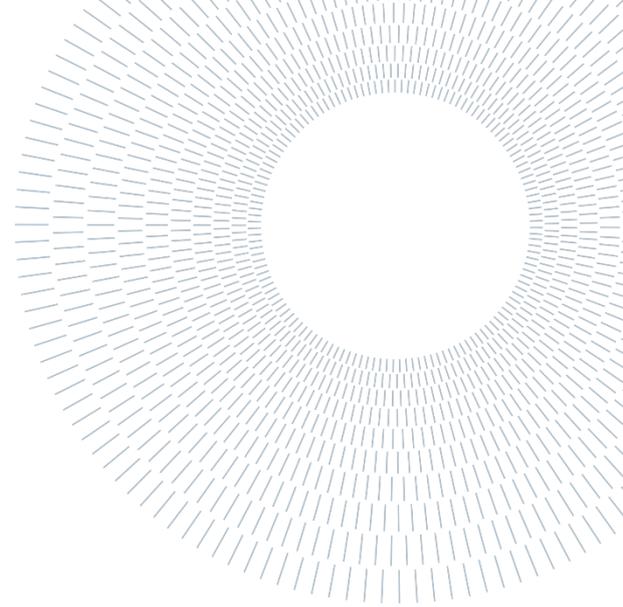




POLITECNICO
MILANO 1863

SCUOLA DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
E DELL'INFORMAZIONE



SINTESI DELLA TESI

Modellazione CFD di dispersione di gas: Heliox in U.O. Anestesia e Rianimazione Pediatrica e N₂O in U.O. Cardiochirurgia presso ASST degli Spedali Civili di Brescia

TESI MAGISTRALE IN INGEGNERIA DELLA PREVENZIONE E DELLA SICUREZZA NELL'INDUSTRIA
DI PROCESSO

AUTRICE: Aurora LAFIOSCA

RELATRICE: Prof.ssa Valentina BUSINI

CO-RELATORI: Ing. Gian Luca VIGANÓ, Dott. Matteo VERGA, Dott. Alessandro PINCIROLI

Anno Accademico: 2022-2023

1. Introduzione

Gli ospedali sono ambienti di lavoro per numerose persone, infatti risultano uno dei settori più esposti a rischio professionale, ma vi sono anche pazienti e visitatori. Pertanto, il problema della salute e della sicurezza riguarda tutti gli esposti nell'arco dell'intera giornata. L'obiettivo resta quello di individuare e caratterizzare degli scenari e fornire degli strumenti per calibrare le politiche di sicurezza negli ospedali. Nella seguente trattazione sono stati considerati gli agenti chimici quali: l'heliox, una miscela di elio e ossigeno, per la terapia respiratoria e i gas medicali che hanno la funzione di indurre l'anestesia, la quale viene attualmente praticata utilizzando protossido di azoto associato ad un anestetico alogenato, presente in ogni sala operatoria di chirurgia. La

sicurezza e la salute dei lavoratori nella sala operatoria e nell'unità di rianimazione dipendono da numerosi fattori sia ambientali che legati alle specifiche lavorazioni. Tuttavia, nell'ambiente, si può risalire alla quantità di gas erogato e alla concentrazione che derivano da essi.

1.1. Contesto di ricerca

Il lavoro di tesi si è concretizzato attraverso un'attenta ricerca presso ASST degli Spedali Civili di Brescia, rappresentato in figura 1.1, collaborando con l'Ingegneria Clinica, affiancando gli esperti dei gas medicali. Tale collaborazione, ha permesso di disporre di una visione reale, consapevole e attenta sulla complessità presente in un ambiente di lavoro così delicato e vulnerabile. Successivamente, con le nozioni e competenze acquisite, si sono modellati degli scenari di dispersione dei gas menzionati precedentemente,

2. Materiali e Metodi

Questo lavoro propone di analizzare e confrontare, attraverso la CFD (*Computational Fluid Dynamics*), degli scenari incontrati durante il tirocinio presso ASST degli Spedali Civili di Brescia. Questo lavoro ha permesso di studiare delle problematiche in un ambiente di lavoro estremamente delicato e preciso.

In funzione delle due casistiche oggetto di studio, il software utilizzato per realizzare le simulazioni di dispersione è Ansys® Fluent. Tutte le simulazioni CFD in questo lavoro sono state implementate utilizzando la versione 19.1 di Ansys®Fluent. La procedura applicata nei casi studio, tramite il software, è così definita:

- Elaborazione del progetto di studio;
- Creazione della geometria mediante la progettazione CAD (*Computer Aided Design*) e la definizione dei limiti fisici del problema, impostando il dominio da simulare (*pre-processing*);
- Suddivisione del volume occupato dal fluido in una griglia tridimensionale di celle di configurazione di elementi esaedri, tetraedri, prismatici, piramidali o poliedrici (*mesh*);
- Definizione della tipologia di simulazione (stazionaria o transitoria) dei modelli di turbolenza da utilizzare per risolvere il problema e definizione delle condizioni al contorno, ossia il comportamento e le proprietà del fluido delimitato nel dominio;
- Avvio della simulazione;
- Analisi e visualizzazione dei risultati ottenuti.

Per questo lavoro sono stati utilizzati i software ANSYS 19.1®, in particolare:

1. ANSYS® Design Modeler per l'elaborazione della geometria;
2. ANSYS® Mesher per la definizione e generazione della *mesh*;
3. ANSYS ® Fluent per il calcolo della soluzione.

Per la modellazione della dispersione dei gas medicali, è stato adottato l'approccio del diametro equivalente di Birch; in questo modo, un getto sotto espanso e comprimibile può essere modellato come se fosse un getto espanso e incompressibile [4]. Tramite questo approccio, si può determinare

una superficie equivalente che viene attraversata dallo stesso flusso di massa in uscita dall'orifizio che causa lo scenario accidentale. L'equazione impiegata è la seguente [5]:

$$\left(\frac{Dps}{D}\right)^2 = C_D \left(\frac{P_1}{P_3}\right) \left(\frac{T_3}{T_1}\right)^{0.5} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad (2.1)$$

Per simulare il getto è stato utilizzato l'approccio proposto da Birch che consente di identificare un orifizio virtuale posizionato all'inizio del getto. Questa superficie permette di mantenere le stesse caratteristiche del getto, come se fosse stato rilasciato dalla sorgente originale, minimizzando però il calcolo, riducendo al minimo il costo computazionale grazie al fatto che non è necessario calcolare il campo vicino del getto sotto espanso con un approccio comprimibile [6]. In questo modo, si ottiene un foro più grande attraversato dalla stessa portata massica, ma con una velocità del getto inferiore. L'equazione per ottenere il diametro equivalente è la seguente:

$$\left(\frac{Dps}{D}\right)^2 = \frac{C_D \rho_2 \cdot v_2}{\rho_3 \cdot v_3} \quad (2.2)$$

L'obiettivo di questa analisi è quello di definire un "pseudo-diametro" che, una volta sostituito alle equazioni che definiscono un getto libero subsonico circolare, riprodurrà il campo di concentrazione nella regione di autopreservazione di un getto supercritico [5].

2.1. Caso 1: bombola Heliox

La necessità di questo lavoro nasce dal fatto che vi è stato fatto uno studio sugli scenari di dispersione del gas inserito nel contesto della ristrutturazione dei locali della U.O. Anestesia e Rianimazione Pediatrica. Lo scopo è quello di valutare il posizionamento più adeguato di un possibile sensore di rilevazione dell'elio, in seguito alla dispersione del gas in un ambiente confinato (in questo caso specifico i sensori ossigeno, sicuramente più comuni, non risultano adeguati perché l'heliox ha la stessa composizione in ossigeno dell'aria). Di conseguenza, dalla simulazione del modello, emergono delle evidenze che permettono di individuare, a seconda delle differenti rotazioni della bombola, il posizionamento migliore per il sensore di rilevamento dell'elio.

Attraverso il software Ansys® Design Modeler, è stato possibile creare la geometria di base come si vede in figura 2.1 e 2.2:

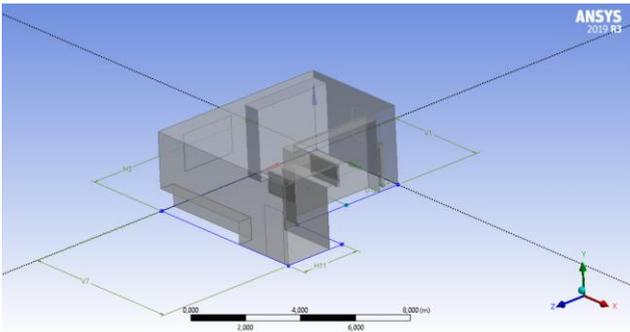


Figura 2.1: Geometria sala medici anestesisti

Nel dettaglio, la bombola di heliox è stata modellata come mostrato in figura 2.2:

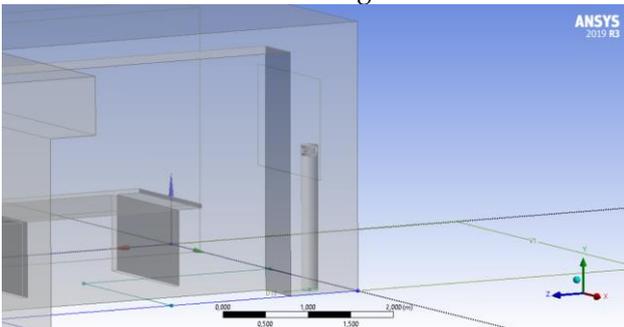


Figura 2.2: Posizione bombola di heliox

Per quanto riguarda la *mesh* impiegata nella simulazione, le dimensioni delle celle non sono uniformi, di fatto variano in base a parametri definiti durante la creazione della geometria, secondo la metodologia dei *body of influence* [6]. Il criterio pensato e disposto nella simulazione è tale che la dimensione massima delle celle nel dominio sia di 30 centimetri, mentre nelle vicinanze della bombola di heliox è stata definita una regione all'interno della quale la dimensione delle celle è minore. Inoltre, è stato utilizzato un metodo che permette di suddividere ogni faccia della geometria in almeno dieci elementi, così da garantire una corretta modellazione anche delle parti più ridotte della bombola, come si osserva in figura 2.3 e 2.4:

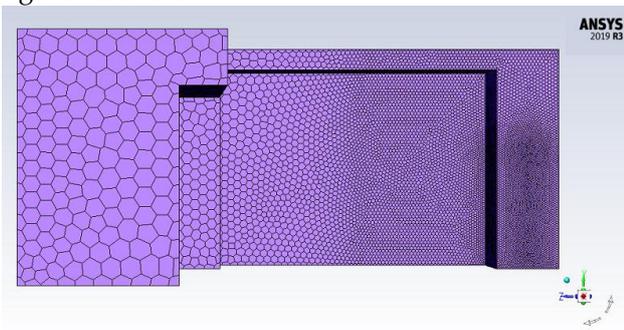


Figura 2.3: Mesh stanza piano ZY

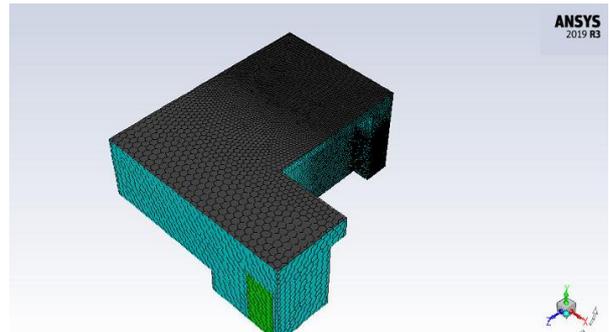


Figura 2.4: Mesh stanza in isometrica

Nella zona più fitta vi è la presenza della bombola che rappresenta la sorgente della dispersione, perciò, le celle risulteranno più piccole (vedi dimensioni nella tabella 2.1 seguente):

Tabella 2.1: Parametri caratteristici della *mesh*

	Dimensione celle [m]	Growth Rate [-]
Superficie ambiente	$3 \cdot 10^{-2}$	1,2
Zona adiacente alla bombola	$1 \cdot 10^{-2}$	1,1
Bombola	$3,5 \cdot 10^{-3}$	1,1
Foro	$1 \cdot 10^{-3}$	1,1

Come si vede, le dimensioni delle celle aumentano, man mano che ci si allontana (figura 2.5):

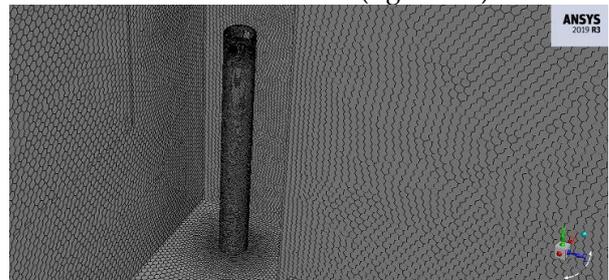


Figura 2.5: Mesh bombola

2.2. Caso 2: monitoraggio sala operatoria

La sala operatoria dell'U.O. Cardiocirurgia è parte dell'ospedale dove non sono previsti dei sistemi di monitoraggio per quanto riguarda la rilevazione del protossido d'azoto; allora, tramite Ansys® Fluent, si andrà a simulare una perdita di N₂O durante la procedura di intubazione che risulta essere una fase critica prima dell'operazione al paziente. Come sorgente della dispersione, si considera l'apparecchiatura con la quale si fornisce il gas per l'anestesia. Lo scopo è quello di fornire

alla struttura ospedaliera delle strategie per il controllo e sottolineare l'importanza dei sensori di monitoraggio in un locale molto delicato, quale la sala operatoria, con la possibilità di studiare e analizzare l'andamento e il comportamento della dispersione della concentrazione del gas, in seguito a una possibile rottura della cannula e/o maschera. Come il caso precedente, si è creata la struttura di base della sala operatoria rappresentata nella figura 2.6, in cui personale ospedaliero e paziente sul lettino operatorio sono stati rappresentati attraverso forme cilindriche:

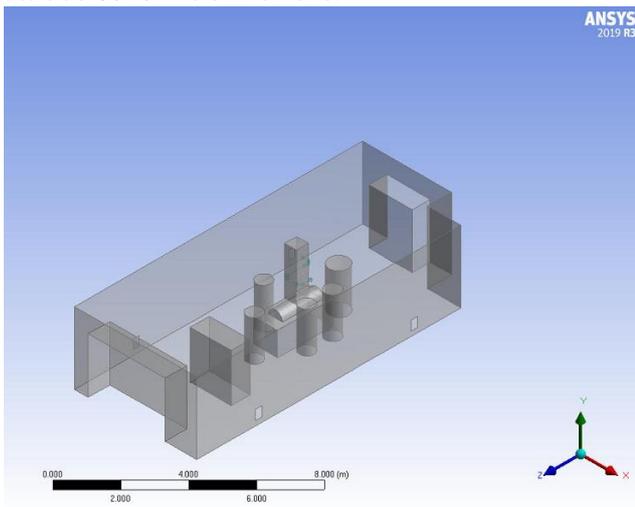


Figura 2.6: Geometria sala operatoria

Nel dettaglio di figura 2.7 è riportata la geometria con la quale si è schematizzata la cannula per la somministrazione del gas anestetico, che risulta essere la sorgente per questo secondo caso studio:

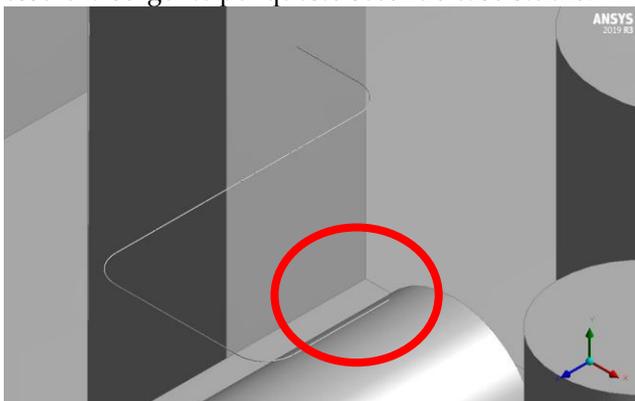


Figura 2.7: Raccordo cannula

In figura 2.8 e 2.9 è possibile vedere la *mesh* dell'intero dominio e della sorgente, considerando sempre lo stesso concetto descritto per il caso precedente:

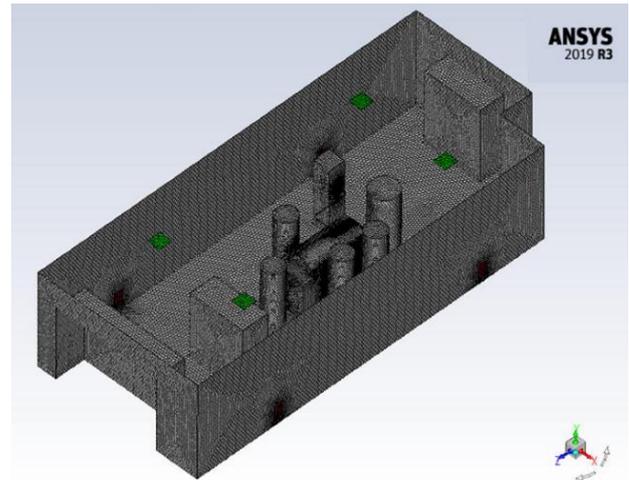


Figura 2.8: Mesh sala operatoria in isometrica

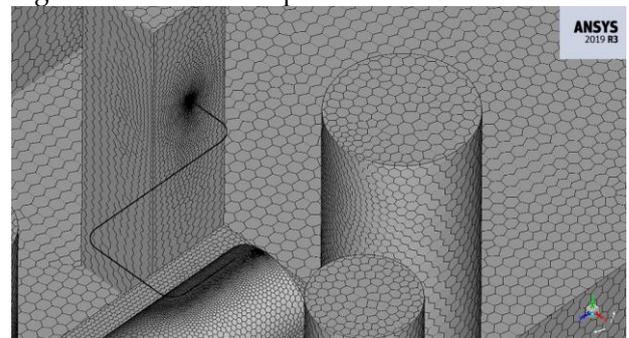


Figura 2.9: Mesh raccordo apparecchiatura-cannula-paziente

Per questo caso studio è stato necessario ricorrere alla *mesh* di tipo "poly-hexcore" permette di ridurre il numero di celle del 15% rispetto a una *mesh* classica poliedrica. La scelta è stata dettata dal fatto che la sala operatoria costituisce un ambiente più grande rispetto a quello analizzato nel caso studio 1 e utilizzando lo stesso criterio di creazione della *mesh* il processo di calcolo sarebbe stato troppo oneroso da un punto di vista computazionale. Nella zona di interesse, ovvero sia quella rappresentata dal raccordo, la *mesh* risulterà più fitta per lo stesso motivo discusso precedentemente.

3. Risultati e discussioni

Le intenzioni, di queste simulazioni, sono finalizzate a dare un tornaconto a livello pratico, guidando il dimensionamento con caratteri tecnici e allo stesso tempo mantenere i requisiti sulla sicurezza.

3.1. Heliox

Per quanto concerne la simulazione del gas heliox in U.O. Anestesia e Rianimazione Pediatrica, le

criticità sono state quello di aver individuato uno stoccaggio non idoneo per la bombola e la scelta di voler posizionare un sensore di ossigeno per monitorare la percentuale di O₂ in caso di perdita o di danneggiamento della bombola, il che risulterebbe senza senso perché l'ossigeno presente nella bombola ha la stessa frazione molare dell'ossigeno contenuto nell'aria.

Con la CFD a disposizione, si è simulato e poi analizzato un getto ad alta pressione in un ambiente confinato per andare a studiare il suo comportamento e, successivamente, il posizionamento corretto del sensore di elio.

Inoltre, per individuare il punto migliore e strategico per la rilevazione della perdita di elio, oltre a distinguere se le finestre fossero chiuse e/o aperte, si sono simulati diversi casi di rotazione della bombola. Per fare questo, il getto della dispersione cambia e si disperde a seconda della configurazione della stanza.

Le diverse casistiche sono riassunte in tabella 3.1:

Caso con le finestre aperte	
Posizione 1	Orientamento a 0°
Posizione 2	Orientamento 90°
Posizione 3	Orientamento 180°
Posizione 4	Orientamento 270°
Caso con le finestre chiuse	
Posizione 1	Orientamento a 0°
Posizione 2	Orientamento 90°
Posizione 3	Orientamento 180°
Posizione 4	Orientamento 270°

L'orientamento a 0° è la convenzione che è stata utilizzata valutando la bombola nella posizione stoccata, ovvero con il foro verso il tavolo. Si riporta il caso con l'orientamento a 0° sia in caso di finestre aperte, sia in caso di finestre chiuse (figure 3.1 e 3.2):

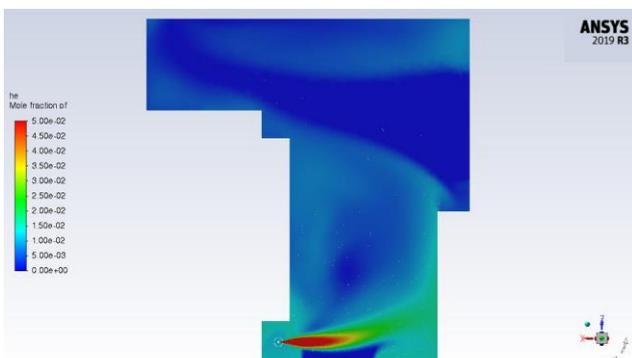


Figura 3.1: Bombola in posizione 1 finestre aperte

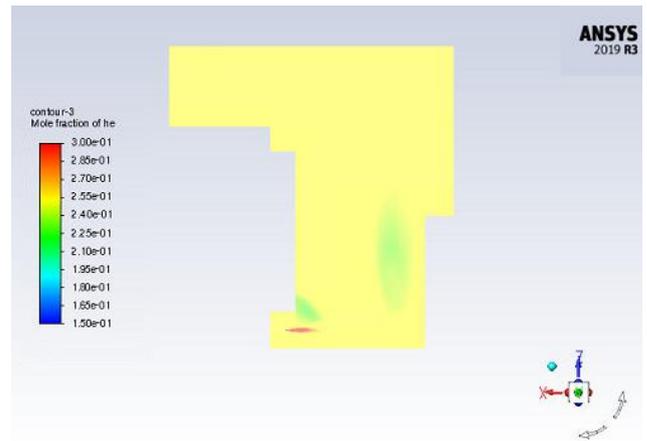


Figura 3.2: Bombola in posizione 1 finestre chiuse

Dalle diverse simulazioni, si evidenzia che la soluzione migliore dove posizionare i sensori di elio sono illustrati in figura 3.3:

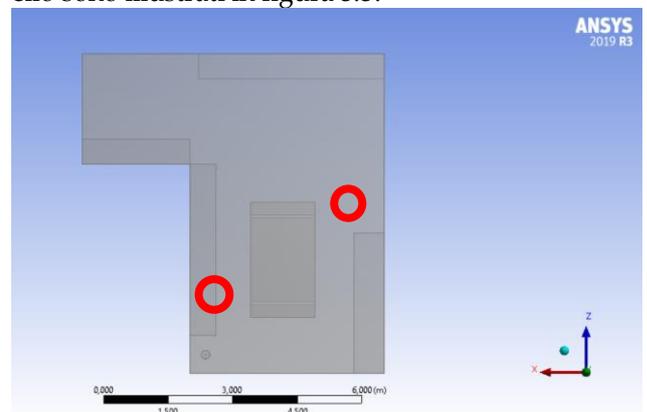


Figura 3.3: Posizionamento sperimentale del rilevatore di elio

3.2. N₂O

Per quanto riguarda la simulazione per i gas anestetici nella sala operatoria in U.O. Cardiochirurgia, la simulazione permetterà di analizzare il comportamento del gas al fine di vedere come si disperde nella sala operatoria; esso rappresenta un valore aggiunto valutando che già una ditta esterna appaltatrice si occupa del monitoraggio. Però nella sala operatoria di interesse, la ditta non ha predisposto i sensori di monitoraggio del protossido di azoto e quindi questo sistema dovrà essere implementato. È stata fatta questa simulazione per convalidare "sperimentalmente" la dispersione e la validità della posizione dei sensori adottata nelle altre U.O. Analizzando il caso peggiore, ossia quello ad alto flusso: la figura 3.4 mostra come, in regime stazionario, si disperde il protossido d'azoto. Per rendere più conservativa la simulazione si è usato il valore limite della concentrazione ammissibile

per legge, questo per considerare anche il caso peggiorativo, ovvero una concentrazione di 50 ppm.

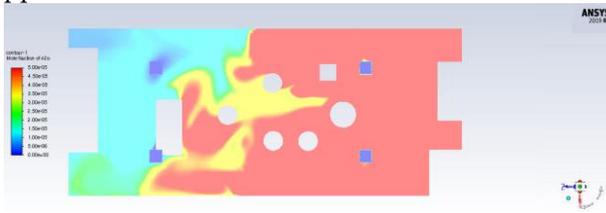


Figura 3.4: Visualizzazione piano ZX della concentrazione ad alto flusso

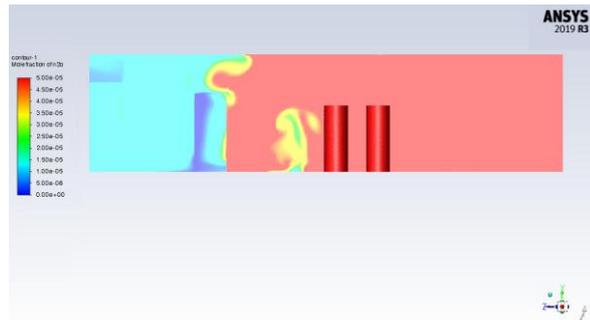


Figura 3.5: Visualizzazione piano YZ della concentrazione ad alto flusso

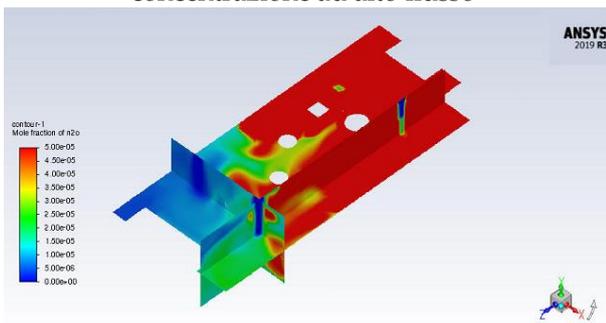


Figura 3.6: Andamento concentrazione isometrica ad alti flussi

Analizzando invece il secondo caso, quello con il flusso minimo: in figura 3.6 è riportata l'iso-surface di 50 ppm del protossido d'azoto.

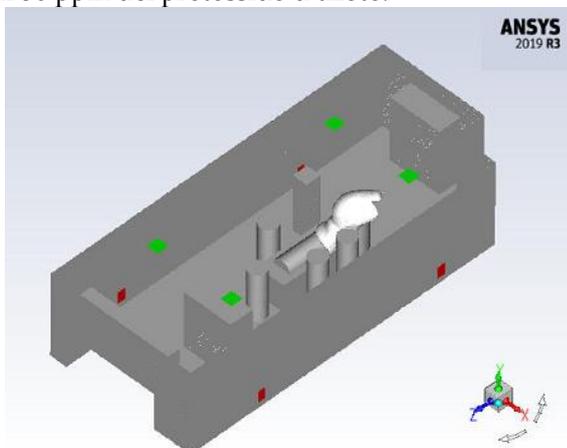


Figura 3.7: Comportamento della concentrazione di N_2O a flussi minimi

4. Conclusioni

Questo lavoro di tesi ha permesso di dare importanti suggerimenti sulla posizione di sensori specifici in ambito ospedaliero. Dei possibili sviluppi futuri, correlati a questo lavoro di tesi, potranno essere: l'analisi di dispersione della concentrazione di un altro gas anestetico, ossia isoflurano perché è utilizzato tanto durante la procedura anestesiológica; ma si potrebbero analizzare anche i possibili valori di esposizione professionale legati a un monitoraggio biologico in seguito a un'esposizione da gas anestetico. Si potrebbe studiare uno scenario sempre con l'helióx, ma in reparti o luoghi diversi e soprattutto con un pacco bombole e non solo con una singola bombola per analizzare gli scenari plausibili nel locale di stoccaggio.

Bibliografia

- [1] G. Viganò «Ingegneria Clinica agli Spedali Civili di Brescia» presentazione 2022.
- [2] James D. McGlothlin, John E. Moening, Sandra S. Cole «Evaluation and control of waste anesthetic gases in the PostAnesthesia Care Unit (PACU)» Journal of PeriAnesthesia Nursing, 2014.
- [3] E. Franquet, V. Perrier, S. Gibout and B. Pascal «Free underexpanded jets in a quiescent medium» A Review. Progress in Aerospace Sciences, 2015.
- [4] R. Rota e G. Nano «Introduzione alla Affidabilità e Sicurezza nell'Industria di Processo» 2007.
- [5] A. D. Birch, D. R. Brown, M. G. Dodson and F. Swaeld «The structure and concentration decay of high pressure jets of natural gas» Combustion Science and Technology, vol. 36, pp. 249-261, 1983.
- [6] A. Pincioli, L. Rubbuano «Square-shaped obstacle influence on high-pressure jet: a CFD study» Master's thesis, Politecnico di Milano, 2021.