilizzo della finestra, risulta essere l'utilizzo di flussi d'aria con determinate caratteristiche; da qui deriva il nome per l'appunto di ricevitori windowless, ovvero senza finestra.

L'idea di utilizzare dei flussi d'aria è nata quando si è notato che in presenza di vento in una determinata direzione, il ricevitore tendeva a mantenere una temperatura media interna più elevata.

A seguito di questa osservazione sono stati sperimentati numerosi progetti con l'obiettivo principale di ridurre le perdite dovute alla convezione tra ambiente esterno e l'interno del ricevitore.

## 1.2 Sistemi a lama d'aria

I sistemi a lama d'aria consistono in dei generatori che soffiano aria compressa creando per l'appunto una sorta di lama d'aria.

Questi sistemi sono stati studiati, in un primo momento, per svolgere delle funzioni a livello industriale, quali asciugatura (figura 5), raffreddamento, pulizia e smistamento. Infatti essi vengono tutt'oggi spesso implementati nelle grosse catene di produzione dove è necessario svolgere una di queste operazioni appena citate.



Figura 5: Asciugatura di componenti verniciati in una catena di produzione [P.5]

In un secondo momento si è notato come questi sistemi a lama d'aria fossero in grado di isolare termicamente due zone distinte (a destra e a sinistra del flusso d'aria). Oggi questi sistemi vengono spesso applicati alle porte dei grandi edifici, come per esempio fabbriche, centri commerciali, grattacieli. Queste infatti, a seconda della stagione, impediscono all'aria fredda/calda esterna di entrare, e, al tempo stesso, mantengono l'aria riscaldata/refrigerata all'interno. Una porta a lama d'aria correttamente installata riduce inoltre le correnti d'aria e crea un ambiente interno confortevole evitando che fumo, gas di scarico o odori malsani penetrino all'interno dell'edificio.

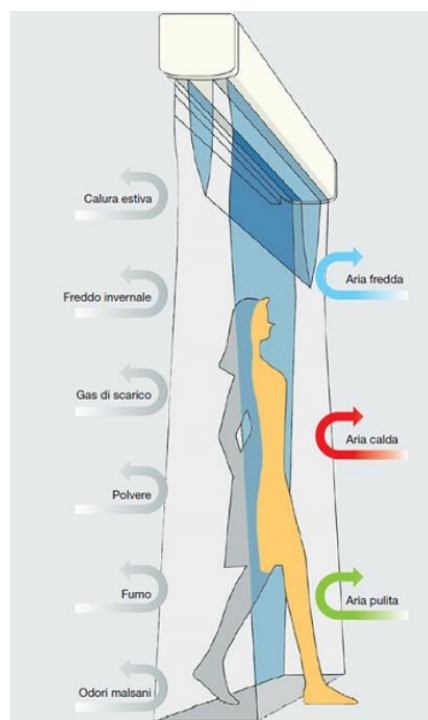


Figura 6: Funzionamento semplificato porta a lama d'aria [P.6]

Numerosi test hanno dimostrato che una barriera a lama d'aria correttamente installata può ridurre le perdite di energia di una porta aperta fino all'80%. Quest'ultima crea una barriera d'aria che copre l'intera apertura e si adatta alle circostanze a cui è esposta. Oltre alla portata d'aria della barriera, durante il dimensionamento è necessario valutare i requisiti di velocità dell'aria e uniformità del getto d'aria a livello del pavimento, dal momento che è proprio qui che la pressione è maggiore. In questo modo si è sicuri di avere una barriera d'aria che raggiunge l'intera lunghezza da coprire e fornisce la migliore protezione possibile.

Di seguito (figura 7) è riportato il confronto della situazione di un edificio con porta a lama d'aria spenta e in funzione. Come si può notare la differenza di temperatura all'interno e all'esterno dell'edificio è netta e dal punto di vista energetico questa soluzione offre risparmi non sottovalutabili per impianti di riscaldamento/raffrescamento.

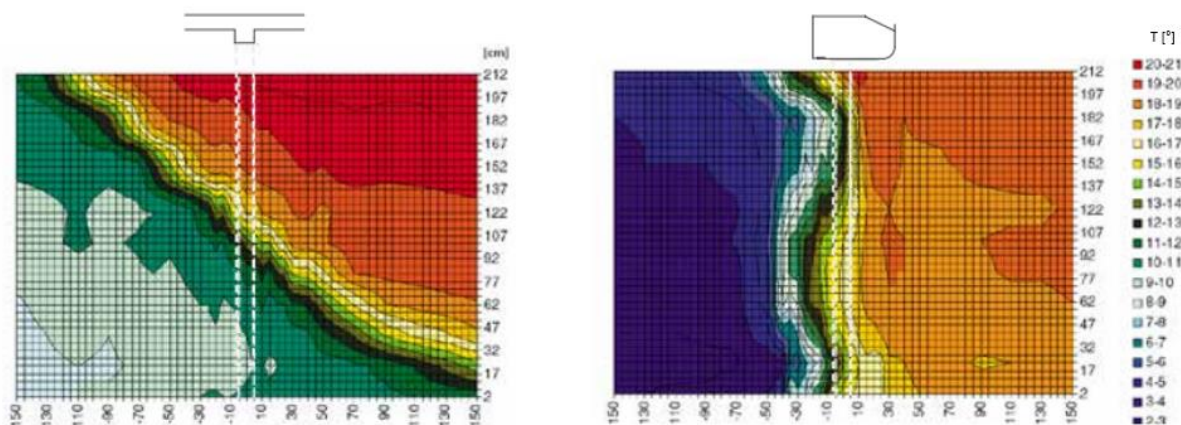


Figura 7: Confronto tra porta a lama d'aria spenta e in funzione durante la stagione invernale: a sinistra viene raffigurato l'ambiente esterno all'edificio e a destra quello interno [P.7]

Le lame d'aria vengono oggi utilizzate anche in alcuni forni industriali. Queste permettono, durante le varie aperture degli sportelli dei forni, che il calore all'interno del forno non venga disperso all'esterno. In questo modo l'efficienza del forno migliora e si riduce il quantitativo di combustibile necessario per portare il forno ad una determinata temperatura. Un altro aspetto da non sottovalutare è l'ambiente di lavoro: solitamente nelle stanze dove sono presenti forni industriali le temperature sono piuttosto elevate, specialmente se è necessario aprire più volte i forni; con la tecnologia delle porte a lama d'aria, anche l'ambiente lavorativo risulta più confortevole per gli operai.



Figura 8: Forno industriale con porta a lama d'aria [P.8]

Attraverso uno studio è stato dimostrato che per alcuni forni industriali, l'applicazione di porte a lama d'aria può portare a vantaggi, in termini di efficienza, fino al 70 %.

Com'è possibile notare dal grafico 1, i costi diminuiscono drasticamente all'aumentare della temperatura del forno.



Grafico 1: Andamento dei costi in funzione della temperatura del forno durante l'apertura dello sportello [P.9]

Separare due zone con temperature differenti utilizzando le porte a lama d'aria è relativamente semplice se non ci fossero altri fattori a cui prestare attenzione. Tuttavia non è così; infatti gestire un'apertura esposta a vento, differenze di pressione e ventilazione non bilanciata risulta essere molto più complesso.

I primi due parametri che possono essere citati per ottenere una porta a lama d'aria con una certa efficacia sono la portata e la velocità del getto d'aria. Per offrire ottime prestazioni bisogna combinare questi due fattori. La velocità del getto d'aria dipende in primo luogo dalla distanza che deve ricoprire la lama d'aria; velocità troppo basse non permetterebbero al flusso d'aria di ricoprire tutta l'apertura, mentre velocità troppo elevate innescherebbero dei moti turbolenti che diminuirebbero la distanza percorribile del flusso.

### 1.3 Sistemi a lama d'aria applicati ai ricevitori solari "windowless"

Sono stati svolti numerosi studi incentrati su come diminuire le perdite di calore dovute principalmente alla convezione; sono state studiate geometrie differenti, angoli di inclinazione della cavità diversi, la distribuzione della temperatura interna e molti altri fattori.

Tuttavia non è mai stata posta molta attenzione al possibile utilizzo di flussi di gas attivi atti a mitigare le perdite di calore dovute principalmente alla convezione.

Come già detto in precedenza, degli studi hanno evidenziato come in presenza di vento, le perdite di calore convettive erano addirittura minori rispetto alla situazione in assenza di vento. Questo potrebbe infatti suggerire che un flusso d'aria orientato correttamente potrebbe essere in grado di agire come una sorta di barriera alle perdite convettive attraverso l'apertura della cavità. Ovviamente, è di facile intuizione il fatto che la barriera d'aria non potrà isolare perfettamente come invece viene fatto dalle finestre al quarzo.

Studi precedenti hanno dimostrato come alcuni parametri influiscano notevolmente sull'efficacia di una porta a lama d'aria; questi parametri sono:

- La portata del flusso
- La velocità del flusso
- L'angolo di inclinazione della cavità
- L'angolo di inclinazione del getto d'aria
- Velocità del vento

Come per le porte a lama d'aria, anche in questo caso bisognerà considerare il possibile effetto che potrebbe avere il vento sulle prestazioni del ricevitore.

Ovviamente le perdite dovute alla convezione dipenderanno anche in primis dalle temperature della superficie interna del ricevitore e dell'atmosfera esterna.

Verranno ora analizzati criticamente degli studi relativi a ricevitori solari a cavità con applicazione di cortine a lama d'aria.



Vengono ora proposti una serie di progetti dai quali sono state ricavate alcune importanti considerazioni per lo svolgimento del progetto. Le immagini illustrate di seguito fanno riferimento al progetto analizzato.

### 1.3.1 Approfondimenti sperimentali sul meccanismo delle perdite di calore di un ricevitore cilindrico a cavità solare dotato di una cortina d'aria [1]

In un recente studio, Elham Alipourtarzanagh, Alfonso Chinnici, Graham J. Nathan e Bassam B. Dally hanno cercato di ricreare una situazione reale in cui ad un ricevitore viene applicato un sistema a lama d'aria ed hanno valutato come i vari parametri influiscano sulle perdite di calore convettive.

Il ricevitore utilizzato nei loro studi è il seguente:

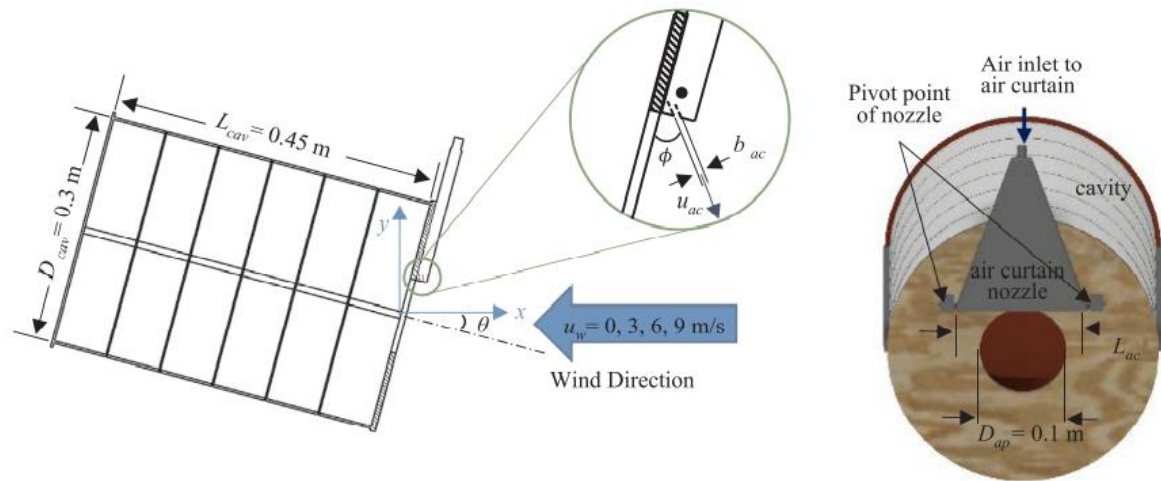


Figura 9: Ricevitore solare a cavità utilizzato da Elham Alipourtarzanagh, Alfonso Chinnici, Graham J. Nathan e Bassam B. Dally

È stata valutata l'efficienza del ricevitore, intesa come riduzione delle perdite convettive, eseguendo delle simulazioni con angolazioni, velocità del getto d'aria e velocità del vento differenti.

La temperatura media interna della cavità è stata impostata a 300 °C, mentre l'ambiente esterno a 15 °C.

L'ugello da cui fuoriesce il getto d'aria ha uno spessore  $b_{ac}$  di 2 mm.

Con  $u_{ac}$  viene indicata la velocità del getto d'aria mentre con  $u_w$  la velocità del vento.

Le simulazioni sono state eseguite con il ricevitore posto con l'apertura rivolta verso il basso di un angolo  $\theta$  di 15°.

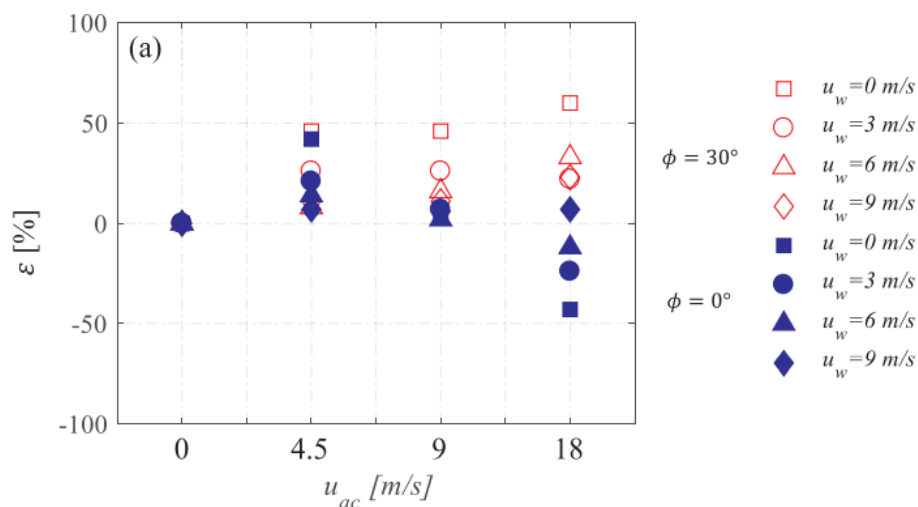


Grafico 2: Valori di efficienza in funzione della velocità del getto d'aria e del vento

I valori di efficienza sono mostrati nei grafici 2 e 3. La prima cosa che si nota è il fatto che non sempre l'utilizzo del sistema a lama d'aria porta ad una diminuzione delle perdite convettive. Infatti i valori al di sotto dello zero nel grafico, stanno proprio ad indicare che le perdite convettive in quei casi sono aumentate. Questo è avvenuto quando il getto è stato posto parallelamente alla cavità del ricevitore ( $\phi = 0^\circ$ ) ad una velocità di  $18 \frac{m}{s}$  ed in presenza di vento. Più la velocità del vento aumenta, maggiori sono le perdite convettive.

Sono invece stati ottenuti dei buoni riscontri per un angolo di inclinazione del getto d'aria di  $\phi = 30^\circ$ . Il miglior valore di efficienza è stato ottenuto con una velocità del getto d'aria di  $18 \frac{m}{s}$  ed in assenza di vento. All'aumentare della velocità del vento, anche in questo caso, il valore dell'efficienza va diminuendo.

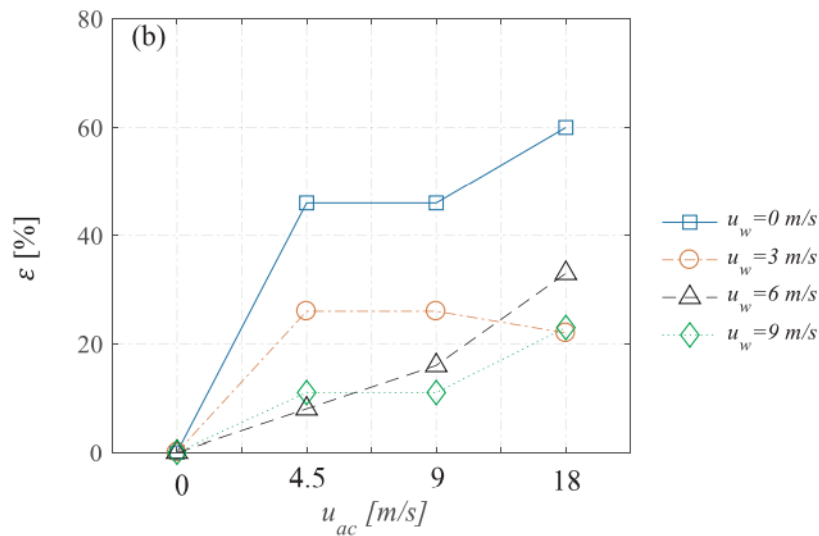


Grafico 3: Valori di efficienza in funzione della velocità del getto d'aria e del vento

Nel grafico 2 sono riportati solamente i valori per un angolo di inclinazione del getto d'aria di  $\phi = 30^\circ$ . A parte qualche valore, gli andamenti dei dati sono piuttosto regolari.

In questo grafico si può apprezzare meglio il valore della miglior soluzione eseguita che si aggira intorno al 60 %.

### 1.3.2 Riduzione delle perdite di calore convettivo nei ricevitori a cavità solare attraverso l'utilizzo di un sistema a cortina d'aria [2]

Un altro progetto mirato a determinare la fattibilità di utilizzare un sistema a lama d'aria per ridurre le perdite convettive in un ricevitore solare a cavità, è stato svolto da Song Yanga, Jun Wang, Peter D. Lunda, Siyu Wang e Chuan Jiang.

È stato modellato un ricevitore solare (figura 13) in cui è stato incorporato un canale, utilizzato per generare il flusso d'aria.

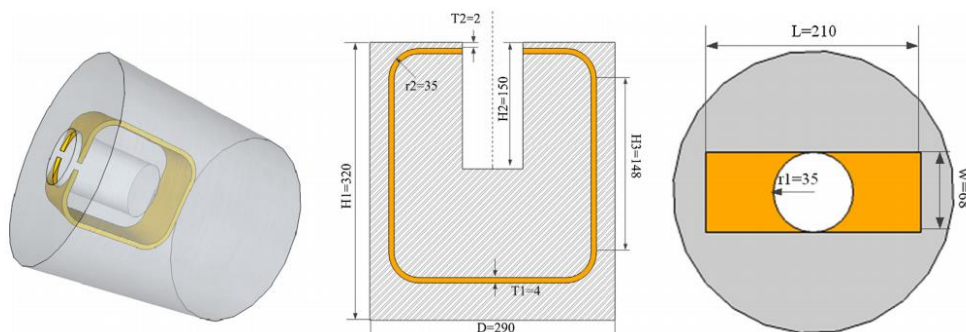


Figura 10: Ricevitore solare modellato da Song Yanga, Jun Wang, Peter D. Lunda, Siyu Wang, Chuan Jiang

Le pareti interne della cavità sono state considerate isoterme, mentre le pareti esterne adiabatiche. La temperatura delle pareti interne è stata impostata a  $723\text{ K}$  e l'ambiente esterno a  $300\text{ K}$ ; queste corrispondono alle temperature medie sperimentali. Per simulare il flusso d'aria viene inserita una ventola a metà del condotto e viene modellato impostando un salto di pressione costante. Il salto di pressione positivo indica che il flusso d'aria si muoverà in senso orario, mentre se negativo si muoverà in senso antiorario. Anche in questa ricerca viene identificato con  $\theta$  l'inclinazione della cavità.

Dallo studio è stato possibile determinare come il flusso d'aria antiorario riduce notevolmente le perdite dovute alla convezione e infatti la temperatura media interna della cavità risulta essere maggiore (figura 13). In particolare la soluzione migliore tra quelle rappresentate risulta essere quella con il salto di pressione negativo maggiore ( $-20\text{ Pa}$ ). Anche dal contour di velocità si può notare come si crei uno strato isolante di aria tra la cavità e l'ambiente esterno.

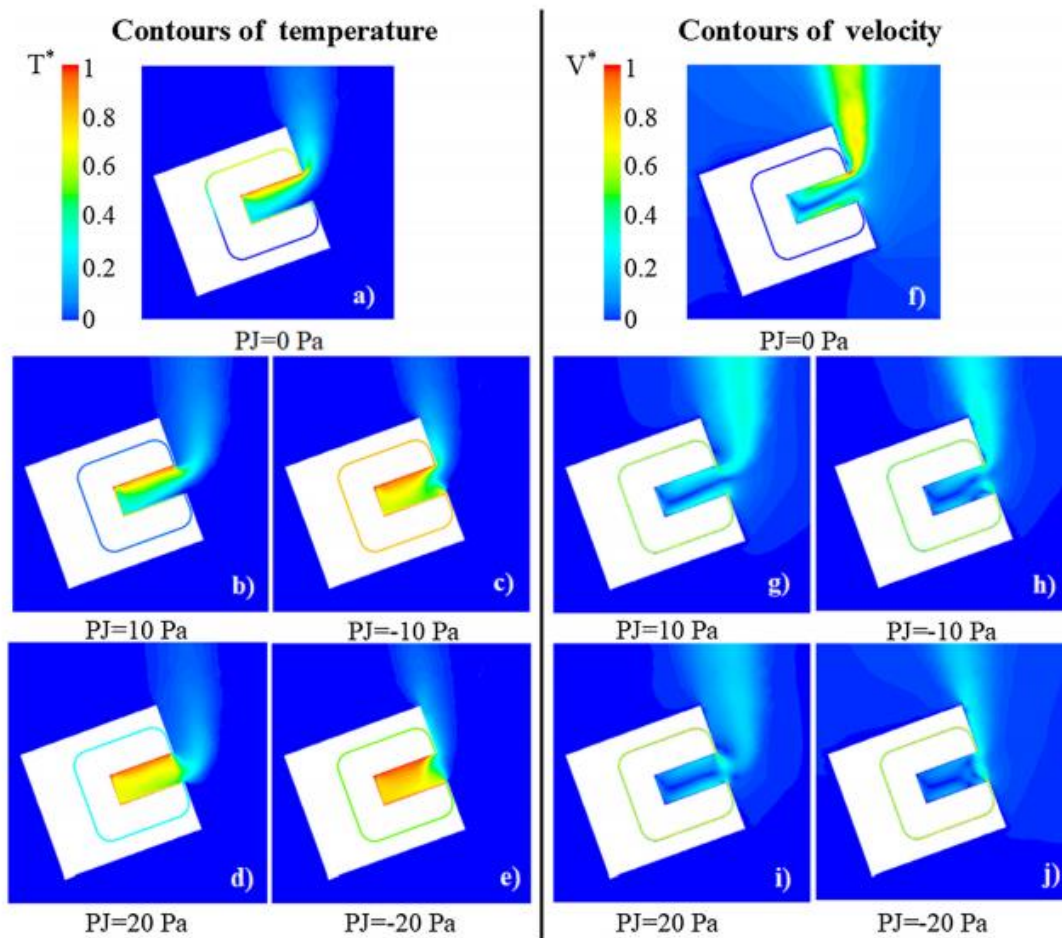


Figura 11: Risultati ottenuti applicando salti di pressione differenti con un'inclinazione  $\theta$  del ricevitore di  $-15^\circ$

Osservando la figura 11 si potrebbe pensare che aumentando ulteriormente il salto di pressione e, di conseguenza, la velocità del flusso d'aria, la temperatura interna media aumenti. La figura 12 conferma invece il contrario. Si può osservare come aumentando il salto di pressione da  $-20\text{ Pa}$  a  $-30\text{ Pa}$ , la temperatura media della cavità diminuisca. Questo perché, come si può vedere dalle linee di flusso, il vortice che si crea all'uscita del getto d'aria aumenta le sue dimensioni e aumenta anche lo scambio di calore dovuto alla convezione.

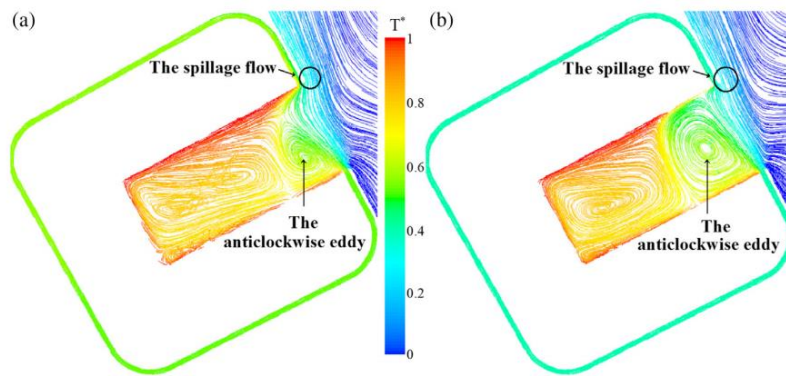


Figura 12: Linee di flusso con valori di temperatura localizzati con ricevitore posto a  $\theta = -30^\circ$ : nella figura (a) il salto di pressione è di  $-20 \text{ Pa}$ , nella figura (b) il salto di pressione è di  $-30 \text{ Pa}$

Si può dunque affermare che un aumento della velocità del flusso al di sopra di un certo valore favorisce una maggiore miscelazione tra la cortina di aria fredda e l'aria calda interna del ricevitore, facendo così diminuire la temperatura media della cavità del ricevitore.

Di seguito (figura 15) viene invece riportata la differenza di temperatura di tre sezioni, in assenza della tecnologia a lame d'aria, e in presenza del caso con lame d'aria risultato migliore, ovvero con il salto di pressione a  $-20 \text{ Pa}$ .

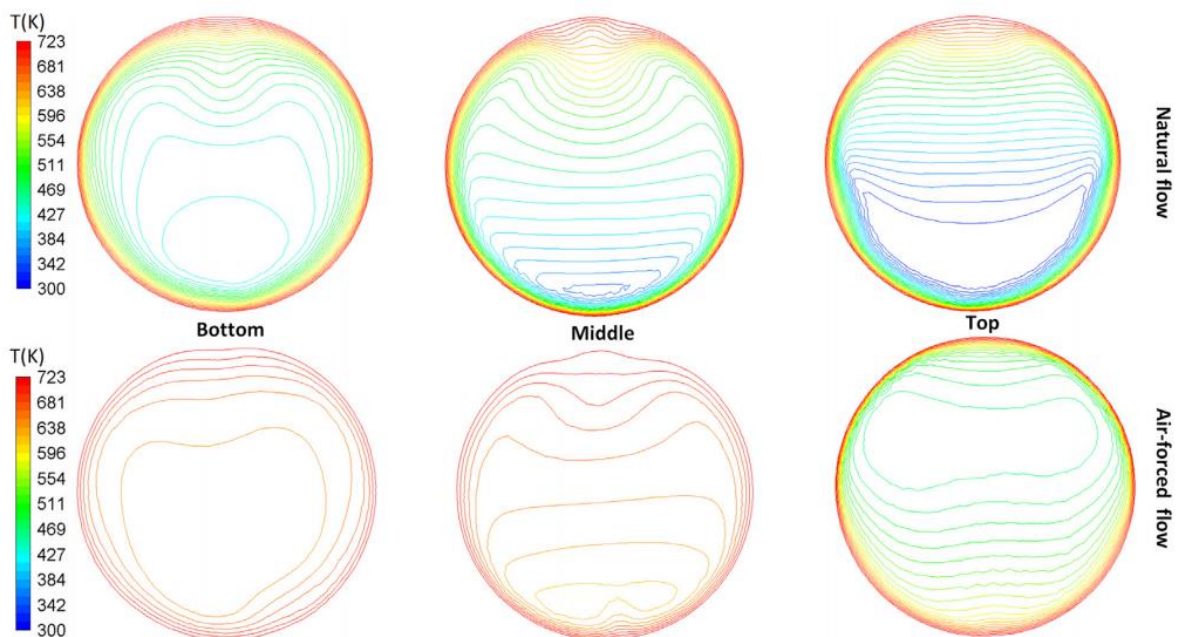


Figura 13: Contour di temperatura delle superfici di fondo del ricevitore (bottom), di mezzo (middle) e esterna (top)

Come si può notare le temperature sulle superfici in fondo e a metà della cavità sono nettamente maggiori utilizzando il getto d'aria; differenza che invece è meno percettibile sulla superficie esterna della cavità.

È stata poi studiata anche la variazione di perdite convettive variando l'inclinazione del ricevitore e sono stati ottenuti i seguenti risultati (grafico 4).

Anche in questo caso viene confermato ciò che è stato analizzato precedentemente; il flusso antiorario (salto di pressione negativo) riduce, a parità di inclinazione della cavità, le perdite dovute alla convezione.

Interessante notare come all'aumentare dell'angolo di inclinazione della cavità del ricevitore (cavità rivolta verso il basso), diminuiscano notevolmente le perdite di calore convettivo. Al contrario, quando la cavità viene rivolta verso l'alto, le perdite dovute alla convezione aumentano.

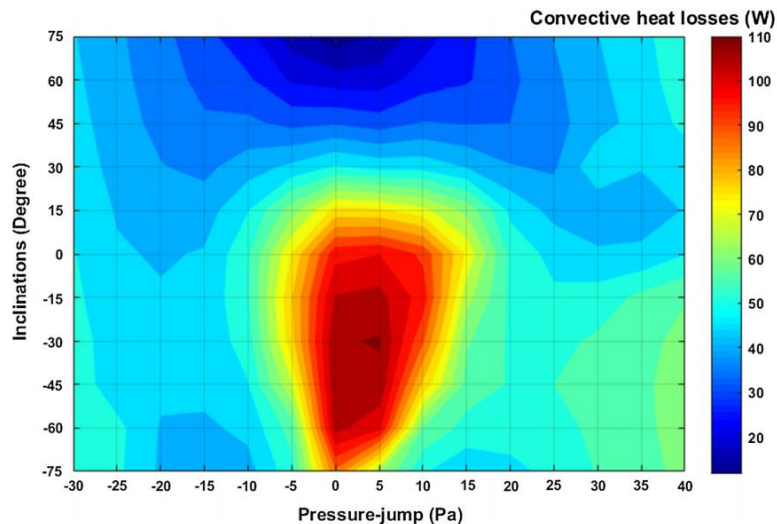


Grafico 4: Rappresentazione delle perdite convettive in funzione dell'inclinazione del ricevitore e del salto di pressione

In questo studio è stata inoltre stimata la quantità di energia necessaria alla ventola per generare il flusso d'aria utilizzando delle celle fotovoltaiche; l'energia aggiuntiva richiesta per alimentare il sistema di circolazione dell'aria è risultata essere molto bassa rispetto alle perdite di calore che si avrebbero senza utilizzare il sistema a lama d'aria, per cui la soluzione avrebbe tutte le specifiche per poter essere applicata.

### 1.3.3 Controllo attivo del flusso d'aria per ridurre le perdite di calore di un ricevitore a cavità [3]

Un ulteriore progetto di ricerca è stato svolto da J. Jack Zhang, John. D. Pye, Graham O. Hughes; anch'essi hanno cercato di ridurre le perdite di un ricevitore a cavità attraverso il controllo attivo di un flusso d'aria. In particolare, attraverso l'analisi CFD, sono state replicate più configurazioni variando velocità ed inclinazione del flusso e inclinazione della cavità.

Il ricevitore utilizzato per questo progetto è il seguente (figura 17):

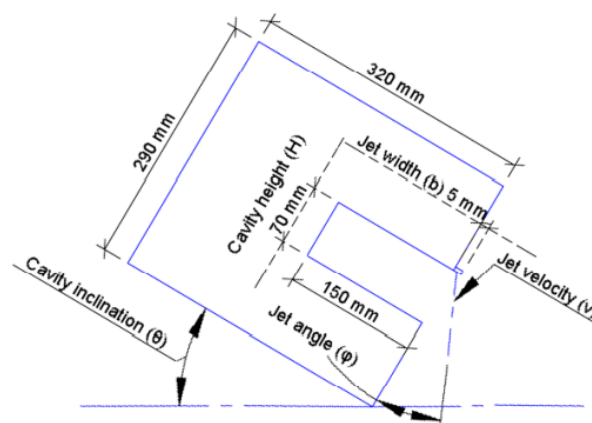


Figura 14: Dimensioni e parametri del ricevitore a cavità

La temperatura delle pareti interne della cavità (isoterme) è stata fissata a  $720\text{ K}$ , mentre l'ambiente esterno a  $300\text{ K}$ . All'angolo di inclinazione della cavità sono stati conferiti i valori di  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  e  $45^\circ$ . È stato inoltre fissato il rapporto tra larghezza del getto e altezza della cavità a  $0,071$ .

Per impostare la velocità e l'angolo di inclinazione del getto sono state fornite delle condizioni al contorno all'uscita del getto.

Sono state esaminate due tipi di applicazione della lama d'aria: una modalità in cui la cavità viene parzialmente sigillata e una in cui la cavità è completamente sigillata. Per fare ciò è stato fatto variare, a parità degli altri parametri, l'angolo di inclinazione e la velocità del flusso d'aria.

Per la soluzione parzialmente sigillata vengono usate velocità relativamente basse e angoli di inclinazione del getto sia verso l'interno ( $\varphi > 0^\circ$ ) che verso l'esterno della cavità ( $\varphi < 0^\circ$ ); per la soluzione completamente sigillata vengono utilizzate velocità più elevate e angoli di inclinazione del getto rivolti solo verso l'esterno della cavità ( $\varphi < 0^\circ$ );

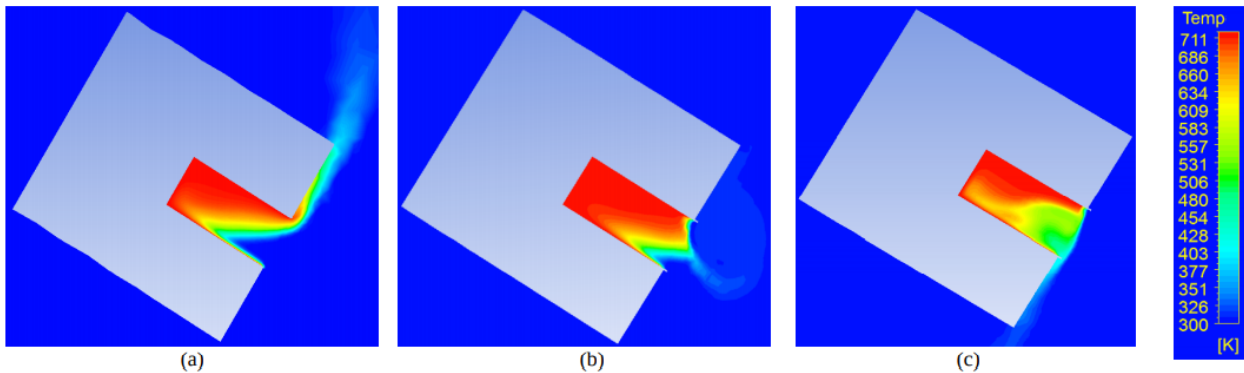


Figura 15: Soluzione con cavità posta a  $30^\circ$ : (a) senza lama d'aria, (b) parzialmente sigillata con lama d'aria a velocità  $v = 1 \frac{m}{s}$  e angolo di inclinazione  $\varphi = 10^\circ$ , (c) completamente sigillata con lama d'aria a velocità  $v = 2 \frac{m}{s}$  e angolo di inclinazione  $\varphi = -10^\circ$

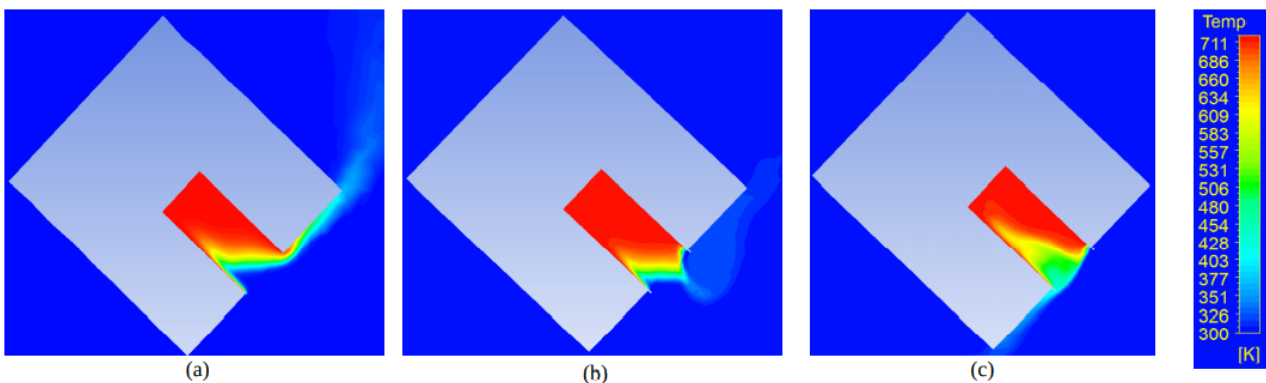


Figura 16: Soluzione con cavità posta a  $45^\circ$ : (a) senza lama d'aria, (b) parzialmente sigillata con lama d'aria a velocità  $v = 1 \frac{m}{s}$  e angolo di inclinazione  $\varphi = 10^\circ$ , (c) completamente sigillata con lama d'aria a velocità  $v = 2 \frac{m}{s}$  e angolo di inclinazione  $\varphi = -10^\circ$

Nelle figure 18 e 19 è possibile analizzare i risultati per le soluzioni con cavità rispettivamente a  $30^\circ$  e  $45^\circ$ . Come è possibile notare, le modalità parzialmente sigillate (b) riescono comunque a mantenere una temperatura interna del ricevitore più elevata rispetto alla modalità completamente sigillata. Questo aspetto è riconducibile a ciò che era stato notato anche nel progetto di Song Yanga, Jun Wang, Peter D. Lunda, Siyu Wang, Chuan Jiang; aumentando la velocità del getto, questo tende a portare più aria dall'ambiente esterno all'interno della cavità, favorendo così lo scambio termico per convezione (figura 20).

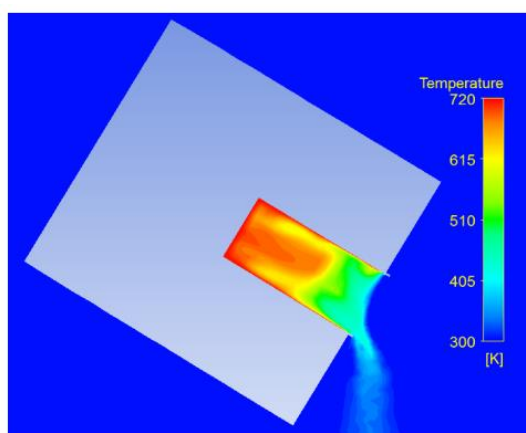


Figura 17: Situazione con cavità posto a  $30^\circ$ , velocità del getto d'aria  $v = 5 \frac{m}{s}$ , angolo di inclinazione del getto  $\varphi = 10^\circ$

Infine sono stati riportati in dei grafici di superficie tutti i valori di efficienza delle prove eseguite.

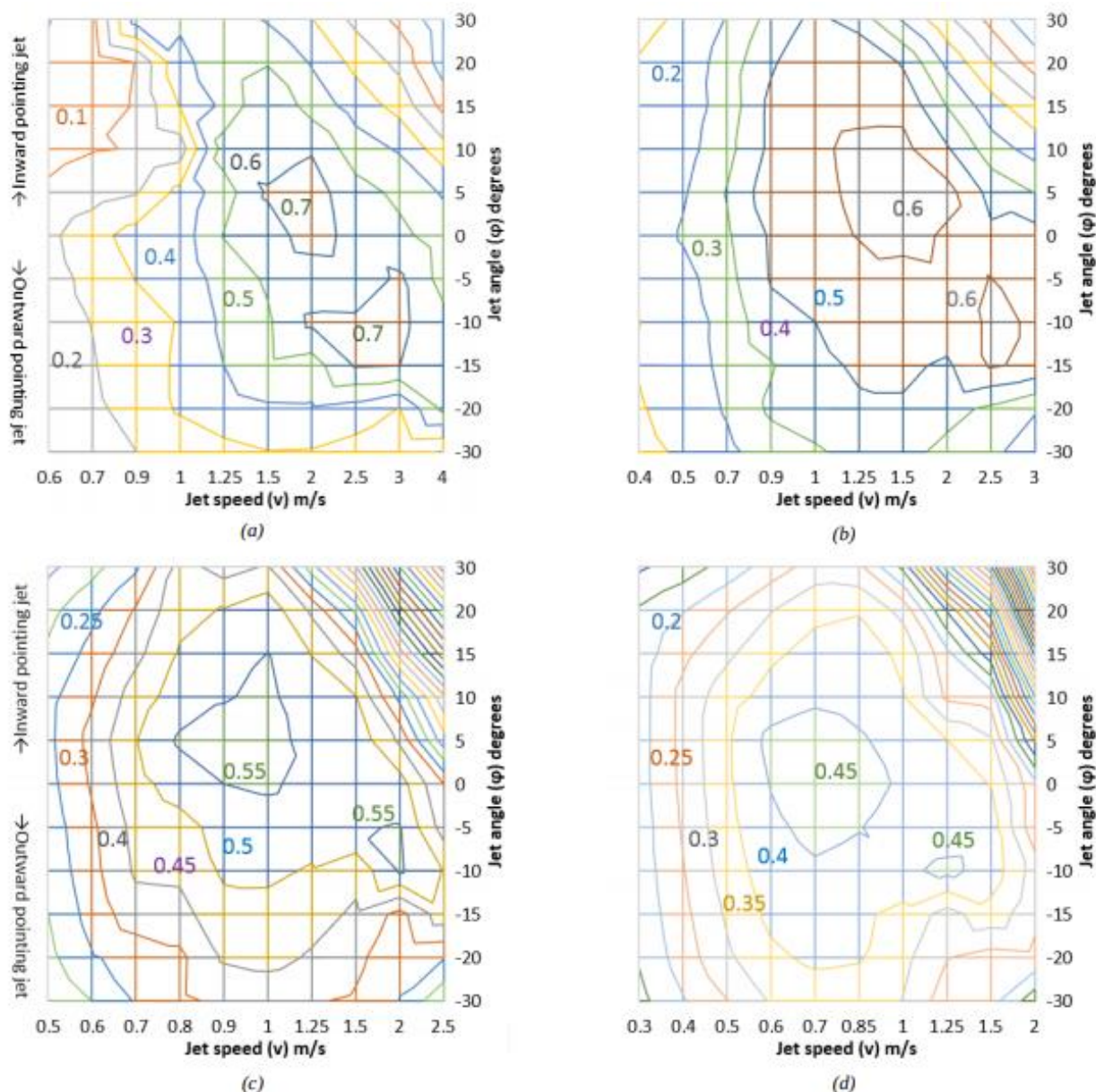


Figura 18: Valori di efficacia in funzione della velocità e dell'inclinazione del getto e dell'inclinazione della cavità: (a) angolo di inclinazione della cavità  $\theta = 0^\circ$ , (b)  $\theta = 15^\circ$ , (c)  $\theta = 30^\circ$ , (d)  $\theta = 45^\circ$

### 1.3.4 Utilizzo di una cortina d'aria per ridurre le perdite di calore di una cavità aperta inclinata [4]

Un ulteriore studio, eseguito esclusivamente attraverso un'analisi CFD 2D, è stato svolto da A. McIntosh, G. Hughes e J. Pye.

È stato modellato un ricevitore (figura 21) con le seguenti dimensioni:

- Diametro della cavità = 70 mm;
- Profondità della cavità = 150 mm;
- Diametro esterno ricevitore = 290 mm;
- Lunghezza ricevitore = 320 mm;

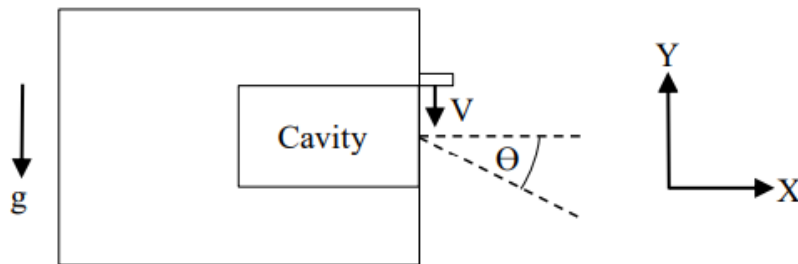


Figura 19: Ricevitore usato per lo studio dai ricercatori A. McIntosh, G. Hughes e J. Pye

È stata impostata una temperatura delle pareti della cavità di 720 K e dell'ambiente esterno di 300 K; le pareti esterne della cavità sono state considerate adiabatiche. Il getto d'aria è stato sempre posto perpendicolarmente all'asse della cavità.

Dai loro studi è risultato che la porta a lama d'aria con efficienza maggiore, è stata quella applicata alla cavità posta orizzontalmente; infatti le perdite di calore dovute alla convezione sono state ridotte del 54% rispetto alla situazione senza lama d'aria, con una velocità del flusso di  $1,4 \frac{m}{s}$ .

Quando invece la cavità è stata inclinata, sono state ridotte le perdite per valori che si aggirano attorno al 30/38%. È importante anche considerare il fatto che, aumentando l'inclinazione del ricevitore (cavità rivolta verso il basso), la velocità del getto d'aria per ottenere il funzionamento ottimale si riduce.

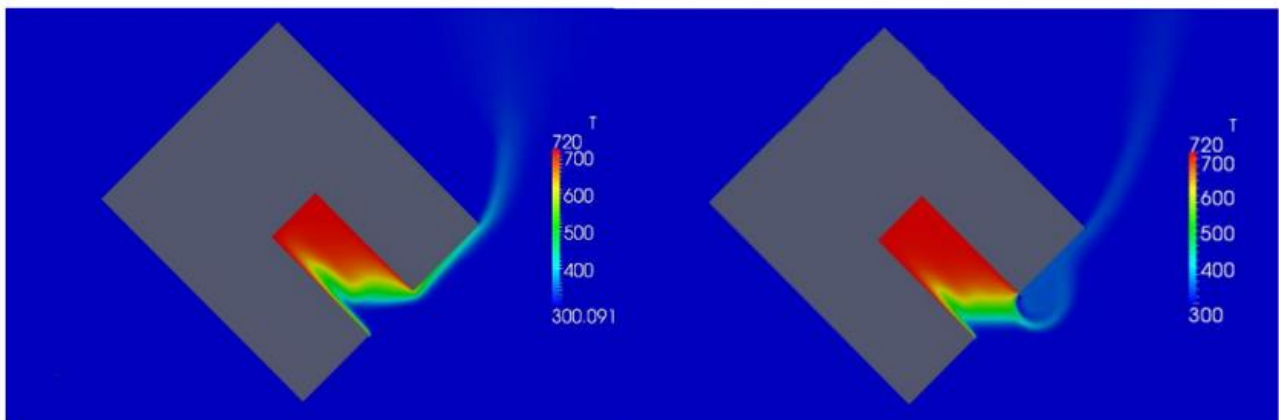


Figura 20: Confronto tra soluzione senza lama d'aria (sinistra) e lama d'aria (destra) con cavità posta a  $\theta = 45^\circ$  e velocità del getto d'aria  $v = 0,6 \frac{m}{s}$

Sono poi stati riportati graficamente gli andamenti dell'efficienza, in termini di risparmio di calore, per differenti velocità del getto e inclinazioni della cavità.



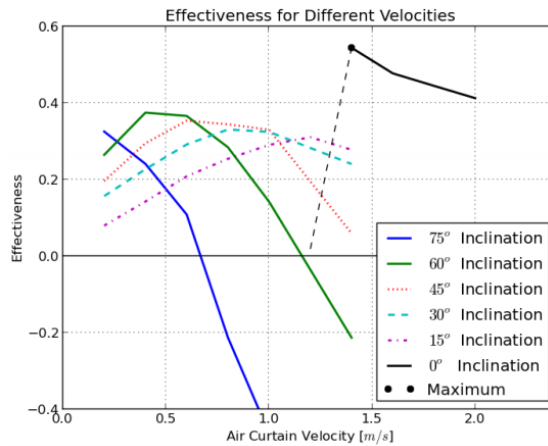


Grafico 5: Valori di efficienza in funzione della velocità del getto d'aria e dell'inclinazione della cavità

Il caso migliore è stato ottenuto con il ricevitore posto parallelamente al suolo per una velocità del getto d'aria prossima a  $1,5 \frac{m}{s}$ .

## 1.4 Modulo di deflessione

È interessante notare come, sia nel progetto di Elham Alipourtarzanagh, Alfonso Chinnici, Graham J. Nathan e Bassam B. Dally, sia in quello di John D.Pye e anche in quello di A. McIntosh, G. Hughes e J. Pye, si sia tenuto conto di un parametro adimensionale che risulta d'aiuto nello studio dei flussi a lama d'aria. Questo parametro è il modulo di deflessione (Deflection modules),  $D_m$ , e indica il rapporto tra il momento del getto d'aria in uscita e le forze trasversali che agiscono su di esso. È possibile determinare un valore minimo del modulo di deflessione,  $D_{m,min}$ , che definisce la quantità di moto richiesta dal getto per coprire l'apertura della cavità e quindi fornisce un valore di velocità minimo, necessario per "sigillare" la cavità. Va però precisato che il più delle volte la velocità minima che viene trovata utilizzando il modulo di deflessione, va aumentata in quanto vi sono altri elementi che possono disturbare il getto d'aria.

$$D_m = \frac{b_0 \cdot \rho_c \cdot v_0^2}{g \cdot H^2 \cdot (\rho_a \cdot \rho_c)} = \frac{b_0 \cdot v_0^2 \cdot T_c \cdot T_a}{g \cdot H^2 \cdot T_a \cdot (T_c - T_a)}$$

Dove:

- $b_0$ , larghezza del getto all'ugello;
- $\rho_c$ , densità dell'aria nella cavità;
- $v_0$ , velocità del getto all'ugello;
- $g$ , accelerazione di gravità;
- $H$ , altezza della cavità (diametro);
- $\rho_a$ , densità dell'aria dell'ambiente esterno;
- $T_c$ , temperatura dell'aria nella cavità;
- $T_a$ , temperatura dell'aria dell'ambiente esterno.

## 1.5 Tabelle riassuntive

Nelle tabelle i progetti analizzati sono indicati nel seguente modo:

- 1, Approfondimenti sperimentali sul meccanismo delle perdite di calore di un ricevitore cilindrico a cavità solare dotato di una cortina d'aria
- 2, Riduzione delle perdite di calore convettivo nei ricevitori a cavità solare attraverso l'utilizzo di un sistema a cortina d'aria
- 3, Controllo attivo del flusso d'aria per ridurre le perdite di calore di un ricevitore a cavità
- 4, Utilizzo di una cortina d'aria per ridurre le perdite di calore di una cavità aperta inclinata

Dimensioni ricevitori			
1	2	3	4
			<p>Dimensioni identiche a quelle dello studio "3"</p>

Tabella 1: Geometrie utilizzate nei progetti analizzati nello stato dell'arte

Temperature [K]				
	1	2	3	4
$T_{pareti\ cavità}$	573	723	720	720
$T_{amb\ esterno}$	288	300	300	300

Tabella 2: Temperature utilizzate nei progetti visionati nello stato dell'arte

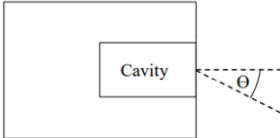
Parametri prove effettuate			
1	2	3	4
$\varphi = 0^\circ, 30^\circ$ $\theta = 0^\circ$ $u_{ac} = 0, 4.5, 9, 18 \left[ \frac{m}{s} \right]$ $u_w = 0, 3, 6, 9 \left[ \frac{m}{s} \right]$  La soluzione più efficace è stata ottenuta in assenza di vento con $\theta = 0^\circ$ , $\varphi = 30^\circ$ , $u_{ac} = 18 \left[ \frac{m}{s} \right]$ e in assenza di vento. Anche in presenza di vento questa configurazione è stata la più efficace.	$\varphi = 0^\circ$ $\theta = da -80^\circ a 80^\circ$ $\Delta p = da -30 a 40 [Pa]$  La soluzione ottimale è stata ottenuta con $\theta = 60^\circ$ e $\Delta p = -20 [Pa]$ .	$\varphi = da -30^\circ a 30^\circ$ $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ $u_{ac} = da 0.2 a 4 \left[ \frac{m}{s} \right]$  Per ogni angolo di inclinazione della cavità sono state ottenute le seguenti soluzioni più efficaci illustrate nella figura 18.	$\varphi = 0^\circ$ $\theta = da 0^\circ a 75^\circ$ $u_{ac} = da 0 a 2 \left[ \frac{m}{s} \right]$  La soluzione più efficace è stata ottenuta con $\theta = 0^\circ$ , $\varphi = 0^\circ$ , $u_{ac} \approx 1.5 \left[ \frac{m}{s} \right]$
Con: <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>\varphi</math>, angolo di inclinazione del getto d'aria</li> <li>- <math>\theta</math>, angolo di inclinazione della cavità</li> <li>- <math>u_{ac}</math>, velocità del getto 'aria</li> <li>- <math>u_w</math>, velocità del vento</li> <li>- <math>\Delta p</math>, salto di pressione<sup>1</sup></li> </ul> <p>Gli angoli vengono considerati come da convenzione, positivo senso antiorario, negativo senso orario.                      L'angolo <math>\varphi</math> pari a zero corrisponde al getto perpendicolare all'apertura della cavità; l'angolo <math>\theta</math> pari a zero corrisponde al ricevitore posto parallelamente al suolo come mostrato in figura.</p> <div style="text-align: center;">  </div> <p>Nota: Nello studio 2, viene imposto un salto di pressione in prossimità della metà del canale per simulare una ventola.</p>			

Tabella 3: Parametri utilizzati nei progetti visionati nello stato dell'arte

## 2 Ricevitore solare “windowless”

Il progetto è basato su uno studio di fattibilità nell'isolare un ricevitore solare a cavità “windowless” (senza finestra di quarzo) attraverso un sistema di isolamento aerodinamico a lama d'aria.

### 2.1 Funzionamento

Il funzionamento del ricevitore solare a cavità in esame è piuttosto particolare e tutt'ora in fase di sviluppo. Ha una particolare geometria, con un ingresso a cono ed una cavità simile ad una “botte”.



Figura 21: Ricevitore solare a cavità modellato in 3D

Come i classici ricevitori, esso sfrutta la radiazione solare concentrata, convogliata attraverso un campo di eliostati, nella cavità del ricevitore.

All'interno della cavità vi scorre un fluido termovettore, vapore acqueo, la cui particolarità è quella di essere trasparente alla radiazione solare in entrata alla cavità.

Il fluido prima di entrare nella cavità è preriscaldato ad una temperatura di 700 K.

La radiazione attraversa quindi il fluido termovettore, come se quest'ultimo fosse invisibile, e raggiunge le pareti interne del ricevitore, che a loro volta si riscaldano raggiungendo temperature molto elevate ed emettono una radiazione di lunghezza d'onda differente rispetto a quella dei raggi in entrata, più precisamente nel campo dei raggi infrarossi. Il fluido assorbe la radiazione infrarossa riemessa dalle pareti interne del ricevitore raggiungendo temperature prossime ai 1773 K.

Una volta che il fluido termovettore raggiunge l'uscita viene convogliato ad un ciclo Rankine per produrre energia elettrica.

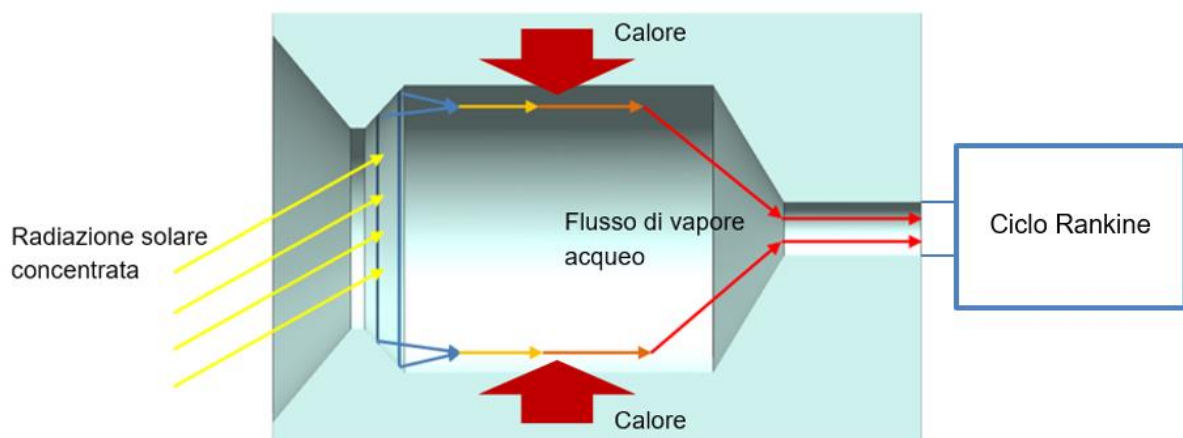


Figura 22: Nell'immagine viene mostrato il funzionamento del ricevitore: le frecce gialle rappresentano la radiazione solare concentrata dagli specchi che entrano nel ricevitore e scaldano le pareti interne; le frecce “grandi” rosse rappresentano il calore emesso dalle pareti che scalda il flusso termovettore; le altre frecce rappresentano il percorso seguito dal vapore acqueo. Il differente colore delle frecce indica l'aumento di temperatura a cui è soggetto il fluido termovettore.

## 2.2 Problematiche e possibile soluzione

Inizialmente l'isolamento tra l'interno del ricevitore e l'ambiente esterno veniva svolto da una finestra di quarzo, che impediva le perdite di fluido termovettore e riduceva le perdite di calore.

Questo elemento risulta tuttavia molto delicato e fatica a sopportare gli shock termici al quale era sottoposto. È stato provato anche a raffreddare la finestra ma i gradienti di temperatura che si instaurano su difficili da controllare.

Si vuole quindi cercare di capire se sia possibile isolare la cavità attraverso un sistema più innovativo a lama d'aria, eliminando così le problematiche dovute alla finestra di quarzo.

L'aria che andrebbe ad utilizzare questo sistema, svolge prima la funzione di raffreddare alcune componenti interne del ricevitore, e raggiunge una temperatura  $T_{air}$  di 473 K.

Va sottolineato che non si potrà intervenire modificando la geometria interna del ricevitore, ma il getto d'aria potrà essere fatto fuoriuscire anche da dei punti interni.

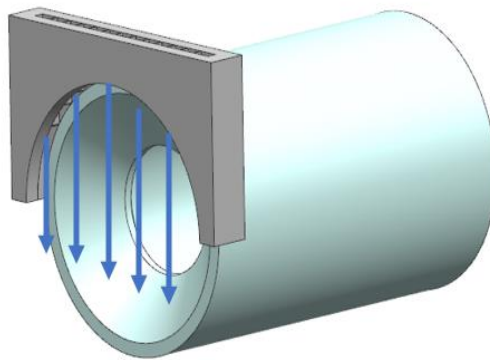


Grafico 6: Possibile sistema a lama d'aria applicato al ricevitore. L'immagine è a puro scopo illustrativo. Le frecce blu indicano l'aria che fuoriesce dal sistema.

## 2.3 Dimensioni e generalità

Le dimensioni del ricevitore sono illustrate in figura:

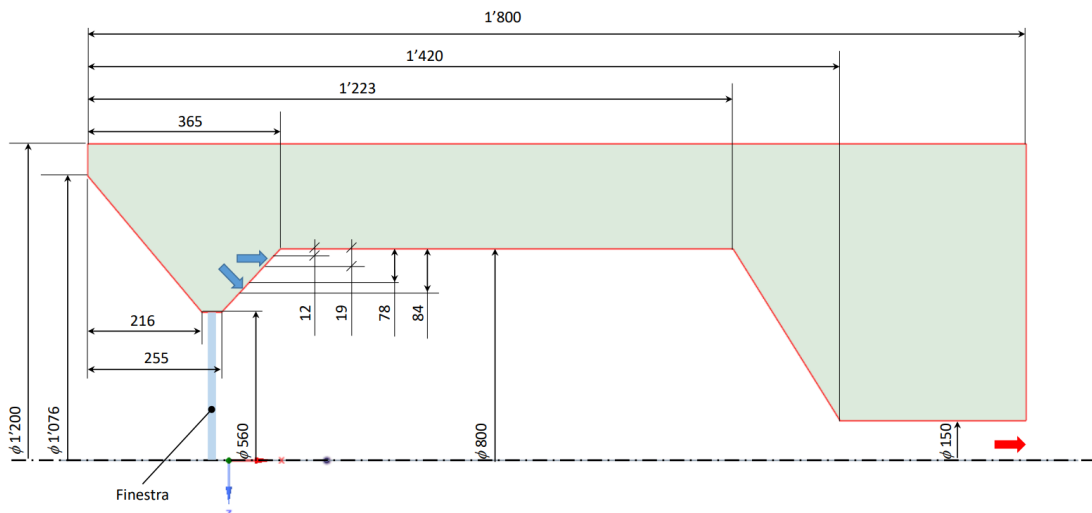


Figura 23: Dimensioni ricevitore [C.2]

Le due frecce azzurre indicano gli ingressi da dove fuoriesce il vapore acqueo, mentre la freccia rossa indica l'uscita dove esso fluisce andando in un ciclo termodinamico per produrre energia elettrica.

Gli ingressi sono delle sorte di corone circolari e la portata di vapore viene ripartita uniformemente tra le due entrate (50% e 50%).

La portata massica di vapore in entrata,  $\dot{m}_{H_2O}$ , è pari a  $460 \frac{kg}{h}$  ad una temperatura di  $773 K$ . La temperatura media all'interno della cavità,  $T_c$ , è di  $1000 K$ .

Il ricevitore durante il funzionamento è posto inclinato di un angolo  $\theta$  di  $25^\circ$  rispetto all'asse X, con la cavità rivolta verso il basso come mostrato in figura. Con l'angolo  $\varphi$  vengono invece indicate le angolazioni che avrà il getto d'aria nelle varie configurazioni.

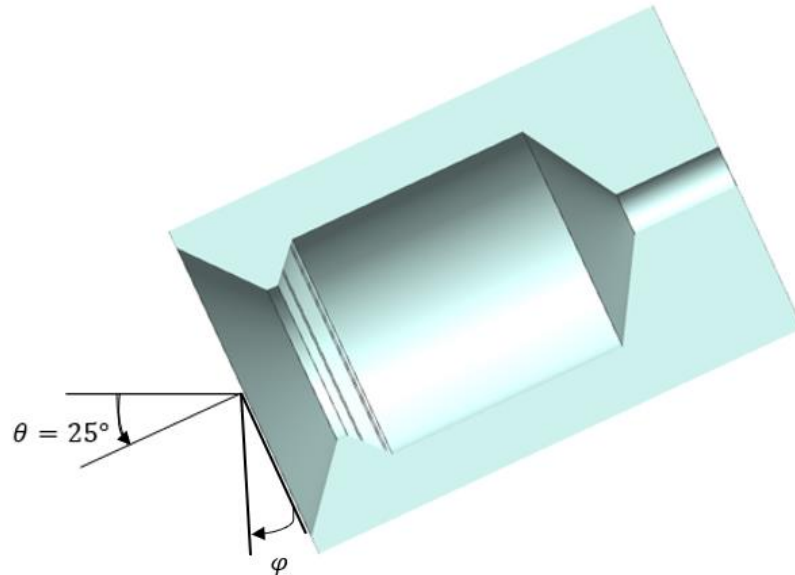


Figura 24: Ricevitore inclinato di  $25^\circ$  durante il suo funzionamento

### 3 Nomenclatura

Termini legati alla geometria del ricevitore e del getto d'aria

$A_c$	area della sezione trasversale di fluido [ $m^2$ ]
$P$	perimetro a contatto con il fluido [ $m^2$ ]
$R$	raggio esterno [ $m$ ]
$r$	raggio interno [ $m$ ]
$H$	lunghezza diametrale che deve coprire il getto d'aria [ $m$ ]
$D_h$	diametro idraulico [ $m$ ]
$L$	lunghezza dell'ugello del getto d'aria [ $m$ ]
$b_0$	spessore dell'ugello del getto d'aria [ $m$ ]

Termini legati ai flussi d'aria e di vapore

$\dot{m}_{in,H_2O}$	portata massica totale di vapore acqueo in ingresso [ $\frac{kg}{h}$ ] o [ $\frac{kg}{s}$ ]
$\dot{m}_{in,air}$	portata massica totale di aria in ingresso [ $\frac{kg}{h}$ ] o [ $\frac{kg}{s}$ ]
$\dot{m}_{out,H_2O}$	portata massica di vapore acqueo in uscita [ $\frac{kg}{h}$ ] o [ $\frac{kg}{s}$ ]
$\dot{m}_{out,air}$	portata massica totale di aria in uscita [ $\frac{kg}{h}$ ] o [ $\frac{kg}{s}$ ]
$\dot{m}_{loss,H_2O}$	portata massica di vapore acqueo persa [ $\frac{kg}{h}$ ] o [ $\frac{kg}{s}$ ]
$\dot{m}_{out,tot}$	portata massica totale in uscita [ $\frac{kg}{h}$ ] o [ $\frac{kg}{s}$ ]
$v$	velocità del getto d'aria [ $\frac{m}{s}$ ]
$v_w$	velocità del vento [ $\frac{m}{s}$ ]
$p_{out}$	pressione all'outlet 1 [ $Pa$ ]

Temperature

$T_c$	temperatura della cavità [ $K$ ]
$T_a$	temperatura dell'ambiente esterno [ $K$ ]
$T_{air}$	temperatura di uscita dell'aria del sistema a lama d'aria [ $K$ ]

Angolazioni

$\theta$	angolo di inclinazione della cavità [ $^\circ$ ]
$\varphi$	angolo di inclinazione del getto d'aria rispetto alla faccia del ricevitore [ $^\circ$ ]

Percentuali

$\%_{out,H_2O}$	percentuale di vapore acqueo in uscita [-]
$\%\dot{m}_{loss,H_2O}$	percentuale di vapore acqueo perso [%]
$\%\dot{m}_{out,air}$	percentuale di aria in uscita [%]
$Diff\%$	differenza tra i due valori di portate massiche nel calcolo iterativo [%]
$\epsilon$	efficienza del sistema a lama d'aria [%]

Quantità note e termini adimensionali

$Re$	numero di Reynolds [-]
$D_m$	modulo di deflessione [-]
$g$	accelerazione di gravità [ $\frac{m}{s^2}$ ]

## 4 Prime simulazioni

Inizialmente sono state eseguite alcune simulazioni testando qualche possibile configurazione per isolare la cavità del ricevitore, con un settaggio del software Fluent non definitivo.

Non vengono infatti riportati i risultati grafici e numerici di tali simulazioni ma sono comunque state fatte alcune importanti riflessioni che hanno permesso di iniziare a comprendere il funzionamento del ricevitore.

Lo spessore iniziale dell'ugello da dove fuoriesce il getto d'aria era stato impostato a  $20\text{ mm}$ . Fin da subito, è stata valutata la portata massica in uscita del getto d'aria ed equivaleva a valori piuttosto elevati. È così stato deciso di ridurre lo spessore dell'ugello a  $5\text{ mm}$  in modo da diminuire la quantità d'aria in uscita dall'ugello.

È stato notato anche un altro aspetto cardine per l'intero progetto. In queste prime simulazioni veniva impostata una condizione di "pressure outlet" all'uscita del ricevitore, con valore di pressione pari a  $0\text{ Pa}$ .

Il valore della portata massica in uscita dal ricevitore spesso risultava minore del valore di portata massica di vapore in entrata. Questo perché, frequentemente, il getto d'aria influenzava i getti di vapore acqueo e parte di quest'ultimo finiva per fluire al di fuori del ricevitore. La condizione di "pressure outlet" non risulterebbe quindi veritiera, in quanto nella situazione reale vi sono delle soffianti che facilitano lo scorrimento del fluido termovettore verso l'uscita della cavità del ricevitore. Nel capitolo "Condizione all'outlet 1" verrà affrontato proprio questo aspetto fino ad arrivare ad una conclusione.

Le prime simulazioni sono state eseguite facendo fuoriuscire il getto d'aria all'estremo dell'apertura del ricevitore da una sorta di impianto a lama d'aria, come illustrato nella figura che segue. Il getto d'aria per riuscire a raggiungere l'estremità opposta del ricevitore necessita di velocità piuttosto elevate.

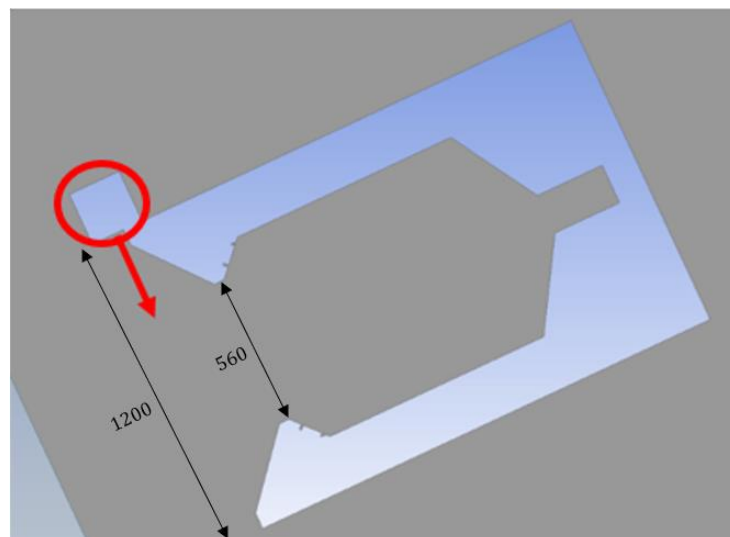
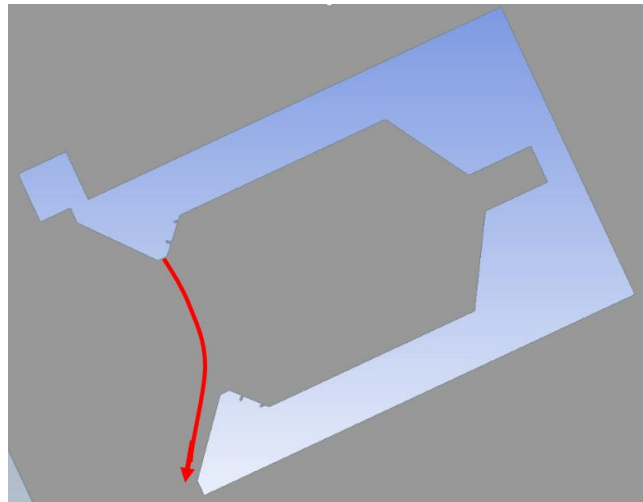


Figura 25: Geometria usata per le prime simulazioni; la freccia rossa indica da dove fuoriesce il getto d'aria, mentre il cerchio rosso indica l'impianto installato sul ricevitore per generare il getto d'aria.

Si è intuito che si sarebbe potuto posizionare il getto d'aria nella posizione dove vi era originariamente la finestra di quarzo (figura 26). Da questo punto, la distanza che avrebbe dovuto coprire il getto d'aria per isolare la cavità sarebbe stata minore,  $560\text{ mm}$  invece di  $1200\text{ mm}$ , e di conseguenza avrebbe dovuto avere una velocità minore. Sicuramente si avrebbe un miglioramento anche dal punto di vista energetico se si pensa all'impianto che dovrà generare il getto d'aria; inoltre da questa posizione si

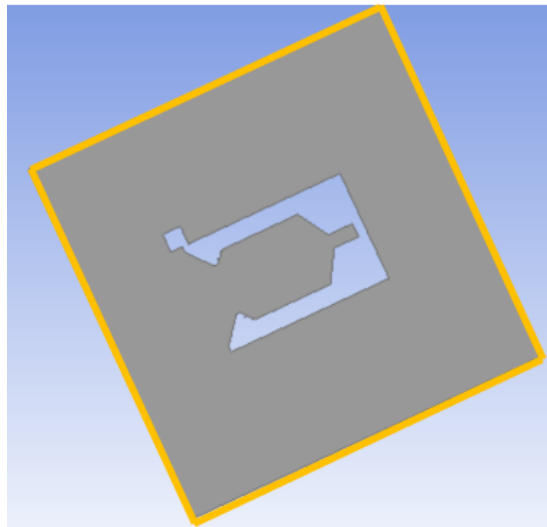


sarebbe potuta sfruttare la geometria del ricevitore per far poi fluire il getto d'aria all'esterno della cavità.



*Figura 26: Nuova posizione di fuoriuscita del getto d'aria; la freccia rossa indica da dove fuoriesce il getto d'aria e il possibile percorso che dovrebbe compiere per isolare la cavità*

È stato notato anche un altro aspetto da migliorare; il dominio computazionale, utilizzato per le prime simulazioni, è stato costruito con dimensioni piuttosto ridotte e per evitare che il comportamento del ricevitore venga influenzato dalle pareti del dominio, quest'ultimo andrà ulteriormente ingrandito.



*Figura 27: Dominio computazionale usato per le prime simulazioni*

## 5 Ricerca Varianti

Come già detto in precedenza lo scopo del progetto è quello di verificare se sia fattibile isolare il ricevitore sostituendo la finestra di quarzo con un sistema a lama d'aria e valutarne l'efficienza.

Lo studio delle varianti in questo progetto è stato svolto in maniera differente rispetto alla consuetudine. Dopo le considerazioni fatte nelle "Prime simulazioni", si è partiti da una posizione di riferimento da dove fare fuoriuscire il getto d'aria (Variante 1). Per questa variante sono state eseguite numerose simulazioni, variando velocità e angolo di inclinazione del getto d'aria.

È stata poi fatta una valutazione delle simulazioni eseguite e solo successivamente si è deciso quali altre posizioni del getto d'aria potessero migliorare ulteriormente la situazione della variante analizzata precedentemente.

A priori infatti sarebbe stato molto difficile dare dei giudizi a delle varianti senza aver eseguito alcuna simulazione e soprattutto sarebbe stato altrettanto difficile determinare quali avrebbero potuto essere le posizioni migliori da dove far fuoriuscire il getto d'aria per isolare il ricevitore.

Nel rapporto vengono descritti i motivi e le osservazioni per i quali si è deciso di analizzare le Variante 2 e 3.

In questo capitolo vengono presentate in ordine le 3 varianti analizzate così da poter rendere più comprensibili i successivi capitoli riguardanti il settaggio del software Fluent e i parametri/calcoli svolti per poter procedere con le simulazioni.

Va precisato che le rappresentazioni grafiche delle varianti sono in due dimensioni in quanto sono state svolte unicamente delle simulazioni planari 2D.

### 5.1 Variante 1

La prima variante è già stata in parte mostrata nel capitolo "Prime simulazioni". Essa prevede che il getto d'aria fuoriesca dalla posizione dove vie era precedentemente la finestra di quarzo e fluisca dall'alto verso il basso.

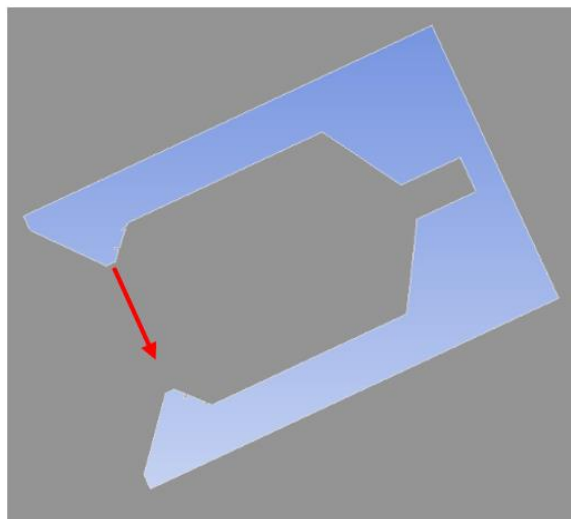


Figura 28: Rappresentazione grafica della variante 1

## 5.2 Variante 2

La seconda variante prevede che il getto d'aria fuoriesca da una posizione speculare alla Variante 1 e fluisca dal basso verso l'alto.

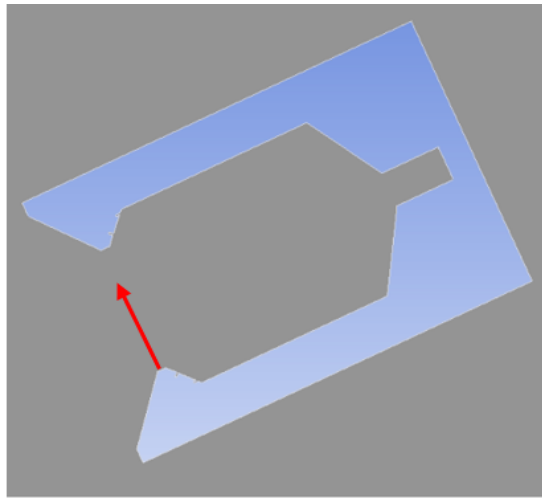


Figura 29: Rappresentazione grafica della variante 2

## 5.3 Variante 3

Nella variante 3 il getto d'aria fuoriesce da una posizione intermedia tra l'estremità del ricevitore e la Variante 2 e fluisce sempre dal basso verso l'alto.

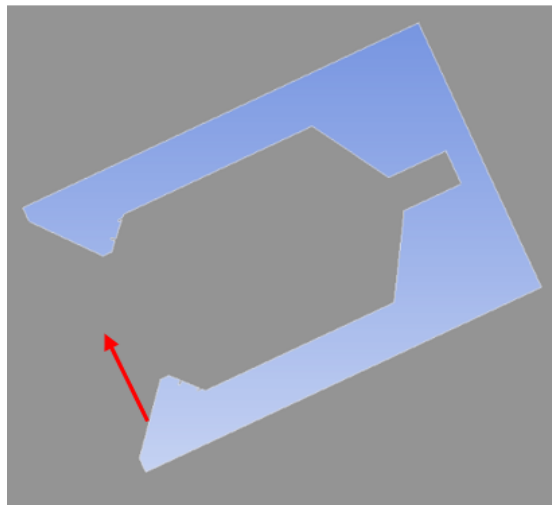


Figura 30: Rappresentazione grafica della variante 3

## 6 Analisi CFD e Settaggio definitivo Fluent

Per simulare il comportamento del ricevitore si è ricorso all'utilizzo del pacchetto Ansys Fluent. In particolare per generare le geometrie è stato utilizzato Design-Modeler, per generare le mesh il software di meshatura del pacchetto Ansys e per eseguire le simulazioni Fluent 2019.

### 6.1 Geometry

Per semplificare le simulazioni e ridurre il costo computazionale si è deciso di eseguire delle simulazioni planari 2D.

Sono quindi state generate le geometrie in base alle varianti proposte in precedenza. Ad ogni geometria corrisponde una posizione del getto d'aria differente.

Per assicurarsi che il comportamento del ricevitore non venisse influenzato dalle pareti del dominio computazionale, è stato creato un dominio computazionale sufficientemente grande, compreso di una "cornice" esterna e una più piccola interna dov'è contenuto il ricevitore.

Le dimensioni delle due "cornici" sono di:

- Cornice esterna: 7000 x 5000 mm
- Cornice interna: 3000 x 3000 mm

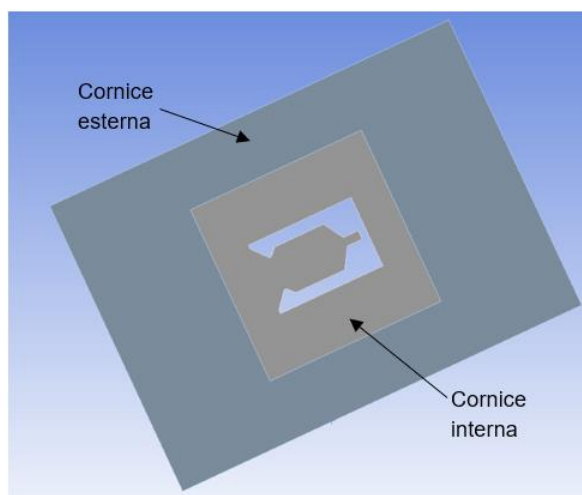


Figura 31: Rappresentazione di una geometria realizzata con Design-Modeler

### 6.2 Meshing

La meshatura è stata eseguita rispettando le regole generali del meshing.

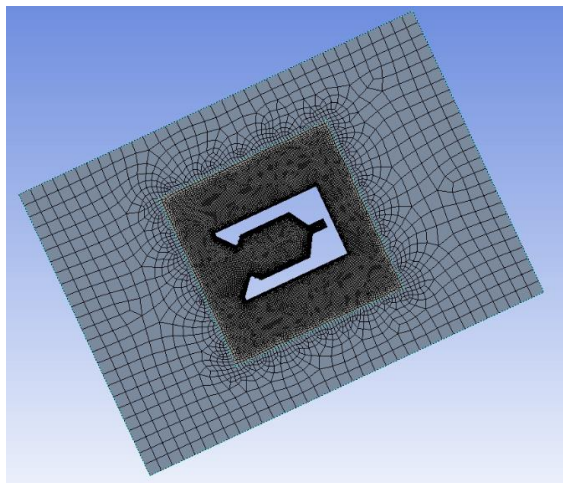


Figura 32: Meshatura di una delle geometrie create

Sulla cornice esterna sono stati generati elementi più grandi mentre nel riquadro interno gli elementi sono più fini e sono stati eseguiti gli infittimenti dove necessario. Con il comando “inflation” sono invece stati creati gli elementi alle pareti per simulare lo strato limite correttamente. Una volta create le mesh è stato verificato che la “skewness” e l’”aspect ratio” fossero entro i valori limite. Infine sono state definite le named selection alle quali andranno attribuite le corrette boundary condition nel Fluent.

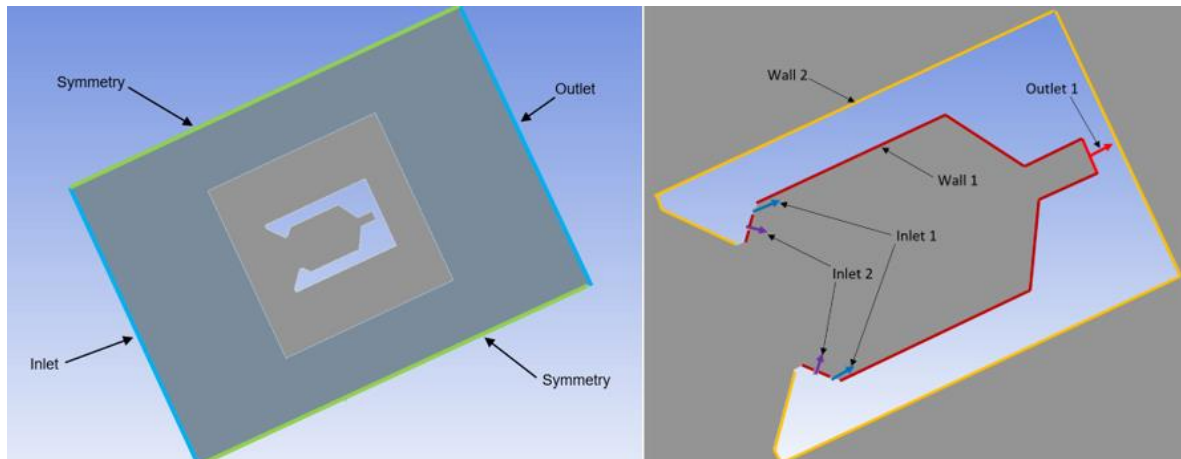


Figura 33: Named Selection assegnate

## 6.3 Fluent

Le mesh sono poi state esportate e aperte in Fluent dove è stato settato il calcolo per simulare le varianti create.

Di seguito viene illustrato il settaggio definitivo usato per eseguire le simulazioni con il software Fluent 2019. Tutte le modifiche apportate rispetto alle impostazioni di default sono riportate nei seguenti sotto-capitoli.

Nel caso di simulazioni eseguite con un setup differente, le variazioni vengono specificate nel capitolo e nel paragrafo relativo a tali simulazioni.

### 6.3.1 Setup

#### General

Il flusso è stato impostato come comprimibile dato che il numero di Mach è inferiore a 0,3. Viene eseguita una simulazione 2D planare e stazionaria. Viene impostato un valore di gravità di  $-9,81 \frac{m}{s^2}$  in direzione Y.

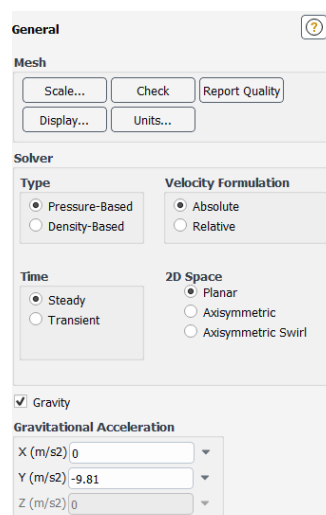


Figura 34: Settaggio delle impostazioni generali di Fluent

## Models

Le equazioni che vengono attivate sono:

- Energy;
- Viscous;
- Species;

In particolare per l'equazione della viscosità, Viscous; viene attivato il modello "k-epsilon" (2 eqn) realizzabile per simulare il flusso turbolento. Il modello "Realizable" è il più evoluto rispetto agli altri due modelli ed offre numerosi vantaggi. Viene impostata una condizione alla parete "Enhanced Wall Treatment" così che Fluent capisce autonomamente come modellare lo strato limite alla parete. Inoltre vengono attivate le opzioni "Full Bouyancy Effects" e "Production Limiter":

- l'opzione "full bouyancy effects" serve a tener conto dell'effetto della gravità sia sull'equazione k che su epsilon;
- l'opzione "production limiter" viene attivata in quanto il modello "k-epsilon" tende a sovrastimare la generazione di energia cinetica, specialmente nei punti di ristagno; attivando "production limiter" si limita questo effetto.

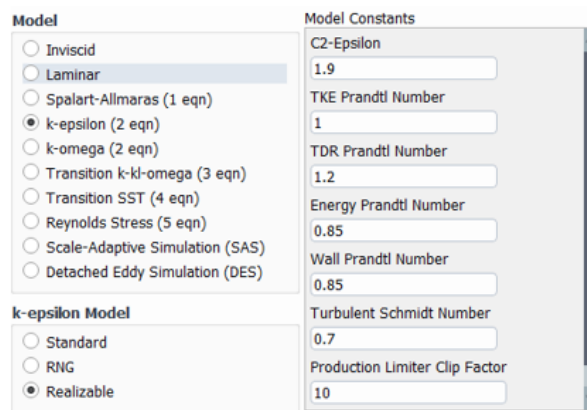


Figura 35: Settaggio delle impostazioni legate al modello di turbolenza "k-epsilon"

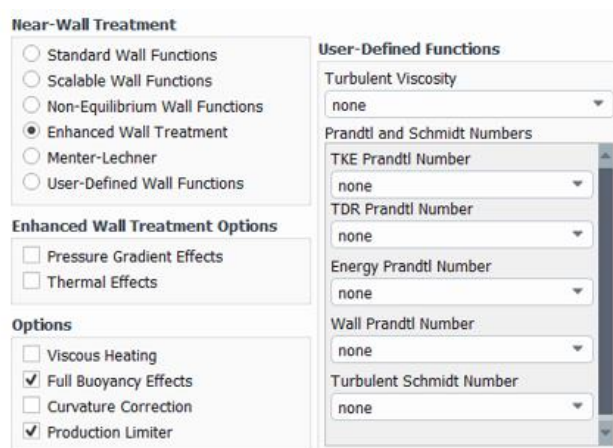


Figura 36: Settaggio delle impostazioni legate al trattamento alla parete del fluido

Per quanto riguarda l'equazione delle specie viene attivato il modello "Species Transport" e l'opzione "Diffusion Energy Source".

Figura 37: Settaggio delle impostazioni legate all'equazione delle specie

**Material**

Nei materiali è stata impostata la miscela, "Mixture", di aria e vapore acqueo impostando le proprietà nei modi rappresentati nelle seguenti figure.

**Mixture Template**

Figura 38: Settaggio delle impostazioni legate alla miscela

- **Water-vapor**

Figura 39: Settaggio delle impostazioni legate al vapore acqueo

STUDENTSUPSI

- **Air**

Properties

Cp (Specific Heat) (j/kg-k)	piecewise-polynomial	Edit...
Thermal Conductivity (w/m-k)	polynomial	Edit...
Viscosity (kg/m-s)	polynomial	Edit...
Molecular Weight (kg/kmol)	constant	Edit...
	18.01534	
L-J Characteristic Length (angstrom)	constant	Edit...
	2.605	
L-J Energy Parameter (k)	constant	Edit...
	572.4	

Figura 40: Settaggio delle impostazioni legate all'aria

La densità della miscela è stata impostata come “incompressibile ideal gas” in quanto il flusso è incompressibile ( $Mach < 0.3$ ).

Per definire la maggior parte delle altre proprietà di aria e vapore acqueo sono stati utilizzati i polinomi già esistenti nel Fluent Database. È stato invece necessario “costruire” due polinomi per quanto riguarda la conducibilità termica e la viscosità dinamica in quanto non erano presenti nel Fluent database. Attraverso il software Matlab, sono stati generati i due polinomi utilizzando dei dati tabellati [C.3].

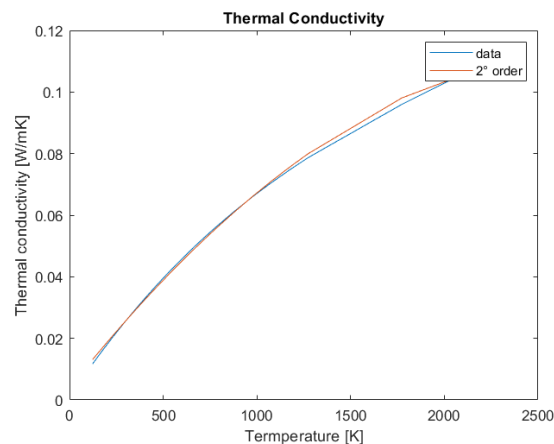


Grafico 7: Andamento della conducibilità termica in funzione della temperatura. La linea blu rappresenta la curva ricavata dai dati tabellati, la linea rossa rappresenta il polinomio approssimativo di secondo ordine.

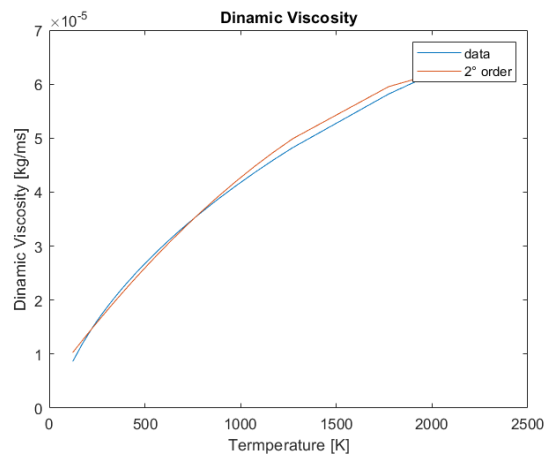


Grafico 8: Andamento della viscosità dinamica in funzione della temperatura. La linea blu rappresenta la curva ricavata dai dati tabellati, la linea rossa rappresenta il polinomio approssimativo di secondo ordine.



Sono stati utilizzati dei polinomi del secondo ordine in quanto consigliati dal software “Matlab” e come si può notare, questi approssimano bene le curve dei dati tabellati.

	$a^0$	$a^1$	$a^2$
Conducibilità Termica	0.00387704315628455	7.66757392429474e-05	-1.32821008148587e-08
Viscosità Dinamica	4.61407360370566e-06	4.73051285939177e-08	4.61407360370566e-06

Tabella 4: Coefficienti dei polinomi di conducibilità termica e viscosità dinamica

## Cell Zone Condition

Nelle “Cell Zone Condition” viene assegnata la miscela al dominio computazionale.

## Boundary Condition

Le condizioni al contorno associate alle Named Selection create nel Meshing sono:

- Inlet → pressure-inlet
- Inlet 1 → mass-flow-inlet
- Inlet 2 → mass-flow-inlet
- Inlet 3 → velocity-inlet
- Outlet → pressure-outlet
- Outlet 1 → pressure-outlet e successivamente mass-flow-outlet
- Symmetry → symmetry
- Wall 1 → Wall
- Wall 2 → Wall

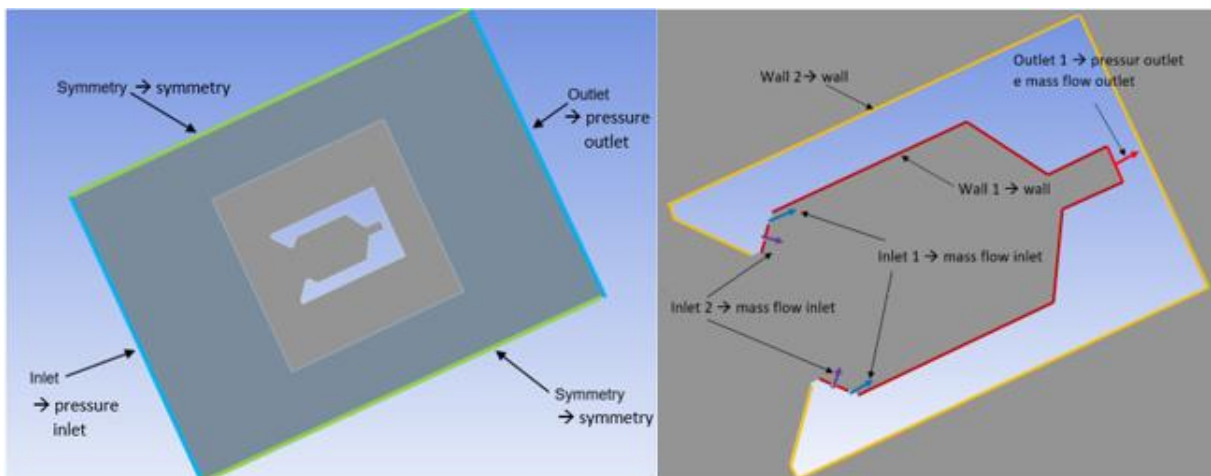


Figura 41: Rappresentazione delle “Named Selection” e delle “boundary conditions” associate. A sinistra è raffigurato l'intero dominio computazionale, mentre a destra viene è rappresentato un ingrandimento del ricevitore solare

L'inlet 3 non è indicato in figura in quanto è l'inlet relativo al getto d'aria e la sua posizione dipende dalla variante analizzata.

Le impostazioni relative alle boundary condition verranno trattate nel seguente capitolo (“Calcoli e settaggio delle boundary condition”).

## Reference values

Viene impostato il valore della profondità, “Depth”, pari a 0,8 m, ovvero la dimensione diametrale interna del ricevitore.

### 6.3.2 Solution

Per quanto riguarda la risoluzione delle simulazioni, una volta inizializzato il calcolo con il metodo ibrido, vengono risolte le equazioni con le impostazioni riportate nelle prossime immagini.

#### Method

Lo schema utilizzato è il "Simple", in quanto si tratta di una simulazione stazionaria; le equazioni vengono risolte in modo segregato.

La discretizzazione spaziale del gradiente viene invece eseguita nel modo "green-gauss node base" in quanto risulta essere il più accurato ed esegue la discretizzazione basandosi sui nodi.

Per le altre equazioni vengono utilizzati i metodi di risoluzione al secondo ordine.

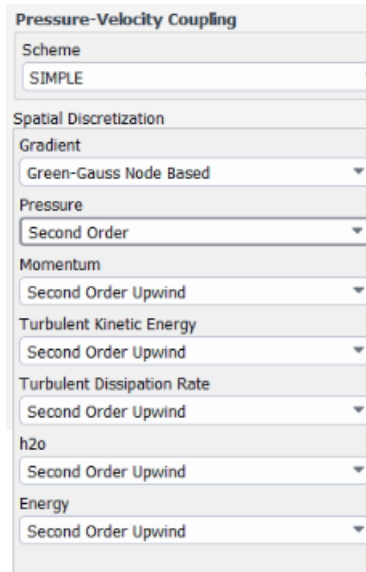


Figura 42: Impostazione legate ai metodi risolutivi utilizzati per risolvere le equazioni

#### Controls

I controlli vengono spesso utilizzati per facilitare la convergenza dei risultati. In particolare, durante il corso delle simulazioni, vengono variati i fattori di sotto-rilassamento di pressione e momento. Sono stati utilizzati i valori di default (0,3 e 0,7) per un certo numero di iterazioni, poi vengono invertiti e successivamente vengono diminuiti. Gli altri fattori di sotto-rilassamento sono stati tenuti di default.

#### Monitor

##### Residual

I valori di residui impostati sono i seguenti:

- Continuity, 1e-4
- X-velocity, 1e-4
- Y-velocity, 1e-4
- Energy, 1e-8
- K, 1e-4
- Epsilon, 1e-4
- H<sub>2</sub>O, 1e-5

##### Report Plots

Sono stati creati un report di "Mass-Weighted Average" della variabile specie (species), sulla quantità "Mass fraction of H<sub>2</sub>O" sull'outlet 1 e un 'altro report di "Area-Weighted Average" della variabile pressione (pressure) sempre sull'outlet 1.

Questo è stato fatto in quanto durante le simulazioni i residui faticavano a raggiungere i valori impostati, per cui veniva deciso di interrompere le simulazioni quando l'andamento delle curve dei due report era pressoché una retta parallela all'asse x. A questo punto venivano ricontrollati i residui per

verificare che fossero sufficientemente bassi. Successivamente si poteva dichiarare concluse le simulazioni.

### **Inizialization**

Viene eseguita un'inizializzazione di tipo ibrido, "hybrid", impostando un numero di 100 iterazioni. Con questo tipo di inizializzazione la convergenza delle simulazioni viene raggiunta prima rispetto ad un'inizializzazione di tipo standard.

## 7 Calcoli e settaggio delle boundary conditions

In questo capitolo vengono riportati i parametri e i calcoli che sono stati svolti per completare il settaggio delle impostazioni del software Fluent (boundary conditions) per poter eseguire le simulazioni.

La simbologia utilizzata nei calcoli è stata illustrata precedentemente nel capitolo “Nomenclatura”. Nel caso di più termini con lo stesso simbolo vengono utilizzati i pedici per differenziarli.

Il primo passo è stato quello di identificare una velocità di riferimento da cui partire per svolgere le simulazioni. Per fare ciò, è stato utilizzato il modulo di deflessione già illustrato anche nello stato dell'arte.

Partendo dal grafico [C2] è stato ricavato il valore del modulo di deflessione conoscendo le dimensioni di  $H$  e  $b_0$ :

- $H = 560 \text{ mm}$
- $b_0 = 5 \text{ mm}$

Il valore del rapporto  $\frac{H}{b_0}$  è di 112. Dato che l'andamento del modulo di deflessione tende a linearizzarsi, viene considerato il valore estremo sul grafico di  $\frac{H}{b_0}$  pari a 100.

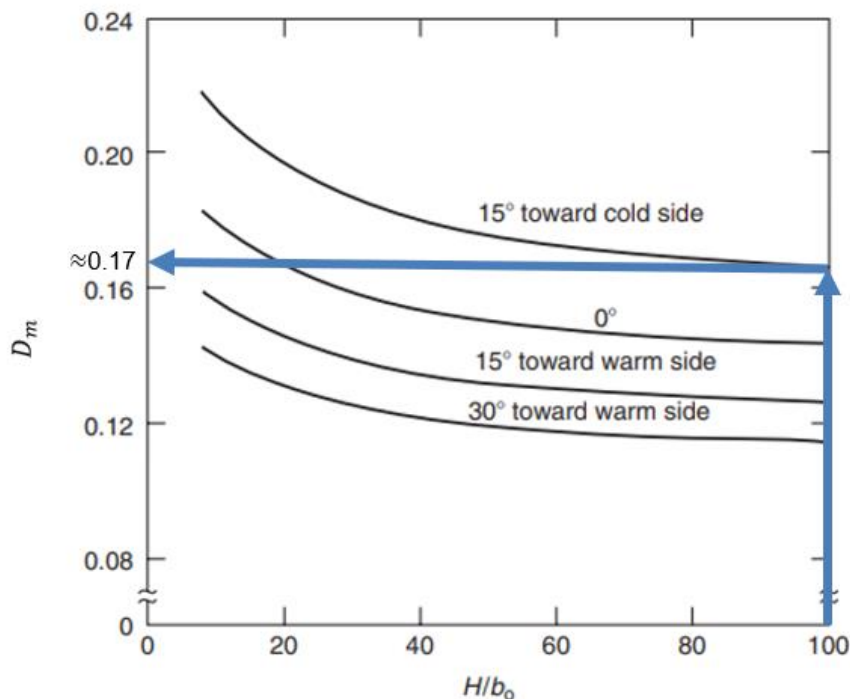


Grafico 9: Andamento del modulo di deflessione in funzione del rapporto  $\frac{H}{b_0}$  [C.4]

È risultato un valore del modulo di deflessione pari a circa 0.17.

Invertendo la formula del modulo di deflessione è stato calcolato il minimo valore di velocità necessario ad isolare la cavità:

$$D_m = \frac{b_0 \cdot \rho_c \cdot v_0^2}{g \cdot H^2 \cdot (\rho_a \cdot \rho_c)} = \frac{b_0 \cdot v_0^2 \cdot T_c \cdot T_a}{g \cdot H^2 \cdot T_a \cdot (T_c - T_a)}$$

$$v_0 = \sqrt{\frac{D_m \cdot g \cdot H^2 \cdot T_a \cdot (T_c - T_a)}{b_0 \cdot T_c \cdot T_a}}$$

Con:

- $b_0 = 20 \text{ mm}$
- $T_c = 1000 \text{ K}$
- $T_a = 300 \text{ K}$
- $H = 560 \text{ mm} = 0.560 \text{ m}$
- $g = 9.81$

$$v_0 = \sqrt{\frac{0,17 \cdot 9,81 \cdot 0,560^2 \cdot 300 \cdot (1000 - 300)}{0,005 \cdot 1000 \cdot 300}} = 8,65 \left[ \frac{m}{s} \right]$$

Avendo trovato un valore di velocità minimo di  $8,65 \frac{m}{s}$ , nelle simulazioni si è partiti utilizzando una velocità di  $10 \text{ m/s}$ . Infatti il valore di  $v_0$ , rappresenta il minimo valore per cui il getto d'aria è in grado di percorrere la distanza di  $H$ . Questo valore va però aumentato se si vuole riuscire a coprire in maniera efficiente la cavità. Inoltre va ricordato che il ricevitore in esame è diverso da quelli abituali, visti anche nello stato dell'arte, e il getto d'aria potrebbe venire disturbato da altri elementi.

Dopo aver calcolato il valore minimo di velocità si è proceduto con il calcolo dei diametri idraulici. I due ingressi del vapore acqueo, per semplificare i calcoli, sono stati ipotizzati come due corone circolari (figura 42).

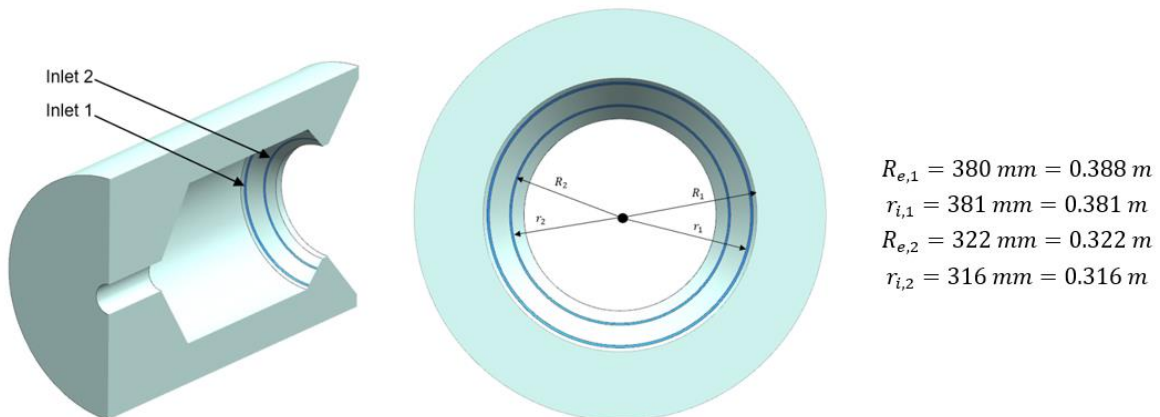


Figura 43: Illustrazione degli ingressi del vapore acqueo

Il diametro idraulico viene calcolato con la seguente formula:

$$D_h = \frac{4 \cdot A_c}{P}$$

Con:

- $A_{c,1} = \pi \cdot (R_{e,1}^2 - r_{i,1}^2) = \pi \cdot (0,388^2 - 0,381^2)$
- $A_{c,2} = \pi \cdot (R_{e,2}^2 - r_{i,2}^2) = \pi \cdot (0,322^2 - 0,316^2)$
- $P_1 = 2 \cdot \pi \cdot (R_{e,1} + r_{i,1}) = 2 \cdot \pi \cdot (0,388 + 0,381)$
- $P_2 = 2 \cdot \pi \cdot (R_{e,2} + r_{i,2}) = 2 \cdot \pi \cdot (0,322 + 0,316)$

$$D_{h,1} = \frac{4 \cdot \pi \cdot (0,388^2 - 0,381^2)}{2 \cdot \pi \cdot (0,388 + 0,381)} = 0,014 \text{ [m]}$$

$$D_{h,2} = \frac{4 \cdot \pi \cdot (0,322^2 - 0,316^2)}{2 \cdot \pi \cdot (0,322 + 0,316)} = 0,012 \text{ [m]}$$

Successivamente è stato calcolato il diametro idraulico del getto d'aria per le varianti proposte; per la variante 1 e 2 il valore del diametro idraulico del condotto di uscita dell'aria è lo stesso in quanto la posizione da cui fuoriesce l'aria nella variante 2 è speculare a quella della variante 1 e le dimensioni sono le stesse.

Non si è posta attenzione al sistema che genererà il getto d'aria e nemmeno a come questo verrà implementato sul ricevitore solare. Si è solamente pensato che il flusso d'aria potesse fuoriuscire da una geometria come quella mostrata nella seguente figura.

Lo spessore  $b_0$  del condotto, come già analizzato nel capitolo "Prime simulazioni", sarà essere di 5 mm, mentre la lunghezza dipende da dove viene posizionato l'apparecchio.

Per la variante 1 e 2 la lunghezza  $L$  è di 0.560 m, mentre per la variante 3 è di 0.880 m.

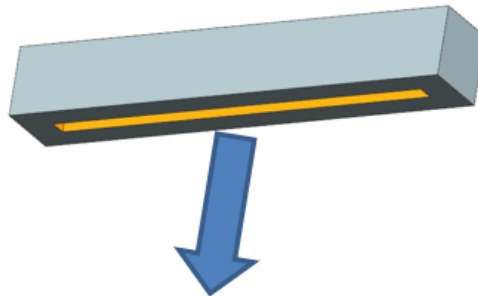


Figura 44: Generatore del flusso d'aria

La formula per il calcolo del diametro idraulico è la stessa usata precedentemente:

$$D_h = \frac{4 \cdot A_c}{P}$$

Con:

- $A_{c,var 1-2} = b_0 \cdot L_{var 1-2} = 0.005 \cdot 0.560$
- $A_{c,var 3} = b_0 \cdot L_{var 3} = 0.005 \cdot 0.880$
- $P_{var 1-2} = 2 \cdot (b_0 + L_{var 1-2}) = 2 \cdot (0.005 + 0.560)$
- $P_{var 3} = 2 \cdot (b_0 + L_{var 3}) = 2 \cdot (0.005 + 0.880)$

$$D_{h,1} = \frac{4 \cdot 0.005 \cdot 0.560}{2 \cdot (0.005 + 0.560)} = 0.00991 \text{ [m]}$$

$$D_{h,2} = \frac{4 \cdot 0.005 \cdot 0.880}{2 \cdot (0.005 + 0.880)} = 0.00994 \text{ [m]}$$

In ultimo è stata eseguita la conversione per determinare il corretto valore di vapore acqueo in entrata nel dominio computazionale:

$$\dot{m}_{H_2O} = 460 \left[ \frac{kg}{h} \right] = \frac{460}{3600} = 0.1278 \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

Questo valore è stato poi ripartito uniformemente (50% e 50%) per i due ingressi di vapore.

$$\dot{m}_{H_2O, 1 \text{ ingresso}} = \frac{0.1278}{2} = 0.0639 \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

Impostando questi valori il software Fluent darà dei valori finali non corretti. Per ottenere i valori corretti di portate, è necessario eseguire un semplice rapporto nel seguente modo.

Si imposta il valore di portata massica trovata precedentemente e si fa partire la simulazione. Una volta conclusa la simulazione si va ad appuntare il valore di portata effettivo che restituisce Fluent.

Impostando il valore di  $0.0639 \frac{kg}{s}$  è risultato un valore di portata di  $0.05113 \frac{kg}{s}$ .

Si esegue il rapporto sapendo che il valore finale di portata dovrà essere  $0.0639 \frac{kg}{s}$ .

$$\frac{0.05113}{0.0639} = \frac{0.0639}{X}$$

$$X = \frac{0.0639 \cdot 0.0639}{0.05113} = 0.07987$$

La portata di vapore corretta da inserire negli Inlet sarà di  $0.07987 \frac{kg}{s}$ .

Mentre per la condizione di "mass flow outlet" basterà inserire il doppio della quantità che viene inserita per il singolo inlet, ovvero  $2 \cdot 0.07987 = 0.15974 \frac{kg}{s}$ .

Conclusi i calcoli sono state impostate le boundary condition per concludere così il settaggio definitivo e poter lanciare le simulazioni.

Le boundary condition già illustrate nel capitolo precedente sono:

- Inlet → pressure-inlet
- Inlet 1 → mass-flow-inlet
- Inlet 2 → mass-flow-inlet
- Inlet 3 → velocity-inlet
- Outlet → pressure-outlet
- Outlet 1 → pressure-outlet e successivamente mass-flow-outlet
- Symmetry → symmetry
- Wall 1 → Wall
- Wall 2 → Wall

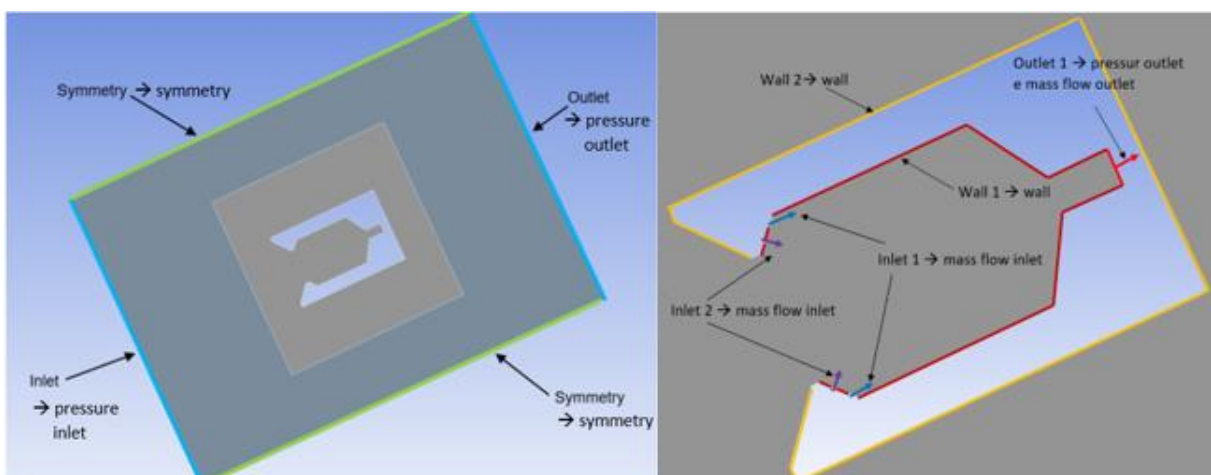


Figura 45: Rappresentazione delle "Named Selection" e delle "boundary conditions" associate. A sinistra è raffigurato l'intero dominio computazionale, mentre a destra viene rappresentato un ingrandimento del ricevitore solare

#### Inlet → pressure-inlet

In questo pressure inlet il valore della pressione viene lasciato a  $0 Pa$ . Vengono lasciati anche i valori di default legati alla turbolenza:

- Turbulence intensity = 5 [%]
- Turbulent viscosity ratio = 10

La temperatura viene impostata a 300 K e nelle "species" viene impostato l'assenza di acqua.

#### **Inlet 1 → mass-flow-inlet**

Viene impostato un valore di "mass flow rate" pari a  $0.07987 \frac{kg}{s}$  "normal to boundary". Per quanto riguarda la turbolenza sono stati impostati i seguenti valori:

- Turbulence intensity = 5%
- Hydraulic diameter = 0.014 [m]

La temperatura del vapore in ingresso viene impostata a 573 K e nelle specie viene impostato che nel da questi ingressi entra solamente vapore acqueo.

#### **Inlet 2 → mass-flow-inlet**

Viene impostato un valore di "mass flow rate" pari a  $0.07987 \frac{kg}{s}$  "normal to boundary". Per quanto riguarda la turbolenza sono stati impostati i seguenti valori:

- Turbulence intensity = 5%
- Hydraulic diameter = 0.012 [m]

La temperatura del vapore in ingresso viene impostata a 573 K e nelle specie viene impostato che nel da questi ingressi entra solamente vapore acqueo.

#### **Inlet 3 → velocity-inlet**

Il velocity inlet viene impostato in base alla velocità del getto ed all'angolazione che si vuole analizzare. Per ogni simulazione l'impostazione del velocity inlet è differente e dipende dalla velocità e dall'angolazione che si vuole dare al getto d'aria. Restano invece costanti i valori legati alla turbolenza:

- Turbulence intensity = 5%
- Hydraulic diameter = 0.0099[m]

La temperatura dell'aria viene impostata a 473 K e nelle specie viene impostato che da questo ingresso entra solamente l'aria.

#### **Outlet → pressure-outlet**

In questo pressure outlet il valore della pressione viene lasciato a 0 Pa. Vengono lasciati anche i valori di default legati alla turbolenza:

- Backflow Turbulence intensity = 5 [%]
- Backflow Turbulent viscosity ratio = 10

La temperatura di "backflow" viene impostata a 300 K e nelle "species" viene impostata l'assenza di acqua nel "backflow".



**Outlet 1 → pressure-outlet e mass-flow-outlet****pressure outlet**

Anche in questo pressure outlet il valore della pressione viene lasciato a  $0 Pa$ . Per quanto riguarda la turbolenza sono stati impostati i seguenti valori:

- Turbulence intensity = 5%
- Hydraulic diameter = 0.012 [m]

La temperatura di “backflow” viene impostata a  $1773 K$  e nelle “species” viene impostata l’assenza di aria nel “backflow”.

**mass-flow-outlet**

Viene impostato un valore di “mass flow rate” pari a  $0.15974 \frac{kg}{s}$ .

**Symmetry → symmetry**

Per quanto riguarda le boundary conditions symmetry, esse non prevedono alcun settaggio da impostare.

**Wall 1, Wall 2 → Wall**

Dato che è stato deciso di valutare solamente l’aspetto fluidodinamico del ricevitore, non è stato settato alcuna impostazione legata all’aspetto termico delle pareti. È stata impostata la condizione di “stationary wall” e “no slip”.

## 8 Condizione all'Outlet 1

Dopo le prime simulazioni in cui veniva impostata una condizione di "pressure outlet" con un valore di pressione pari a 0 Pascal, si è subito notato che questa condizione non replicava in modo veritiero la situazione reale in quanto era chiaro che il ricevitore non aspirava il vapore verso l'uscita. Infatti solitamente queste tecnologie sono dotate di soffianti che aiutano a creare una sorta di risucchio verso l'uscita e facilitano il fluire del flusso.

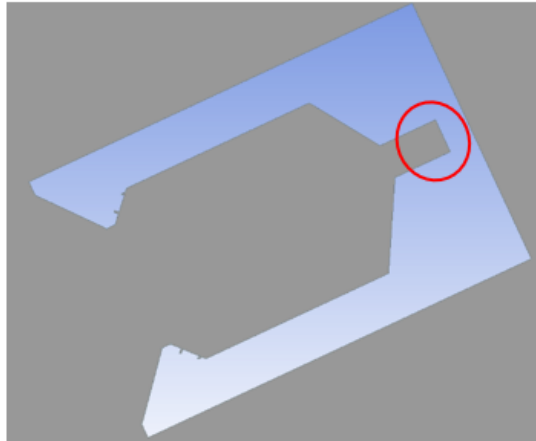


Figura 46: Geometria del ricevitore solare; il cerchio rosso indica l'outlet 1

La situazione all'Outlet 1, risulta però sconosciuta, per cui è stato necessario cercare di ricavare delle conclusioni o un valore di pressione univoco per poter poi procedere con la simulazione delle configurazioni con cui si intenderà isolare il ricevitore.

Per prima cosa è stata eseguita una simulazione solo dell'interno del ricevitore come se fosse completamente isolato. Il settaggio del Fluent utilizzato è quello definitivo ma nei materiali è stato ovviamente utilizzato solamente il vapore acqueo.

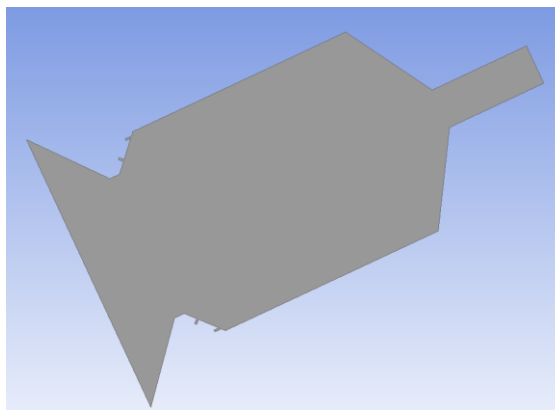


Figura 47: Interno del ricevitore

Questo è stato fatto per cercare di determinare un possibile valore di pressione all'outlet 1 da confrontare poi con le successive simulazioni.

Nella simulazione all'outlet 1 è stata impostata la condizione di "mass flow outlet" con, ovviamente, il valore di portata massica in uscita uguale alla portata massica di vapore in entrata.

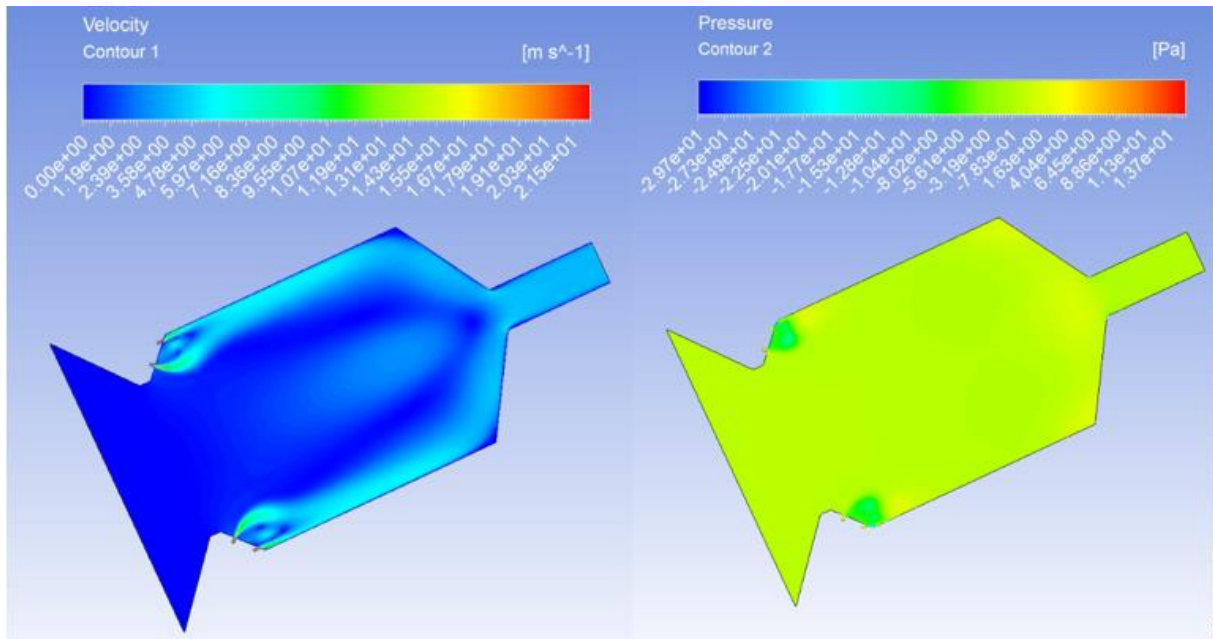


Figura 48: Contour di velocità (sinistra) e pressione (destra) della simulazione dell'interno del ricevitore

Il flusso di vapore fluisce interamente verso l'uscita del ricevitore. Questa sarebbe la situazione ideale alla quale si vorrebbe riuscire ad arrivare, isolando il ricevitore con il sistema a lama d'aria.

Anche il contour di pressione mostra un andamento regolare, con delle depressioni in prossimità delle entrate di flusso di vapore, data la velocità più elevata, e delle sovrappressioni dove il flusso rallenta.

Il valore di pressione trovato all'outlet 1 è di:  $-0.6948 Pa$ .

Successivamente si è pensato di utilizzare una sorta di metodo di calcolo iterativo per cercare di determinare il valore di pressione all'outlet 1 in caso di simulazioni con il getto d'aria; questo metodo consiste nello svolgere delle simulazioni nel seguente modo:

- Nella prima simulazione; dopo aver eseguito un certo numero di iterazioni con una condizione di "pressure outlet", viene impostata una condizione all'outlet 1 di "mass flow outlet" settando il valore di portata massica in uscita dal ricevitore pari al valore della portata in ingresso di vapore acqueo. Raggiunta la convergenza si ricava il valore della pressione all'outlet 1;
- Nella seconda simulazione si imposta una condizione di "pressure outlet" con il valore di pressione trovato dalla simulazione precedente. Una volta raggiunta la convergenza anche di questa simulazione, viene valutata la differenza tra i due valori di portate massiche in uscita (outlet 1) delle due simulazioni eseguite: se la differenza tra i due valori è inferiore al 5% il calcolo iterativo si può considerare concluso.
- Se la differenza tra i due valori è superiore al 5% bisogna procedere con l'eseguire due nuove simulazioni:
  - o La prima delle due nuove simulazioni verrà eseguita, sempre dopo avere eseguito un certo numero di iterazioni con una condizione di "pressure outlet", impostando una condizione di "mass flow outlet" dove però questa volta verrà impostato il valore di portata massica trovato nella simulazione precedente.
  - o La seconda simulazione verrà eseguita impostando la condizione di "pressure outlet" con il valore di pressione trovato nella simulazione precedente. A questo punto si valuterà nuovamente la differenza tra i due valori di portata massica in uscita delle due simulazioni. Se la differenza è inferiore al 5% si considererà il calcolo concluso; Viceversa si ripeteranno due nuove simulazioni ripetendo gli ultimi due punti.

Come già detto, la condizione di “mass flow outlet” non può essere impostata all’inizio della simulazione in quanto porta il calcolo ad andare in divergenza. Bisogna quindi impostare una condizione di “pressure outlet” per un certo numero di iterazioni. Non vi è un numero definito di iterazioni oltre il quale impostare la condizione di “mass flow outlet” ma è stato valutato simulazione per simulazione. Nella quasi totalità delle simulazioni, la condizione di “mass flow outlet” è stata settata quando si valutata che il valore di pressione e di percentuale di vapore acqueo in uscita erano pressoché costati. In questo modo è stato possibile raggiungere la convergenza nelle simulazioni in modo più rapido.

Per cercare di comprendere al meglio il funzionamento del ricevitore si è deciso di analizzare una singola variante (1) di fuoriuscita del getto.

Sono state quindi simulate 2 angolazioni  $\varphi$  differenti del getto d’aria e per ognuna 4 velocità diverse:

- 35°
  - $50 \frac{m}{s}$
  - $40 \frac{m}{s}$
  - $30 \frac{m}{s}$
  - $20 \frac{m}{s}$
  
- 10°
  - $40 \frac{m}{s}$
  - $30 \frac{m}{s}$
  - $20 \frac{m}{s}$
  - $10 \frac{m}{s}$

Queste due differenti angolazioni non sono state prese in considerazione casualmente. Infatti impostando una condizione di “pressure outlet” con un valore di pressione pari a 0 Pascal all’outlet 1, si è notato che nel caso di angolazione del getto d’aria  $\varphi$  a 35° con velocità del getto sufficientemente elevate, la portata massica in uscita dal ricevitore è inferiore a quella ideale di vapore in entrata, mentre nel caso di angolazione  $\varphi$  a 10°, la portata massica in uscita, il più delle volte, risulta maggiore di quelle di vapore in entrata. Proprio queste disuguaglianze hanno portato ad analizzare queste due differenti angolazioni per studiare come rispondeva il ricevitore impostando la condizione di “mass flow outlet”.

Nella pagina seguente vengono riportati i valori delle quantità di interesse tabellati, estrapolati dalle simulazioni eseguite.

Nella prima colonna viene indicata la variante utilizzata, in questo caso la 1, e la condizione impostata all’outlet 1. Quando sono state utilizzate le condizioni di “pressure outlet, viene indicato anche il valore di pressione settato.

L’abbreviazione “po” seguita da “mass flow outlet” sta per “pressure outlet” ed indica che in quella simulazione si è passati dalla condizione di “pressure outlet” a quella di “mass flow outlet” all’outlet 1. Quando non viene indicato il valore dopo “mass flow outlet” significa che viene impostato il valore di portata massica in uscita pari alla portata massica di vapore in entrata,  $0.1278 \frac{kg}{s}$ .

Tutte le altre quantità indicate nelle tabelle sono illustrate nella “Nomenclatura”.

Variante e condizione all'outlet 1	Impostazioni getto d'aria			Area weighted average			Mass weighted average								
	$v$ [m/s]	$\varphi$ [°]	$b_0$ [mm]	$p_{out}$ [Pa]	$\dot{m}_{in,H_2O}$ [kg/s]	$\dot{m}_{in,air}$ [kg/s]	$\dot{m}_{out,tot}$ [kg/s]	% $_{out,H_2O}$ [-]	% $_{out,air}$ [-]	$\dot{m}_{out,H_2O}$ [kg/s]	$\dot{m}_{loss,H_2O}$ [kg/s]	% $_{m_{loss,H_2O}}$ [%]	$\dot{m}_{out,air}$ [kg/s]	% $_{m_{out-air}}$ [%]	Diff % [%]
1_pressout=0	50	35	5	0.0000	0.1278	0.1223	0.0739	0.9283	0.0717	0.0686	0.0592	46.2902	0.0053	7.1686	
1_pressout->massflow	50	35	5	-2.4296	0.1278	0.1223	0.1278	0.6289	0.3711	0.0804	0.0474	37.0880	0.0474	37.1068	
1_pressout_-2.429	50	35	5	-2.4296	0.1278	0.1223	0.1400	0.5924	0.4076	0.0829	0.0449	35.1023	0.0571	40.7611	9.5199
1_po->massflow_0.1400	50	35	5	-4.3483	0.1278	0.1223	0.1400	0.5984	0.4016	0.0838	0.0440	34.4364	0.0562	40.1570	
1_pressout_-4.348	50	35	5	-4.3574	0.1278	0.1223	0.1433	0.5744	0.4256	0.0823	0.0455	35.5940	0.0610	42.5594	2.3431
1_pressout=0	40	35	5	-0.0727	0.1278	0.0978	0.0370	0.9143	0.0857	0.0338	0.0940	73.5281	0.0032	8.5690	
1_pressout->massflow	40	35	5	-4.7952	0.1278	0.0978	0.1278	0.6723	0.3277	0.0859	0.0419	32.7751	0.0419	32.7709	
1_pressout_-4.795	40	35	5	-4.8060	0.1278	0.0978	0.1337	0.6705	0.3295	0.0897	0.0381	29.8453	0.0441	32.9547	4.6443
1_pressout=0	30	35	5	-0.0043	0.1278	0.0734	0.1455	0.7124	0.2876	0.1036	0.0242	18.9151	0.0418	28.7616	
1_pressout->massflow	30	35	5	1.2541	0.1278	0.0734	0.1278	0.7398	0.2602	0.0945	0.0333	26.0241	0.0333	26.0241	
1_pressout_+1.25	30	35	5	1.2503	0.1278	0.0734	0.1124	0.7947	0.2053	0.0893	0.0385	30.1027	0.0231	20.5320	12.0434
1_po->massflow_0.112	30	35	5	3.0398	0.1278	0.0734	0.1124	0.7892	0.2108	0.0887	0.0391	30.5923	0.0237	21.0803	
1_pressout_+3.039769	30	35	5	3.0398	0.1278	0.0734	0.1850	0.5591	0.4409	0.1034	0.0244	19.0707	0.0816	44.0897	64.5857
1_po->massflow_0.1850	30	35	5	-0.8765	0.1278	0.0734	0.1858	0.6086	0.3914	0.1131	0.0147	11.4989	0.0727	39.1352	
1_pressout_-0.8764	30	35	5	-0.8794	0.1278	0.0734	0.1737	0.6420	0.3580	0.1115	0.0163	12.7544	0.0622	35.7998	6.5403
1_po->massflow_0.1737	30	35	5	-0.7355	0.1278	0.0734	0.1737	0.6365	0.3635	0.1106	0.0172	13.4943	0.0631	36.3500	
1_pressout_-0.735	30	35	5	-0.7384	0.1278	0.0734	0.1660	0.6611	0.3389	0.1097	0.0181	14.1393	0.0563	33.8906	4.4380
1_pressout=0	20	35	5	0.0000	0.1278	0.0489	0.2378	0.4730	0.5270	0.1125	0.0153	11.9778	0.1253	52.6954	
1_pressout->massflow	20	35	5	4.3850	0.1278	0.0489	0.1278	0.5473	0.4527	0.0699	0.0579	45.2738	0.0579	45.2738	
1_pressout_+4.384	20	35	5	4.3850	0.1278	0.0489	0.1299	0.5475	0.4525	0.0711	0.0567	44.3458	0.0588	45.2522	1.6555

Tabella 5: Raccolta ed elaborazione dei dati estrapolati dalle simulazioni eseguite con il calcolo iterativo; angolo del getto d'aria a  $\varphi = 35^\circ$

Variante e condizione all'outlet 1	Impostazioni getto d'aria			Area weighted average			Mass weighted average								
	$v$ [m/s]	$\varphi$ [°]	$b_0$ [mm]	$p_{out}$ [Pa]	$\dot{m}_{in,H_2O}$ [kg/s]	$\dot{m}_{in,air}$ [kg/s]	$\dot{m}_{out,tot}$ [kg/s]	% $_{out,H_2O}$ [-]	% $_{out,air}$ [-]	$\dot{m}_{out,H_2O}$ [kg/s]	$\dot{m}_{loss,H_2O}$ [kg/s]	% $_{m_{loss,H_2O}}$ [%]	$\dot{m}_{out,air}$ [kg/s]	% $_{m_{out-air}}$ [%]	Diff % [%]
1_pressout=0	40	10	5	0.0703	0.1278	0.1176	0.1864	0.5933	0.4067	0.1106	0.0172	13.4446	0.0758	40.6664	
1_pressout->massflow	40	10	5	6.1578	0.1278	0.1176	0.1284	0.6716	0.3284	0.0862	0.0416	32.5298	0.0422	32.8435	
1_pressout_+6.16	40	10	5	6.0901	0.1278	0.1176	0.0081	0.9753	0.0247	0.0079	0.1199	93.8216	0.0002	2.4676	93.69
1_pressout=0	30	10	5	-0.0124	0.1278	0.0882	0.1768	0.6276	0.3724	0.1109	0.0169	13.1862	0.0658	37.2421	
1_pressout->massflow	30	10	5	2.6663	0.1278	0.0882	0.1279	0.7283	0.2717	0.0931	0.0347	27.1288	0.0348	27.1744	
1_pressout_+2.66	30	10	5	2.6518	0.1278	0.0882	0.1076	0.7890	0.2110	0.0849	0.0429	33.5581	0.0227	21.0975	15.85
1_p->massflow_0.1076	30	10	5	2.9980	0.1278	0.0882	0.1076	0.7787	0.2213	0.0838	0.0440	34.4146	0.0238	22.1259	
1_pressout_+2.998	30	10	5	2.9857	0.1278	0.0882	0.0991	0.8113	0.1887	0.0804	0.0474	37.1150	0.0187	18.8737	7.96
1_p->massflow_0.099	30	10	5	3.0015	0.1278	0.0882	0.0991	0.8025	0.1975	0.0795	0.0483	37.7805	0.0196	19.7493	
1_pressout_3.001	30	10	5	2.9736	0.1278	0.0882	0.0743	0.8541	0.1459	0.0635	0.0643	50.3508	0.0108	14.5944	25.02
1_p->massflow_0.074	30	10	5	2.9679	0.1278	0.0882	0.0743	0.8403	0.1597	0.0624	0.0654	51.1524	0.0119	15.9735	
1_pressout_+2.968	30	10	5	2.9562	0.1278	0.0882	0.0988	0.8113	0.1887	0.0801	0.0477	37.3051	0.0186	18.8653	32.92
1_p->massflow_0.0987	30	10	5	2.9020	0.1278	0.0882	0.0988	0.8027	0.1973	0.0793	0.0485	37.9721	0.0195	19.7314	
1_pressout_+2.90	30	10	5	2.8940	0.1278	0.0882	0.1028	0.7969	0.2031	0.0819	0.0459	35.8805	0.0209	20.3051	4.12
1_pressout=0	20	10	5	0.0000	0.1278	0.5880	0.2303	0.5509	0.4491	0.1269	0.0009	0.7184	0.1034	44.9134	
1_pressout->massflow	20	10	5	4.4187	0.1278	0.5880	0.1278	0.7477	0.2523	0.0956	0.0322	25.2099	0.0322	25.2268	
1_pressout_+4.418	20	10	5	4.4161	0.1278	0.5880	0.1296	0.7458	0.2542	0.0967	0.0311	24.3669	0.0330	25.4237	1.39
1_p->massflow_0.1296	20	10	5	4.7754	0.1278	0.5880	0.1296	0.7424	0.2576	0.0962	0.0316	24.7120	0.0334	25.7645	
1_pressout_4.775	20	10	5	4.7754	0.1278	0.5880	0.1309	0.5099	0.4901	0.0668	0.0610	47.7598	0.0642	49.0136	1.03
1_pressout=0	10	10	5	0.0000	0.1278	0.0294	0.2074	0.5395	0.4605	0.1119	0.0159	12.4397	0.0955	46.0509	
1_pressout->massflow	10	10	5	5.2980	0.1278	0.0294	0.1278	0.6463	0.3537	0.0826	0.0452	35.3682	0.0452	35.3663	
1_pressout_+5.298	10	10	5	5.2980	0.1278	0.0294	0.1389	0.6193	0.3807	0.0860	0.0418	32.6873	0.0529	38.0676	8.69
1_p->massflow_0.1389	10	10	5	5.2361	0.1278	0.0294	0.1389	1.6193	-0.6193	0.2249	-0.0971	-75.9891	-0.0860	-61.9324	
1_pressout_+5.236	10	10	5	5.2361	0.1278	0.0294	0.1386	0.6408	0.3592	0.0888	0.0390	30.4858	0.0498	35.9228	0.18

Tabella 6: Raccolta ed elaborazione dei dati estrapolati dalle simulazioni eseguite con il calcolo iterativo; angolo del getto d'aria a  $\varphi = 10^\circ$

Come si può notare dalle tabelle, a parte il caso con velocità del getto pari a  $40 \frac{m}{s}$  e angolazione di  $10^\circ$  che non può essere considerato in quanto non è stato concluso il calcolo vista la grande differenza di valore tra le pressioni della prima e seconda simulazione, negli altri casi non si è mai ottenuto un valore di pressione  $p_{out}$  univoco. Difficile anche poter confrontare il valore di pressione trovato nella simulazione del solo interno del ricevitore con i valori trovati nel calcolo iterativo.

In base alla situazione rappresentata si è trovato un valore di pressione differente della altre.

Per chiarire il perché dei valori di pressione trovati sono di seguito riportati nella sequenza svolta nel calcolo, i contour per i casi con velocità del getto pari a  $30 \frac{m}{s}$  e angolazione pari a  $10^\circ$ , e per velocità del getto pari a  $50 \frac{m}{s}$  e angolazione pari a  $35^\circ$ .

In questo modo è possibile vedere in maniera accurata come si evolvono le situazioni iterazione per iterazione.

- Velocità  $v = 10 \frac{m}{s}$  e angolo  $\varphi = 10^\circ$

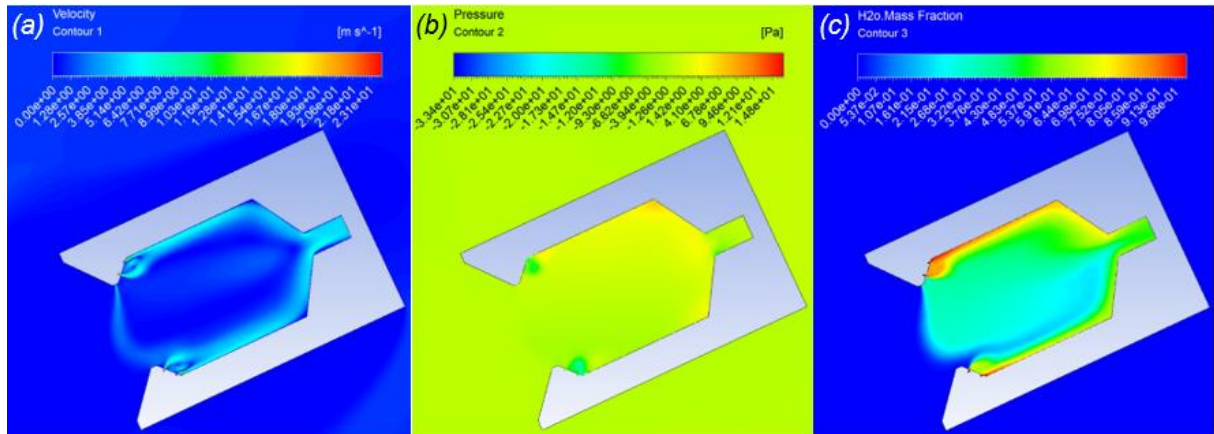


Figura 49: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H<sub>2</sub>O" (c), con condizione di "pressure outlet" pari a 0 Pa

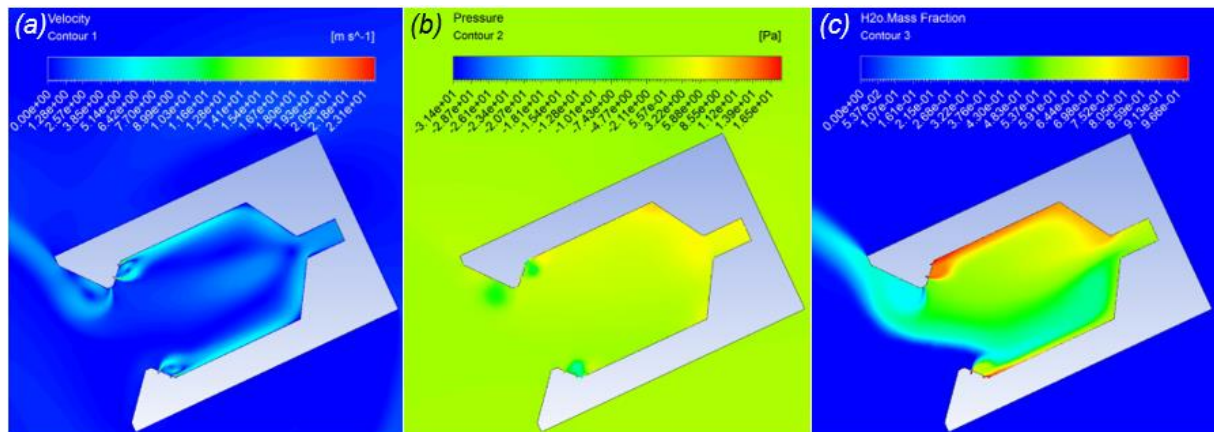


Figura 50: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H<sub>2</sub>O" (c) con condizione di "mass flow outlet" pari a  $0.1278 \frac{kg}{s}$

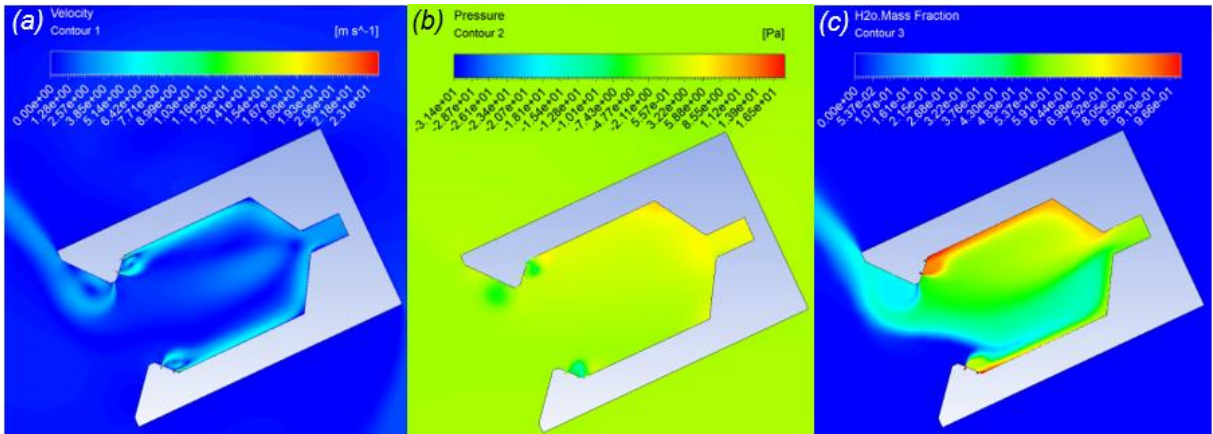


Figura 51: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H<sub>2</sub>O" (c) con condizione di "pressure outlet" pari a 5.298 Pa

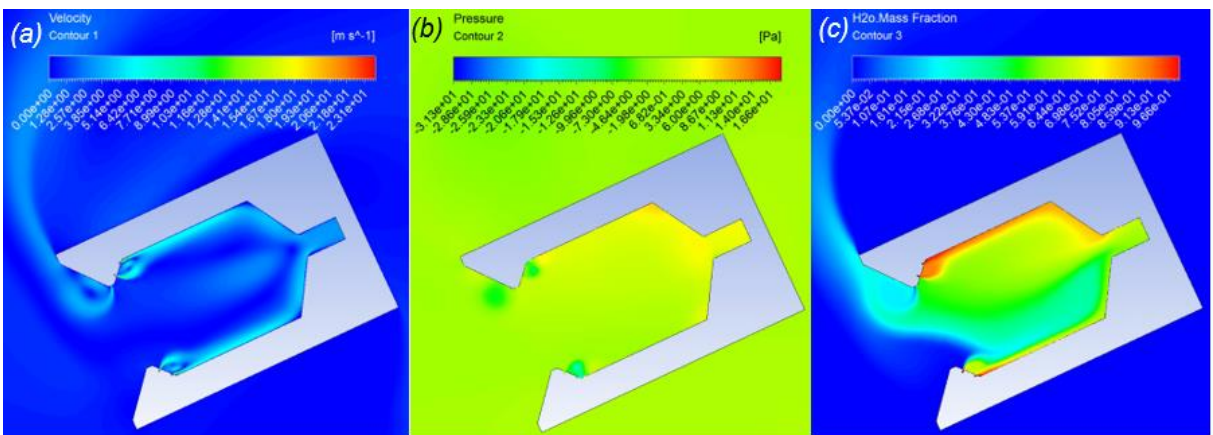


Figura 52: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H<sub>2</sub>O" (c) con condizione di "mass flow outlet" pari a  $0.1389 \frac{kg}{s}$

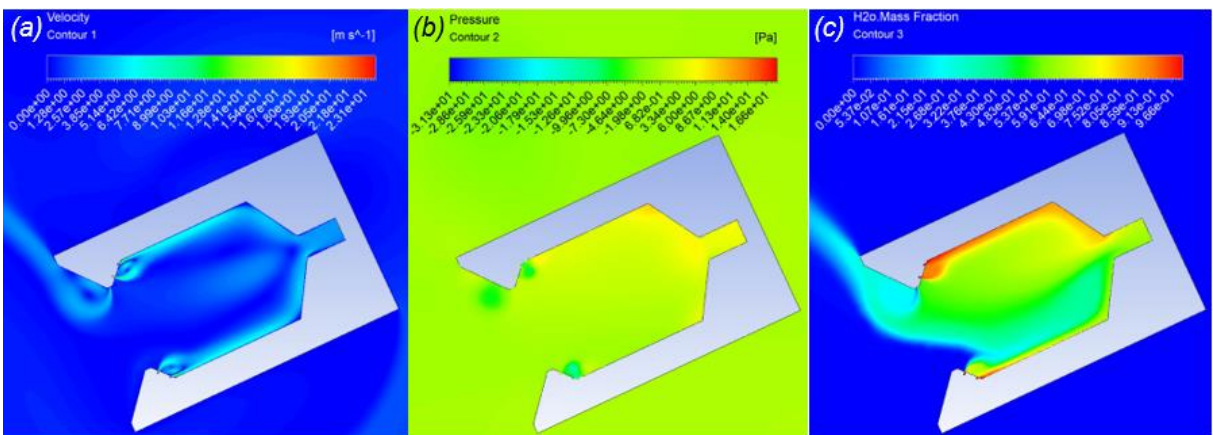


Figura 53: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H<sub>2</sub>O" (c) con condizione di "pressure outlet" pari a 5.236 Pa

STUDENTSUPSI

- Velocità  $v = 50 \frac{m}{s}$  e angolo  $\varphi = 35^\circ$

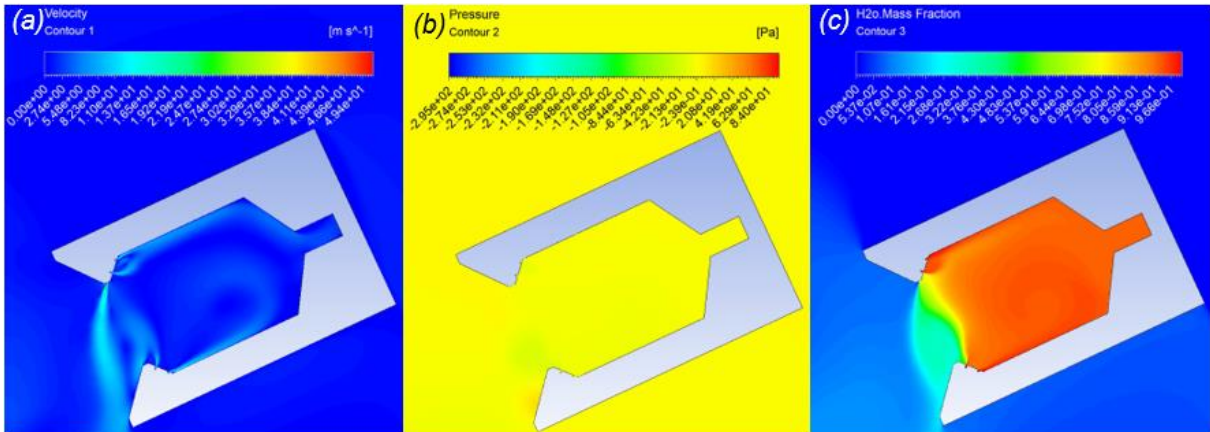


Figura 54: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie “mass frac. of H<sub>2</sub>O” (c) con condizione di “pressure outlet” pari a 0 Pa

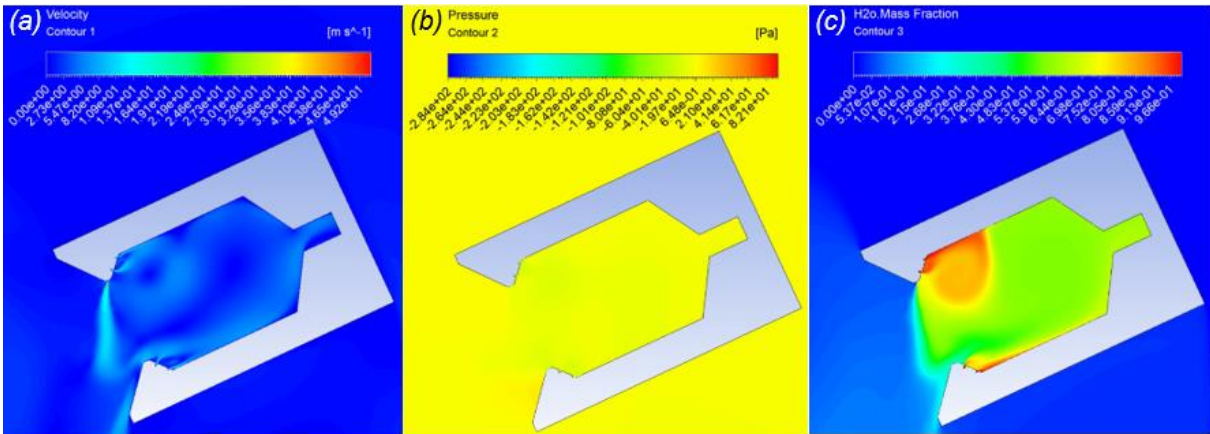


Figura 55: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie “mass frac. of H<sub>2</sub>O” con condizione di “mass flow outlet” pari a  $0.1278 \frac{kg}{s}$

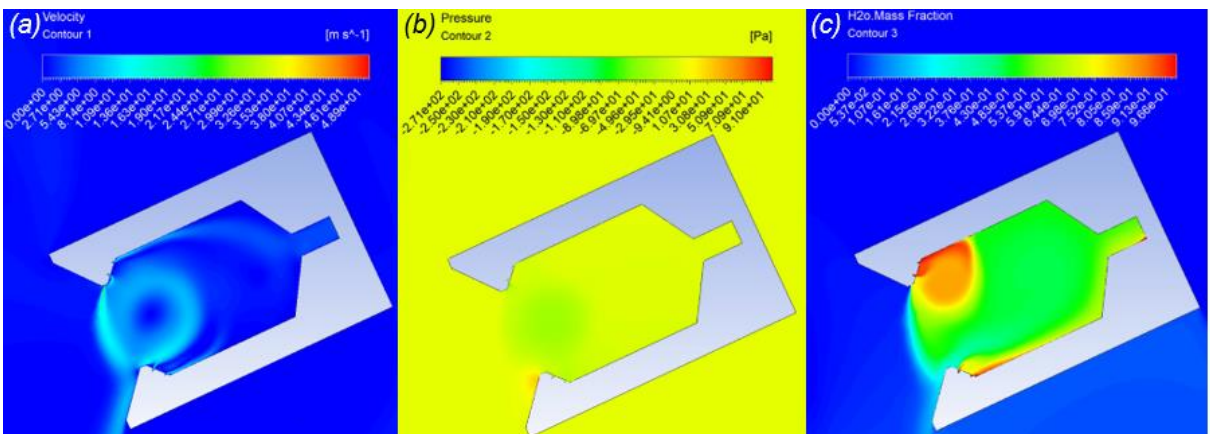


Figura 56: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie “mass frac. of H<sub>2</sub>O” (c) con condizione di “pressure outlet” pari a -2.429 Pa



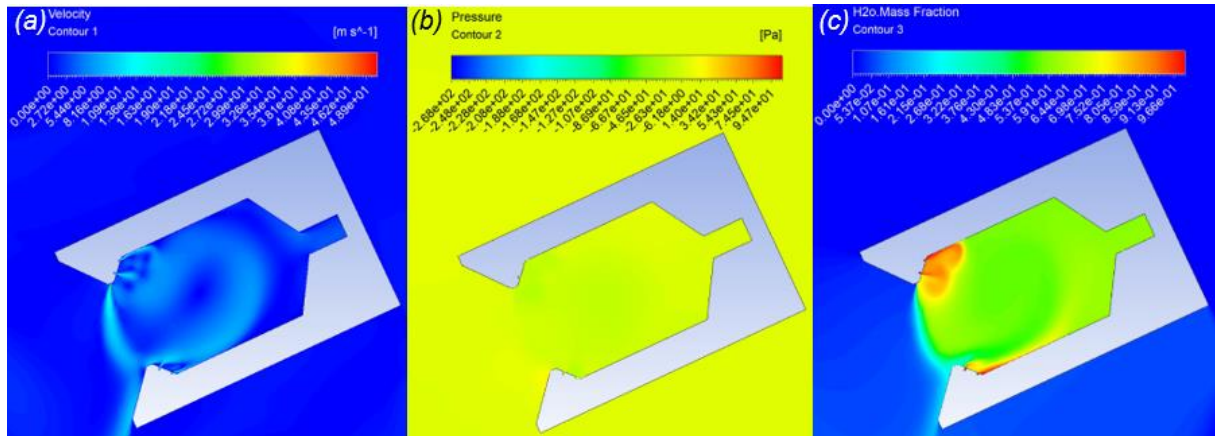


Figura 57: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H<sub>2</sub>O" (c) con condizione di "mass flow outlet" pari a  $0.1400 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$

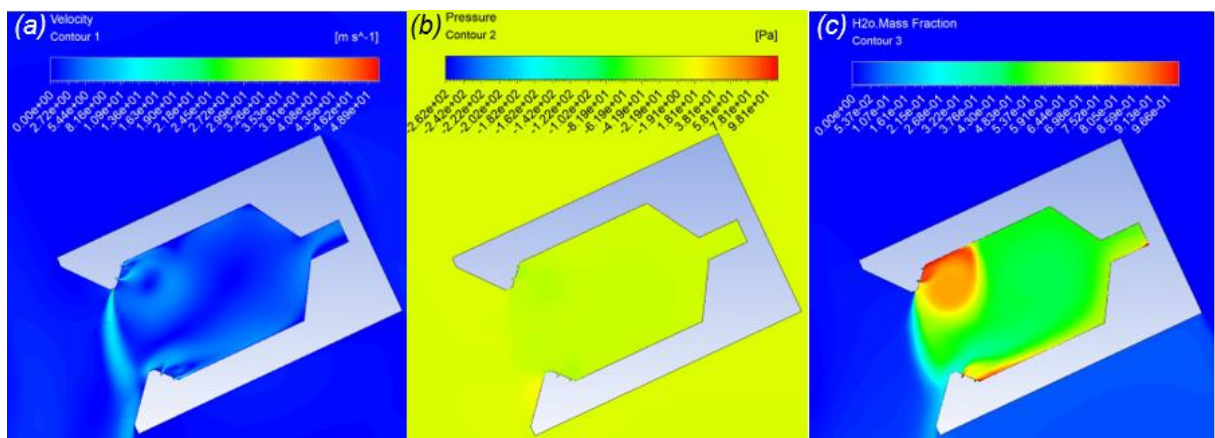


Figura 58: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H<sub>2</sub>O" (c) con condizione di "pressure outlet" pari a  $-4.348 \text{ Pa}$

Dopo numerose simulazioni quello che si evidenzia, come già detto in precedenza, è che non si riesce a trovare un valore di pressione univoco.

Infatti il software agisce nel seguente modo: impostando una determinata situazione, il flusso d'aria può essere, in parte o interamente, attirato all'interno del ricevitore oppure può fluire al di fuori del ricevitore senza entrarci. In base a quale situazione viene simulata, i getti di vapore vengono più o meno influenzati dal getto d'aria. In alcune simulazioni il vapore resta quasi interamente all'interno del ricevitore mentre in altre, attirato dal getto d'aria, parte del vapore viene disperso al di fuori del ricevitore. Vi sono per cui 2 casi principali:

- nel primo caso, quando il getto d'aria fluisce fuori dal ricevitore e attira verso di sé anche una certa quantità di vapore, la portata massica registrata all'uscita (outlet 1), impostando una condizione di "pressure outlet" nulla (pressione =  $0 \text{ Pa}$ ), risulta inferiore alla portata di vapore in ingresso. In questo caso quando si andrà ad imporre la condizione di "mass-flow-outlet" pari al valore ideale di portata di vapore in entrata, la pressione che verrà rilevata una volta raggiunta la convergenza sarà negativa in quanto è necessario creare una depressione in grado di aspirare una maggiore quantità di portata massica per raggiungere il valore impostato;
- nel secondo caso, quando il getto d'aria entra interamente o in parte nel ricevitore senza che venga disperso vapore nell'ambiente esterno, impostando la condizione di "pressure outlet" nulla (pressione =  $0 \text{ Pa}$ ), il valore della portata massica sull'outlet 1 risulterà maggiore del valore di portata di vapore in entrata. Quando viene impostata la condizione di "mass-flow-outlet" pari al valore ideale di vapore in entrata nel ricevitore, la pressione all'uscita risulterà positiva in quanto è necessario creare una sovrappressione che respinga una certa quantità di portata al fine di raggiungere il valore impostato.

Alla fine si è giunti alla conclusione che per replicare più fedelmente la situazione reale, verrà impostata la condizione di “mass flow outlet” con il valore di portata massica in uscita pari a quello in entrata di vapore. Questa condizione infatti, oltre a definire la stessa quantità di portata in uscita dal ricevitore uguale per tutte le simulazioni, mantiene una velocità del flusso nel condotto di uscita maggiore rispetto al caso con “pressure outlet pari a 0 Pa e replica più fedelmente la situazione reale dove il flusso viene aiutato a fluire verso l’uscita da dalle soffianti.

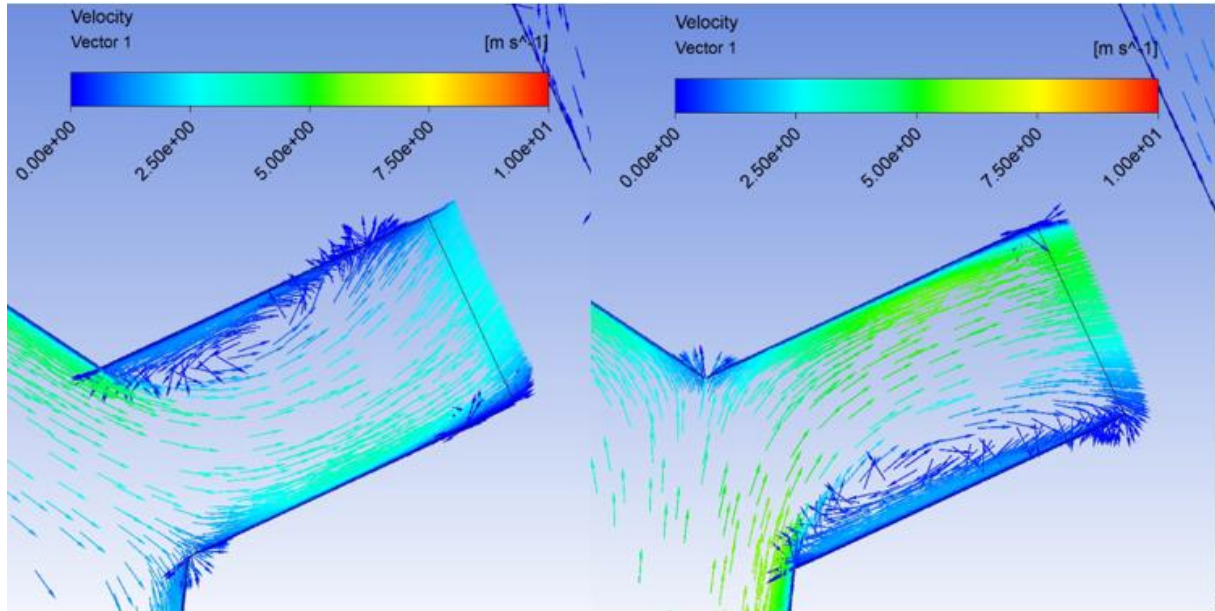


Figura 59: Confronto tra condizione “pressure outlet” pari a 0 Pa (sinistra) e condizione di “mass flow outlet” con valore di portata in uscita pari al valore di portata massica di vapore in entrata (destra) per la simulazione con  $v = 50 \frac{m}{s}$  e  $\varphi = 35^\circ$ ; in entrambi i casi le velocità sono state scale da 0 a  $10 \frac{m}{s}$  per evidenziare meglio le differenze di velocità

Come evidenzia anche l’immagine, la velocità del flusso con la condizione di “mass flow outlet” è di circa  $5 \frac{m}{s}$ , mentre con la condizione di “pressure outlet” vengono raggiunti solamente circa  $2,5 \frac{m}{s}$ .

In alcune simulazioni è già stato notato un particolare vortice di depressione che si forma in prossimità dell’apertura del ricevitore; questo verrà analizzato meglio nel capitolo “Studio della soluzione più efficace”, in particolare nella variante 1.

## 9 Studio della soluzione più efficace

In questo capitolo vengono mostrate le analisi svolte sulle simulazioni eseguite per le varianti 1, 2 e 3: vengono spiegati e illustrati i passaggi fondamentali che hanno portato ad analizzare le diverse configurazioni di getto d'aria.

### 9.1 Variante 1

Dopo aver stabilito in che modo definire la condizione all'outlet 1, si è deciso di cercare di trovare la soluzione che isoli al meglio il ricevitore in assenza di vento.

Ancora una volta, data la complessità delle simulazioni, si è deciso di valutare solamente l'aspetto fluidodinamico del ricevitore e di trascurare i fenomeni termodinamici, in particolare lo scambio di calore tra pareti interne del ricevitore e fluido termovettore. Questo per semplificare il calcolo e capire a chi attribuire le differenze tra le varie simulazioni.

Sono state eseguite diverse simulazioni, variando velocità e angolazione del getto d'aria, partendo dalla variante 1, ovvero quella in cui il getto fuoriesce da una fessura posta dove precedentemente vi era la finestra di quarzo, dall'alto verso il basso.

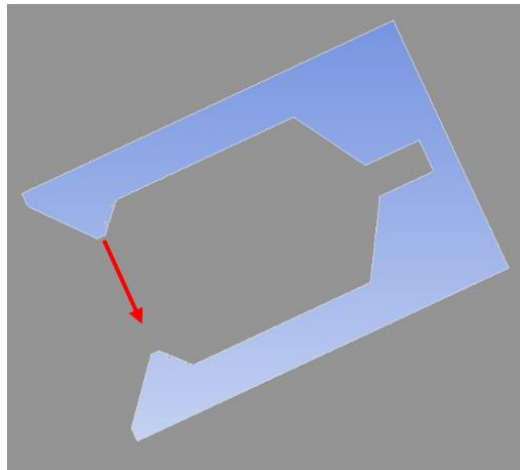


Figura 60: Rappresentazione della variante 1, la freccia in rosso indica la posizione da cui fuoriesce il getto d'aria

Si è partiti da una velocità appena superiore a quella trovata con il calcolo del  $D_m$ , ovvero  $10 \frac{m}{s}$ , fino a  $50 \frac{m}{s}$ , ad intervalli di  $10 \frac{m}{s}$ , per angolazioni  $\varphi$  da  $10^\circ$  a  $40^\circ$  ad intervalli di  $5^\circ$ .

Come già detto nel capitolo precedente, tutte le simulazioni sono state effettuate impostando una condizione all'outlet 1 di "pressure outlet" e dopo un certo numero di iterazioni, variabili da caso a caso, viene settata la condizione di "mass flow outlet" con il valore di portata massica in uscita pari al valore di portata massica di vapore in entrata.

Per ogni caso è stata valutata l'efficienza, ovvero la percentuale di vapore acqueo presente nel flusso all'uscita (outlet 1) del ricevitore.

Infatti trascurando l'aspetto termodinamico e quindi anche quanto riesca ad isolare termicamente il ricevitore, è stato valutato quanto vapore acqueo il sistema a lama d'aria riuscisse a conservare all'interno della cavità.

Di seguito vengono riportati i risultati tabellati. Le quantità indicate nelle tabelle sono illustrate nella Nomenclatura.

Variante	Impostazioni getto d'aria			Area weighted average					Mass weighted average						
	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi$ [°]	$b_0$ [mm]	$p_{out}$ [Pa]	$\dot{m}_{in,H_2O}$ [ $\frac{kg}{s}$ ]	$\dot{m}_{in,air}$ [ $\frac{kg}{s}$ ]	$\dot{m}_{out,H_2O}$ [ $\frac{kg}{s}$ ]	$\%_{out,H_2O}$ [-]	$\%_{out,air}$ [-]	$\dot{m}_{out,H_2O}$ [ $\frac{kg}{s}$ ]	$\dot{m}_{loss,H_2O}$ [ $\frac{kg}{s}$ ]	$\%_{m_{loss,H_2O}}$ [%]	$\dot{m}_{out,air}$ [ $\frac{kg}{s}$ ]	$\%_{m_{out-air}}$ [%]	$\epsilon$ [%]
1	50	40	5	-2.8807	0.1278	0.1143	0.1278	0.7838	0.2162	0.1002	0.0276	21.5961	0.0276	21.6163	78.40
1	40	40	5	4.3233	0.1278	0.0915	0.1278	0.4883	0.5117	0.0624	0.0654	51.1675	0.0654	51.1712	48.83
1	30	40	5	1.4079	0.1278	0.0686	0.1278	0.7427	0.2573	0.0949	0.0329	25.7192	0.0329	25.7319	74.28
1	20	40	5	4.5881	0.1278	0.0457	0.1280	0.6803	0.3197	0.0871	0.0407	31.8643	0.0409	31.9680	68.14
1	10	40	5	5.5438	0.1278	0.0229	0.1278	0.5678	0.4322	0.0726	0.0552	43.2203	0.0552	43.2186	56.78
1	50	35	5	-2.4296	0.1278	0.1223	0.1278	0.6289	0.3711	0.0804	0.0474	37.0880	0.0474	37.1068	62.91
1	40	35	5	-4.7952	0.1278	0.0978	0.1278	0.6723	0.3277	0.0859	0.0419	32.7751	0.0419	32.7709	67.22
1	30	35	5	1.2541	0.1278	0.0734	0.1278	0.7398	0.2602	0.0945	0.0333	26.0241	0.0333	26.0241	73.98
1	20	35	5	4.3850	0.1278	0.0489	0.1278	0.5473	0.4527	0.0699	0.0579	45.2738	0.0579	45.2738	54.73
1	10	35	5	5.1641	0.1278	0.0288	0.1278	0.6315	0.3685	0.0807	0.0471	36.8522	0.0471	36.8482	63.15
1	50	30	5	-2.3059	0.1278	0.1293	0.1282	0.6187	0.3813	0.0793	0.0485	37.9383	0.0489	38.1300	62.06
1	40	30	5	-1.1113	0.1278	0.1034	0.1280	0.6777	0.3223	0.0867	0.0411	32.1468	0.0412	32.2328	67.85
1	30	30	5	1.1755	0.1278	0.0776	0.1278	0.7475	0.2525	0.0955	0.0323	25.2426	0.0323	25.2493	74.76
1	20	30	5	5.5689	0.1278	0.0517	0.1278	0.5164	0.4836	0.0660	0.0618	48.3592	0.0618	48.3578	51.64
1	10	30	5	5.1496	0.1278	0.0259	0.1278	0.6268	0.3732	0.0801	0.0477	37.3274	0.0477	37.3235	62.67
1	50	25	5	-4.7594	0.1278	0.1353	0.1283	0.6296	0.3704	0.0808	0.0470	36.8092	0.0475	37.0359	63.19
1	40	25	5	-2.1604	0.1278	0.1082	0.1281	0.6639	0.3361	0.0850	0.0428	33.4755	0.0430	33.6146	66.52
1	30	25	5	0.9098	0.1278	0.0812	0.1278	0.7360	0.2640	0.0941	0.0337	26.4029	0.0337	26.4037	73.60
1	20	25	5	3.8905	0.1278	0.0541	0.1278	0.8026	0.1974	0.1026	0.0252	19.7419	0.0252	19.7437	80.26
1	10	25	5	5.8154	0.1278	0.0271	0.1278	0.6014	0.3986	0.0769	0.0509	39.8639	0.0509	39.8601	60.14
1	50	20	5	3.3372	0.1278	0.1403	0.1283	0.6184	0.3816	0.0793	0.0485	37.9158	0.0490	38.1607	62.08
1	40	20	5	5.7140	0.1278	0.1122	0.1280	0.6761	0.3239	0.0865	0.0413	32.2997	0.0414	32.3855	67.70
1	30	20	5	1.5827	0.1278	0.0842	0.1278	0.7346	0.2654	0.0939	0.0339	26.5370	0.0339	26.5362	73.46
1	20	20	5	3.5207	0.1278	0.0561	0.1278	0.7913	0.2087	0.1012	0.0266	20.8468	0.0267	20.8665	79.15
1	10	20	5	5.2120	0.1278	0.0281	0.1278	0.6203	0.3797	0.0793	0.0485	37.9764	0.0485	37.9725	62.02
1	50	15	5	6.5077	0.1278	0.1442	0.1285	0.6119	0.3881	0.0786	0.0492	38.4734	0.0499	38.8107	61.53
1	40	15	5	5.7140	0.1278	0.1153	0.1285	0.6761	0.3239	0.0869	0.0409	32.0127	0.0416	32.3855	67.99
1	30	15	5	1.6921	0.1278	0.0865	0.1278	0.7313	0.2687	0.0935	0.0343	26.8520	0.0344	26.8728	73.15
1	20	15	5	4.3155	0.1278	0.0577	0.1278	0.7885	0.2115	0.1008	0.0270	21.1403	0.0270	21.1522	78.86
1	10	15	5	5.8254	0.1278	0.0288	0.1278	0.6294	0.3706	0.0804	0.0474	37.0634	0.0474	37.0613	62.94
1	50	10	5	5.6067	0.1278	0.0183	0.1287	0.5859	0.4141	0.0754	0.0524	40.9897	0.0533	41.4091	59.01
1	40	10	5	6.1578	0.1278	0.1176	0.1284	0.6716	0.3284	0.0862	0.0416	32.5298	0.0422	32.8435	67.47
1	30	10	5	2.6663	0.1278	0.0882	0.1279	0.7283	0.2717	0.0931	0.0347	27.1288	0.0348	27.1744	72.87
1	20	10	5	4.4187	0.1278	0.0580	0.1278	0.7477	0.2523	0.0956	0.0322	25.2099	0.0322	25.2268	74.79
1	10	10	5	5.2980	0.1278	0.0294	0.1278	0.6463	0.3537	0.0826	0.0452	35.3682	0.0452	35.3663	64.63

Tabella 7: Raccolta ed elaborazione dei dati estrapolati dalle simulazioni eseguite per la variante 1

Le simulazioni evidenziate in verde sono quelle che hanno offerto un'efficienza maggiore. Vengono ora riportati in un grafico i valori di efficienza di tutte le simulazioni.

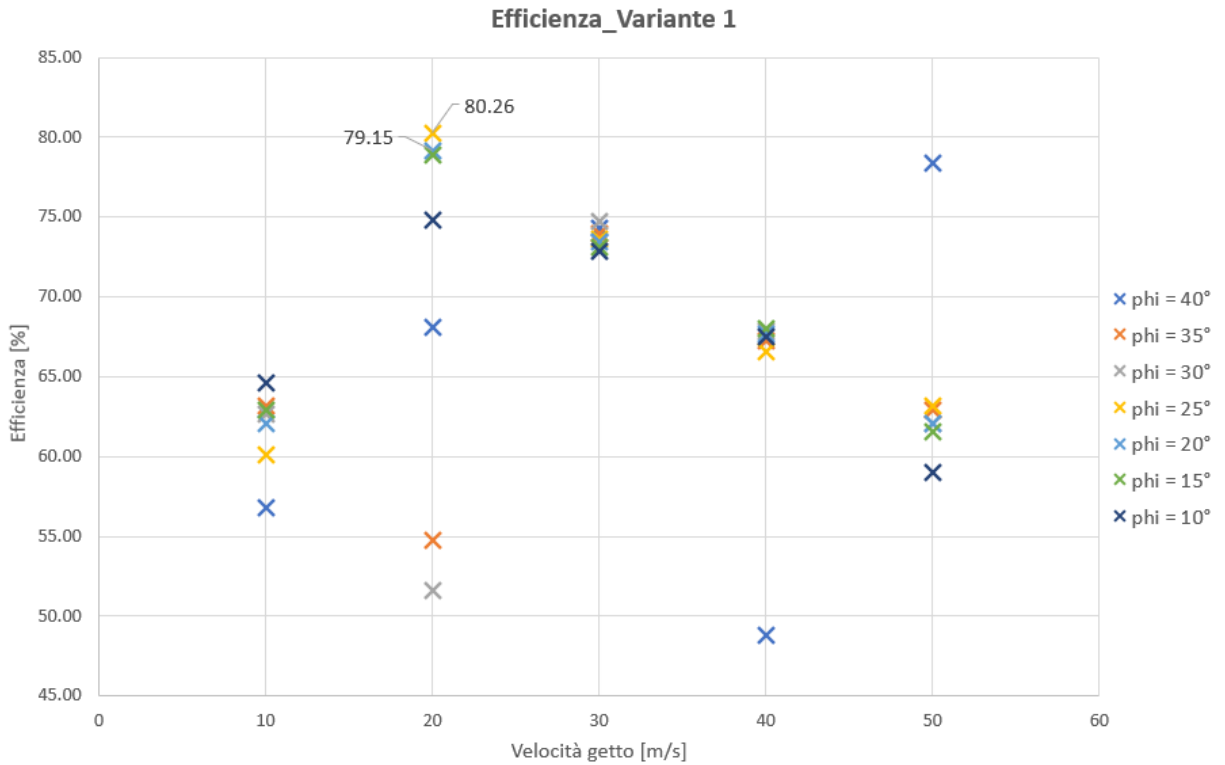


Grafico 10: Valori di efficienza della variante 1 in funzione della velocità del getto e dell'angolo di inclinazione

Come è più evidente vedere dal grafico, a parte qualche caso sporadico, le simulazioni alle varie velocità hanno un'efficienza simile.

L'efficienza maggiore ( $\epsilon = 80,26\%$ ) la si è ottenuta con il getto d'aria ad una velocità  $v$  di  $20 \frac{m}{s}$  e per un'angolazione  $\varphi$  di  $25^\circ$ .

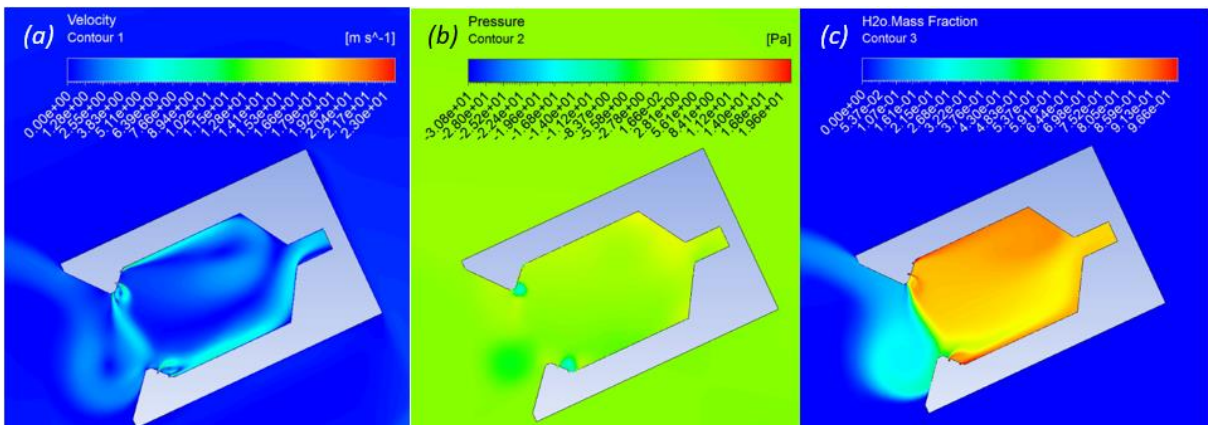


Figura 61: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H<sub>2</sub>O" (c) con velocità del getto pari a  $20 \frac{m}{s}$  e angolo di inclinazione di  $25^\circ$

Dai contour si può apprezzare come il getto d'aria riesca a creare una sorta di muro che isola la cavità. Va però sottolineato che una quantità di aria proveniente dal getto entra nel ricevitore e fluisce verso l'uscita.

I due getti di vapore nella parte bassa del ricevitore, si mischiano con una determinata quantità d'aria e riescono a fluire verso l'uscita.

Il getto di vapore più in alto invece, arrivato in prossimità dell'uscita del ricevitore, non riesce a convogliarsi verso l'outlet in quanto viene deviato dalla grande portata di flusso proveniente dal basso, e così torna verso l'apertura del ricevitore.

Un aspetto benefico non però desiderato, è il fatto che il secondo getto di vapore in alto (quello più vicino al getto d'aria) viene attirato da quest'ultimo e, in parte fluisce fuori dal ricevitore, e in parte va a convogliarsi insieme ai getti di vapore sottostanti. È anche per questo motivo che l'efficienza della simulazione risulta piuttosto elevata.

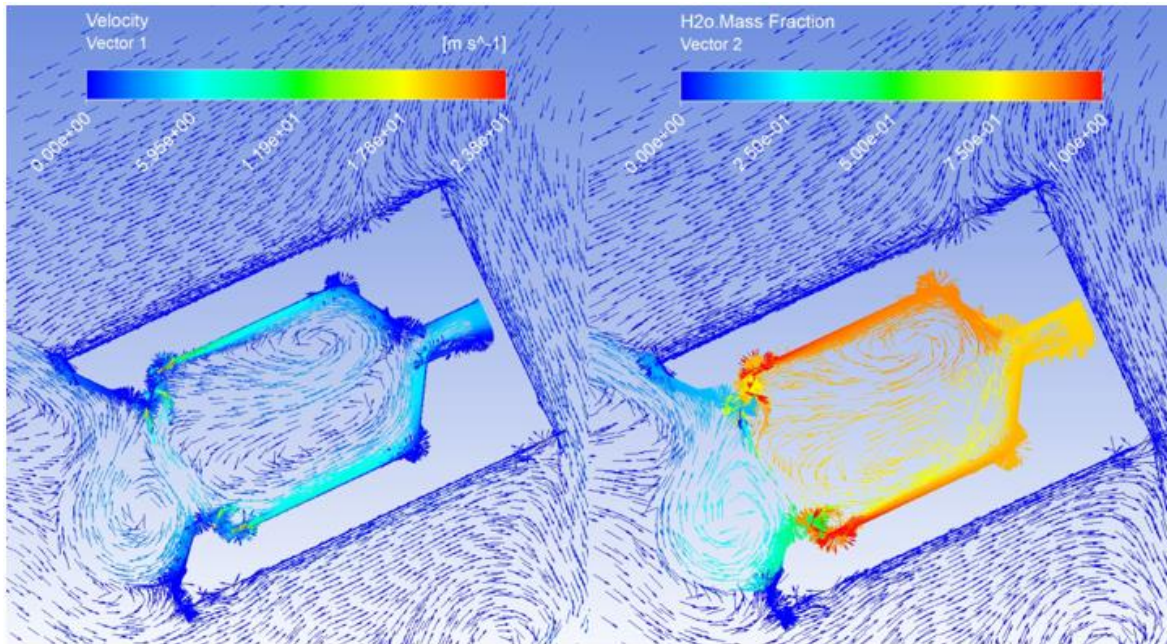


Figura 62: Rappresentazione dei vettori velocità: a sinistra colorati per intensità di velocità, a destra colorati per specie (mass frac of H<sub>2</sub>O)

Usando la rappresentazione dei vettori velocità si riesce a chiarire il comportamento del ricevitore. Particolare è il vortice che si viene a creare in prossimità dell'entrata del ricevitore.

Cambiando la scala di colori del contour di pressione, si riesce ad osservare meglio le caratteristiche di quest'ultimo.

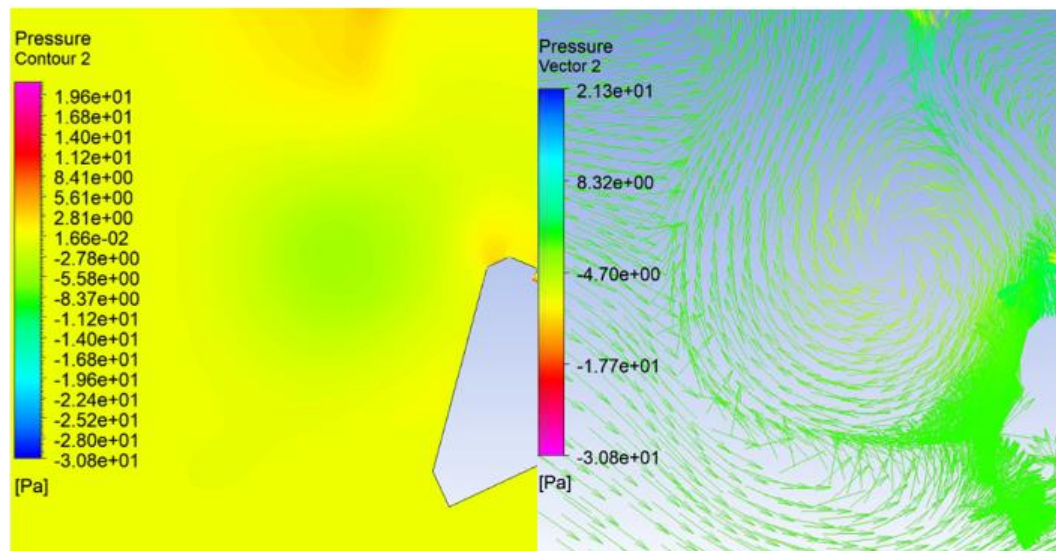


Figura 63: A sinistra il contour di pressione per la simulazione con velocità del getto pari a  $20 \frac{m}{s}$  e angolo di inclinazione di 25°; variazione nella scala di colori. Si può vedere il vortice di depressione all'ingresso del ricevitore; A destra il vortice rappresentato dai vettori colorati per pressione

All'interno del vortice la velocità della miscela risulta nulla, ma nonostante questo la pressione all'interno del vortice diminuisce (tra  $-4 Pa$  e  $-6 Pa$ ). Sarebbe stato normale aspettarsi un aumento della pressione all'interno del vortice. Si fatica a trovare una spiegazione al fenomeno e soprattutto a chi attribuire questo comportamento.

Sono state stilate alcune conclusioni plausibili:

- Il vortice ha ragione di esistere e risulta essere fisicamente corretto, con la velocità che diminuisce più ci si avvicina al centro;
- La depressione interna potrebbe essere attribuita a qualche fenomeno termodinamico sconosciuto, infatti il vortice è composto di una miscela di aria e vapore acqueo che si mescolano a temperature differenti;
- Potrebbe essere un fenomeno transitorio, ma attraverso una simulazione stazionaria (come in questo caso) non si può vedere la sua evoluzione.

Il vortice all'ingresso del ricevitore è stato notato anche in altre situazioni e sempre con il valore della pressione che decresce man mano ci si avvicina al centro.

Un'altra interessante configurazione che ha ottenuto un'efficienza elevata è quella con velocità  $v$  del getto di  $50 \frac{m}{s}$  e per un'angolazione  $\varphi$  di  $40^\circ$ .

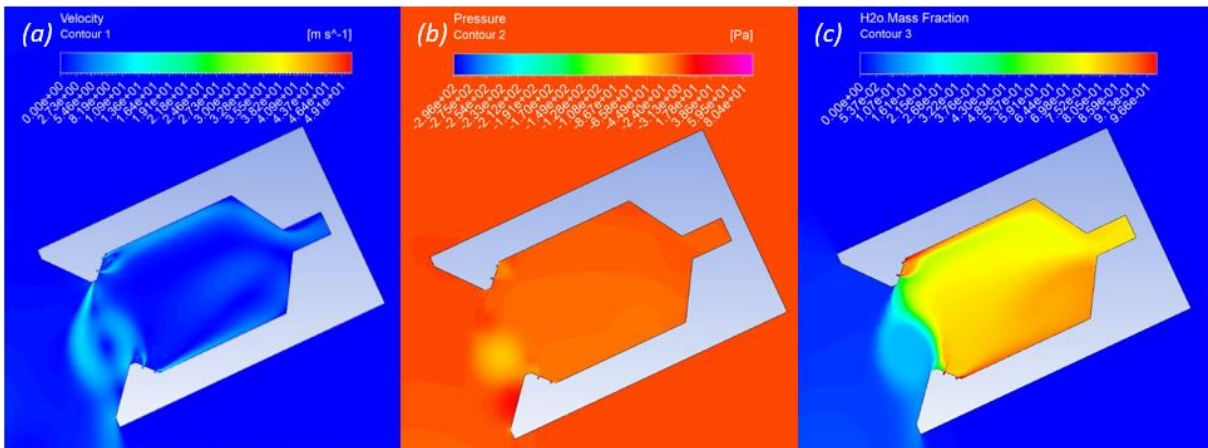


Figura 64: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H2O" (c) con velocità del getto pari a  $50 \frac{m}{s}$  e angolo di inclinazione di  $40^\circ$

La rappresentazione dei contour mostra che in questo caso i due getti di vapore superiori fluiscono verso l'uscita del ricevitore. Ad essere deviato in questo caso è il getto di vapore inferiore più vicino all'apertura. Quest'ultimo viene attirato dal getto d'aria che crea uno strano vortice. Infatti rispetto alla situazione visionata precedentemente, il vortice ruota verso l'interno del ricevitore.

Viene confermato anche in questa situazione, come si può vedere dal contour di pressione, che il valore della pressione più ci si avvicina verso il centro, decresce.

Nonostante non sia la configurazione che ha ottenuto l'efficienza maggiore ( $\epsilon = 78,40\%$ ), dal contour di specie si nota che all'interno del ricevitore vi è una buona percentuale di vapore acqueo.

## 9.2 Variante 2

Dopo aver completato il quadro generale per la variante 1, si è deciso di provare a far fuoriuscire il getto da una posizione speculare alla variante 1, così da provare ad evitare la formazione del vortice in ingresso al ricevitore. In questa variante infatti, il getto d'aria fuoriesce dal basso verso l'alto e si presume che questa condizione possa contribuire ad eliminare il vortice.

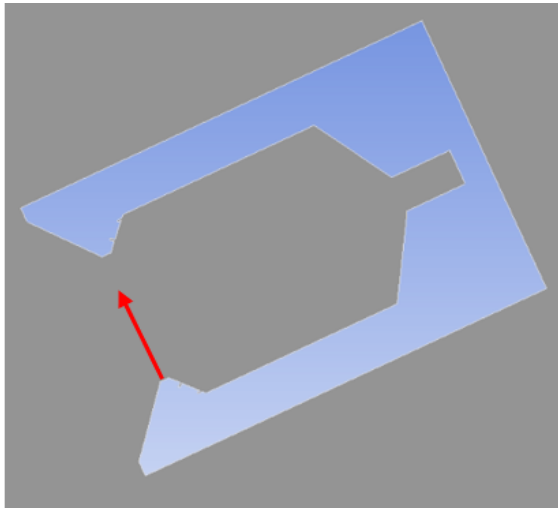


Figura 65: Rappresentazione della variante 2, la freccia in rosso indica la posizione da cui fuoriesce il getto d'aria

Anche per la variante 2 si è partiti da una velocità del getto  $v$  di  $10 \frac{m}{s}$  fino a  $50 \frac{m}{s}$ , ad intervalli di  $10 \frac{m}{s}$ , per angolazioni  $\varphi$  da  $10^\circ$  a  $40^\circ$  ad intervalli di  $5^\circ$ .

Successivamente si è però notato che, rispetto alla variante 1, l'efficienza del sistema all'aumentare dell'angolazione aumentava, soprattutto per i casi con velocità pari a  $20 \frac{m}{s}$ . Per questo motivo si è deciso di fare ulteriori simulazioni fino a quando l'efficienza non iniziava a diminuire. Sono per cui state eseguite delle simulazioni anche per angolazioni  $\varphi$  di  $45^\circ$  e  $50^\circ$ ; a quest'ultima angolazione l'efficienza diminuiva e non è quindi stato ulteriormente aumentato l'angolo di inclinazione del getto.

Nella pagina seguente vengono riportati i valori tabellati delle simulazioni. Le quantità mostrate in tabella sono illustrate nella "Nomenclatura".



Variante	Impostazioni getto d'aria				Area weighted average			Mass weighted average								
	$v \left[ \frac{m}{s} \right]$	$\varphi [^\circ]$	$b_0 [mm]$	$p_{out} [Pa]$	$\dot{m}_{in,H_2O} \left[ \frac{kg}{s} \right]$	$\dot{m}_{in,air} \left[ \frac{kg}{s} \right]$	$\dot{m}_{out,hot} \left[ \frac{kg}{s} \right]$	$\%out_{H_2O} [-]$	$\%out_{air} [-]$	$\dot{m}_{out,H_2O} \left[ \frac{kg}{s} \right]$	$\dot{m}_{loss,H_2O} \left[ \frac{kg}{s} \right]$	$\%m_{mass,H_2O} [%]$	$\dot{m}_{out,air} \left[ \frac{kg}{s} \right]$	$\%m_{out-air} [%]$	$\epsilon [%]$	
2	50	50	5	2.6995	0.1278		0.0959	0.1278	0.7587	0.2413	0.0969	0.0309	24.1396	0.0308	24.1349	75.86
2	40	50	5	4.1702	0.1278		0.0768	0.1278	0.8309	0.1691	0.1062	0.0216	16.9132	0.0216	16.9080	83.09
2	30	50	5	3.8100	0.1278		0.0576	0.1278	0.8291	0.1709	0.1060	0.0218	17.0931	0.0218	17.0896	82.91
2	20	50	5	3.4604	0.1278		0.0384	0.1278	0.8138	0.1862	0.1040	0.0238	18.6292	0.0238	18.6241	81.37
2	10	50	5	4.5009	0.1278		0.0192	0.1278	0.7410	0.2590	0.0947	0.0331	25.9000	0.0331	25.8954	74.10
2	50	45	5	-4.0867	0.1278		0.1055	0.1279	0.8062	0.1938	0.1031	0.0247	19.3184	0.0248	19.3751	80.68
2	40	45	5	0.9003	0.1278		0.0844	0.1278	0.8091	0.1909	0.1034	0.0244	19.0961	0.0244	19.0911	80.90
2	30	45	5	0.6650	0.1278		0.0633	0.1278	0.7531	0.2469	0.0962	0.0316	24.6912	0.0315	24.6865	75.31
2	20	45	5	3.3493	0.1278		0.0422	0.1278	0.8472	0.1528	0.1083	0.0195	15.2803	0.0195	15.2750	84.72
2	10	45	5	4.4231	0.1278		0.0211	0.1278	0.7292	0.2708	0.0932	0.0346	27.0807	0.0346	27.0762	72.92
2	50	40	5	-7.2946	0.1278		0.1143	0.1279	0.6155	0.3845	0.0787	0.0491	38.3901	0.0492	38.4480	61.61
2	40	40	5	-0.1299	0.1278		0.0915	0.1278	0.7689	0.2311	0.0983	0.0295	23.1099	0.0295	23.1051	76.89
2	30	40	5	1.1756	0.1278		0.0686	0.1278	0.7557	0.2443	0.0966	0.0312	24.4322	0.0312	24.4275	75.57
2	20	40	5	3.1501	0.1278		0.0457	0.1278	0.8315	0.1685	0.1063	0.0215	16.8538	0.0215	16.8486	83.15
2	10	40	5	0.6384	0.1278		0.0229	0.1278	0.6383	0.3617	0.0816	0.0462	36.1787	0.0462	36.1747	63.82
2	50	35	5	-6.1558	0.1278		0.1223	0.1278	0.6321	0.3679	0.0808	0.0470	36.7916	0.0470	36.7876	63.21
2	40	35	5	-1.2741	0.1278		0.0978	0.1278	0.6718	0.3282	0.0858	0.0420	32.8259	0.0419	32.8217	67.17
2	30	35	5	0.3284	0.1278		0.0734	0.1278	0.7449	0.2551	0.0952	0.0326	25.5190	0.0326	25.5144	74.48
2	20	35	5	3.2266	0.1278		0.0489	0.1278	0.8287	0.1713	0.1059	0.0219	17.1340	0.0219	17.1288	82.87
2	10	35	5	4.3829	0.1278		0.0245	0.1278	0.6426	0.3574	0.0821	0.0457	35.7460	0.0457	35.7420	64.25
2	50	30	5	-2.5255	0.1278		0.1293	0.1281	0.6215	0.3785	0.0796	0.0482	37.7238	0.0485	37.8520	62.28
2	40	30	5	-0.9615	0.1278		0.1034	0.1278	0.6798	0.3202	0.0869	0.0409	32.0198	0.0409	32.0198	67.98
2	30	30	5	1.3985	0.1278		0.0776	0.1278	0.7530	0.2470	0.0962	0.0316	24.7063	0.0316	24.7016	75.29
2	20	30	5	4.7591	0.1278		0.0517	0.1278	0.8172	0.1828	0.1044	0.0234	18.2825	0.0234	18.2809	81.72
2	10	30	5	0.6504	0.1278		0.0259	0.1278	0.6503	0.3497	0.0831	0.0447	34.9718	0.0447	34.9718	65.02
2	50	25	5	-1.0765	0.1278		0.1353	0.1283	0.6512	0.3488	0.0835	0.0443	34.6533	0.0447	34.8827	65.35
2	40	25	5	0.5497	0.1278		0.1082	0.1278	0.6883	0.3117	0.0880	0.0398	31.1412	0.0398	31.1661	68.86
2	30	25	5	1.5528	0.1278		0.0812	0.1278	0.7469	0.2531	0.0954	0.0324	25.3192	0.0324	25.3147	74.68
2	20	25	5	3.8301	0.1278		0.0541	0.1278	0.8079	0.1921	0.1033	0.0245	19.1938	0.0246	19.2136	80.81
2	10	25	5	3.5508	0.1278		0.0271	0.1278	0.6340	0.3660	0.0810	0.0468	36.6015	0.0468	36.5975	63.40
2	50	20	5	2.7830	0.1278		0.1403	0.1284	0.6470	0.3530	0.0831	0.0447	35.0052	0.0453	35.2952	64.99
2	40	20	5	6.2835	0.1278		0.1122	0.1282	0.6639	0.3361	0.0851	0.0427	33.4057	0.0431	33.6060	66.59
2	30	20	5	0.7519	0.1278		0.0842	0.1278	0.7521	0.2479	0.0961	0.0317	24.7882	0.0317	24.7852	75.21
2	20	20	5	4.0548	0.1278		0.0561	0.1278	0.8086	0.1914	0.1033	0.0245	19.1451	0.0245	19.1446	80.85
2	10	20	5	5.5284	0.1278		0.0281	0.1278	0.6207	0.3793	0.0793	0.0485	37.9290	0.0485	37.9252	62.07
2	50	15	5	5.9053	0.1278		0.1442	0.1286	0.6140	0.3860	0.0789	0.0489	38.2247	0.0496	38.5955	61.78
2	40	15	5	5.7269	0.1278		0.1153	0.1282	0.7017	0.2983	0.0900	0.0378	29.5804	0.0383	29.8260	70.42
2	30	15	5	2.9211	0.1278		0.0865	0.1278	0.7180	0.2820	0.0918	0.0360	28.1855	0.0360	28.1982	71.81
2	20	15	5	4.1607	0.1278		0.0577	0.1278	0.8001	0.1999	0.1023	0.0255	19.9904	0.0256	19.9920	80.01
2	10	15	5	3.6408	0.1278		0.0288	0.1278	0.6441	0.3559	0.0823	0.0455	35.5914	0.0455	35.5874	64.41
2	50	10	5	9.3471	0.1278		0.1470	0.1287	0.5970	0.4030	0.0768	0.0510	39.8849	0.0519	40.3026	60.12
2	40	10	5	7.3079	0.1278		0.1176	0.1283	0.6932	0.3068	0.0890	0.0388	30.3898	0.0394	30.6814	69.61
2	30	10	5	4.2584	0.1278		0.0882	0.1279	0.7433	0.2567	0.0950	0.0328	25.6335	0.0328	25.6706	74.37
2	20	10	5	4.5878	0.1278		0.0588	0.1279	0.7903	0.2097	0.1010	0.0268	20.9337	0.0268	20.9688	79.07
2	10	10	5	3.3997	0.1278		0.0294	0.1278	0.6051	0.3949	0.0773	0.0505	39.4922	0.0505	39.4884	60.51

Tabella 8: Raccolta ed elaborazione dei dati estrapolati dalle simulazioni eseguite per la variante 2

Come è subito evidente notare dai dati raccolti, la variante 2 mostra più simulazioni con livelli di efficienza anche superiori all'80% rispetto alla variante 1.

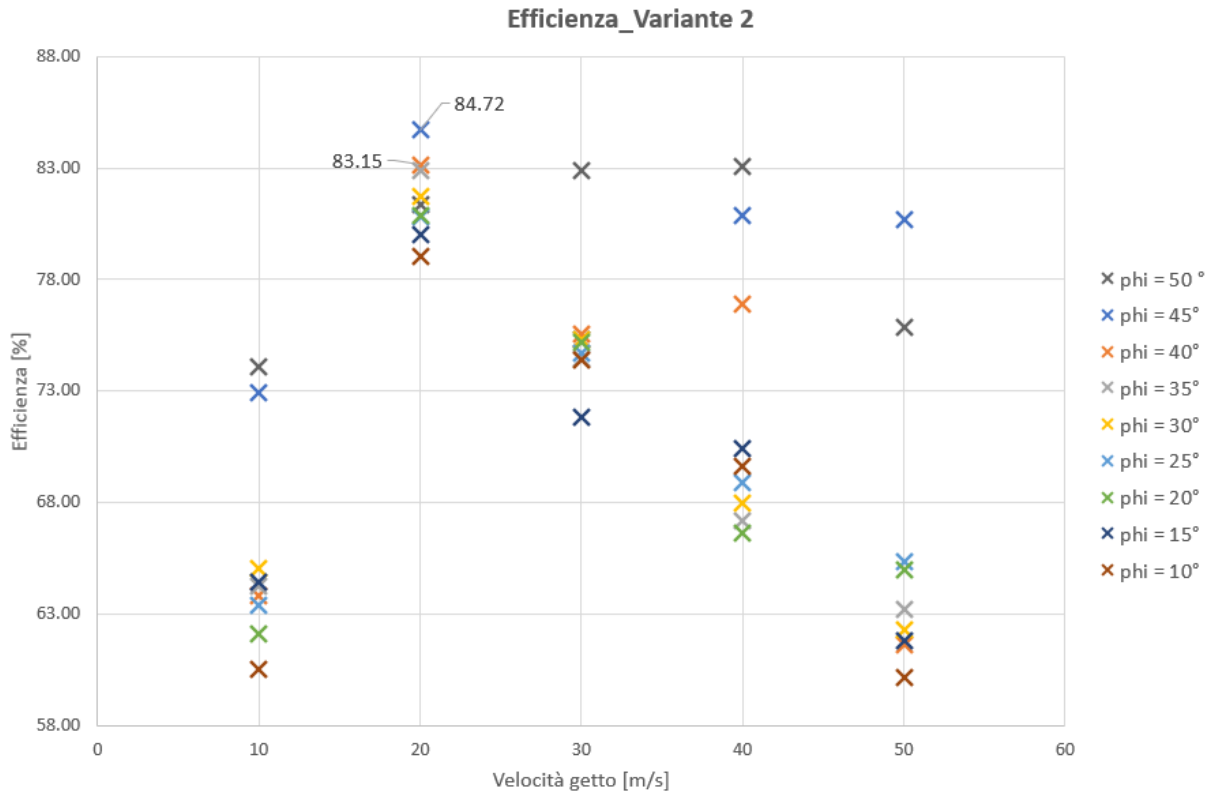


Grafico 11: Valori di efficienza per la variante 2 in funzione della velocità del getto e dell'angolo di inclinazione

L'andamento dei risultati è simile rispetto alla variante 1; si possono notare dei valori di efficienza elevati per quanto riguarda i casi a  $\varphi$  pari a 45° e 50° alle velocità  $v$  di 30, 40 e 50  $\frac{m}{s}$ , ma come si vedrà successivamente queste simulazioni non hanno offerto un vero e proprio isolamento della cavità.

Si conferma invece ancora ottimale la velocità  $v$  di 20  $\frac{m}{s}$ , che ha ottenuto l'efficienza più alta nel caso di inclinazione del getto pari a  $\varphi = 45^\circ$ .

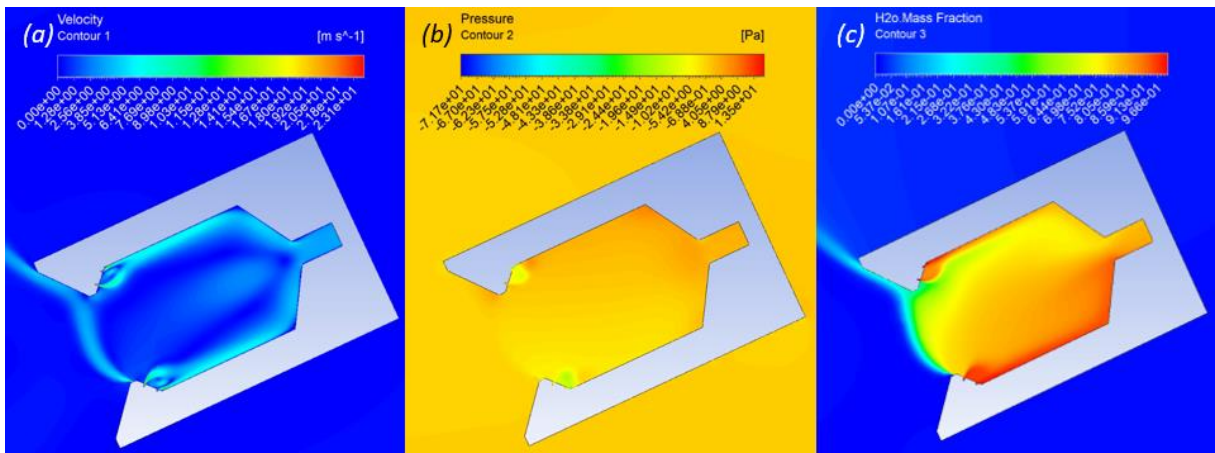


Figura 66: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H2O" (c) con velocità del getto pari a 20  $\frac{m}{s}$  e angolo di inclinazione di 45°

Dalle immagini si può subito intuire che il getto d'aria isola in maniera piuttosto ottimale la cavità. Anche il comportamento all'interno del ricevitore è quello desiderato, con i 4 getti di vapore che fluiscono tutti verso l'uscita.

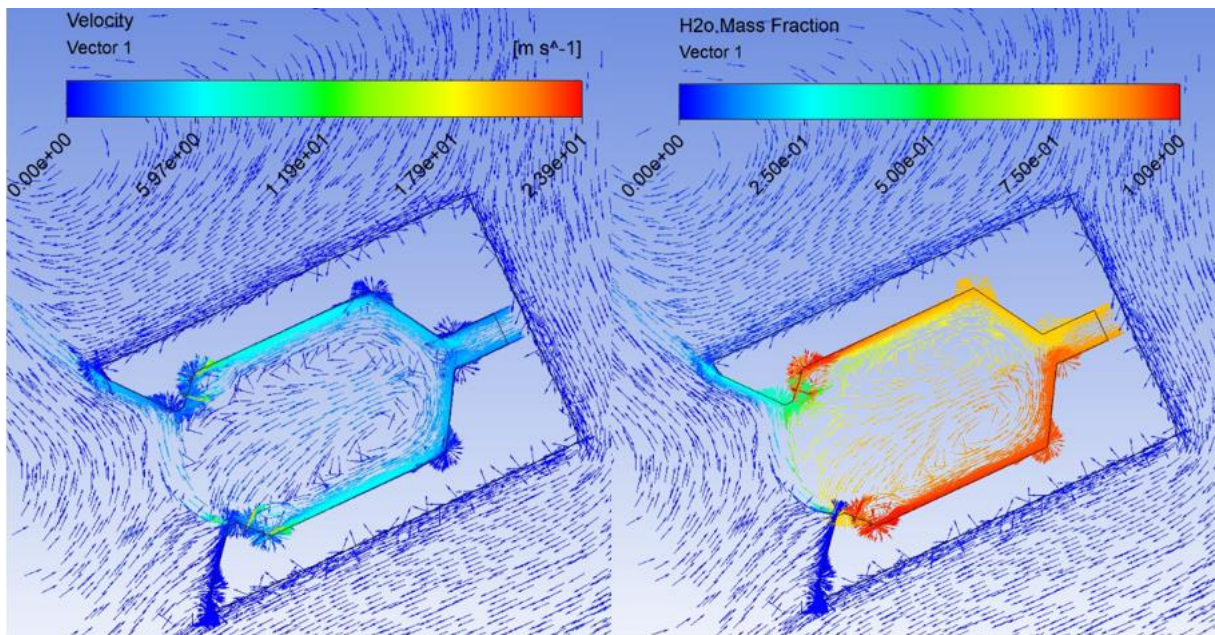


Figura 67: Rappresentazioni dei vettori per il caso con velocità del getto pari a  $20 \frac{m}{s}$  e angolo di inclinazione di  $45^\circ$ ; a sinistra colorati per intensità di velocità e a destra colorati per specie

Le rappresentazioni vettoriali aiutano a comprendere in maniera più precisa la situazione; si possono subito notare con maggior chiarezza le due zone di ricircolo all'interno del ricevitore e la quantità d'aria che entra nella parte superiore della cavità.

Un aspetto positivo è invece l'assenza del vortice in ingresso che si era evidenziato in alcune delle simulazioni eseguite sulla variante 1.

In questo caso il comportamento del getto d'aria è quello voluto e si può notare come, la geometria del ricevitore, favorisca il suo fluire verso l'ambiente esterno.

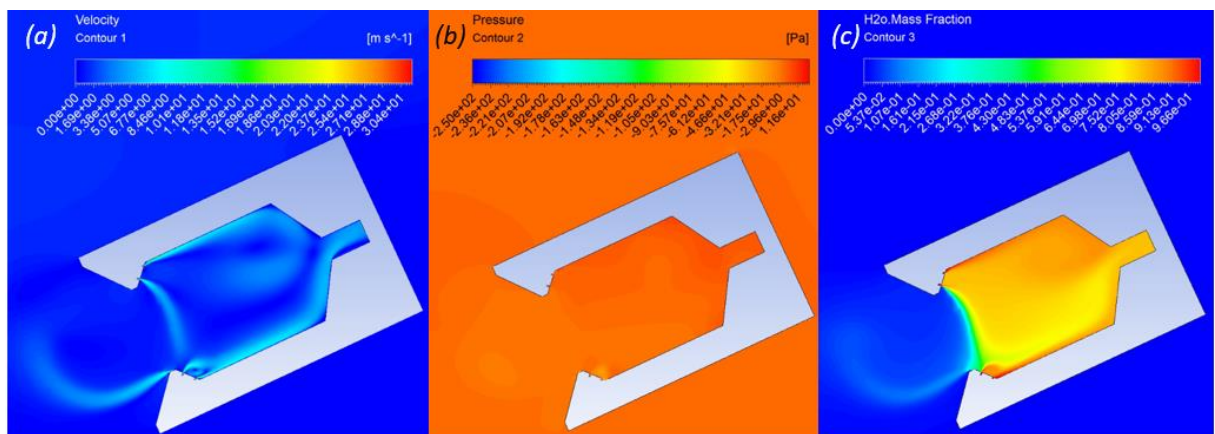


Figura 68: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H2O" (c) con velocità del getto pari a  $30 \text{ m/s}$  e angolo di inclinazione di  $50^\circ$

Nella figura 67 è rappresentato il caso già nominato precedentemente. Questa situazione è stata osservata per alcune simulazioni a  $45^\circ$  e  $50^\circ$ , ottenendo comunque dei livelli di efficienza elevati. Come si può però osservare dal contour di velocità, l'isolamento della cavità non viene fatto dal getto

d'aria, ma dal getto di vapore superiore. Questa condizione verrà osservata successivamente anche nelle simulazioni in presenza di vento da sinistra verso destra.

Ovviamente se si guarda il contour di specie, il quadro della situazione è piuttosto buono, infatti all'interno della cavità del ricevitore penetra solamente una leggera quantità d'aria, come confermano anche i valori di efficienza superiori all'80%.

Bisogna però ricordare che in queste simulazioni si sta valutando solamente l'aspetto fluidodinamico del ricevitore solare. Probabilmente se ad una situazione simile dovesse essere aggiunto lo scambio convettivo tra il fluido termovettore e l'aria dell'ambiente esterno, la soluzione non risulterebbe così ottimale.

### 9.3 Variante 3

Dopo aver valutato l'uscita del getto d'aria dalle posizioni 1 e 2, si è deciso di effettuare delle prove con il getto d'aria uscente da una posizione intermedia tra l'estremità del ricevitore e le posizioni 1 e 2. Questo perché nella miglior soluzione offerta dalla variante 2, una certa quantità d'aria entrava comunque nel ricevitore, probabilmente data la vicinanza del getto d'aria alla cavità. Tenendo il getto più distante questo effetto potrebbe essere limitato.

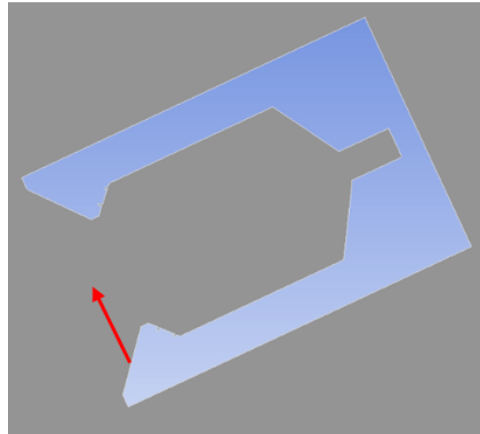


Figura 69: Rappresentazione della variante 3, la freccia in rosso indica la posizione da cui fuoriesce il getto d'aria

Visti i vantaggi che ha portato la variante 2, si è deciso di far fuoriuscire il getto d'aria sempre dal basso verso l'alto.

L'idea di base era quella di svolgere una panoramica come è stato fatto per le varianti 1 e 2 ma fin dalle prime simulazioni non si è ottenuto l'effetto desiderato.

Si è partiti con una velocità del getto d'aria di  $30 \frac{m}{s}$  e un angolo di inclinazione di  $25^\circ$ .

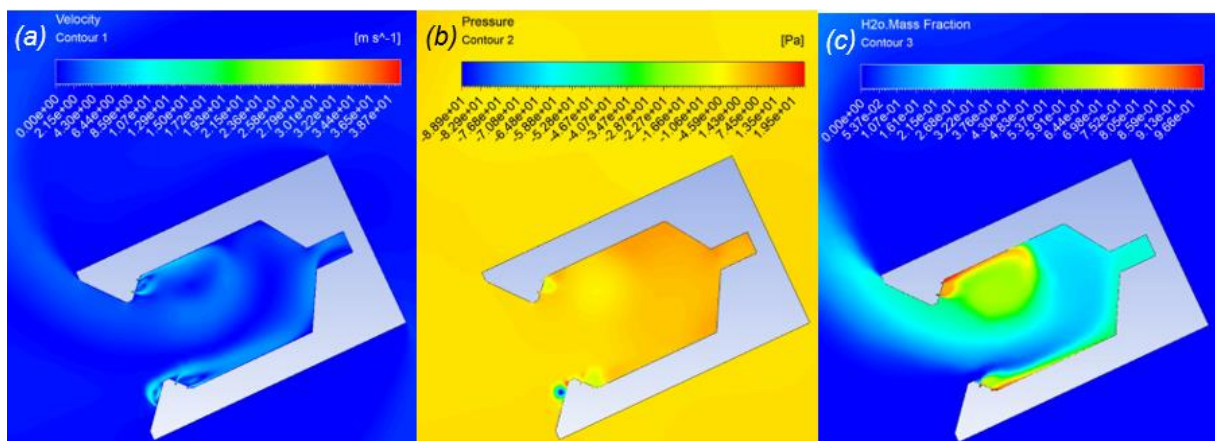


Figura 70: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H<sub>2</sub>O" (c) con velocità del getto pari a  $30 \frac{m}{s}$  e angolo di inclinazione di  $25^\circ$

La raccolta dei dati relativa alla simulazione è stata tralasciata in quanto quello che salta subito all'occhio dal contour di velocità della prima simulazione eseguita, è la facilità con cui il getto d'aria fluisce all'interno della cavità. Se però si guarda il contour di pressione, si intravede subito una notevole depressione in prossimità del getto d'aria. Questo buco di pressione attira verso di sé il getto d'aria facendolo fluire dentro la cavità del ricevitore. È sorto quindi il problema di dover dare una spiegazione a questo fenomeno. Infatti all'interno del vortice la velocità dell'aria è nulla ma la pressione, anziché aumentare, diminuisce notevolmente (figura 70).

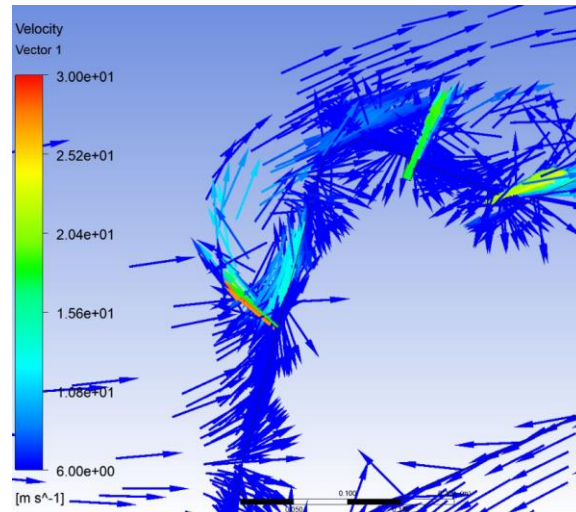


Figura 71: Focus dei vettori velocità intorno alla depressione per la simulazione con velocità del getto pari a  $30 \frac{m}{s}$  e angolo di inclinazione di  $25^\circ$ . Al centro del vortice la velocità è nulla.

In un primo momento si è pensato di aumentare la velocità del getto d'aria per verificare se una maggior quantità di moto riuscisse ad evitare il formarsi del buco di pressione e fluire liberamente verso l'estremità superiore del ricevitore. È stata quindi simulata la situazione con angolazione uguale alla precedente ma con velocità del getto di  $50 \frac{m}{s}$ .

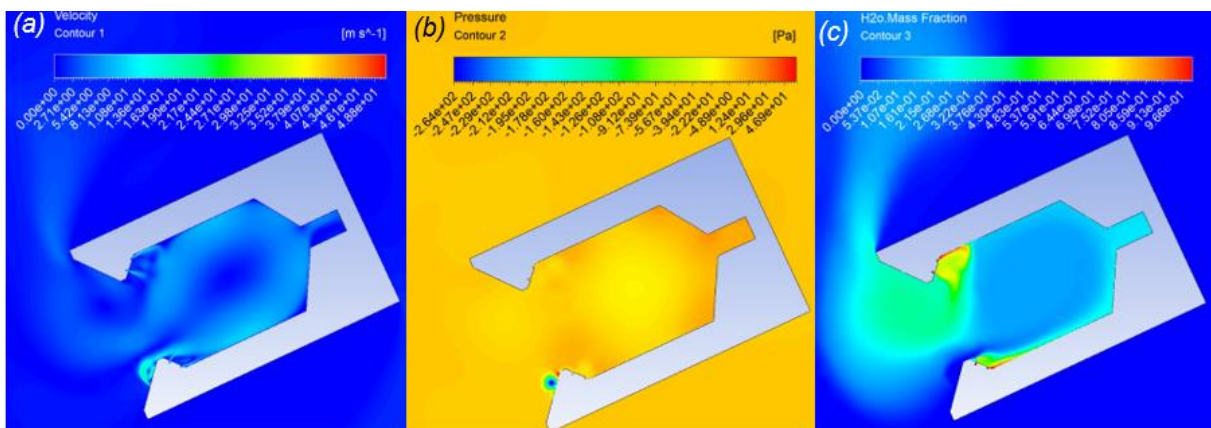


Figura 72: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H<sub>2</sub>O" (c) con velocità del getto pari a  $50 \frac{m}{s}$  e angolo di inclinazione di  $25^\circ$

Purtroppo aumentando la velocità da  $30 \frac{m}{s}$  a  $50 \frac{m}{s}$  non è stato ottenuto nessun miglioramento della situazione. Anche in questo caso il getto d'aria viene interamente deviato all'interno della cavità dal buco di pressione.

Sono successivamente state eseguite altre due simulazioni, alle velocità di  $30 \frac{m}{s}$  e  $50 \frac{m}{s}$ , aumentando questa volta l'angolazione del getto d'aria a  $35^\circ$ , cercando di capire se si riuscisse in qualche modo ad evitare la formazione del buco di pressione.

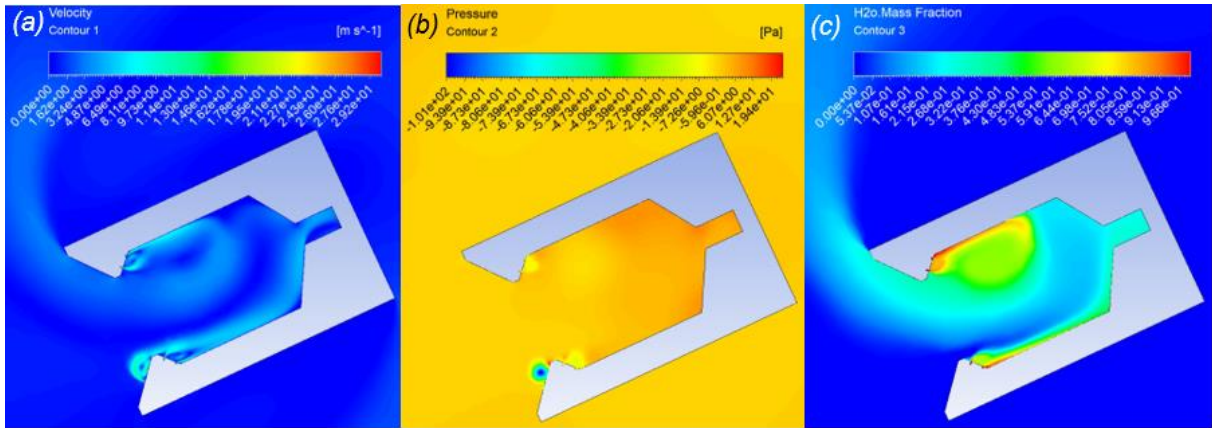


Figura 73: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie “mass frac. of H<sub>2</sub>O” (c) con velocità del getto pari a 30  $\frac{m}{s}$  e angolo di inclinazione di 35°

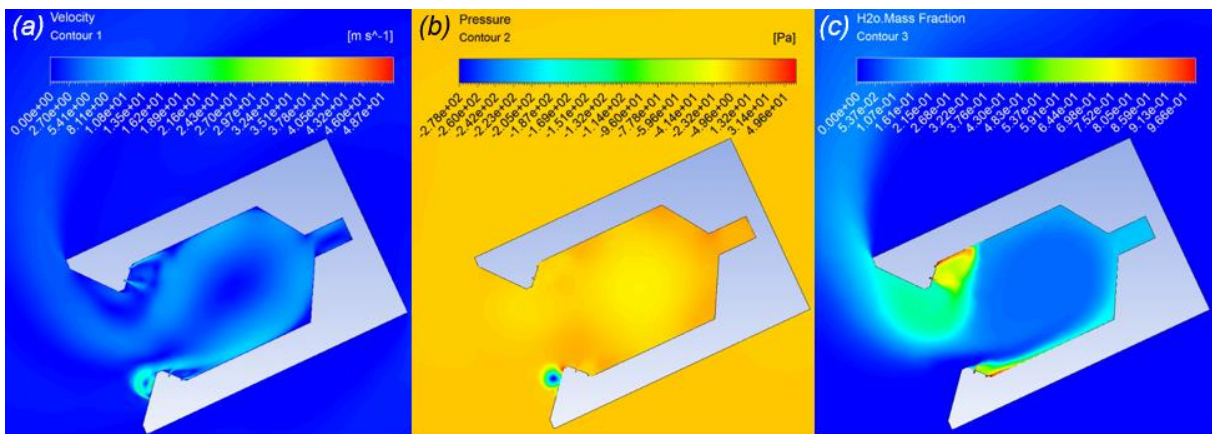


Figura 74: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie “mass frac. of H<sub>2</sub>O” (c) con velocità del getto pari a 50  $\frac{m}{s}$  e angolo di inclinazione di 35°

Aumentando l’angolo la situazione non è cambiata e il buco di pressione persiste. I valori di pressione statica in questo punto si aggirano tra i -280 Pa e -260 Pa.

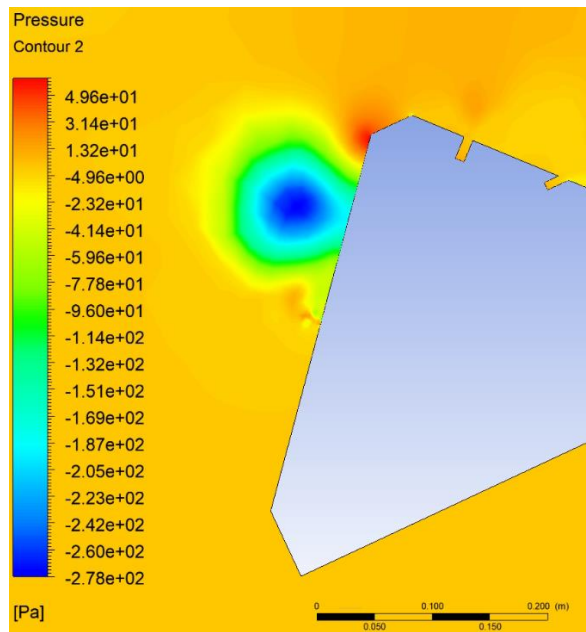


Figura 75: Focus sul buco di pressione della simulazione con velocità del getto pari a 50  $\frac{m}{s}$  e angolo di inclinazione di 35°

A questo punto si è deciso di effettuare delle simulazioni alla velocità  $v$  di  $50 \frac{m}{s}$  e angolazione  $\varphi$  di  $35^\circ$ , variando dei parametri relativi al settaggio di Fluent. Viene variato un solo parametro alla volta così da poter identificare e conoscere con esattezza la causa di una determinata variazione.

Sono stati provati diversi approcci per verificare a cosa fosse dovuto il buco di pressione. Il primo passaggio è stato quello di utilizzare il modello di turbolenza “k-epsilon standard”, più semplice rispetto al “realizable”, considerando solo l’opzione “full bouyancy effects”. In un secondo momento si è proceduto togliendo anche l’opzione “full bouyancy effects”. È stata poi eseguita una simulazione, sempre con il modello di turbolenza “k-epsilon standard” e senza nessuna opzione selezionata, a “lunga durata” per verificare che il buco di pressione non fosse un fenomeno stazionario e la situazione potesse magari in qualche modo evolversi. Successivamente è stato deciso di togliere anche la gravità oltre alle opzioni già specificate. Poi è stata eseguita una simulazione impostando solamente la condizione di “pressure outlet” all’outlet 1 pari a  $0 Pa$  e in ultimo è stato simulato il caso in cui la temperatura del getto d’aria fosse la stessa di quella dell’ambiente esterno ( $300 K$ ).

Di seguito sono riportate tutte le prove effettuate, in cui viene specificato ed **evidenziato** quale parametro è stato fatto variare rispetto al “settaggio di Fluent” illustrato al capitolo “Analisi CFD e Settaggio definitivo Fluent”.

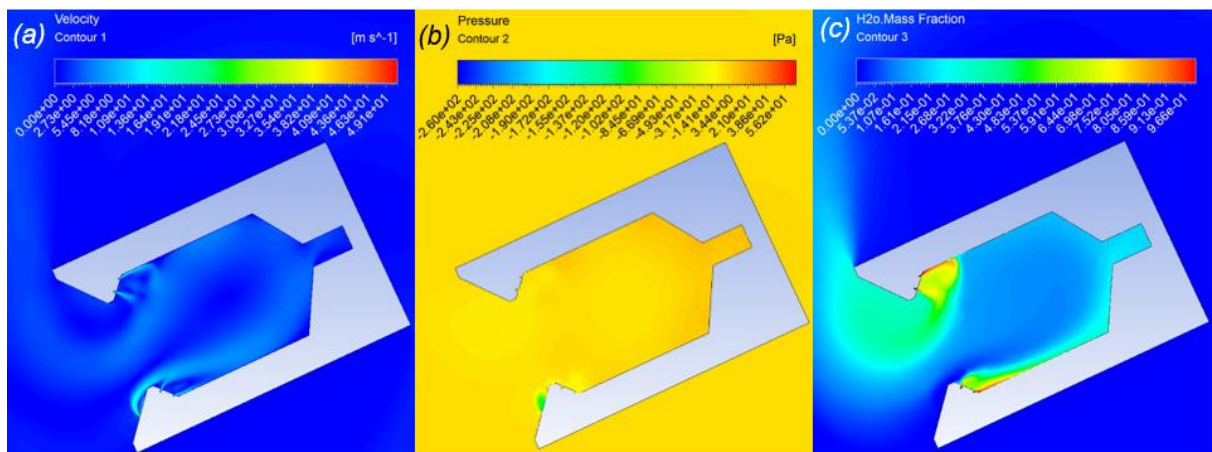


Figura 76: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie “mass frac. of H<sub>2</sub>O” (c) con velocità del getto pari a  $50 \frac{m}{s}$  e angolo di inclinazione di  $35^\circ$  con modello di turbolenza “k-epsilon standard” con l’opzione “full bouyancy effects”

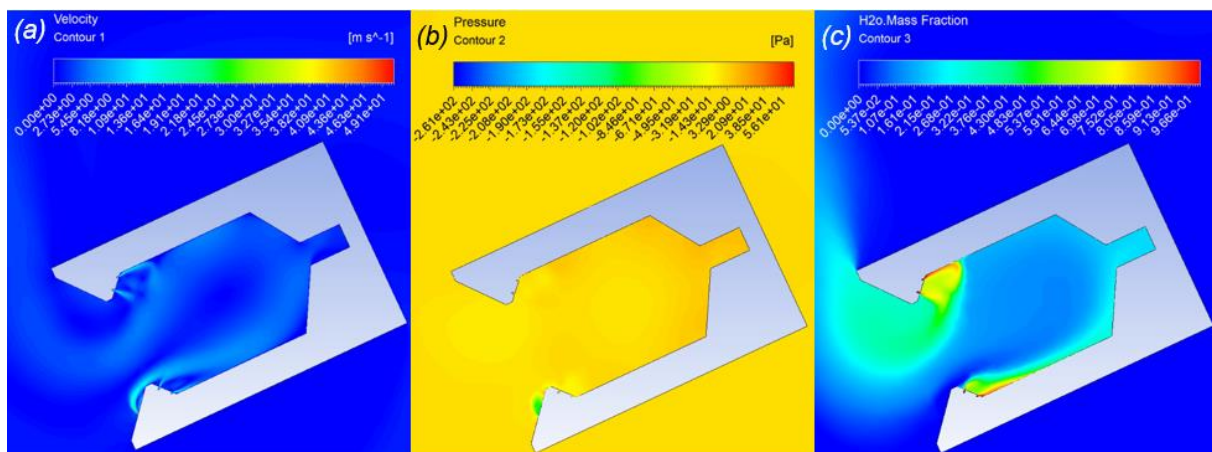


Figura 77: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie “mass frac. of H<sub>2</sub>O” (c) con velocità del getto pari a  $50 \frac{m}{s}$  e angolo di inclinazione di  $35^\circ$  con modello di turbolenza “k-epsilon standard” senza l’opzione “full bouyancy effects”



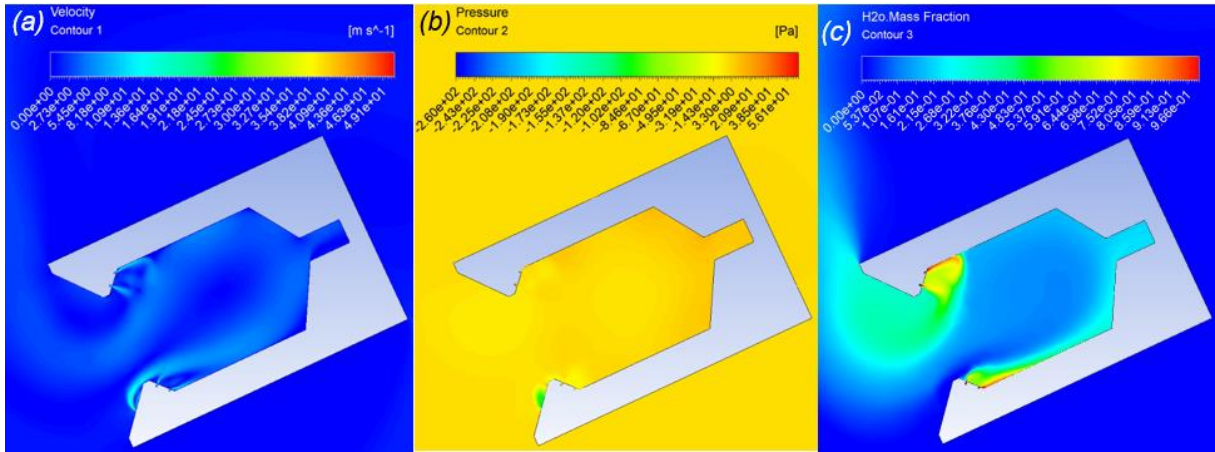


Figura 78: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie “mass frac. of H<sub>2</sub>O” (c) con velocità del getto pari a 50  $\frac{m}{s}$  e angolo di inclinazione di 35° con modello di turbolenza “k-epsilon standard” senza l’opzione “full bouyancy effects” a lunga durata [120'000 iterazioni]

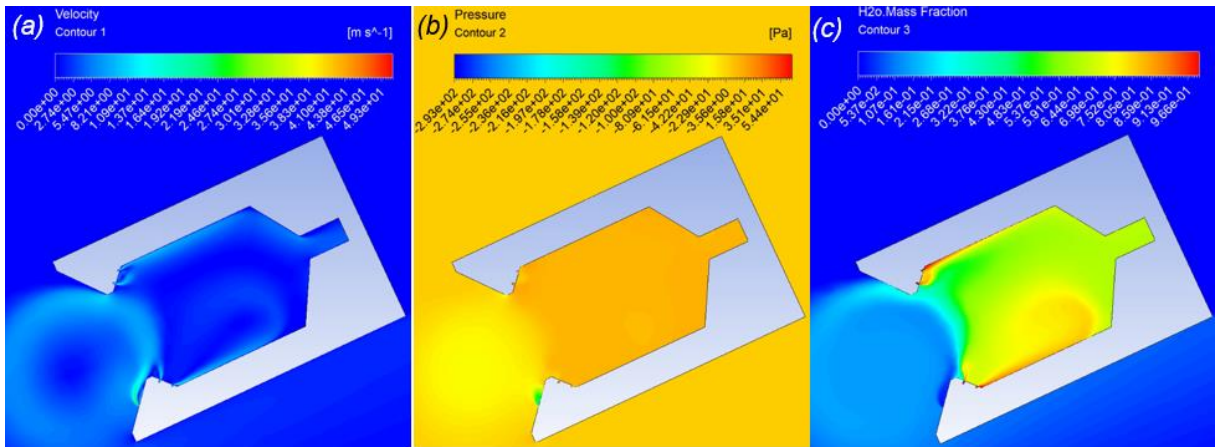


Figura 79: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie “mass frac. of H<sub>2</sub>O” (c) con velocità del getto pari a 50  $\frac{m}{s}$  e angolo di inclinazione di 35° con modello di turbolenza “k-epsilon standard” senza l’opzione “full bouyancy effects” e senza gravità [57'000 iterazioni]

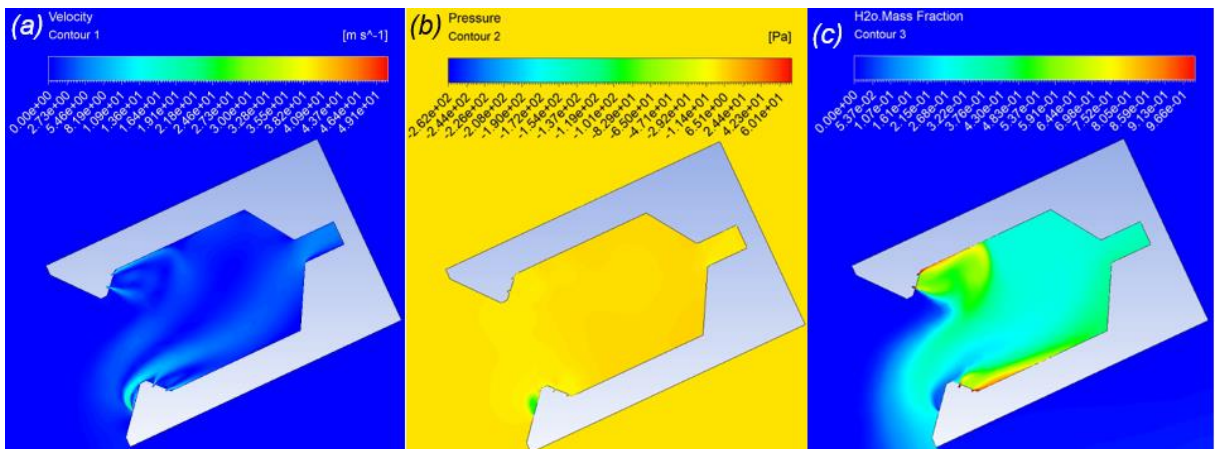


Figura 80: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie “mass frac. of H<sub>2</sub>O” (c) con velocità del getto pari a 50  $\frac{m}{s}$  e angolo di inclinazione di 35° con modello di turbolenza “k-epsilon standard” senza l’opzione “full bouyancy effects” e senza gravità utilizzando solo la condizione di “pressure outlet” all’outlet 1

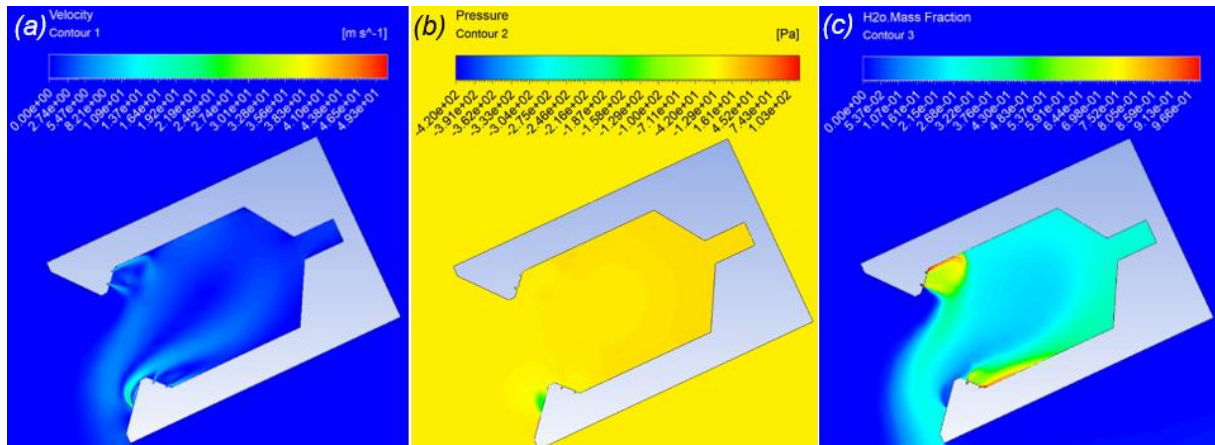


Figura 81: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie “mass frac. of H<sub>2</sub>O” (c) con velocità del getto pari a  $50 \frac{m}{s}$  e angolo di inclinazione di  $35^\circ$  con modello di turbolenza “k-epsilon standard” senza l’opzione “full bouyancy effects” e senza gravità con getto d’aria a temperatura ambiente (300 K)

Fin dalla prima simulazione, effettuata con il modello di turbolenza “k-epsilon” standard, il valore di depressione del buco è diminuito, da  $-280/-260 Pa$  a  $-100/-80 Pa$  (pressione statica), senza però sparire.

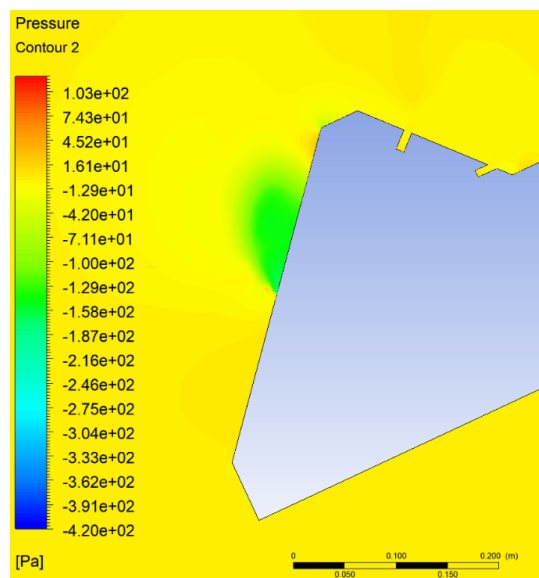


Figura 82: Focus sul buco di pressione della simulazione con velocità del getto pari a  $50 \frac{m}{s}$  e angolo di inclinazione di  $35^\circ$  con modello di turbolenza “k-epsilon standard” con l’opzione “full bouyancy effects”

Nelle successive simulazioni, sempre focalizzandosi sulla depressione, non sono avvenute grosse variazioni.

Sono anche stati valutati i valori di pressione all’entrata del getto d’aria e in uscita dalla cavità. Anche i valori di pressione non sono riusciti a chiarire in alcun modo la formazione della depressione.

In uscita, a parte il caso dove è stato usato il “pressure outlet” e il caso in cui è stato utilizzato il modello di turbolenza “k-epsilon realizable”, i valori di pressione sono abbastanza coerenti.

All’entrata del getto d’aria, sempre trascurando il caso con modello di turbolenza “k-epsilon realizable”, si può notare come eliminando la gravità, il valore di pressione risulta positivo.

$v = 50 \frac{m}{s}$ , $\varphi = 35^\circ$	Pressure in air [Pa]	Pressure out [Pa]
Realizable	1.345809	14.82933
Standard con FBE	-4.898979	11.47329
Standard senza FBE	-5.120055	10.92856
Standard senza FBE lunga durata	-5.113834	9.614708
Standard senza FBE, senza gravità	-8.923564	9.896168
Standard senza FBE, solo press-out, senza gravità	3.683481	0
Standard senza FBE, senza gravità, getto a $T_{amb}$	11.58883	9.122489

Tabella 9: Valori di pressione all'inlet del getto d'aria e all'outlet del ricevitore

Si è dunque arrivati alla probabile conclusione che il buco di pressione possa essere dovuto alla geometria del ricevitore. Infatti dopo aver valutato numerose simulazioni senza aver ottenuto grosse differenze, questa è rimasta una delle poche deduzioni plausibili.

## 10 Simulazioni in presenza di vento

Dopo aver determinato la soluzione che isola meglio la cavità del ricevitore, è stato valutato come l'efficienza di questa configurazione vari in presenza di vento.

Sono dunque state effettuate delle simulazioni partendo da una velocità del vento di  $2.5 \frac{m}{s}$  fino a  $15 \frac{m}{s}$  ad intervalli di  $2.5 \frac{m}{s}$ . Inoltre sono state comparate due diverse configurazioni: in una, il vento fluisce da destra verso sinistra, nell'altra il vento fluisce da sinistra verso destra.

La direzione del vento è stata impostata parallela all'asse X.

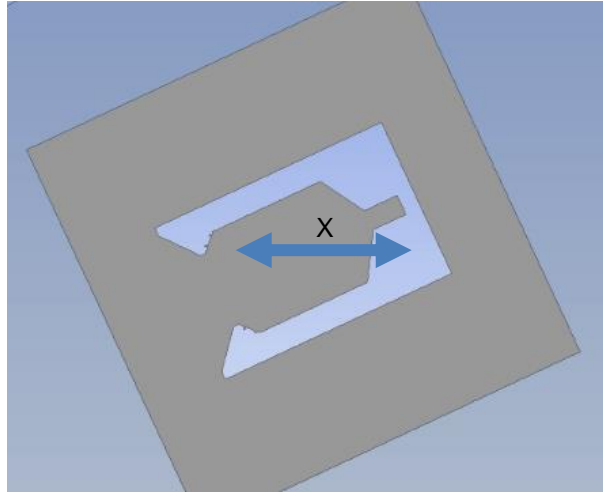


Figura 83: Indicazione della direzione del vento

Le velocità del vento non sono state ipotizzate casualmente. Sono state osservate le velocità medie del vento di Hassi Messaouduna, città al centro del deserto del Sahara e quindi possibile locazione futura del ricevitore solare, ad un'altezza di 10 metri dal suolo. A quest'altezza infatti la velocità del vento non risulta influenzata dalle infrastrutture presenti.

La linea nera del grafico rappresenta l'andamento della velocità media del vento durante l'anno. [10]

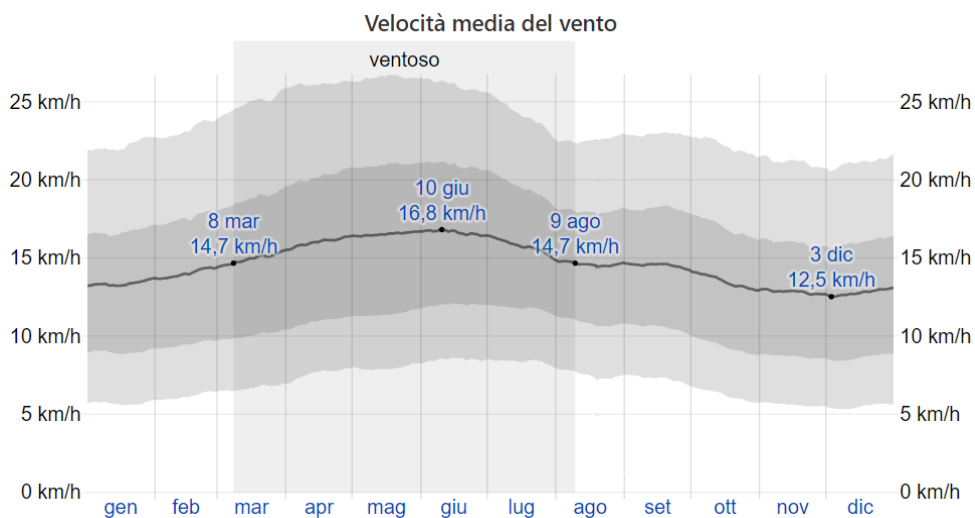


Grafico 12: Andamento della velocità del vento nella città di Hassi Messaouduna [P. 10]

Le velocità medie sono comprese tra  $10 \frac{km}{h}$  e  $20 \frac{km}{h}$  che corrispondono rispettivamente a  $2.77 \frac{m}{s}$  e  $5.55 \frac{m}{s}$ . Per questo motivo si è partiti simulando una velocità di  $2.5 \frac{m}{s}$  e ci si è spinti fino a  $15 \frac{m}{s}$ .

Per poter impostare la condizione vento, sono state rimosse le boundary condition “symmetry” e al loro posto sono stati inseriti un pressure outlet e un pressure inlet.

Questo in quanto le pareti del dominio sono parallele al ricevitore, per cui per poter avvolgere il ricevitore dal vento, che fluisce in direzione X, è stato necessario applicare questo accorgimento.

Quando il vento fluisce da sinistra verso destra le pareti “rosse”, come indicato nella figura sottostante”, fungono da inlet, mentre le pareti “blu” da outlet; quando il vento fluisce da destra verso sinistra avviene invece il contrario.

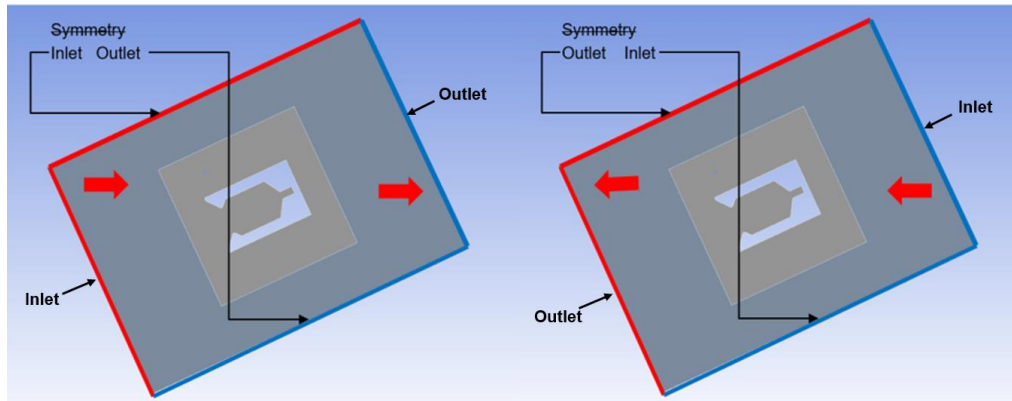


Figura 84: Modifica delle boundary condition per le simulazioni con vento

Nella pagina seguente vengono mostrati i valori tabellati ricavati dalle simulazioni in presenza di vento. Le quantità indicate nelle tabelle sono illustrate nella “Nomenclatura”.

Variante	Impostazioni getto d'aria			$v_w$ [ $\frac{m}{s}$ ]	Direzione vento	Area weighted average			Mass weighted average								
	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi$ [°]	$b_0$ [mm]			$p_{out}$ [Pa]	$\dot{m}_{in,H_2O}$ [ $\frac{kg}{s}$ ]	$\dot{m}_{in,air}$ [ $\frac{kg}{s}$ ]	$\dot{m}_{out,tot}$ [ $\frac{kg}{s}$ ]	$\%_{out,H_2O}$ [-]	$\%_{out,air}$ [-]	$\dot{m}_{out,H_2O}$ [ $\frac{kg}{s}$ ]	$\dot{m}_{loss,H_2O}$ [ $\frac{kg}{s}$ ]	$\%_{m_{loss,H_2O}}$ [%]	$\dot{m}_{out,air}$ [ $\frac{kg}{s}$ ]	$\%_{m_{out-air}}$ [%]	$\epsilon$ [%]
2	20	45	5	0		3.3493	0.1278	0.0422	0.1278	0.8472	0.1528	0.1083	0.0195	15.2803	0.0195	15.2750	84.72
2	20	45	5	2.5	SX-->DX	12.5377	0.1278	0.0422	0.1278	0.8042	0.1958	0.1028	0.0250	19.5857	0.0250	19.5806	80.41
2	20	45	5	5	SX-->DX	48.9346	0.1278	0.0422	0.1278	0.8586	0.1414	0.1097	0.0181	14.1444	0.0181	14.1390	85.86
2	20	45	5	7.5	SX-->DX	101.3058	0.1278	0.0422	0.1278	0.6949	0.3051	0.0888	0.0390	30.5149	0.0390	30.5105	69.49
2	20	45	5	10	SX-->DX	178.2190	0.1278	0.0422	0.1278	0.6875	0.3125	0.0879	0.0399	31.2519	0.0399	31.2476	68.75
2	20	45	5	12.5	SX-->DX	277.7099	0.1278	0.0422	0.1278	0.6675	0.3325	0.0853	0.0425	33.2524	0.0425	33.2482	66.75
2	20	45	5	15	SX-->DX	393.5523	0.1278	0.0422	0.1278	0.6573	0.3427	0.0840	0.0438	34.2769	0.0438	34.2728	65.72
2	20	45	5	2.5	DX-->SX	4.5912	0.1278	0.0422	0.1278	0.8444	0.1556	0.1079	0.0199	15.5674	0.0199	15.5622	84.43
2	20	45	5	5	DX-->SX	4.3698	0.1278	0.0422	0.1278	0.8462	0.1538	0.1081	0.0197	15.3863	0.0197	15.3810	84.61
2	20	45	5	7.5	DX-->SX	4.2371	0.1278	0.0422	0.1278	0.8436	0.1564	0.1078	0.0200	15.6452	0.0200	15.6399	84.35
2	20	45	5	10	DX-->SX	3.6115	0.1278	0.0422	0.1278	0.8448	0.1552	0.1080	0.0198	15.5207	0.0198	15.5155	84.48
2	20	45	5	12.5	DX-->SX	2.6384	0.1278	0.0422	0.1278	0.8449	0.1551	0.1080	0.0198	15.5138	0.0198	15.5085	84.49
2	20	45	5	15	DX-->SX	2.8107	0.1278	0.0422	0.1278	0.8458	0.1542	0.1081	0.0197	15.4205	0.0197	15.4152	84.58

Tabella 10: Raccolta ed elaborazione dei dati estrapolati dalle simulazioni con condizione di vento

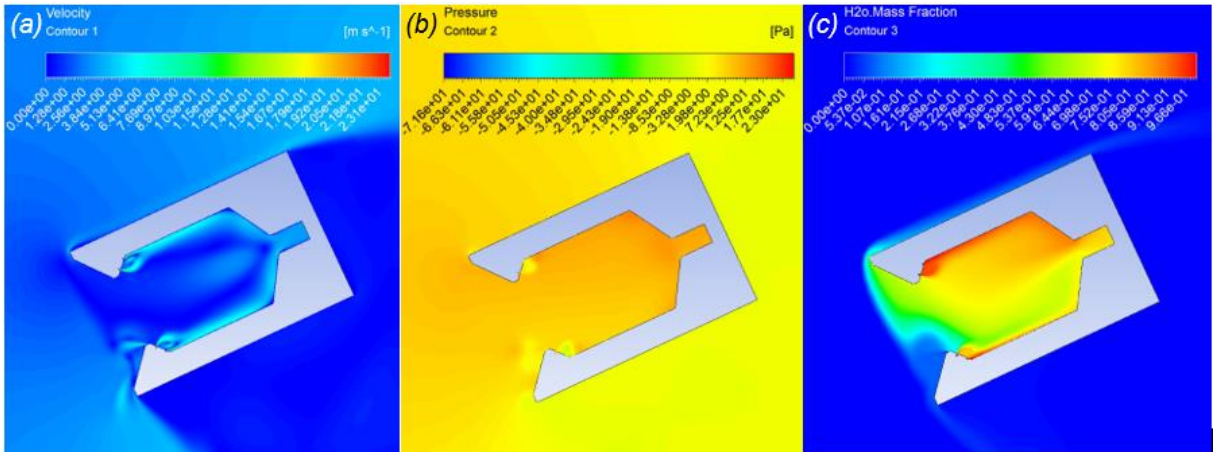


Figura 85: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie “mass frac. of H2O” (c), per la simulazione con vento da sinistra verso destra ad una velocità del vento,  $v_w$ , di  $2.5 \frac{m}{s}$

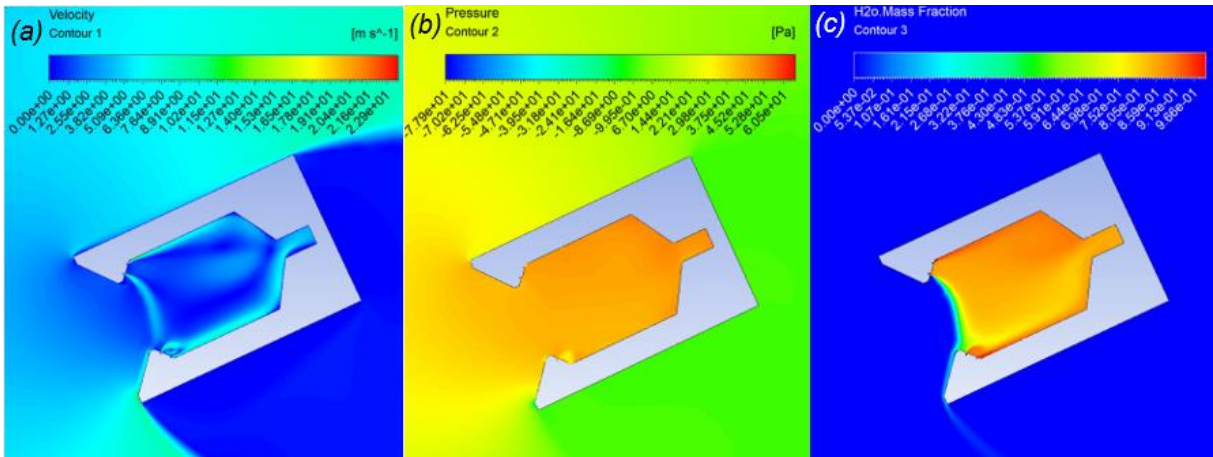


Figura 86: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie “mass frac. of H2O” (c), per la simulazione con vento da sinistra verso destra ad una velocità del vento,  $v_w$ , di  $5 \frac{m}{s}$

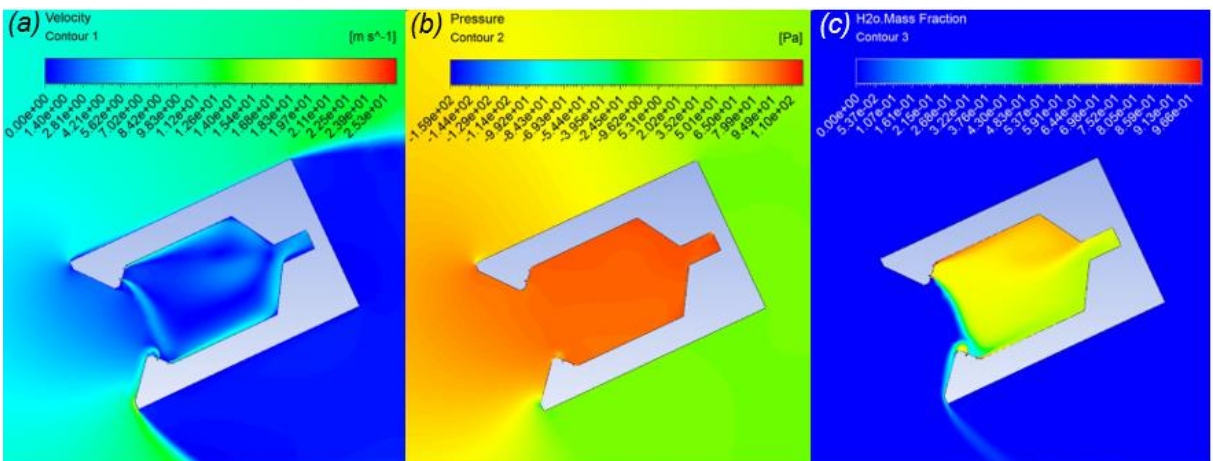


Figura 87: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie “mass frac. of H2O” (c), per la simulazione con vento da sinistra verso destra ad una velocità del vento,  $v_w$ , di  $7.5 \frac{m}{s}$

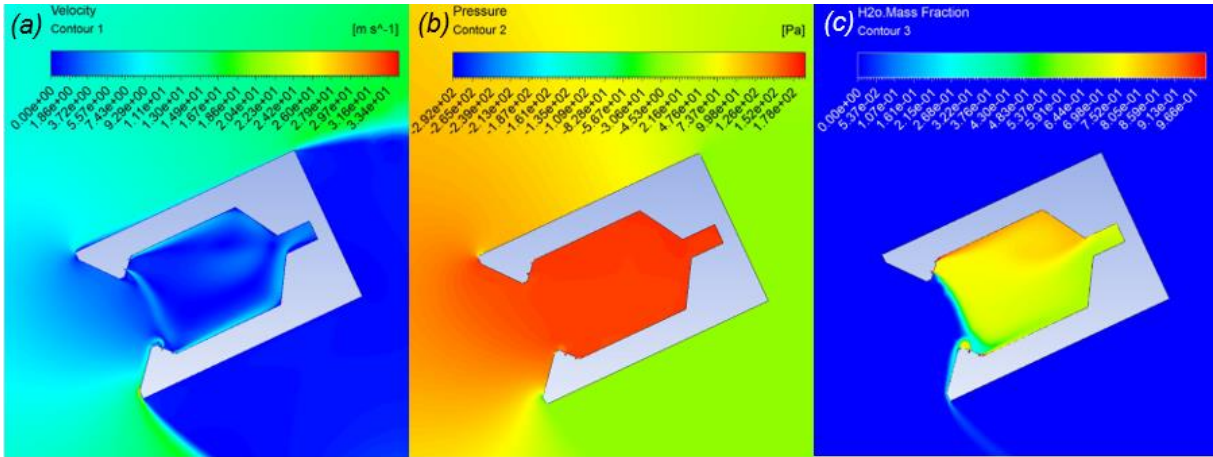


Figura 88: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie “mass frac. of H2O” (c), per la simulazione con vento da sinistra verso destra ad una velocità del vento,  $v_w$ , di  $10 \frac{m}{s}$

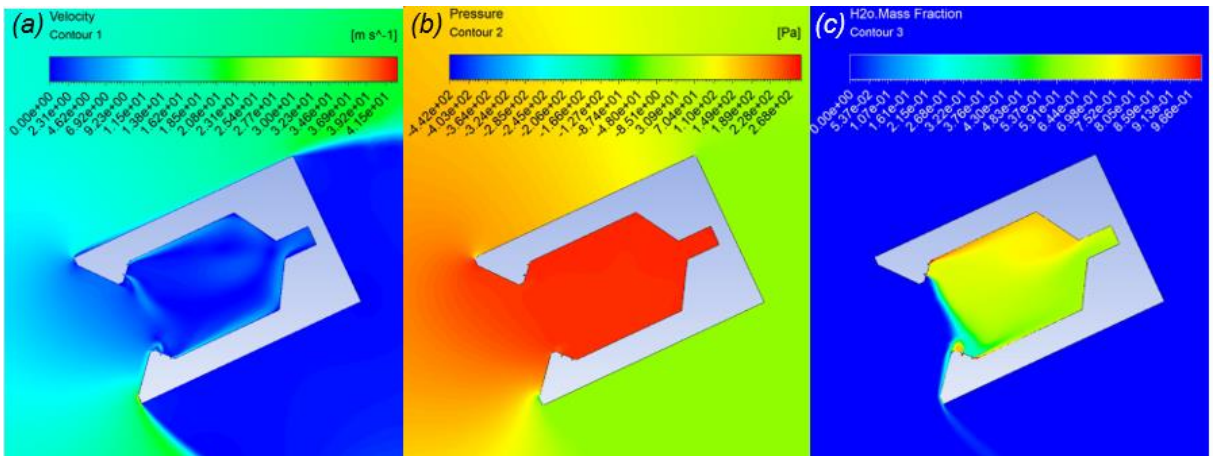


Figura 89: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie “mass frac. of H2O” (c), per la simulazione con vento da sinistra verso destra ad una velocità del vento,  $v_w$ , di  $12.5 \frac{m}{s}$

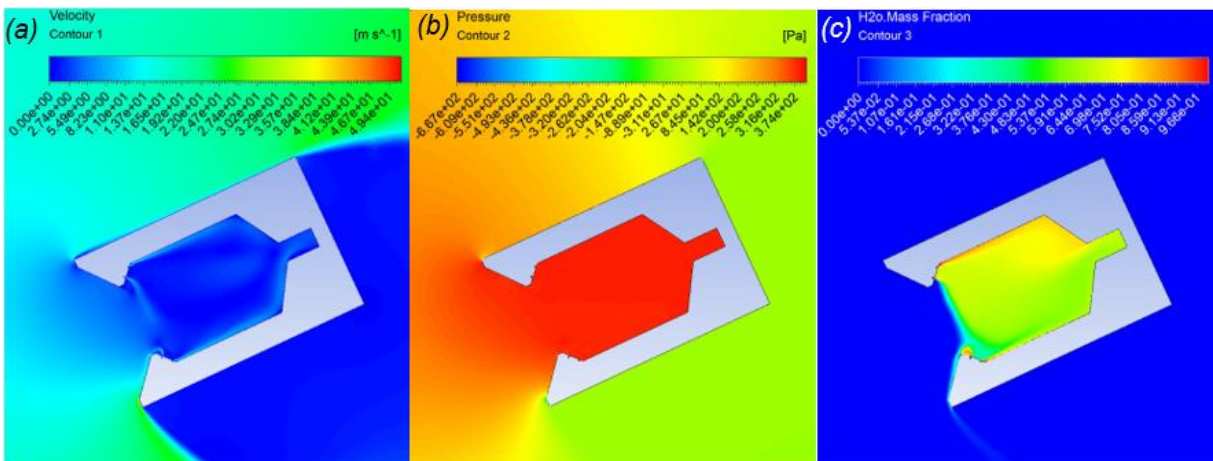


Figura 90: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie “mass frac. of H2O” (c), per la simulazione con vento da sinistra verso destra ad una velocità del vento,  $v_w$ , di  $15 \frac{m}{s}$



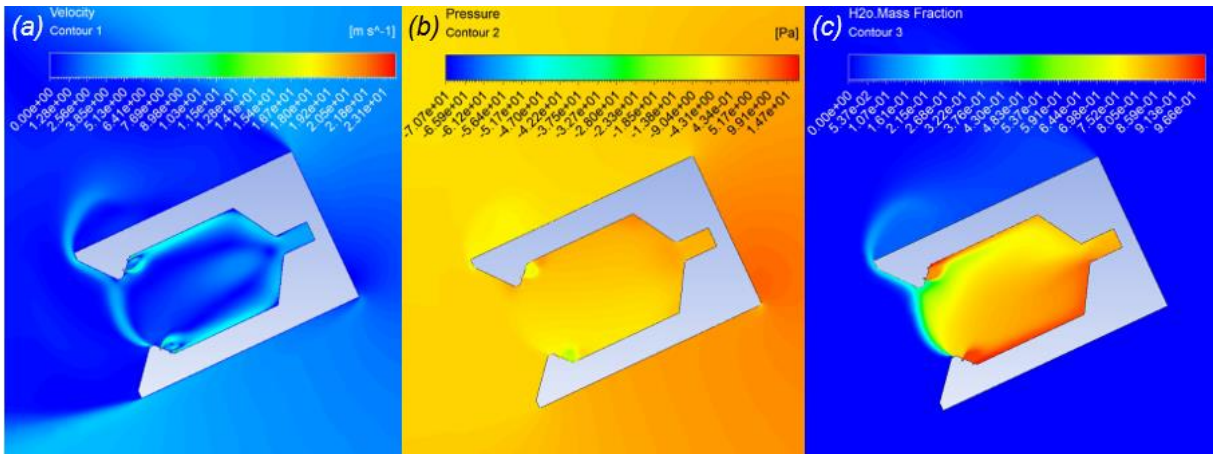


Figura 91: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie “mass frac. of H2O” (c), per la simulazione con vento da destra verso sinistra ad una velocità del vento,  $v_w$ , di  $2.5 \frac{m}{s}$

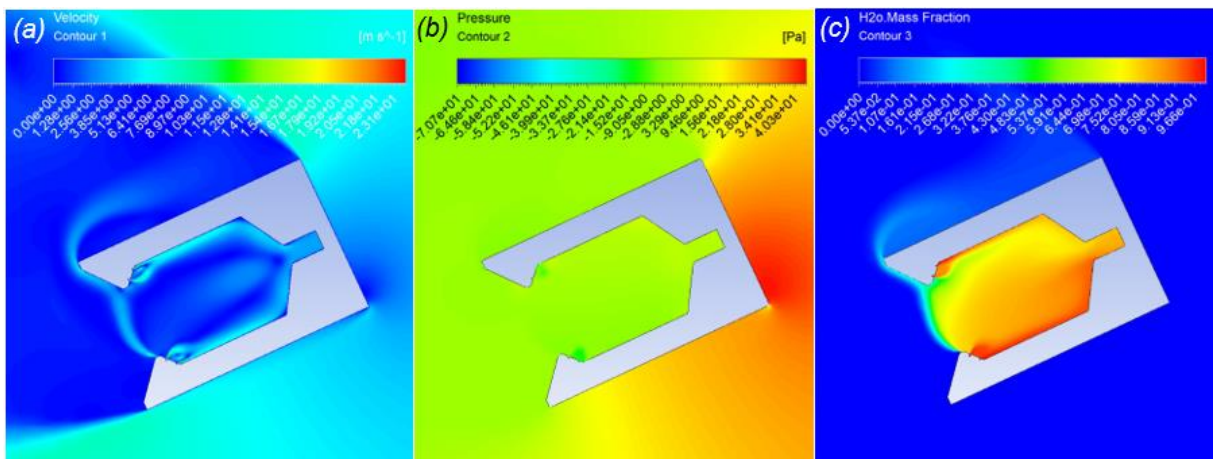


Figura 92: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie “mass frac. of H2O” (c), per la simulazione con vento da destra verso sinistra ad una velocità del vento,  $v_w$ , di  $5 \frac{m}{s}$

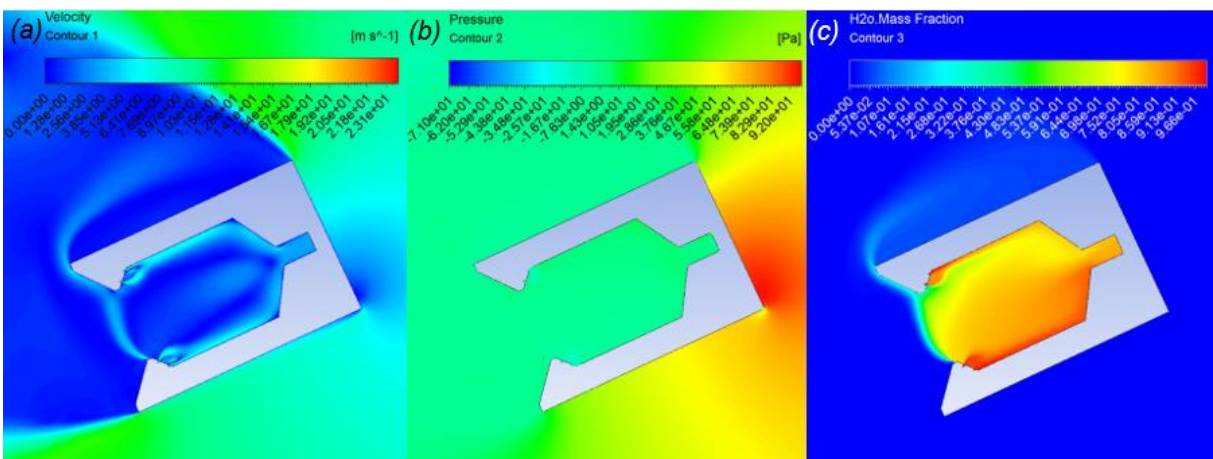


Figura 93: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie “mass frac. of H2O” (c), per la simulazione con vento da destra verso sinistra ad una velocità del vento,  $v_w$ , di  $7.5 \frac{m}{s}$

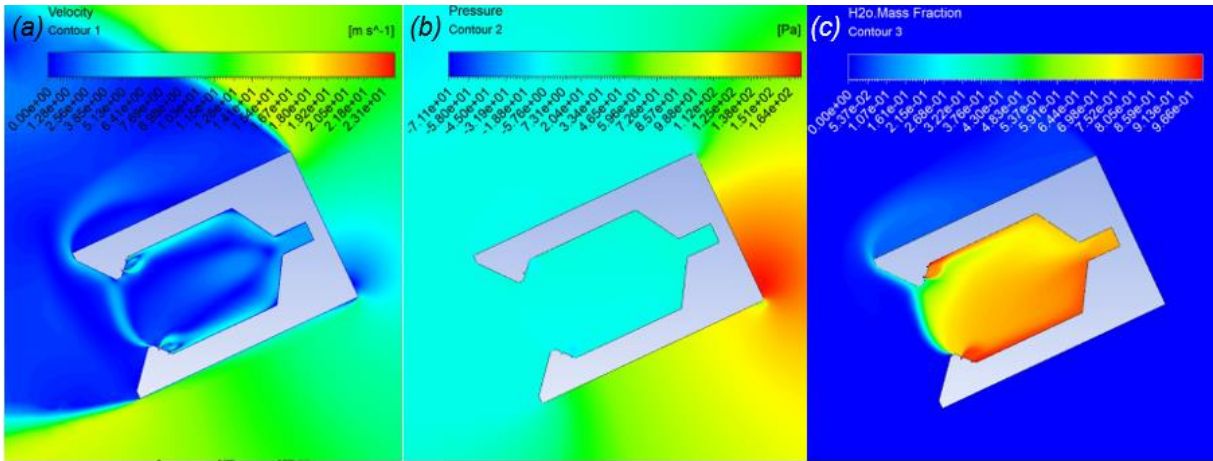


Figura 94: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie “mass frac. of H2O” (c), per la simulazione con vento da destra verso sinistra ad una velocità del vento,  $v_w$ , di  $10 \frac{m}{s}$

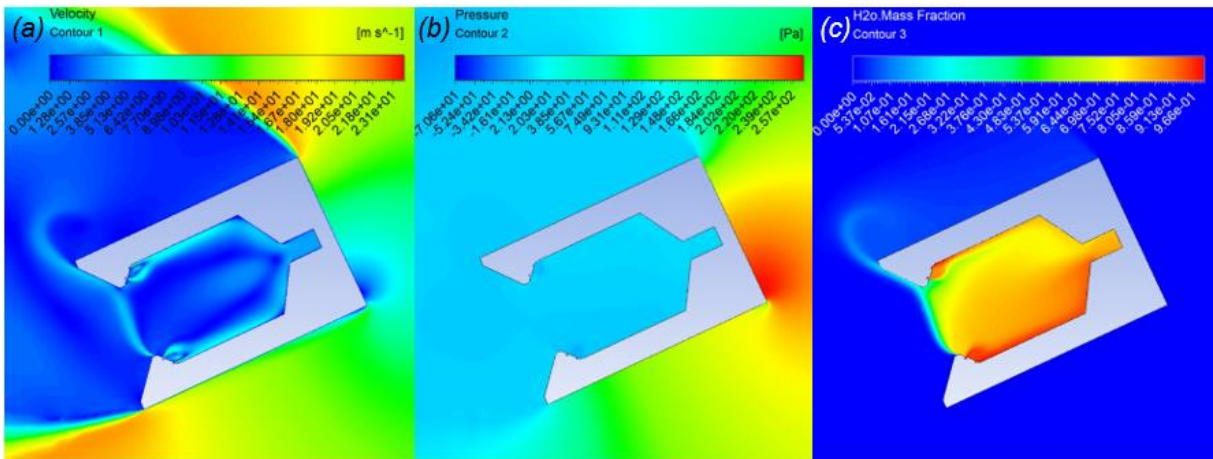


Figura 95: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie “mass frac. of H2O” (c), per la simulazione con vento da destra verso sinistra ad una velocità del vento,  $v_w$ , di  $12.5 \frac{m}{s}$

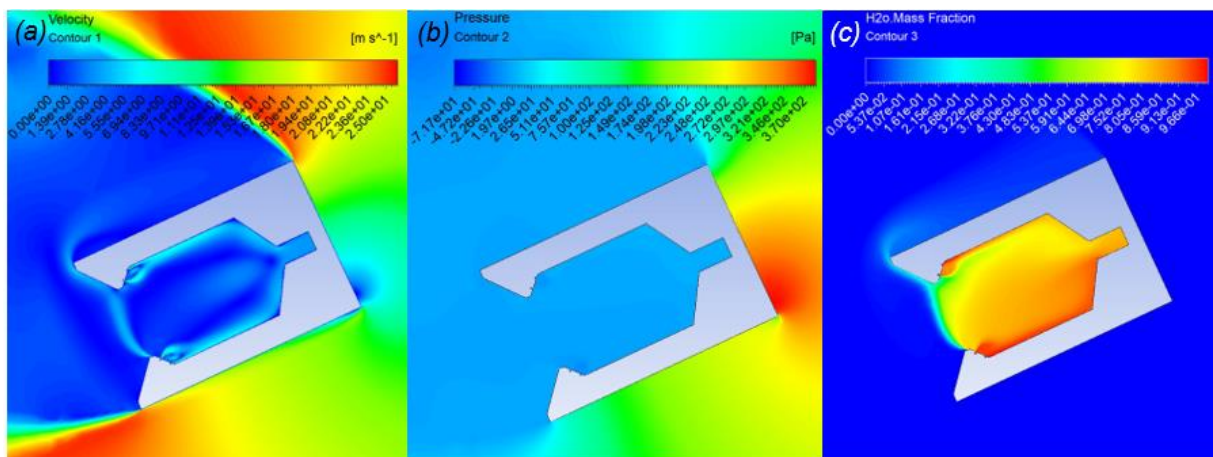
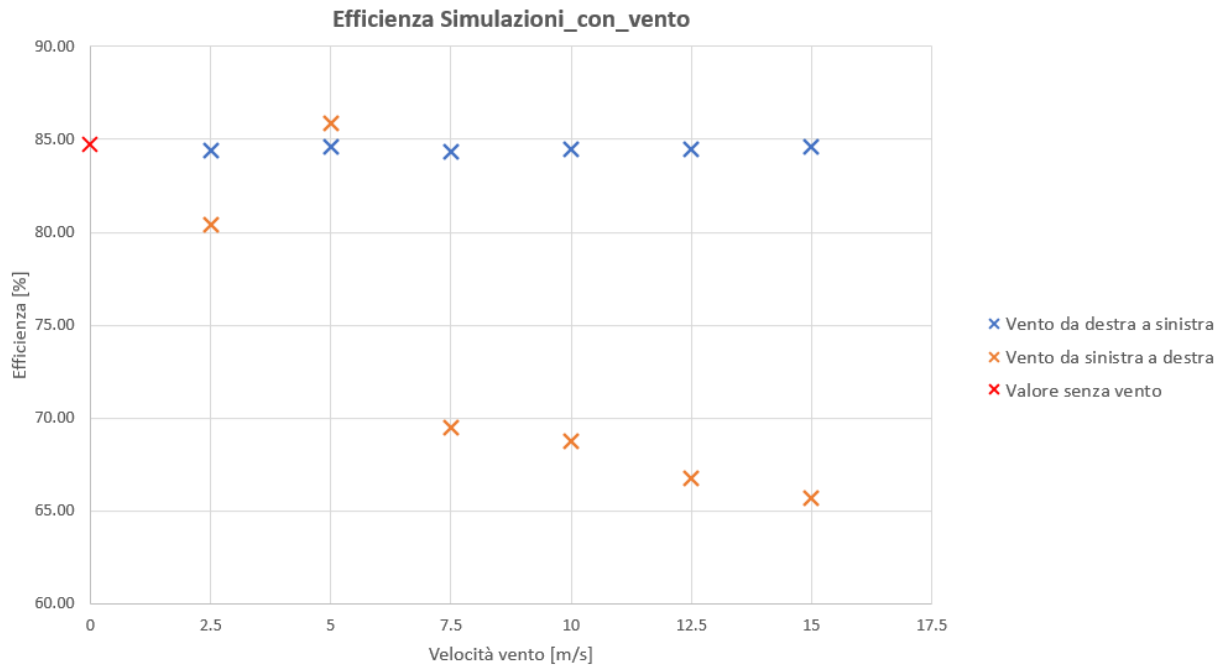


Figura 96: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie “mass frac. of H2O” (c), per la simulazione con vento da destra verso sinistra ad una velocità del vento,  $v_w$ , di  $15 \frac{m}{s}$



*Grafico 13: Valori di efficienza in funzione della velocità del vento*

Come mostrano i valori tabellati, i contour e più chiaramente il grafico, quando il vento fluisce da destra verso sinistra il ricevitore non risulta influenzato da quest'ultimo ed infatti i valori di efficienza alle varie velocità del vento risultano molto simili al caso senza vento.

Quando invece il vento fluisce da sinistra verso destra, a parte il caso con velocità del vento di  $2,5 \frac{m}{s}$ , il ricevitore riesce comunque a creare una sorta di isolamento, già notato anche nelle simulazioni eseguite per la variante 2 alle angolazioni  $\varphi$  di  $45^\circ$  e  $50^\circ$  ed alle velocità  $v$  di 30, 40 e  $50 \frac{m}{s}$ . I valori di efficienza decrescono all'aumentare della velocità del vento ma mantengono comunque valori piuttosto elevati, specialmente per il caso con velocità del vento pari a  $5 \frac{m}{s}$  (simulazione eseguita due volte per avere la conferma del risultato ottenuto) dove addirittura il valore di efficienza risulta maggiore della situazione senza vento.

Questa situazione era stata notata anche in alcuni progetti relativi alla lama d'aria, dove a particolari velocità del vento e con la cavità inclinata in un certo modo, le perdite di calore venivano ridotte.

Sono stati riportati i contour di tutte le simulazioni eseguite in presenza di vento in quanto è molto interessante notare come si evolvono le situazioni man mano che la velocità del vento aumenta.

Ovviamente ancora una volta va precisato che queste simulazioni si limitano ad osservare l'aspetto fluidodinamico del ricevitore. Probabilmente, se si dovesse valutare anche l'aspetto termodinamico, quando il vento soffia da sinistra verso destra i rendimenti diminuirebbero in quanto vi sarebbe dello scambio di calore tra l'ambiente esterno e il ricevitore; infatti il getto d'aria in questi casi non crea alcun velo di isolamento.

Interessante valutare anche la pressione all'uscita del ricevitore (grafico 14).

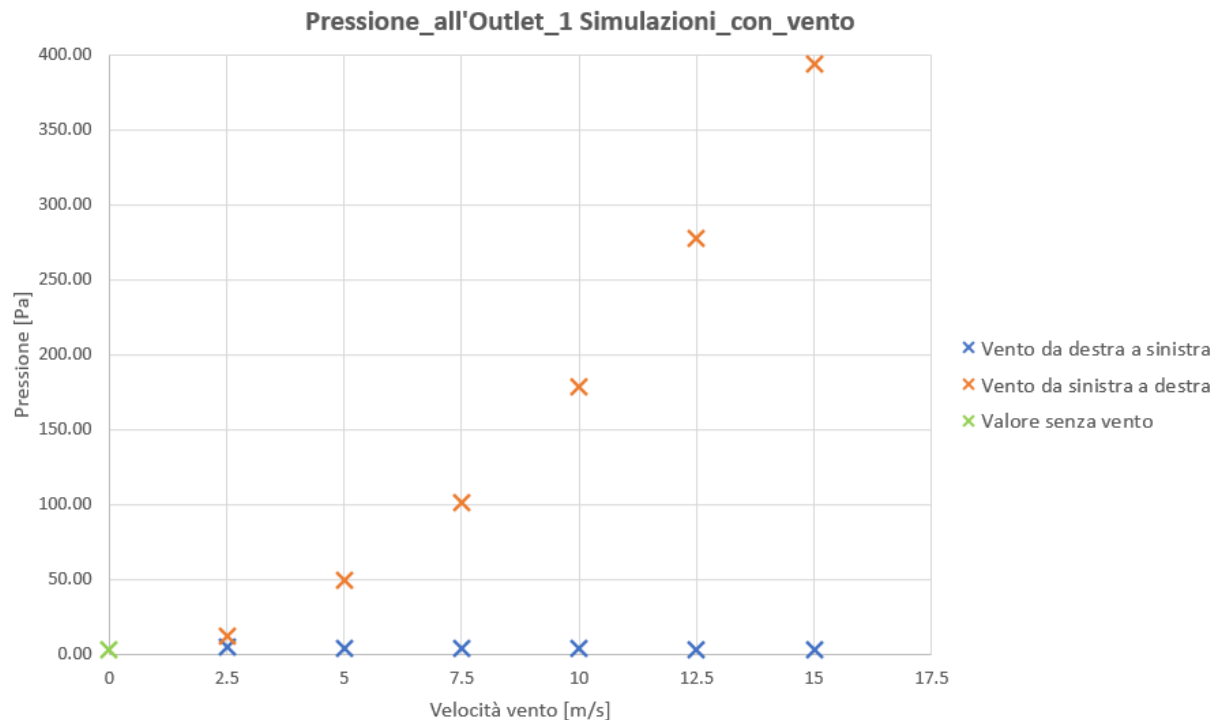


Grafico 14: Valori di pressione all'outlet 1 in funzione della velocità del vento

Come era possibile prevedere, quando il vento fluisce da sinistra verso destra, il valore della pressione all'outlet e all'interno del ricevitore aumenta all'aumentare della velocità del vento. Questo avviene in quanto impostando la condizione di "mass flow outlet" all'outlet 1, dall'uscita può fluire solo la quantità di portata impostata; questo produce un aumento notevole della pressione all'aumentare della velocità del vento in quanto all'interno del ricevitore vi è una grande quantità di aria che rallenta il suo corso in quanto trova l'uscita del ricevitore "tappata" (una sorta di imbuto).

Anche i contour di pressione mostrano la cavità del ricevitore che più aumenta la velocità del vento e più il colore rosso si intensifica, stando appunto ad indicare l'aumento della pressione all'interno della cavità.

Quando il vento fluisce da destra verso sinistra non si hanno invece particolari variazioni di pressione rispetto alla situazione senza vento.

## 11 Sviluppi futuri

Come già detto in precedenza, nel progetto è stata posta attenzione all'aspetto fluidodinamico del ricevitore. Per non appesantire le simulazioni e il costo computazionale, è stato trascurato lo scambio termico tra pareti interne del ricevitore e fluido termovettore.

In futuro potrebbe essere valutato anche l'aspetto termodinamico del ricevitore solare, così da avere una dinamica più completa e capire se effettivamente un sistema a lama d'aria applicato al ricevitore in questione sia conveniente.

Andrebbe valutato il rendimento termodinamico del ricevitore e combinato con l'efficienza già calcolata anche in questo progetto, legata alla quantità di fluido termovettore dispersa nell'ambiente esterno.

In secondo luogo potrebbe essere interessante valutare anche nuove posizioni di fuoriuscita del getto d'aria e paragonarle a quelle già analizzate.

Sono state svolte anche alcune simulazioni utilizzando due getti d'aria, ma visto che il ricevitore presentava già parecchi aspetti da chiarire, si è proceduto analizzando solamente configurazioni in cui è stato usato un solo getto d'aria. Nel rapporto non sono state infatti riportate le simulazioni eseguite con due getti d'aria in quando la convergenza non veniva raggiunta e non è quindi stato possibile certificare tali simulazioni. In futuro sarebbe curioso rivalutare anche delle simulazioni utilizzando più getti d'aria.

In questo lavoro di diploma sono state effettuate esclusivamente simulazioni in due dimensioni. Un futuro sviluppo dovrà sicuramente essere quello di effettuare delle simulazioni in tre dimensioni.

Anche in questo caso, in un primo momento andrebbe prediletto unicamente l'aspetto fluidodinamico del ricevitore e solo in un secondo momento anche quello termodinamico.

Questo in quanto risulta più semplice capire a chi attribuire determinati comportamenti del ricevitore quando vi sono meno impostazioni e fenomeni in atto.

Come in tutti i progetti sarebbe sicuramente molto interessante realizzare un prototipo in scala del ricevitore solare ed effettuare delle simulazioni reali in laboratorio, confrontandole con quelle computazionali. Infatti, come spesso accade, le simulazioni CFD possono differire dal caso reale e ovviamente finché il ricevitore non verrà testato anche concretamente, non si potrà avere la certezza che il sistema a lama d'aria funzioni.

## 12 Conclusioni

Dopo aver effettuato all'incirca 150 simulazioni, è risultato che sostituire la finestra di quarzo con un sistema a lama d'aria è sicuramente difficile ma non impossibile. Il getto d'aria infatti necessita di un'angolazione e una velocità ben precise affinché funzioni in maniera efficiente.

Durante le simulazioni eseguite si sono evidenziate alcune particolarità e alcuni fenomeni che hanno permesso di comprendere come lavora il sistema a lama d'aria integrato al ricevitore solare in esame. Va infatti ricordato che il ricevitore solare in oggetto è differente rispetto a quelli analizzati anche nello stato dell'arte e richiede una maggior attenzione; oltre a dover essere isolato termicamente, è altresì importante che non venga disperso vapore acqueo nell'ambiente esterno.

Sono state ottenute numerose simulazioni con valori di efficienza superiori all'80% valutando le perdite di vapore acqueo; questo sta ad indicare che una certa quantità di fluido termovettore finisce comunque per fuoriuscire dal ricevitore e non si ottiene per cui un isolamento perfetto della cavità.

Nello studio della variante 1, in alcune situazioni è stato notato un particolare vortice d'aria e vapore acqueo, all'interno del quale la velocità del vento decresce fino ad annullarsi in prossimità del centro, ma la pressione anziché aumentare diminuisce. Si è arrivati ad una conclusione plausibile che la diminuzione della pressione si potrebbe attribuire ad un fenomeno termodinamico sconosciuto, probabilmente frutto della miscelazione tra vapore acqueo e aria.

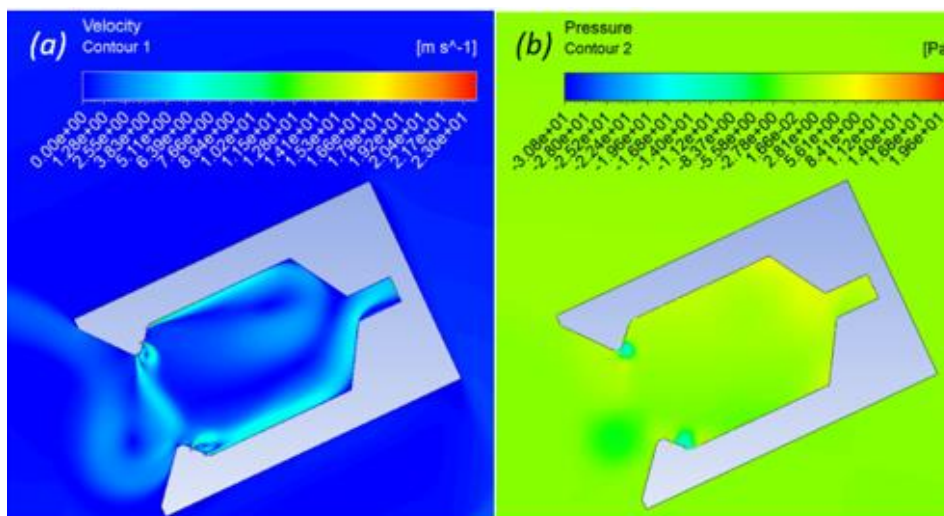


Figura 97: Variante 1: a sinistra si può osservare il vortice composto dalla miscela di aria e vapore acqueo; a destra si può vedere il valore della pressione all'interno del vortice che diminuisce

L'obiettivo della variante 2 è stato proprio quello di verificare se, con un flusso d'aria dal basso verso l'alto, il vortice continuasse a formarsi. Il risultato è stato piuttosto positivo: il vortice all'ingresso del ricevitore non è più stato riscontrato e, rispetto alla variante 1, parecchie configurazioni del getto d'aria hanno portato a rendimenti al di sopra dell'80 %.

La soluzione che isola meglio il ricevitore è risultata essere quella con il getto d'aria orientato ad un angolo  $\varphi$  di  $45^\circ$  e con una velocità  $v$  di  $20 \frac{m}{s}$ .

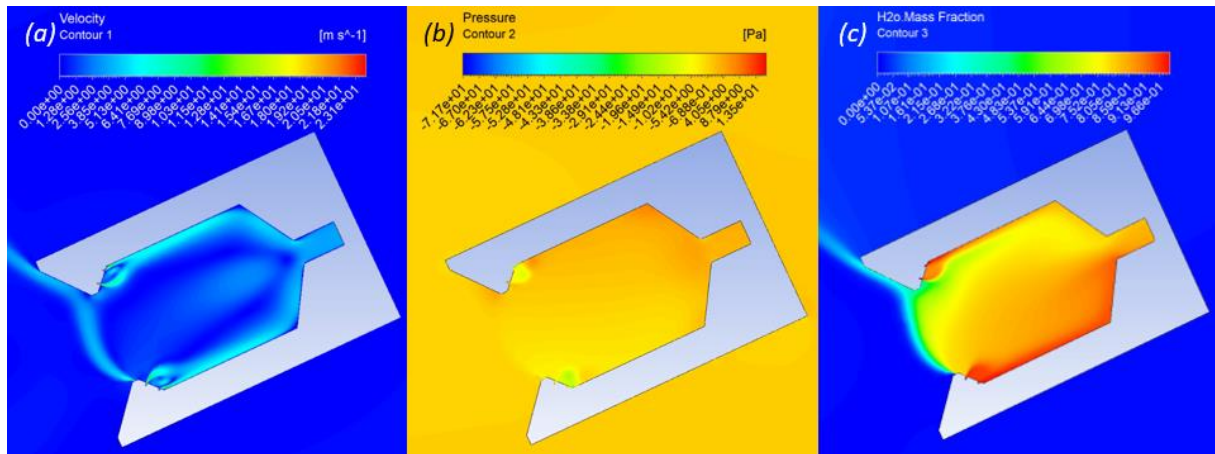


Figura 98: Variante 2: Miglior soluzione ottenuta; angolo di inclinazione del getto d'aria di  $45^\circ$  e velocità di  $20 \frac{m}{s}$

Nella variante 2, come si può notare chiaramente dai contour, una certa quantità di aria è penetrata comunque all'interno del ricevitore, probabilmente data la distanza ravvicinata del getto d'aria alla cavità.

Si è deciso allora di proseguire con lo studio di una terza variante in cui il getto d'aria è stato posto ad una distanza maggiore dalla cavità, più precisamente a metà strada tra l'estremo del ricevitore e la posizione della variante 2.

In questo caso i riscontri sono stati piuttosto negativi: in prossimità del getto d'aria si crea un vortice di depressione che influenza il getto d'aria e lo fa fluire interamente all'interno del ricevitore.

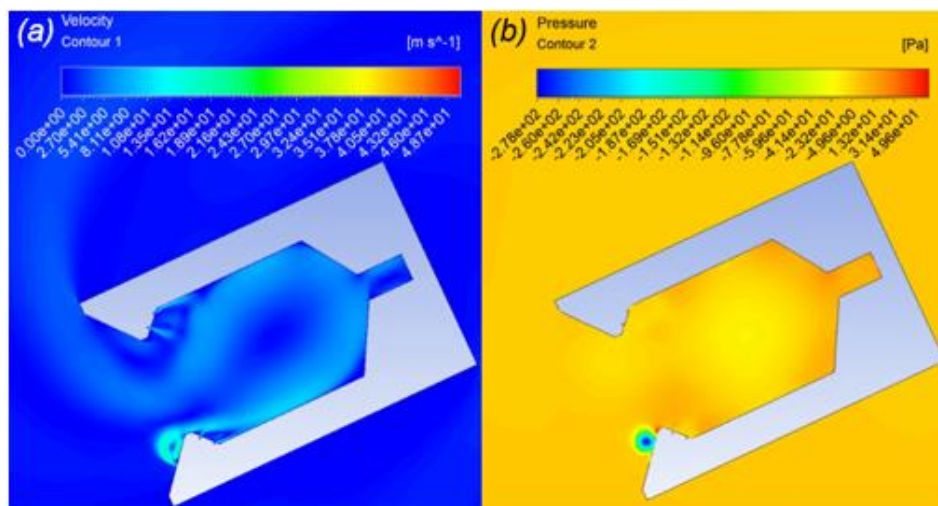


Figura 99: Variante 3: a sinistra si può osservare il flusso d'aria entrare completamente nel ricevitore; a destra si può vedere il buco di pressione che causa questo effetto

Sono stati fatti variare angoli e velocità senza ottenere un riscontro positivo.

È stata anche svolta un'analisi per verificare che la depressione non fosse dovuta ad una qualche impostazione legata al Fluent ed in particolare al modello di turbolenza o alla gravità. Non si è però riusciti ad evitare la formazione del vortice e si è arrivati alla conclusione che potrebbe quest'ultimo potrebbe formarsi a causa della geometria particolare del ricevitore.

Dopo aver concluso le simulazioni relative alle varianti, è stato esaminato anche come il fenomeno del vento influisce sul sistema a lama d'aria. In particolare è stata testata la simulazione che ha ottenuto l'efficienza maggiore ( $\varphi = 45^\circ$ ,  $v = 20 \frac{m}{s}$ ) in condizioni di vento in entrambe le direzioni.

Quando il vento soffia da destra verso sinistra, il sistema a lama d'aria riesce comunque ad isolare in maniera ottimale la cavità.

Quando invece il vento soffia da sinistra verso destra la lama d'aria smette di funzionare nel modo corretto. Nonostante questo i valori di efficienza mantengono comunque valori al di sopra del 65 %.

Come detto anche negli "Sviluppi futuri", il passo successivo è quello di valutare anche l'aspetto termodinamico del ricevitore, attivando lo scambio termico tra pareti del ricevitore e fluido termovettore. Una volta fatto questo andrebbero combinati i due valori di efficienza per poter trarre delle conclusioni finali.

Bisognerebbe avere inoltre ulteriori informazioni su ogni quanto la finestra di quarzo è soggetta alla rottura e su quanto tempo l'impianto deve rimanere fuori servizio per poter permettere agli operai di riparare o sostituire la finestra.

Valutando attentamente i costi della finestra e le perdite di denaro che si hanno quando il ricevitore è fuori servizio, si potrà decretare se effettivamente il sistema a lama d'aria potrebbe essere una buona variante alla finestra di quarzo.



## Bibliografia

- [1] *Experimental insights into the mechanism of heat losses from a cylindrical solar cavity receiver equipped with an air curtain: Elham Alipourtarzanagh, Alfonso Chinnici, Graham J. Nathan, Bassam B. Dally; Australia, 2020*
- [2] *Reducing convective heat losses in solar dish cavity receivers through a modified air-curtain system: Song Yanga, Jun Wang, Peter D. Lunda, Siyu Wang, Chuan Jiang; China and Finland, 2018*
- [3] *Active air flow control to reduce cavity receiver heat loss: J. Jack Zhang, John. D. Pye, Graham O. Hughes; Australia, 2015*
- [4] *Use of an Air Curtain to reduce Heat Loss from an Inclined Open-Ended Cavity: A. McIntosh, G. Hughes and J. Pye; Australia, 2014*
- [5] *Corso di “Energie rinnovabili e sistemi di stoccaggio”; Ing. Simone Zavattoni, Ing. Maurizio Barbato, Ing. Davide Montorfano*
- [6] *Corso di “Fluidodinamica”; Ing. Maurizio barbato, Ing Luca Cornolti*
- [7] *Corso di “Termodinamica”; Ing. Maurizio Barbato, Ing. Simone Zavattoni*
- [8] *Corso di “Termofluidodinamica Computazionale CFD”; Ing Maurizio Barbato, Ing Simone Zavattoni*

## Fonti di immagini e grafici

- [P.1] <https://www.travelworld.it/marocco-la-centrale-di-energia-solare-di-ouarzazate/>
- [P.2] <https://www.peacelink.it/ecodidattica/a/42669.html>
- [P.3] *Experimental testing of a solar air cavity-receiver with reticulated porous ceramic absorbers for thermal processing at above 1000 °C; Vikas R. Patil, Fabio Kiener, Adrian Grylka, Aldo Steinfeld; Svizzera, 2021*
- [P.4] *Documento del progetto consegnato*
- [P.5] <https://www.magugliani.it/exair-prodotti-ad-aria-compressa/generatori-di-barriere-d-aria/generatori-di-barriere-d-aria-super/>
- [P.6] [https://www.frico.net/fileadmin/user\\_upload/frico/Pdf/13-Katalog\\_aircurtains\\_Teknisk-handbok\\_it.pdf](https://www.frico.net/fileadmin/user_upload/frico/Pdf/13-Katalog_aircurtains_Teknisk-handbok_it.pdf)
- [P.7] [https://www.frico.net/fileadmin/user\\_upload/frico/Pdf/13-Katalog\\_aircurtains\\_Teknisk-handbok\\_it.pdf](https://www.frico.net/fileadmin/user_upload/frico/Pdf/13-Katalog_aircurtains_Teknisk-handbok_it.pdf)
- [P.8] <https://www.pcmag.com/gdpr-policy?url=https%3A%2F%2Fwww.pcmag.com%2Farticles%2F86681-advanced-oven-technology-the-air-barrier-heat-seal>
- [P.9] <https://www.pcmag.com/gdpr-policy?url=https%3A%2F%2Fwww.pcmag.com%2Farticles%2F86681-advanced-oven-technology-the-air-barrier-heat-seal>
- [P.10] <https://it.weatherspark.com/y/53024/Condizioni-meteorologiche-medie-a-Hassi-Messaoud-Algeria-tutto-l%27anno>

## Appendici

Di seguito si riporta la sequenza con cui verranno esposti gli allegati.

**Error** Contour per le simulazioni della variante 1

**e.**

**L'ori**

**gine**

**riferi**

**ment**

**o**

**non**

**è**

**stata**

**trova**

**ta.**

A.2 Contour per le simulazioni della variante 2

## Allegati

C.1 Diagramma di Gantt

**Error** Dimensioni-ricevitore

**e.**

**L'ori**

**gine**

**riferi**

**ment**

**o**

**non**

**è**

**stata**

**trova**

**ta.**

C.3 Proprietà dell'aria: Estratto Cengel and Cimbala, Fluid Mechanics Fundamentals and Applications, Ed. 3, McGraw-Hill, 2014

C.4 Computational Fluid Dynamics in Food Processing – Deflectionmodulus

C.5 Contour varianti 1 e 2

## Indice delle figure

Figura 1: Impianto solare Noor 3 (Quarzazate, Marocco) con campo a 360° intorno alla torre [P.1] ...	11
Figura 2: Impianto solare PS10 (Siviglia, Spagna) con campo a nord della torre [P.2].....	12
Figura 3: Esempio di ricevitore solare a cavità; le frecce gialle indicano il percorso di un generico raggio solare; si può notare come il raggio ribalza sulle pareti del ricevitore senza però uscire [P.3] .	12
Figura 4: Ricevitore solare a cavità con finestra (window) [P.4] .....	13
Figura 5: Asciugatura di componenti verniciati in una catena di produzione [P.5] .....	14
Figura 6: Funzionamento semplificato porta a lama d'aria [P.6] .....	14
Figura 7: Confronto tra porta a lama d'aria spenta e in funzione durante la stagione invernale: a sinistra viene raffigurato l'ambiente esterno all'edificio e a destra quello interno [P.7].....	15
Figura 8: Forno industriale con porta a lama d'aria [P.8] .....	15
Figura 9: Ricevitore solare a cavità utilizzato da Elham Alipourtarzanagh, Alfonso Chinnici, Graham J. Nathan e Bassam B. Dally .....	17
Figura 10: Ricevitore solare modellato da Song Yanga, Jun Wanga, Peter D. Lunda, Siyu Wanga, Chuan Jiang .....	18
Figura 11: Risultati ottenuti applicando salti di pressione differenti con un'inclinazione $\theta$ del ricevitore di $-15^\circ$ .....	19
Figura 12: Linee di flusso con valori di temperatura localizzati con ricevitore posto a $\theta = -30^\circ$ : nella figura (a) il salto di pressione è di $-20 Pa$ , nella figura (b) il salto di pressione è di $-30 Pa$ .....	20
Figura 13: Contour di temperatura delle superfici di fondo del ricevitore (bottom), di mezzo (middle) e esterna (top) .....	20
Figura 14: Dimensioni e parametri del ricevitore a cavità .....	21
Figura 15: Soluzione con cavità posta a $30^\circ$ : (a) senza lama d'aria, (b) parzialmente sigillata con lama d'aria a velocità $v = 1ms$ e angolo di inclinazione $\varphi = 10^\circ$ , (c) completamente sigillata con lama d'aria a velocità $v = 2ms$ e angolo di inclinazione $\varphi = -10^\circ$ .....	22
Figura 16: Soluzione con cavità posta a $45^\circ$ : (a) senza lama d'aria, (b) parzialmente sigillata con lama d'aria a velocità $v = 1ms$ e angolo di inclinazione $\varphi = 10^\circ$ , (c) completamente sigillata con lama d'aria a velocità $v = 2ms$ e angolo di inclinazione $\varphi = -10^\circ$ .....	22
Figura 17: Situazione con cavità posto a $30^\circ$ , velocità del getto d'aria $v = 5ms$ , angolo di inclinazione del getto $\varphi = 10^\circ$ .....	23
Figura 18: Valori di efficacia in funzione della velocità e dell'inclinazione del getto e dell'inclinazione della cavità: (a) angolo di inclinazione della cavità $\theta = 0^\circ$ , (b) $\theta = 15^\circ$ , (c) $\theta = 30^\circ$ , (d) $\theta = 45^\circ$ .....	23
Figura 19: Ricevitore usato per lo studio dai ricercatori A. McIntosh, G. Hughes e J. Pye .....	24
Figura 20: Confronto tra soluzione senza lama d'aria (sinistra) e lama d'aria (destra) con cavità posta a $\theta = 45^\circ$ e velocità del getto d'aria $v = 0,6ms$ .....	24
Figura 21: Ricevitore solare a cavità modellato in 3D .....	28
Figura 22: Nell'immagine viene mostrato il funzionamento del ricevitore: le frecce gialle rappresentano la radiazione solare concentrata dagli specchi che entrano nel ricevitore e scaldano le pareti interne; le frecce "grandi" rosse rappresentano il calore emesso dalle pareti che scaldano il flusso termovettore; le altre frecce rappresentano il percorso seguito dal vapore acqueo. Il differente colore delle frecce indica l'aumento di temperatura a cui è soggetto il fluido termovettore. ....	28
Figura 23: Dimensioni ricevitore [C.2] .....	29
Figura 24: Ricevitore inclinato di $25^\circ$ durante il suo funzionamento .....	30
Figura 25: Geometria usata per le prime simulazioni; la freccia rossa indica da dove fuoriesce il getto d'aria, mentre il cerchio rosso indica l'impianto installato sul ricevitore per generare il getto d'aria.....	32
Figura 26: Nuova posizione di fuoriuscita del getto d'aria; la freccia rossa indica da dove fuoriesce il getto d'aria e il possibile percorso che dovrebbe compiere per isolare la cavità .....	33
Figura 27: Dominio computazionale usato per le prime simulazioni.....	33
Figura 28: Rappresentazione grafica della variante 1 .....	34
Figura 29: Rappresentazione grafica della variante 2.....	35
Figura 30: Rappresentazione grafica della variante 3.....	35

Figura 31: Rappresentazione di una geometria realizzata con Design-Modeler .....	36
Figura 32: Meshatura di una delle geometrie create.....	36
Figura 33: Named Selection assegnate .....	37
Figura 34: Settaggio delle impostazioni generali di Fluent .....	37
Figura 35: Settaggio delle impostazioni legate al modello di turbolenza "k-epsilon" .....	38
Figura 36: Settaggio delle impostazioni legate al trattamento alla parete del fluido .....	38
Figura 37: Settaggio delle impostazioni legate all'equazione delle specie .....	39
Figura 38: Settaggio delle impostazioni legate alla miscela .....	39
Figura 39: Settaggio delle impostazioni legate al vapore acqueo.....	39
Figura 40: Settaggio delle impostazioni legate all'aria .....	40
Figura 41: Rappresentazione delle "Named Selection" e delle "boundary conditions" associate. A sinistra è raffigurato l'intero dominio computazionale, mentre a destra viene è rappresentato un ingrandimento del ricevitore solare .....	41
Figura 42: Impostazione legate ai metodi risolutivi utilizzati per risolvere le equazioni .....	42
Figura 43: Illustrazione degli ingressi del vapore acqueo .....	45
Figura 44: Generatore del flusso d'aria .....	46
Figura 45: Rappresentazione delle "Named Selection" e delle "boundary conditions" associate. A sinistra è raffigurato l'intero dominio computazionale, mentre a destra viene è rappresentato un ingrandimento del ricevitore solare .....	47
Figura 46: Geometria del ricevitore solare; il cerchio rosso indica l'outlet 1 .....	50
Figura 47: Interno del ricevitore.....	50
Figura 48: Contour di velocità (sinistra) e pressione (destra) della simulazione dell'interno del ricevitore .....	51
Figura 49: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H <sub>2</sub> O" (c), con condizione di "pressure outlet" pari a 0 Pa .....	54
Figura 50: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H <sub>2</sub> O" (c) con condizione di "mass flow outlet" pari a 0.1278kgs .....	54
Figura 51: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H <sub>2</sub> O" (c) con condizione di "pressure outlet" pari a 5.298 Pa .....	55
Figura 52: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H <sub>2</sub> O" (c) con condizione di "mass flow outlet" pari a 0.1389kgs .....	55
Figura 53: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H <sub>2</sub> O" (c) con condizione di "pressure outlet" pari a 5.236 Pa .....	55
Figura 54: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H <sub>2</sub> O" (c) con condizione di "pressure outlet" pari a 0 Pa .....	56
Figura 55: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H <sub>2</sub> O" con condizione di "mass flow outlet" pari a 0.1278kgs .....	56
Figura 56: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H <sub>2</sub> O" (c) con condizione di "pressure outlet" pari a -2.429 Pa .....	56
Figura 57: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H <sub>2</sub> O" (c) con condizione di "mass flow outlet" pari a 0.1400kgs .....	57
Figura 58: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H <sub>2</sub> O" (c) con condizione di "pressure outlet" pari a -4.348 Pa .....	57
Figura 59: Confronto tra condizione "pressure outlet" pari a 0 Pa (sinistra) e condizione di "mass flow outlet" con valore di portata in uscita pari al valore di portata massica di vapore in entrata (destra) per la simulazione con $v = 50ms$ e $\varphi = 35^\circ$ ; in entrambi i casi le velocità sono state scale da 0 a 10ms per evidenziare meglio le differenze di velocità.....	58
Figura 60: Rappresentazione della variante 1, la freccia in rosso indica la posizione da cui fuoriesce il getto d'aria.....	59
Figura 61: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H <sub>2</sub> O" (c) con velocità del getto pari a 20ms e angolo di inclinazione di 25° .....	61

Figura 62: Rappresentazione dei vettori velocità: a sinistra colorati per intensità di velocità, a destra colorati per specie (mass frac of H <sub>2</sub> O) .....	62
Figura 63: A sinistra il contour di pressione per la simulazione con velocità del getto pari a 20ms e angolo di inclinazione di 25°; variazione nella scala di colori. Si può vedere il vortice di depressione all'ingresso del ricevitore; A destra il vortice rappresentato dai vettori colorati per pressione.....	62
Figura 64: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H <sub>2</sub> O" (c) con velocità del getto pari a 50ms e angolo di inclinazione di 40° .....	63
Figura 65: Rappresentazione della variante 2, la freccia in rosso indica la posizione da cui fuoriesce il getto d'aria.....	64
Figura 66: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H <sub>2</sub> O" (c) con velocità del getto pari a 20ms e angolo di inclinazione di 45° .....	66
Figura 67: Rappresentazioni dei vettori per il caso con velocità del getto pari a 20ms e angolo di inclinazione di 45°; a sinistra colorati per intensità di velocità e a destra colorati per specie .....	67
Figura 68: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H <sub>2</sub> O" (c) con velocità del getto pari a 30 m/s e angolo di inclinazione di 50° .....	67
Figura 69: Rappresentazione della variante 3, la freccia in rosso indica la posizione da cui fuoriesce il getto d'aria.....	69
Figura 70: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H <sub>2</sub> O" (c) con velocità del getto pari a 30ms e angolo di inclinazione di 25° .....	69
Figura 71: Focus dei vettori velocità intorno alla depressione per la simulazione con velocità del getto pari a 30ms e angolo di inclinazione di 25°. Al centro del vortice la velocità è nulla. ....	70
Figura 72: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H <sub>2</sub> O" (c) con velocità del getto pari a 50ms e angolo di inclinazione di 25° .....	70
Figura 73: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H <sub>2</sub> O" (c) con velocità del getto pari a 30ms e angolo di inclinazione di 35° .....	71
Figura 74: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H <sub>2</sub> O" (c) con velocità del getto pari a 50ms e angolo di inclinazione di 35° .....	71
Figura 75: Focus sul buco di pressione della simulazione con velocità del getto pari a 50ms e angolo di inclinazione di 35°.....	71
Figura 76: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H <sub>2</sub> O" (c) con velocità del getto pari a 50ms e angolo di inclinazione di 35° con modello di turbolenza "k-epsilon standard" con l'opzione "full bouyancy effects" .....	72
Figura 77: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H <sub>2</sub> O" (c) con velocità del getto pari a 50ms e angolo di inclinazione di 35° con modello di turbolenza "k-epsilon standard" senza l'opzione "full bouyancy effects" .....	72
Figura 78: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H <sub>2</sub> O" (c) con velocità del getto pari a 50ms e angolo di inclinazione di 35° con modello di turbolenza "k-epsilon standard" senza l'opzione "full bouyancy effects" a lunga durata [120'000 iterazioni].....	73
Figura 79: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H <sub>2</sub> O" (c) con velocità del getto pari a 50ms e angolo di inclinazione di 35° con modello di turbolenza "k-epsilon standard" senza l'opzione "full bouyancy effects" e senza gravità [57'000 iterazioni] .....	73
Figura 80: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H <sub>2</sub> O" (c) con velocità del getto pari a 50ms e angolo di inclinazione di 35° con modello di turbolenza "k-epsilon standard" senza l'opzione "full bouyancy effects" e senza gravità utilizzando solo la condizione di "pressure outlet" all'outlet 1 .....	73
Figura 81: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H <sub>2</sub> O" (c) con velocità del getto pari a 50ms e angolo di inclinazione di 35° con modello di turbolenza "k-epsilon standard" senza l'opzione "full bouyancy effects" e senza gravità con getto d'aria a temperatura ambiente (300 K) ....	74
Figura 82: Focus sul buco di pressione della simulazione con velocità del getto pari a 50ms e angolo di inclinazione di 35° con modello di turbolenza "k-epsilon standard" con l'opzione "full bouyancy effects" .....	74
Figura 83: Indicazione della direzione del vento .....	76

Figura 84: Modifica delle boundary condition per le simulazioni con vento .....	77
Figura 85: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H2O" (c), per la simulazione con vento da sinistra verso destra ad una velocità del vento, $v_w$ , di 2.5ms .....	79
Figura 86: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H2O" (c), per la simulazione con vento da sinistra verso destra ad una velocità del vento, $v_w$ , di 5ms .....	79
Figura 87: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H2O" (c), per la simulazione con vento da sinistra verso destra ad una velocità del vento, $v_w$ , di 7.5ms .....	79
Figura 88: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H2O" (c), per la simulazione con vento da sinistra verso destra ad una velocità del vento, $v_w$ , di 10ms .....	80
Figura 89: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H2O" (c), per la simulazione con vento da sinistra verso destra ad una velocità del vento, $v_w$ , di 12.5ms .....	80
Figura 90: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H2O" (c), per la simulazione con vento da sinistra verso destra ad una velocità del vento, $v_w$ , di 15ms .....	80
Figura 91: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H2O" (c), per la simulazione con vento da destra verso sinistra ad una velocità del vento, $v_w$ , di 2.5ms .....	81
Figura 92: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H2O" (c), per la simulazione con vento da destra verso sinistra ad una velocità del vento, $v_w$ , di 5ms .....	81
Figura 93: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H2O" (c), per la simulazione con vento da destra verso sinistra ad una velocità del vento, $v_w$ , di 7.5ms .....	81
Figura 94: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H2O" (c), per la simulazione con vento da destra verso sinistra ad una velocità del vento, $v_w$ , di 10ms .....	82
Figura 95: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H2O" (c), per la simulazione con vento da destra verso sinistra ad una velocità del vento, $v_w$ , di 12.5ms .....	82
Figura 96: Contour di velocità (a), pressione (b) e specie "mass frac. of H2O" (c), per la simulazione con vento da destra verso sinistra ad una velocità del vento, $v_w$ , di 15ms .....	82
Figura 97: Variante 1: a sinistra si può osservare il vortice composto dalla miscela di aria e vapore acqueo; a destra si può vedere il valore della pressione all'interno del vortice che diminuisce .....	86
Figura 98: Variante 2: Miglior soluzione ottenuta; angolo di inclinazione del getto d'aria di 45° e velocità di 20ms .....	87
Figura 99: Variante 3: a sinistra si può osservare il flusso d'aria entrare completamente nel ricevitore; a destra si può vedere il buco di pressione che causa questo effetto .....	87

## Indice delle tabelle

Tabella 1: Geometrie utilizzate nei progetti analizzati nello stato dell'arte.....	26
Tabella 2: Temperature utilizzate nei progetti visionati nello stato dell'arte.....	27
Tabella 3: Parametri utilizzati nei progetti visionati nello stato dell'arte.....	27
Tabella 4: Coefficienti dei polinomi di conducibilità termica e viscosità dinamica.....	41
Tabella 5: Raccolta ed elaborazione dei dati estrapolati dalle simulazioni eseguite con il calcolo iterativo; angolo del getto d'aria a $\varphi = 35^\circ$ .....	53
Tabella 6: Raccolta ed elaborazione dei dati estrapolati dalle simulazioni eseguite con il calcolo iterativo; angolo del getto d'aria a $\varphi = 10^\circ$ .....	53
Tabella 7: Raccolta ed elaborazione dei dati estrapolati dalle simulazioni eseguite per la variante 1.....	60
Tabella 8: Raccolta ed elaborazione dei dati estrapolati dalle simulazioni eseguite per la variante 2.....	65
Tabella 9: Valori di pressione all'inlet del getto d'aria e all'outlet del ricevitore.....	75
Tabella 10: Raccolta ed elaborazione dei dati estrapolati dalle simulazioni con condizione di vento.....	78

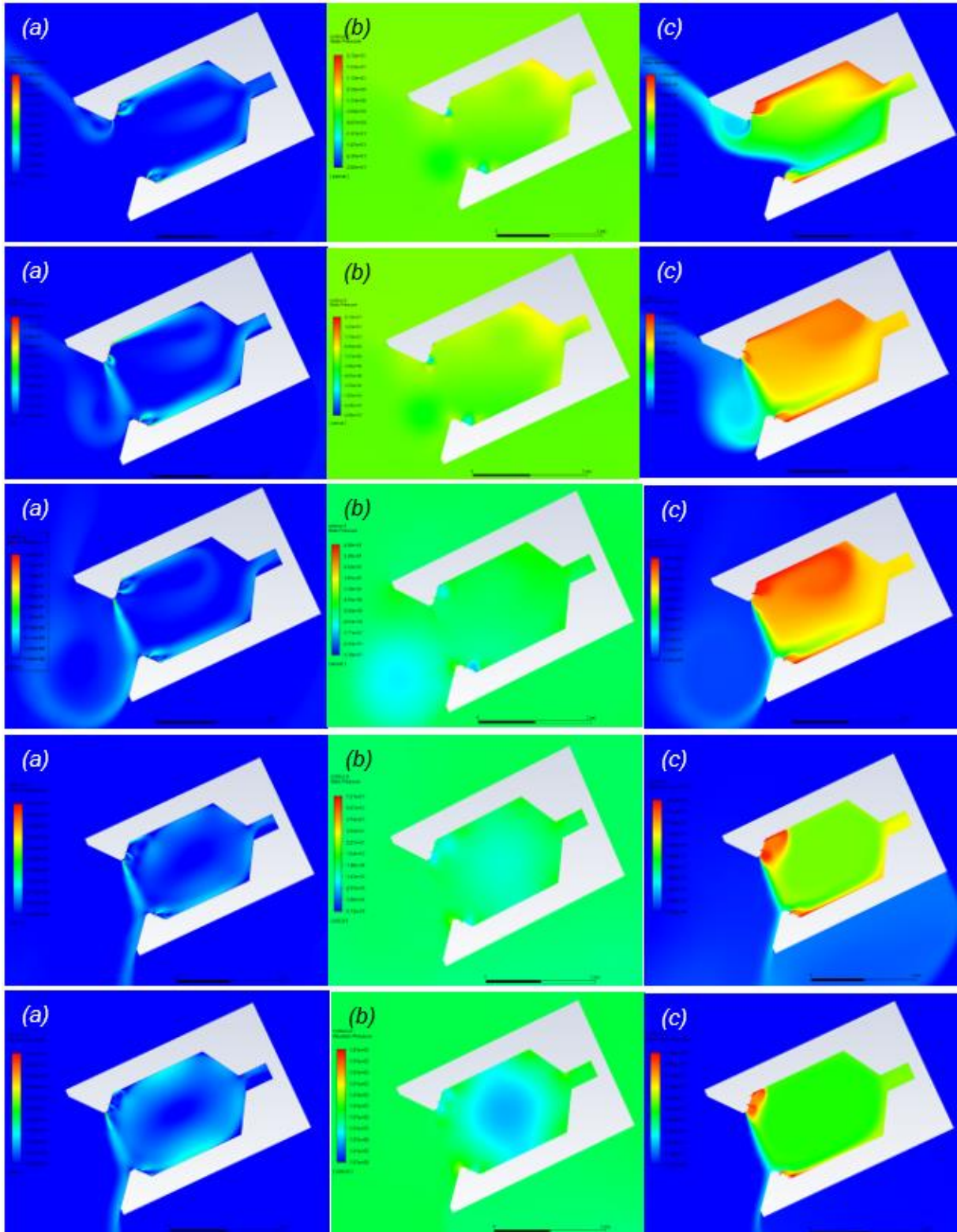
## Indice dei grafici

Grafico 1: Andamento dei costi in funzione della temperatura del forno durante l'apertura dello sportello [P.9].....	16
Grafico 2: Valori di efficienza in funzione della velocità del getto d'aria e del vento.....	17
Grafico 3: Valori di efficienza in funzione della velocità del getto d'aria e del vento.....	18
Grafico 4: Rappresentazione delle perdite convettive in funzione dell'inclinazione del ricevitore e del salto di pressione.....	21
Grafico 5: Valori di efficienza in funzione della velocità del getto d'aria e dell'inclinazione della cavità.....	25
Grafico 6: Possibile sistema a lama d'aria applicato al ricevitore. L'immagine è a puro scopo illustrativo. Le frecce blu indicano l'aria che fuoriesce dal sistema.....	29
Grafico 7: Andamento della conducibilità termica in funzione della temperatura. La linea blu rappresenta la curva ricavata dai dati tabellati, la linea rossa rappresenta il polinomio approssimativo di secondo ordine.....	40
Grafico 8: Andamento della viscosità dinamica in funzione della temperatura. La linea blu rappresenta la curva ricavata dai dati tabellati, la linea rossa rappresenta il polinomio approssimativo di secondo ordine.....	40
Grafico 9: Andamento del modulo di deflessione in funzione del rapporto $Hb0$ [C.4].....	44
Grafico 10: Valori di efficienza della variante 1 in funzione della velocità del getto e dell'angolo di inclinazione.....	61
Grafico 11: Valori di efficienza per la variante 2 in funzione della velocità del getto e dell'angolo di inclinazione.....	66
Grafico 12: Andamento della velocità del vento nella città di Hassi Messaouduna [P.10].....	76
Grafico 13: Valori di efficienza in funzione della velocità del vento.....	83
Grafico 14: Valori di pressione all'outlet 1 in funzione della velocità del vento.....	84

## A.1. Contour per le simulazioni della variante 1

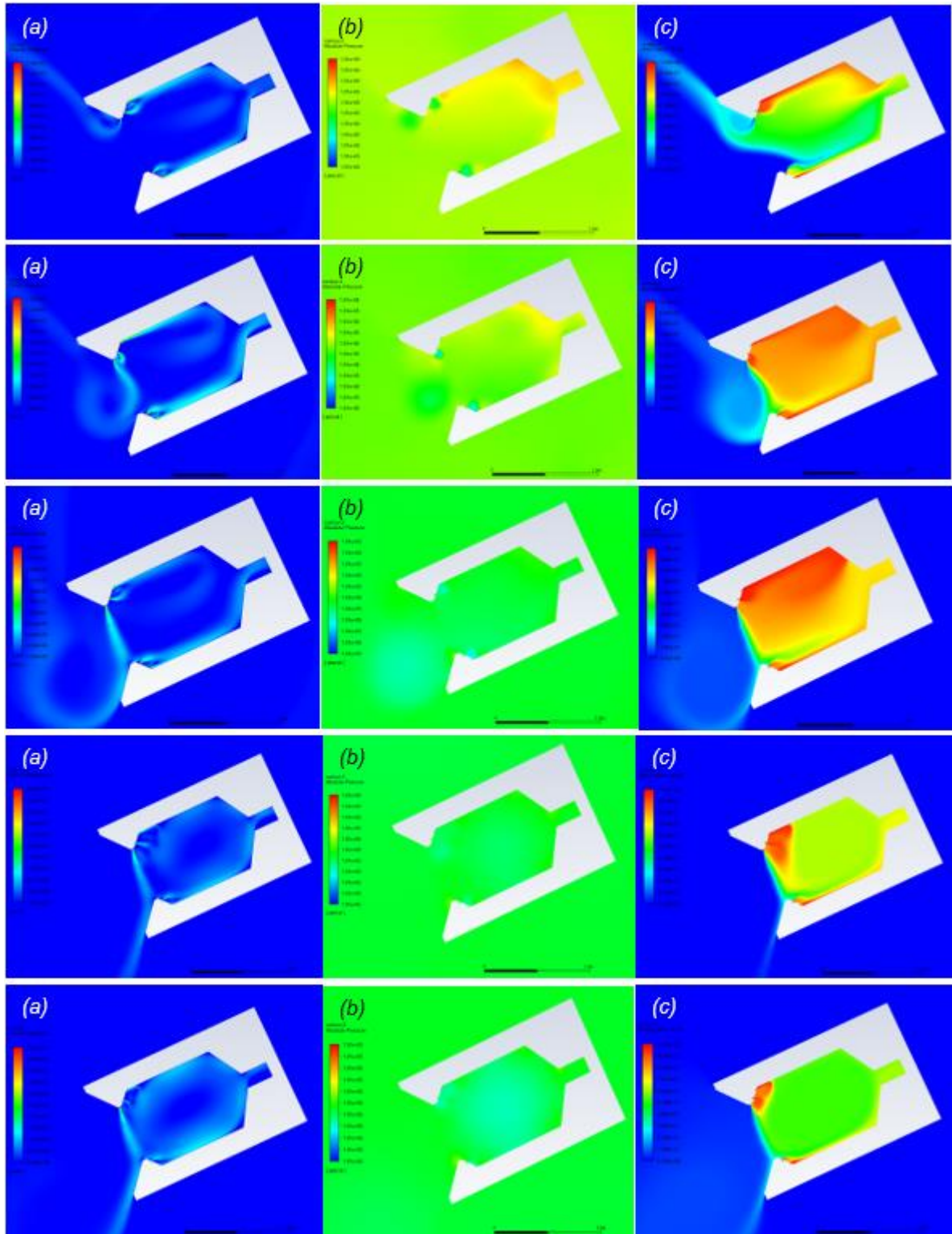
Di seguito vengono mostrati qualitativamente i contour di velocità (a), pressione (b) e specie (c) delle simulazioni eseguite per la variante 1. Lo scopo è quello di facilitare la visualizzazione grafica di tutte le simulazioni eseguite ed in caso di necessità è possibile indentificare in maniera rapida la simulazione di interesse ed andarla ad osservare meglio negli allegati.

Angolo di inclinazione del getto d'aria  $\varphi = 10^\circ$ , velocità  $v$  a 10, 20, 30, 40 e  $50 \frac{m}{s}$  (dall'alto verso il basso)

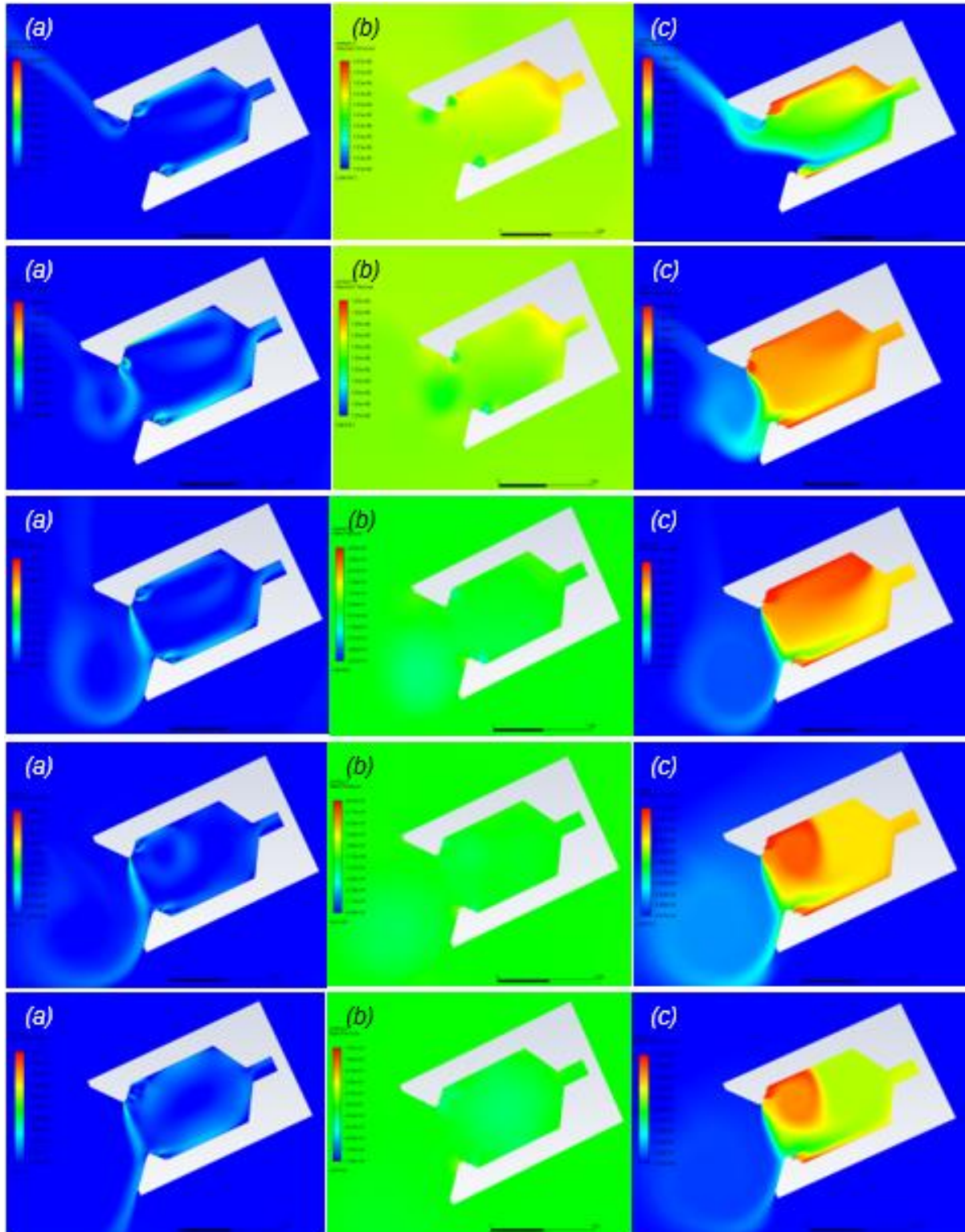




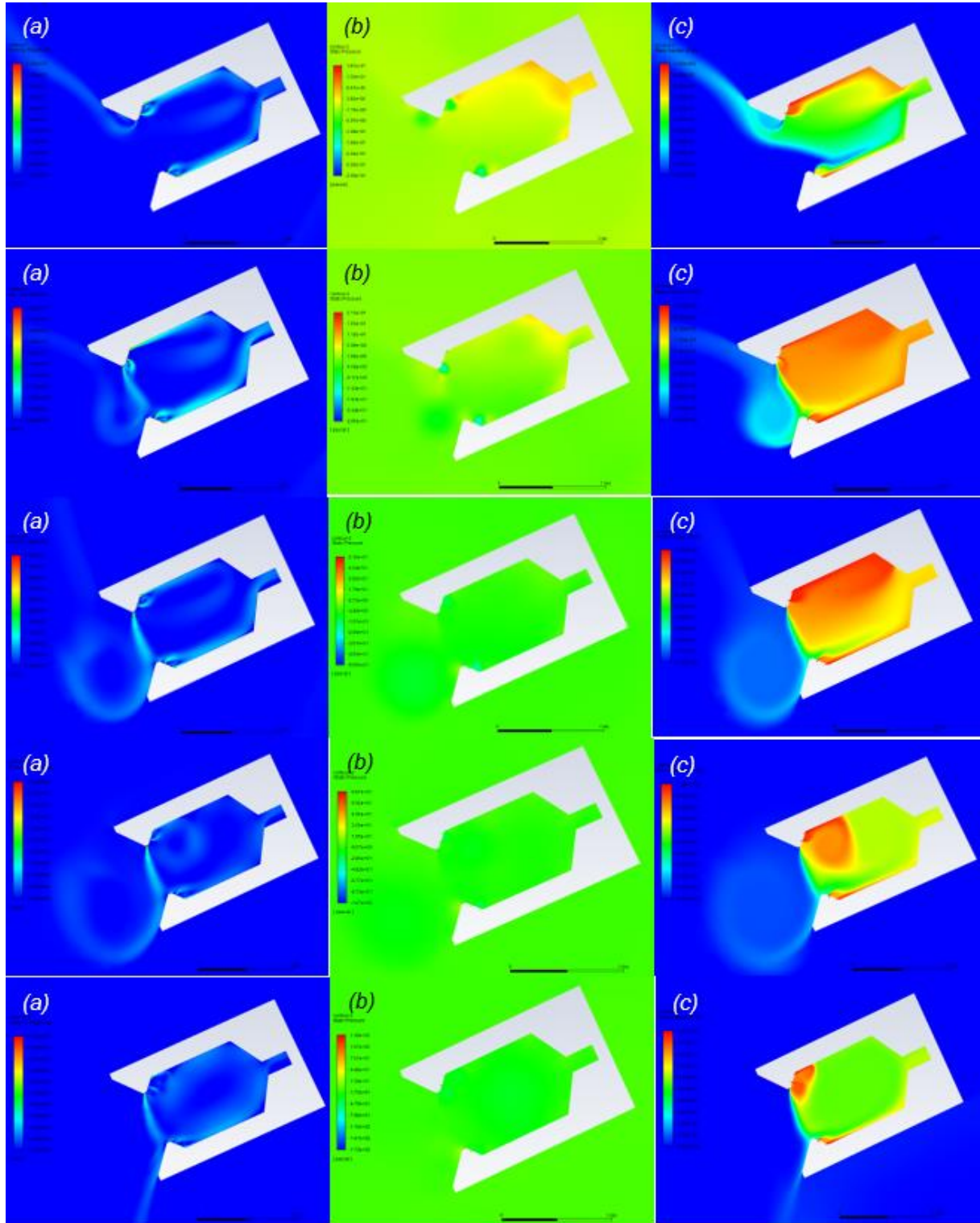
Angolo di inclinazione del getto d'aria  $\varphi = 15^\circ$ , velocità  $v$  a 10, 20, 30, 40 e 50  $\frac{m}{s}$  (dall'alto verso il basso)



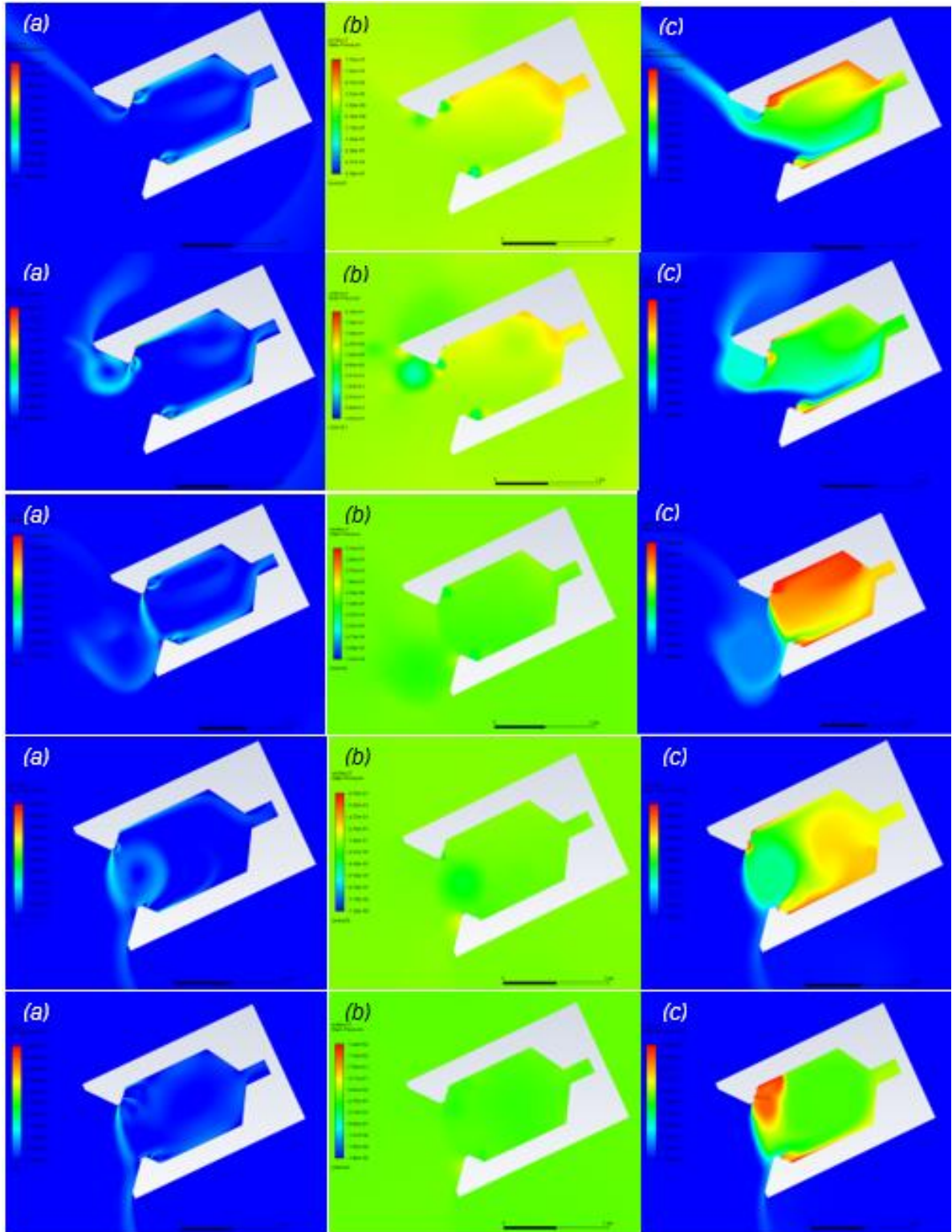
Angolo di inclinazione del getto d'aria  $\varphi = 20^\circ$ , velocità  $v$  a 10, 20, 30, 40 e  $50 \frac{m}{s}$  (dall'alto verso il basso)



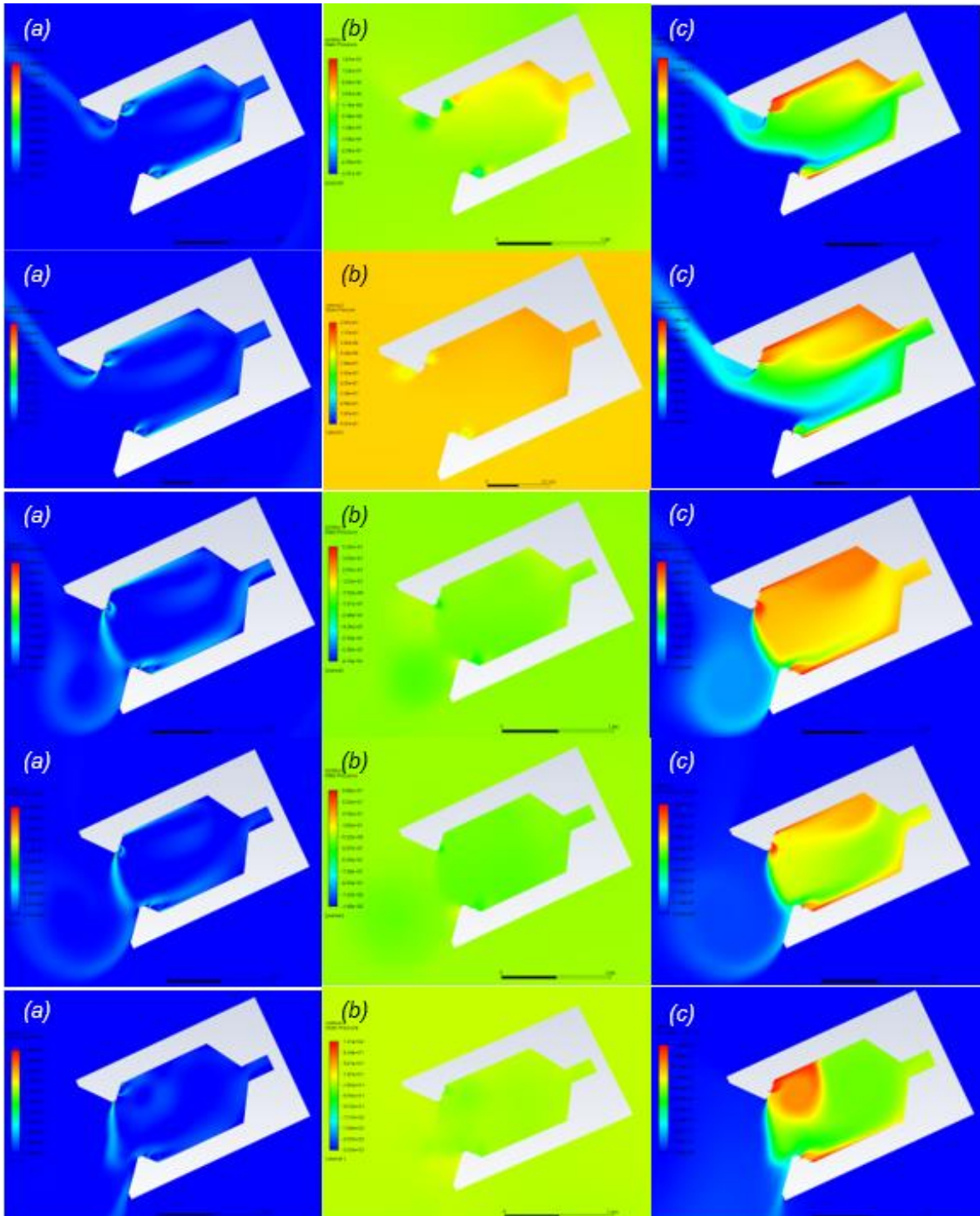
Angolo di inclinazione del getto d'aria  $\varphi = 25^\circ$ , velocità  $v$  a 10, 20, 30, 40 e 50  $\frac{m}{s}$  (dall'alto verso il basso)



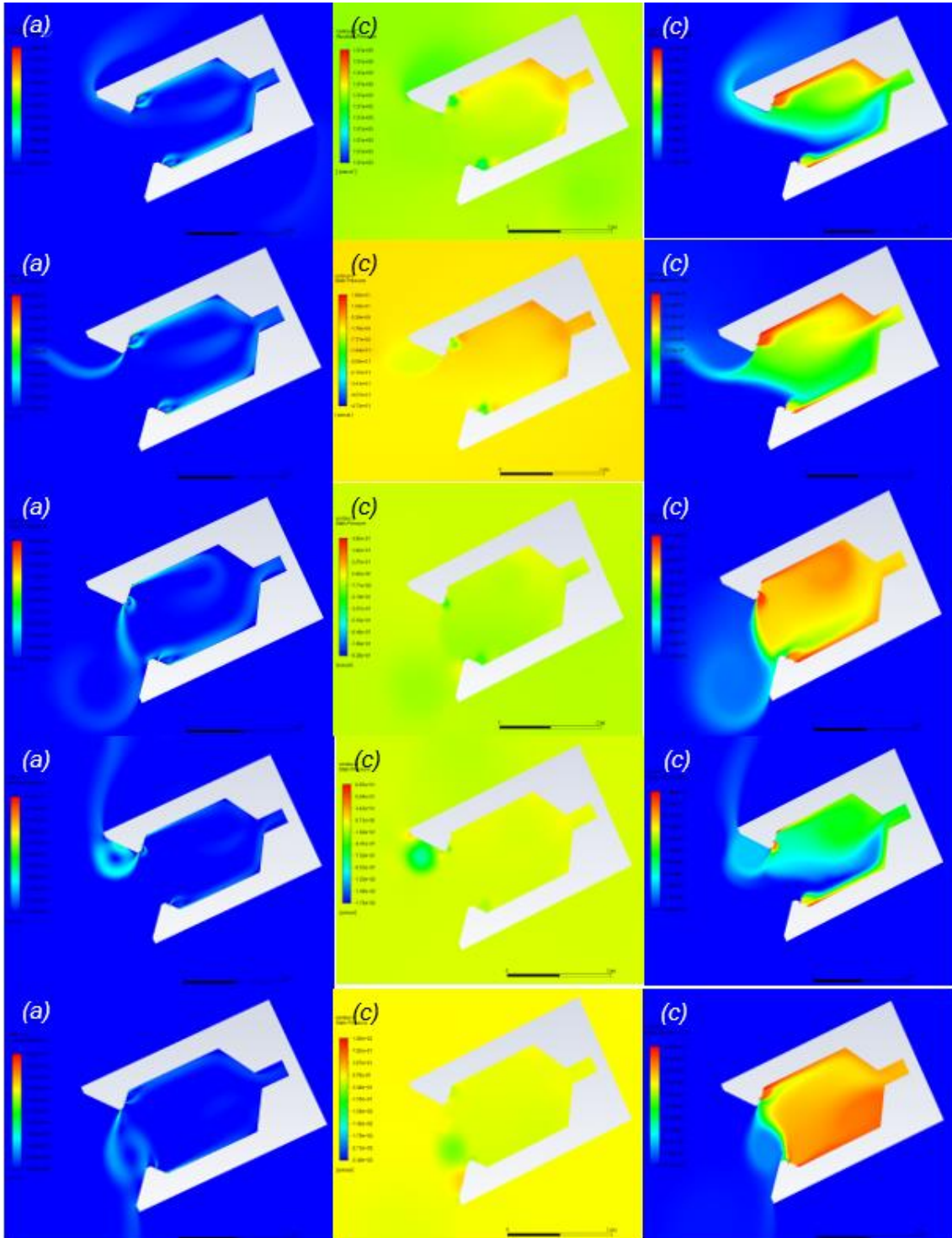
Angolo di inclinazione del getto d'aria  $\varphi = 30^\circ$ , velocità  $v$  a 10, 20, 30, 40 e 50  $\frac{m}{s}$  (dall'alto verso il basso)



Angolo di inclinazione del getto d'aria  $\varphi = 35^\circ$ , velocità  $v$  a 10, 20, 30, 40 e 50  $\frac{m}{s}$  (dall'alto verso il basso)



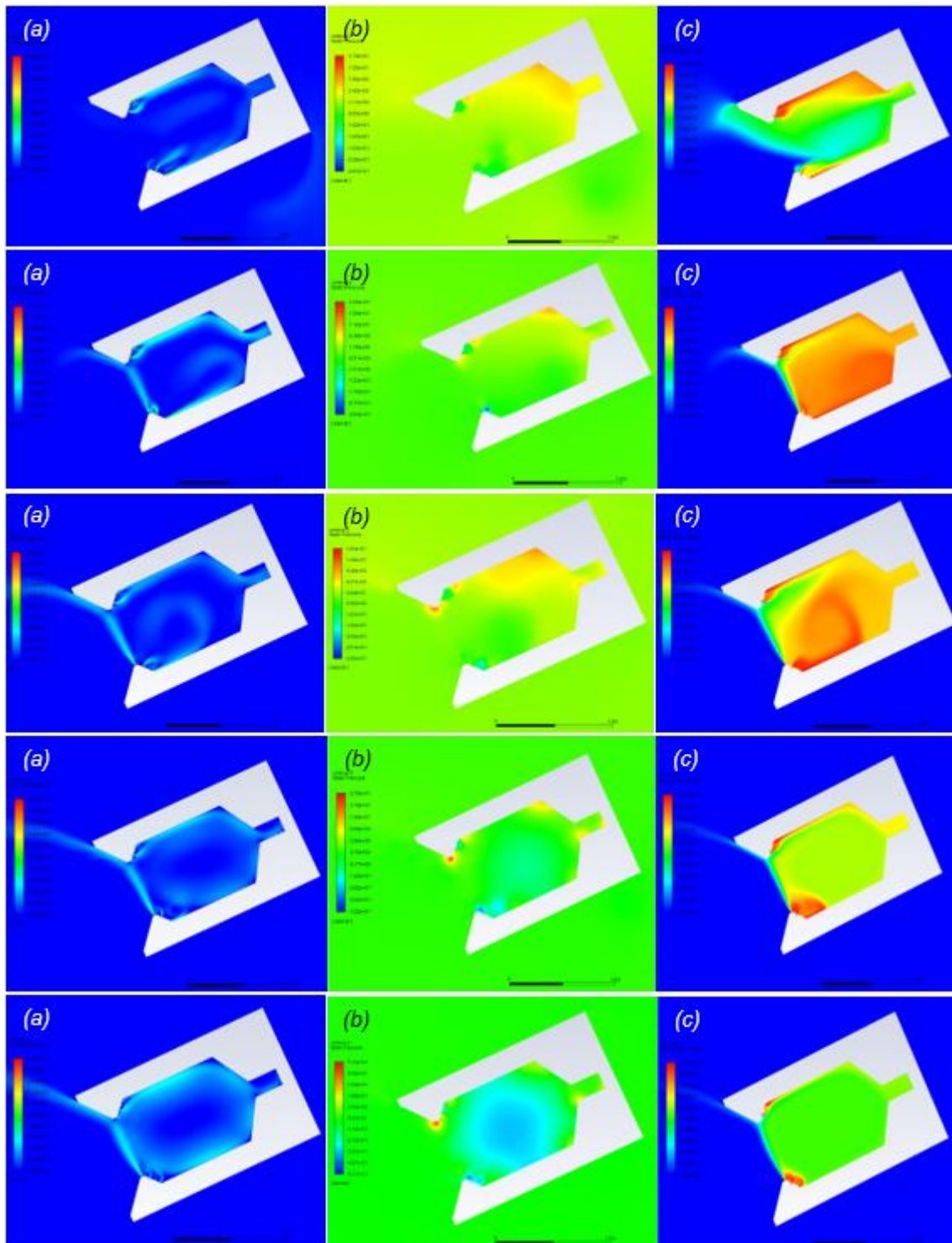
Angolo di inclinazione del getto d'aria  $\varphi = 40^\circ$ , velocità  $v$  a 10, 20, 30, 40 e 50  $\frac{m}{s}$  (dall'alto verso il basso)



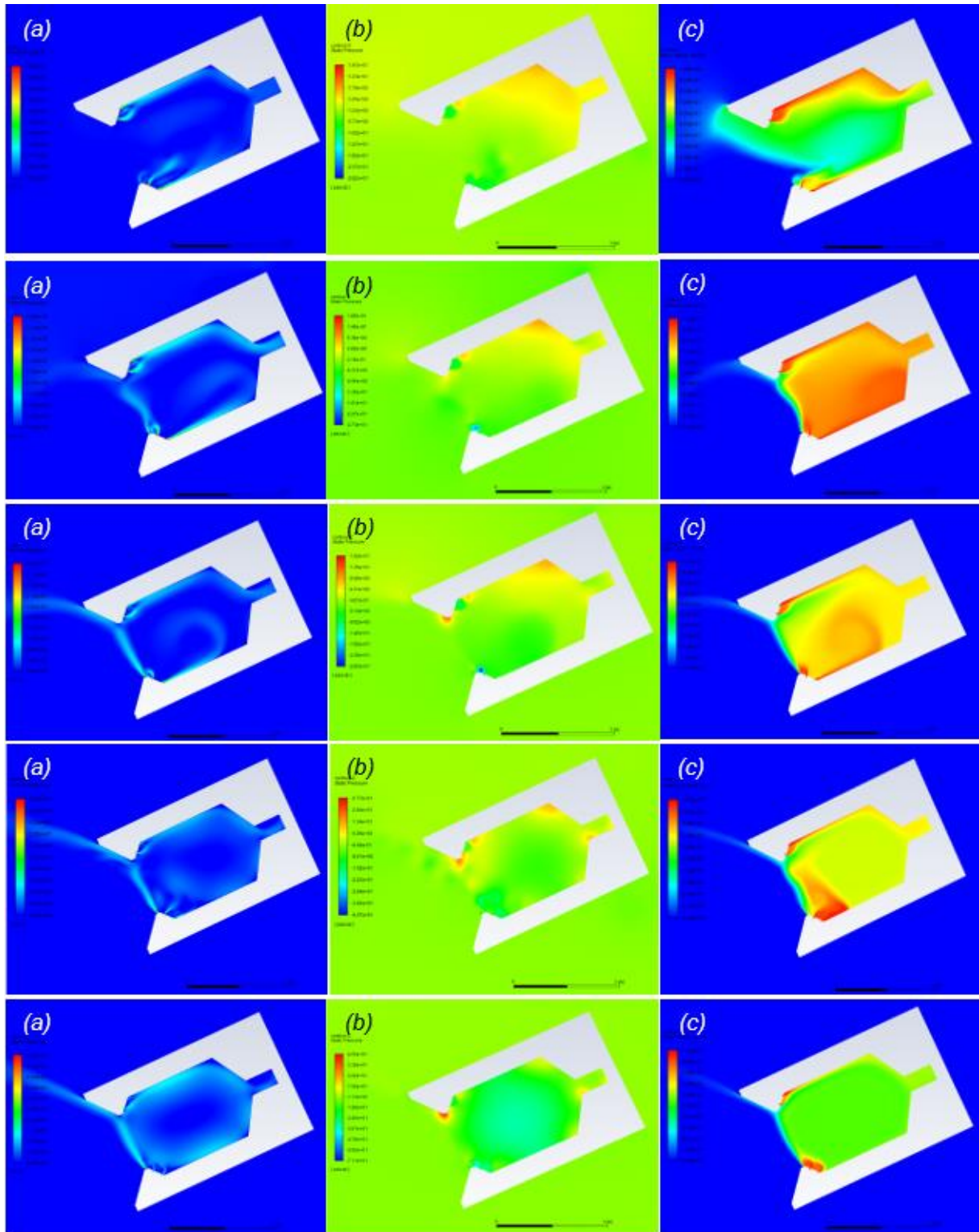
## A.2. Contour per le simulazioni della variante 2

Di seguito vengono mostrati qualitativamente i contour di velocità (a), pressione (b) e specie (c) delle simulazioni eseguite per la variante 2. Lo scopo è quello di facilitare la visualizzazione di tutte le simulazioni eseguite ed in caso di necessità è possibile indentificare in maniera rapida la simulazione di interesse ed andare a osservarla meglio negli allegati.

Angolo di inclinazione del getto d'aria  $\varphi=10^\circ$ , velocità  $v$  a 10,20,30,40 e 50 m/s (dal basso verso l'alto)

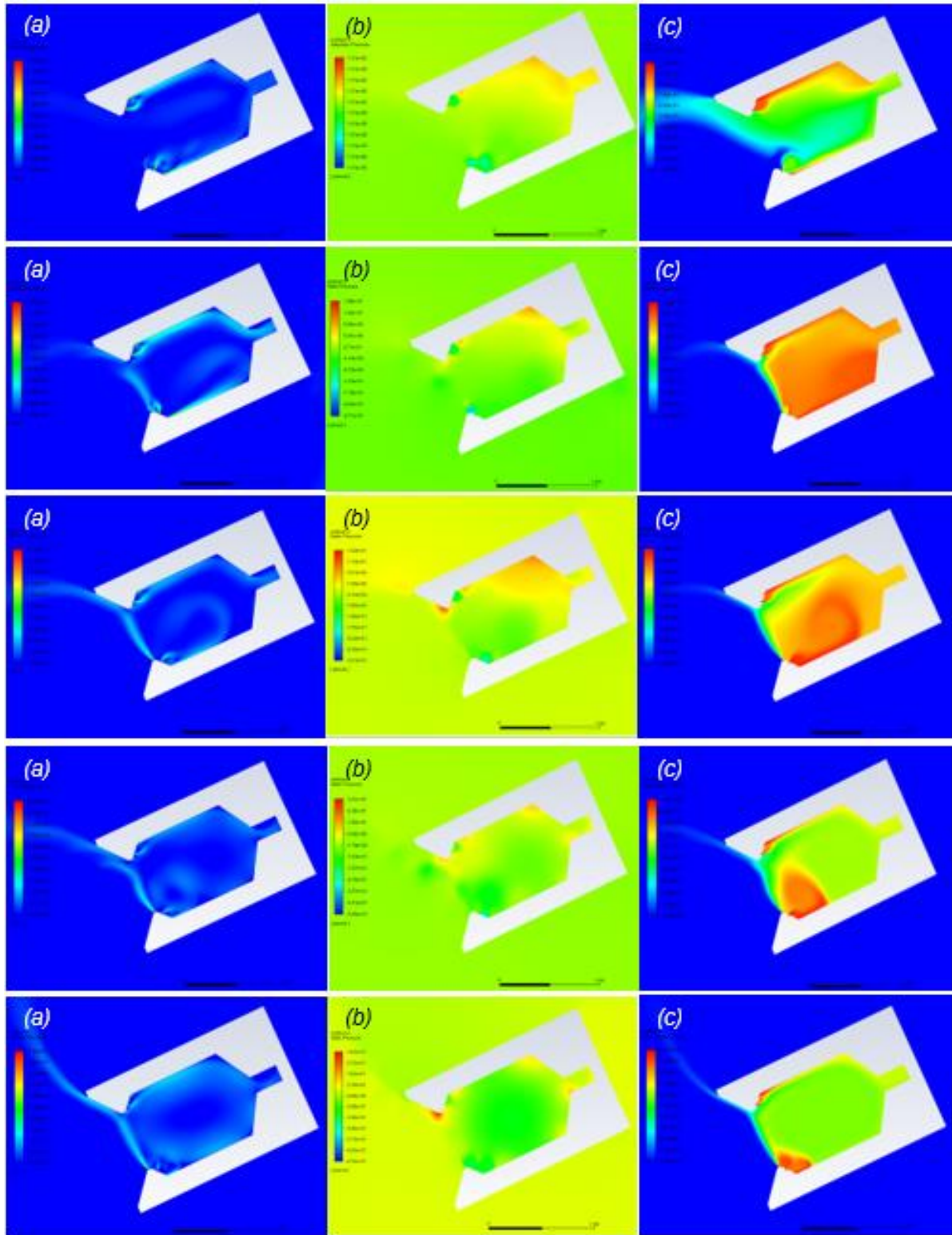


Angolo di inclinazione del getto d'aria  $\varphi=15^\circ$ , velocità  $v$  a 10,20,30,40 e 50 m/s (dal basso verso l'alto)

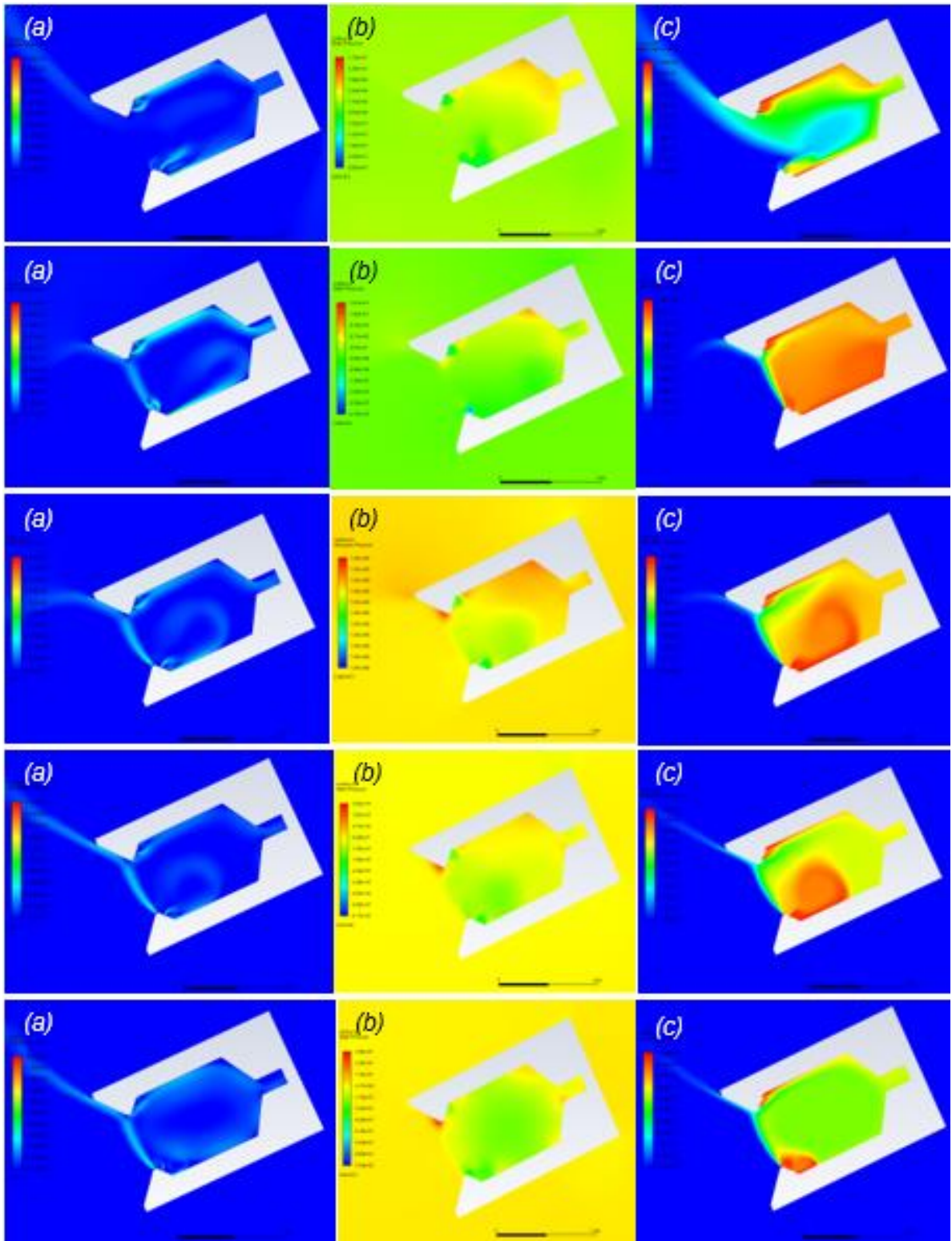




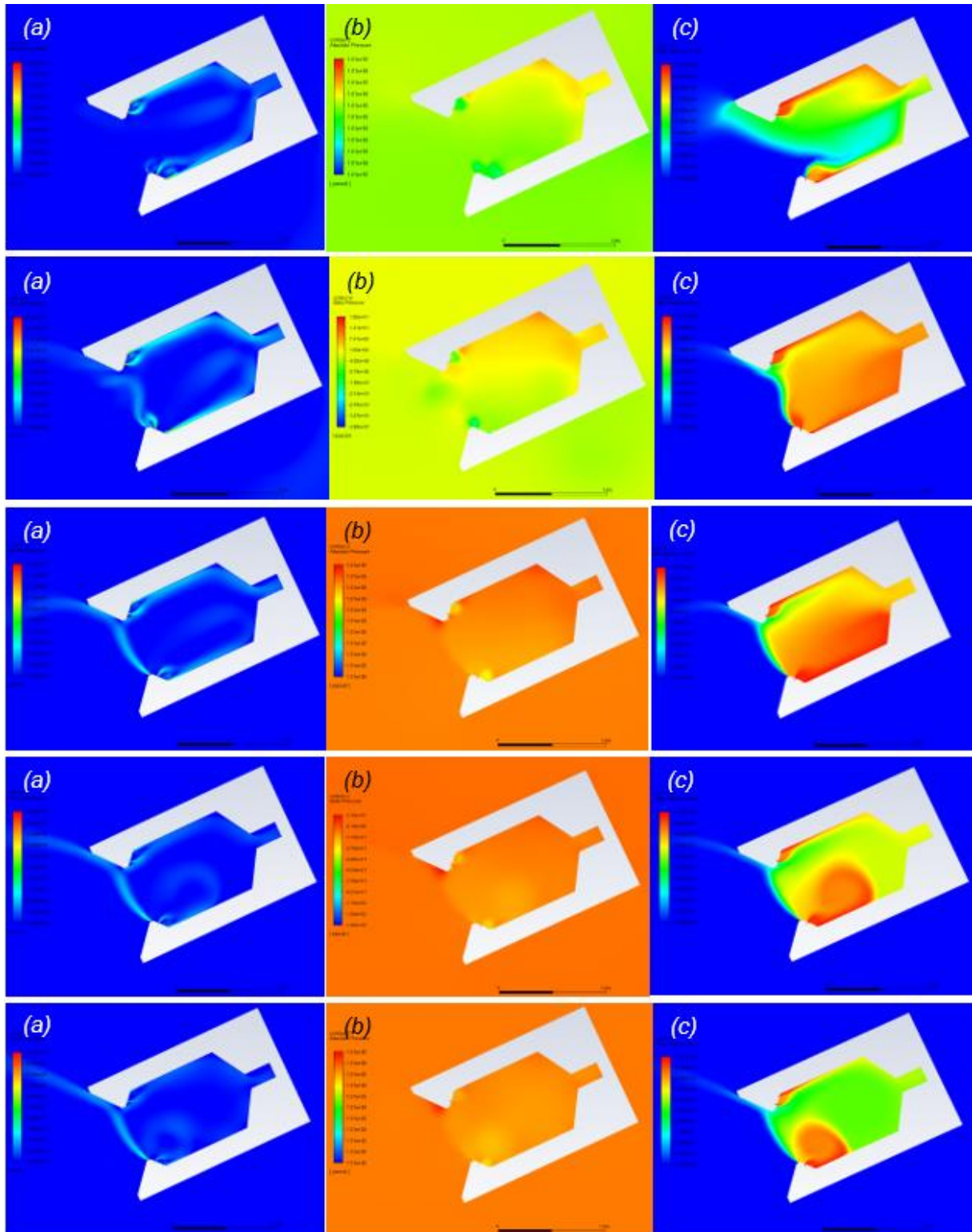
Angolo di inclinazione del getto d'aria  $\varphi=20^\circ$ , velocità  $v$  a 10,20,30,40 e 50 m/s (dal basso verso l'alto)



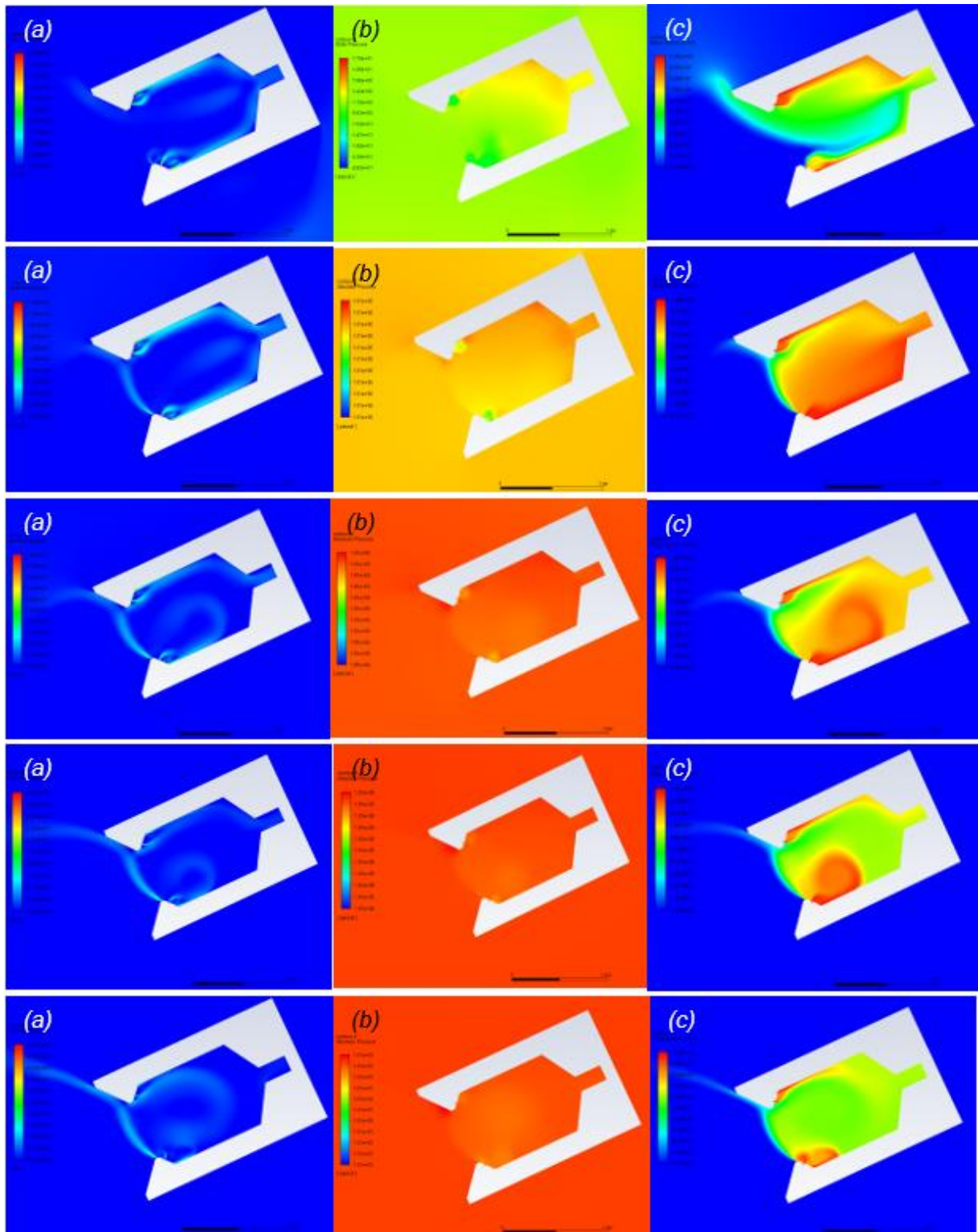
Angolo di inclinazione del getto d'aria  $\varphi=25^\circ$ , velocità  $v$  a 10,20,30,40 e 50 m/s (dal basso verso l'alto)



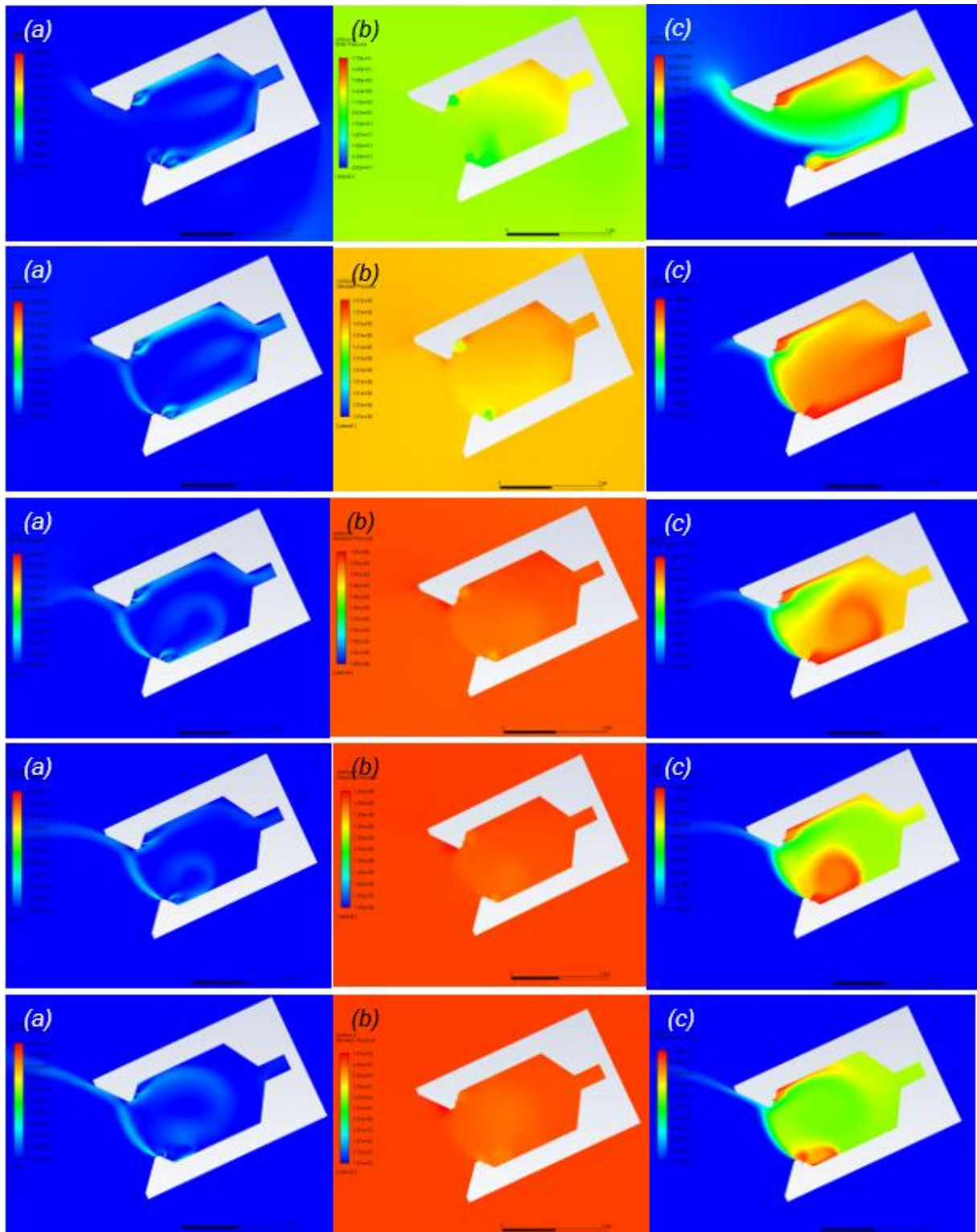
Angolo di inclinazione del getto d'aria  $\varphi=30^\circ$ , velocità  $v$  a 10,20,30,40 e 50 m/s (dal basso verso l'alto)



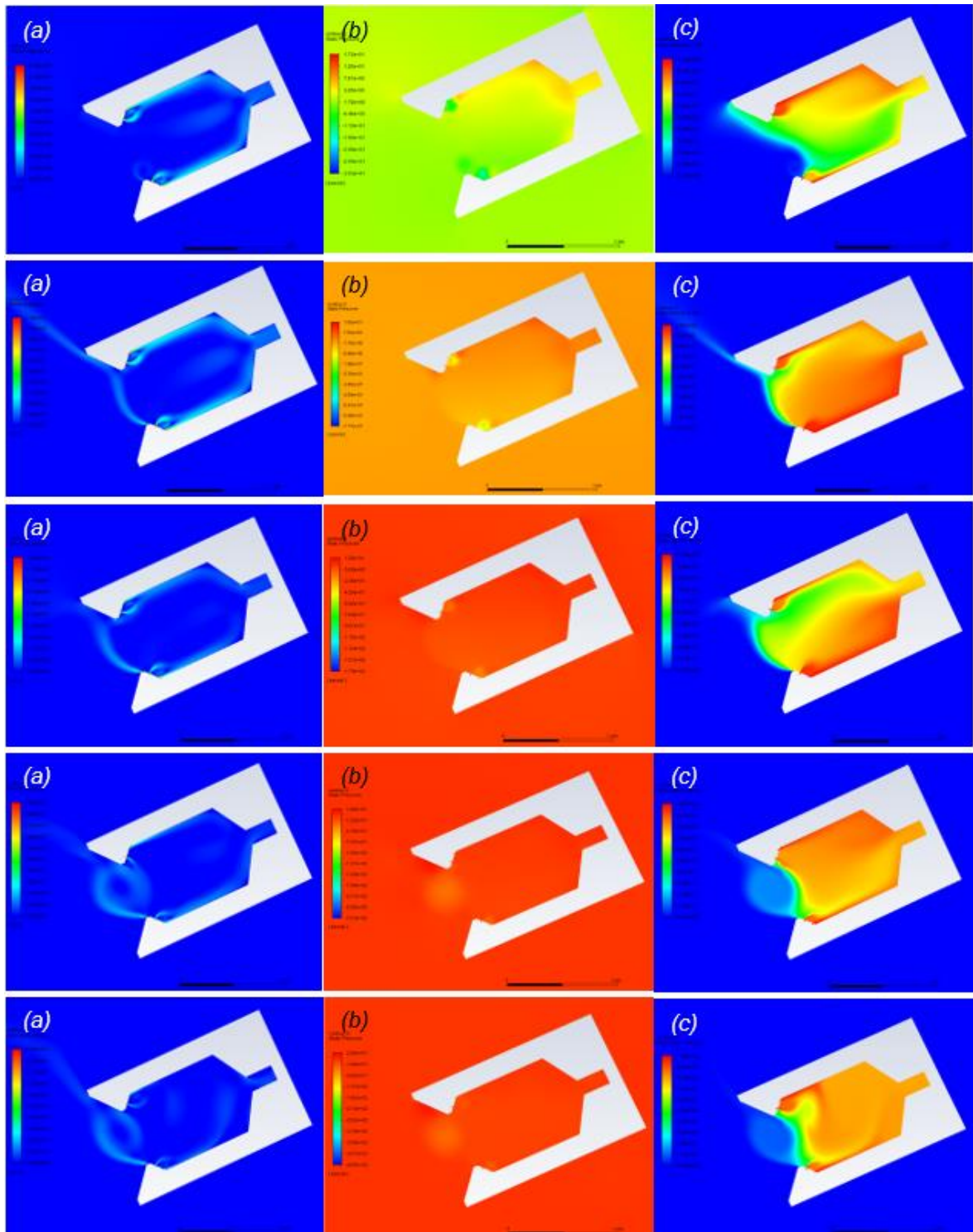
Angolo di inclinazione del getto d'aria  $\varphi=35^\circ$ , velocità  $v$  a 10,20,30,40 e 50 m/s (dal basso verso l'alto)



Angolo di inclinazione del getto d'aria  $\varphi=40^\circ$ , velocità  $v$  a 10,20,30,40 e 50 m/s (dal basso verso l'alto)



Angolo di inclinazione del getto d'aria  $\varphi=45^\circ$ , velocità  $v$  a 10,20,30,40 e 50 m/s (dal basso verso l'alto)



Angolo di inclinazione del getto d'aria  $\varphi=45^\circ$ , velocità  $v$  a 10,20,30,40 e 50 m/s (dal basso verso l'alto)

