



RELAZIONE TECNICA FINALE

INCARICO N. 58 DEL 31/03/2020

AFFIDAMENTO DIRETTO - SERVIZI

(Ai sensi dell'art. 36 comma 2 lettera a del D.Lgs. n. 50/2016)

Il responsabile dell'incarico

Prof. Fabrizio CUMO

Documenti di Riferimento

REF ID	Titolo	Autore	Versione	Date
[AD-1]	Incarico n. 58- affidamento diretto – servizi Titolo intervento “Foro Romano – Museo di Giacomo Boni sulla Via Sacra (ex magazzino Bordoni) e area limitrofa. Restauro, adeguamento funzionale e manutenzione area limitrofa” Oggetto affidamento: “Servizio di diagnosi ambientale ed energetica, controllo dell’ambiente visivo e progettazione illuminotecnica”.	PARCO	-	31-03-2020
[AD-2]	Progetto definitivo foro romano, ingresso salaria vecchia lavori per il nuovo sistema di alimentazione della zona “foro” rilievo impianti, verifica analitica dei coordinamenti, progetto nuovo quadro bt - pgt 108/2020.	Sepli s.r.l.	-	14-09-20
[AD-3]	Impianto di estrazione aria a servizio dei trasformatori e struttura a pannelli isolanti finalizzati alla preservazione del manufatto. nuovo layout delle apparecchiature.	Sepli s.r.l.	-	03-11-20

Gruppo di lavoro

Titolo	Persone	Funzione	Afferenza
Prof. Ing.	Fabrizio CUMO	Coordinatore	CITERA
Ing.	Fabio NARDECCHIA	Progettista	CITERA
Ing.	Luca GUGLIERMETTI	Progettista	CITERA

Sommario

INTRODUZIONE	4
RILIEVO ARCHITETTONICO	5
MISURE AMBIENTALI	6
IMPLEMENTAZIONE E VALIDAZIONE DEL MODELLO	10
SPECIFICHE CABINA ELETTRICA	25
SIMULAZIONE CABINA ELETTRICA SENZA CONFINAMENTO	25
PORTATA MINIMA PREVISTA	27
PORTATA MASSIMA PREVISTA	41
SIMULAZIONE CABINA ELETTRICA CON CONFINAMENTO	55
ALLEGATI	90

INTRODUZIONE

All’intero del Museeto è prevista l’installazione di una cabina elettrica la cui progettazione è stata eseguita dall’Sepli s.r.l.. che, su precise indicazioni della committenza, ha proposto differenti soluzioni al fine di ridurre al massimo l’impatto di tale impianto sulla struttura. Pertanto, gli aspetti ambientali ed energetici trattati nella presente relazione tecnica hanno avuto come loro obiettivo l’individuazione della migliore soluzione tecnico/impiantistica, tra quelle proposte, in grado di conciliare la funzionalità della cabina elettrica con gli aspetti legati alla conservazione e all’ispezionabilità del manufatto storico. Le attività e i risultati riportate nel seguito hanno permesso di valutare e individuare una soluzione “ottimale”, caratterizzata da un confinamento dei trasformatori, realizzato con una struttura termicamente isolante e rimovibile, e da un opportuno impianto meccanico di ventilazione.

Il risultato suddetto è stato raggiunto attraverso attività di caratterizzazione dell’ambiente (interno ed esterno in condizioni estive) e dei materiali, che a loro volta hanno costituito l’input per le attività previsionali, basate su modelli di calcolo termofluidodinamici, dell’impatto sull’edificio conseguente all’installazione della prevista cabina elettrica nelle differenti configurazioni proposte.

La attività svolte sono state:

- caratterizzazione dell’involtucro edilizio (opaco e trasparente), con relativo rilievo e restituzione in 3D, accompagnato da un calcolo delle sue caratteristiche di isolamento termico, massa e permeabilità all’aria, conduttività;
- caratterizzazione dell’ambiente esterno supportato da misurazioni in situ e attività computazionale, al fine di elaborare un giorno tipo da utilizzare come input per le simulazioni termofluidodinamiche;
- caratterizzazione del campo termico interno ed esterno (temperature, umidità, disuniformità termiche) mediante misurazioni in situ.

Le attività di simulazioni termofluidodinamica, dopo essere state ottimizzate e verificate sulla base dei dati sperimentali rilevati strumentalmente, sono state applicate, in diversi regimi termici a due tra le tipologie proposte per la realizzazione della cabina elettrica seguendo le indicazioni della committenza: la prima senza confinamento dei trasformatori, la seconda con un loro confinamento. Le due tipologie analizzate sono inoltre caratterizzate da una diversa configurazione dell’impianto di ventilazione necessario al raffreddamento dei trasformatori.

RILIEVO ARCHITETTONICO

L'edificio oggetto della presente relazione (Museeto è posizionata sulla Via Sacra davanti al Tempio di Romolo (vedi Figure 1-2).



Figura 1 – Posizione struttura

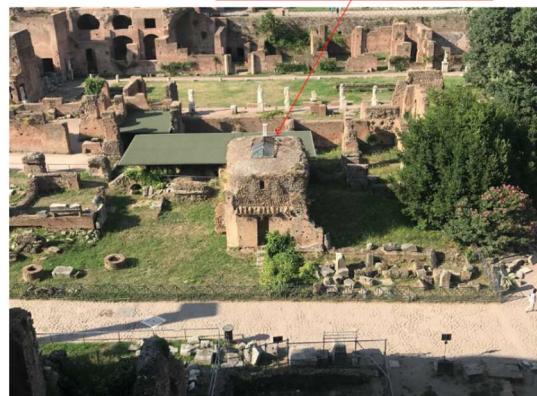


Figura 2 – "MUSEETO" DI GIACOMO BONI

Il rilievo architettonico, relativamente alle parti di interesse per le attività svolte, è stato eseguito con tecniche fotogrammetriche che hanno prodotto un modello 3D dell'edificio (nella sua parte interna ed esterna) che, oltre a fornire gli aspetti dimensionali, permette una rapida visualizzazione dello stato di conservazione dei materiali e strutture, nonché l'utilizzo in sistemi BIM.

L'elaborazione è stata effettuata con il software Metashape utilizzando un data base fotografico di circa 500 foto ottenute con macchina fotografica reflex full frame con DATA-LOGGER 8356x5504 pixel, obiettivo con focale da 18 mm; il GSD utilizzato è stato pari a 0.8-1.1 mm/pixel per poter garantire una precisione di circa 2 mm/metro. La "scalatura" del modello 3D è stata effettuata mediante misure metriche con laser tra punti di riferimento prestabiliti e facilmente individuabili.

I file per la visualizzazione del 3D forniti al committente, al fine di permetterne una facile gestione, sono stati del tipo .mtl.

MISURE AMBIENTALI

Sono stati acquisiti dati climatici dell'ambiente esterno e interno solamente nel periodo estivo (dal 19/07/2020 al 17/09/2020) in quanto ritenuto il più critico ai fini conservativi, utilizzando rispettivamente una centralina meteorologica e data-logger interni.

La centralina climatica utilizzata è stata una DAVIS VANTAGE PRO2 CABLATA; ragioni legate all'invasività della centralina e al decoro del sito, hanno portato al posizionamento della sola sonda per il rilievo della velocità dell'aria al di sopra dell'edificio, mentre le restanti, per il rilievo della temperatura, umidità relativa, irraggiamento solare e piovosità sono state posizionate ad una altezza di circa 1.5 metri dal terreno livello del terreno, ancorate ad una esistente ringhiera (Figure 3 e 4).



Figura 3 – Posizione sonda misure ambientali



Figura 4 – Centralina DAVIS VANTAGE PRO2

I dati rilevati dalla centralina metereologica sono stati resi anche disponibili in rete per una consultazione in tempo reale mediante applicativo weatherlink (<https://www.eweatherlink.com/>) utilizzando un nodo di rete presente all'interno dell'edificio analizzato

Le caratteristiche delle sonde utilizzate possono essere consultate sul sito del produttore (<https://www.davisinstruments.com/vantage-pro2/>)

Per le misure interne sono stati utilizzati tre data-logger, per il rilievo della temperatura e dell'umidità relativa, posizionati all'interno della struttura: due al centro delle pareti di lato maggiore (indicati con DATA-LOGGER 72 e DATA-LOGGER 84) e uno al centro dell'ambiente (indicato con DATA-LOGGER 66), tutti ad un'altezza di circa 1.70 m da terra. (Figure 5 e 6).



Figura 5 – Ubicazione sensori interni

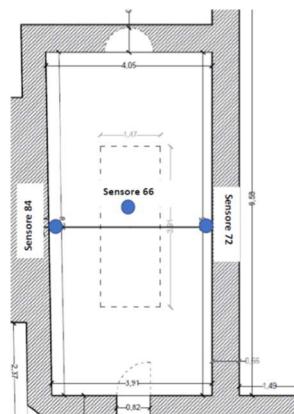


Figura 6 – Schematizzazione ubicazione sensori interni

Sono stati utilizzati data-logger multifunzionali VOLTCRAFT DL-121TH (Figura 7), le cui principali caratteristiche tecniche possono esser reperite in <http://www.volcraft.ch/>. Questa tipologia di data-logger è particolarmente compatto e utilizza una batteria al litio integrata che permette l'acquisizione di 16000 valori di misura della temperatura e 16000 dell'umidità. I valori di misura memorizzati possono essere letti attraverso l'interfaccia USB ed essere valutati graficamente con il software fornito in dotazione o esportati per l'ulteriore elaborazione.



Figura 7 – DATA-LOGGER VOLTCRAFT DL-121TH

La Figura 8, riporta i valori forniti dalla centralina metereologica (temperatura, umidità relativa e punto di rugiada) nell'arco temporale considerato. L'andamento a carattere prevalentemente ciclico delle grandezze rilevate ha permesso di estrarre un giorno tipico rappresentativo dell'intero periodo estivo da utilizzare nelle simulazioni numeriche.

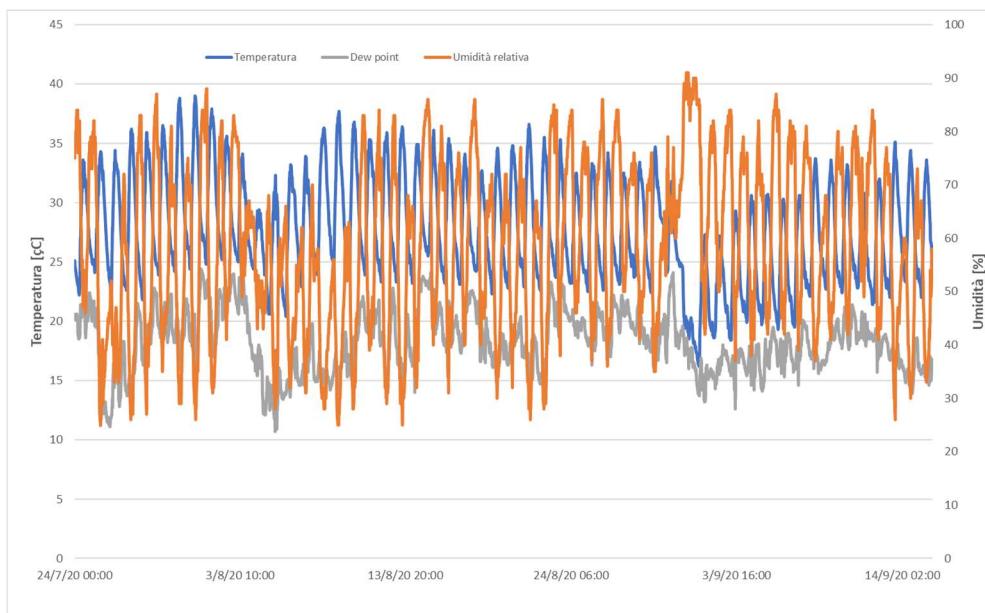


Figura 8 – Andamento parametri ambientali esterni

I dati acquisiti dai data-logger interni sono riportati nelle Figure 9-11.

I risultati, per tutti e tre i punti di misura, mostrano un andamento che si ripete nel tempo, quasi ciclicamente: gli scostamenti da tale trend sono imputabili alla presenza di personale all'interno

dell'edificio, per lavori di pulizia e manutenzione nodo internet, con conseguente apertura della porta di ingresso durante tali attività.

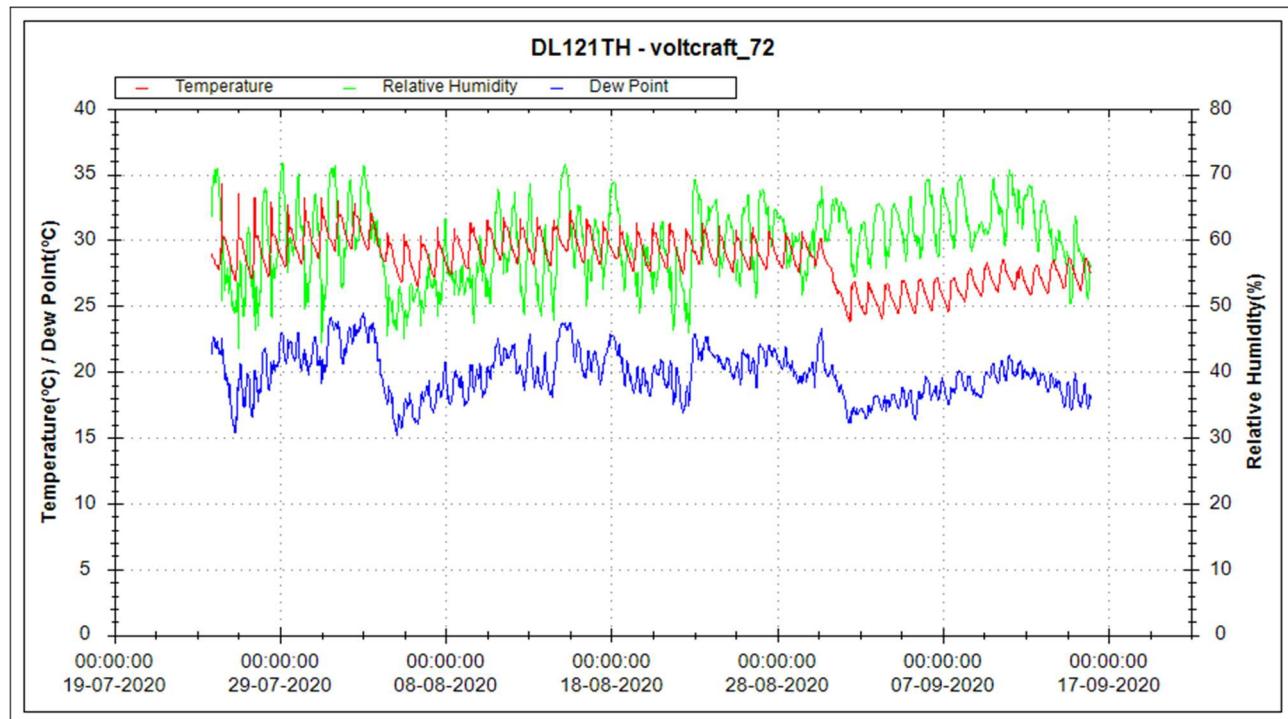


Figura 9 – Andamento DATA-LOGGER 72

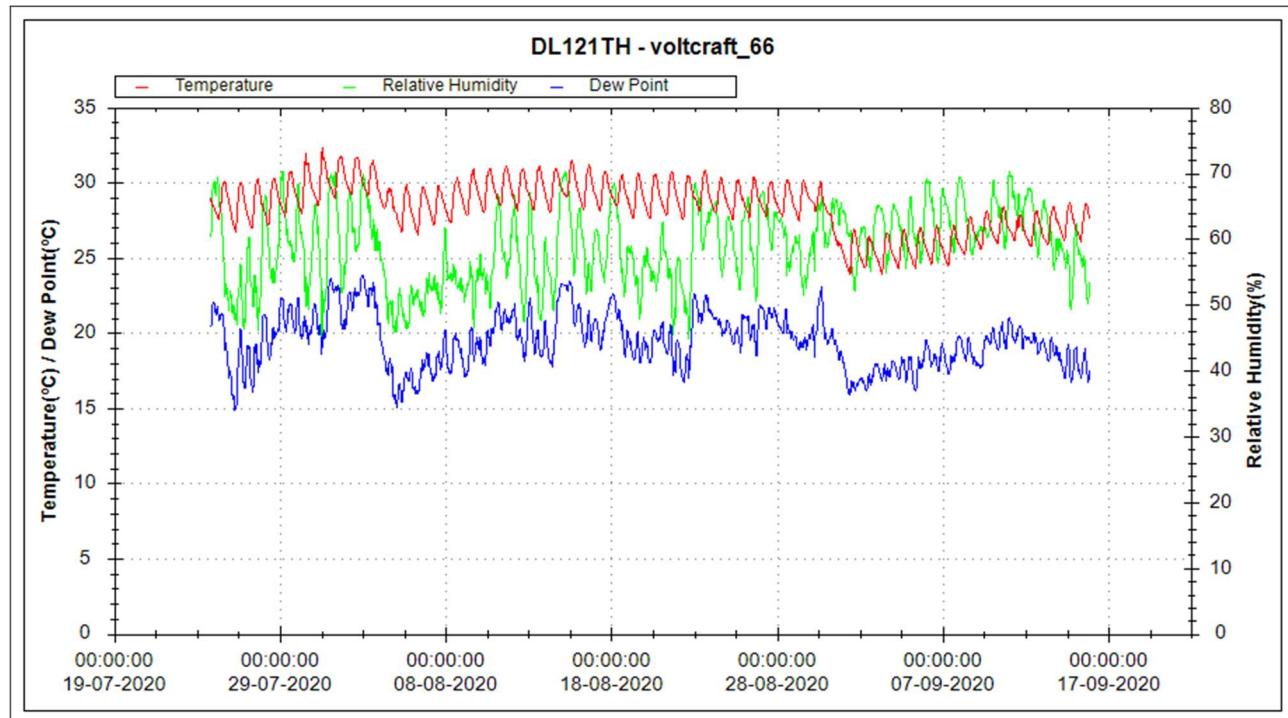


Figura 10 – Andamento DATA-LOGGER 66

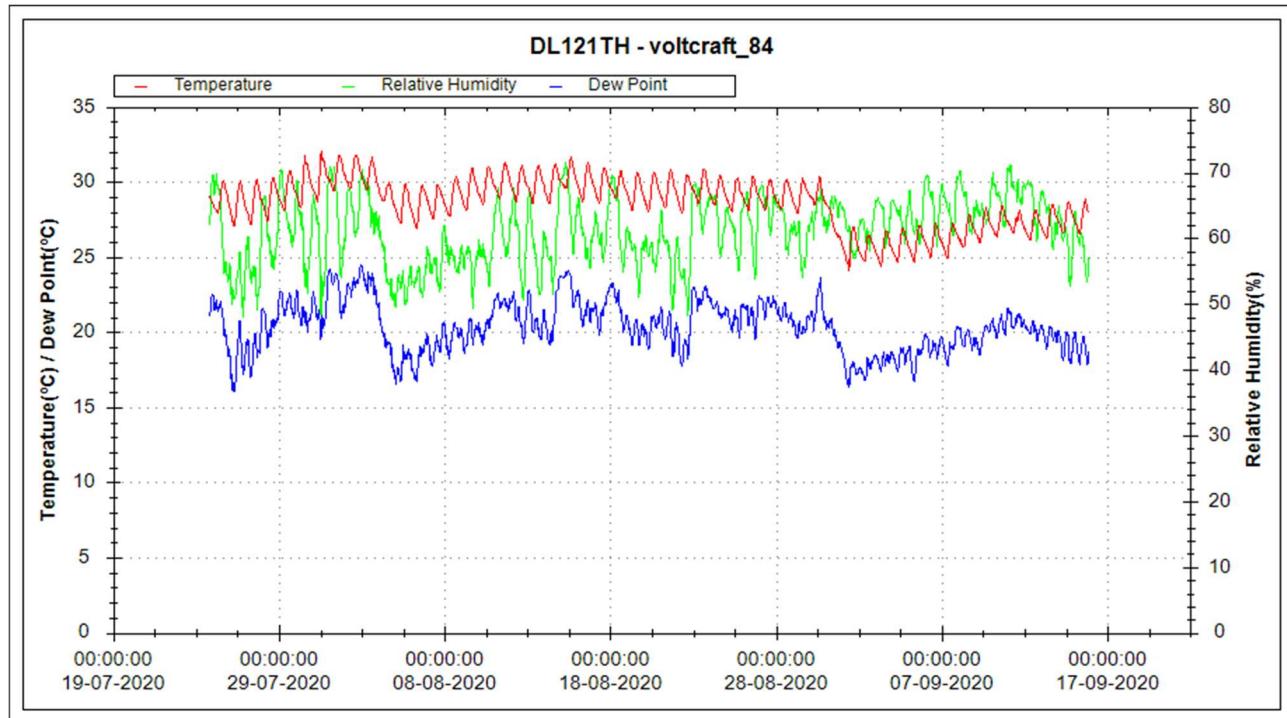


Figura 11 – Andamento DATA-LOGGER 84

IMPLEMENTAZIONE E VALIDAZIONE DEL MODELLO

Le simulazioni numeriche sono state eseguite in due regimi termici differenti, utilizzati in funzione della problematica trattata:

- periodico stabilizzato: tale regime permette di valutare l'effetto dell'inerzia termica dell'edificio in quanto utilizza come input un andamento orario giornaliero delle grandezze metereologiche ricavato sulla base dei dati rilevati sperimentalmente, che viene assunto come giorno medio estivo. I risultati ottenuti sono pertanto orari (nelle 24 ore della giornata media) e rappresentano il comportamento medio dell'edificio.
- Stazionario: non tiene conto dell'inerzia dell'edificio e ha valore come situazione estremale in assoluto, non superabile in nessun caso, in quanto i calcoli sono fatti assumendo un valore costante per le grandezze climatiche esterne: in questo caso i campi termofluidodinamici non cambiano con il tempo.

Il software utilizzato è stato Ansys Fluent v.14.5 [**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**] e le simulazioni sono state eseguite con un solutore 3D a doppia precisione pressure based; le equazioni RANS (Reynolds-averaged Navier–Stokes) sono state utilizzate in combinazione con il modello turbolento RNG k- ϵ . L'accoppiamento pressione-velocità è stato sviluppato utilizzando l'algoritmo PISO.

La forma e la dimensione del dominio computazionale e le condizioni al contorno sono state modellate per essere identiche al rilievo architettonico effettuato. Come mostrato nella Figura 12, il dominio computazionale è un prisma rettangolare con una sezione trasversale rettangolare di 4.05 x 8.35 m, con un tetto a volta per un'un'altezza complessiva di 4.68 m.

Sono state utilizzate celle tetraedriche non strutturate il dominio computazionale (Figura 12). Uno studio di indipendenza della soluzione numerica dalla mesh utilizzate (mesh sensitivity) è stato eseguito utilizzando griglie coarse, medie e fini contenenti rispettivamente 0.2, 0.8 e 2.2 milioni di cellule. Per la mesh sensitivity, come parametro di test è stata scelta la temperatura presa in corrispondenza di uno dei sensori di misura sperimentali; tale analisi ha individuato come ottimale un n.ro di celle pari a 800.000, con intervallo spaziale di 0.1 m.

I piani in cui sono stati riportati i risultati (Figure 13 e 14) sono denominati come Piano1, Piano2, Piano3 quelli paralleli alle pareti laterali, Piano4, Piano5, Piano6 quelli paralleli alla parete frontale. La validazione del modello realizzato è stata effettuata confrontando i risultati ottenuti dalla simulazione con quelli rilevati in situ con riferimento alle stesse condizioni ambientali esterne. La simulazione è stata effettuata in regime periodico stabilizzato e sono stati utilizzati i dati del 10/08/2020, che risulta essere il peggiore per quanto riguarda le condizioni esterne: in particolare la sua temperatura media è di 30.55 °C e l'ampiezza di 6.25 °C. Per quanto concerne l'umidità relativa esterna, come si è potuto notare dalla campagna sperimentale, rimane pressoché costante.

Nelle Figure 17-20 sono riportati i risultati ottenuti dalla simulazione in funzione del tempo e quelli rilevati sperimentalmente relativamente ai punti in cui sono stati installati i data-logger, da cui si può dedurre che il modello termofluidodinamico adottato riproduce in modo molto accurato le condizioni reali misurate con scostamenti che raggiungono al massimo i 2 °C per la temperatura e il 2% per l'umidità relativa.

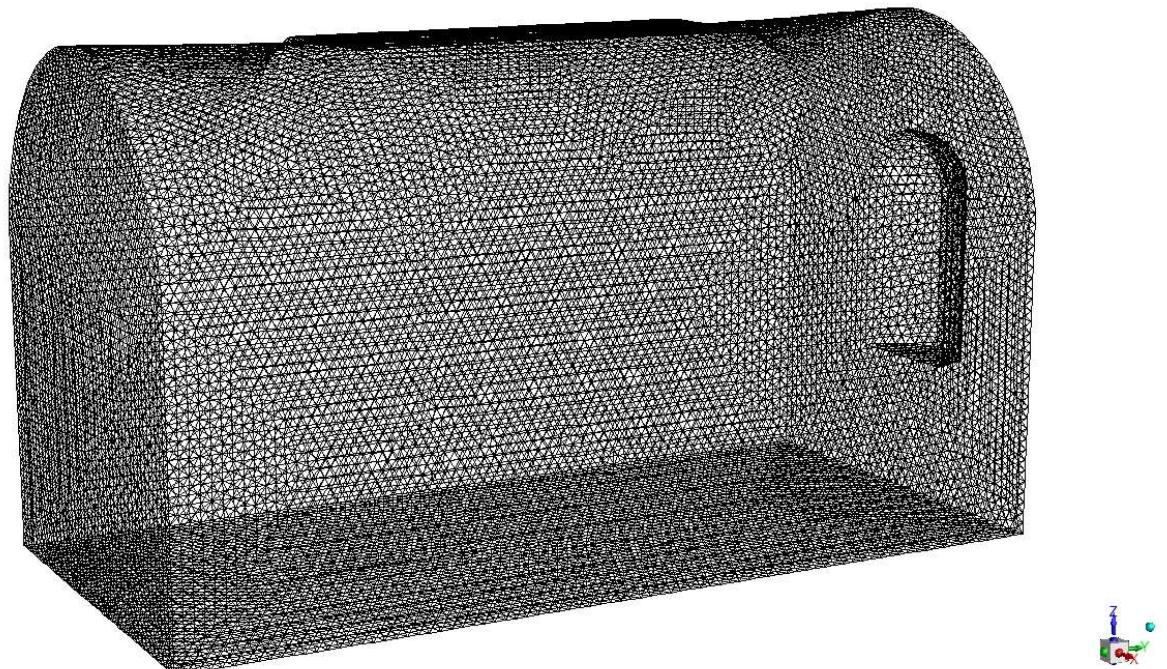


Figura 12 – Mesh del dominio

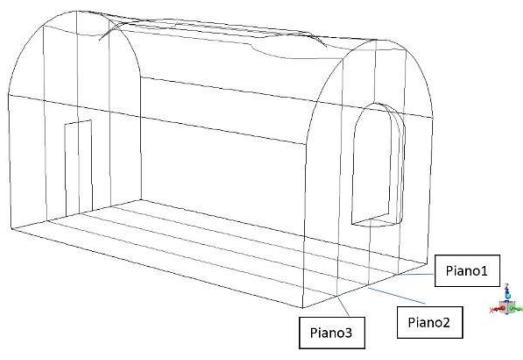


Figura 13 – Piani di visualizzazione

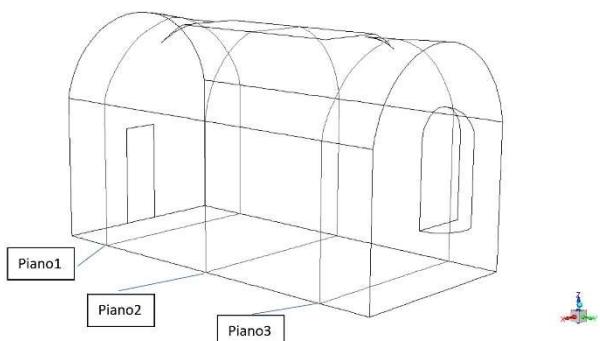


Figura 14 – Piani di visualizzazione

Nelle Figure 21-38 sono inoltre mostrati i risultati della simulazione con l'ausilio di mappe di temperatura, umidità relativa e i vettori velocità, riferiti all'istante in cui l'umidità interna risulta essere massima. Le simulazioni confermano quanto rilevato sperimentale evidenziando che la temperatura rimane pressoché costante all'interno dell'ambiente; con variazioni massime dell'ordine dei 0.5 °C. Allo stesso modo si comporta l'umidità relativa, dove si notano valori bassi rispetto alla media della stanza, solo in una regione in prossimità del pavimento. I vettori velocità mostrano che non ci sono movimenti d'aria significativi all'interno della stanza.

Posizione DATA-LOGGER 66

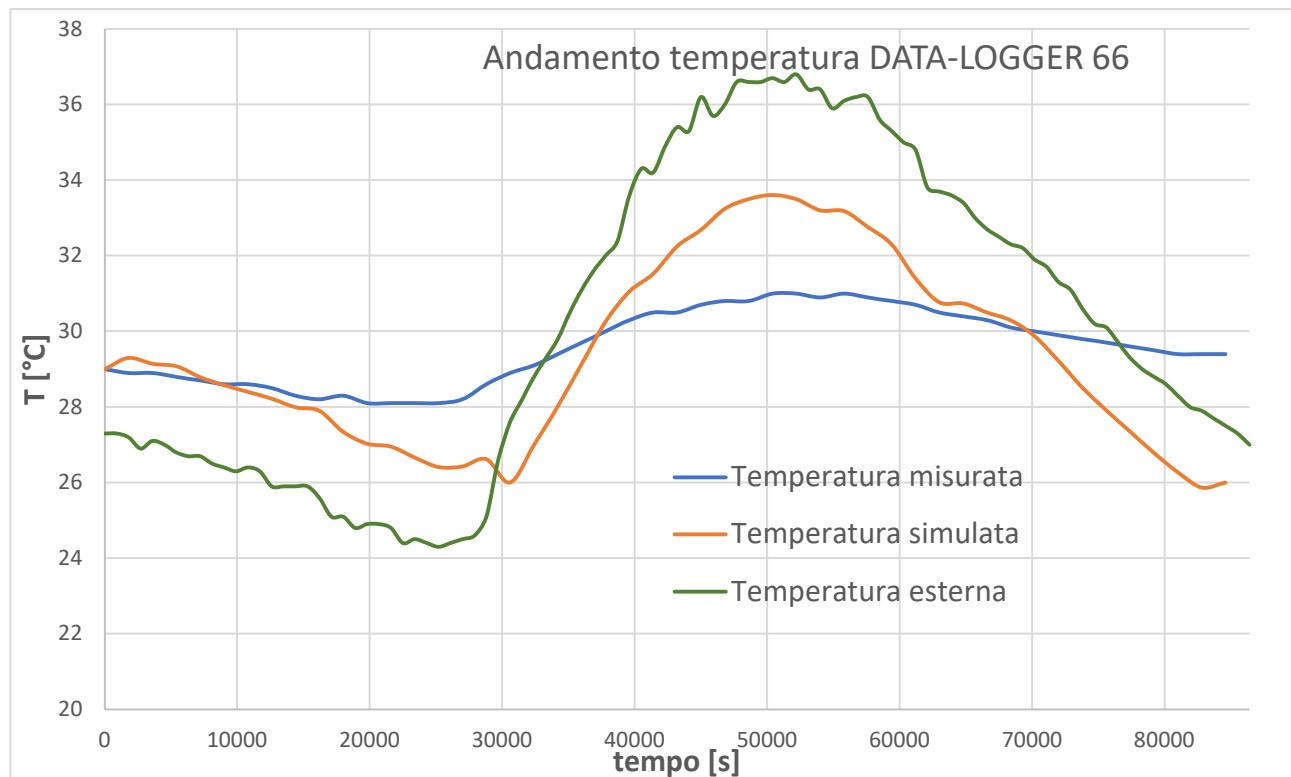


Figura 15 – Confronto valori di temperatura nella posizione DATA-LOGGER 66

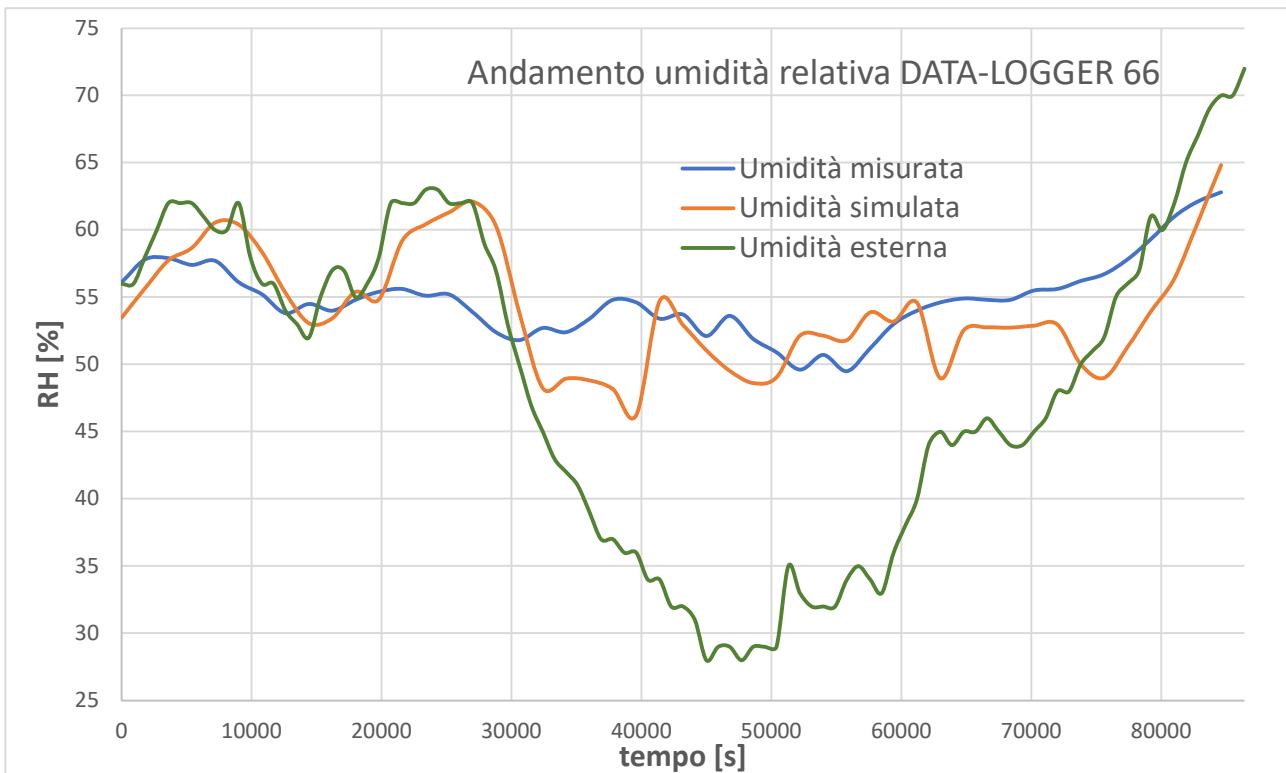


Figura 16 – Confronto valori umidità relativa nella posizione DATA-LOGGER 66

Posizione DATA-LOGGER 72

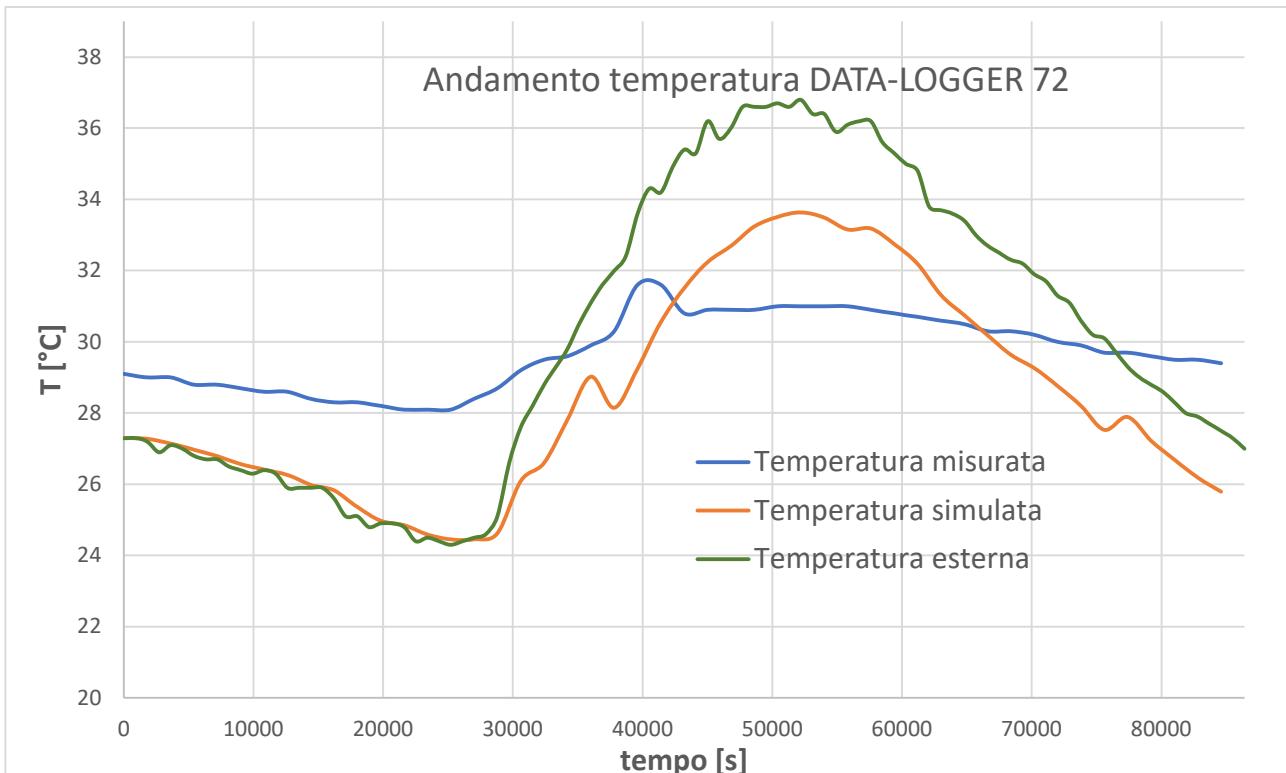


Figura 17 – Confronto valori di temperatura nella posizione DATA-LOGGER 72

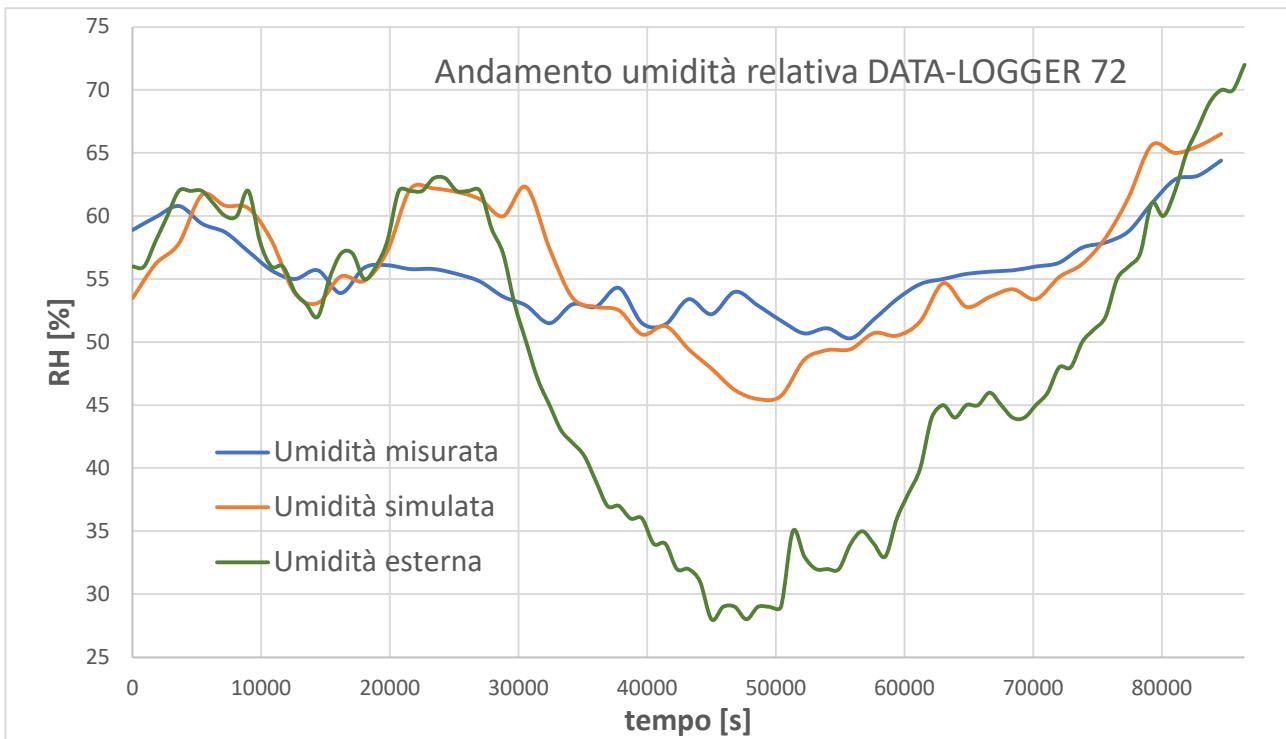


Figura 18 – Confronto valori umidità relativa nella posizione DATA-LOGGER 72

Posizione DATA-LOGGER 84

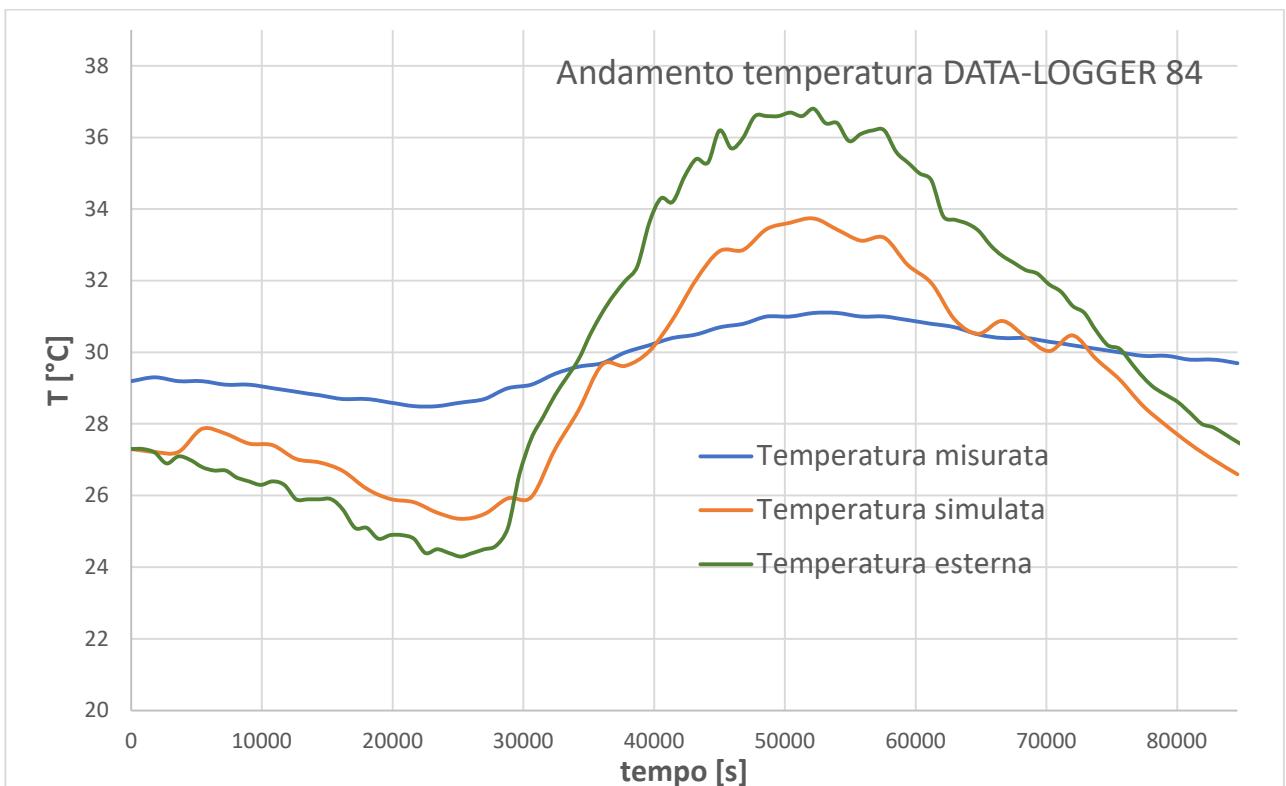


Figura 19 – Confronto valori di temperatura nella posizione DATA-LOGGER 84

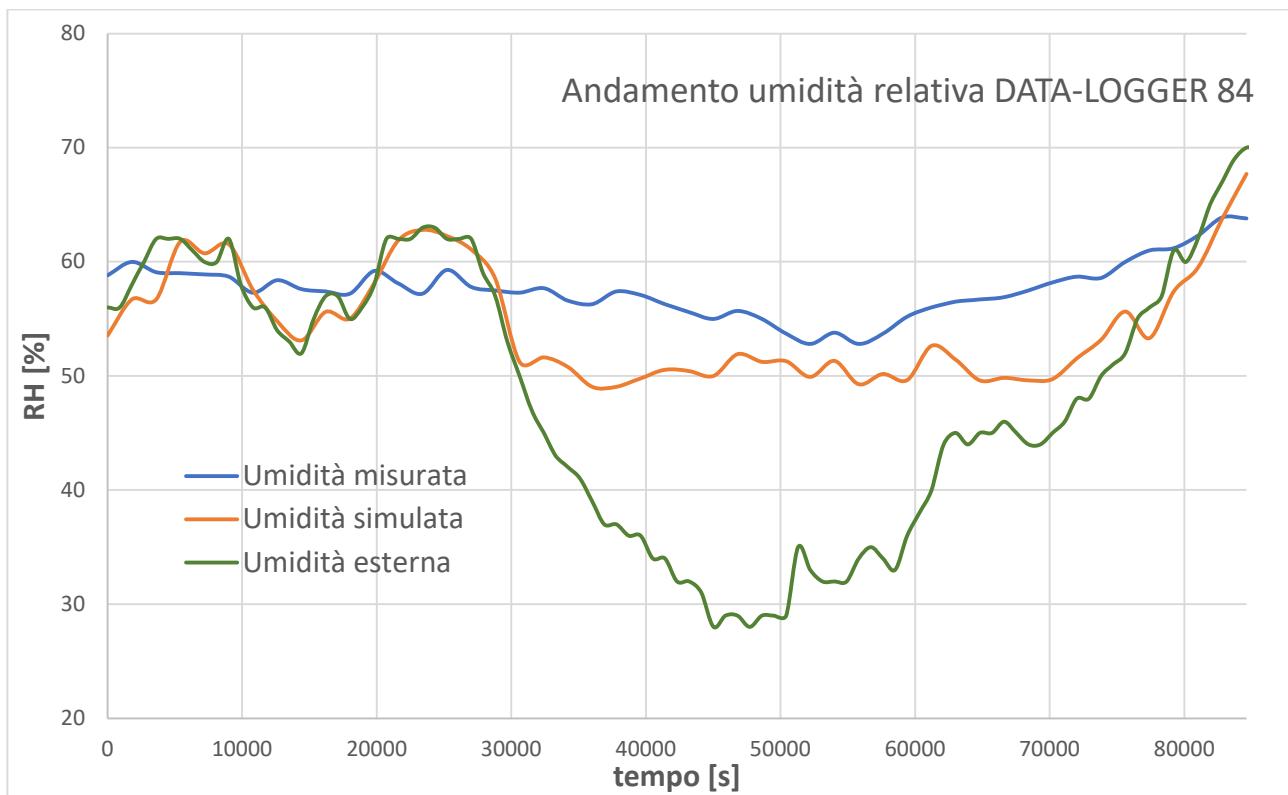


Figura 20 – Confronto valori umidità relativa nella posizione DATA-LOGGER 84

Campi di temperatura

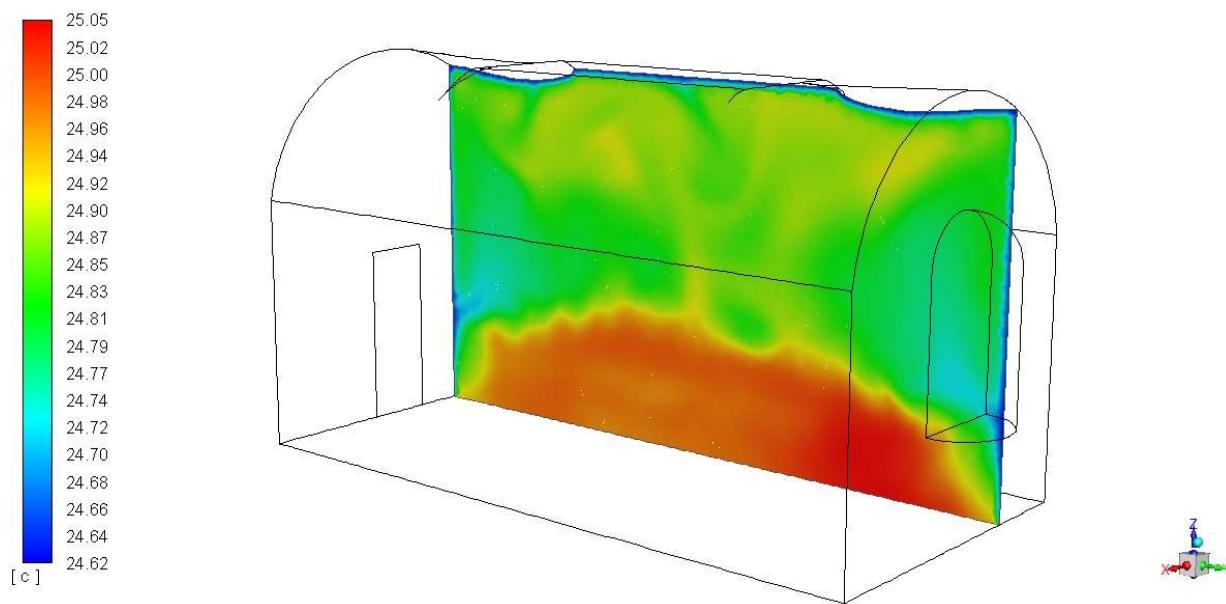


Figura 21 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO1

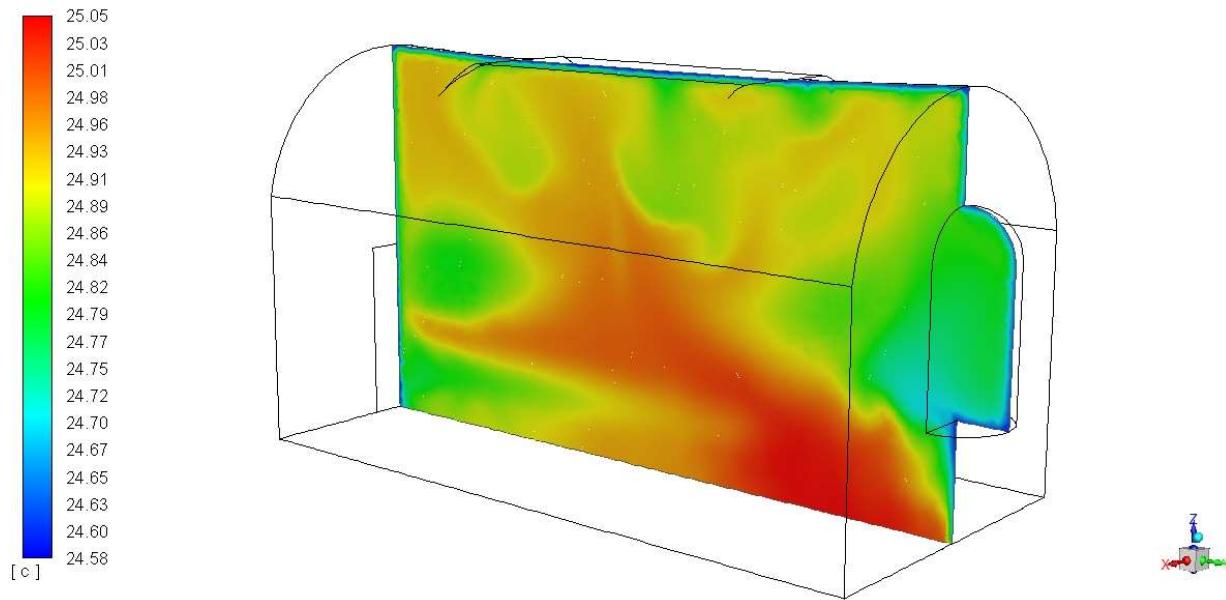


Figura 22 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO2

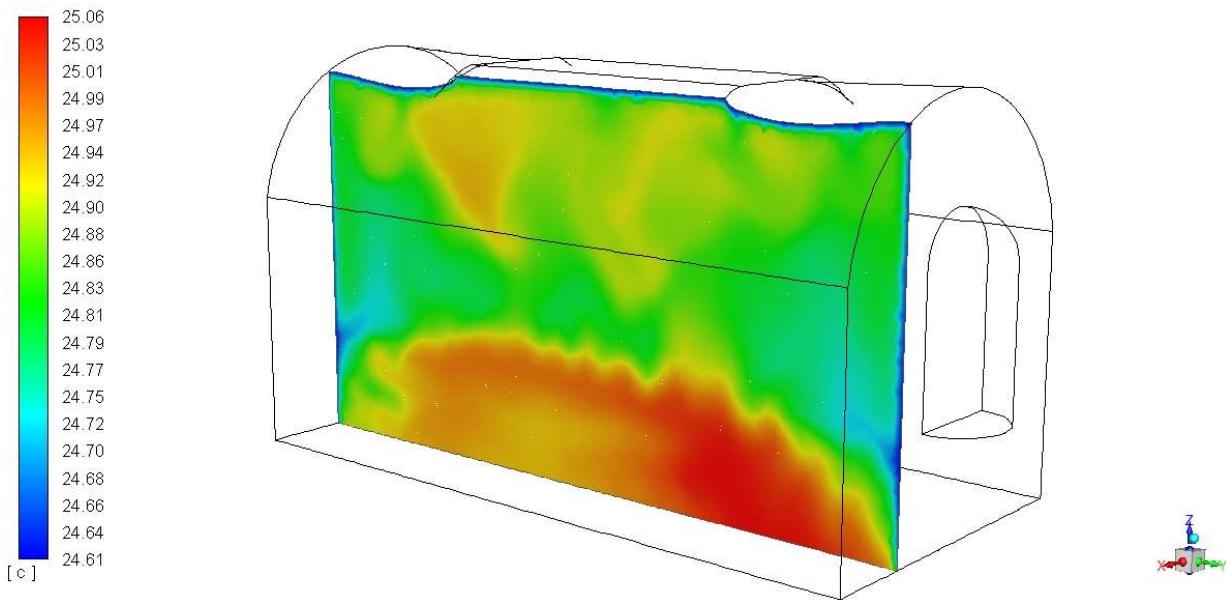


Figura 23 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO3

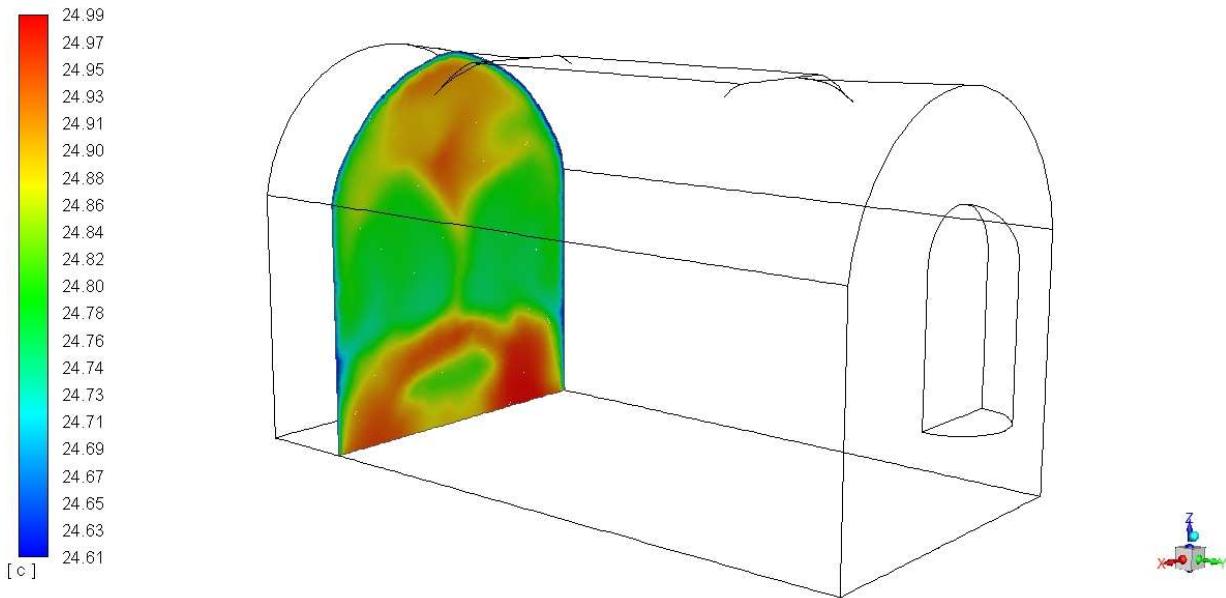


Figura 24 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO4

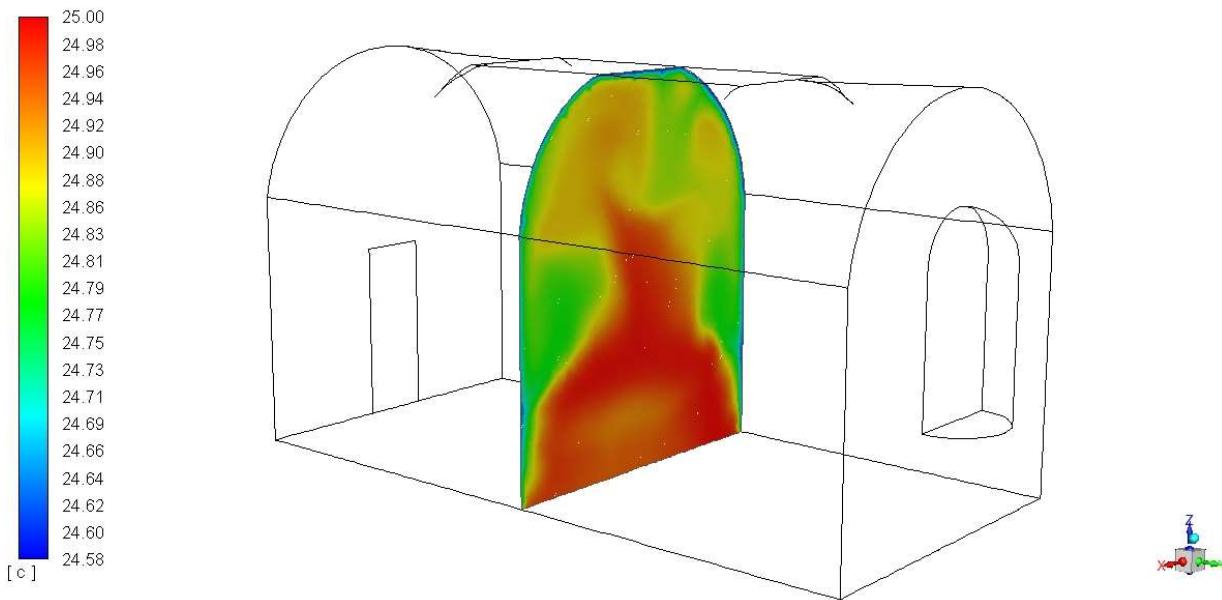


Figura 25 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO5

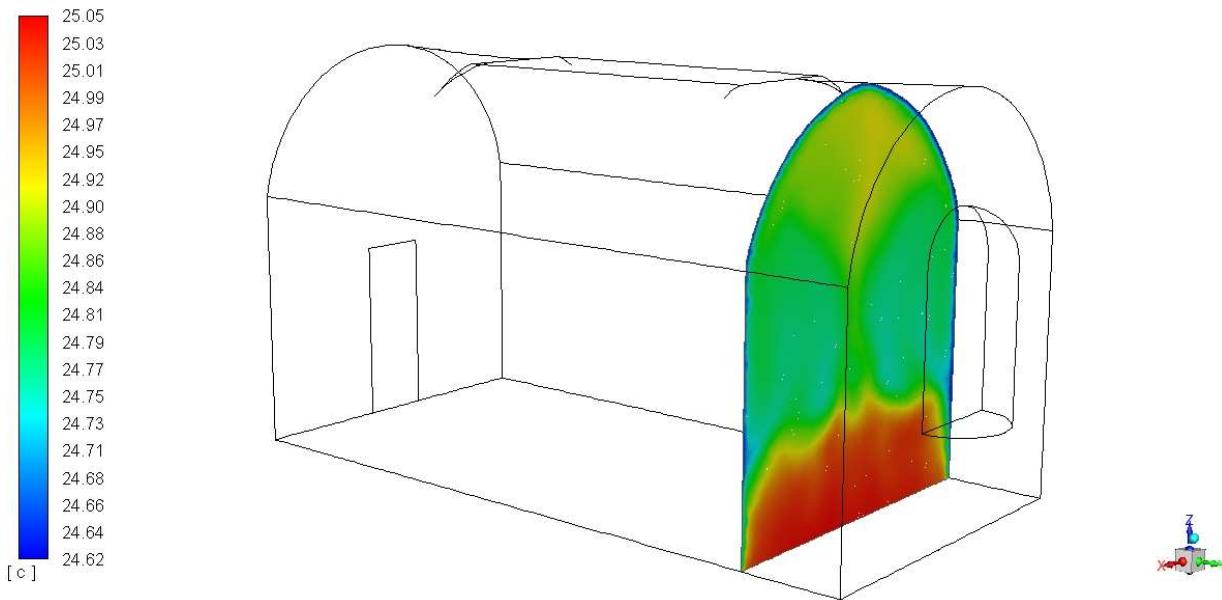


Figura 26 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO6

Campi di umidità relativa

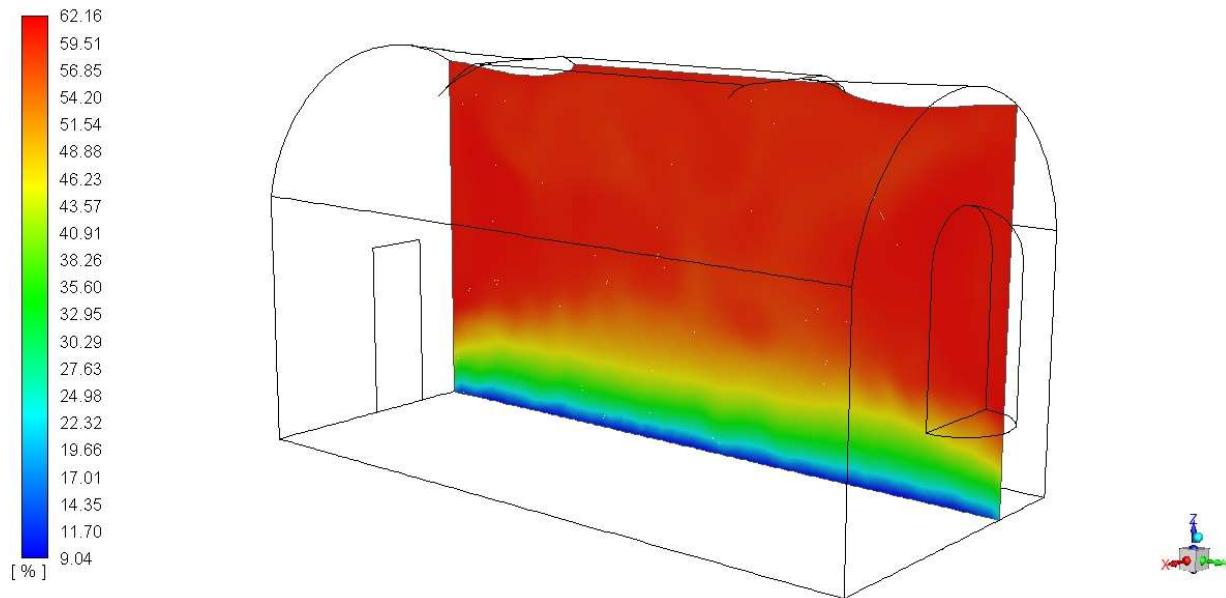


Figura 27 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO1

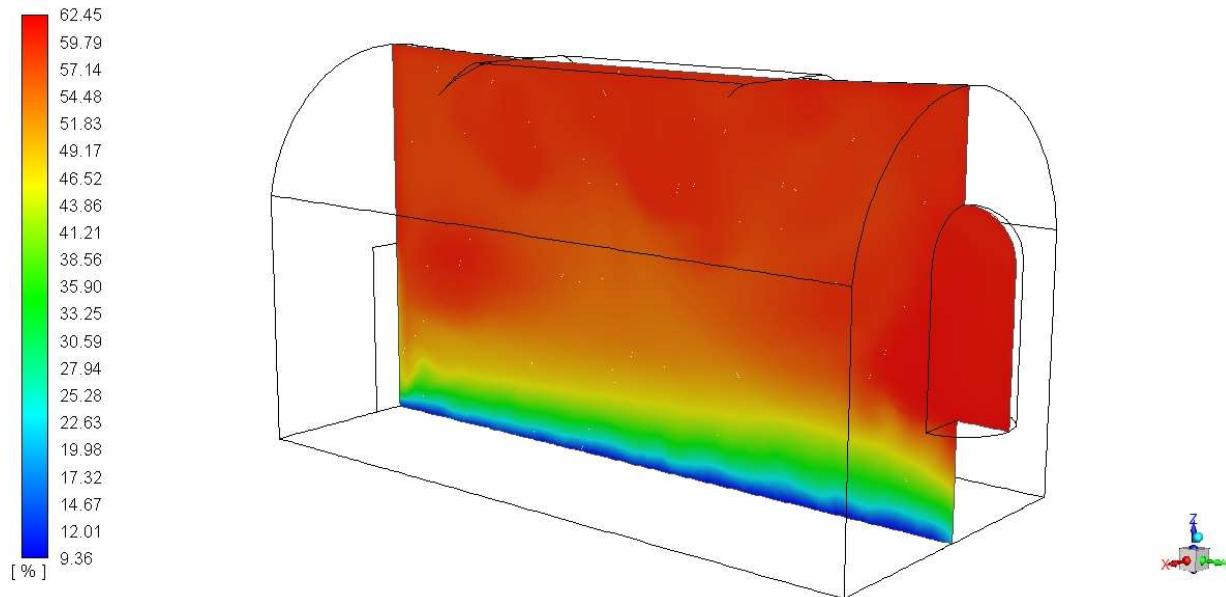


Figura 28 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO2

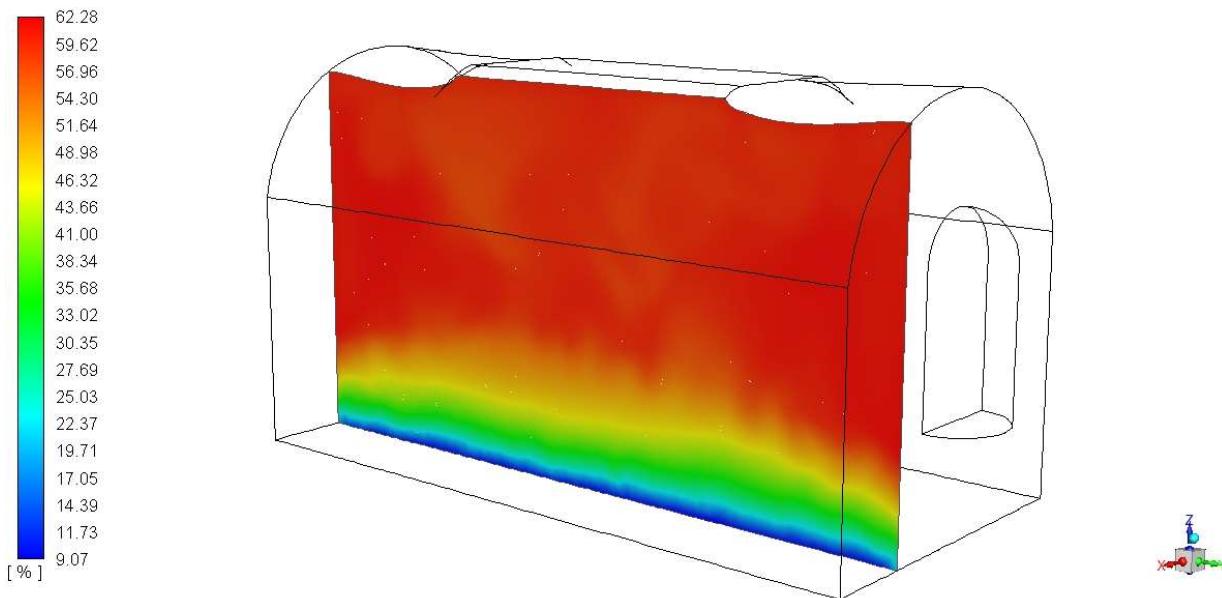


Figura 29 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO3

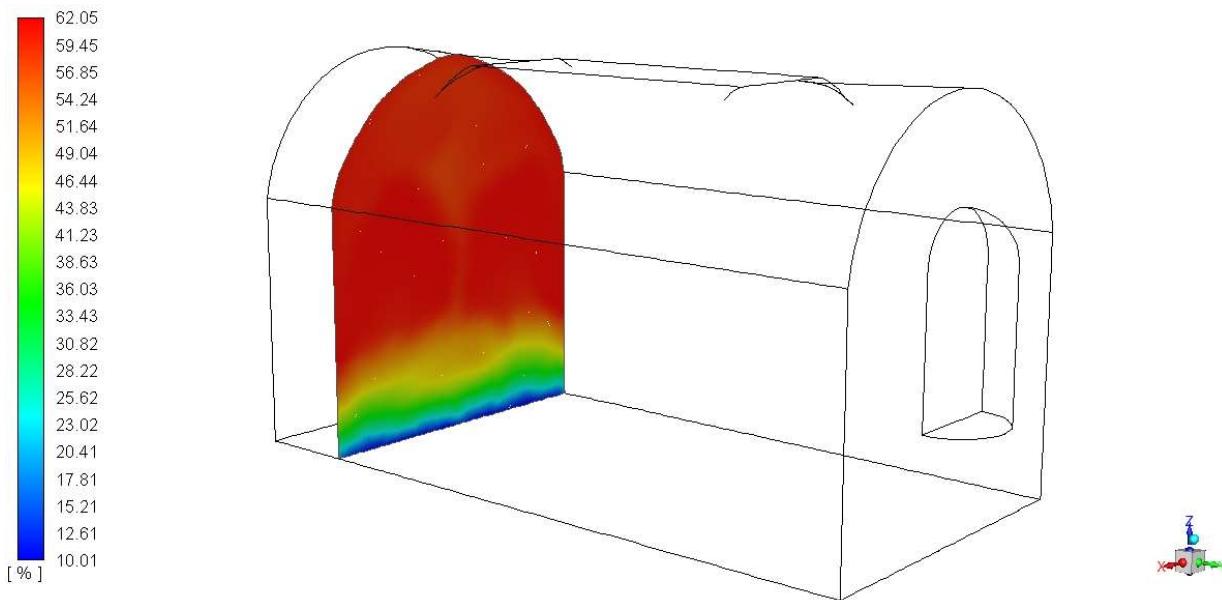


Figura 30 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO4

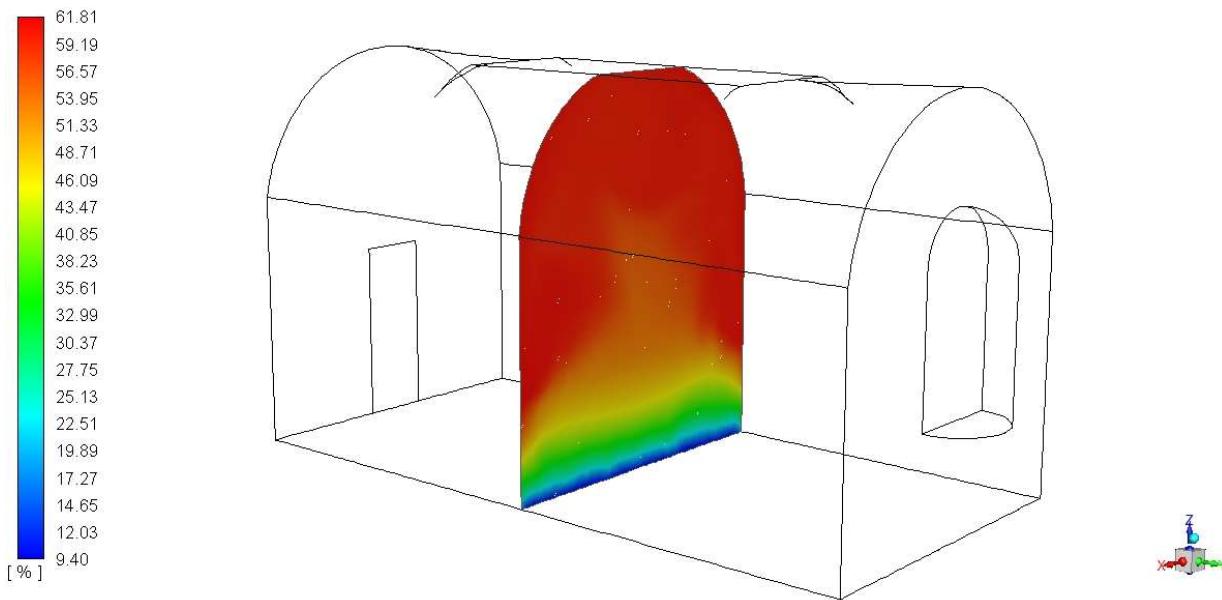


Figura 31 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO5

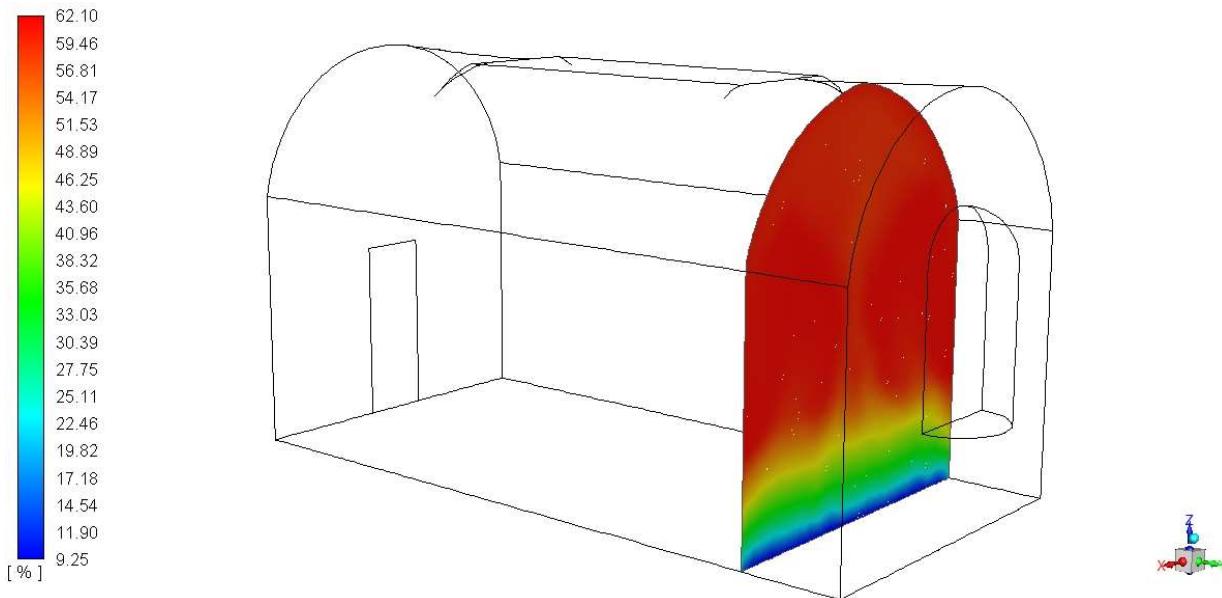


Figura 32 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO6

Vettori velocità

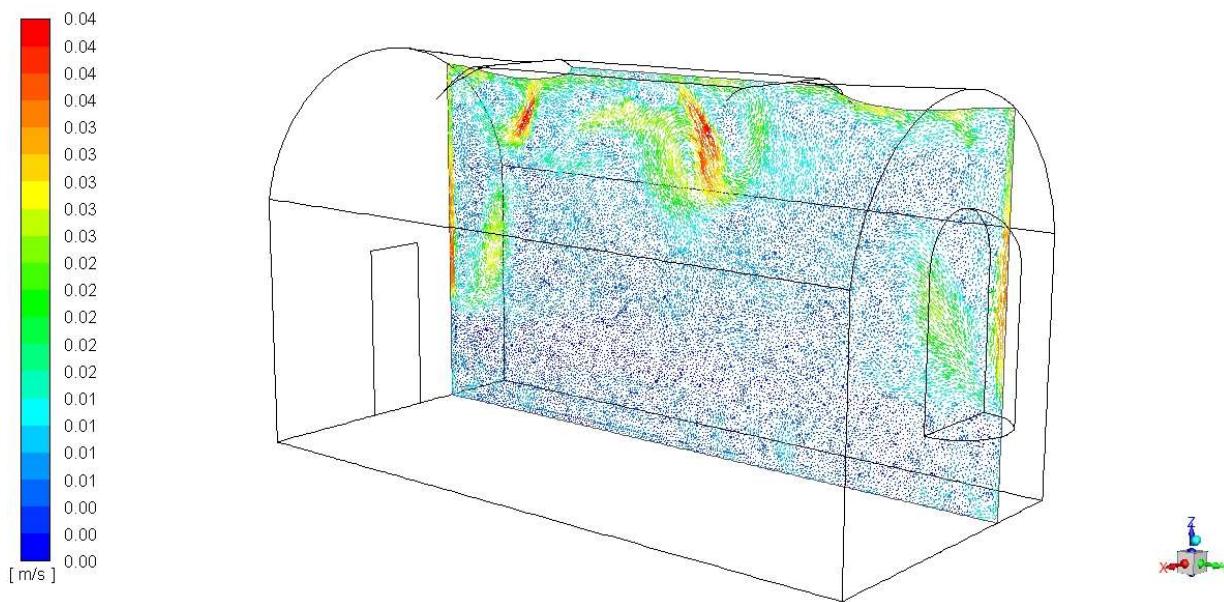


Figura 33 – Visualizzazione vettori velocità per il PIANO1

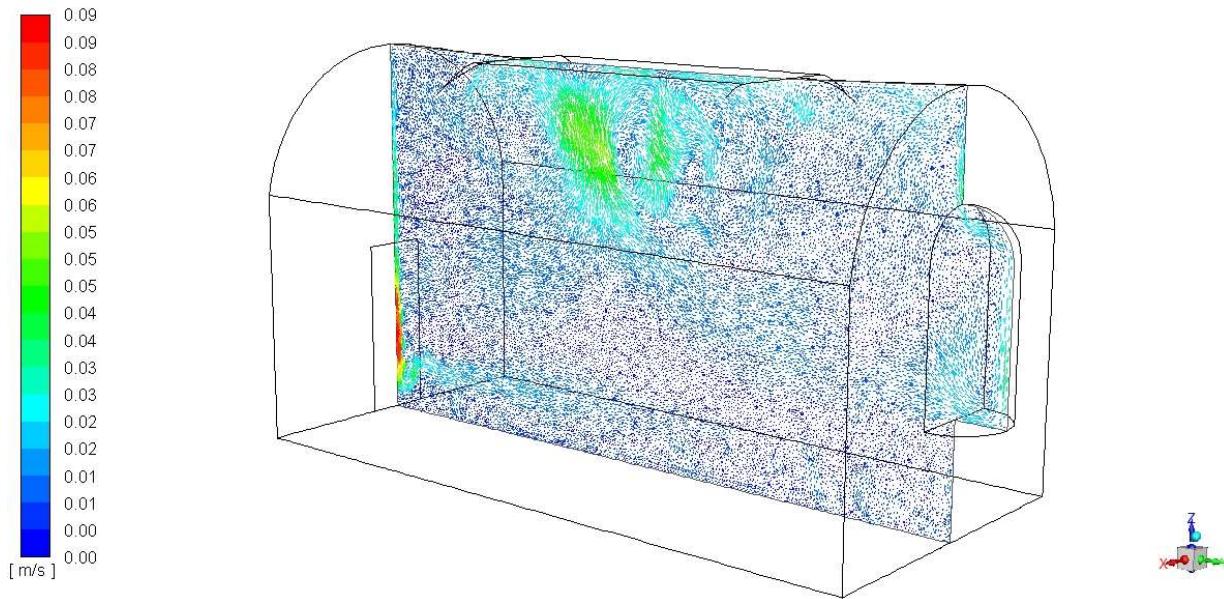


Figura 34 – Visualizzazione vettori velocità per il PIANO2

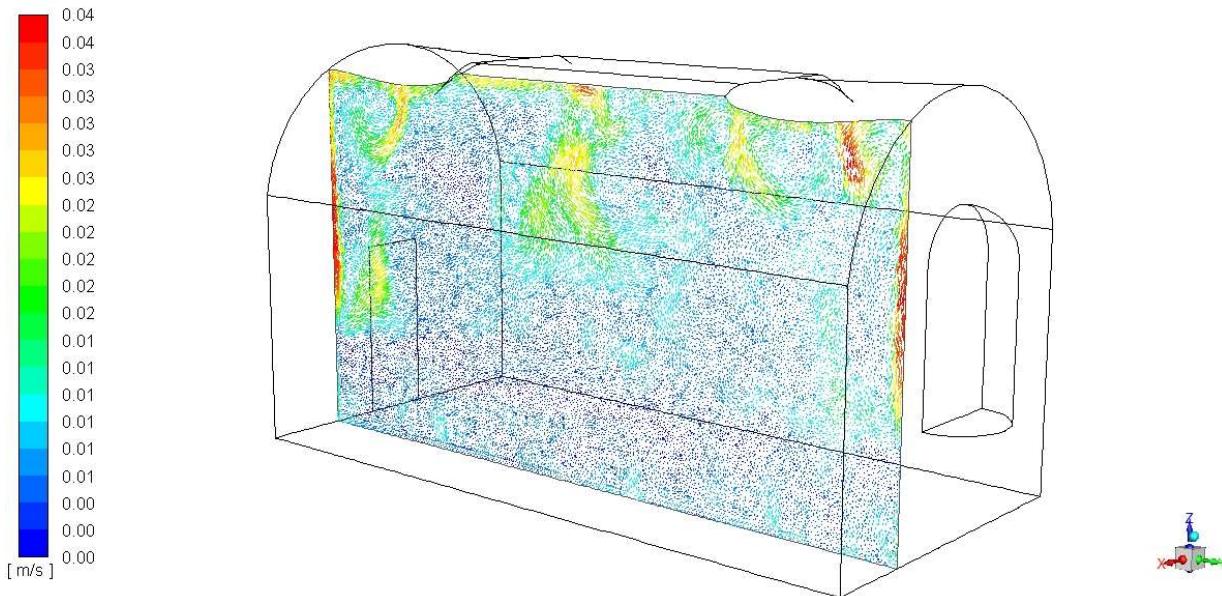


Figura 35 – Visualizzazione vettori velocità per il PIANO3

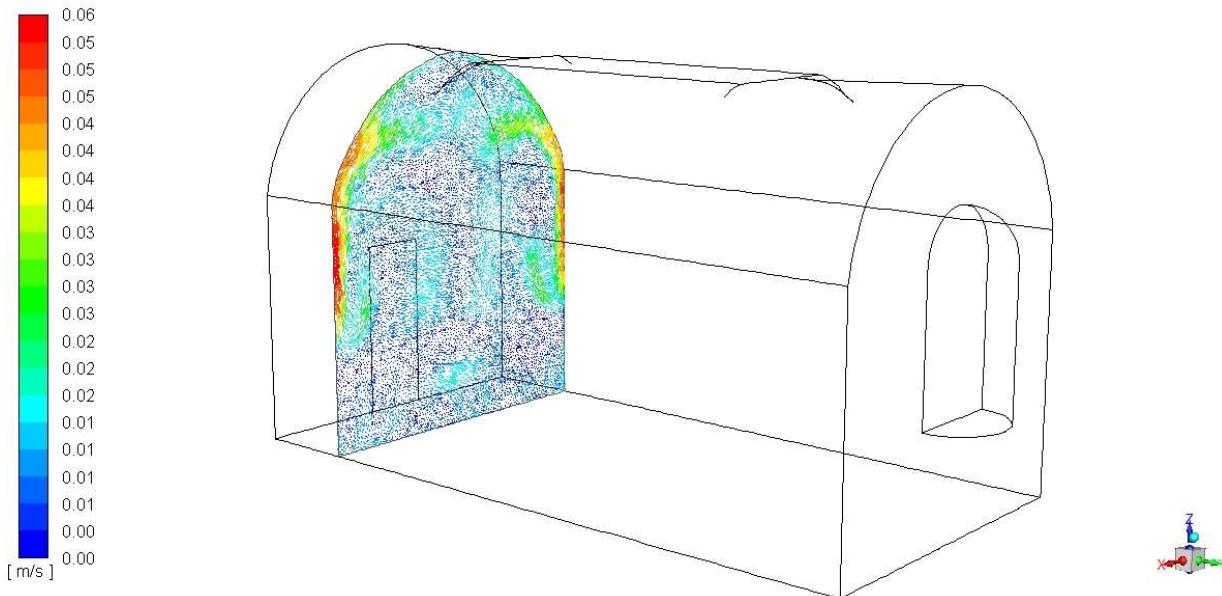


Figura 36 – Visualizzazione vettori velocità per il PIANO4

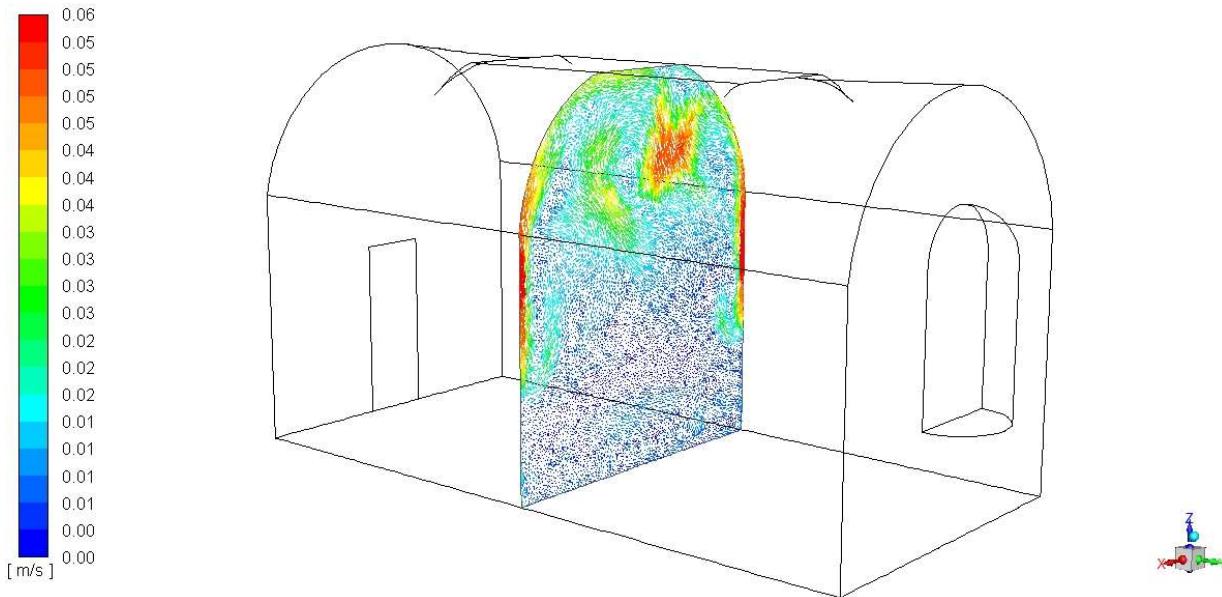


Figura 37 – Visualizzazione vettori velocità per il PIANO5

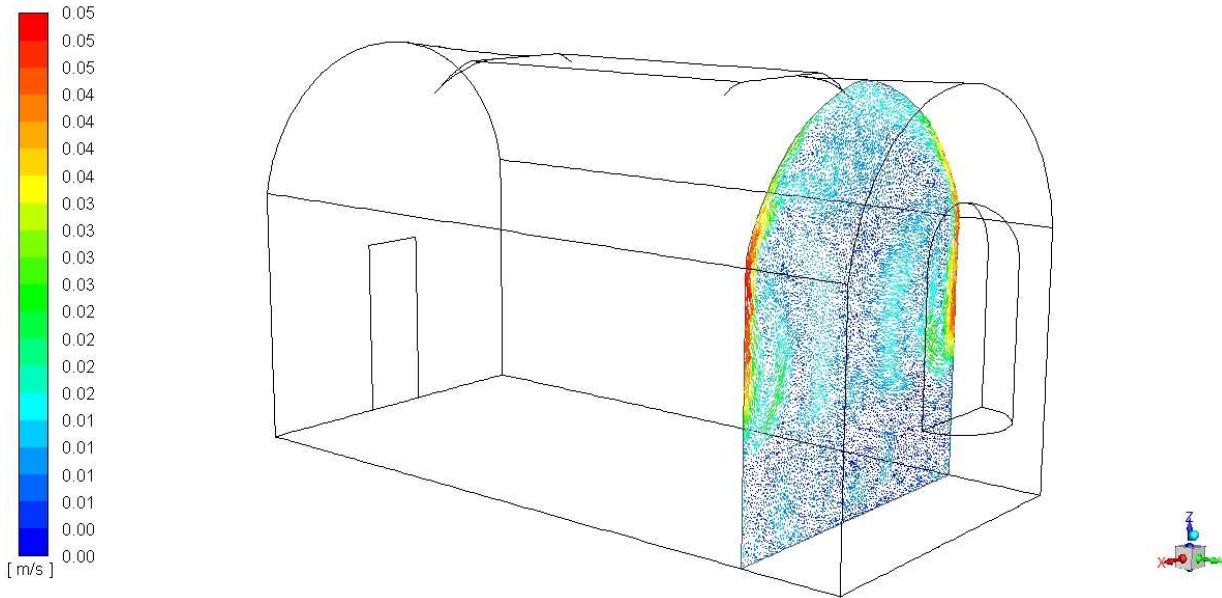


Figura 38 – Visualizzazione vettori velocità per il PIANO6

SPECIFICHE CABINA ELETTRICA

Tutti i dati tecnici relativi alla cabina elettrica e all'impianto di ventilazione sono stati forniti dall'azienda Sepli s.r.l. progettista dell'impianto.

Le caratteristiche elettriche fondamentali della cabina sono:

- Tipo di alimentazione: MT
- Potenza: 500 kW
- Sistema di distribuzione: TN-S
- Frequenza: 50Hz
- Tensione Trifase: 20kV/400V $\pm 5\%$
- Stato del neutro: Distribuito

Inoltre, vengono indicate le seguenti specifiche:

- Il calore prodotto da dissipare mediante un impianto di ventilazione è pari a 3250 W
- Le portate dell'aria di ventilazione sono comprese tra i 1100 m³/h e i 2200 m³/h
- L'impianto di ventilazione deve garantire temperature interne non superiori ai 40 °C
- Le velocità dell'aria all'interno delle canalizzazioni principali non devono superare i 5-6 m/s, mentre in quelli secondari i 2-4.5 m/s

SIMULAZIONE CABINA ELETTRICA SENZA CONFINAMENTO

Nella Figura 39 è riportata uno screen-shot tratto dalle tavole progettuali della cabina elettrico che evidenziano il sistema di ventilazione, che è caratterizzato ad un impianto di estrazione meccanica che utilizza con presa di aria esterna, non canalizzata, e una griglia posta sulla porta di ingresso al Museeto.

Per questa tipologia, con riferimento ad un giorno medio coincidente con il giorno peggiore rilevato sperimentalmente, sono state effettuate due differenti simulazioni in regime periodico stabilizzato, rispettivamente con porta minima e massima dell'aria di ventilazione in accordo con le specifiche della cabina elettrica (1100 m³/h e 2200 m³/h)

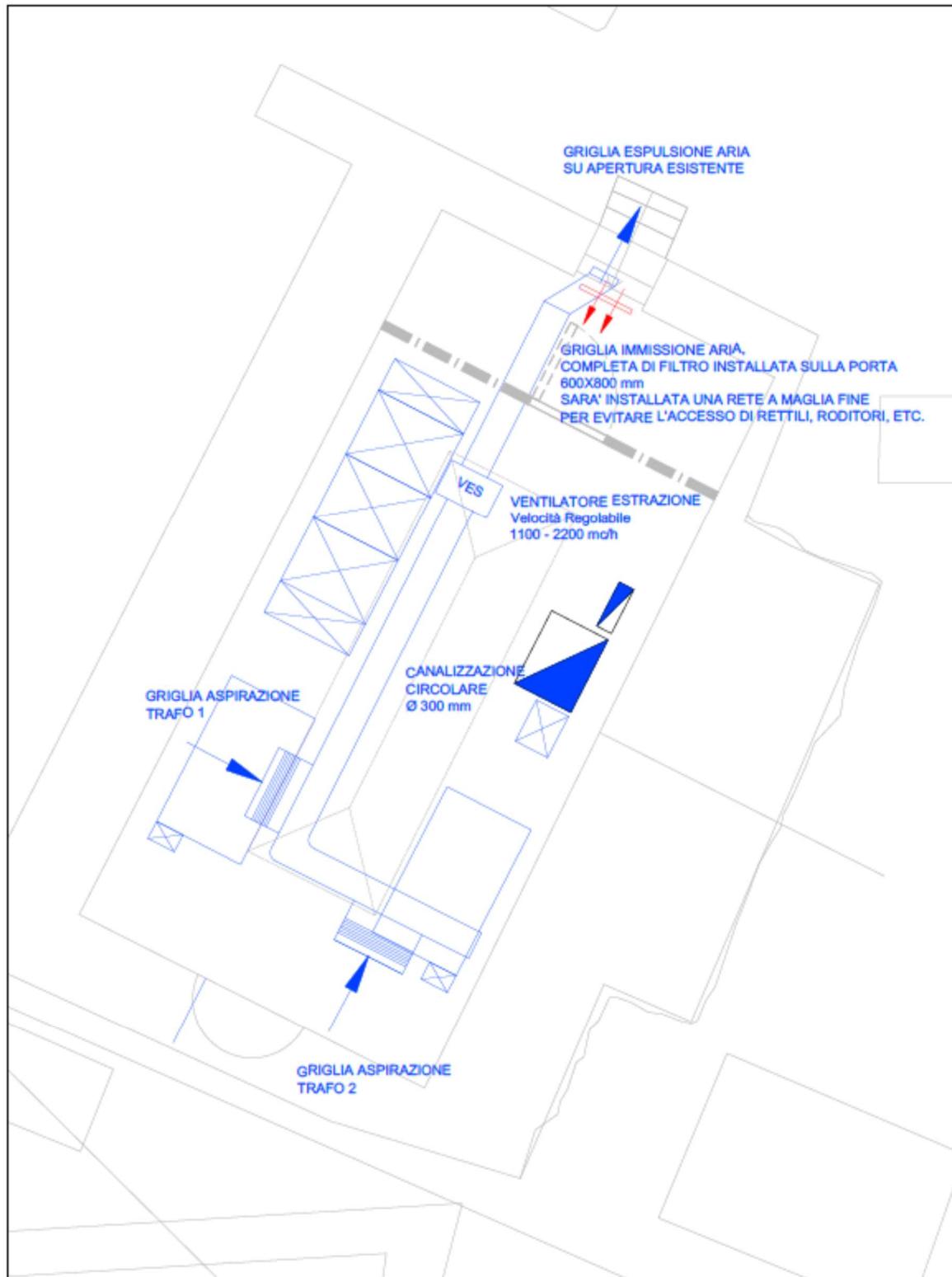


Figura 39 – Impianto estrazione aria

PORTATA MINIMA PREVISTA

I risultati delle simulazioni, riportati nelle Figure 40-45 e riferiti ad una portata di 1100 m³/h, mostrano che la presenza della cabina altera notevolmente le condizioni termoigrometriche all'interno dell'edificio; inoltre, indicano che il sistema di estrazione dell'aria non è in grado di mantenere la temperatura entro i range di funzionamento previsti per il corretto funzionamento dei trasformatori. Come conseguenza di questa situazione i valori di umidità relativa scendono a valori piuttosto bassi rispetto a quelli esterni.

Ad esempio, con riferimento alla posizione del DATA-LOGGER 66, si ha un aumento della temperatura interna di circa 8 °C in presenza della cabina elettrica, e una umidità relativa fino a circa il 22-23%. Stesso comportamento si rileva nel DATA-LOGGER DATA-LOGGER 72, dove l'umidità scende ancora di più, fino a toccare valori minimi di 18%. Per il DATA-LOGGER DATA-LOGGER 84, le variazioni sembrano più attenuate, con un aumento della temperatura fino a 40 °C, quindi di 2-3 °C superiore al caso senza cabina elettrica, e una diminuzione dell'umidità più contenuta, con valori minimi attorno al 25%.

I campi di temperatura mostrati, riportati nelle Figure 46-51, mostrano come l'aumento di temperatura evidenziato in corrispondenza dei sensori si estende a tutto l'ambiente interno. Infatti, analizzando le immagini si può notare una stratificazione della temperatura, ma con una distribuzione uniforme nelle zone stratificate.

Il campo di umidità, riportato nelle Figure 52-57, è pressoché uniforme in tutto l'ambiente studiato, con alcune variazioni vicino ai trasformatori che generano calore.

I vettori velocità, riportati nelle Figure 58- 64, mostrano l'andamento dell'aria nell'ambiente: si notano i flussi di aria che entrano dalla griglia posizionata in corrispondenza della porta di entrata e il richiamo di aria verso le griglie poste in alto per poi seguire la tubazione ed essere espulsa all'esterno.

Posizione DATA-LOGGER 66

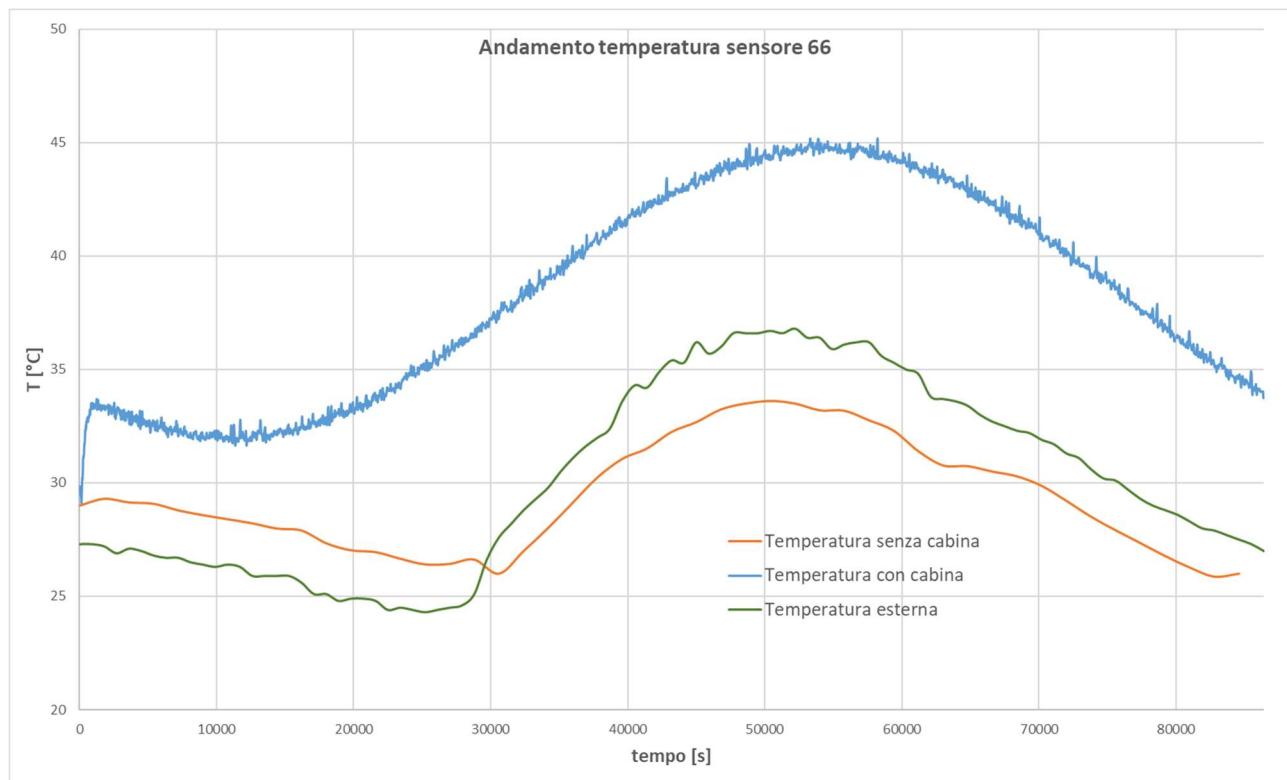


Figura 40 – Confronto valori di temperatura nella posizione DATA-LOGGER 66

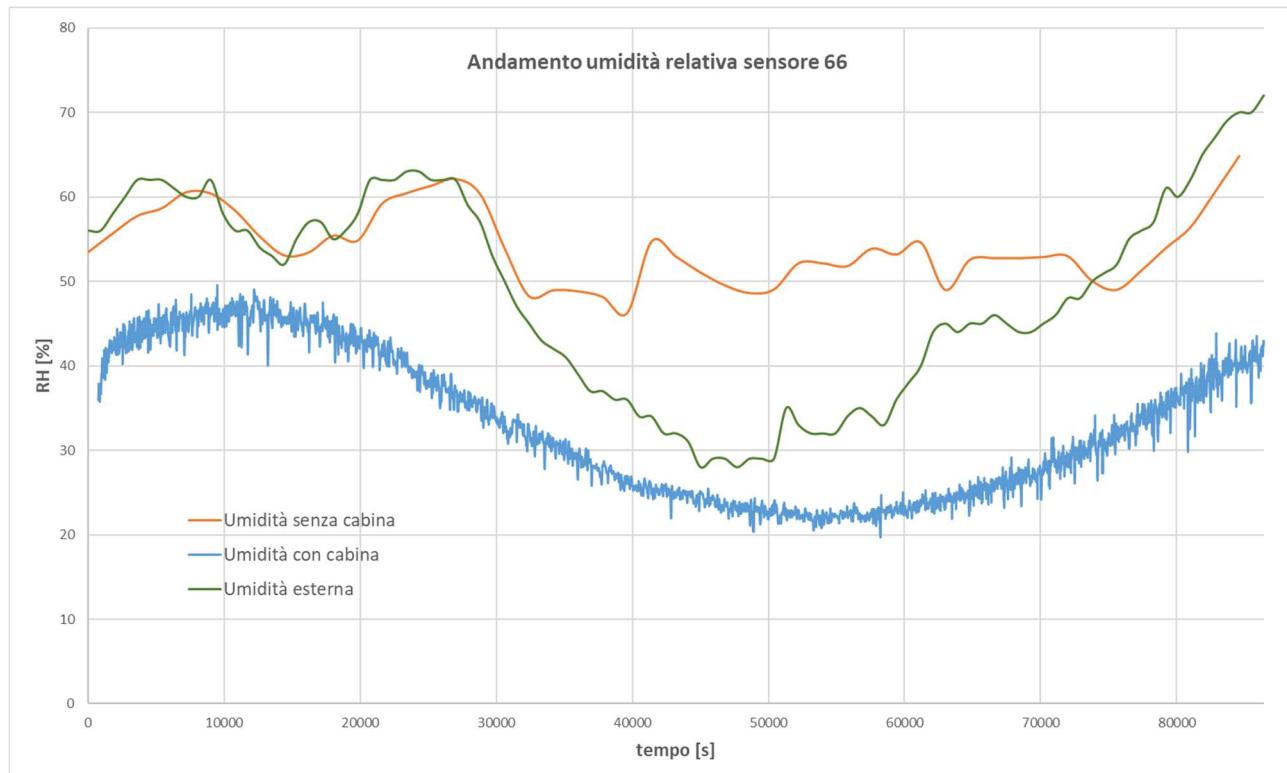


Figura 41 – Confronto valori umidità relativa nella posizione DATA-LOGGER 66

Posizione DATA-LOGGER 72

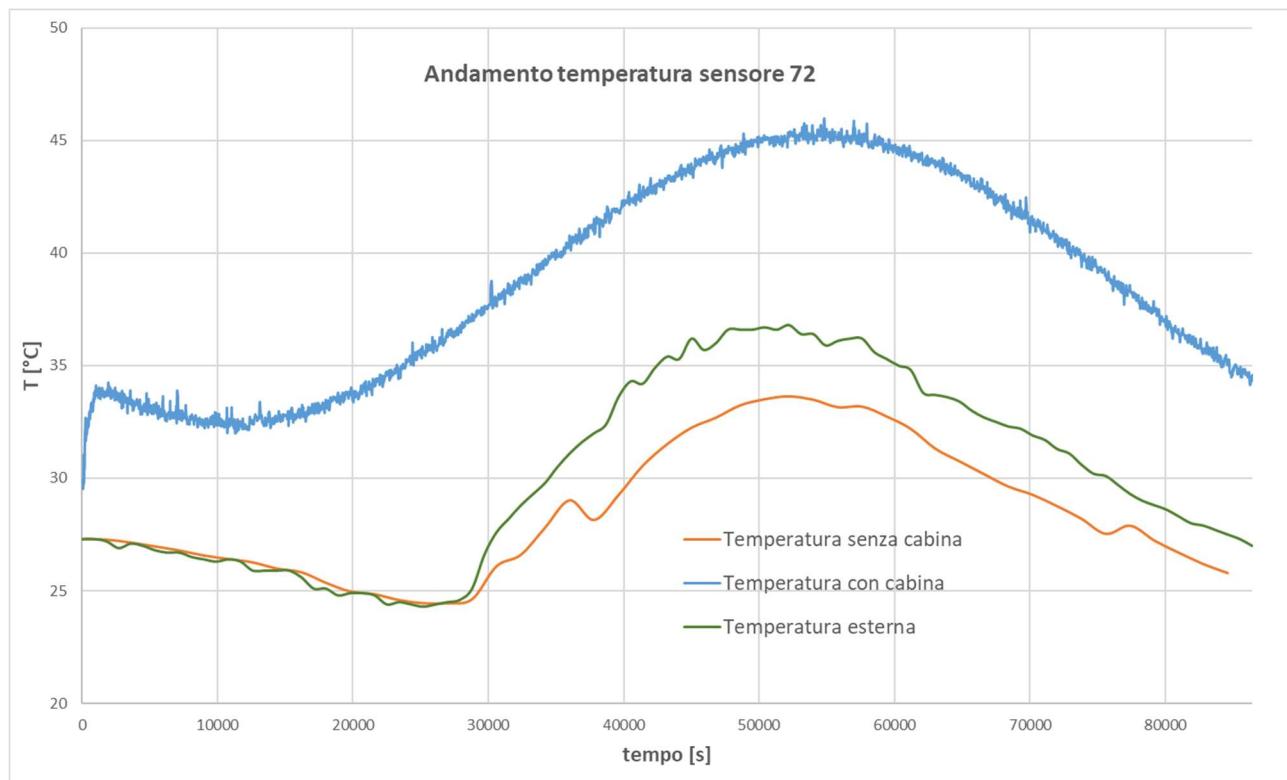


Figura 42 – Confronto valori di temperatura nella posizione DATA-LOGGER 72

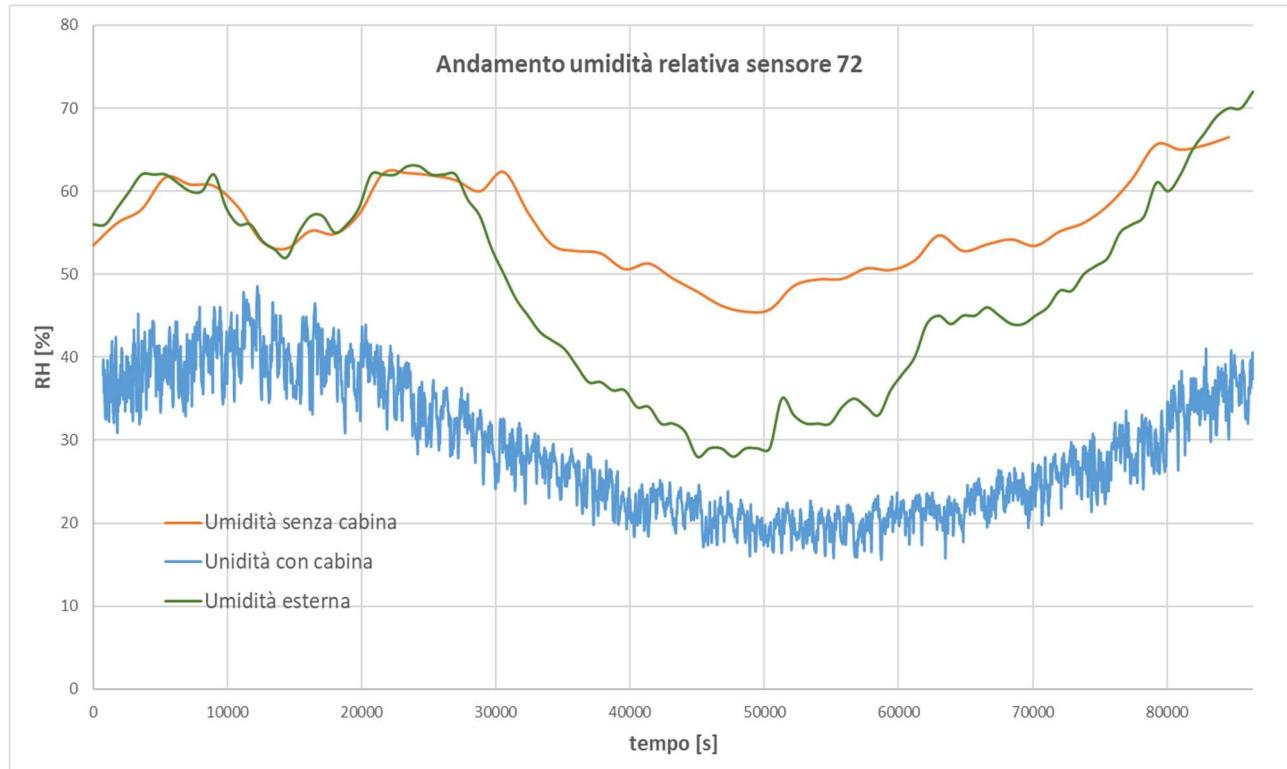


Figura 43 – Confronto valori umidità relativa nella posizione DATA-LOGGER 72

Posizione DATA-LOGGER 84

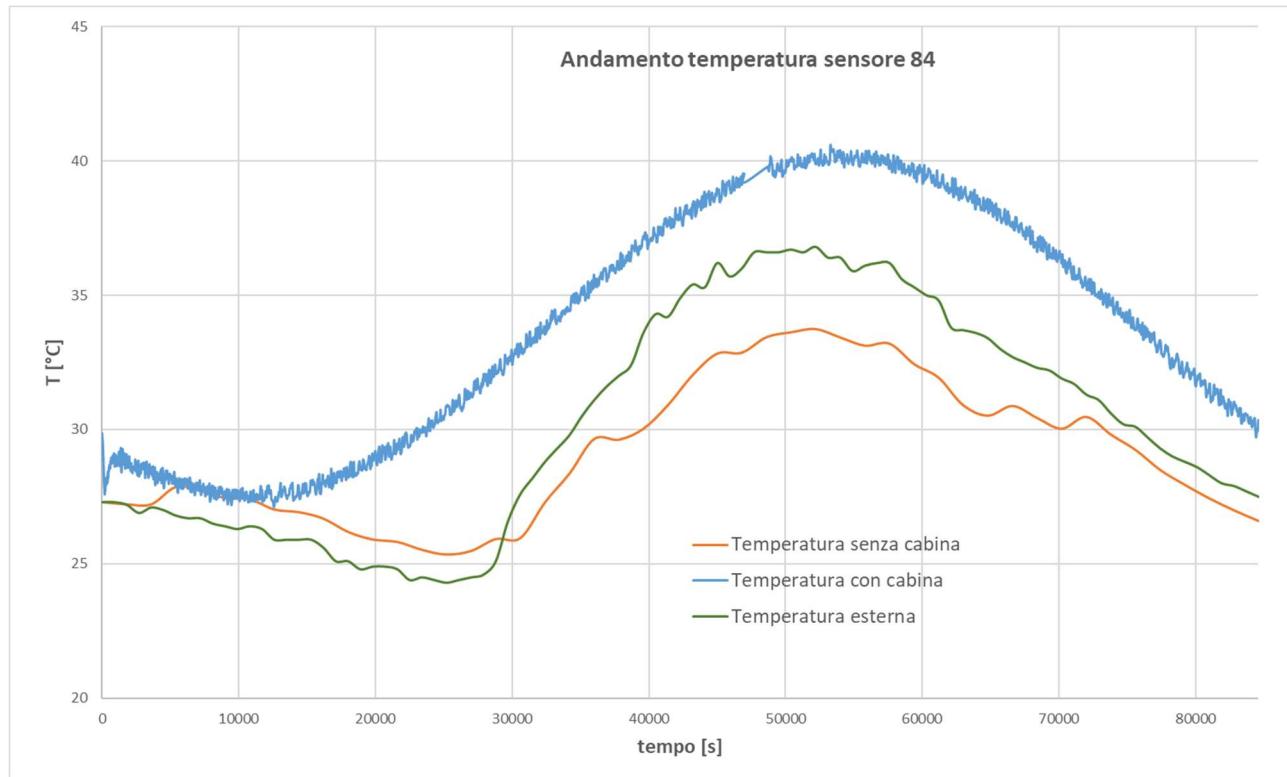


Figura 44 – Confronto valori di temperatura nella posizione DATA-LOGGER 84

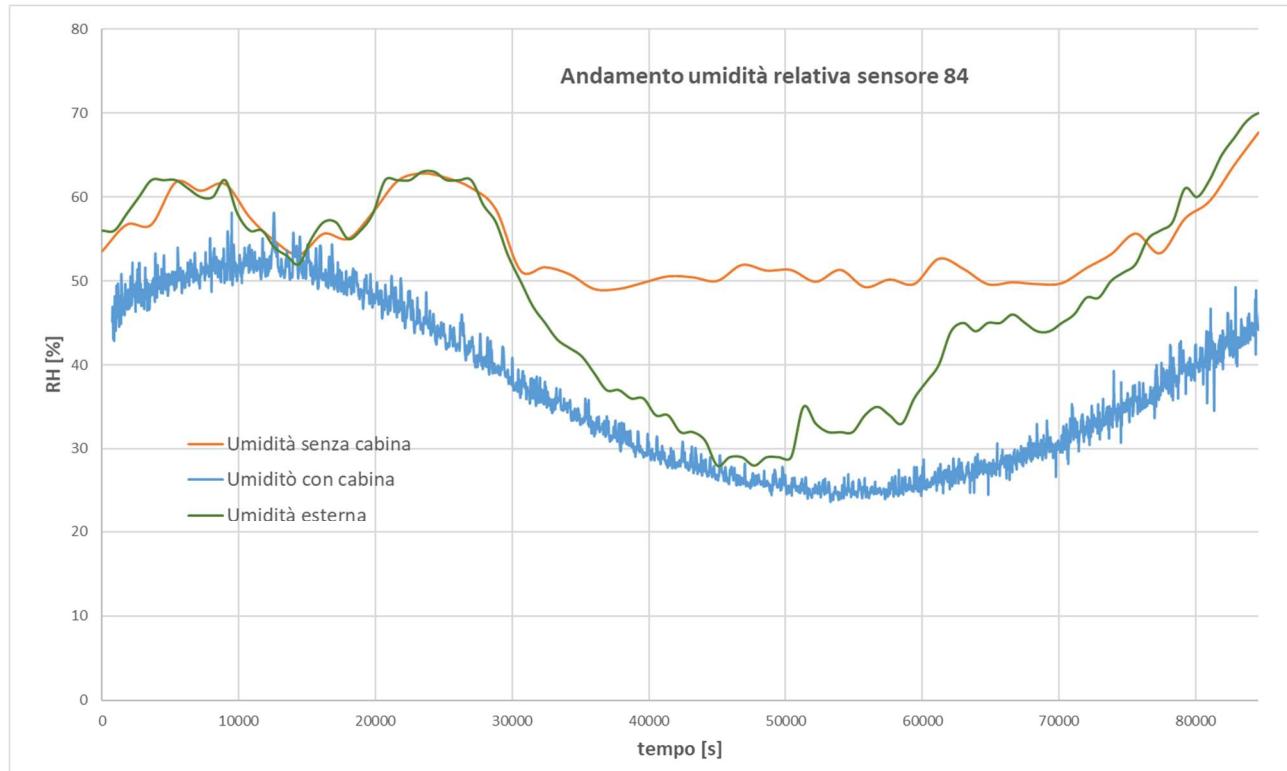


Figura 45 – Confronto valori umidità relativa nella posizione DATA-LOGGER 84

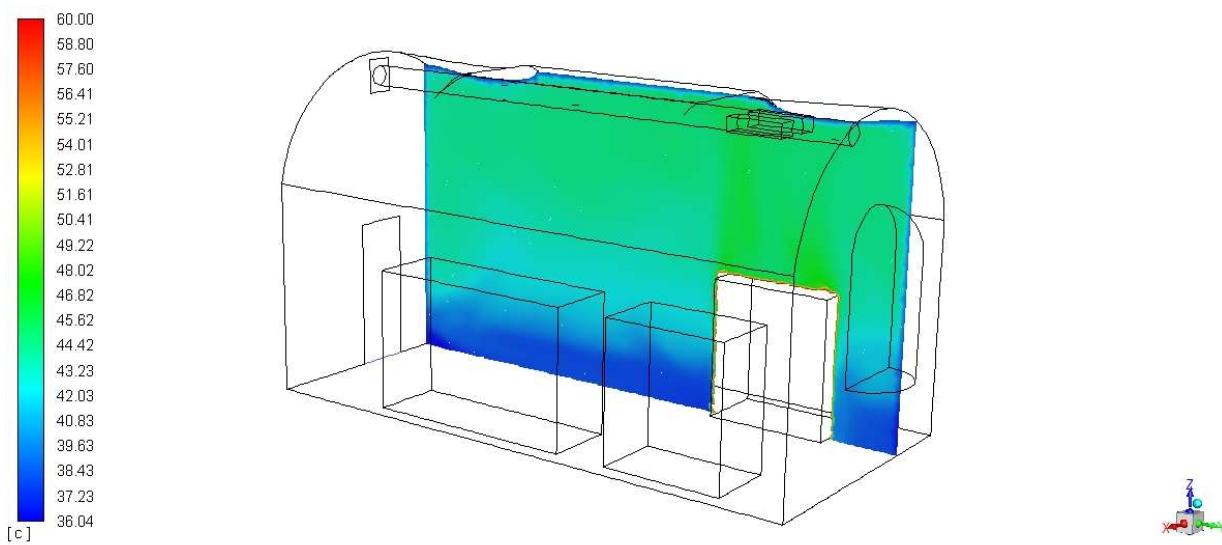


Figura 46 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO1

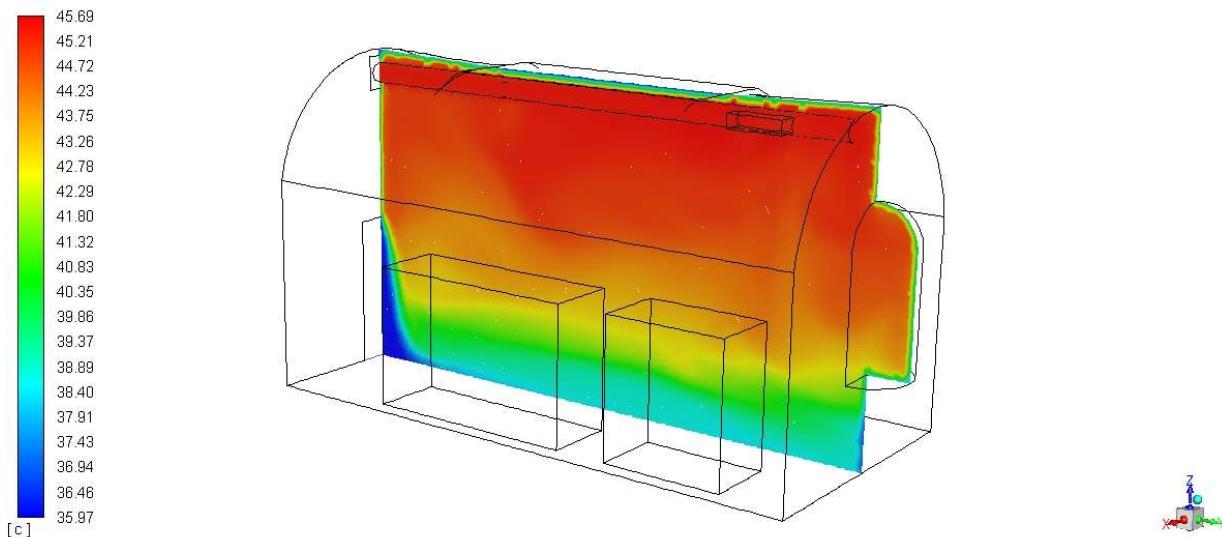


Figura 47 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO2

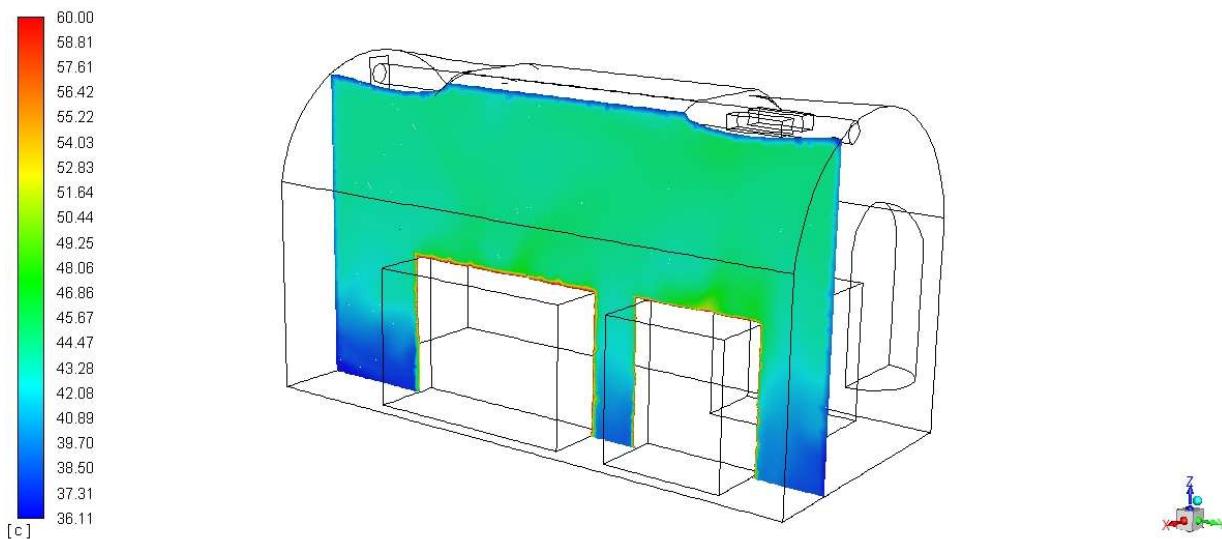


Figura 48 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO3

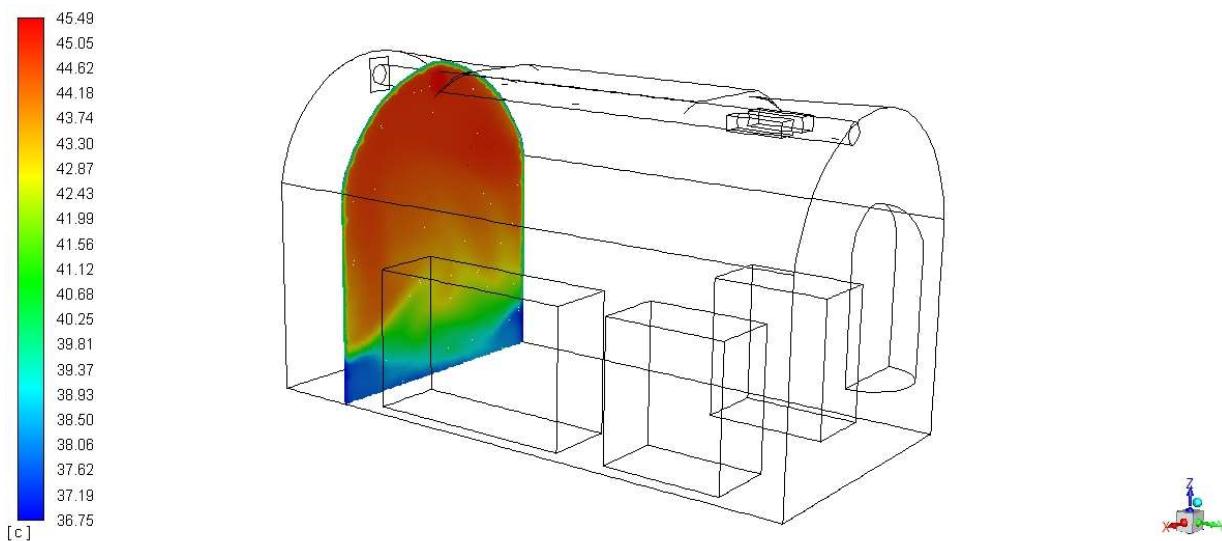


Figura 49 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO4

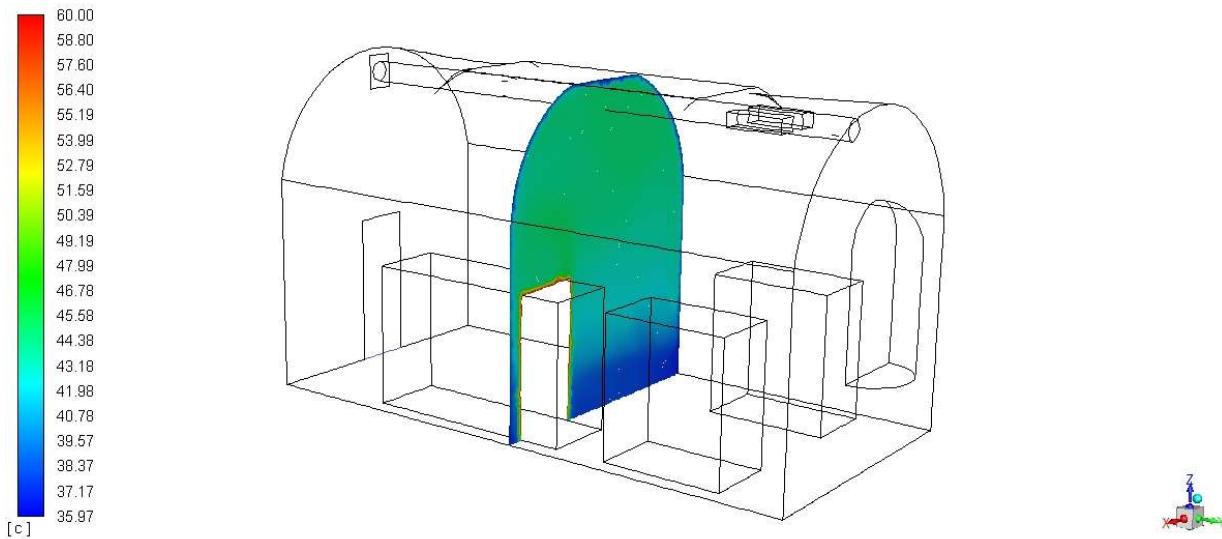


Figura 50 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO5

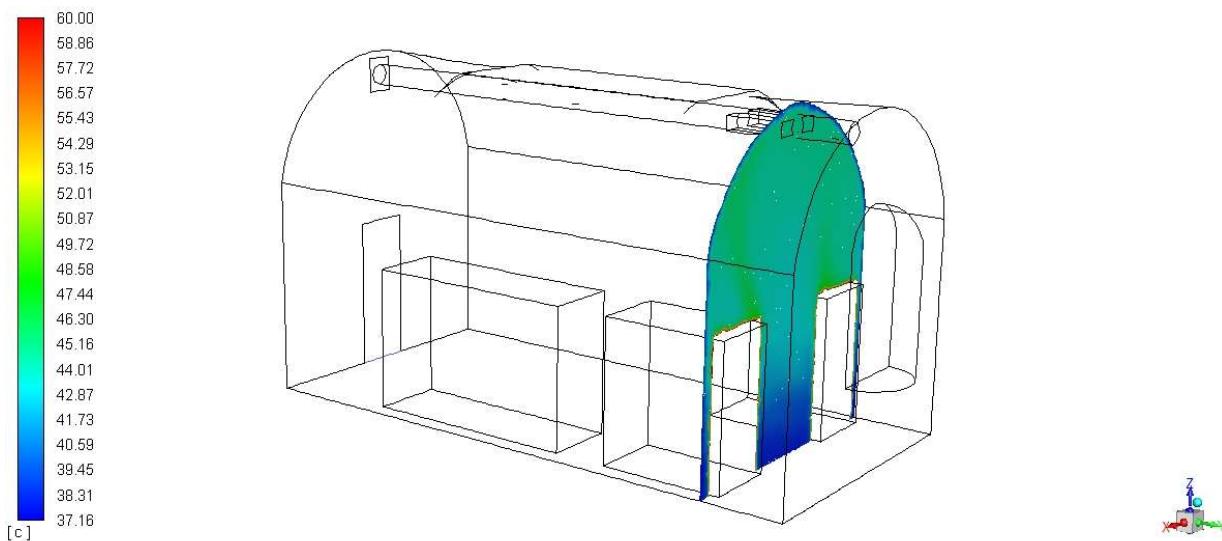


Figura 51 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO6

Campi di umidità relativa

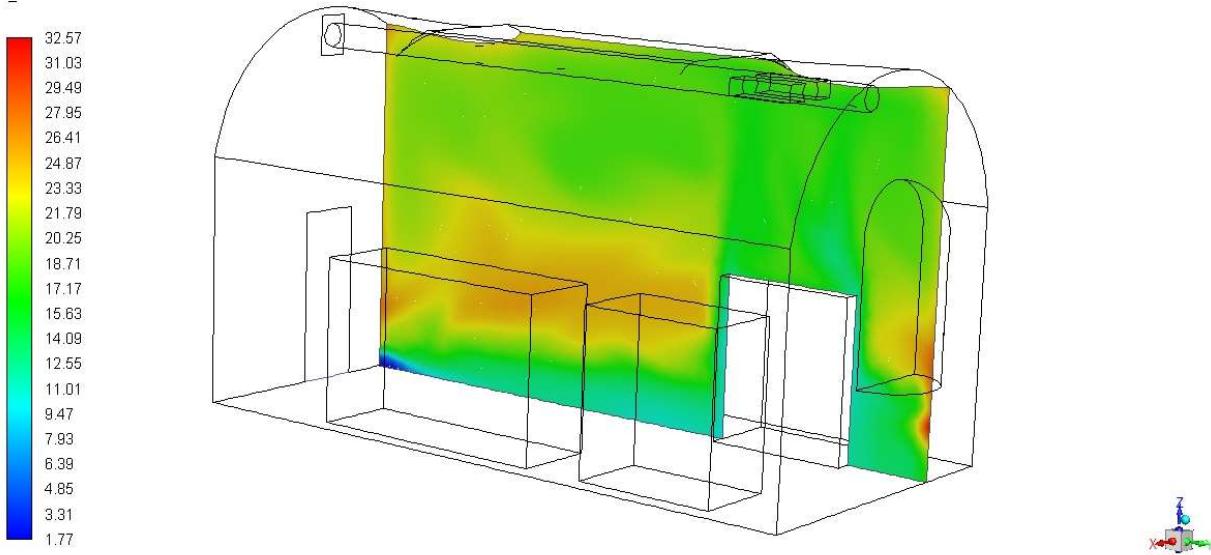


Figura 52 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO1

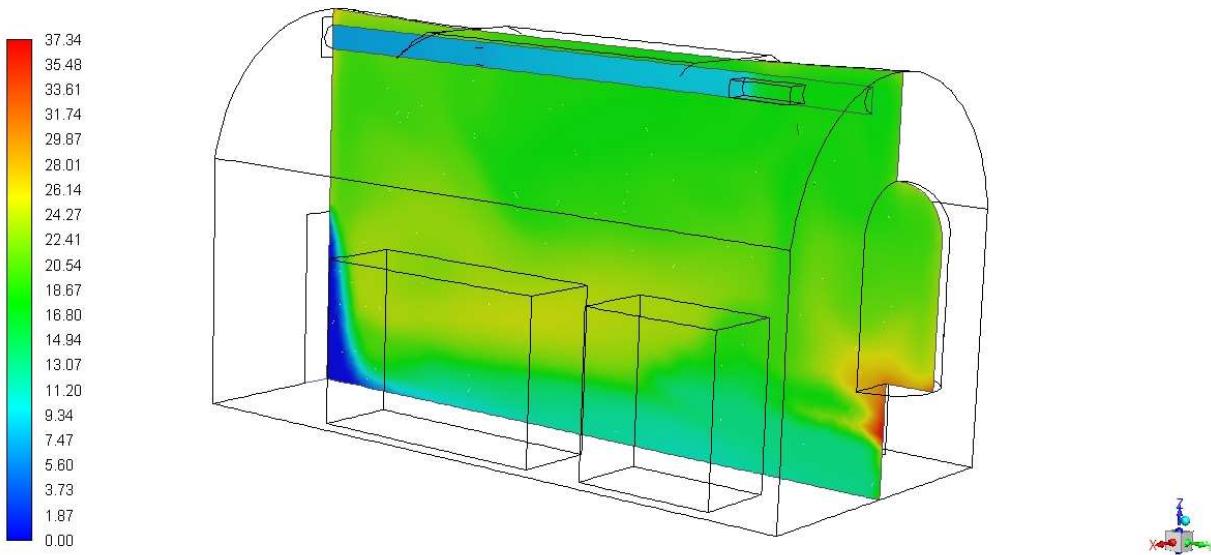


Figura 53 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO2

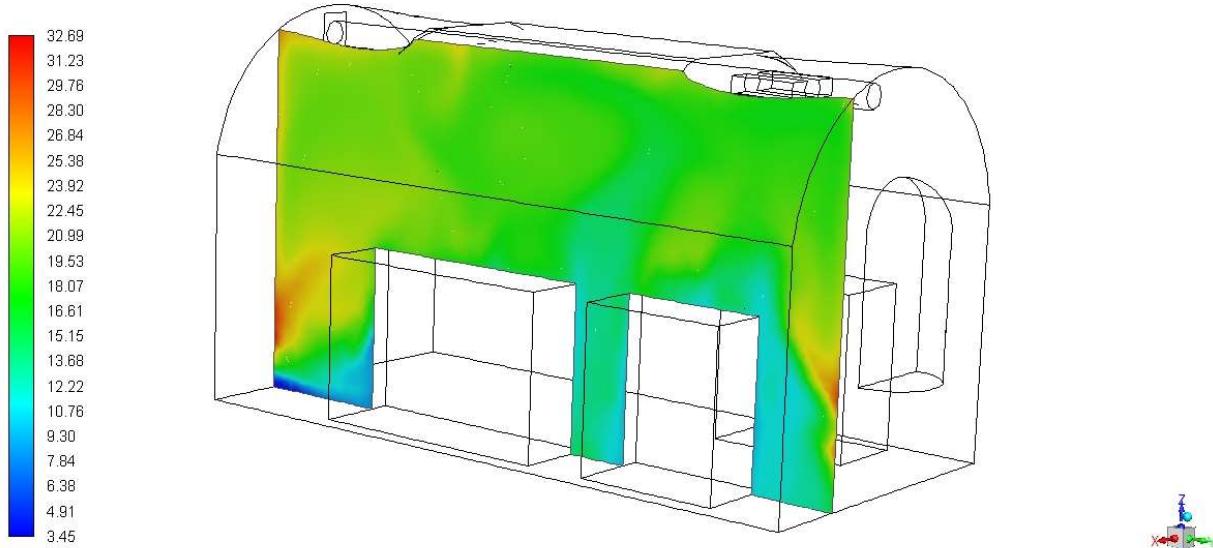


Figura 54 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO3

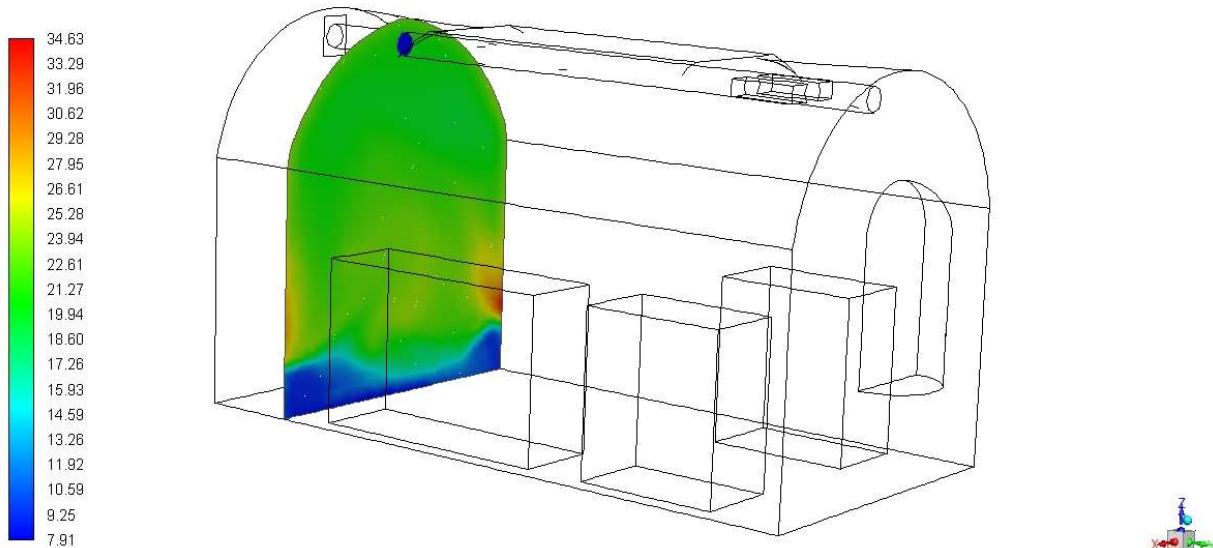


Figura 55 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO4

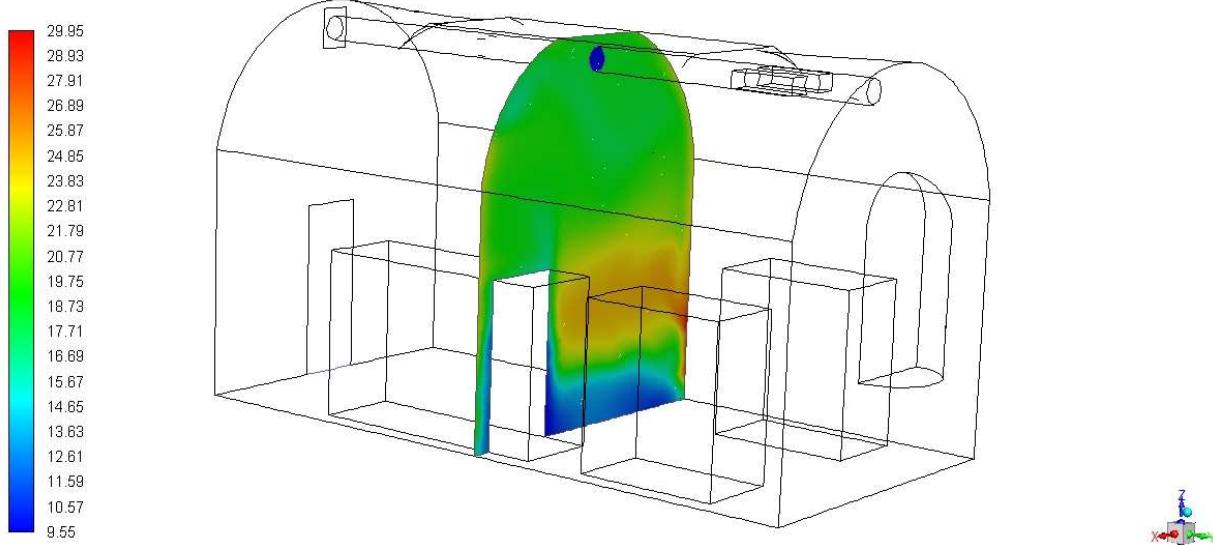


Figura 56 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO5

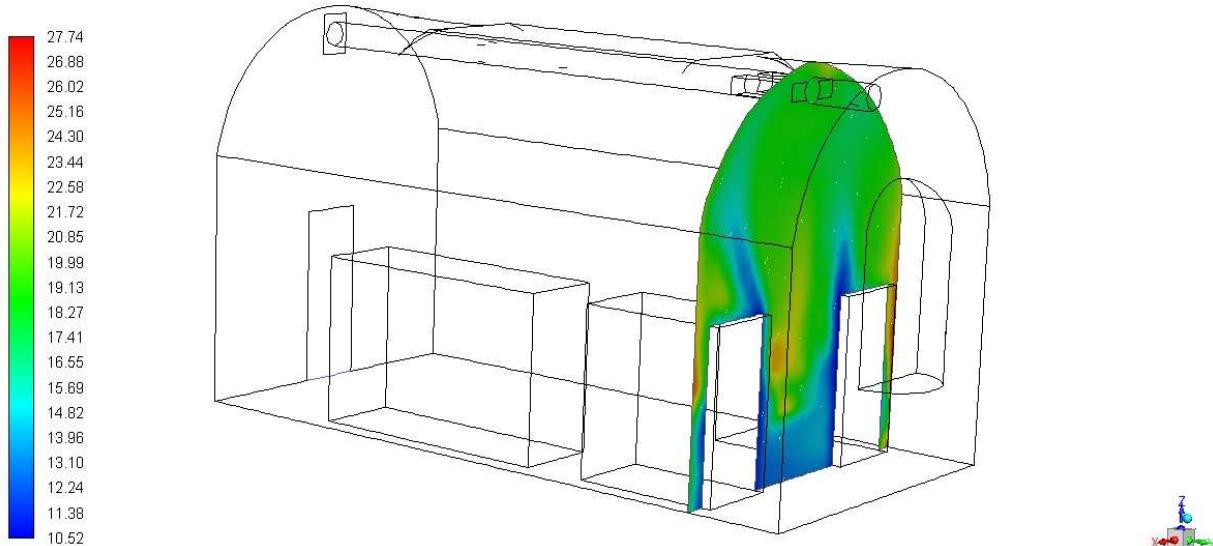


Figura 57 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO6

Vettori velocità

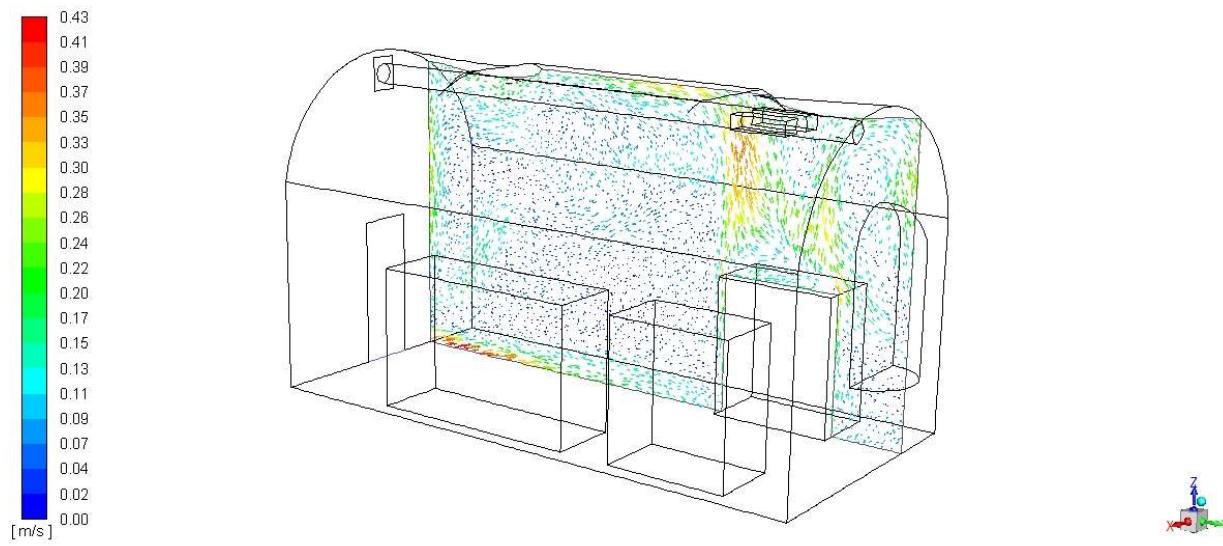


Figura 58 – Visualizzazione vettori velocità per il PIANO1

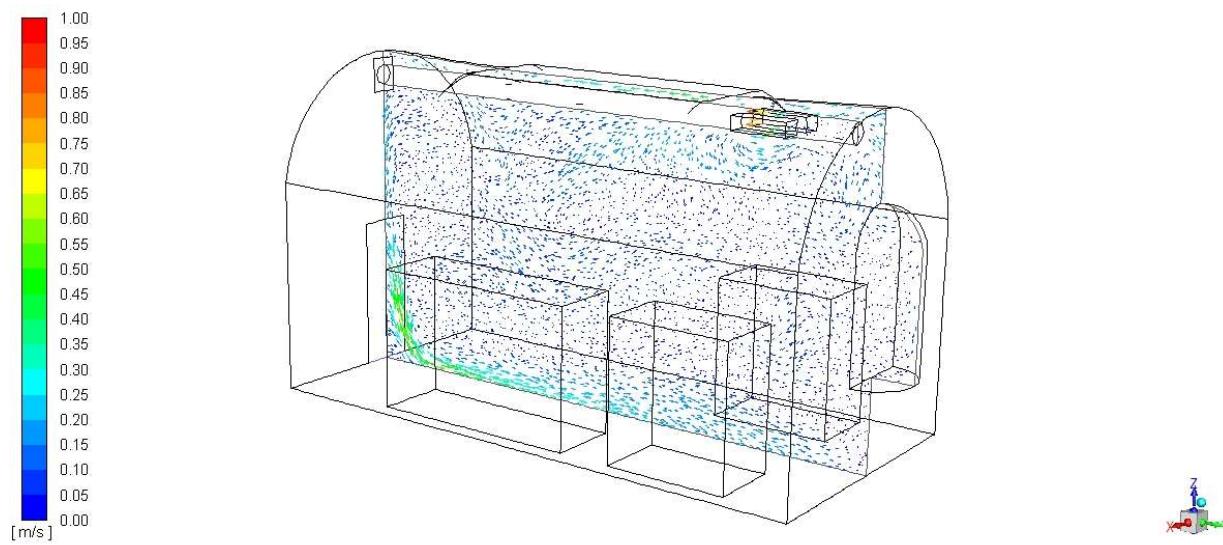


Figura 59 – Visualizzazione vettori velocità per il PIANO2

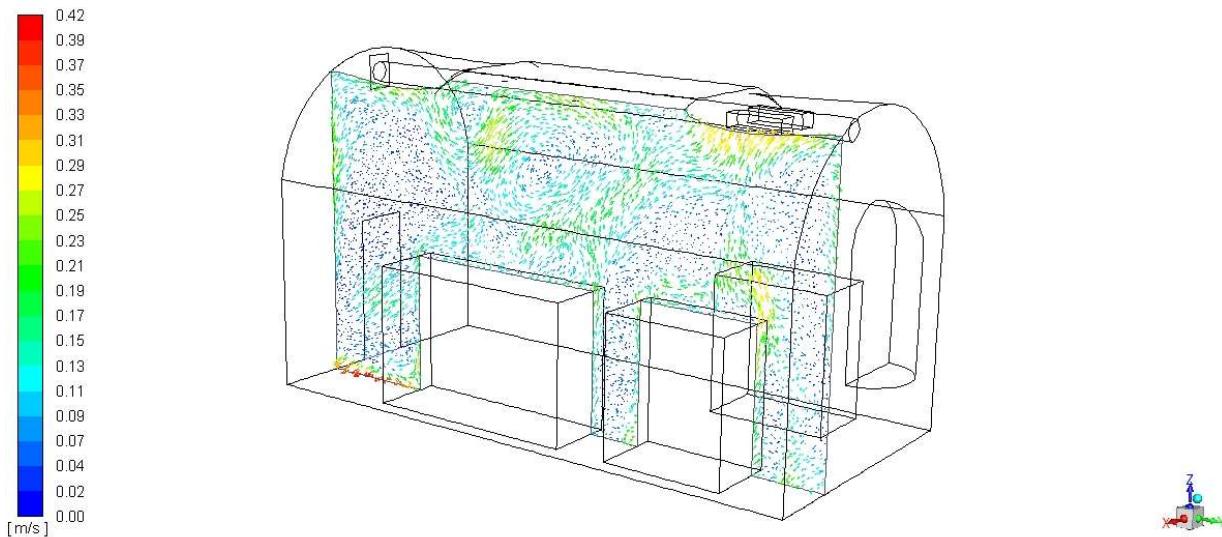


Figura 60 – Visualizzazione vettori velocità per il PIANO3

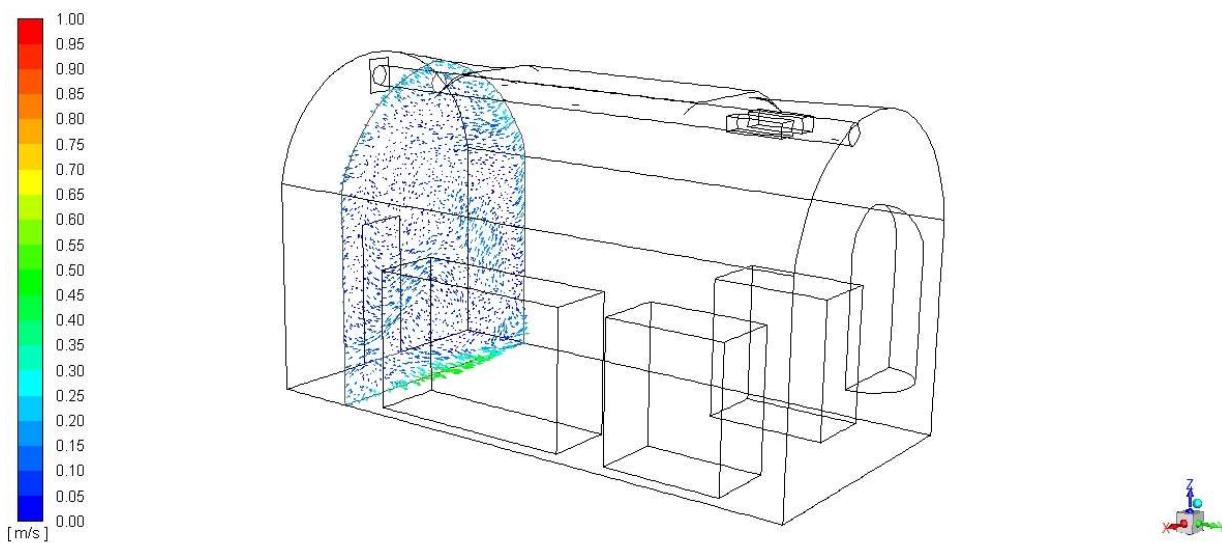


Figura 61 – Visualizzazione vettori velocità per il PIANO4

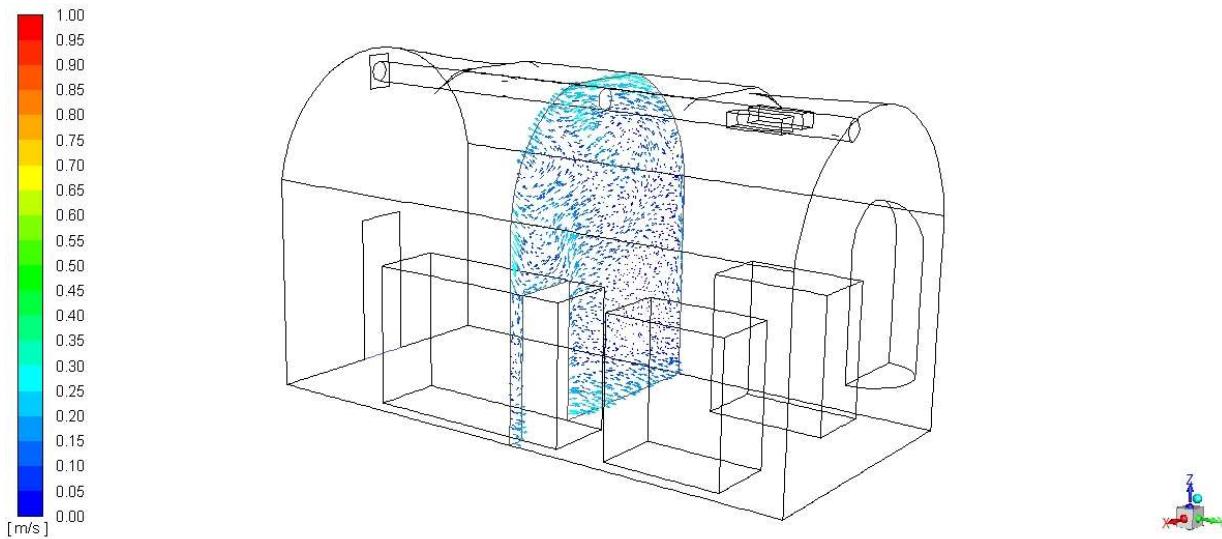


Figura 62 – Visualizzazione vettori velocità per il PIANO5

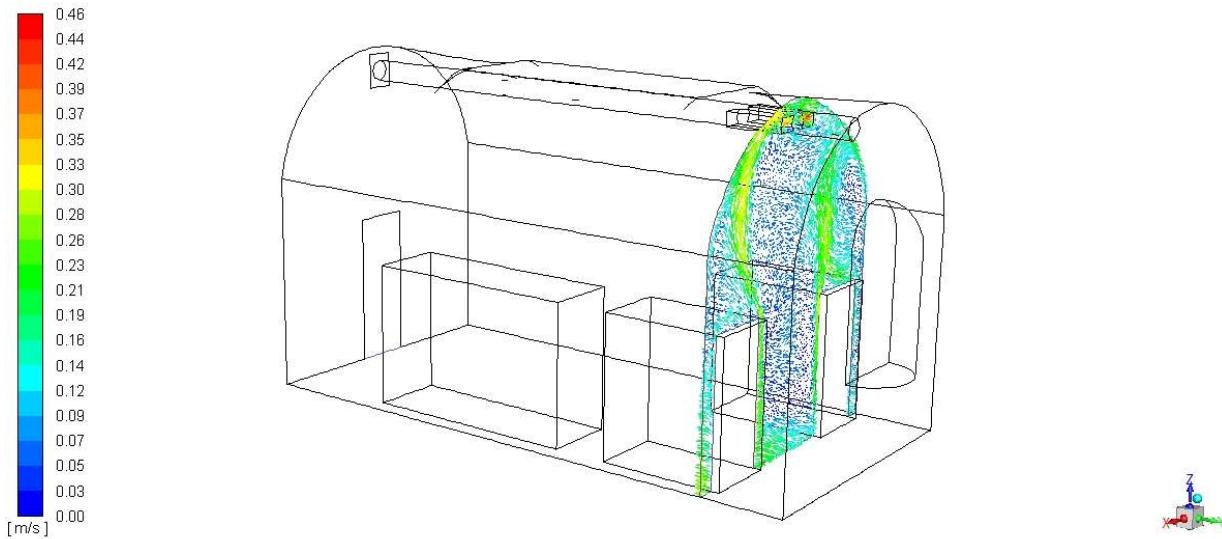


Figura 63 – Visualizzazione vettori velocità per il PIANO6

Pathlines di velocità

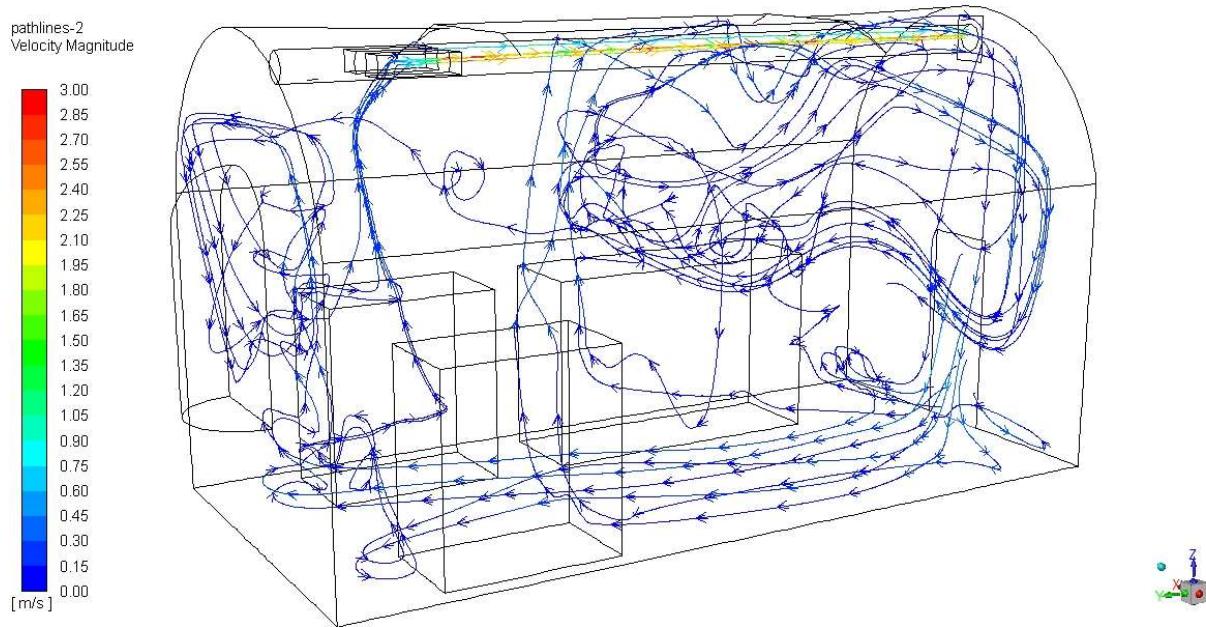


Figura 64 – Visualizzazione pathlines di velocità

PORTATA MASSIMA PREVISTA

I risultati delle simulazioni, riportate nelle Figure 65-70 e riferiti ad una portata di ventilazione di 2200 m³/h, mostrano che anche in questo caso la presenza della cabina altera notevolmente le condizioni termoigometriche all'interno dell'edificio, evidenziando che il sistema di ventilazione è sufficiente a garantire il funzionamento dei trasformatori, ma dà luogo a valori eccessivamente bassi di umidità relativa. Ad esempio, nella posizione del DATA-LOGGER 66, si evince un aumento della temperatura fino a circa 40 °C in presenza della cabina elettrica, con conseguente diminuzione dell'umidità relativa fino a circa il 25%. Stesso comportamento si rileva nella posizione del DATA-LOGGER 72, dove l'umidità scende ancora di più, fino a toccare valori minimi di 20%. Analizzando la posizione del DATA-LOGGER 84, si può notare che la temperatura registra una variazione più contenuta rispetto ai casi precedenti, ma i valori di umidità relativa continuano ad essere ancora estremamente bassi.

I campi di temperatura, riportati nelle Figure 71-76, mostrano come l'aumento di temperatura, riscontrato nei punti relativi alle posizioni dei sensori, si estenda a tutto l'ambiente interno. Infatti, analizzando le immagini si può notare una stratificazione della temperatura, ma con una distribuzione uniforme nelle zone stratificate.

Il campo di umidità, riportato nelle Figure 77-82 è pressoché uniforme in tutto l'ambiente, con alcune variazioni vicino alle cabine che generano calore.

I vettori velocità, riportati nelle Figure 83- 89, mostrano l'andamento dell'aria nell'ambiente: si notano i flussi di aria che entrano dalla griglia posizionata in corrispondenza della porta di entrata e il richiamo di aria verso le griglie poste in alto per poi seguire la tubazione ed essere espulsa all'esterno.

Posizione DATA-LOGGER 66

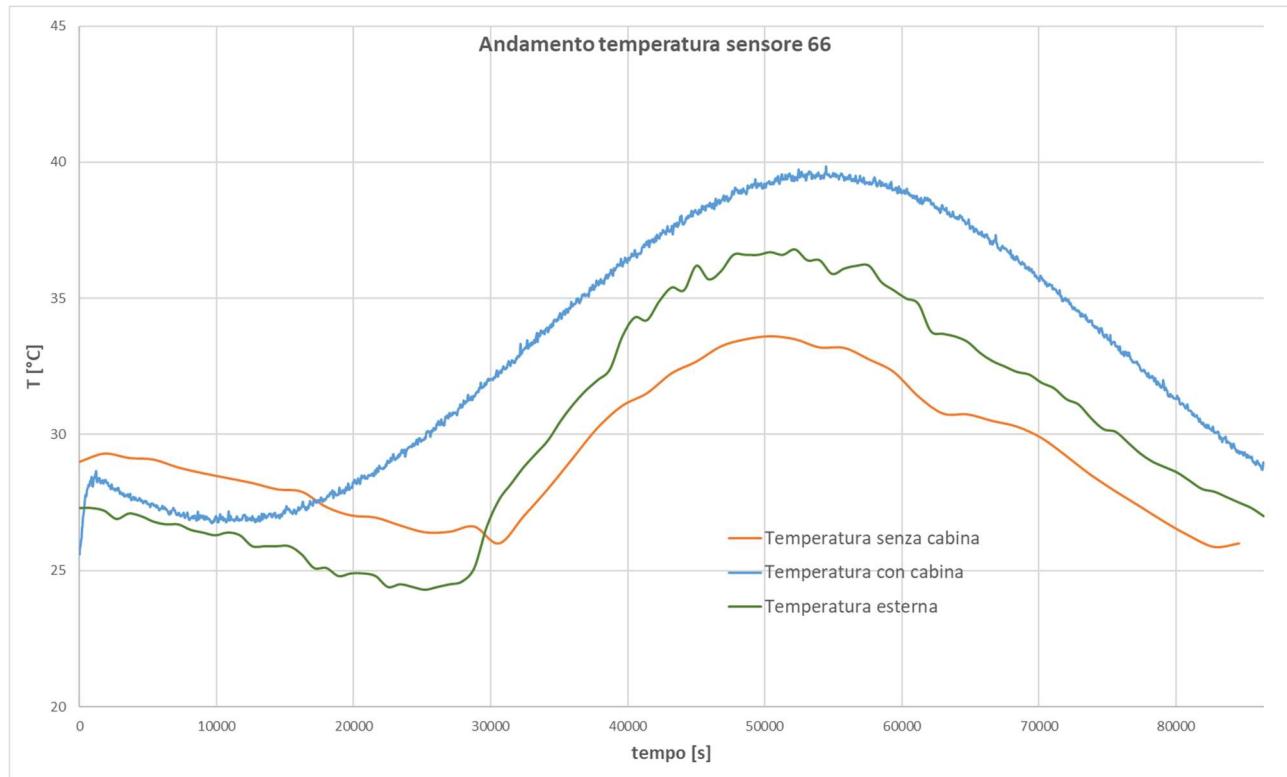


Figura 65 – Confronto valori di temperatura nella posizione DATA-LOGGER 66

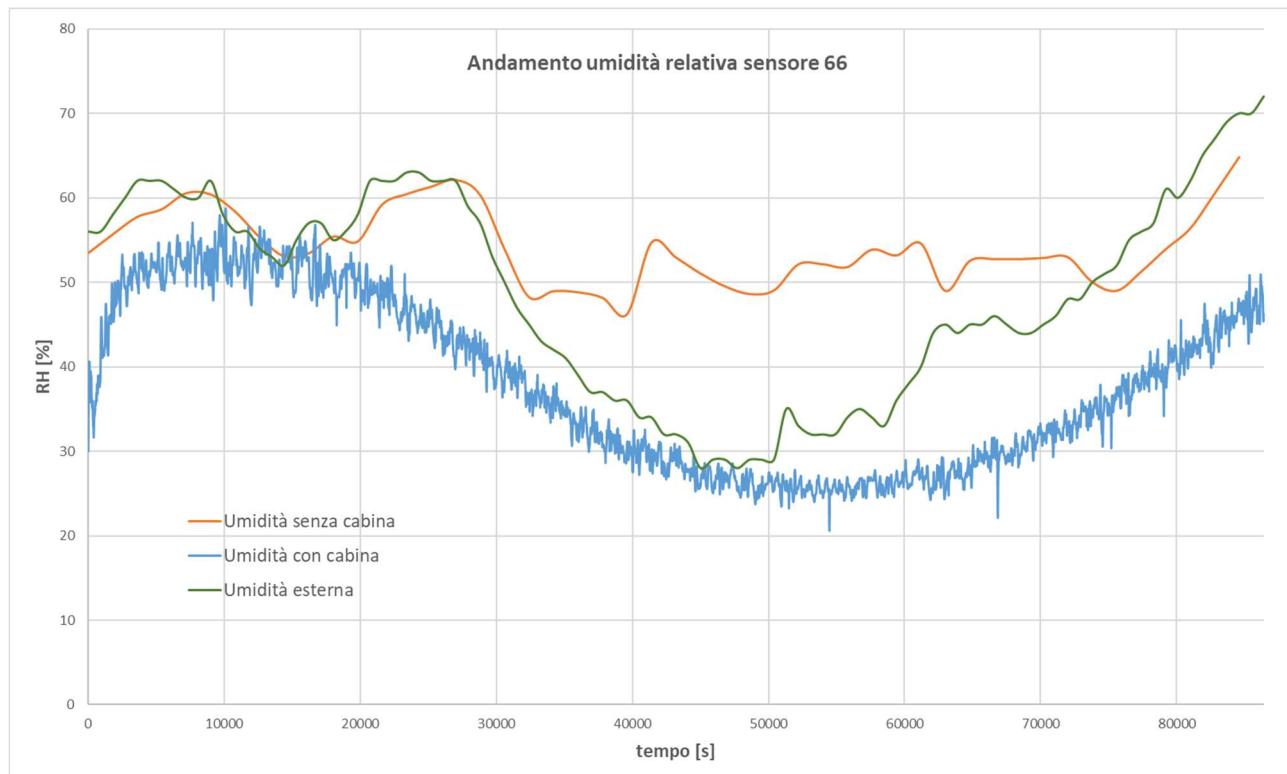


Figura 66 – Confronto valori umidità relativa nella posizione DATA-LOGGER 66

Posizione DATA-LOGGER 72

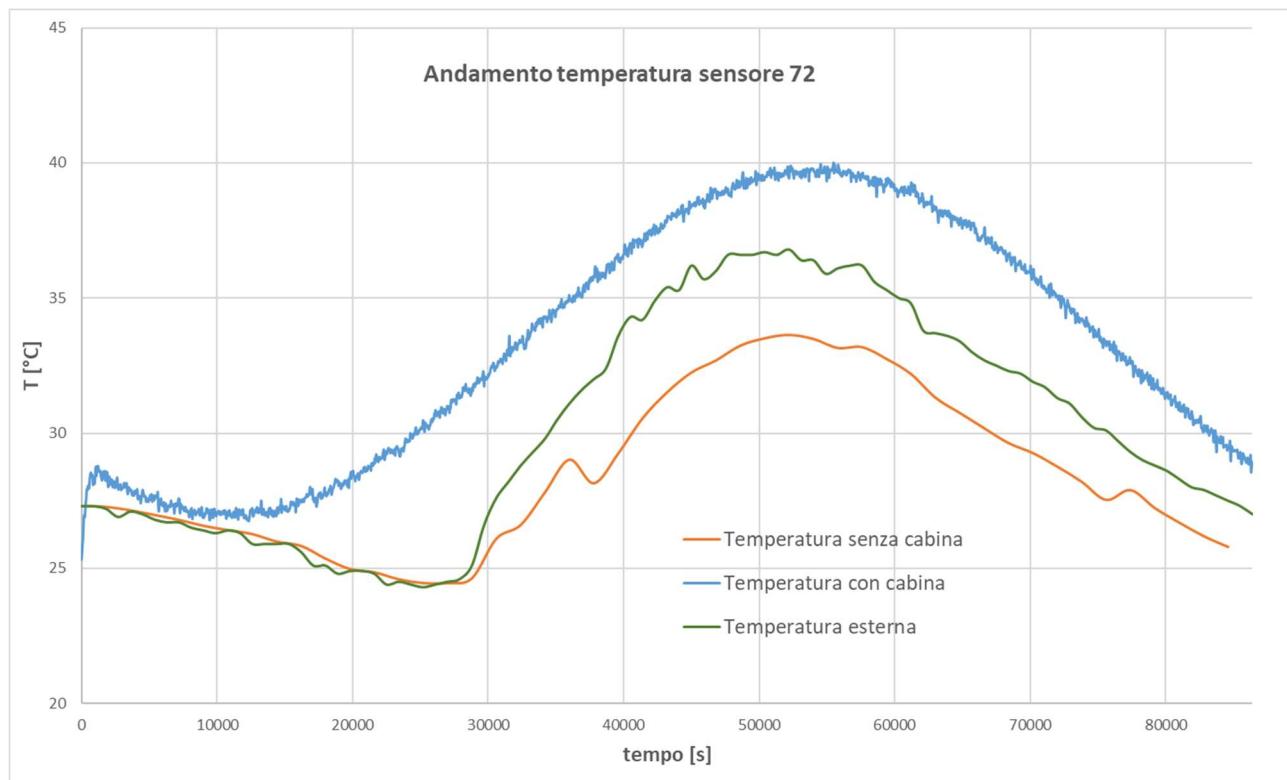


Figura 67 – Confronto valori di temperatura nella posizione DATA-LOGGER 72

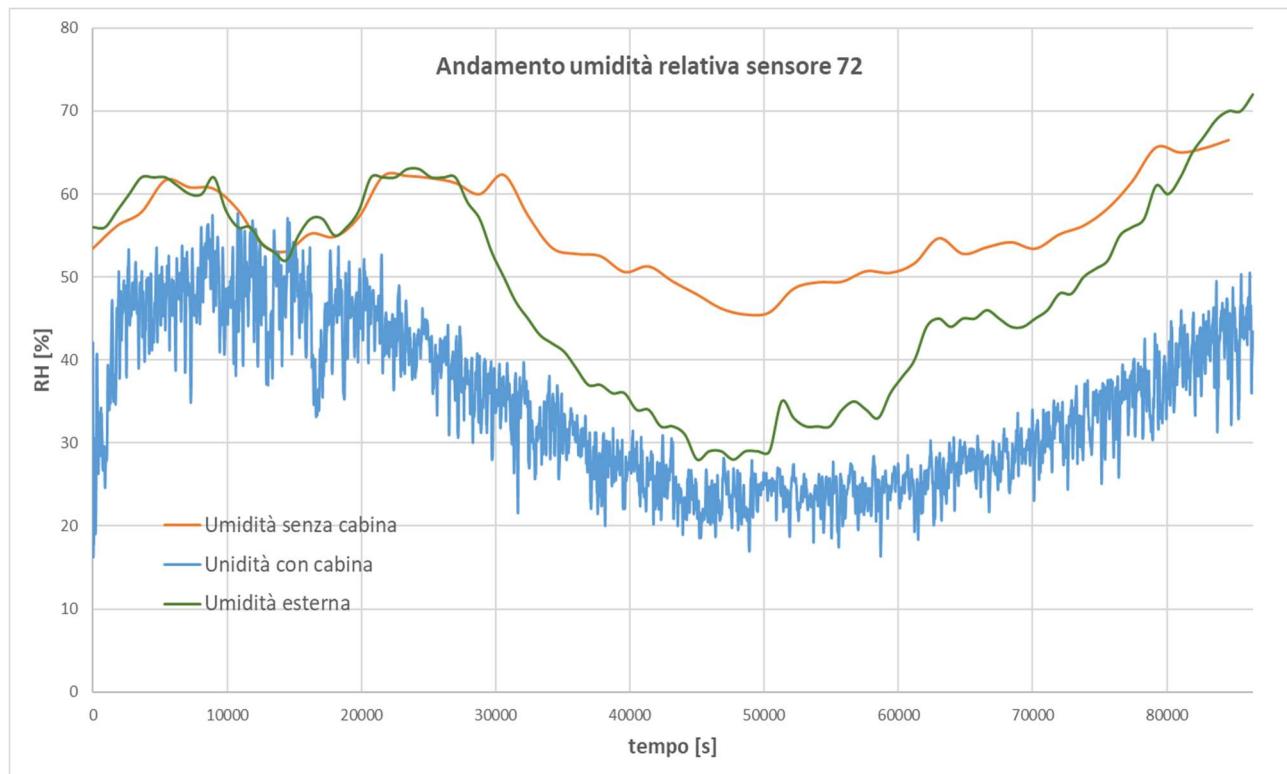


Figura 68 – Confronto valori umidità relativa nella posizione DATA-LOGGER 72

Posizione DATA-LOGGER 84

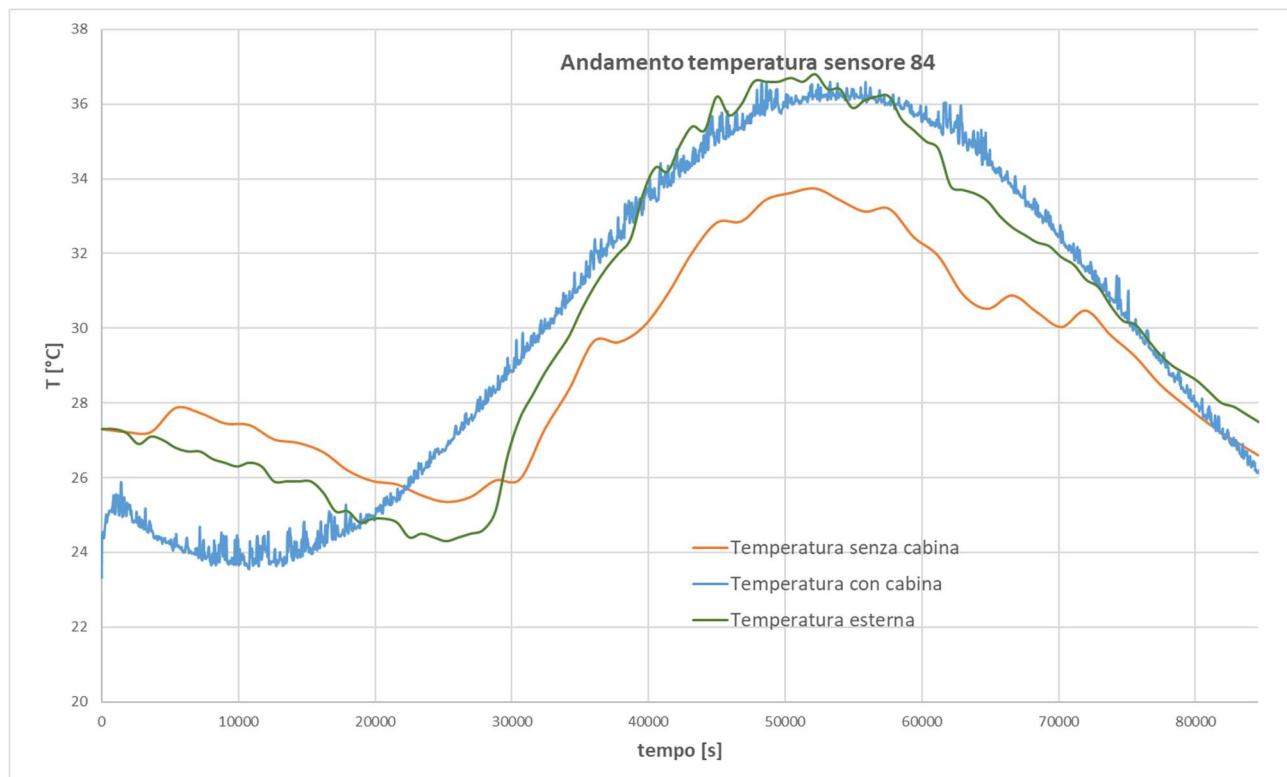


Figura 69 – Confronto valori di temperatura nella posizione DATA-LOGGER 84

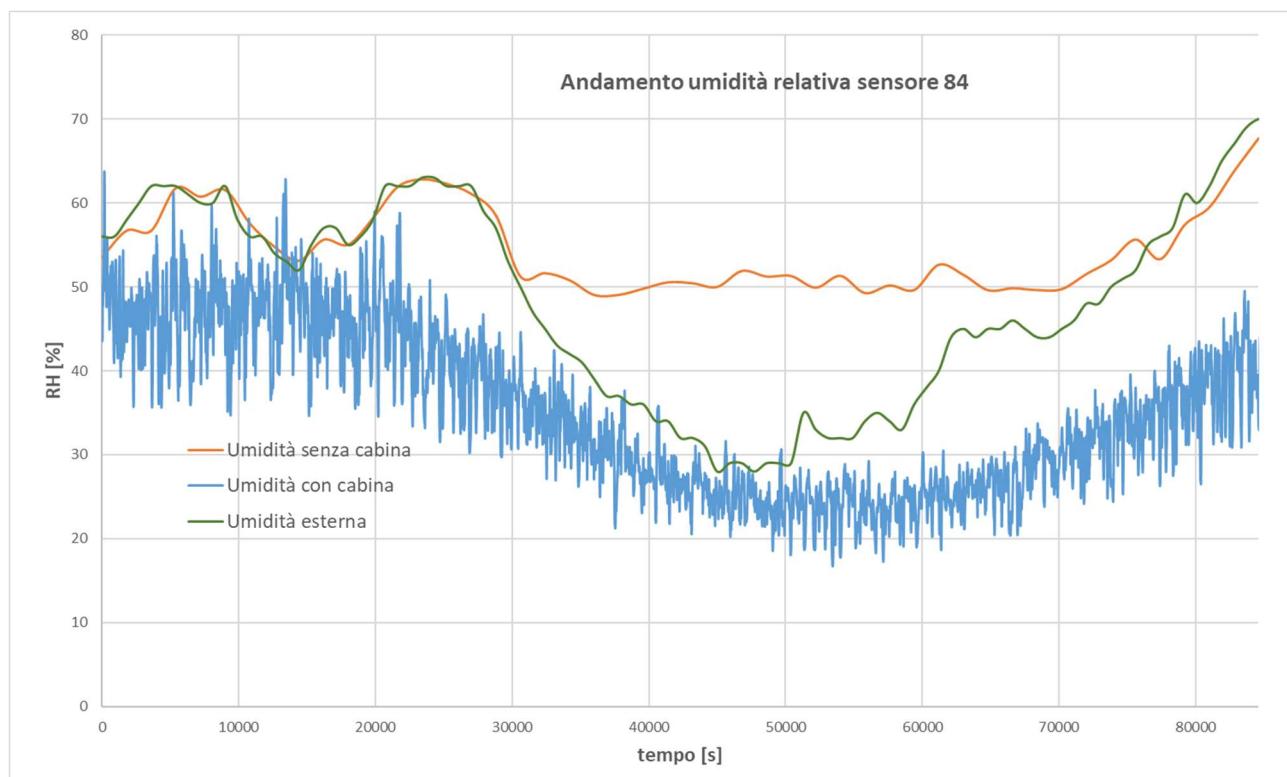


Figura 70 – Confronto valori umidità relativa nella posizione DATA-LOGGER 84

Campi di temperatura

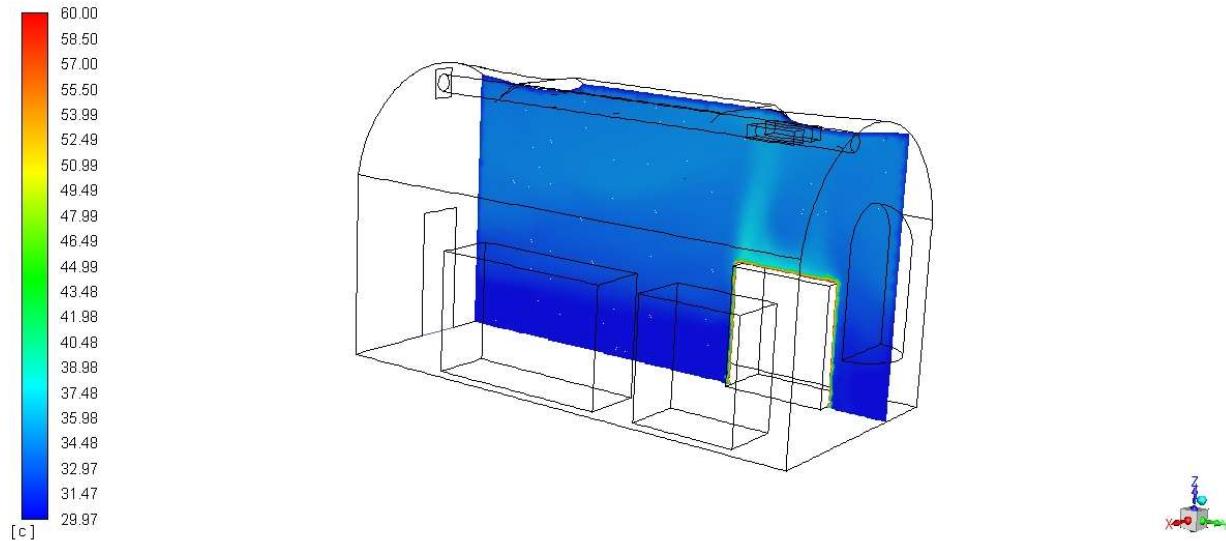


Figura 71 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO1

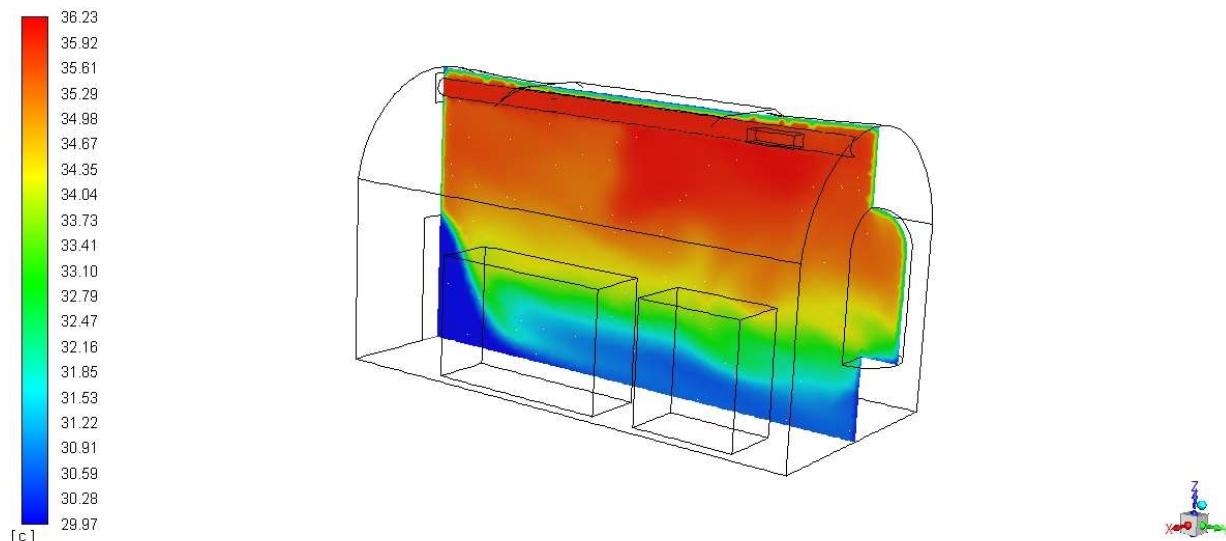


Figura 72 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO2

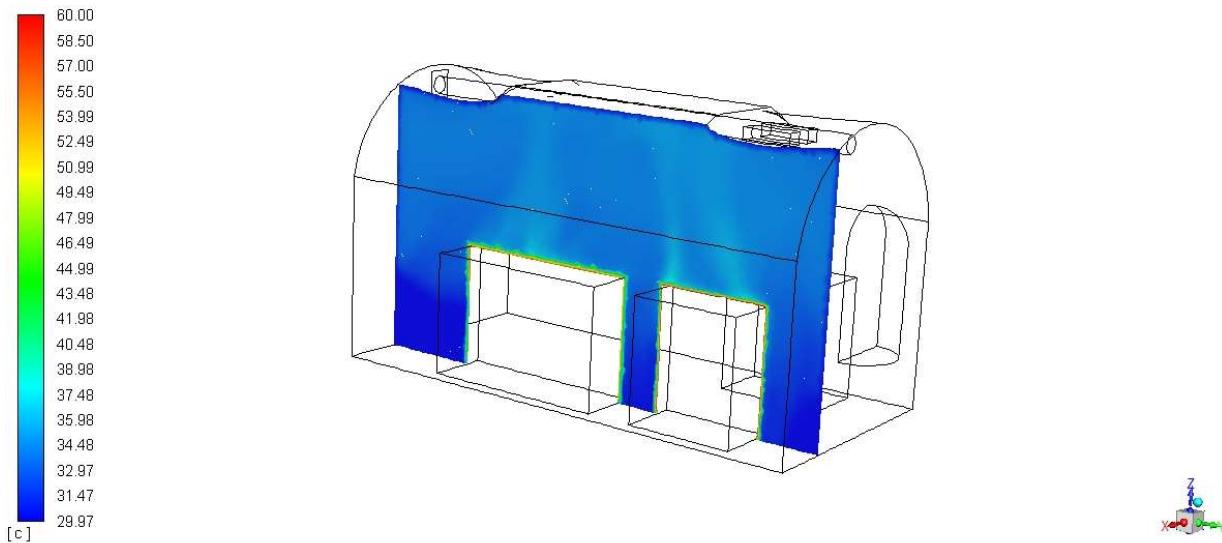


Figura 73 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO3

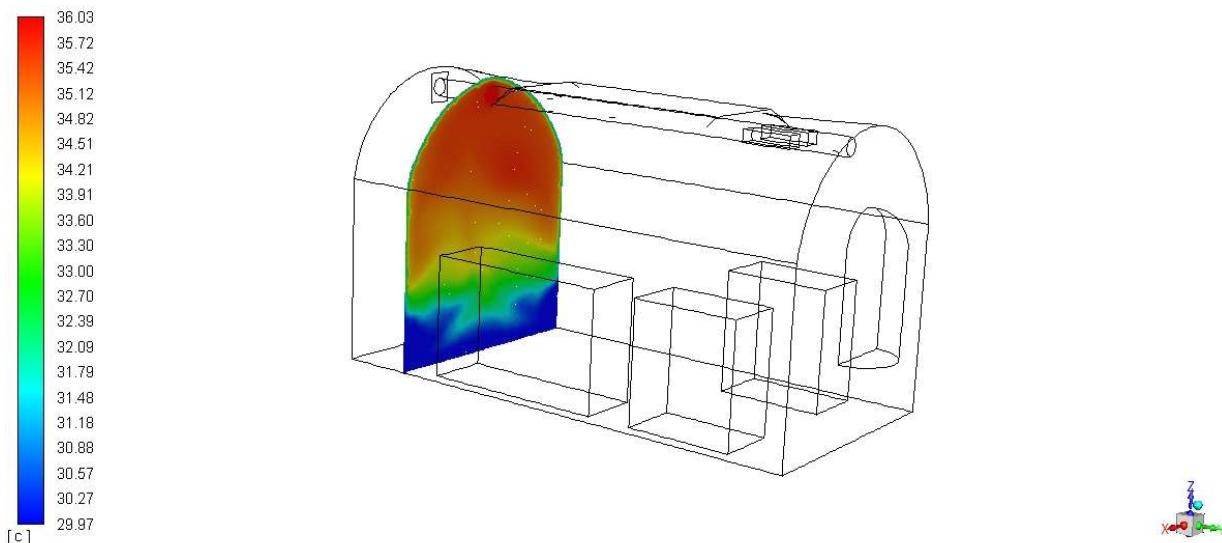


Figura 74 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO4

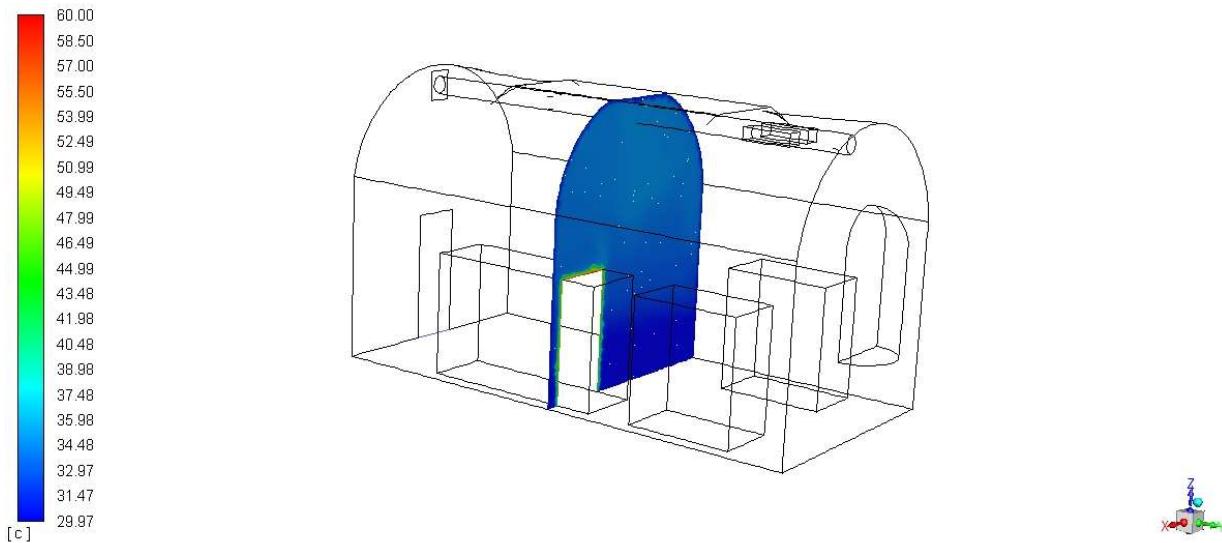


Figura 75 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO5

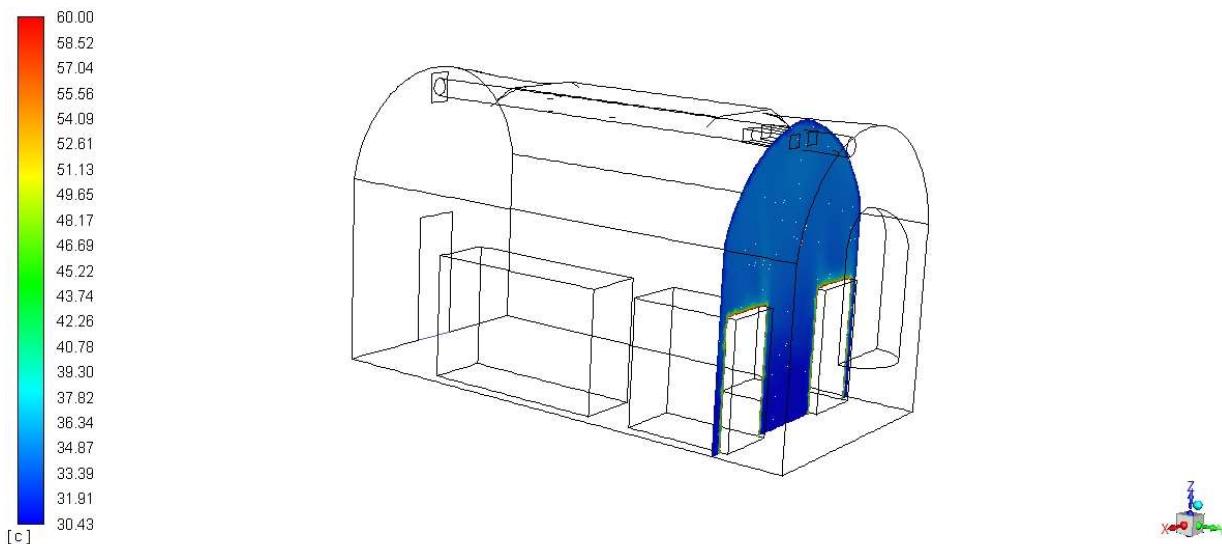


Figura 76 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO6

Campi di umidità relativa

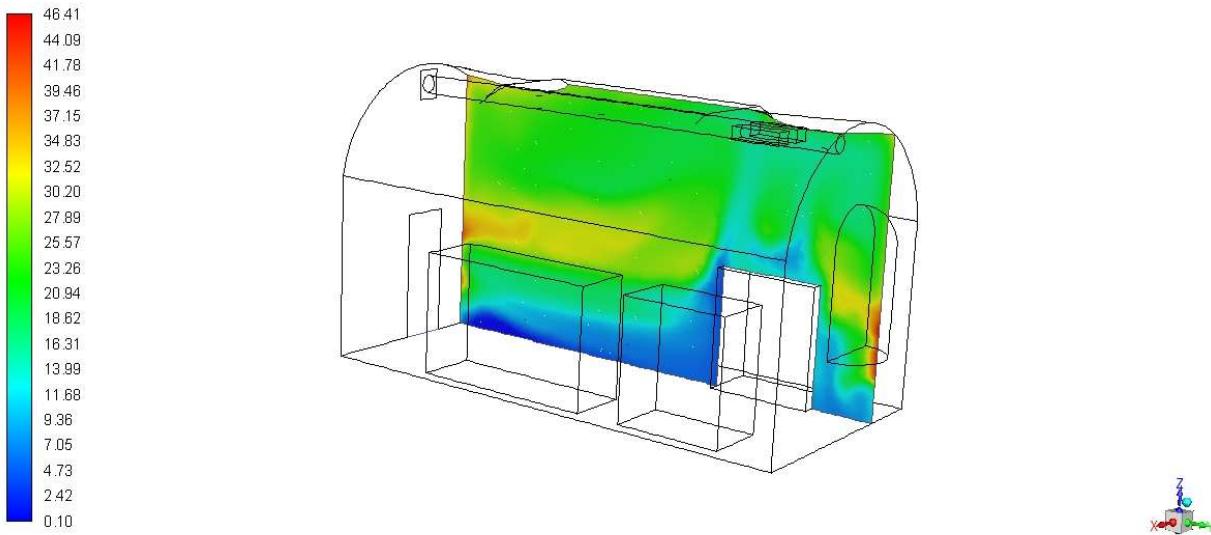


Figura 77 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO1

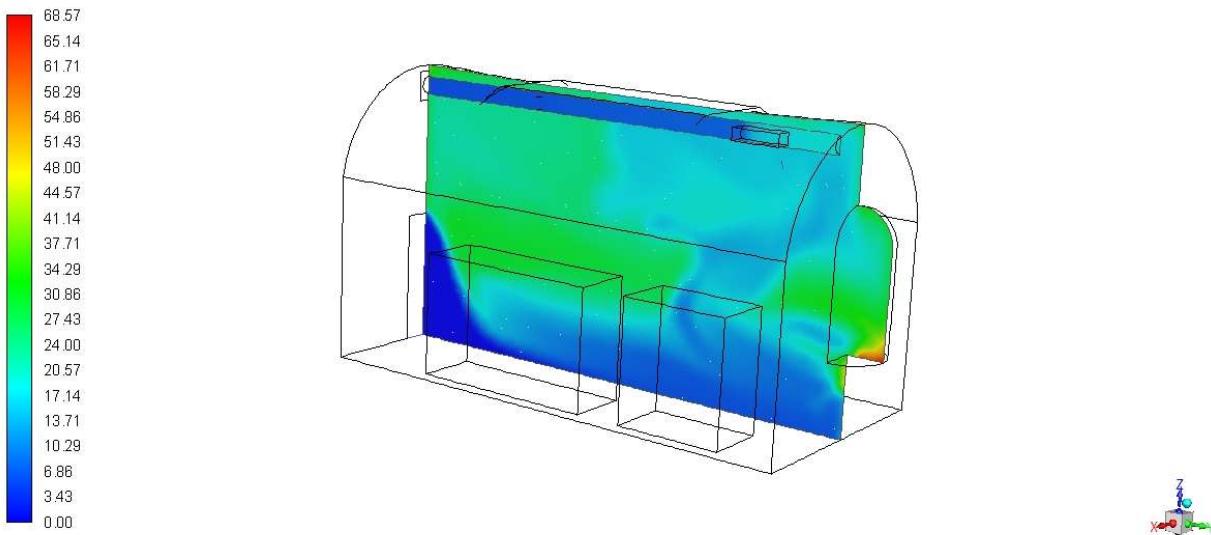


Figura 78 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO2

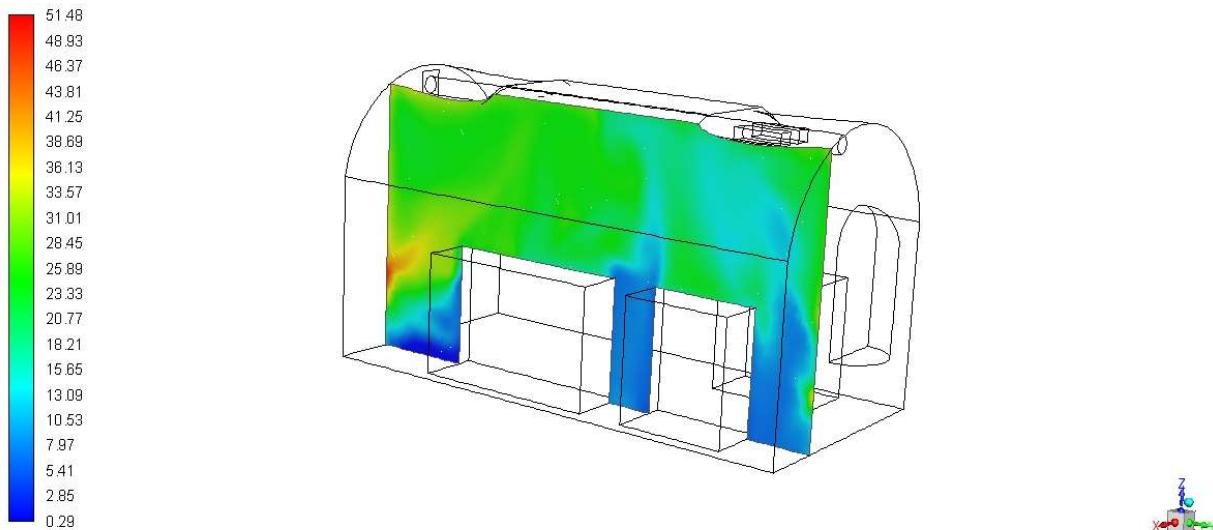


Figura 79 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO3

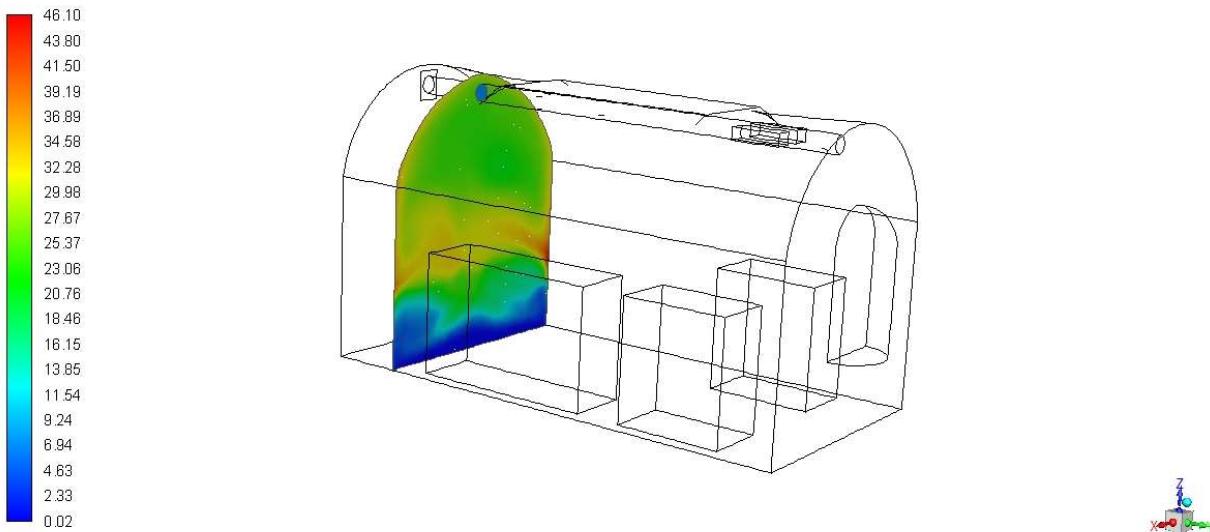


Figura 80 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO4

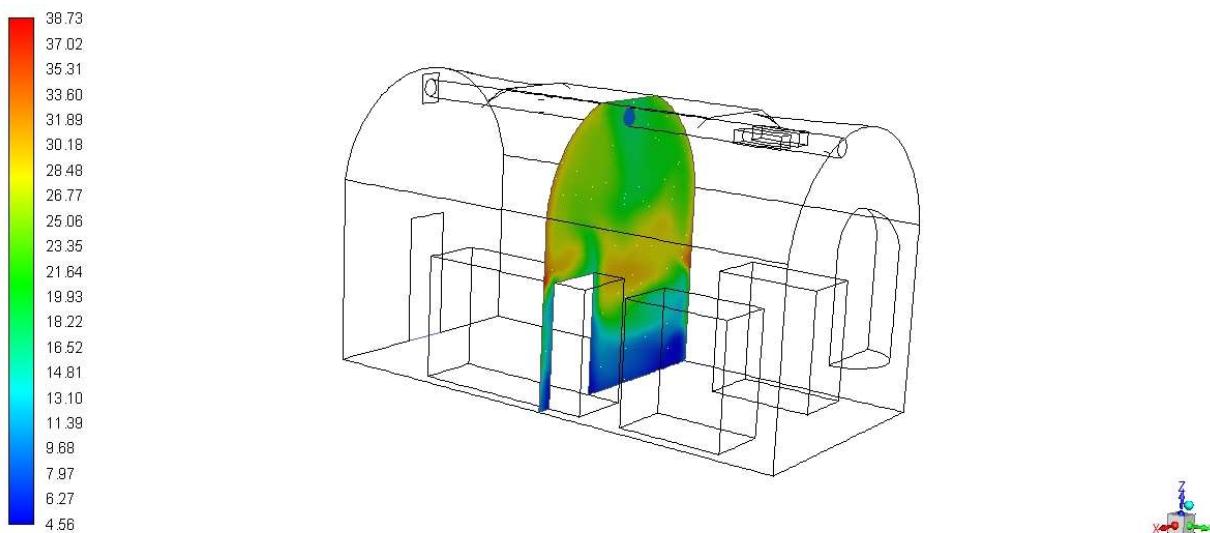


Figura 81 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO5

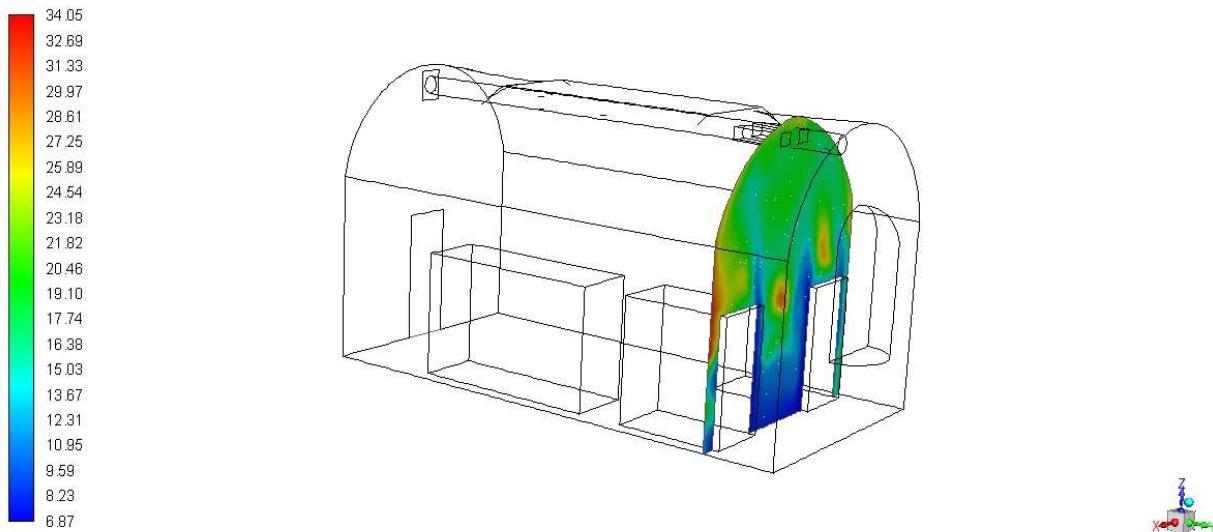


Figura 82 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO6

Vettori velocità

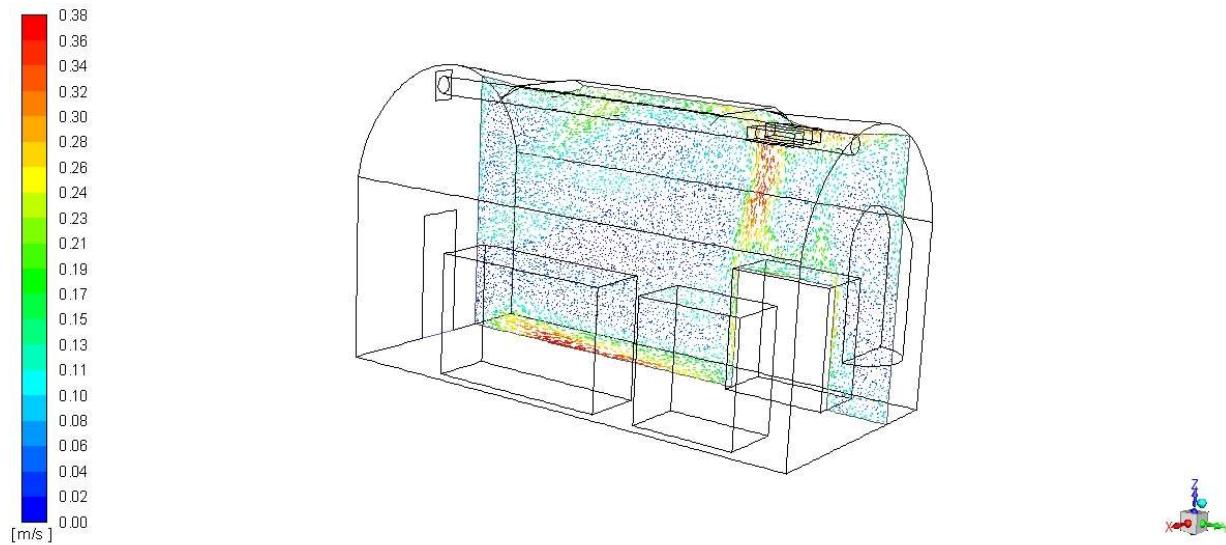


Figura 83 – Visualizzazione vettori velocità per il PIANO1

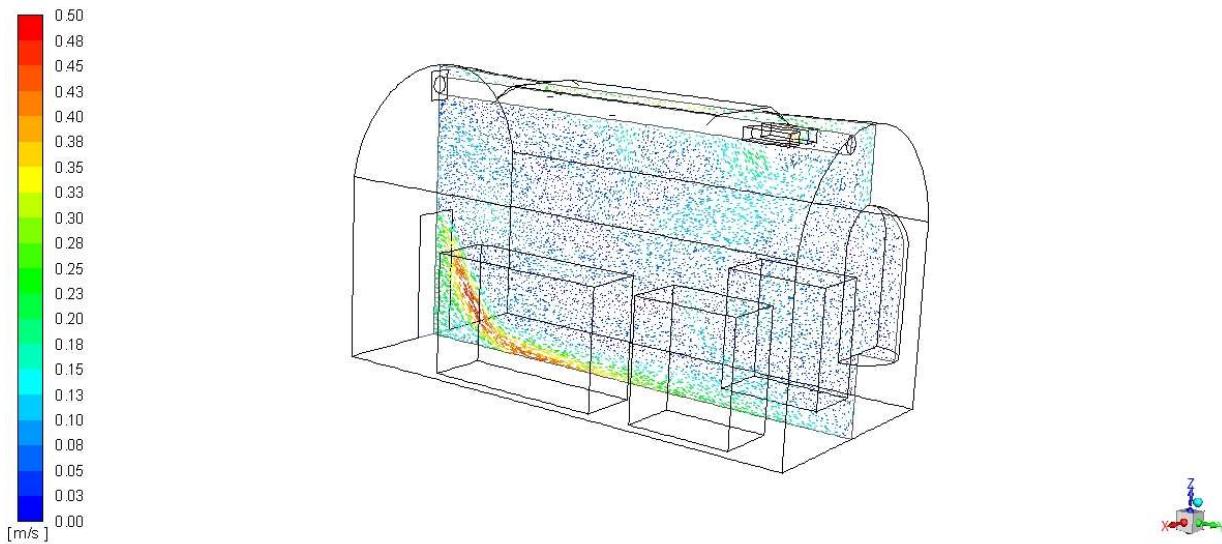


Figura 84 – Visualizzazione vettori velocità per il PIANO2

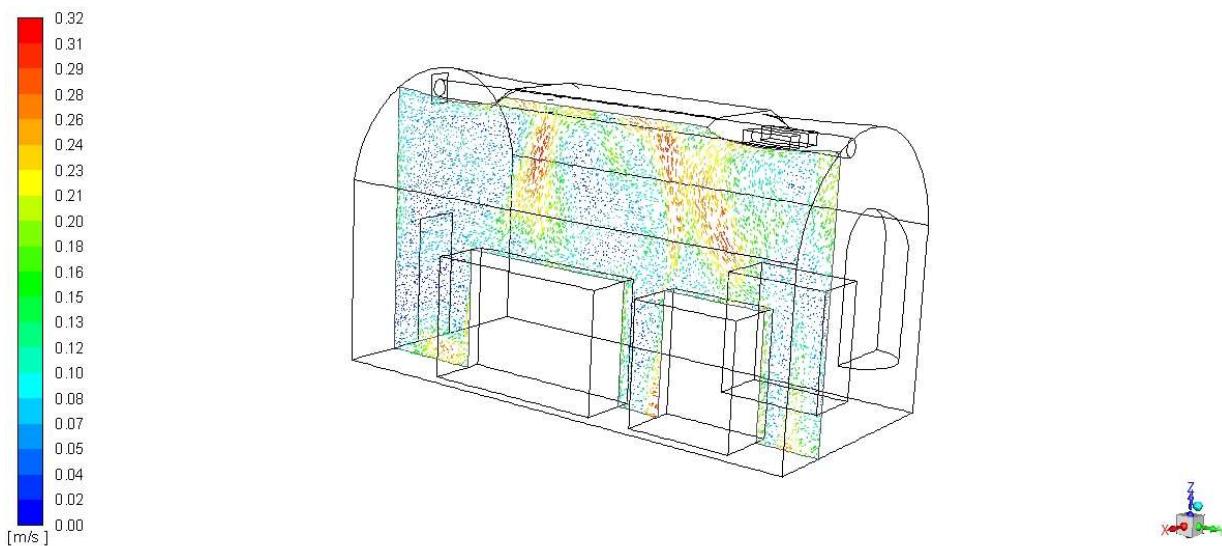


Figura 85 – Visualizzazione vettori velocità per il PIANO3

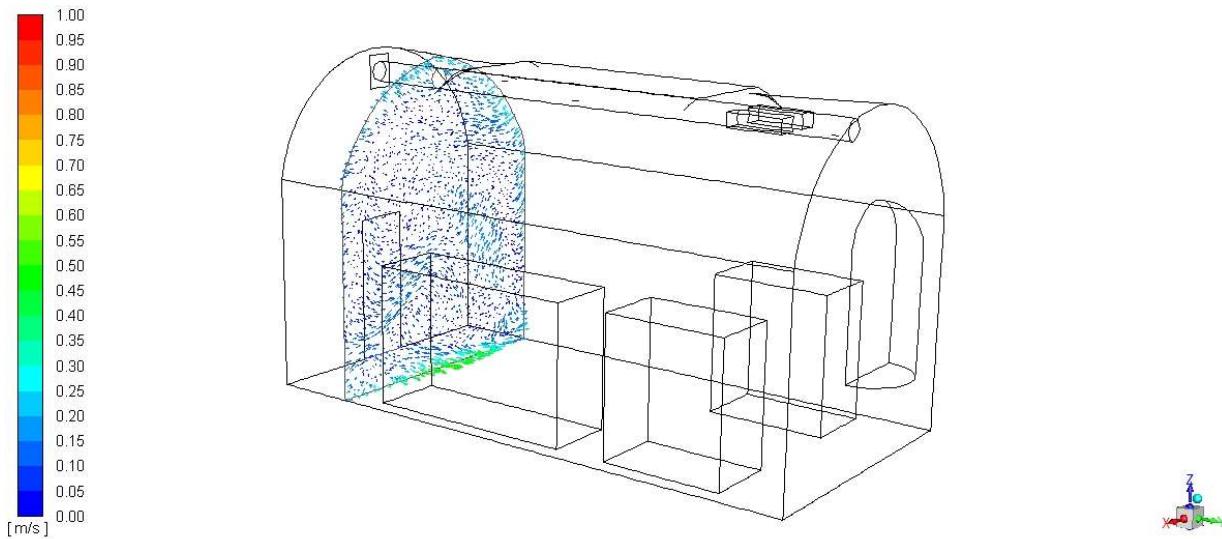


Figura 86 – Visualizzazione vettori velocità per il PIANO4

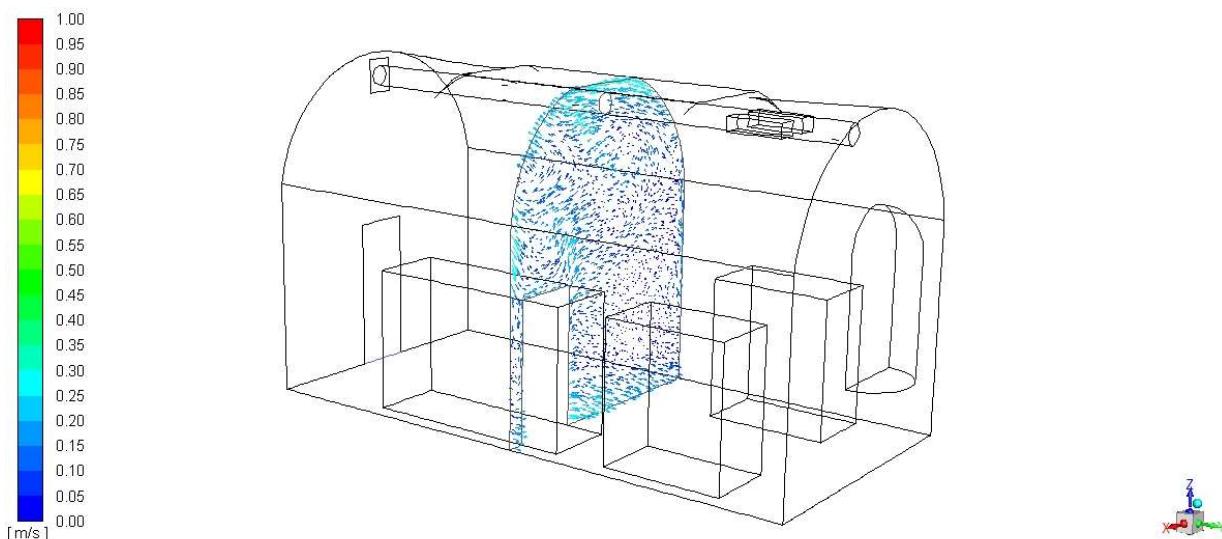


Figura 87 – Visualizzazione vettori velocità per il PIANO5

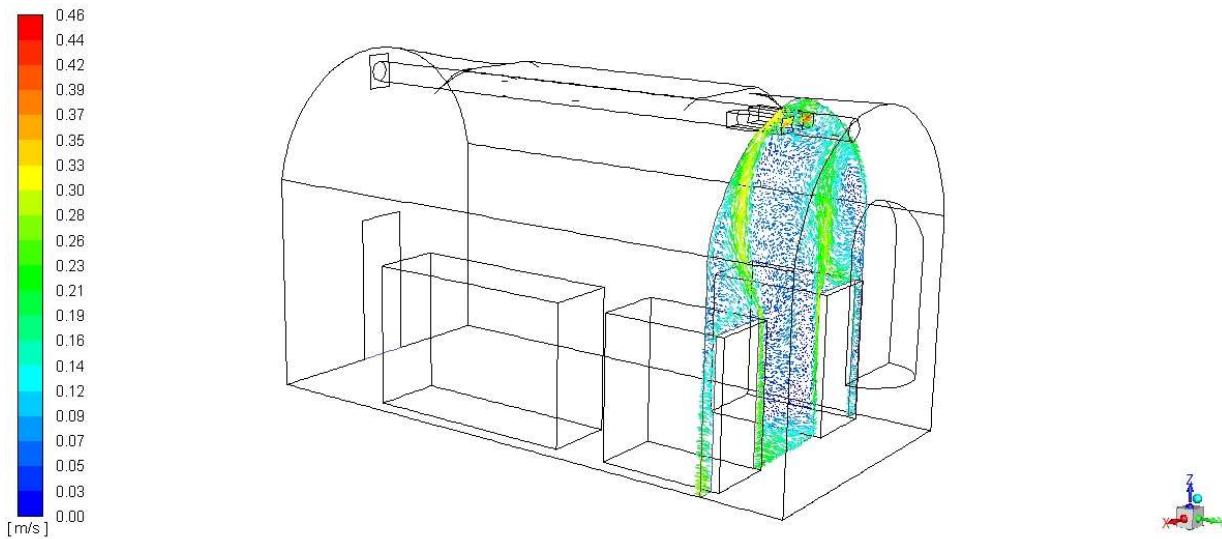


Figura 88 – Visualizzazione vettori velocità per il PIANO

Pathlines di velocità

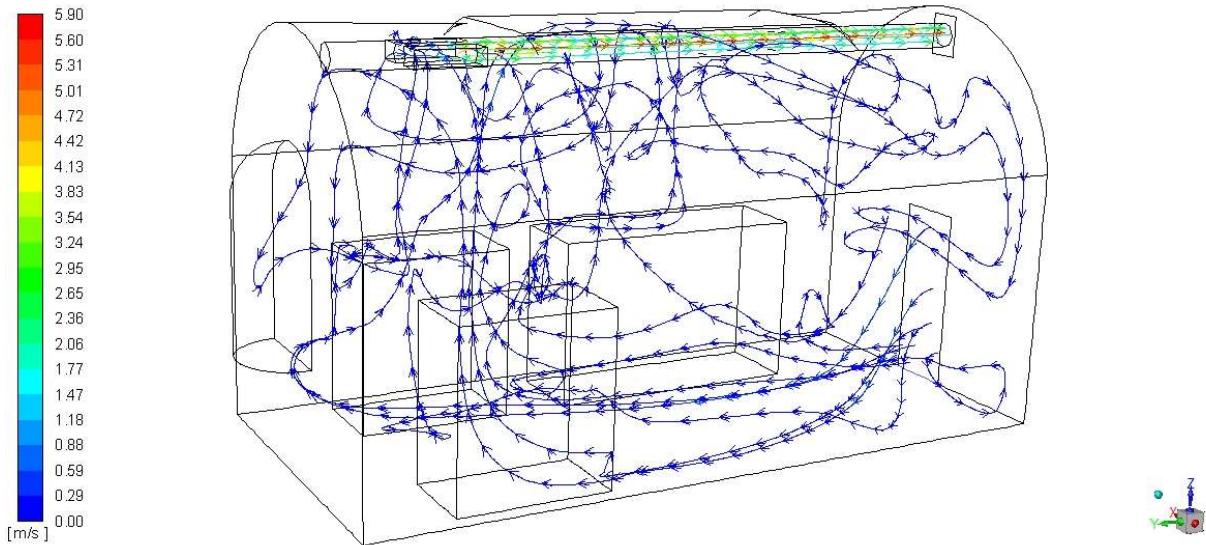


Figura 89 – Visualizzazione pathlines di velocità

SIMULAZIONE CABINA ELETTRICA CON CONFINAMENTO

In questa nuova soluzione la cabina elettrica è confinata all'interno di un “involtucro”, in modo da non sollecitare termicamente l'ambiente interno del Museo; tale involucro è composto da un sistema portante autonomo su cui saranno inseriti dei pannelli isolanti in schiuma polyiso espansa rigida (condutibilità termica pari a $0.026 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), di spessore 8.0 cm. Inoltre, l'interno del pannello è addizionato con grafite espandibile. Al fine di permettere l'ispezione della parete i pannelli potranno essere rimossi dall'interno attraverso un sistema di viti.

L'aria viene prelevata da una fessura posta sopra la porta d'entrata, incanalata lungo una conduttura attraverso una girante e mandata nella struttura dove è posizionata la cabina elettrica. Da questo ambiente si ha un'aspirazione attraverso griglie: l'aria aspirata raggiunge un plenum e viene espulsa attraverso una condotta verticale.

La simulazione è stata effettuata in regime stazionario, assumendo una temperatura esterna pari alla massima rilevata con le campagne di acquisizione sperimentali e pari a 36.7°C . Si è inoltre adottata un'umidità relativa pari a 48.78%, anche essa dedotta dalle campagne di acquisizione sperimentali preliminari. Anche per questo caso il calore prodotto dalle cabine elettriche e quindi da smaltire è pari a 3250 W La posizione delle cabine e del relativo sistema di smaltimento dell'aria si può visualizzare in Figura 90 e Figura 91.

Sono state effettuate quattro tipologie di simulazioni, al variare della portata d'aria in entrata nella cabina come riportato nella seguente tabella, assieme ai numeri delle figure nei quali sono rappresentati i corrispondenti risultati

Codice	Portata m³/h	Campi termici n.ro figure	Campi UR n.ro figure	Campi velocità n.ro figure
M1	2200	92-97	98-103	104-107
M2	1925	108-113	114-119	120-123
M3	1650	124-129	130-135	136-139
M4	1100	140-145	146-151	152-155

Dai risultati ottenuti, si nota che la temperatura all'interno dell'edificio risulta sempre nei limiti previsti con escursioni termiche non rilevanti. I movimenti dell'aria, sempre all'interno dell'edificio non sono di notevole rilevanza. L'umidità relativa rimane pressoché costante.

Pertanto, si può ritenere che il sistema di isolamento progettato comportamenti efficientatamente i trasformatori, evitando che il calore prodotto alteri le condizioni ambientali interne, garantendo una corretta conservazione dell'edificio.

PIANTA

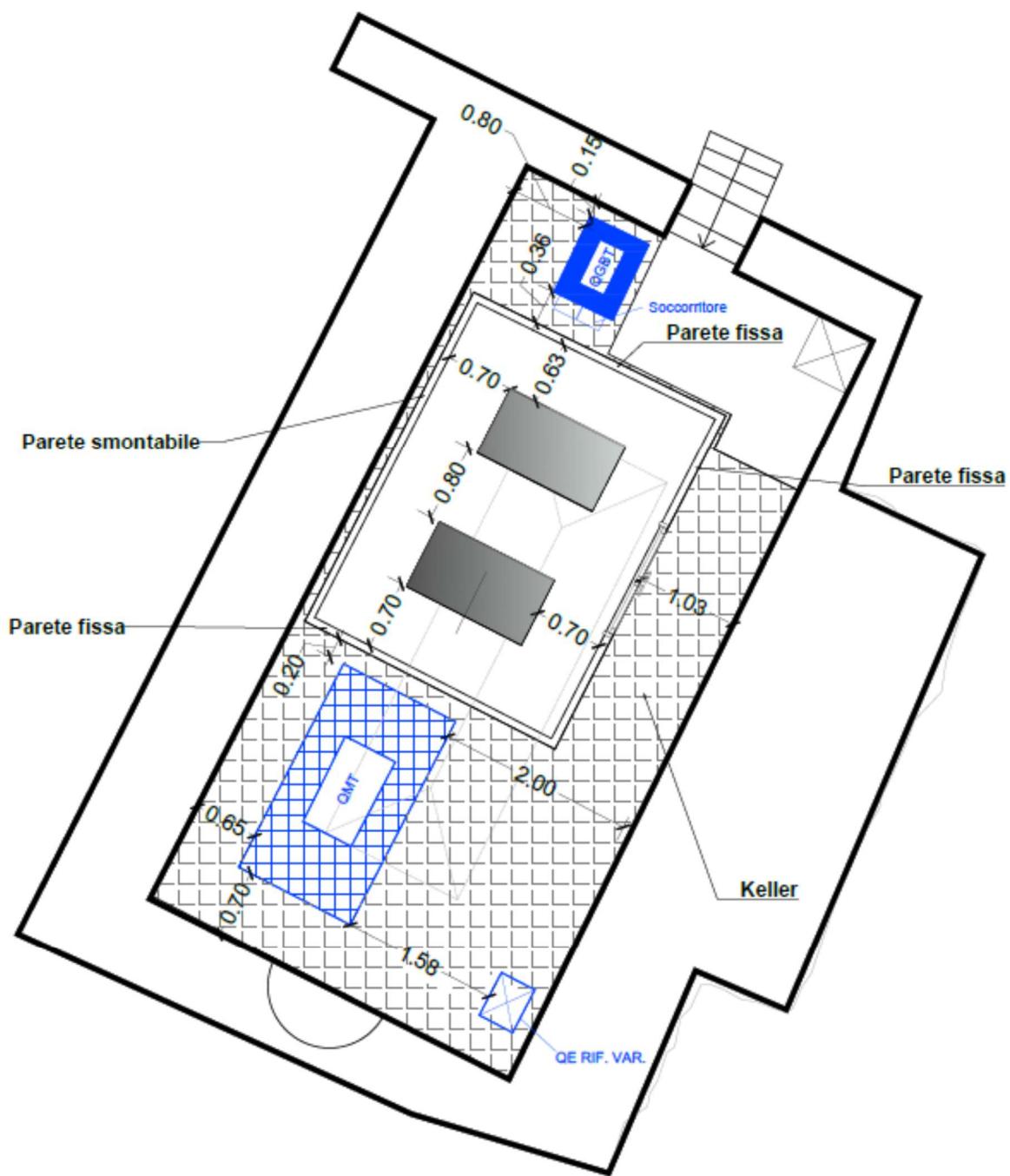


Figura 90 – Posizionamento cabina elettrica

PIANTA CON SOVRAPPOSIZIONE DELL'IMPIANTO

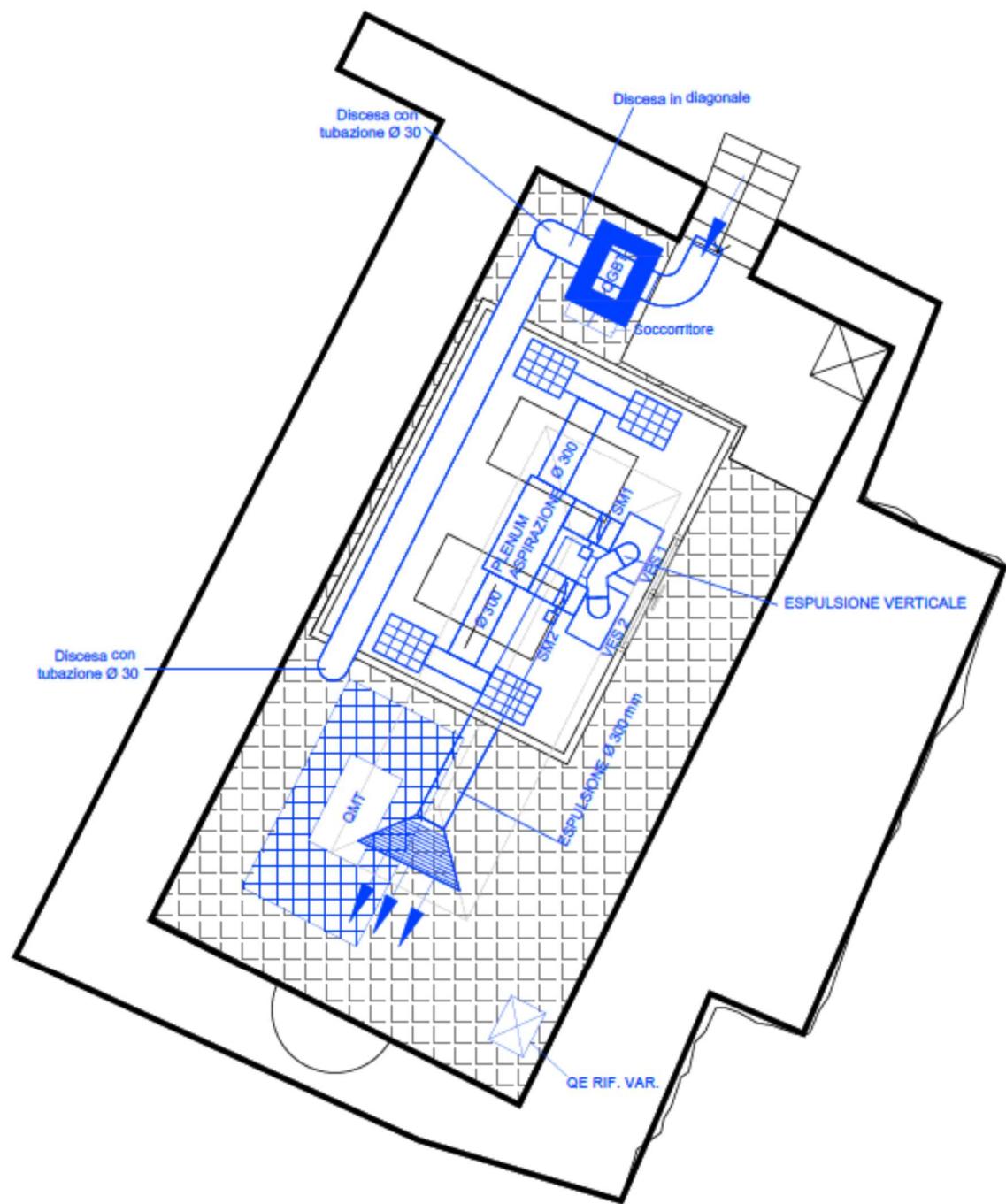


Figura 91 – Configurazione impianto di smaltimento dell'aria

Visualizzazione simulazioni termofluidodinamiche – Caso M1

Campi di temperatura

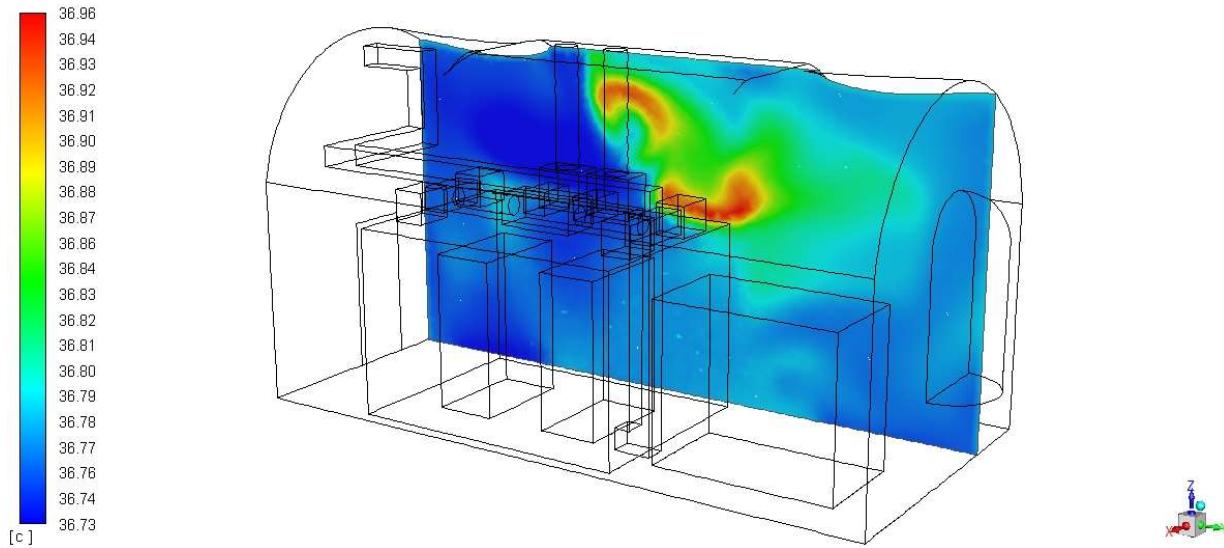


Figura 92 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO1

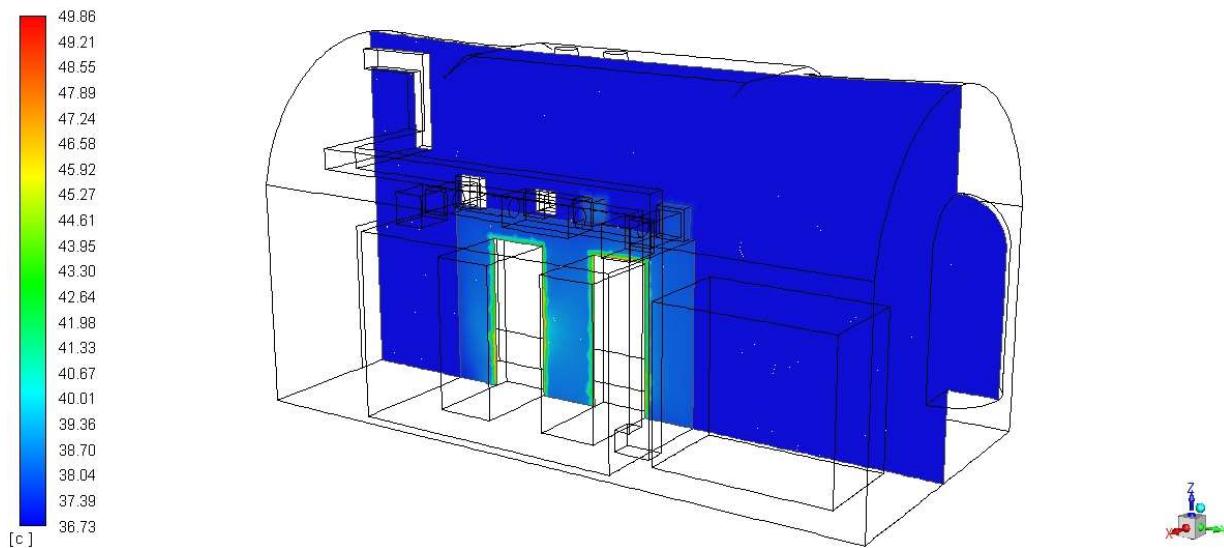


Figura 93 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO2

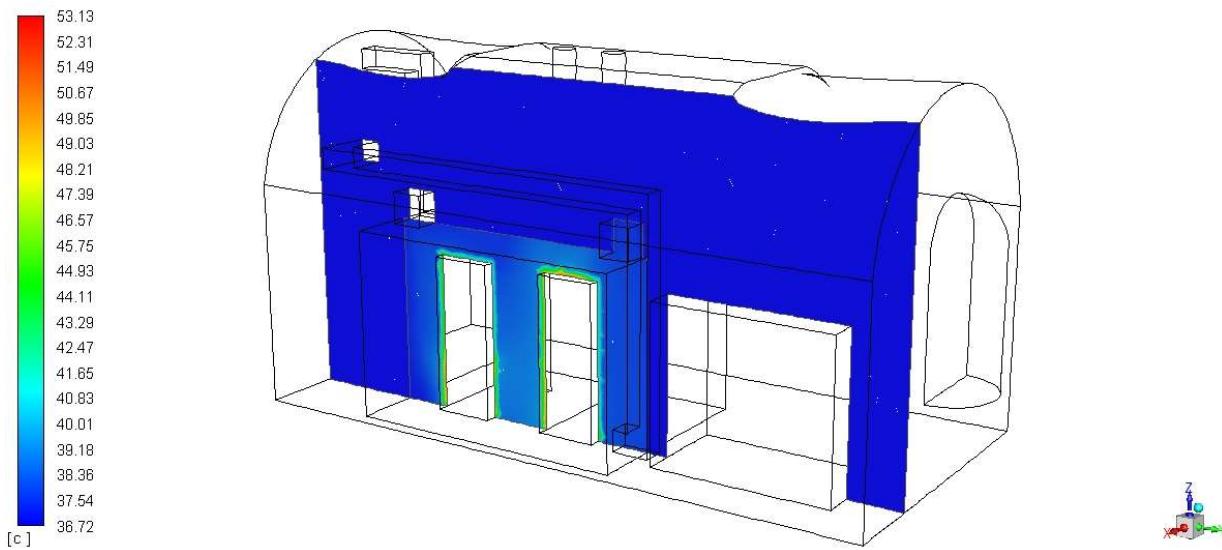


Figura 94 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO3

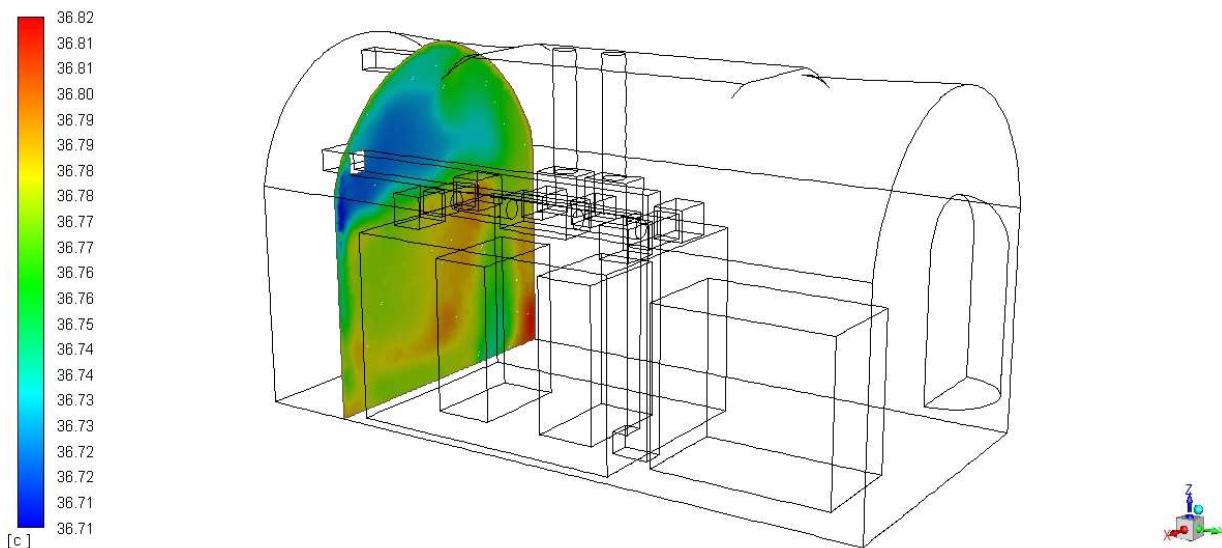


Figura 95 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO4

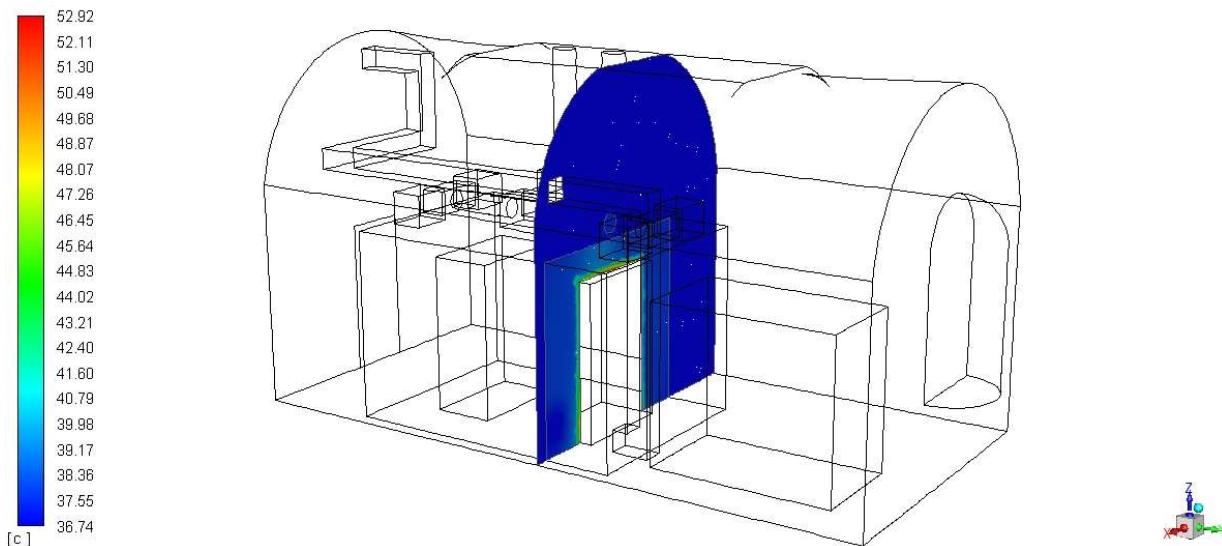


Figura 96 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO 5

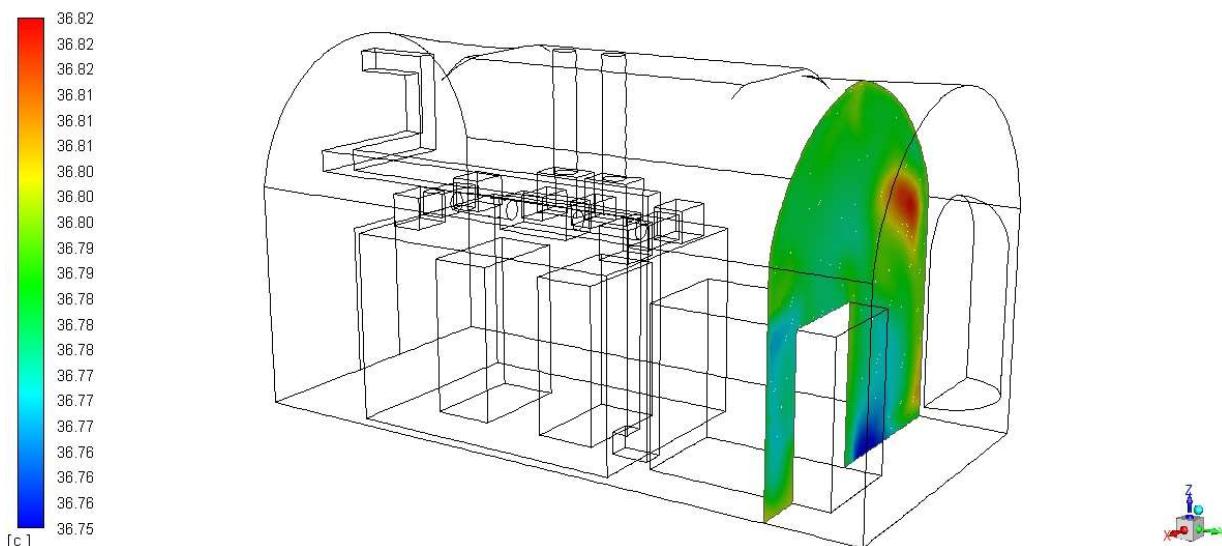


Figura 97 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO 6

Campi di umidità relativa

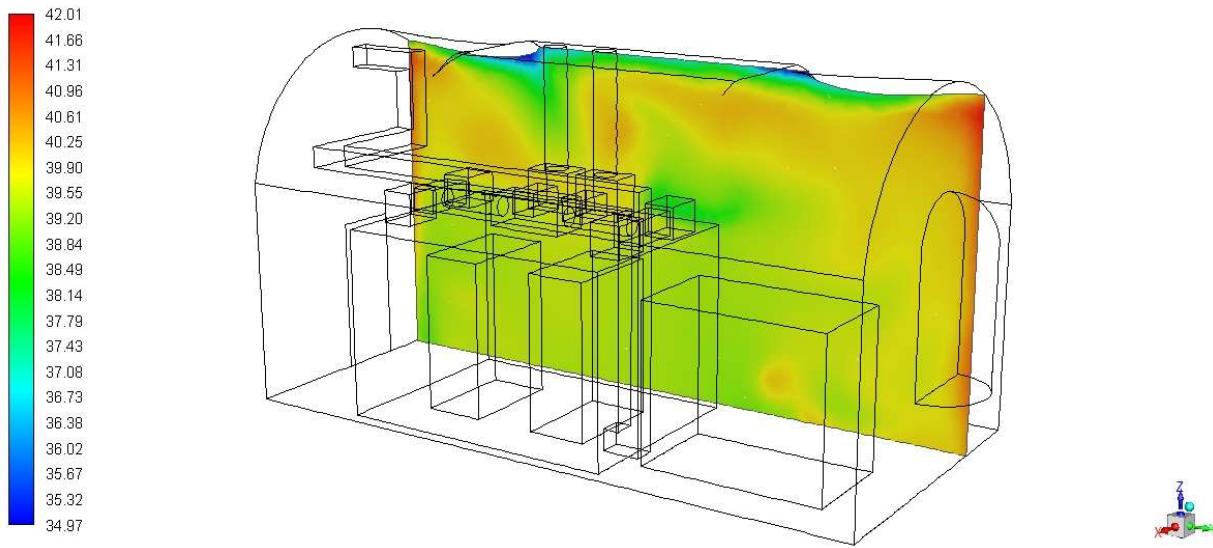


Figura 98 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO1

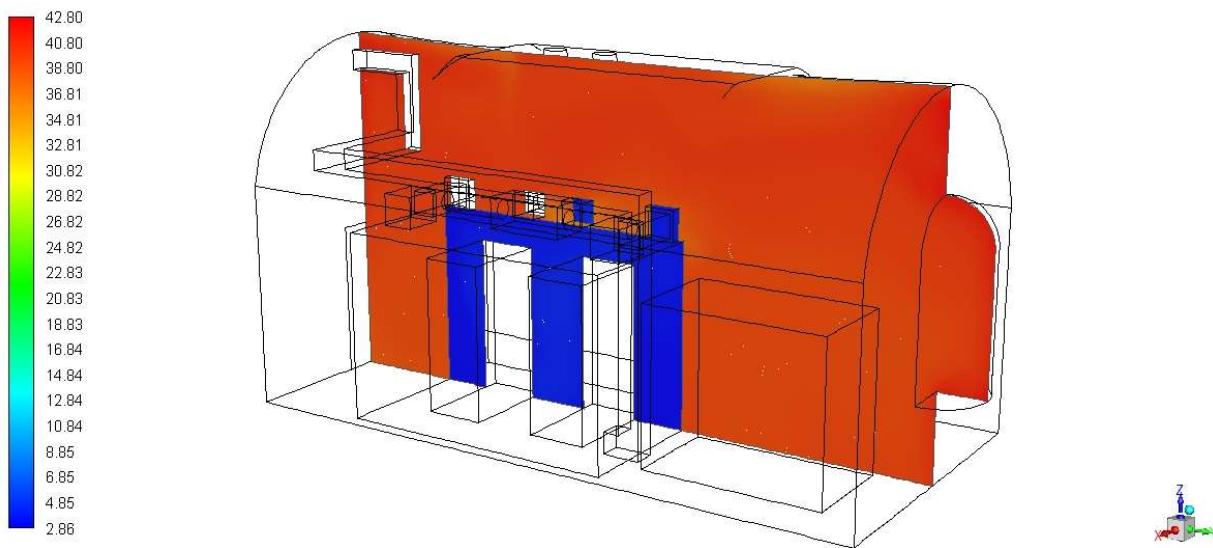


Figura 99 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO2

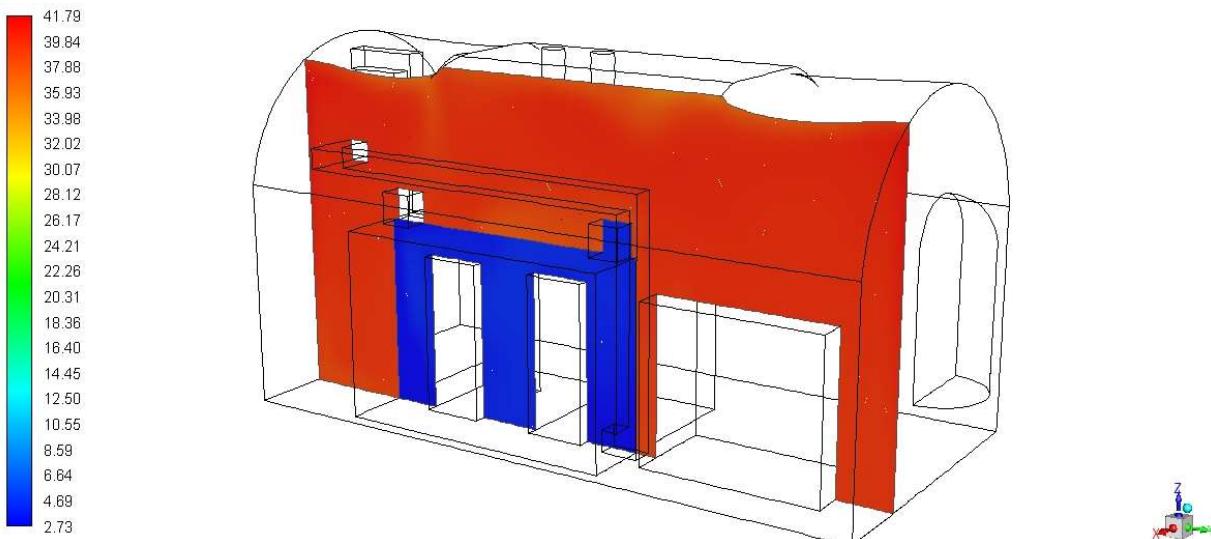


Figura 100 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO3

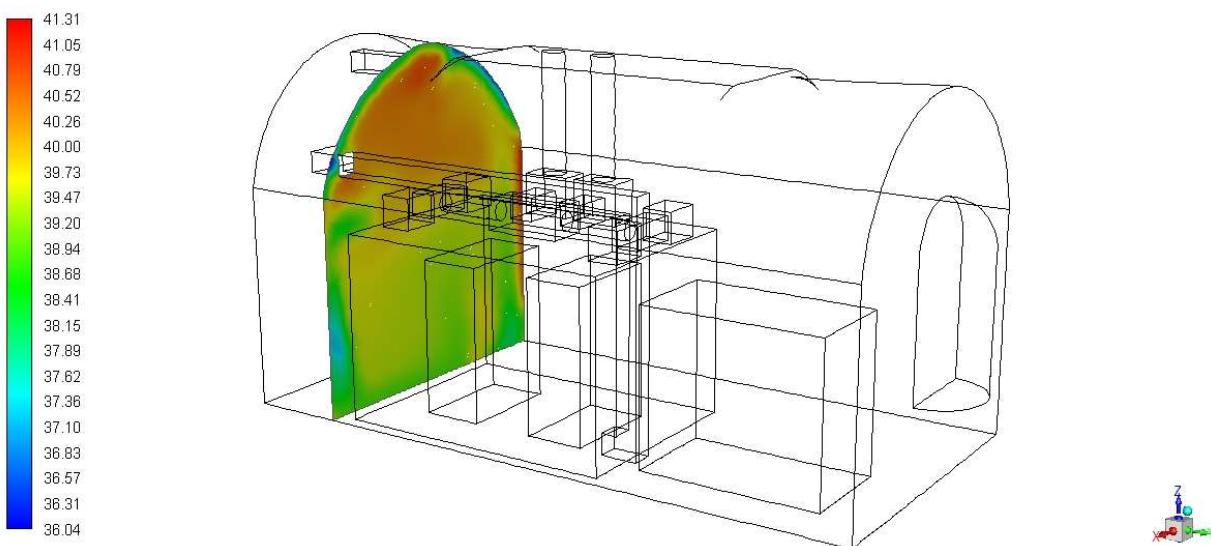


Figura 101 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO4

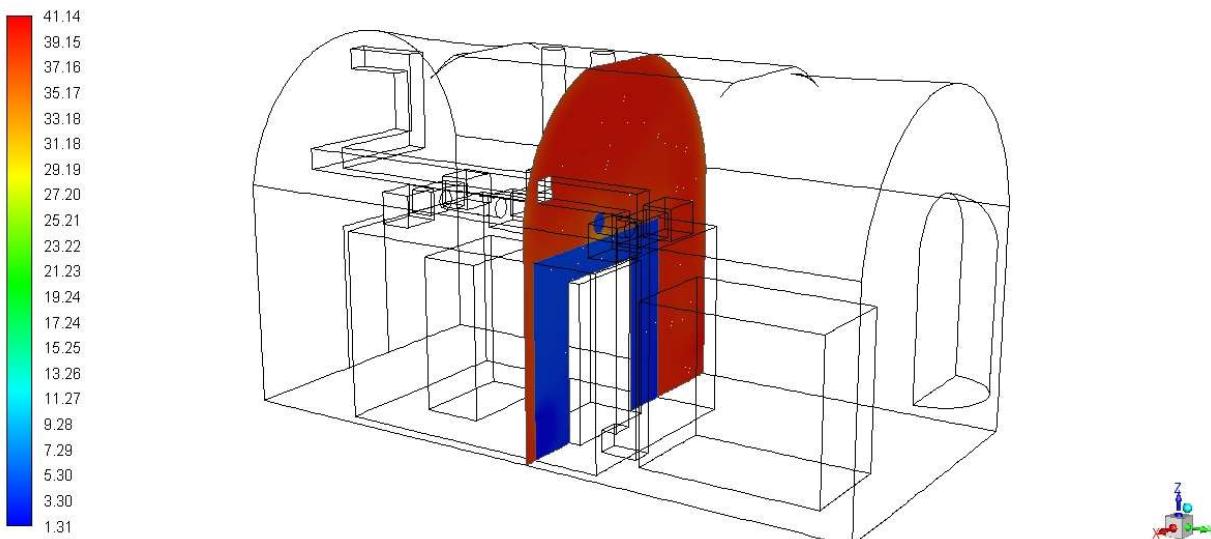


Figura 102 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PLAN05

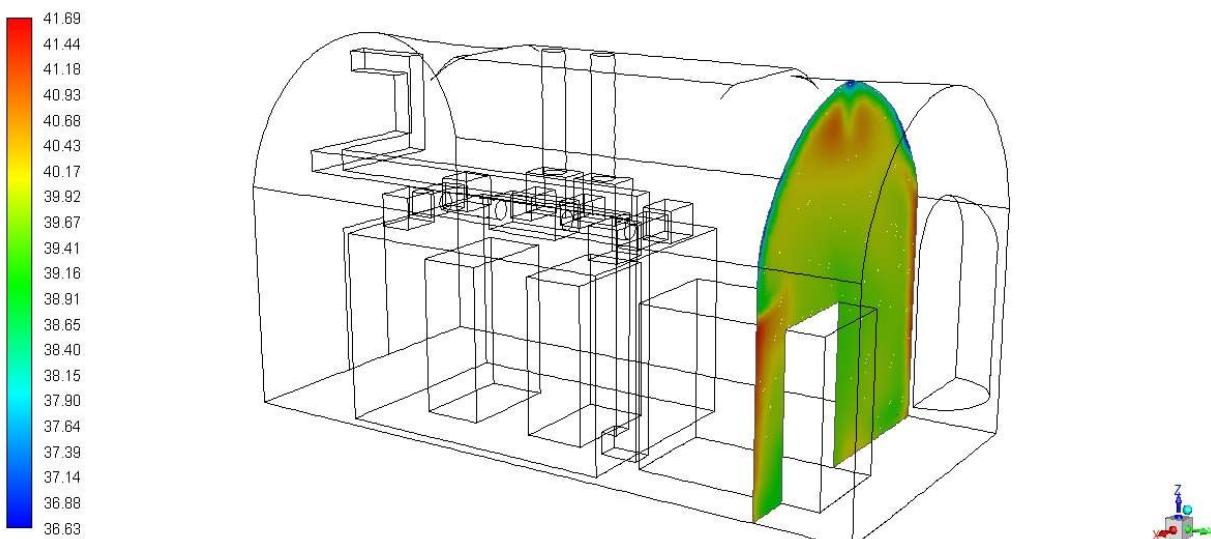


Figura 103 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PLAN06

Vettori velocità

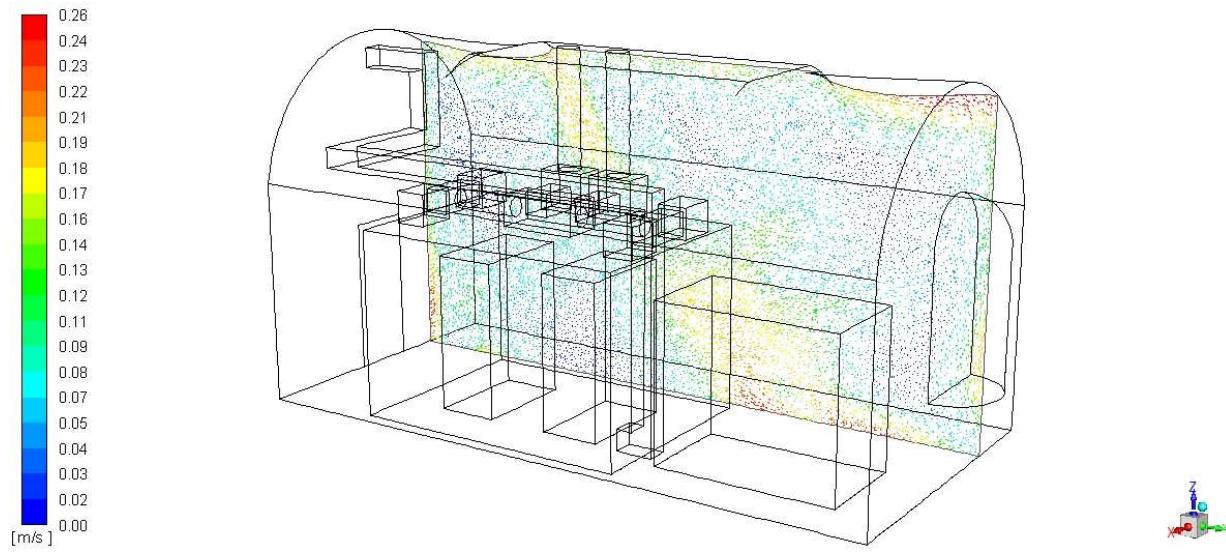


Figura 104 – Visualizzazione vettori velocità per il PIANO1

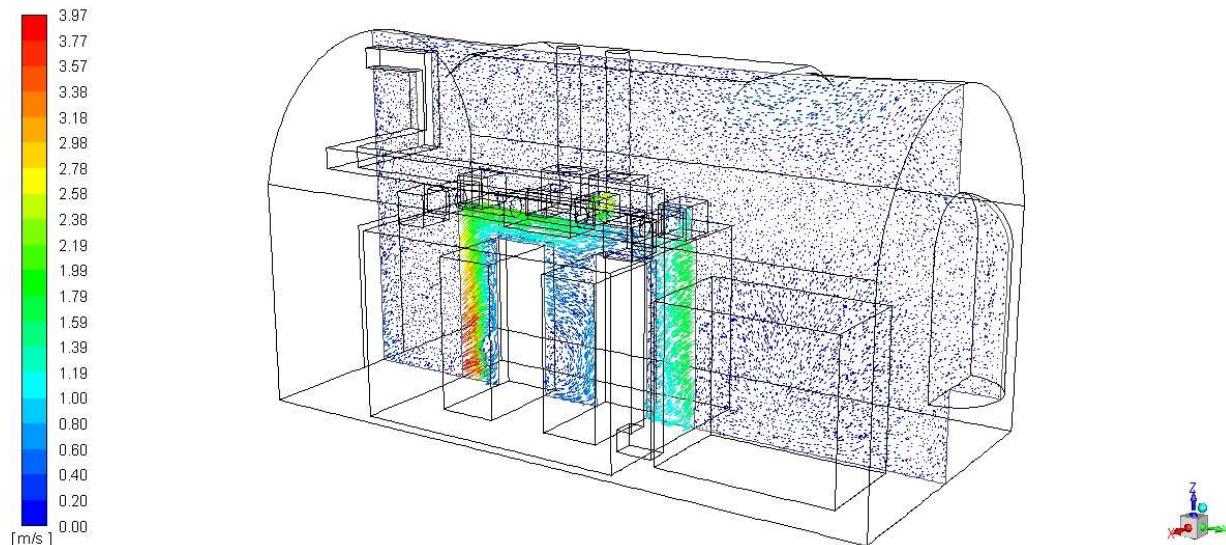


Figura 105 – Visualizzazione vettori velocità per il PIANO2

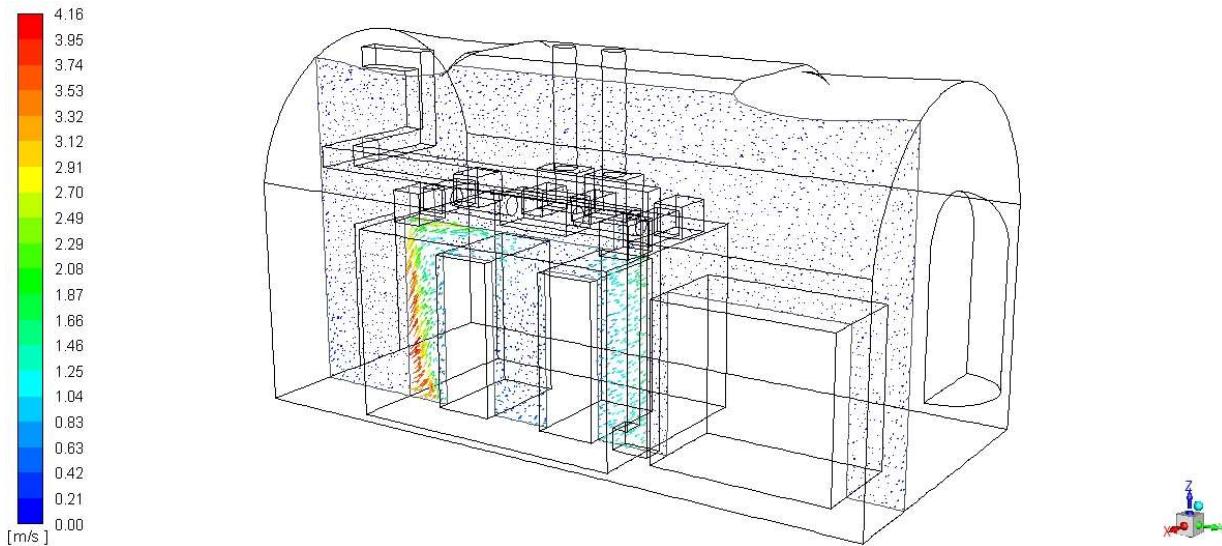


Figura 106 – Visualizzazione vettori velocità per il PIANO3

Pathlines di velocità

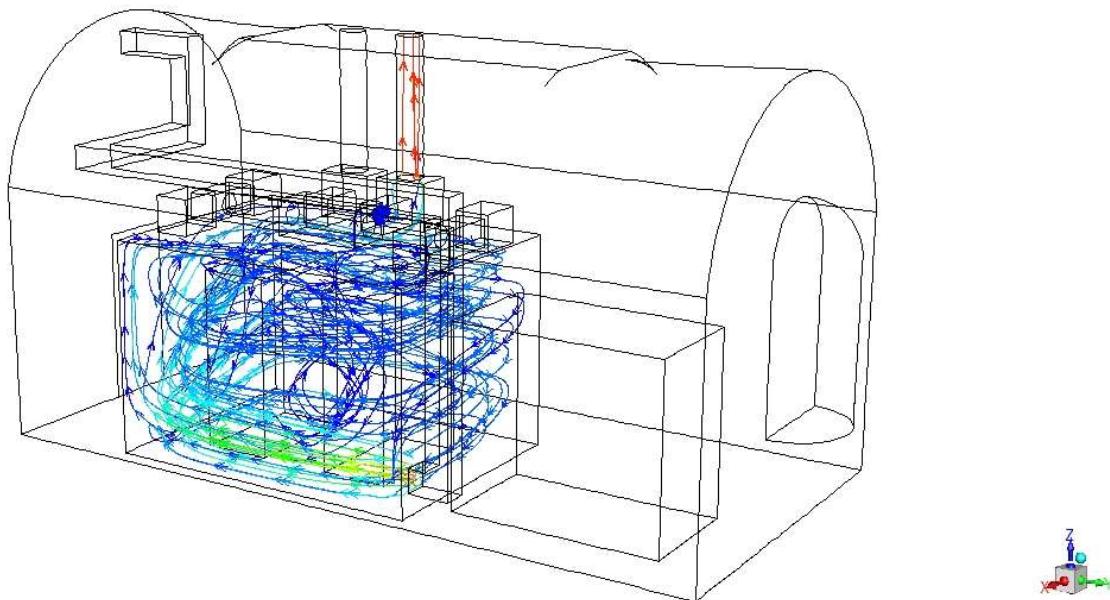


Figura 107 – Visualizzazione pathlines di velocità

5.3.2 Visualizzazione simulazioni termofluidodinamiche – Caso M2

Campi di temperatura

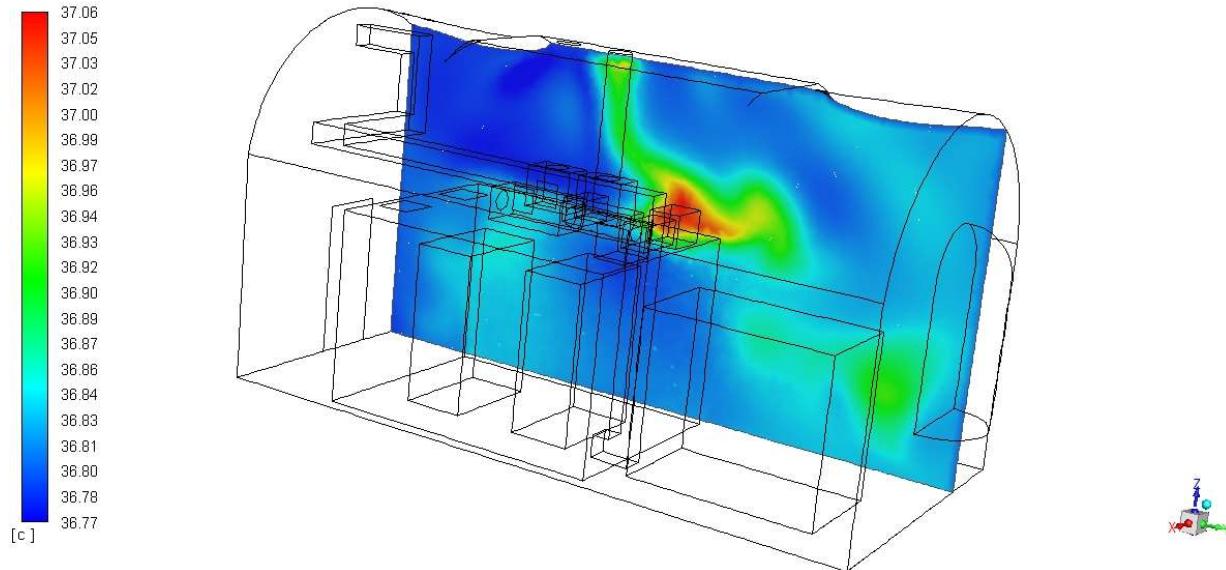


Figura 108 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO1

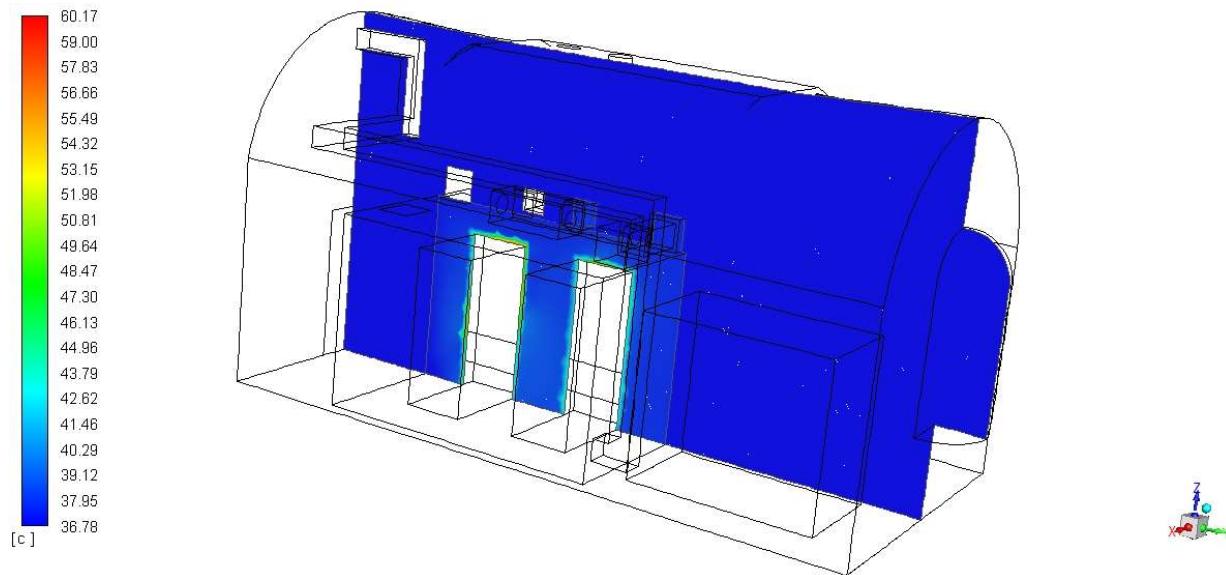


Figura 109 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO2

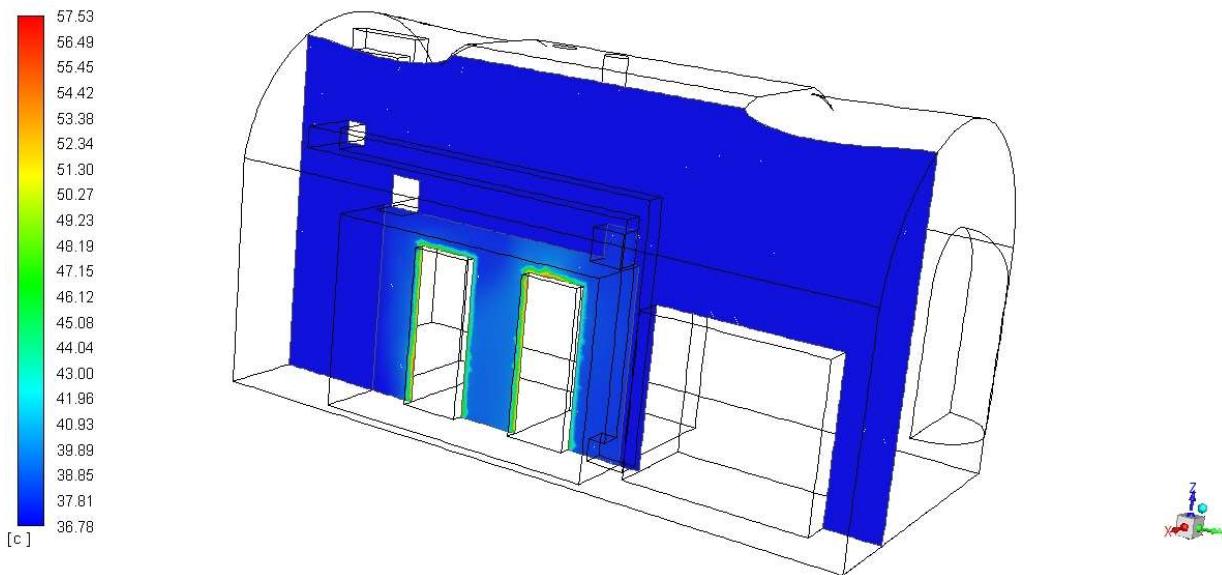


Figura 110 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO3

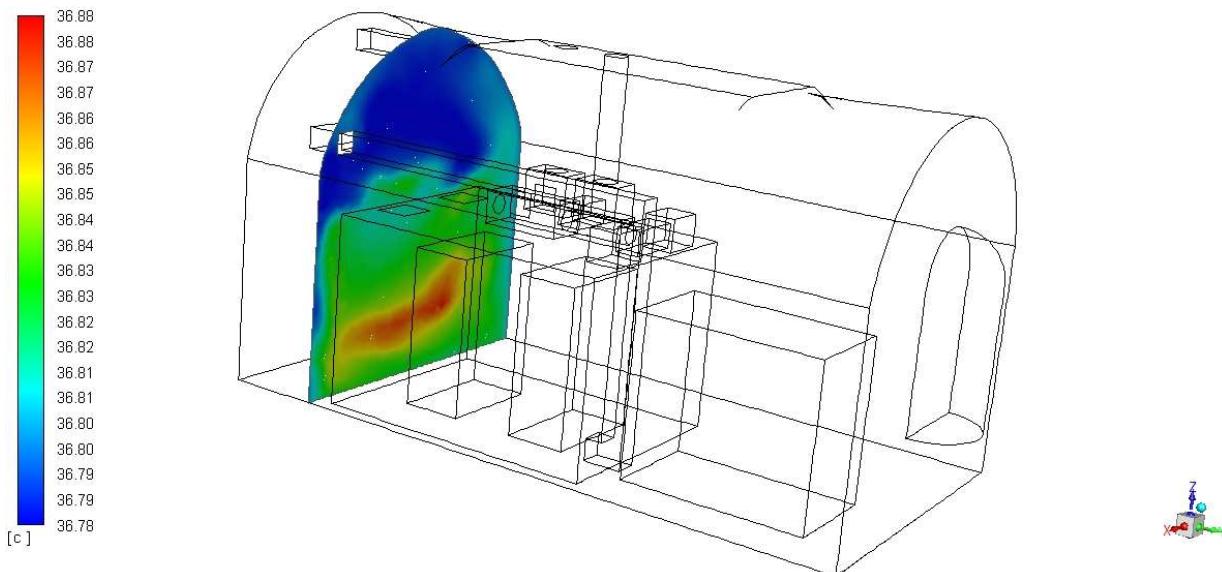


Figura 111 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO4

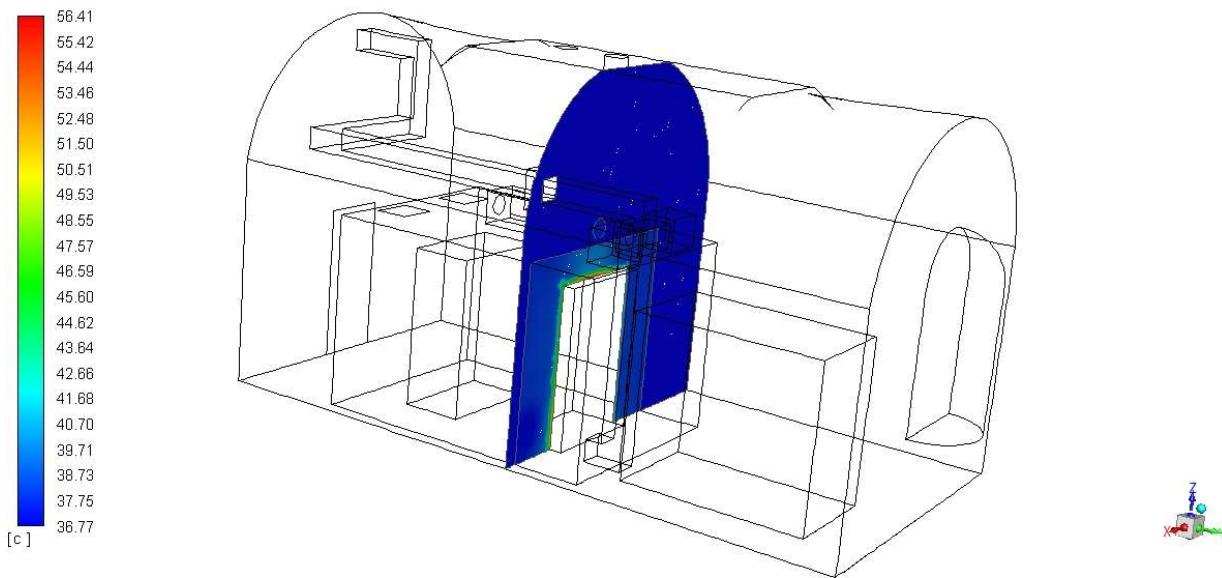


Figura 112 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO5

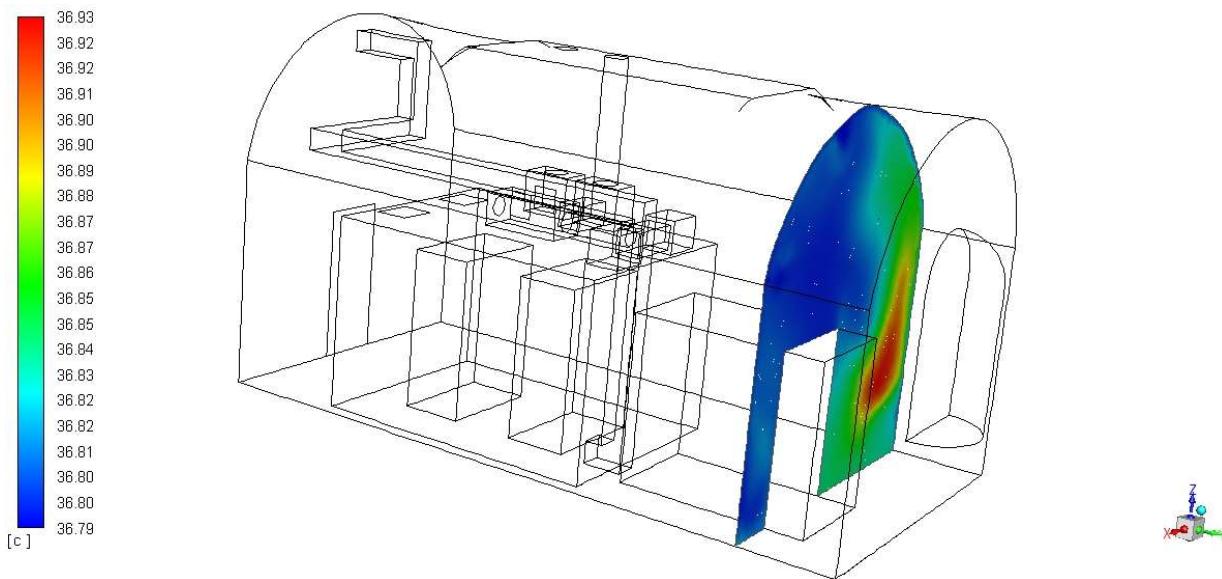


Figura 113 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO6

Campi di umidità relativa

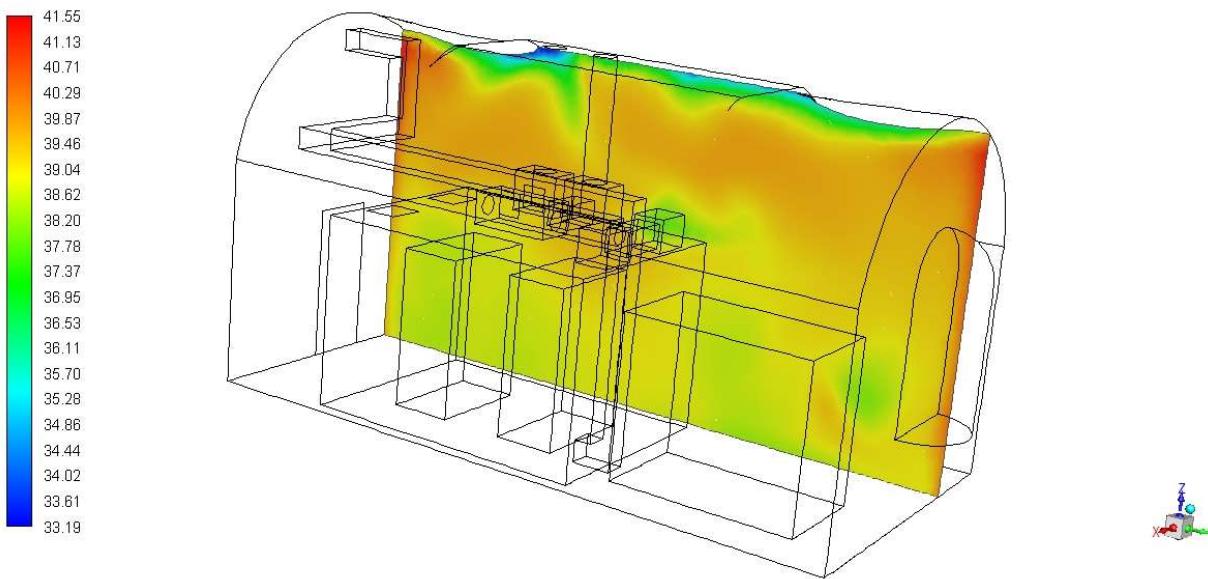


Figura 114 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO1

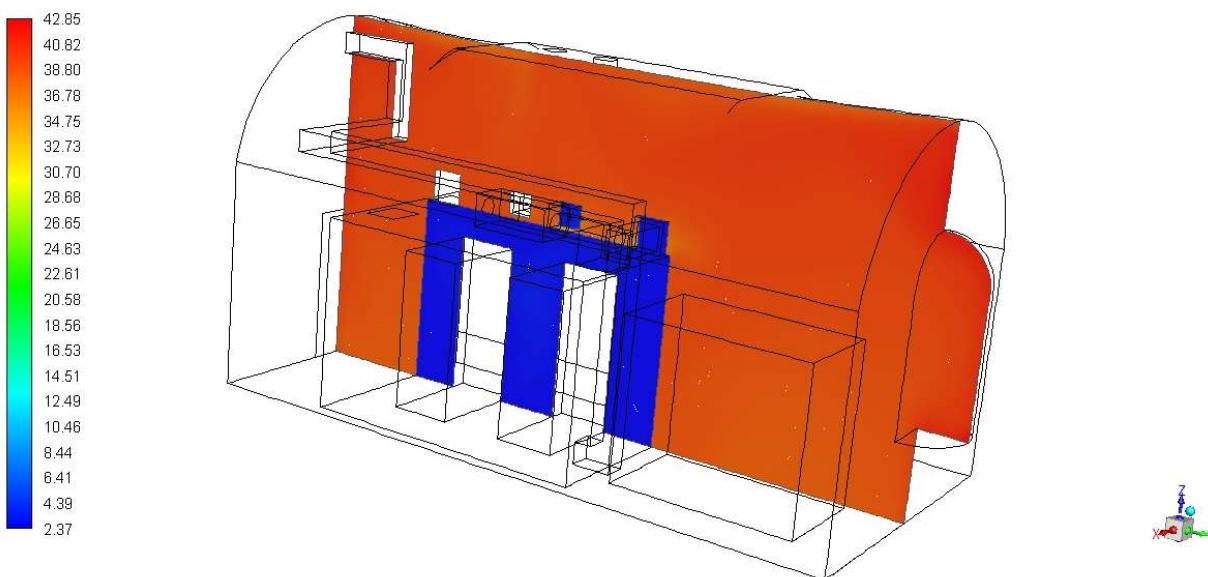


Figura 115 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO2

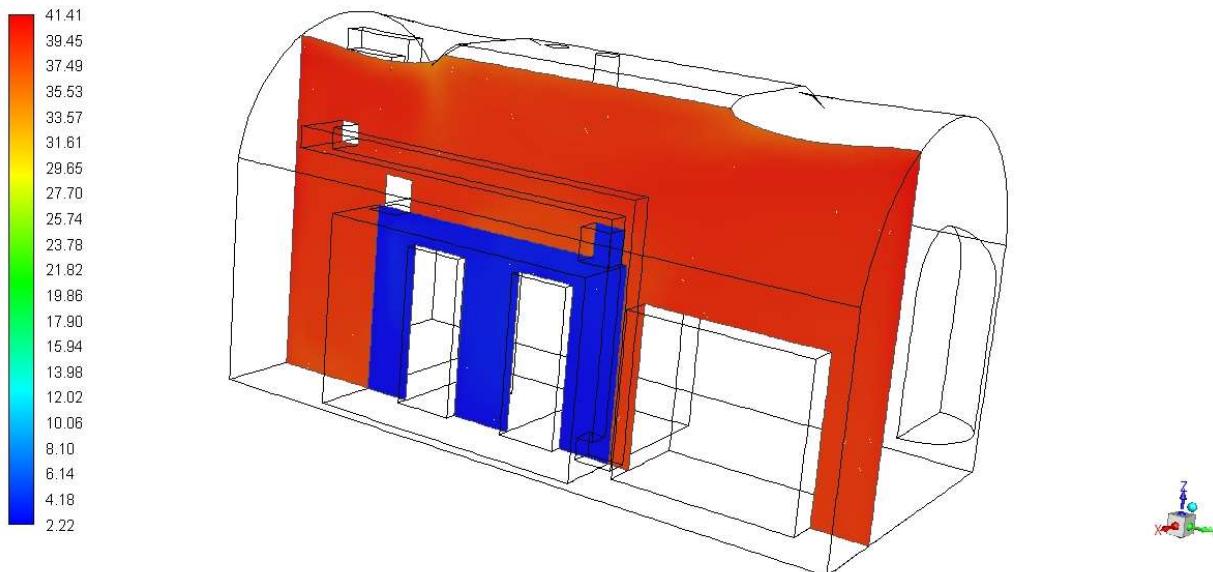


Figura 116 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO3

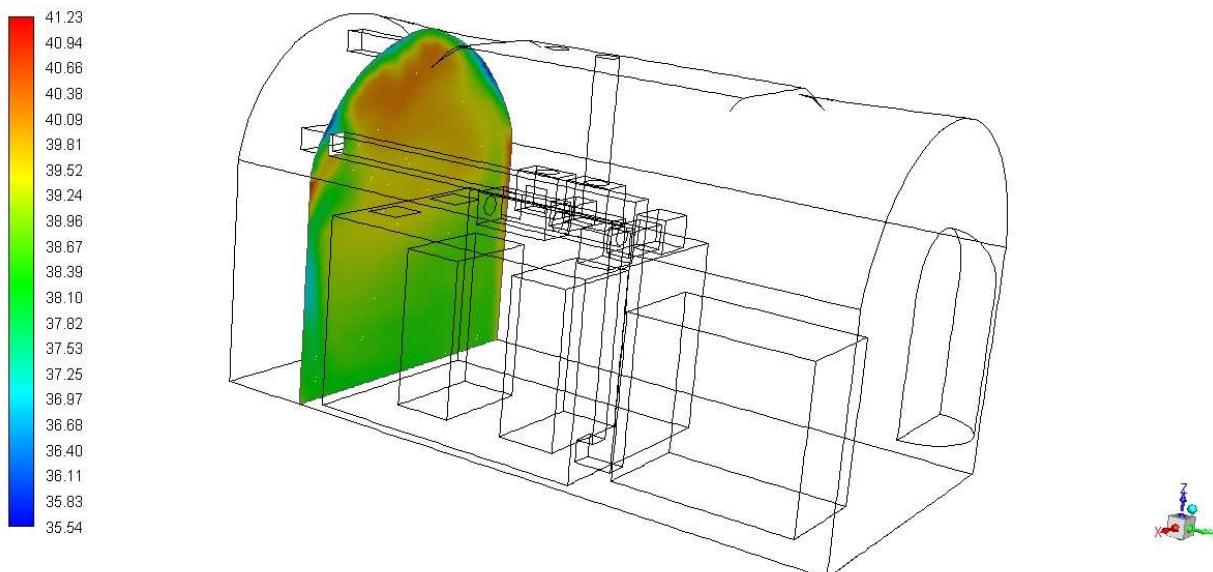


Figura 117 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO4

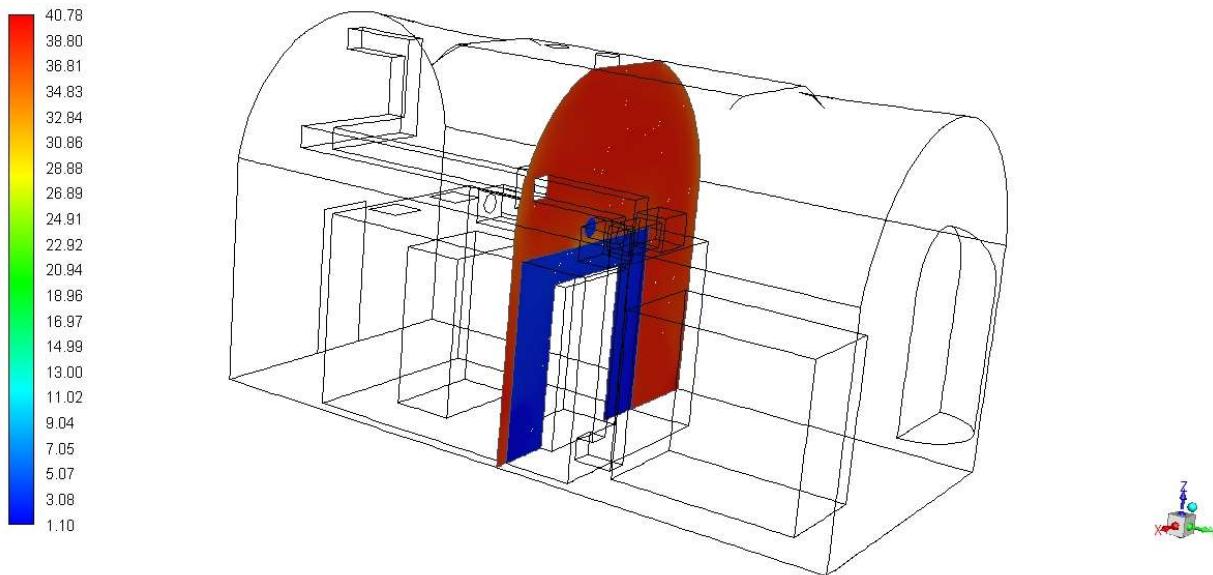


Figura 118 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO5

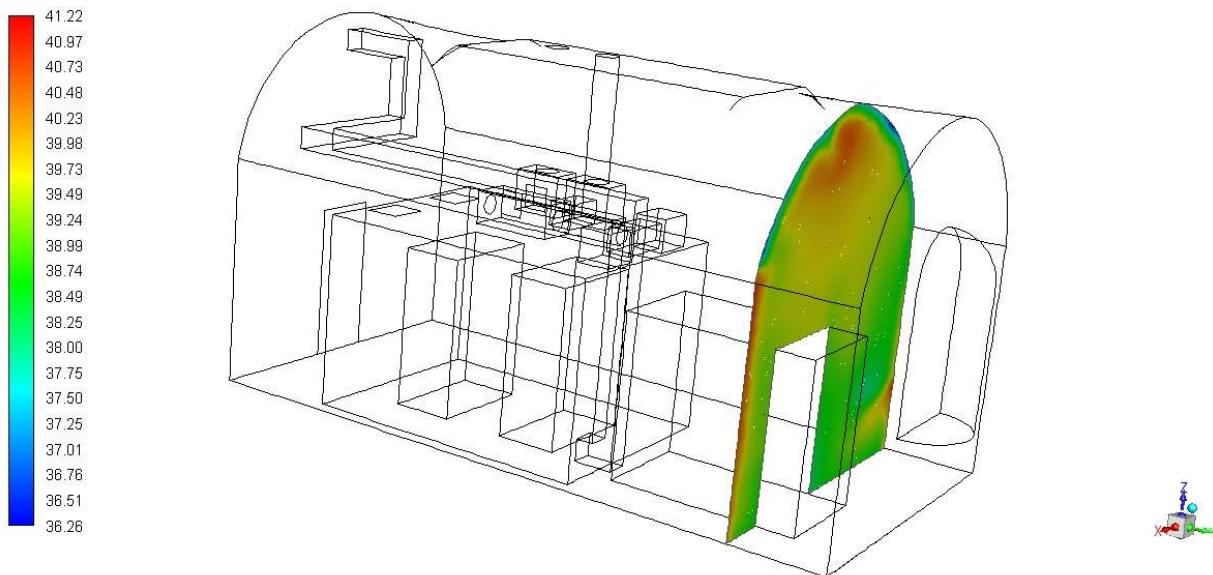


Figura 119 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO6

Vettori velocità

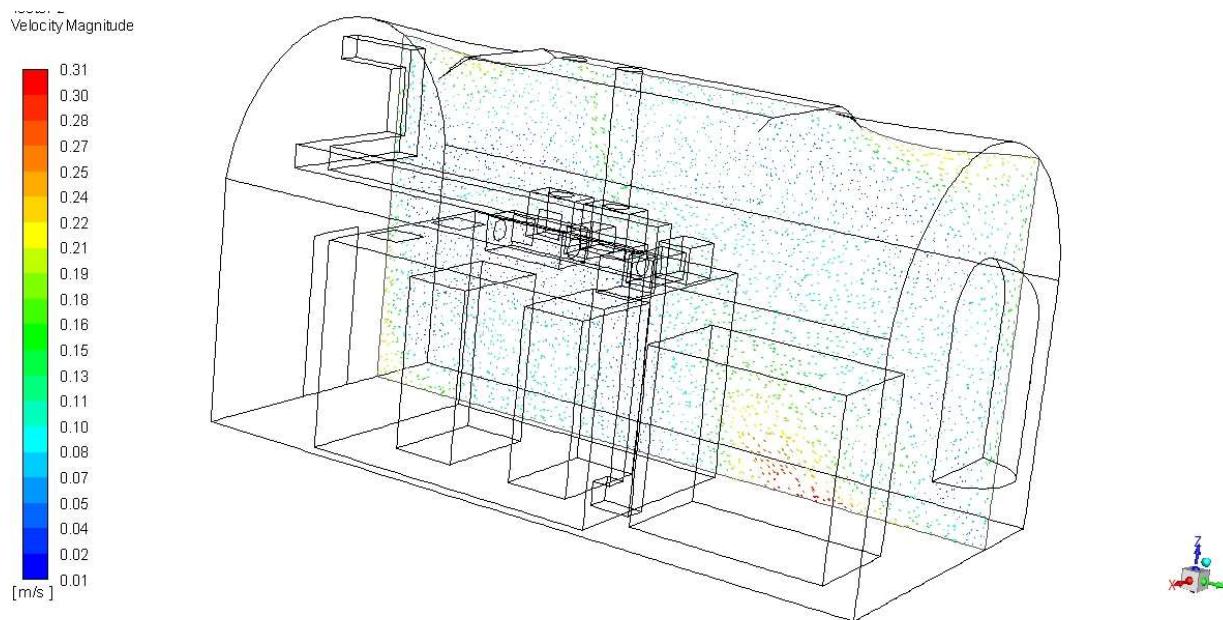


Figura 120 – Visualizzazione vettori velocità per il PIANO1

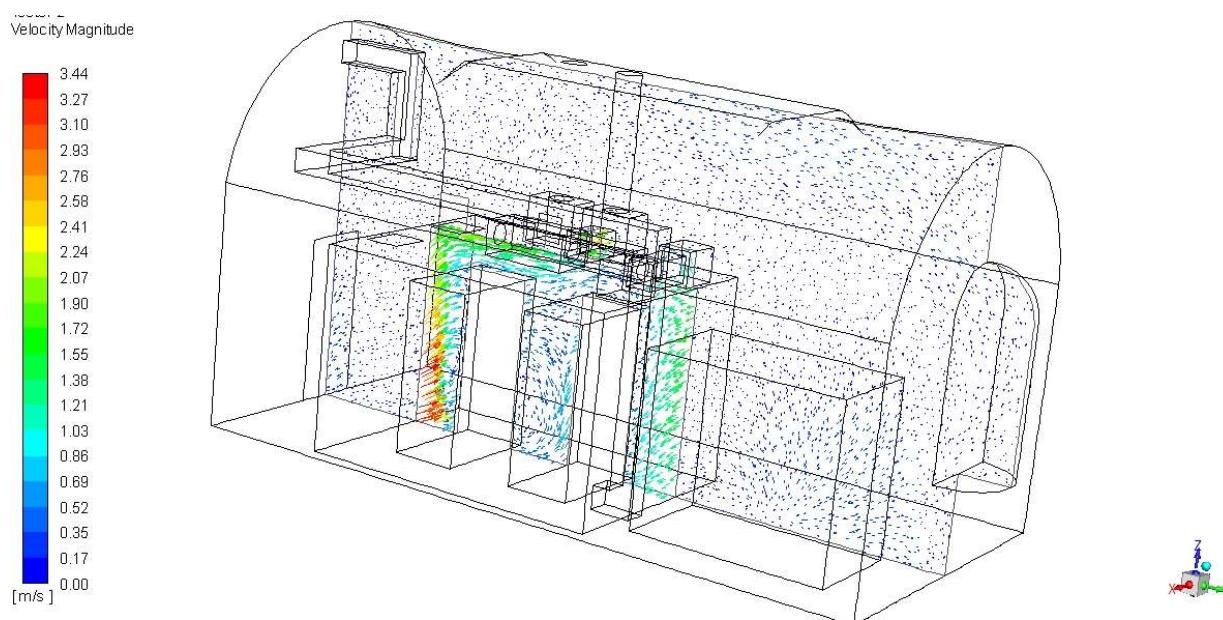


Figura 121 – Visualizzazione vettori velocità per il PIANO2

Velocity Magnitude

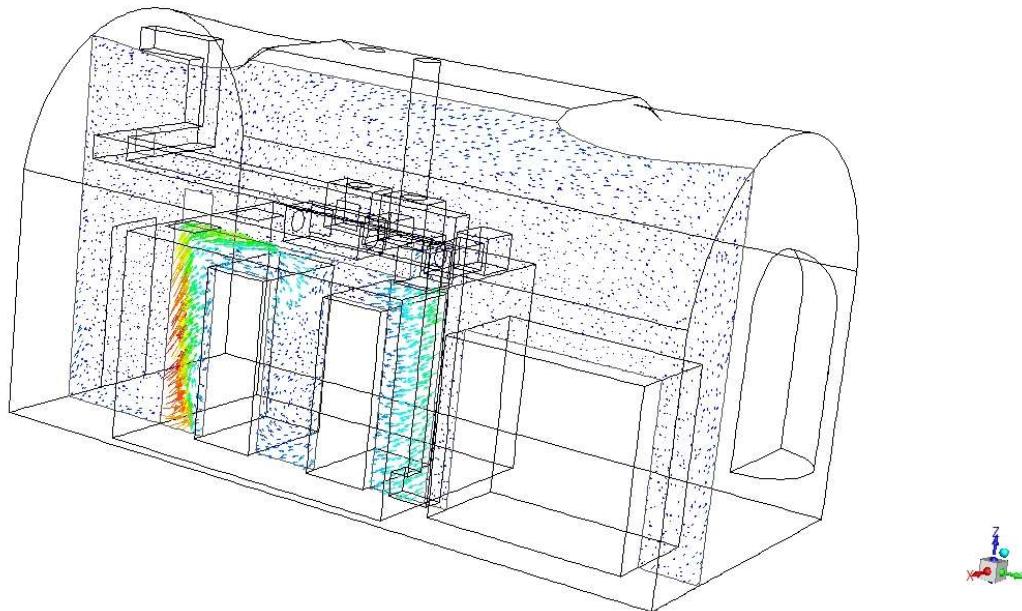
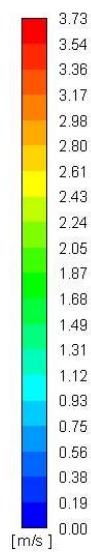


Figura 122 – Visualizzazione vettori velocità per il PIANO3

Pathlines di velocità

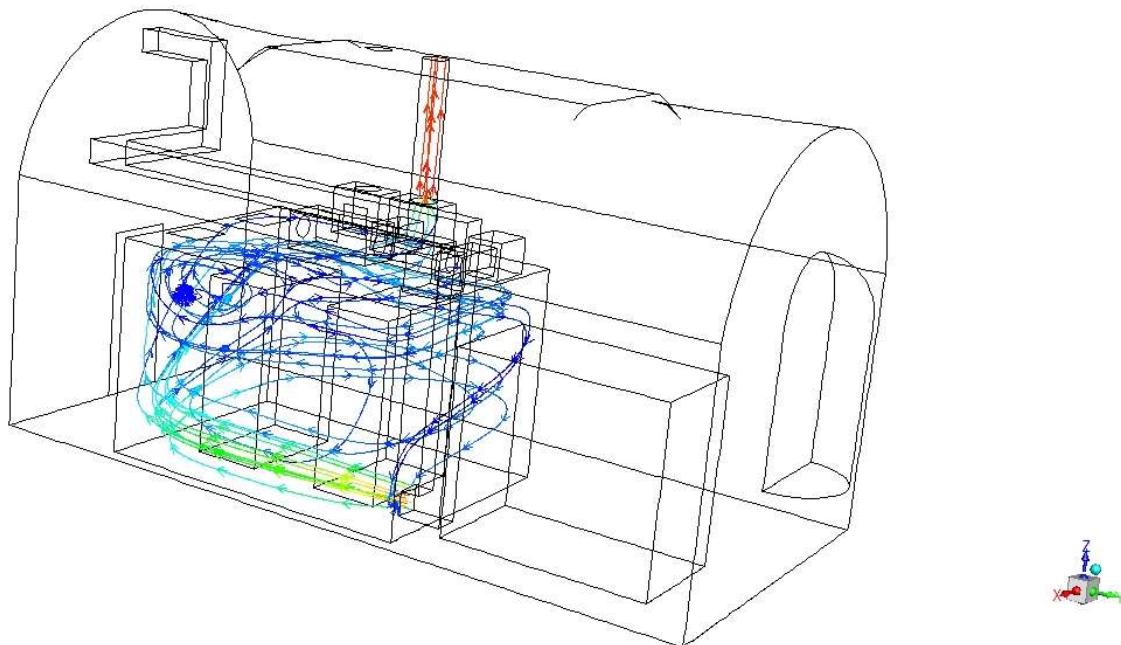


Figura 123 – Visualizzazione pathlines di velocità

Visualizzazione simulazioni termofluidodinamiche – Caso M3

Campi di temperatura

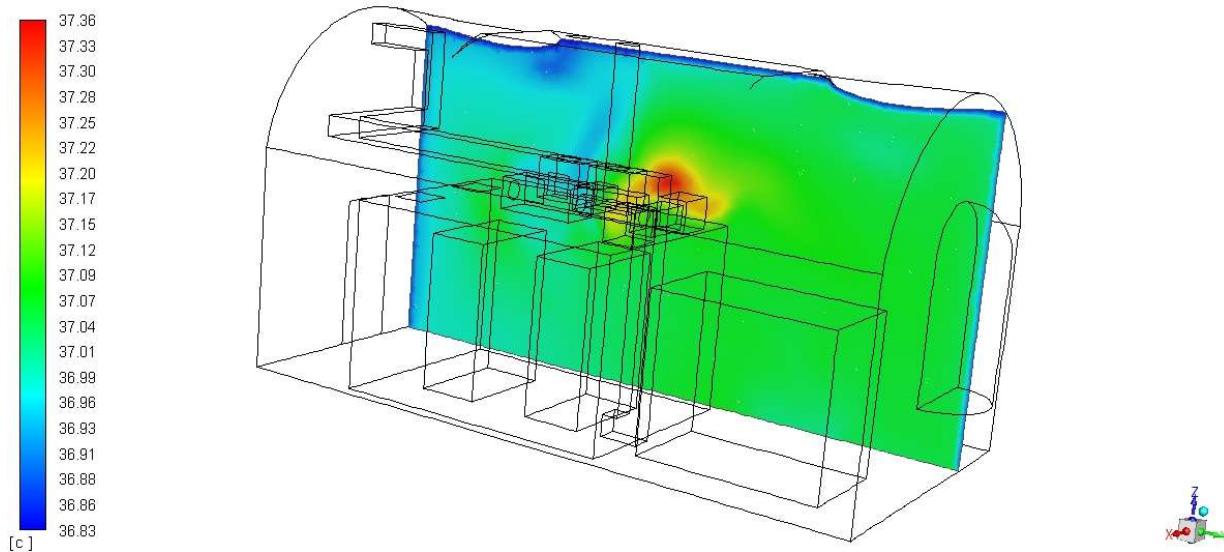


Figura 124 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO1

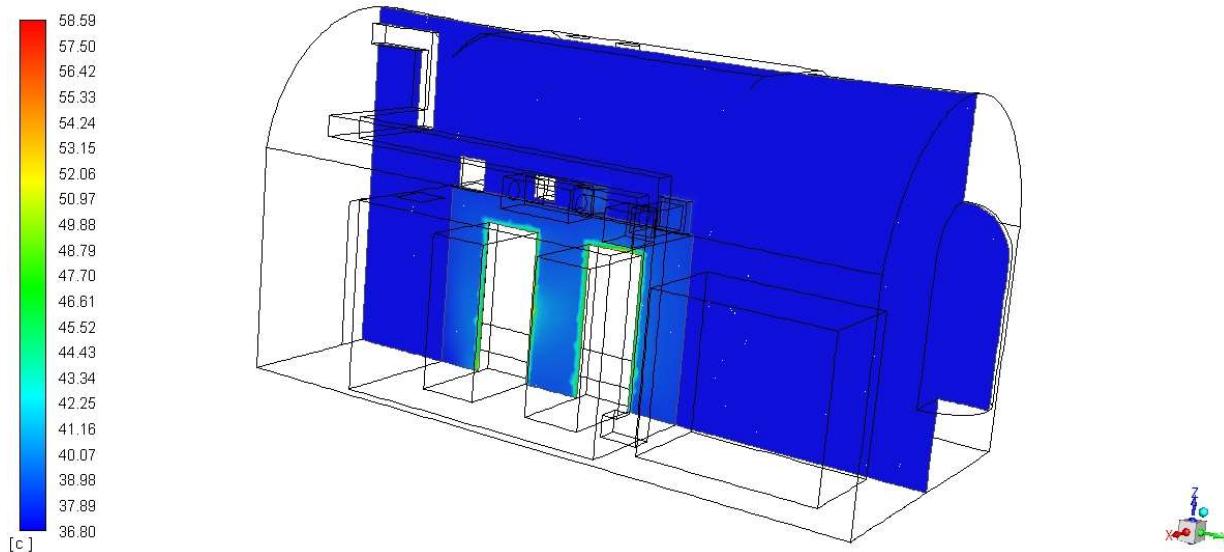


Figura 125 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO2

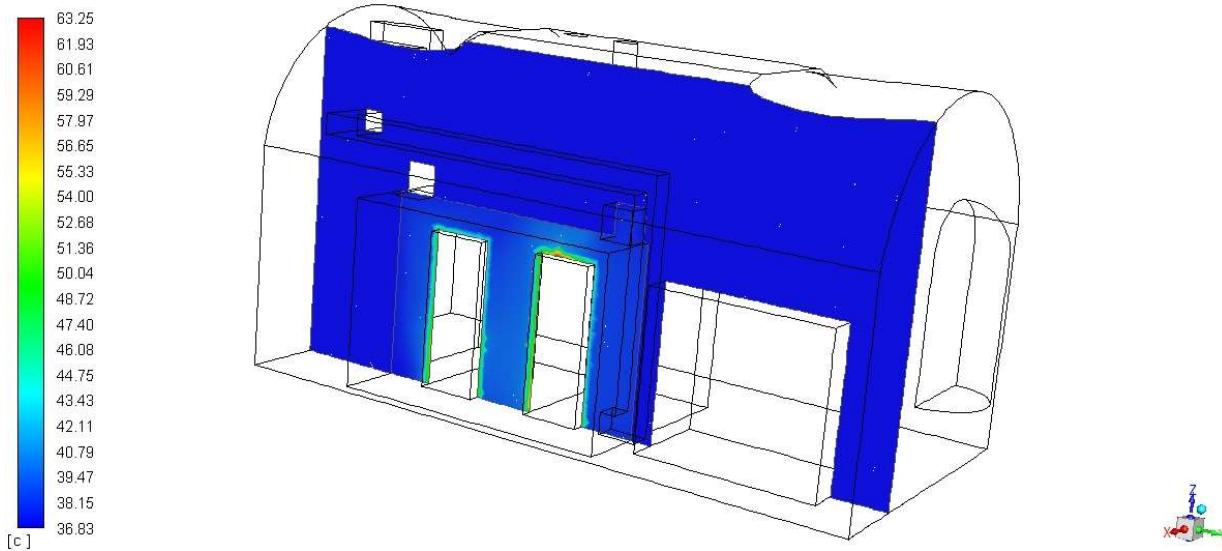


Figura 126 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO3

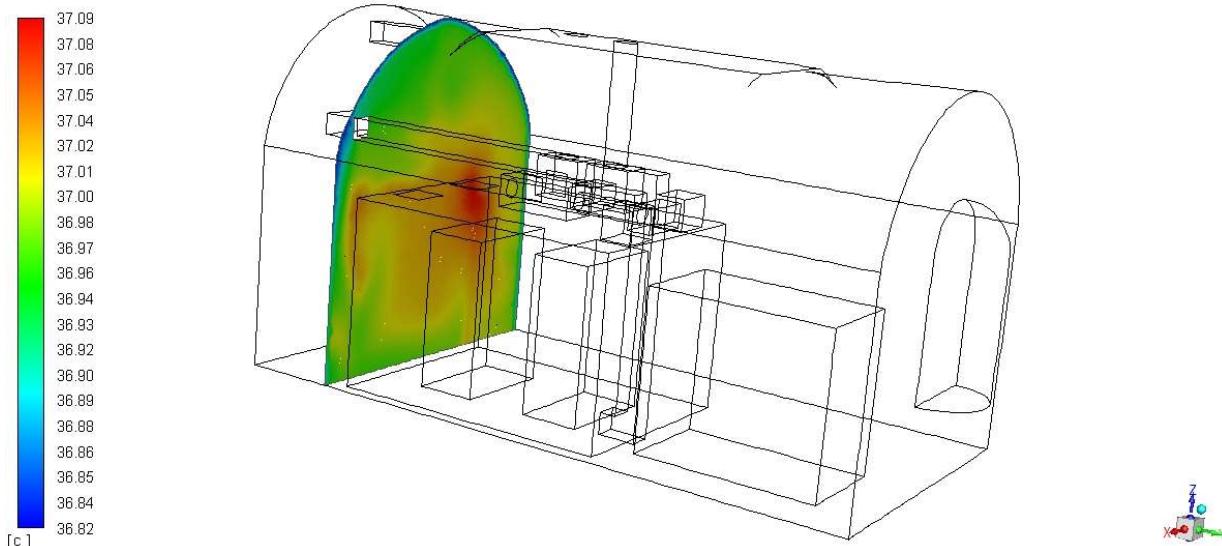


Figura 127 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO4

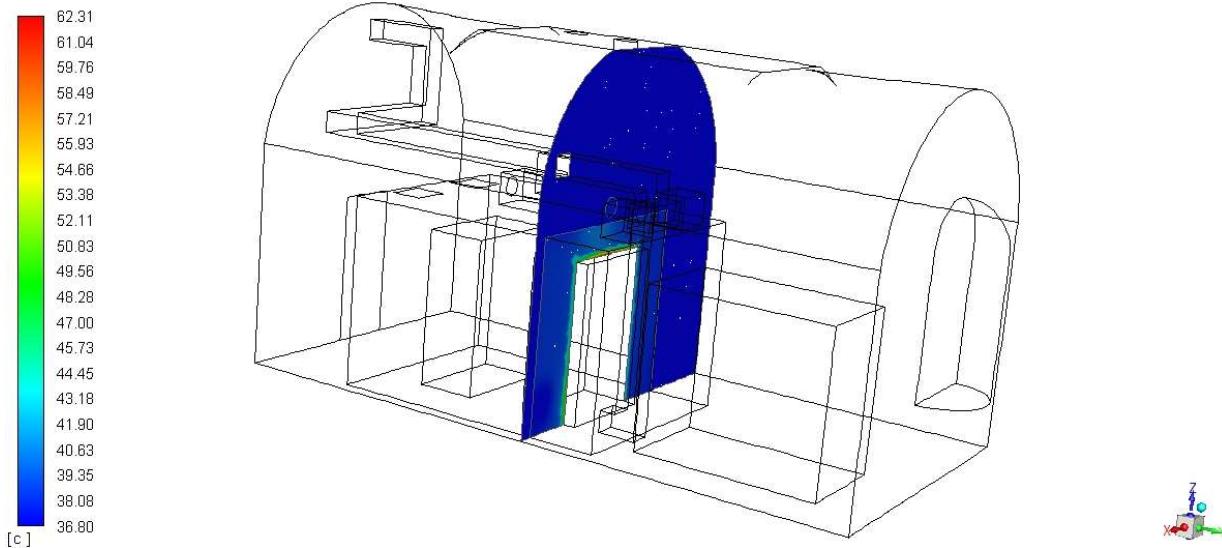


Figura 128 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO5

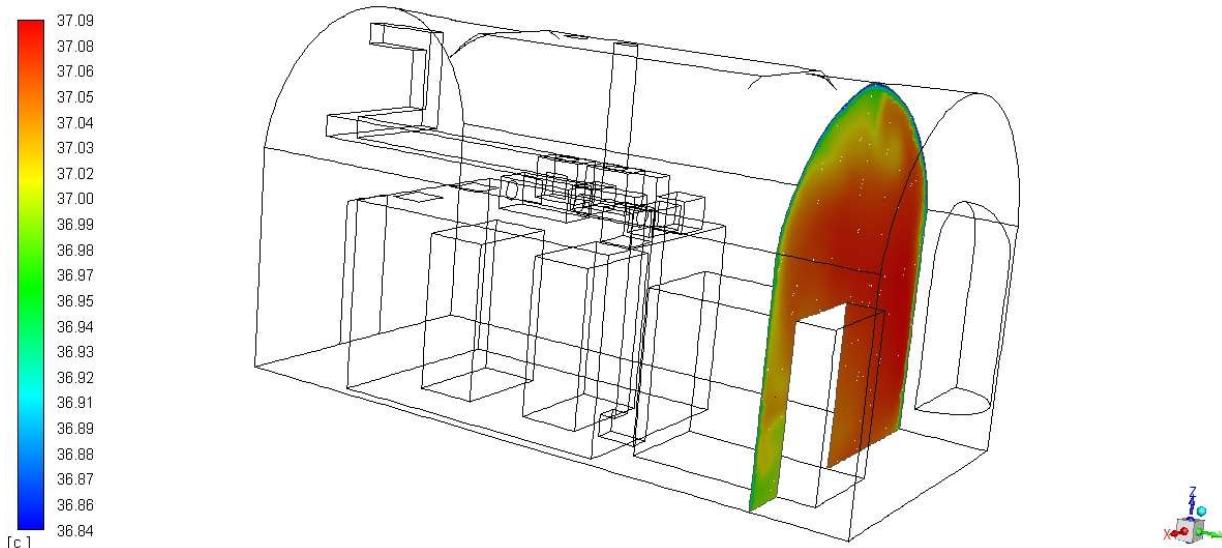


Figura 129 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO6

Campi di umidità relativa

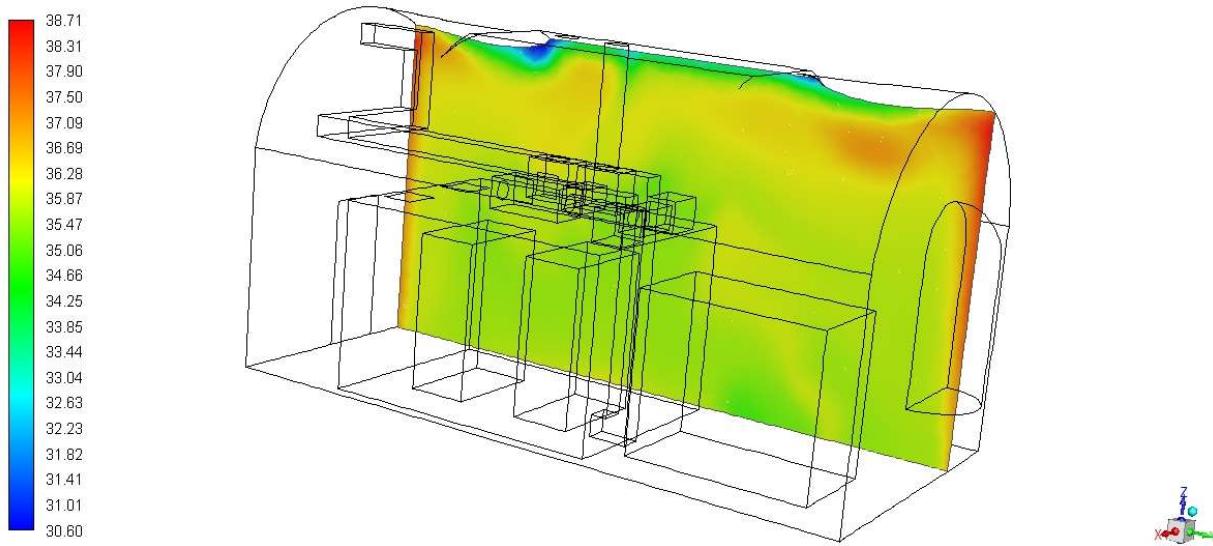


Figura 130 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO1

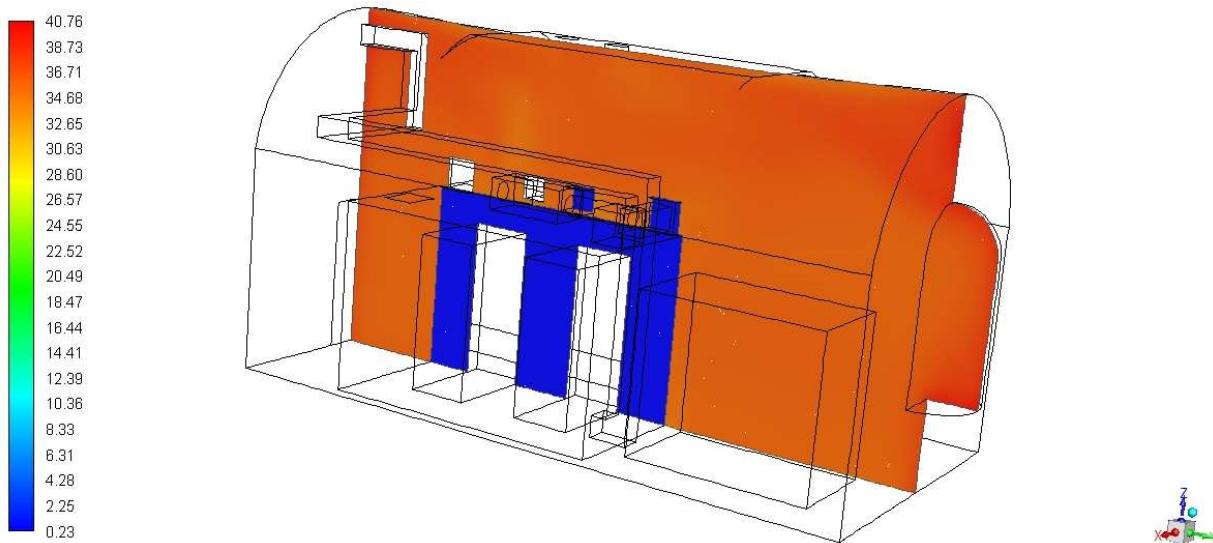


Figura 131 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO2

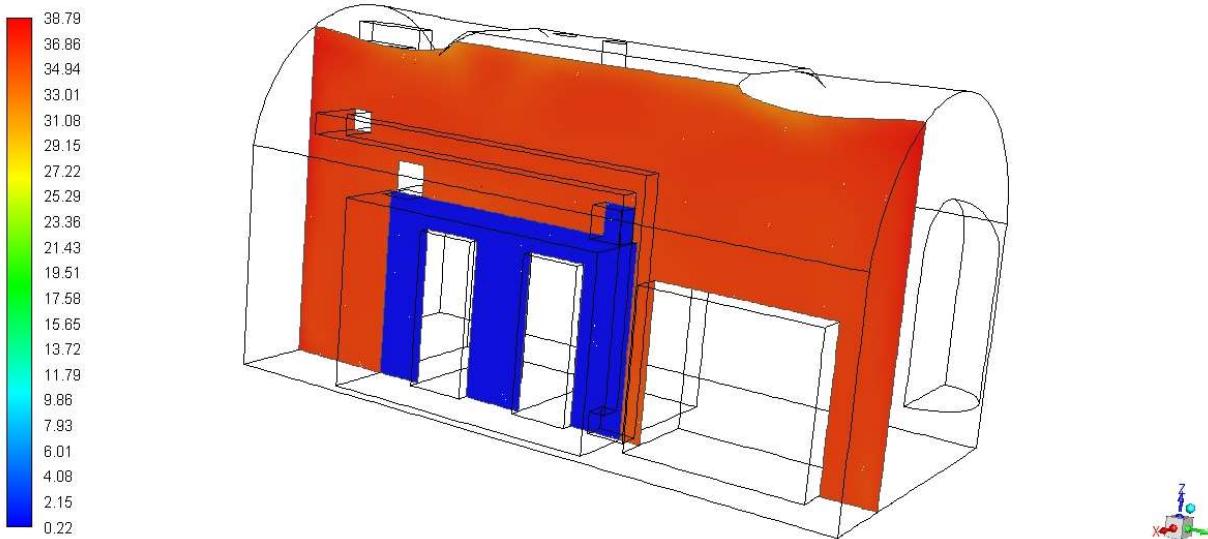


Figura 132 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO3

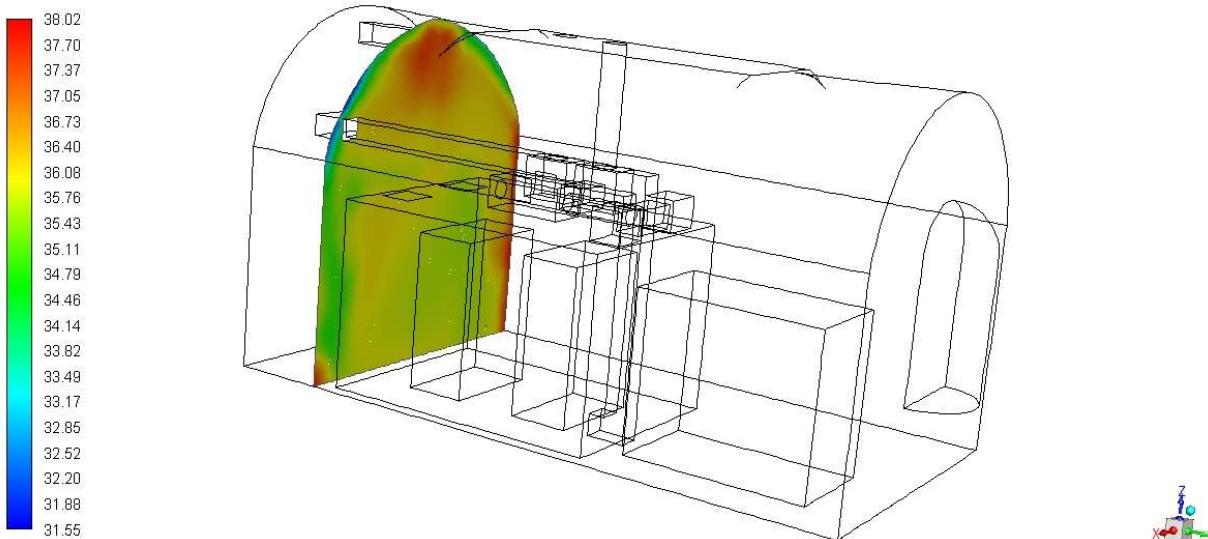


Figura 133 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO4

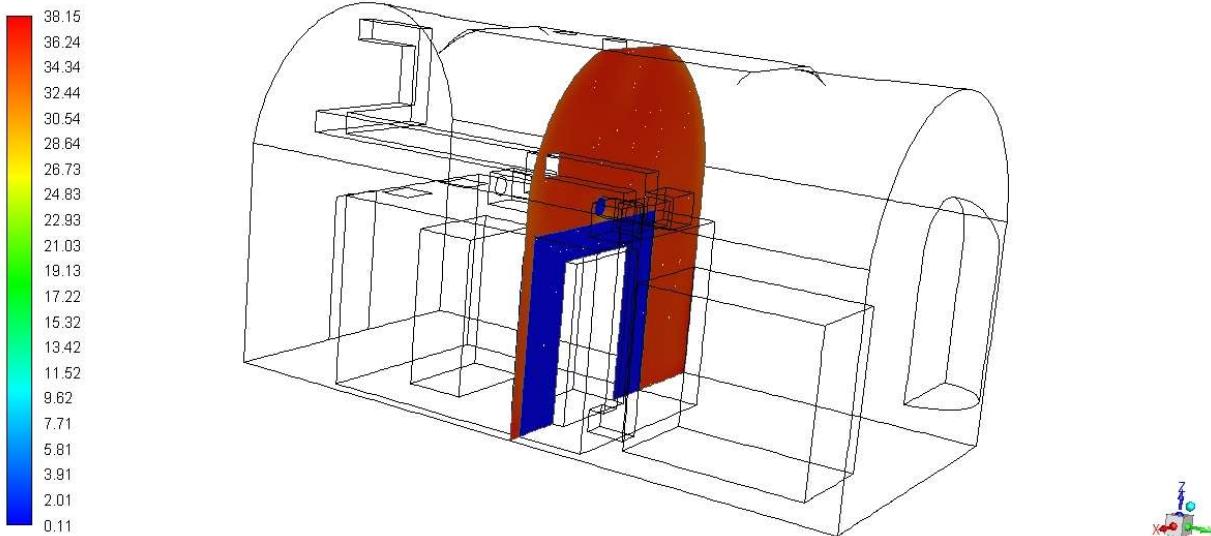


Figura 134 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO5

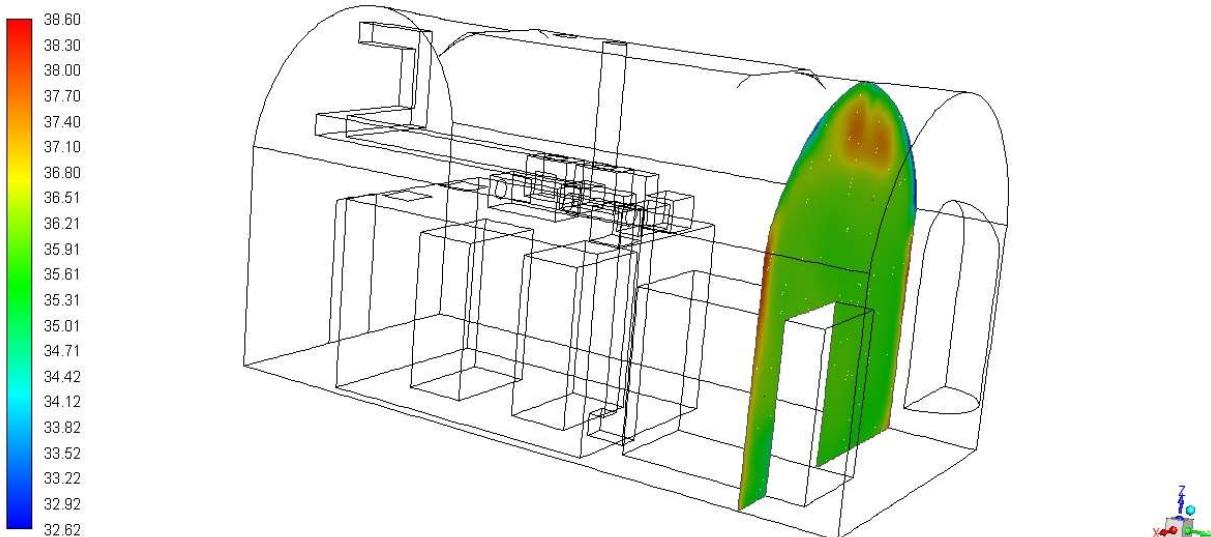


Figura 135 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO6

Vettori velocità

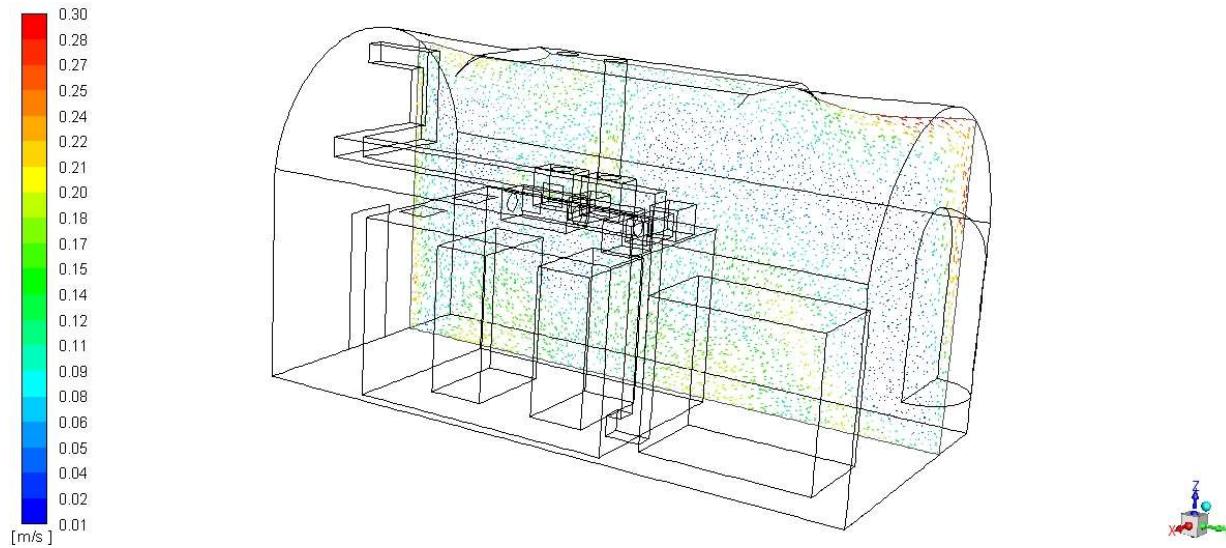


Figura 136 – Visualizzazione vettori velocità per il PIANO1

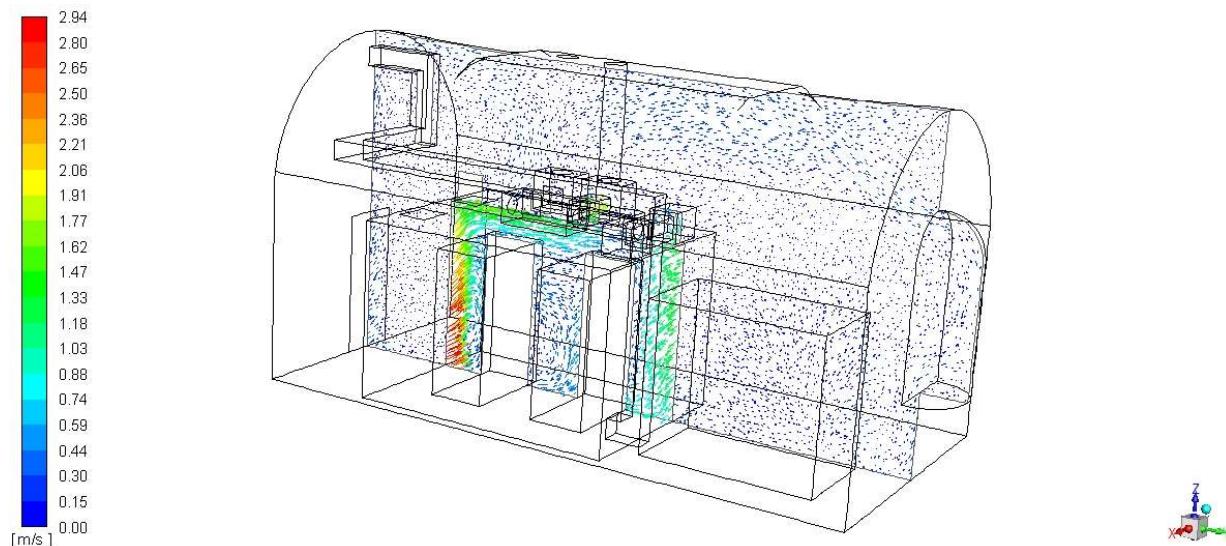


Figura 137 – Visualizzazione vettori velocità per il PIANO2

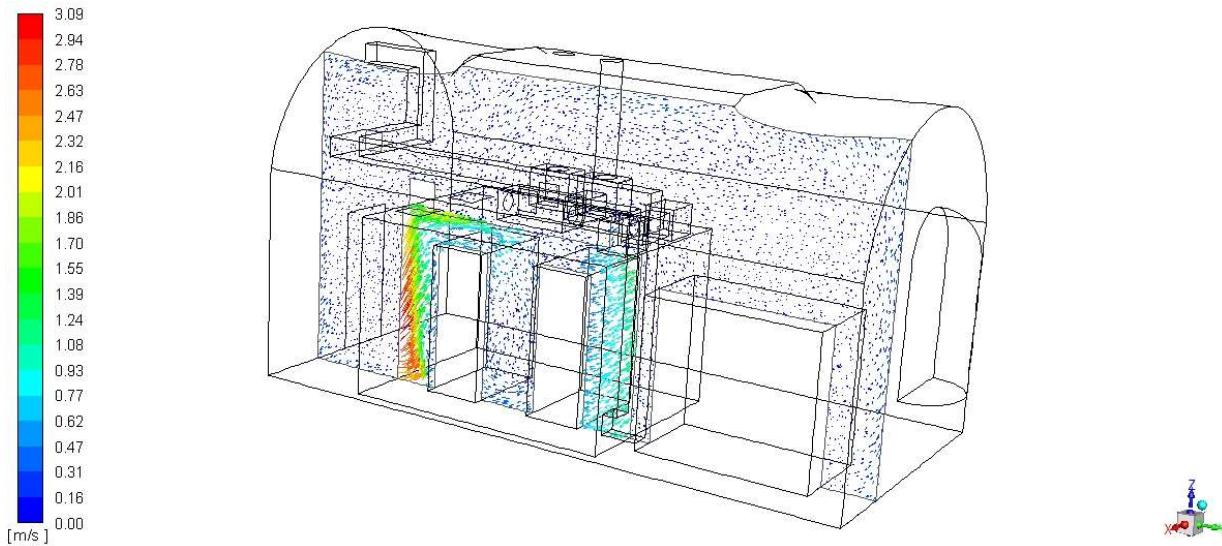


Figura 138 – Visualizzazione vettori velocità per il PIANO 3

Pathlines di velocità

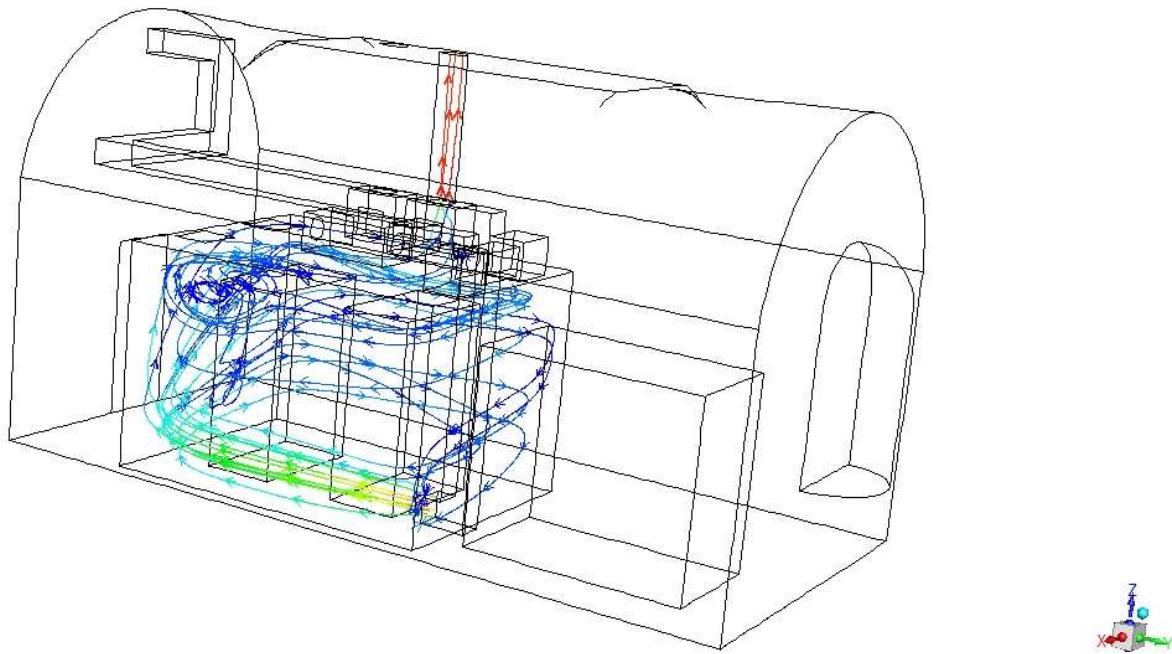


Figura 139 – Visualizzazione pathlines di velocità

Visualizzazione simulazioni termofluidodinamiche – Caso M4

Campi di temperatura

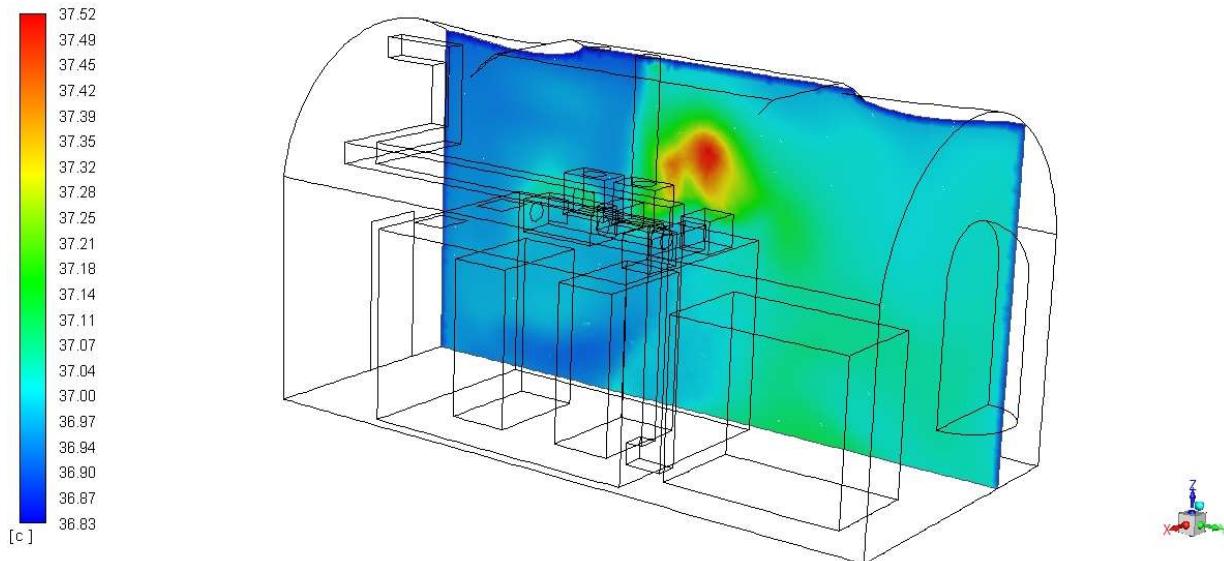


Figura 140 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO1

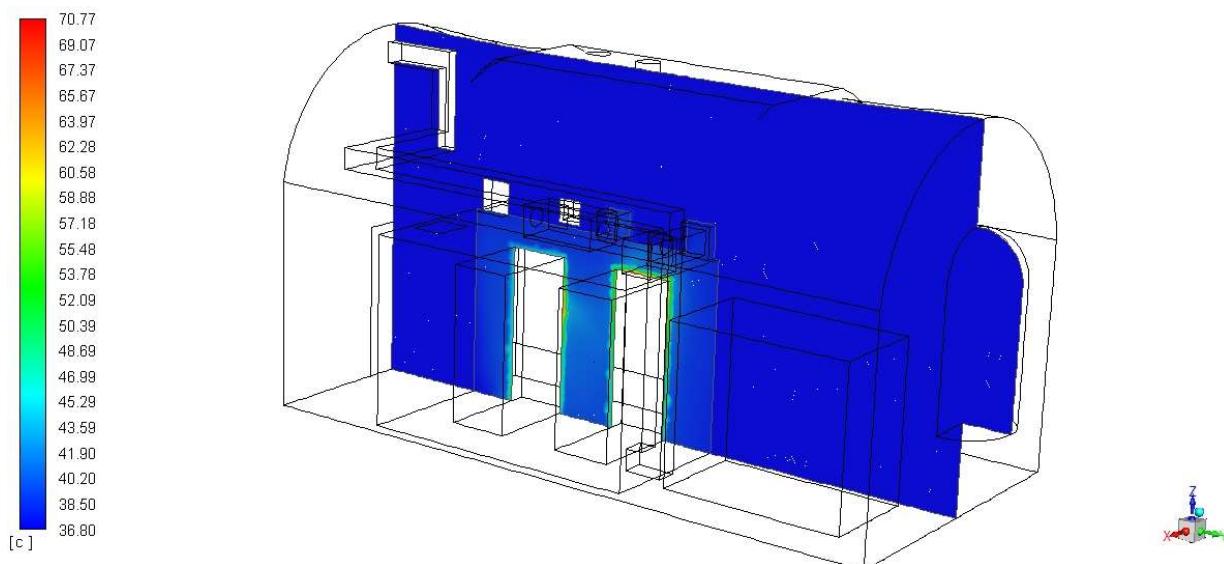


Figura 141 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO2

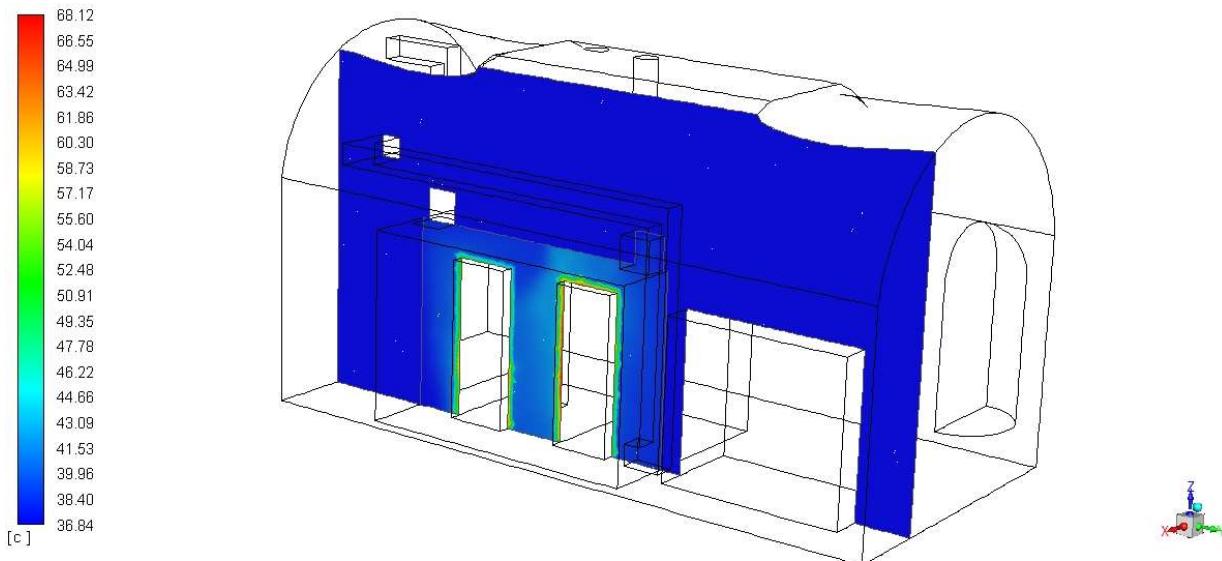


Figura 142 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO3

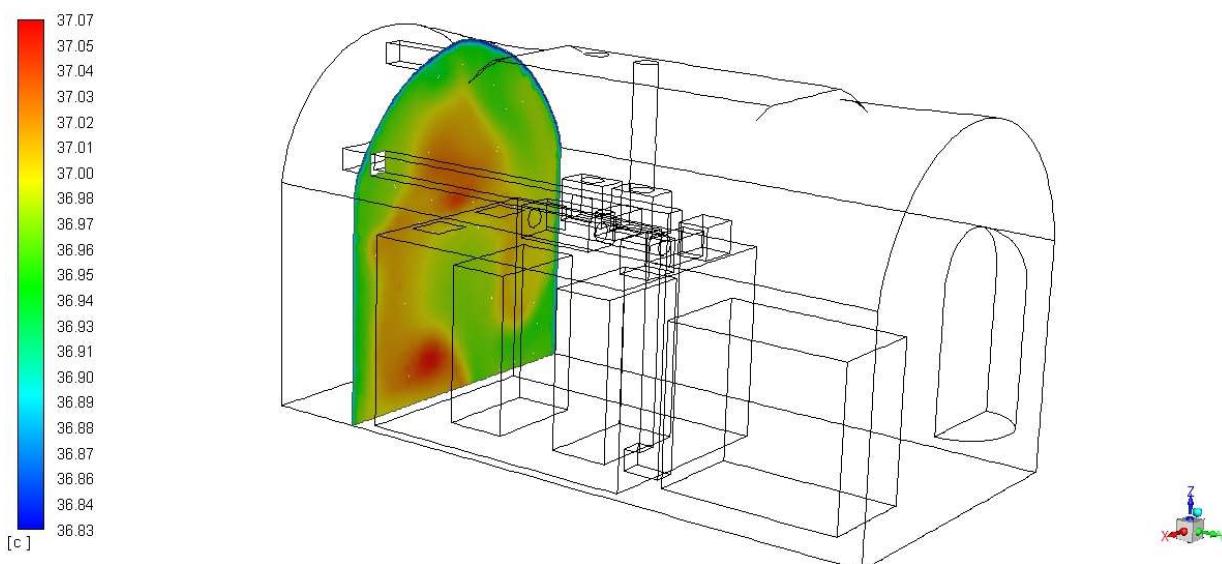


Figura 143 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO4

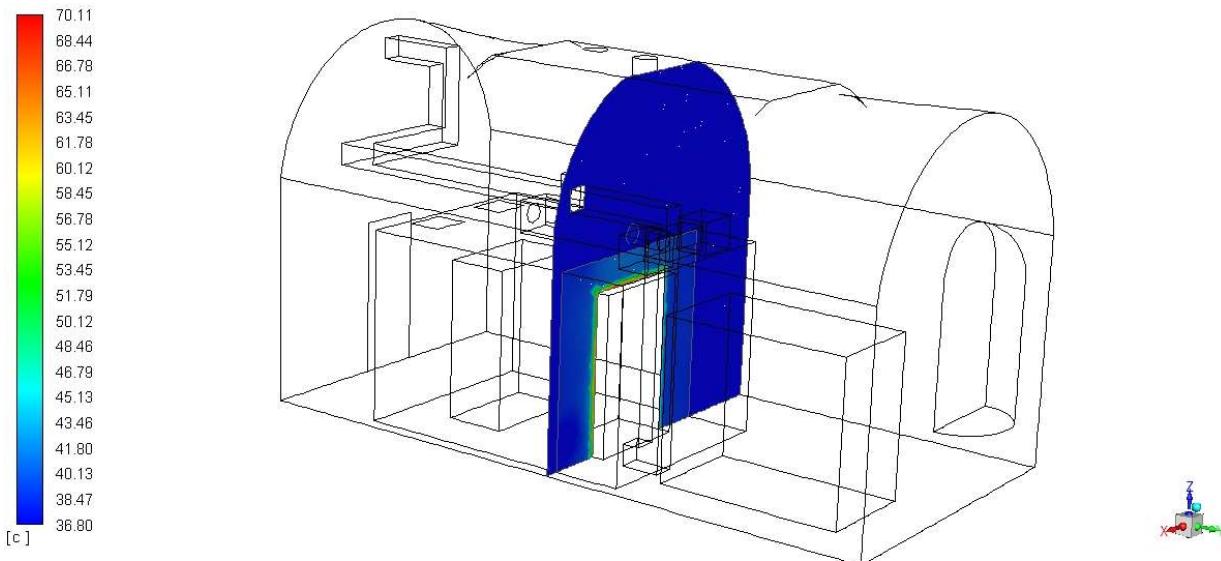


Figura 144 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO5

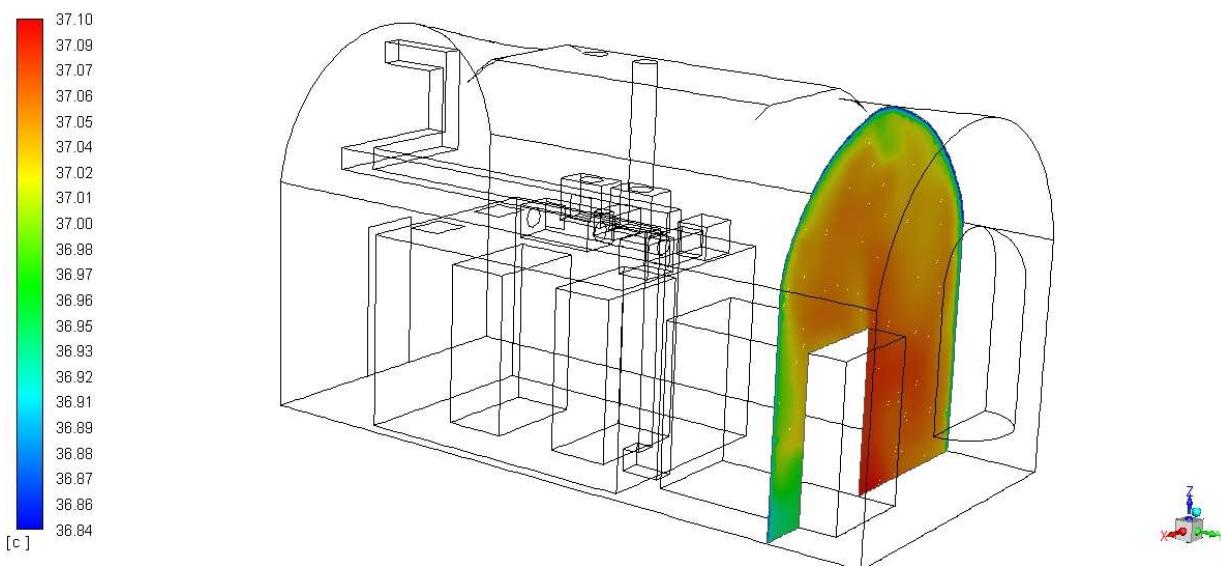


Figura 145 – Visualizzazione campo di temperatura per il PIANO6

Campi di umidità relativa

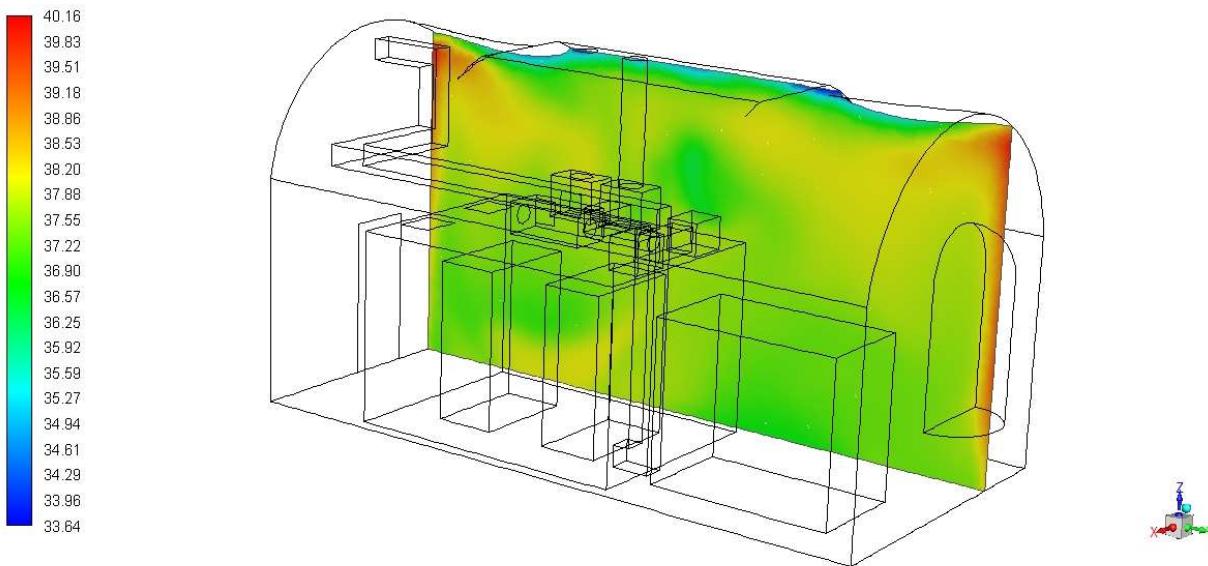


Figura 146 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO1

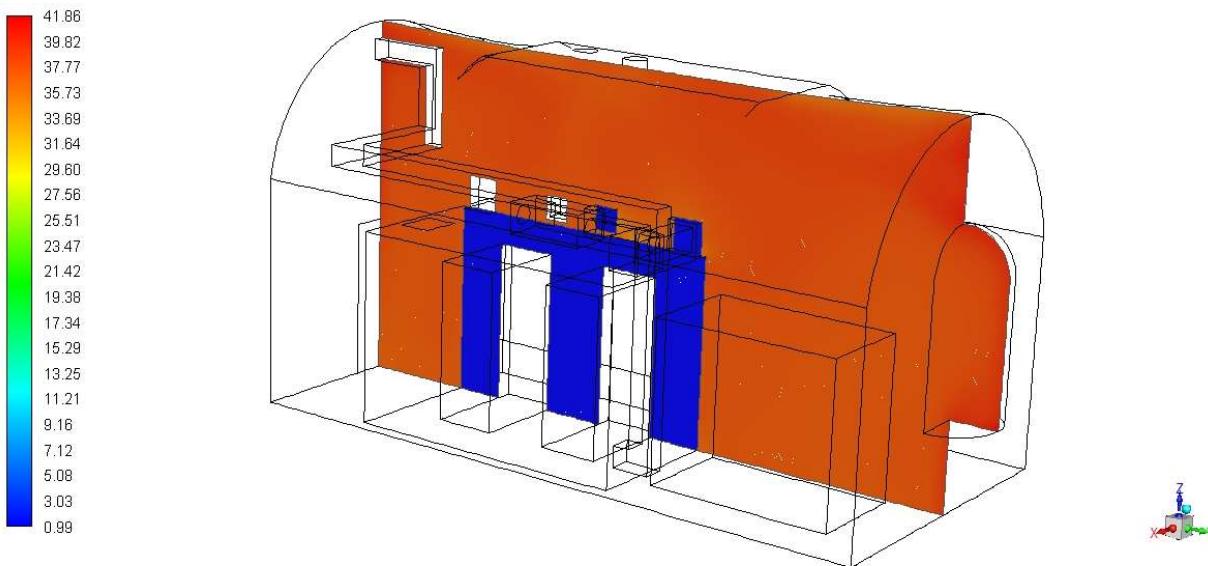


Figura 147 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO2

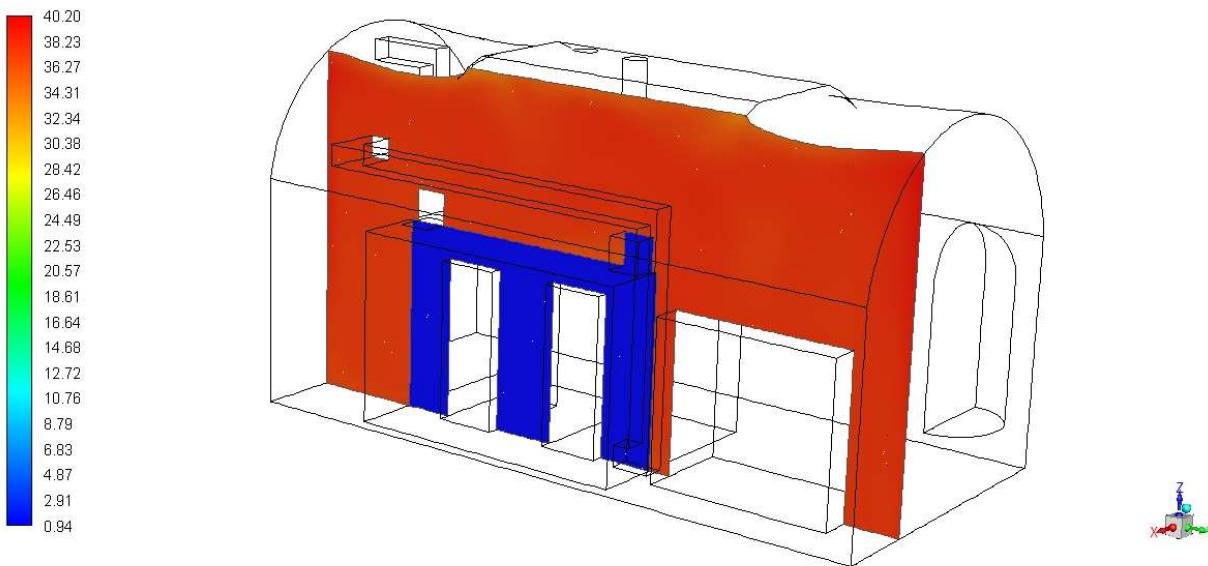


Figura 148 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO3

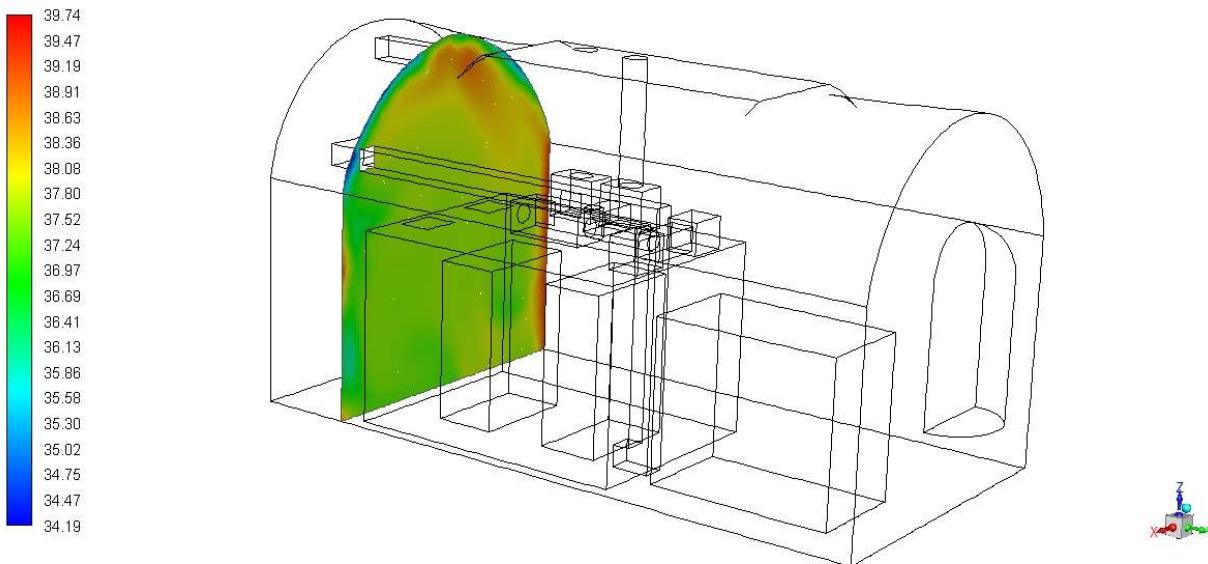


Figura 149 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO4

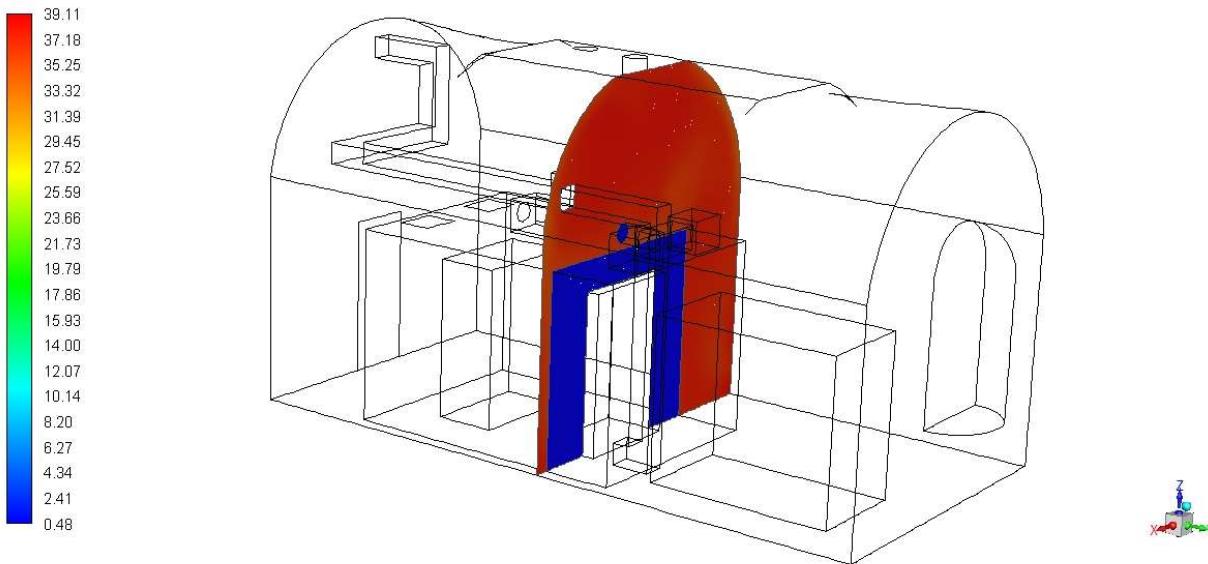


Figura 150 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO5

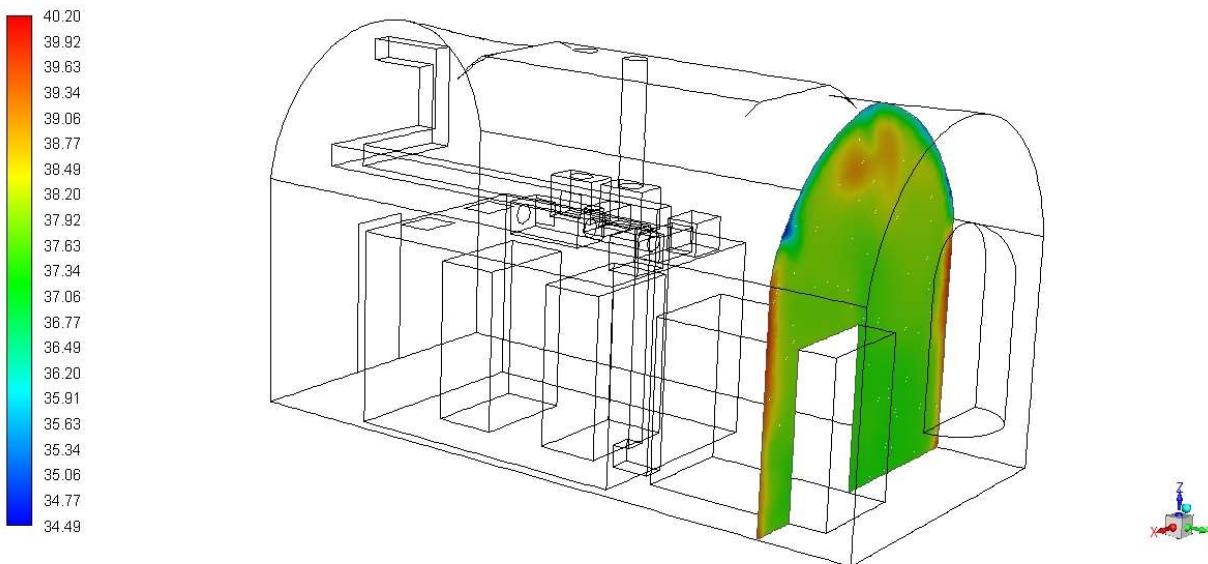


Figura 151 – Visualizzazione campo di umidità relativa per il PIANO6

Vettori velocità

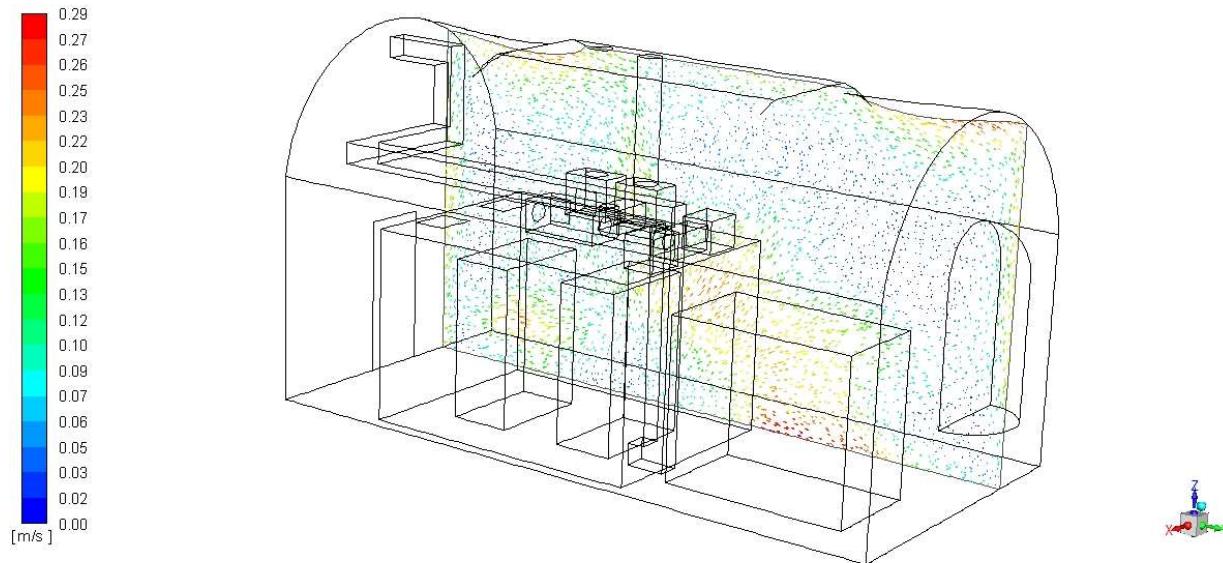


Figura 152 – Visualizzazione vettori velocità per il PIANO1

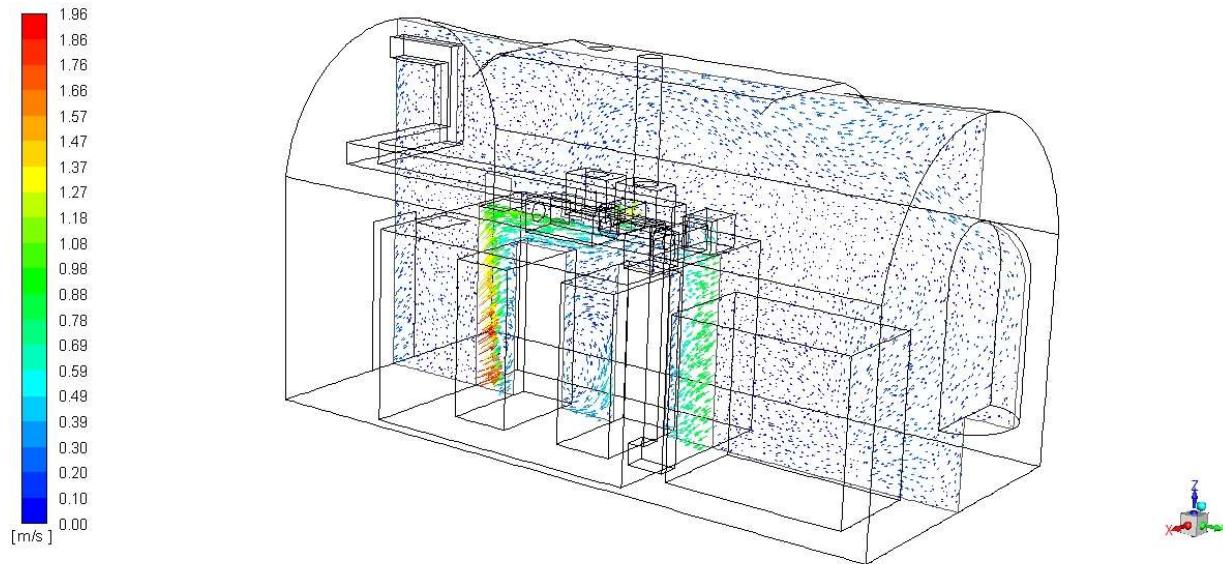


Figura 153 – Visualizzazione vettori velocità per il PIANO2

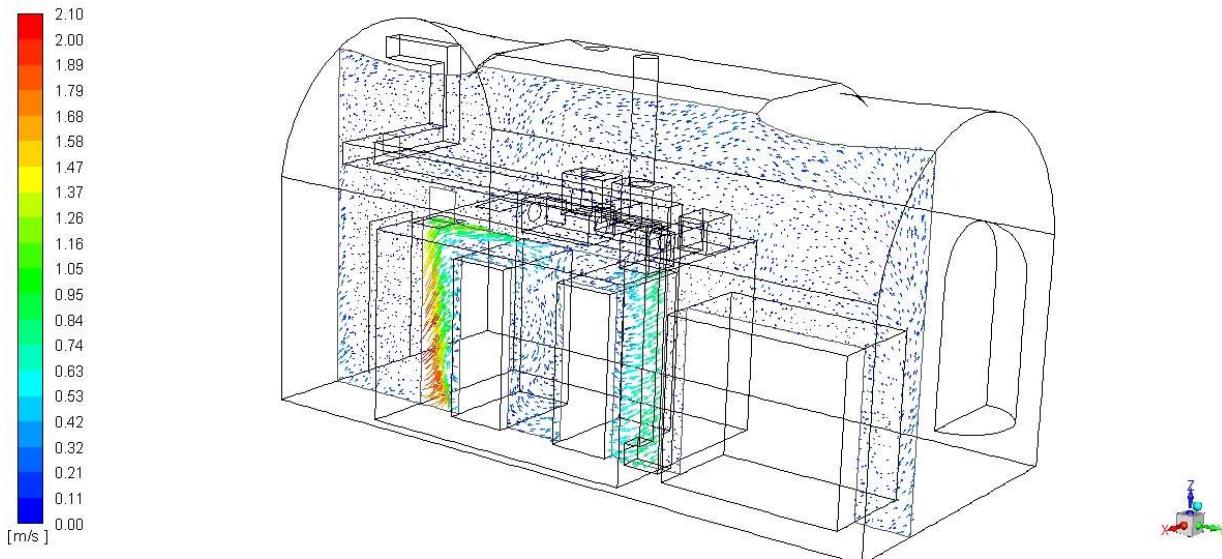


Figura 154 – Visualizzazione vettori velocità per il PIANO3

Pathlines di velocità

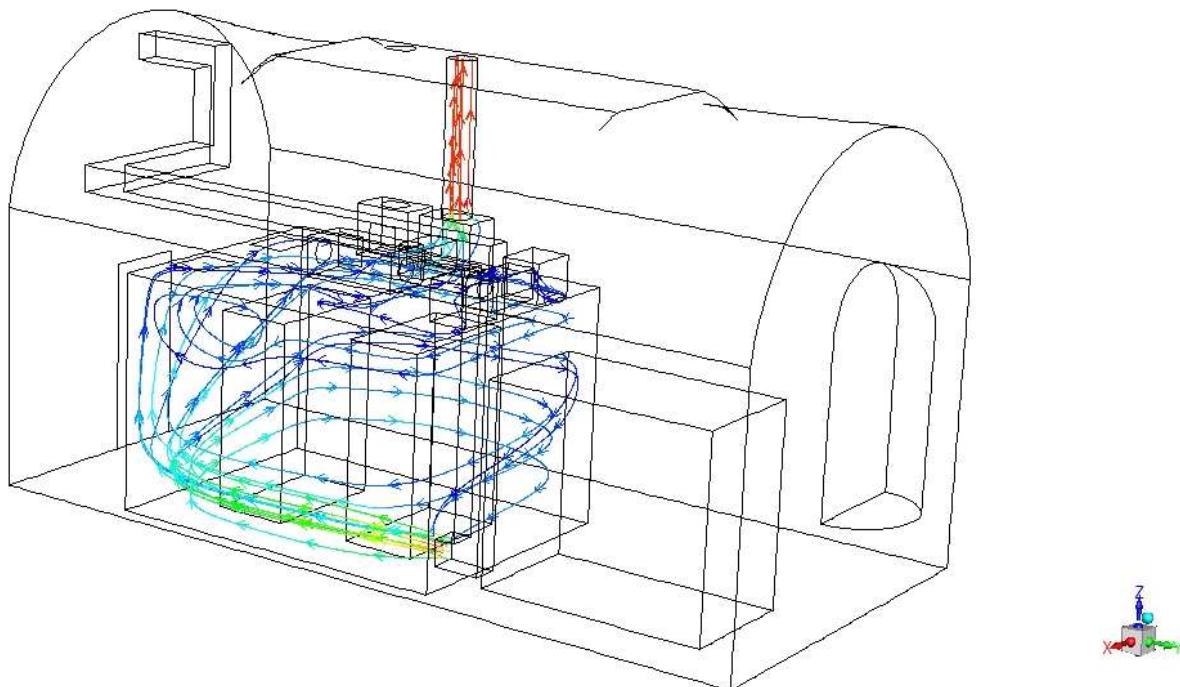


Figura 155 – Visualizzazione pathlines di velocità

ALLEGATI

Gli allegati sono forniti separatamente dalla presente relazione e sono costituiti da:

- Modello 3D: file .mtl dell'interno del Museeto
- Modello 3D: file .mtl dell'esterno del Museeto
- Dati metereologici grezzi ed elaborati: file excel
- Dati indoor sonda 66 grezzi ed elaborati: file excel
- Dati indoor sonda 72 grezzi ed elaborati: file excel
- Dati indoor sonda 84 grezzi ed elaborati: file excel

FINE DEL DOCUMENTO