

**ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITA' DI BOLOGNA**

SCUOLA DI INGENERIA E ARCHITETTURA  
Sede di Bologna

CORSO DI LAUREA  
IN INGEGNERIA MECCANICA  
Classe L-9 INGEGNERIA INDUSTRIALE (0927)

ELABORATO FINALE DI LAUREA

In: Disegno Tecnico Assistito Dal Calcolatore

**Studio ed ottimizzazione di un sistema di  
raffreddamento per un elicottero diesel**

CANDIDATO

Lorenzo Pompei

RELATORE

Prof. Luca Piancastelli

Anno Accademico 2014/2015

Sessione II



# Indice

## **Capitolo 1 – Introduzione**

- 1.1 Riassunto introduttivo
- 1.2 Articoli di rilievo della bibliografia
- 1.3 Descrizione del progetto
- 1.4 Carattere d'innovatività del progetto
- 1.5 Obiettivi

## **Capitolo 2 – Eurocopter EC 120 Colibrì**

- 2.1 Generalità
- 2.2 Scheda tecnica

## **Capitolo 3 – Confronto tra motore a turboalbero e motore diesel**

- 3.1 Motore a turboalbero
- 3.2 Motore diesel
- 3.3 Considerazioni sui propulsori

## **Capitolo 4 – L'impianto di raffreddamento**

- 4.1 Generalità sull'impianto di raffreddamento
- 4.2 Il radiatore
- 4.3 L'exhaust augmenter
- 4.4 Cofano motore

## **Capitolo 5 – Simulazioni di flusso**

- 5.1 Generalità sulle simulazioni
- 5.2 Simulazioni di flusso exhaust augmenter
- 5.3 Simulazioni di flusso elicottero

## **Capitolo 6 – Proposte di soluzione**

- 6.1 Analisi del problema
- 6.2 Ipotesi di soluzione 1
- 6.3 Ipotesi di soluzione 2

## **Capitolo 7 – Conclusioni**

- 7.1 Considerazioni sui materiali
- 7.2 Conclusioni

# Capitolo 1 - Introduzione

## 1.1 Riassunto introduttivo

In questo elaborato di tesi verrà trattato il raffreddamento della rimotorizzazione di un elicottero, passando da una propulsione a turbina ad una diesel. Nel corso del progetto verranno affrontate diverse problematiche, ma ci occuperemo principalmente del metodo con cui fornire un adeguato raffreddamento al motore, tenendo in considerazione gli aspetti salienti di questo tipo di utilizzo, dimensionando e disegnando i vari componenti dell'impianto di raffreddamento. Passeremo poi alla verifica del funzionamento dell'impianto servendoci del simulatore di flusso disponibile nel programma di modellazione solida utilizzato anche per il disegno dei componenti. In base alle simulazioni verrà poi valutata l'efficienza o meno dell'impianto così ottenuto.

## 1.2 Articoli di rilievo della bibliografia

Al fine di sviluppare l'argomento trattato, ho cercato, innanzitutto, di approfondire la mia conoscenza di base affrontando la lettura dell'articolo intitolato "Cooling Systems with Exhaust Augmenters", di Daniel R. Nicoson, dal quale ho potuto trarre alcuni spunti necessari allo sviluppo del progetto. Ho ulteriormente approfondito il tema consultando diversi report NACA, tramite i

quali ho acquisito le conoscenze relative alle forme dei condotti, i diversi profili delle pale dei velivoli e tutto ciò che potesse essere necessario per il dimensionamento di un Exhaust Augmenter adatto alle mie esigenze, con i relativi metodi di verifica del condotto. Uno dei report di maggiore interesse è sicuramente il “NACA Report No. 818” dal titolo “An experimental investigation of rectangular exhaust-gas ejectors applicable for engine cooling”, nel quale sono esposte le varie tipologie di Exhaust Augmenter, prendendo in esame la posizione dello scarico rispetto alla sezione di miscelazione, le dimensioni delle sezioni, la loro lunghezza e gli angoli di convergenza e divergenza delle sezioni. Viene anche trattato l’utilizzo di più di un Exhaust Augmenter in cascata, argomento che non verrà da noi preso in considerazione per motivi di spazio e peso.

### **1.3 Descrizione del progetto**

Uno dei problemi maggiori riscontrati nell’applicazione di un motore diesel su un elicottero è stato il raffreddamento del motore. Infatti nella fase di decollo avremo la condizione più gravosa per il motore, poiché questo sarà al massimo regime di giri per permetterne il decollo, ma l’apporto di aria attraverso il radiatore sarà praticamente nullo, essendo l’elicottero fermo.

Questo tipo di problema potrebbe essere risolto applicando delle ventole che generino un flusso d’aria attraverso il radiatore, garantendo un adeguato raffreddamento, ma questo comporterebbe una diminuzione della potenza disponibile per il decollo ed un’inutile aggiunta di peso. Quindi, per le motivazioni sopra citate, è stato preso in considerazione lo sfruttamento dei gas di scarico per movimentare una quantità di aria attraverso il radiatore, tramite un Exhaust Augmenter. Un Exhaust Augmenter è un condotto con determinate

dimensioni, che consente di sfruttare l'energia dei gas di scarico per movimentare aria dalla sezione circostante lo scarico verso una sezione di miscelazione.

Per sviluppare questo progetto partirò dall'analisi dell'elicottero in questione e sceglierò un motore in grado di fornire una potenza adeguata alle mie esigenze, per poi passare a risolvere le problematiche legate all'utilizzo di questo tipo di motorizzazione in questo ambito. Dimensionerò quindi il diametro dello scarico, il radiatore, le prese d'aria e poi l'Exhaust Augmenter, basandomi sui report NACA e l'articolo di Nicoson. Una volta dimensionati gli elementi necessari, procederò con la simulazione di flusso dell'Exhaust Augmenter assemblato, tramite un programma di modellazione solida. Una volta trovate le condizioni migliori passerò alla simulazione di flusso dell'elicottero completo, per verificare che questo garantisca un adeguato raffreddamento al motore sia in fase di decollo che in fase di crociera.

Per questo progetto si è inizialmente preso in considerazione un possibile disaccoppiamento di un motore v8, passando a due bancate composte ognuna da 4 cilindri in linea, sfruttando solamente circa 400 cv. Si è poi deciso di utilizzare un solo motore. Il motore da noi utilizzato sarà un motore fiat 1900 JTD 8 valvole 4 cilindri in linea modificato, dal quale si riescono comunque ad ottenere circa 400cv. I dati specifici del motore verranno poi illustrati nei capitoli seguenti.

L'elicottero che verrà preso in considerazione è un Eurocopter EC 120.

## 1.4 Carattere d'innovatività del progetto

Attualmente quasi la totalità degli elicotteri è movimentata da un motore turbo-albero. Questo genere di motorizzazione presenta diversi vantaggi, come l'elevato rapporto potenza/peso, ma anche alcuni svantaggi, quali: la scarsa reperibilità del combustibile, l'impiego di un combustibile facilmente infiammabile e l'elevato consumo di combustibile. Al giorno d'oggi il funzionamento orario di un elicottero di piccola taglia è fortemente influenzato dal prezzo del combustibile, in quanto può subire forti variazioni nell'arco di un breve periodo di tempo; questa è la motivazione che ha spinto diverse case produttrici ad avvicinarsi al motore diesel. Il risparmio di combustibile utilizzando un motore diesel di ultima generazione sarebbe di circa il 40% rispetto ad un motore a turbo-albero. Un minore consumo di combustibile implica la necessità di caricare meno combustibile a parità di tratto di volo e quindi un risparmio di peso. Un altro fattore che trae vantaggio dall'utilizzo del diesel è la sicurezza. Infatti il pericolo d'incendio è molto frequente negli incidenti aerei. È da tenere in considerazione anche la vastissima diffusione del diesel che ne garantisce una facile reperibilità.

Ovviamente l'utilizzo di un motore diesel ha anche degli svantaggi. Il primo tentativo di motorizzazione diesel su elicottero è stato fatto nel 1928, ma la tecnologia presente in quei tempi non era sufficiente per garantire un rapporto potenza/peso accettabile della motorizzazione. L'avvento dell'elettronica e dei materiali compositi ha permesso di migliorare notevolmente le prestazioni ed il peso dei motori diesel, rendendoli oggi adatti anche ad un utilizzo aeronautico.

## **1.5 Obiettivi**

L'obiettivo principale della tesi è, come sopra indicato, lo sviluppo di un impianto di raffreddamento adeguato alla motorizzazione scelta, in grado di garantire il raffreddamento del motore nelle condizioni più gravose, ossia nelle fasi di inattività a terra, nella fase di decollo e nella fase di crociera.

# Capitolo 2 - Eurocopter EC 120 Colibrì

## 2.1 Generalità

L'EC 120 Colibrì, in italiano colibrì, è un elicottero prodotto dalla ditta francese Eurocopter. È un leggero modello monoturbina da turismo, a cinque posti e con rotore tripala, utilizzato anche come addestratore.

L'EC 120 Colibrì è dotato di un rotore Spheriflex a tre pale semirigide e di un sistema antirotazione Fenestron in luogo del tradizionale rotore di coda controrotante. La struttura è realizzata in lega leggera e materiale composito ed è dotata di un'ampia finestratura in plexiglas; la cabina di pilotaggio è composta da due posti affiancati anteriori a doppi controlli più tre posti posteriori su due file. Posteriormente invece la trave di coda è realizzata in honeycomb mentre gli stabilizzatori orizzontali e la struttura del fenestron sono realizzati interamente in fibra di carbonio. La versione prevede un paio di pattini di atterraggio in struttura tubolare. Queste caratteristiche, aggiunte ai molteplici accessori disponibili, fanno diventare l'EC 120 Colibrì, oltre che un mezzo privato da turismo, un eccellente candidato per l'utilizzo come pattugliatore urbano per forze di polizia, come elisoccorso e come addestratore, sia in ambito civile che militare.

Ne vengono prodotte svariate versioni:

- P 120: designazione originale assegnata al progetto durante lo sviluppo
- EC 120 Colibrì: designazione standard di produzione in serie
- HC 120: versione da addestramento prodotta su licenza dalla Harbin Aviation Industries (Group) Ltd (HAI)



*Figura 2.1 – Eurocopter EC 120 Colibrì*

## 2.2 Scheda tecnica

<b>Altezza</b>	3,4 m
<b>Lunghezza</b>	9,6 m
<b>Diametro rotore</b>	10,0 m
<b>Peso a vuoto</b>	991 kg
<b>Peso max decollo</b>	1715 kg

<b>Motore</b>	1 turbina Turbomeca Arrius 2F
<b>Potenza</b>	376 kW
<b>Velocità max</b>	278 km/h
<b>Velocità di crociera</b>	237 km/h
<b>Autonomia</b>	710 km
<b>Tangenza</b>	4267 m

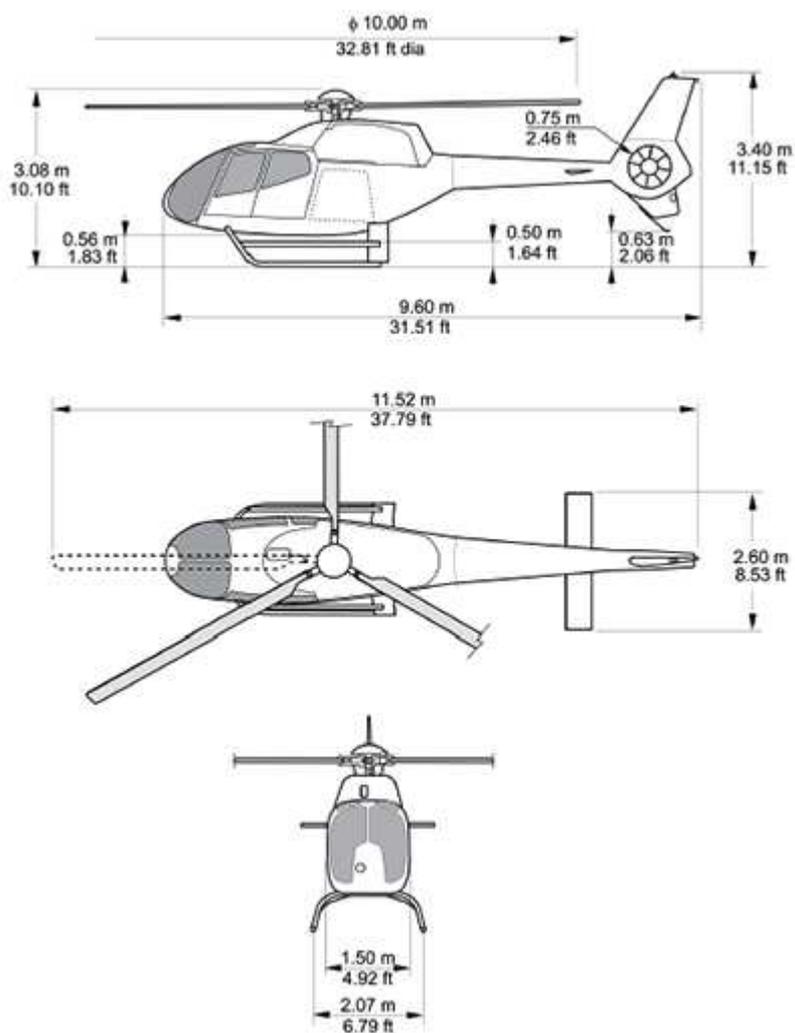


Figura 2. Ingombro Eurocopter EC 120

## **Capitolo 3 – Confronto tra motore a turboalbero e motore diesel**

### **3.1 Motore a turboalbero**

Come precedentemente citato, il motore applicato sul EC 120 colibrì è l'Arrius della TURBOMECA nella versione 2F. I motori Arrius coprono un range di potenza che va dai 450 ai 750 HP; queste cifre si riferiscono alla propulsione a singola e doppia turbina, propulsioni destinate ad elicotteri con un peso compreso tra le 1,5 e le 3,2 tonnellate. Il gruppo propulsivo è semplice e robusto, studiato per avere una manutenzione semplice da eseguire ogni 3000-4000 ore di volo. Ogni turbina è composta da un compressore centrifugo a singolo stadio, una turbina a singolo stadio ed una turbina di potenza. Questo motore viene montato su numerosi elicotteri leggeri, tra i quali possiamo annoverare l'EC135 (Arrius 2B2Plus) e sull'EC120 (Arrius 2F). In particolare l'Arrius 2F è stato progettato specificamente per l'EC120.

Il produttore dichiara che la potenza massima sviluppabile in continuo da tale motore è di 336 kW a 6000 rpm, mentre la potenza di decollo si attesta su i 376 kW. Queste misurazioni sono riferite a livello del mare ed in atmosfera ISA (International Standard Atmosphere). In ultimo, il peso complessivo del motore è di 103.5 kg.

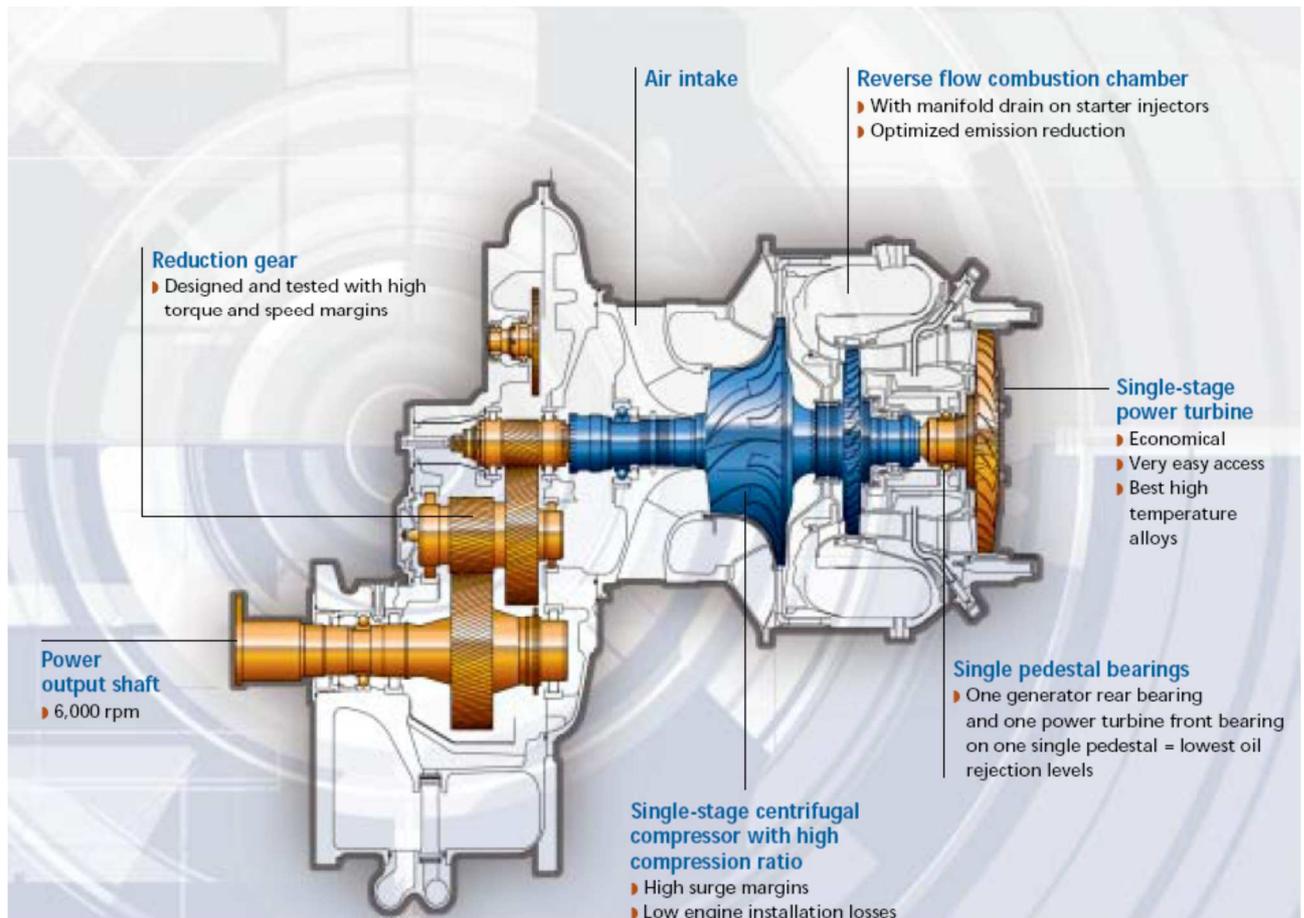


Immagine 3.1 – Schema Arrius 2F.

## 3.2 Motore diesel

Il motore che considereremo in luogo dell'Arrius 2F è il 1900 jtd di produzione FIAT. Questo motore nasce nel 1996 e prende il posto dell'ormai obsoleto 1900 turbodiesel a precamera. Il motore 1900 jtd della FIAT nasce con l'albero motore in ghisa grigia, una testa a 8 valvole per una potenza massima di 105 HP (1996). Durante lo sviluppo, l'albero motore viene costruito con acciai via via sempre più performanti e con geometrie notevolmente migliorate, fermo restando il diametro

delle bronzine di banco che rimane inalterato. La potenza sale così a 250 HP, mostrando però limiti nella durata delle bronzine. La potenzialità del propulsore in termini termodinamici, almeno nella versione attuale di punta con due turbocompressori in serie e circa 3 bar al manifold, è intorno ai 350 HP, potenza e coppia che le bronzine di banco non sono in grado di sopportare. Utilizzando dei pistoni bimetallici, peraltro già disponibili a livello di prototipo, è possibile arrivare a circa 450 HP (Euro 0); persiste però il limite legato al dimensionamento, in particolare del diametro, delle bronzine di banco, il quale richiederebbe la riprogettazione dell'intero basamento.

I 450 HP sviluppati da questo motore risulterebbero già sufficienti per il decollo dell'elicottero. Considerando poi la variazione di peso passando dalla motorizzazione a turboalbero a quella a diesel, i 450 HP potrebbero addirittura risultare superflui.



*Immagine 3.2: Motore FIAT diesel 1.9 JTD*

### 3.3 Considerazioni sui propulsori

È stato analizzato un documento emesso dal Dipartimento Federale per l'aviazione Statunitense nel 2007, nel quale sono esposti i risultati di rilevazioni fatte sul motore a turboalbero utilizzato sul nostro elicottero per motivi di certificazione. I risultati che ne conseguono sono che la potenza massima sviluppabile in continuo diminuisce leggermente raggiungendo il valore di 322 kW, sempre riferita a 6000 rpm. Lo stesso valore è indicato per la potenza al decollo. La diminuzione dei valori di potenza dichiarati è però ampiamente compensata dalla capacità di sovraccarico che il motore è in grado di sopportare; infatti si possono raggiungere valori di potenza di picco pari a 469 kW per un periodo di due minuti e mezzo, permettendo così manovre come il decollo dove è richiesta maggiore potenza.

Considereremo che il nostro motore diesel sia in grado di sviluppare 400 cv (294.16 kW), per rimanere in margine di sicurezza. Teoricamente questa potenza non sarebbe sufficiente per il decollo, ma, come prima detto, si deve tenere in considerazione anche la variazione di peso che si ha passando dal motore a turboalbero al motore a diesel. Il peso risulta notevolmente ridotto per diverse ragioni. In primo luogo il peso del motore a turboalbero di 103,5 kg non tiene conto di tutti i pesi degli accessori, quindi il peso reale del motore risulta superiore al valore dichiarato. Come secondo punto bisogna tenere in considerazione la capacità massima del serbatoio, infatti avendo il motore diesel un consumo di circa il 50% inferiore rispetto al motore a turboalbero, per coprire la stessa autonomia di volo avremo bisogno di circa la metà del combustibile, il che implica un risparmio netto sul peso complessivo del velivolo legato alle dimensioni del serbatoio.

Il calcolo dei pesi e della potenza necessari per il decollo e la crociera esula dagli obiettivi di questa tesi, verranno quindi considerate queste condizioni sufficienti per considerare accettabile la realizzabilità del progetto.

# Capitolo 4 – L'impianto di raffreddamento

## 4.1 Generalità sull'impianto di raffreddamento

Prima di tutto occorre definire gli obiettivi del sistema di raffreddamento in ordine di priorità:

1. Raffreddare adeguatamente il motore in ogni fase operativa;
2. Massima affidabilità;
3. Ridurre la resistenza all'aria;
4. Mantenere il peso al minimo.

Obiettivo 1: raffreddare adeguatamente il motore in ogni fase operativa.

- **Attesa:** è spesso necessario mantenere il motore acceso prima della fase di decollo, è quindi indispensabile che il motore venga raffreddato adeguatamente per un tempo indefinito.
- **Decollo:** è la condizione più gravosa per il raffreddamento del motore. In questa fase il motore dev'essere ben raffreddato a piena potenza con velocità nulla del velivolo.
- **Salita:** risulta meno gravosa del decollo. Durante la salita il motore è vicino alla potenza massima e produce molto calore, ma in queste condizioni si ha un flusso che investe l'elicottero, aumentando il flusso d'aria intorno al motore. Questo flusso d'aria rende il raffreddamento del motore stesso più semplice in quanto, attorno all'elicottero, ci saranno aree di alta pressione e aree di bassa pressione; il sistema di raffreddamento prenderà l'aria per il raffreddamento dai punti di alta pressione e la scaricherà nei punti di bassa pressione.

- **Hoovering in quota:** l'elicottero rimane fermo in quota per effettuare operazioni statiche. In questa fase il motore è ad un regime di giri piuttosto elevato, dipendente dal carico da sollevare o sollevato. In questa condizione abbiamo l'elica che ruota ad una velocità prossima a quella massima, senza avere però un flusso d'aria dovuto allo spostamento dell'elicottero. Siamo quindi in una condizione simile a quella del decollo, la differenza sta nell'assenza del terreno alla base dell'elicottero e nel calo della pressione, fattori questi che potrebbero interferire con il normale flusso d'aria attraverso il radiatore. È quindi bene considerare questa come condizione a sé.
- **Volo a velocità di crociera:** la condizione più facile per il raffreddamento del motore. Condizioni costanti, potenza a livelli medio-alti, notevole flusso d'aria e ben definite pressioni attorno all'elicottero. Molto importante è non ottimizzare il flusso d'aria per il raffreddamento in questa condizione a discapito delle prime quattro perché, se così fosse, non si riuscirebbe a superare le fasi preliminari necessarie a raggiungere quella del volo a velocità di crociera.
- **Discesa e atterraggio:** generalmente bassa potenza ad una buona velocità fino al rallentamento per le fasi di atterraggio. La più grande preoccupazione la desta lo shock cooling, cioè un forte decremento di temperatura. Utilizzando un appropriato liquido di raffreddamento e un termostato si può evitare che il motore si raffreddi in modo eccessivo.

Obiettivo 2: massima affidabilità.

Una via per avere una buona affidabilità è la semplicità del sistema, poche parti in movimento e selezione di componenti di qualità.

Obiettivo 3: ridurre l'impatto all'aria.

Ridurre l'impatto all'aria del sistema di raffreddamento significa ridurre l'ammontare di aria utilizzata per raffreddare il motore. E' necessario porre attenzione a non ridurlo troppo sacrificando i primi due obiettivi.

Obiettivo 4: mantenere il peso al minimo.

Una regola molto importante è: non risparmiare sul peso a discapito di un buon sistema di raffreddamento.

La richiesta di raffreddamento è funzione della potenza: alta potenza comporta elevata necessità di raffreddamento. I tradizionali sistemi di raffreddamento a pressione regolano il flusso d'aria in base alla velocità di volo senza avere una connessione diretta con ciò che il motore richiederebbe. Un sistema di raffreddamento ideale regolerebbe il flusso d'aria di raffreddamento in funzione della potenza del motore. Un sistema di raffreddamento che comprende l'utilizzo di exhaust augmenter è indipendente dalla velocità di volo e completamente dipendente dalla potenza. Questo permette la riduzione dell'impatto all'aria (obiettivo 3) senza compromettere l'obiettivo 1.

Il motore che si dovrà raffreddare, come già anticipato, sarà un FIAT 1900 JTD. La potenza su cui baseremo i nostri calcoli sarà di 400HP. L'aria di raffreddamento verrà aspirata dall'esterno dall'exhaust augmneter, che funzionerà da pompa, attraverso un'apposita griglia creata modificando il cofano motore già esistente. Dopo essere passata attraverso il radiatore, l'aria entrerà nell'exhaust augmenter; data la presenza di una sola bancata e di un unico scarico, si utilizzerà un solo exhaust augmenter.

## 4.2 Il radiatore

Il primo componente da dimensionare è un radiatore che sia in grado di raffreddare opportunamente il motore e per fare questo ci baseremo sull'articolo di Nicoson. Nicoson opta per un radiatore che abbia un volume pari a 2.48 pollici cubi per ogni HP e, inoltre, tale radiatore dovrà avere uno spessore non inferiore a 2.75 pollici, cioè 69.9 mm circa. Dato che il motore studiato da Nicoson è

alimentato a benzina, che ha un rendimento attorno al 20%, mentre il motore che ci si propone di utilizzare per questo elicottero è Diesel, con un rendimento attorno al 50%, ed essendo la parte destinata al riduttore ad un terzo della dispersione totale in entrambe le motorizzazioni, significa che nel Diesel le dimensioni del radiatore sono circa dimezzate rispetto al benzina.

Dall'articolo di Nicoson risultano delle regole per il dimensionamento dei condotti:

1. Un motore a pistoncini produce approssimativamente 0,094 pound di massa al minuto per ogni HP
2. Lo scarico ideale può muovere 6 pound di massa di flusso d'aria di raffreddamento per ogni pound di massa di gas di scarico (mass flow ratio)
3. La sezione del settore di miscelazione dev'essere 10 volte l'area dello scarico del getto
4. La lunghezza del settore di miscelazione dev'essere 6 o 7 volte il diametro
5. Il rapporto tra le sezioni di uscita e ingresso dev'essere 1,87
6. Il diffusore dev'espandere con non più di 12 gradi di angolo
7. Un incremento di oltre 6 pollici di colonna d'acqua dev'essere realizzato tra ingresso e uscita.
8. Operare senza diffusore decresce l'incremento di pressione del 40% circa.

La prima regola ci tornerà utile ora, mentre le altre verranno utilizzate in seguito per il dimensionamento dell'exhaust augmenter.

### **Dimensionamento radiatore:**

$$\text{Volume radiatore} = 400\text{HP} \times 2.48 = 992 \text{ in}^3 = 16255968 \text{ mm}^3$$

$$\text{Area frontale radiatore benzina} = 992 \div 2.75 = 361 \text{ in}^2 = 232903 \text{ mm}^2$$

$$\text{Area frontale radiatore diesel} = 232903 \text{ mm}^2 \div 2 = 116451.5 \text{ mm}^2$$

Una volta nota l'area frontale dobbiamo scegliere la sezione del radiatore. Si è scelta una sezione circolare sia per questioni d'ingombro, sia per avere una maggiore simmetria di tutto il condotto di raffreddamento. Avremo lo scarico in asse con il radiatore e dovremo quindi recuperare le dimensioni dello scarico per scegliere un adeguato diametro della sezione.

Partiamo dal calcolo della portata in massa del Diesel, per il quale occorre moltiplicare il valore utilizzato da Nicoson per un coefficiente che risulta essere il rapporto tra le masse di scarico tra diesel e benzina. Per ricavare questo coefficiente occorre passare per il BSFC per entrambe le propulsioni, cioè il rapporto tra il consumo di carburante in g/s e la potenza prodotta in W.

Consideriamo il rendimento del motore benzina pari a 0,2 e quello del motore Diesel 0,48.

$$\eta_{benzina} = \frac{1}{BSFC_{benzina} * 0,0122225}$$

$$BSFC_{benzina} = \frac{1}{\eta_{benzina} * 0,00122225} = \frac{1}{0,2 * 0,0122225} = 409,08$$

$$\eta_{diesel} = \frac{1}{BSFC_{diesel} * 0,0119531}$$

$$BSFC_{diesel} = \frac{1}{\eta_{diesel} * 0,0119531} = \frac{1}{0,48 * 0,0119531} = 170,45$$

Consideriamo le condizioni stechiometriche e i rapporti di compressioni di 14,5:1 per il propulsore a benzina e 20:1 per il propulsore diesel. In questo modo si ricavano le masse allo scarico dei propulsori e facendone il rapporto ricavo il coefficiente cercato:

$$m_{benzina} = 15,5 * BSFC_{benzina} = 15,5 * 409,08 = 6340,74$$

$$m_{diesel} = 21 * BSFC_{diesel} = 21 * 170,45 = 3579,45$$

$$\frac{m_{diesel}}{m_{benzina}} = \frac{3579,45}{6340,74} \approx 0,57$$

In questo modo si avrà una portata in massa di  $0,094 * 0,57 = 0,05358$  pound di massa al minuto per ogni HP.

Trasformando le unità di misura in grammi si ha per il benzina  $0,094 * 0,45359237 = 0,04264$  kg/min per HP e per il diesel  $0,05358 * 0,45359237 = 0,0243$  kg/min per HP.

Nicoson per cui avrà:

$$\dot{m}_{benzina} = \dot{Q}_{benzina} * \rho_{aria850^{\circ}C} = \frac{\pi * d^2_{Nicoson}}{4} * v_{Nicoson} * \rho_{aria1123,15K}$$

$$\frac{p}{\rho} = RT$$

$$\rho_{aria1123,15K} = \frac{p_{atm}}{RT} = \frac{101325 Pa}{287,05 \frac{J}{kg K} * 1123,15 K} = 0,3143 \frac{kg}{m^3}$$

$$\dot{m}_{benzina} = 0,04264 * HP = \frac{0,04264 * 400}{60} = 0,2843 \frac{kg}{s}$$

Il diametro utilizzato da Nicoson è 2,15" cioè 54,6mm circa. Per cui:

$$v_{Nicoson} = \frac{\dot{m}_{benzina} * 4}{\pi * d^2_{Nicoson} * \rho_{aria1123,15K}} = \frac{0,2843 * 4}{\pi * 0,0546^2 * 0,3143} = 386 m/s$$

Considerato che la velocità di scarico sarà la stessa sia nell'applicazione per Benzina sia nell'applicazione Diesel posso trovare il diametro dello scarico.

$$\dot{m}_{diesel} = \dot{Q}_{diesel} * \rho_{aria650^{\circ}C} = \frac{\pi * d^2}{4} * v_{Nicoson} * \rho_{aria923,15K}$$

$$\rho_{aria923,15K} = \frac{p_{atm}}{RT} = \frac{101325 Pa}{287,05 \frac{J}{kg K} * 923,15 K} = 0,3824 \frac{kg}{m^3}$$

$$\dot{m}_{diesel} = 0,0243 * HP = \frac{0,0243 * 400}{60} = 0,162 \frac{kg}{s}$$

$$d = \sqrt{\frac{\dot{m}_{diesel} * 4}{\pi * v_{Nicoson} * \rho_{aria923,15K}}} = \sqrt{\frac{0,162 * 4}{\pi * 386 * 0,3824}} = 0,03738 m$$

La scelta ricadrà quindi su di uno scarico con un diametro di 37,5 mm.

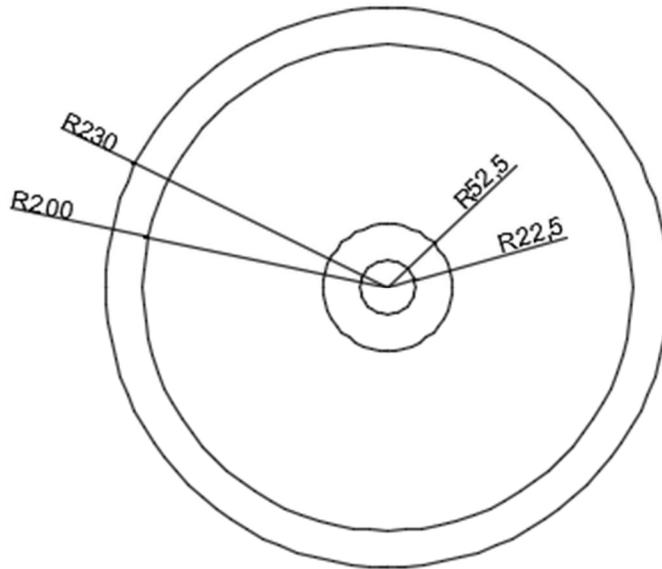
Considerando quindi un foro centrale per il passaggio dello scarico del motore di  $d_i=45\text{mm}$  (viene lasciato lo spazio per una guarnizione tra radiatore e scarico) e considerando uno spessore del “serbatoio” del radiatore di 30mm ottengo:

$$D_1 = 45 \text{ mm}$$

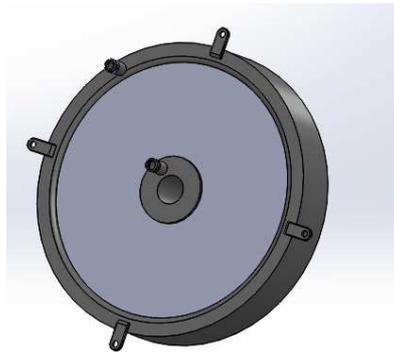
$$D_2 = D_1 + (2 * 30) = 105 \text{ mm}$$

$$D_3 = \sqrt{\frac{A * 4}{\pi}} = \sqrt{\frac{\left[116451,5 + \left(\pi * \frac{105^2}{4}\right)\right] * 4}{\pi}} \approx 400 \text{ mm}$$

$$D_4 = D_3 + (2 * 30) = 460 \text{ mm}$$



*Immagine 4.1: Dimensioni frontali del radiatore.*



*Immagine 4.2: Disegno 3D del radiatore dimensionato.*

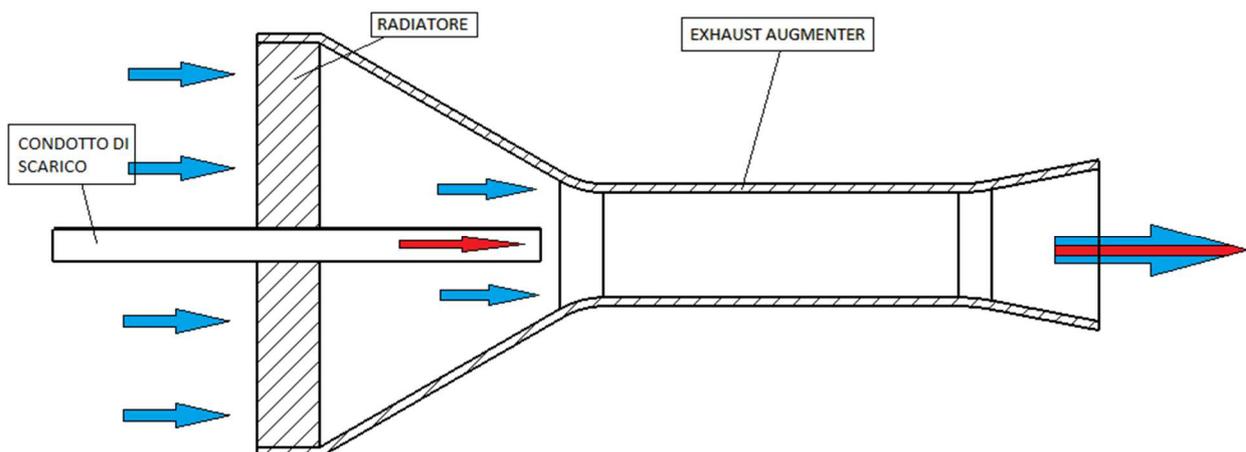
### **4.3 L'exhaust augmenter**

Per il dimensionamento dell'exhaust augmenter mi sono basato principalmente sull'articolo di Nicoson. Per le parti mancanti e per il confronto dei risultati, mi sono comunque basato sui report NACA. Sia l'articolo di Nicoson, che i report

NACA, prendono però in considerazione exhaust augments solo di sezione rettangolare. Ho optato per il dimensionamento di un ugello eiettore (o exhaust augment) di sezione circolare, mantenendo comunque gli stessi rapporti fra le sezioni e angoli di divergenza dei report NACA. Questo per avere un sistema più contenuto in termini di spazio, un flusso più lineare e diminuire i distacchi di vena. Questo tipo di sezione verrà comunque testata singolarmente tramite un simulatore di flusso prima di continuare con le altre simulazioni, per valutarne l'efficacia.

Per quanto riguarda i condotti, questi non devono divergere più di 5-7 gradi per impedire il distacco di vena e permettere il rallentamento del flusso d'aria necessario ad innalzare la pressione.

Un ugello eiettore non è altro che una semplice pompa a getto che usa un piccolo getto di gas ad alta velocità per muovere un grande volume di aria; in questo caso ci proponiamo di utilizzarli in quanto potranno facilitare il flusso d'aria di raffreddamento ad attraversare il radiatore.



*Immagine 4.3: Schema di funzionamento di un Exhaust Augmenter. Le frecce azzurre rappresentano l'aria fredda aspirata dall'esterno, mentre quelle rosse i gas di scarico.*

L'exhaust augmenter ideale è composto da tre settori: l'ingresso, formato per il convogliamento del flusso d'aria e per il posizionamento del getto di scarico; il settore di miscelazione a sezione costante e infine il diffusore. L'espansione del flusso miscelato nel diffusore aumenta del 40 – 50 % il vuoto all'ingresso dello scarico.

Per continuare il dimensionamento dell'ugello eiettore, prendiamo nuovamente in considerazione le regole elencate nel paragrafo precedente.

Per la regola numero 3 la sezione del settore di miscelazione dev'essere 10 volte quella dello scarico del getto.

$$A_{scarico} = \frac{\pi * d_{scarico}^2}{4} = \frac{\pi * 37,5^2}{4} = 1104,5 \text{ mm}^2$$

$$A_{settore} = 10 * A_{scarico} = 10 * 1104,5 = 11045 \text{ mm}^2$$

$$d_{settore} = \sqrt{\frac{A_{settore} * 4}{\pi}} = \sqrt{\frac{11045 * 4}{\pi}} = 118,6 \text{ mm} \approx 120 \text{ mm}$$

Per cui il diametro del settore di miscelazione è 120 mm.

Per la regola 4 la lunghezza del settore di miscelazione deve essere 6-7 volte il diametro, cioè  $6 * 120 = 720 \text{ mm}$

Per quanto riguarda il diffusore mi sono basato sul report NACA 818 dove ho che il diametro finale del diffusore deve essere 1,45 volte il diametro del settore di miscelazione:

TABLE I.—STRAIGHT AND DIFFUSER EXHAUST-GAS EJECTORS INVESTIGATED

Ejector				Exhaust nozzle		
Straight-section area (sq in.)	Aspect ratio <sup>a</sup>	Diffuser-area ratio <sup>b</sup>	Designation (°)	Aspect ratio <sup>a</sup>	Exit location <sup>c</sup> (in.)	Figure
20	3	---	18S	15.8	1	4 (a)
			24S	15.8	1	
			30S	15.8	1	
			36S	15.8	1	
25	3	---	12S	12.0	0	4 (b)
			18S	12.0	0	
			24S	12.0	0	
			30S	12.0	0	
30	3	---	18S	15.8	0	4 (c)
			24S	15.8	0	
			30S	15.8	0	
			36S	15.8	0	
50	3	---	18S	41.7	0	4 (d)
			24S	41.7	0	
			36S	41.7	0	
20	3	1.49	18S+6D	15.8	1	7 (a)
			24S+6D	15.8	1	
			30S+6D	15.8	1	
			36S+6D	15.8	1	
25	3	1.44	6S+6D	12.0	0	7 (b)
			12S+6D	12.0	0	
			18S+6D	12.0	0	
			24S+6D	12.0	0	
30	3	1.40	24S+6D	12.0	1	7 (c)
			30S+6D	12.0	1	
30	3	1.31	18S+6D	41.7	0	7 (d)
20	3	1.98	12S+12D	15.8	1	8 (a)
			18S+12D	15.8	1	
			24S+12D	15.8	1	
			30S+12D	15.8	1	
25	3	1.87	6S+12D	12.0	0	8 (b)
			12S+12D	12.0	0	
			18S+12D	12.0	1	
			24S+12D	12.0	1	
30	3	1.80	18S+12D	15.8	0	8 (c)
			24S+12D	15.8	0	
			30S+12D	15.8	0	
			36S+12D	15.8	0	
50	3	1.62	12S+12D	41.7	0	8 (d)
			18S+12D	41.7	0	
25	3	2.78	24D	12.0	0	10
			6S+18D	12.0	0	
25	1	---	24S	1.0	0	15
30	5	2.03	18S+12D	15.8	0	
25	1	---	6S+18D	7.0	0	18 (a)
			6S+18D	1.0	0	
			18S+12D	12.0	0	
			24S+6D	41.7	0	
30	3	---	24S+6D	15.8	0	18 (b)
			36S+6D	15.8	0	

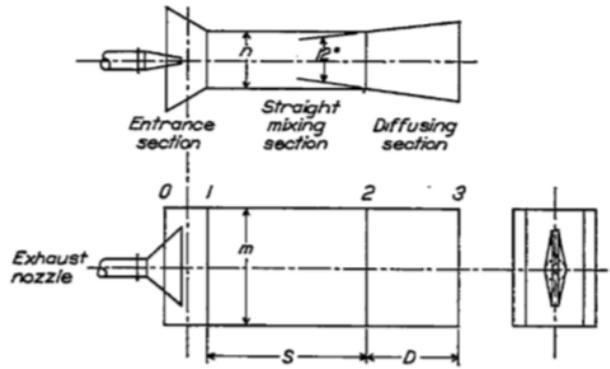


FIGURE 3.—Ejector details and terminology. Straight mixing-section area, square inches; aspect ratio of straight mixing section m/n; length of straight mixing section S, inches; length of diffusing section D, inches. (For example, an ejector with a straight section of 24 in. and a diffusing section of 12 in. would be designated 24S+12D.)

sections, and second, diffuser ejectors consisting of diverging exit sections appended to the straight ejectors. Straight-section areas of 20, 25, 30, and 50 square inches were investigated over a range of over-all length from 6 to 36 inches for both groups. Diffusing exits were tested in lengths of 6, 12, and, for a few cases, 18 inches. In regard to the maximum length tested, no attempt was made to cover the range of length required to obtain maximum ejector performance for all areas investigated. Instead, the lengths were limited to values that were considered compatible with available space on conventional aircraft power-plant installations. An ejector aspect ratio of 3 (the ratio of the larger to the smaller dimension of the rectangular straight section) was arbitrarily chosen for most of the tests from a rough consideration of how the ejectors might be installed on the

Immagine 4.4: Pagina estratta dal report NACA No 818.

Il diametro finale del divergente sarà quindi:  $120 * 1,45 = 174\text{mm}$ , con un angolo di divergenza non superiore ai 12 gradi.

È poi stato creato un convogliatore che, con lo stesso angolo di convergenza dell'exhaust augmenter, arrivi ad un diametro tale da permettere l'alloggio del radiatore al suo interno.

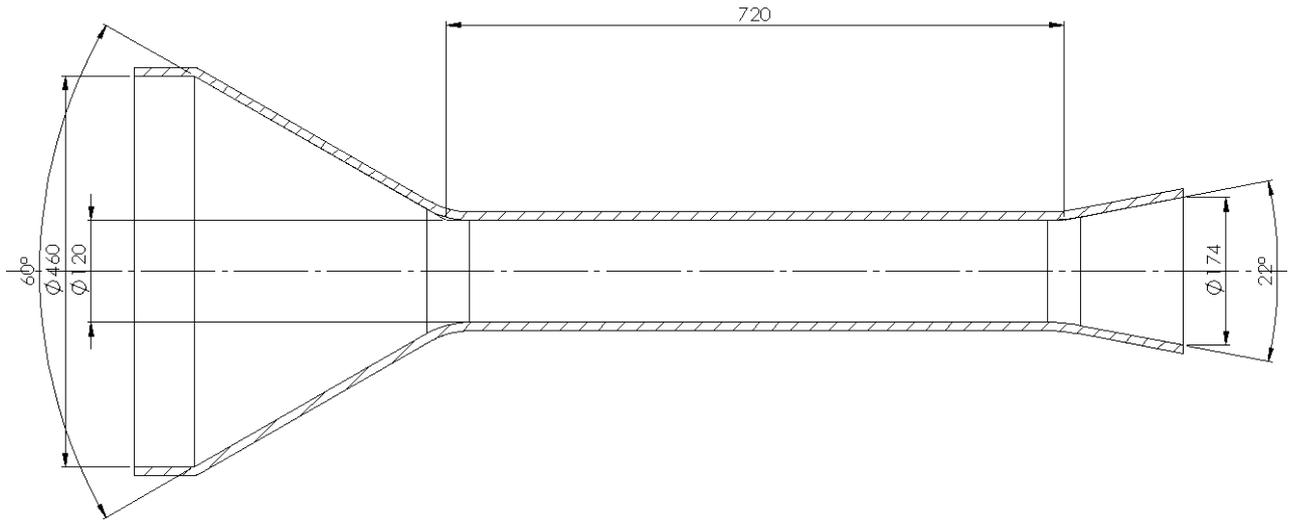


Immagine4.5: Disegno exhaust augmter con settore di miscelazione intero.

Nonostante dai report NACA risultino corrette le misure utilizzate in questo dimensionamento, è stato comunque pensato di provare ad accorciare il settore di miscelazione. Così facendo si riuscirebbe sicuramente a diminuire il peso e forse anche ad aumentare la velocità del flusso che investe il radiatore.

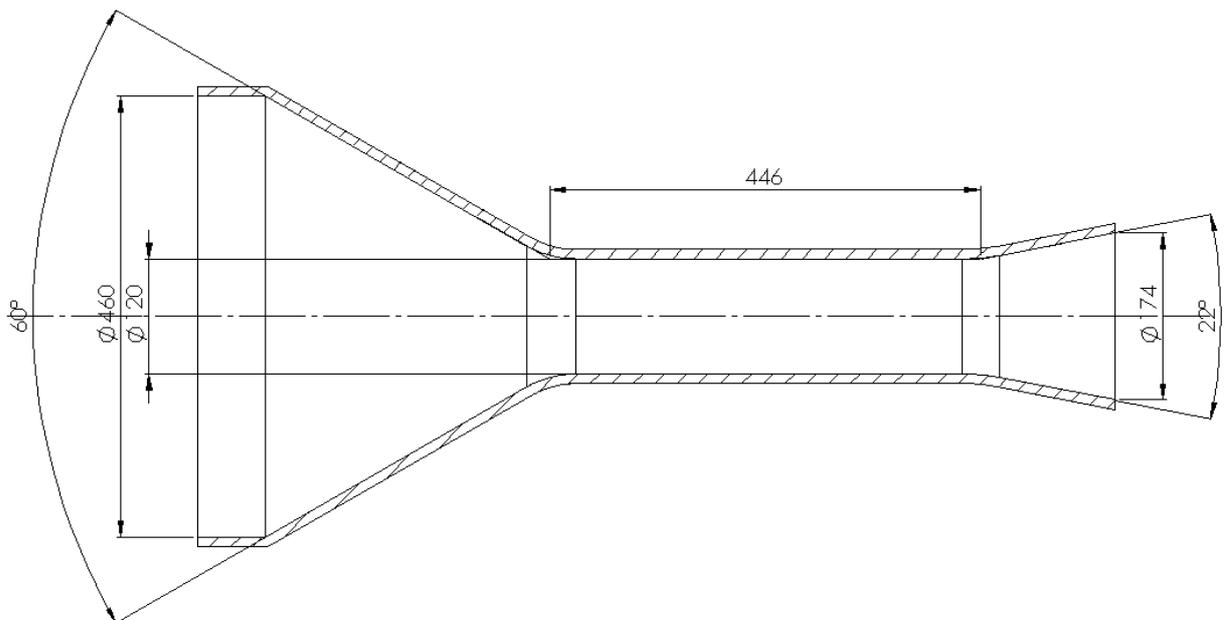
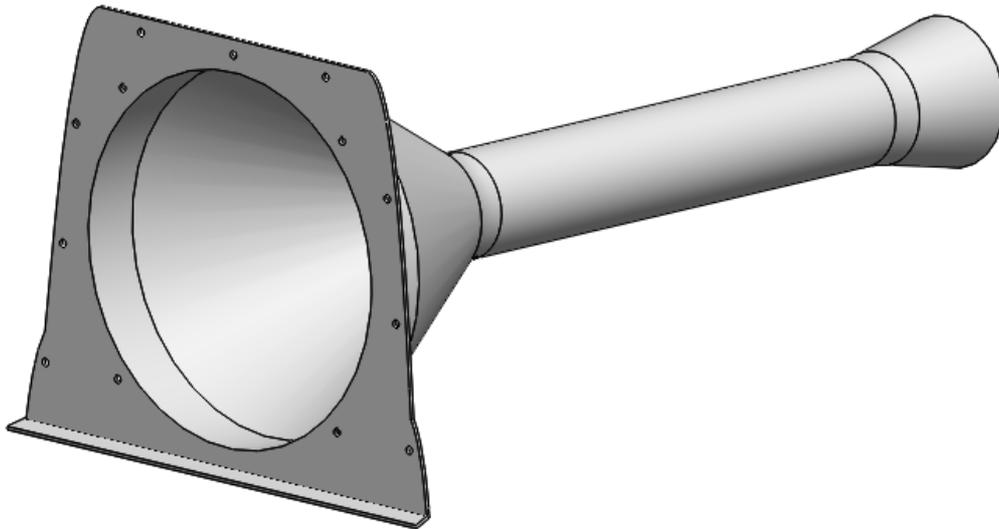


Immagine 4.6:Disegno exhaust augmter con settore di miscelazione corto

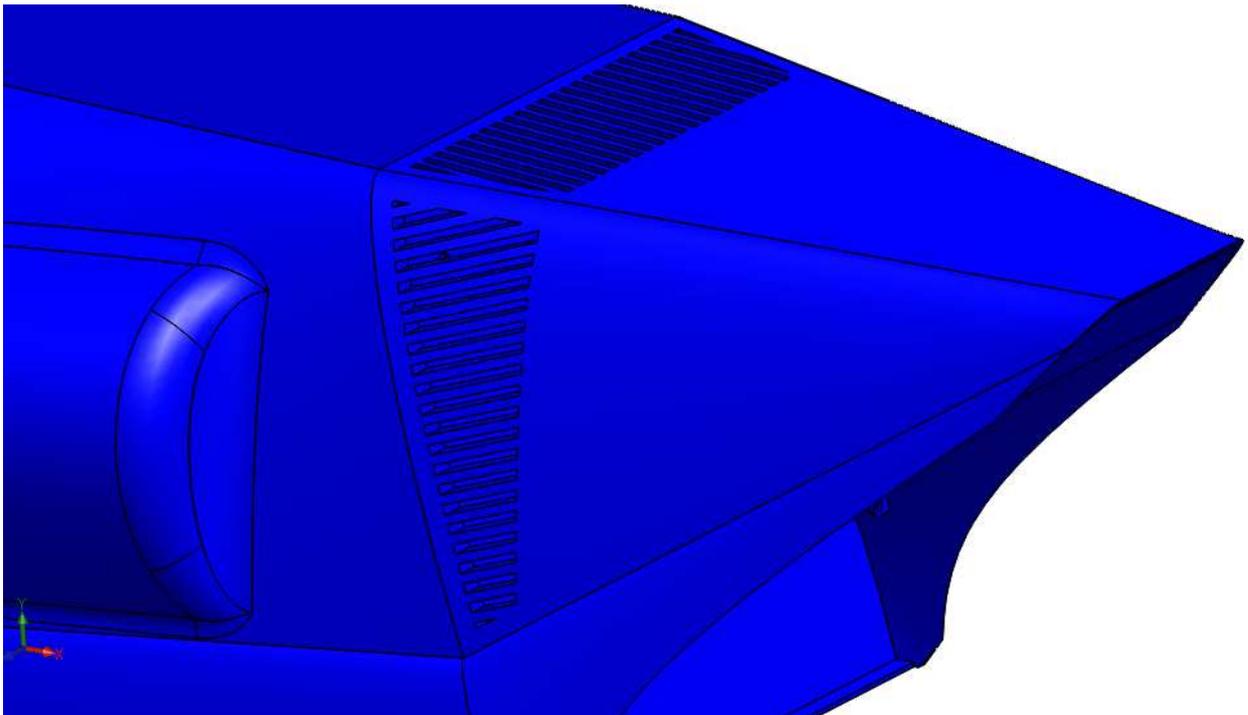
I risultati delle simulazioni di flusso, che andranno a decretare quale delle due tipologie di exhaust augments sia migliore, verranno trattate nel prossimo capitolo.

## **4.4 Cofano motore**

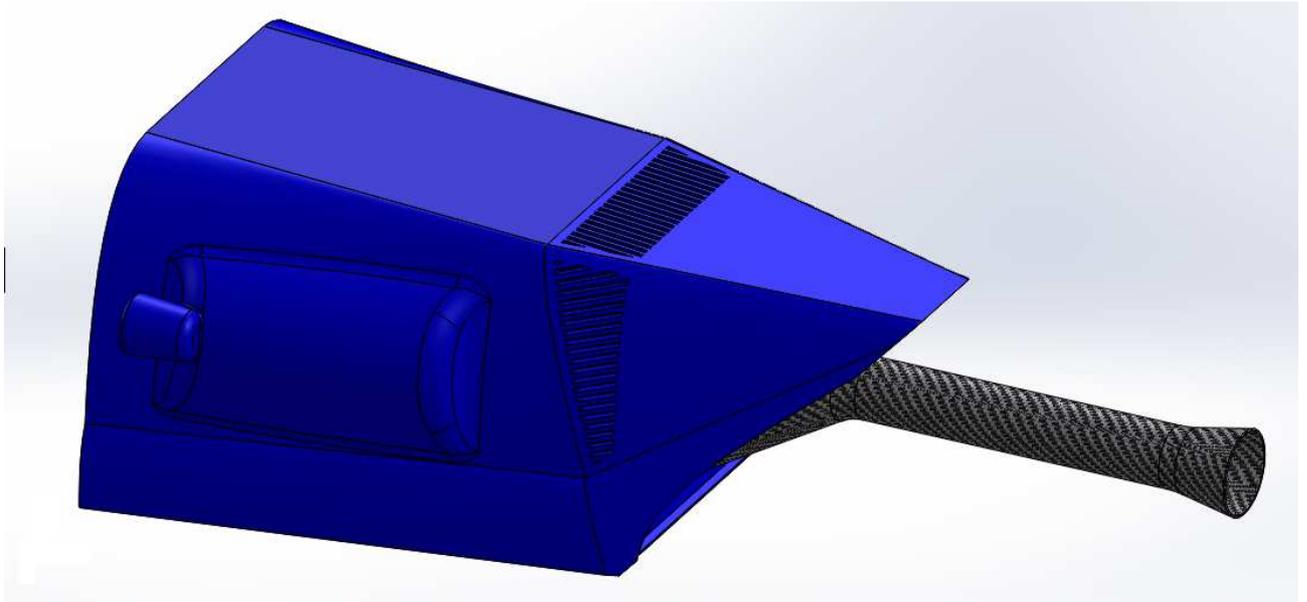
Per poter raffreddare il radiatore, è ovviamente indispensabile creare delle aperture nel cofano motore, le quali rendano possibile il passaggio dell'aria dall'esterno. Per fare questo non verranno utilizzati convogliatori aggiuntivi per l'aria, i quali complicherebbero la struttura dell'elicottero e lo appesantirebbero. Si è anche pensato che fossero superflui, ritenendo che l'exhaust augments sarebbe stato in grado di svolgere il ruolo di pompa adeguatamente. Sono state quindi create delle semplici fenditure longitudinali sul cofano motore, isolando con una paratia la zona in cui è alloggiato il motore da quella in cui andrà posizionato il radiatore, in modo da evitare che il flusso d'aria calda che investe il motore venga poi aspirato dall'exhaust augments e quindi utilizzata per raffreddare il radiatore. Il risultato finale di questa modifica è riportato nell'immagine.



*Immagine 4.7: paratia lato radiatore con assemblato l'exhaust augmenter*



*Immagine4.8: cofano motore modificato*



*Immagine4.9: cofano motore con assemblato l'exhaust augmenter*

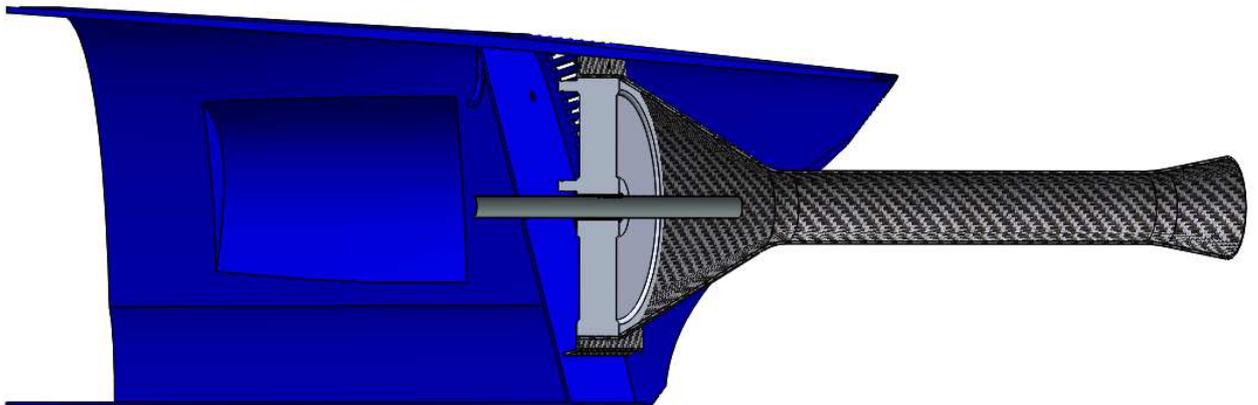


Immagine 4.10: Sezione del cofano motore assemblato

# Capitolo 5 – Simulazioni di flusso

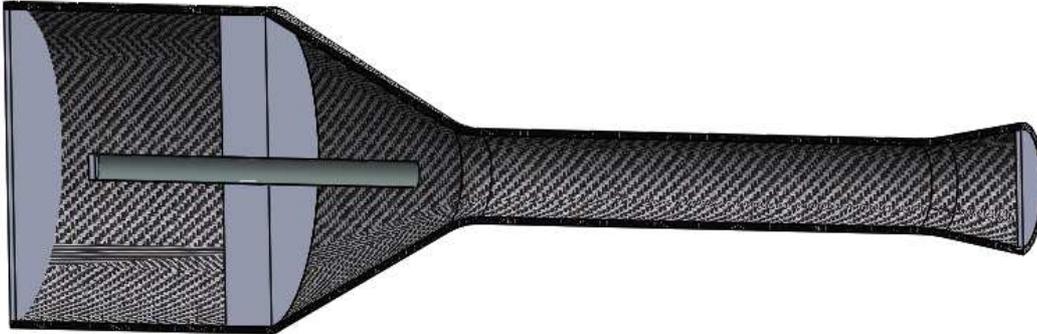
## 5.1 Generalità sulle simulazioni

Le simulazioni che andremo a prendere in considerazione ora sono state eseguite con lo stesso programma utilizzato per la modellazione solida dei componenti, solidworks, utilizzando l'estensione "flow simulation", la quale permette di eseguire simulazioni di flusso su modelli ed assiemi disegnati prima con la parte di modellazione solida. Per poter effettuare calcoli in tempi accettabili, alcuni disegni sono stati semplificati, anche se sono comunque state effettuate simulazioni fino ad una durata di 26 ore. Le simulazioni effettuate sono state realizzate tutte con una qualità di simulazione pari a 5, livello considerato accettabile per poter ritenere le simulazioni ad un livello di approssimazione sufficiente. Molti dei dati utilizzati per effettuare le simulazioni di flusso sono stati presi dai dati utilizzati nei capitoli precedenti, mentre per le condizioni ISA mi sono servito di un sito apposito, 1976 Standard Atmosphere Calculator, che consente di calcolare le condizioni ISA utilizzando in ingresso solamente la quota e l'offset di temperatura.

## 5.2 Simulazioni di flusso exhaust augmenter

Per la simulazione di flusso dell'exhaust augmenter sono partito con un modello semplificato, nel quale il radiatore è stato approssimato con un disco, il quale è

stato poi impostato, per la simulazione, come un setto poroso. Il complessivo semplificato risultante è quello riportato qui di seguito.



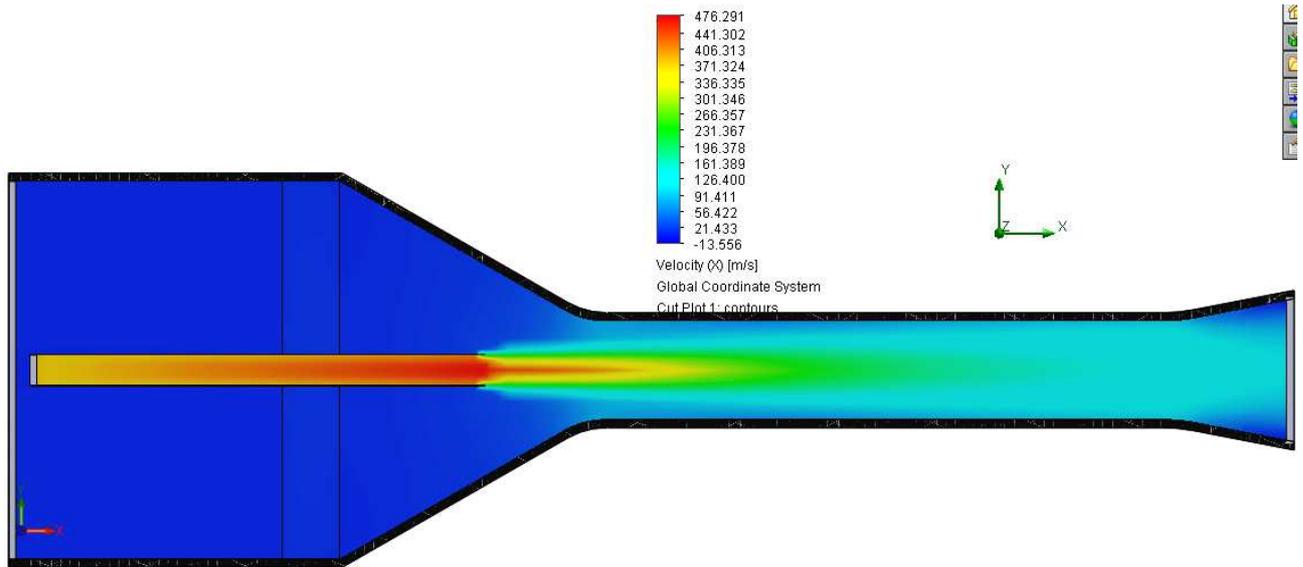
*Immagine 5.1: sezione exhaust augmenter complessivo, pronto per effettuare la simulazione*

Per rendere possibile la realizzazione della simulazione ho dovuto prolungare la parte di exhaust augmenter contenente il radiatore, in modo che riuscisse a contenere anche lo scarico. È stato necessario procedere in questo modo poiché nell'impostazione del "lid" nella superficie dell'exhaust augmenter lato radiatore, non era possibile escludere lo scarico, rendendo impossibile l'impostazione delle condizioni al contorno necessarie. Si è quindi optato per questa semplice soluzione, la quale non andrà comunque ad interferire con il risultato finale.

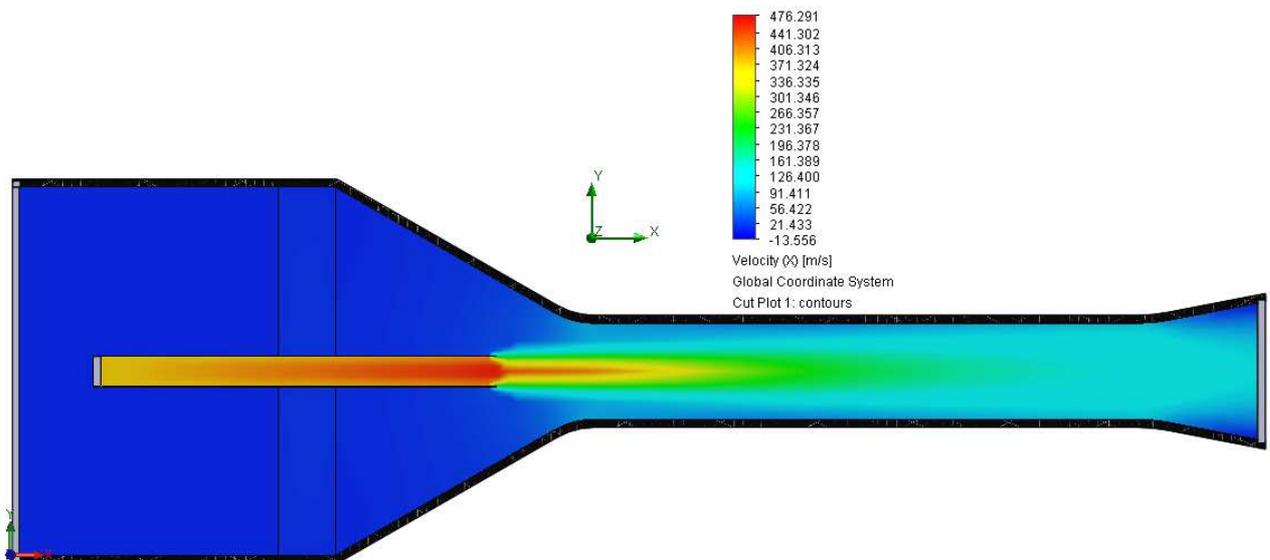
Per le condizioni al contorno ho tenuto conto di una temperatura dell'aria di 303.15 K e di una pressione di 101325 Pa. Queste condizioni sono quelle che rimarranno poi impostate all'entrata e all'uscita dell'exhaust augmenter. Per quanto riguarda la velocità e la temperatura dei gas di scarico sono state impostate:  $V=386$  m/s e  $T=923.15$  K, in accordo con i dati utilizzati nei capitoli precedenti.

È stata presa in considerazione anche la posizione dello scarico rispetto all'inizio della sezione di miscelazione. Sono infatti state fatte 5 diverse simulazioni in base alla distanza dello scarico dalla sezione iniziale del condotto di miscelazione, questa distanza è stata presa per comodità dalla superficie interna del radiatore. Si

otterrà che la posizione dello scarico più vicina alla sezione di miscelazione sarà di 275mm, posizione in cui risulta che lo scarico si trova oltre la sezione, e quella più lontana a 175mm, nella quale lo scarico risulta più vicino al radiatore. La scala delle diverse simulazioni è stata modificata in modo da riuscire a fare un confronto visivo ed immediato.



*Immagine 5.2: simulazione di flusso exhaust augmenter lungo e scarico a 175mm dal radiatore*



*Immagine 5.3: simulazione di flusso exhaust augmenter lungo e scarico a 200mm dal radiatore*

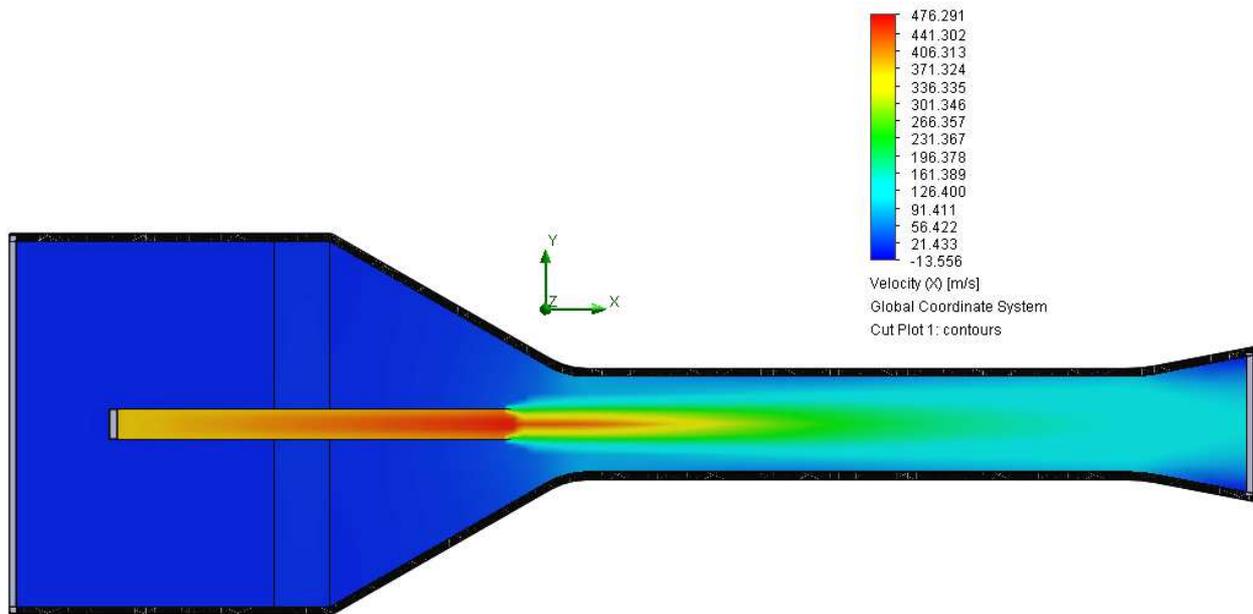


Immagine 5.4: simulazione di flusso exhaust augmenter lungo e scarico a 225mm dal radiatore

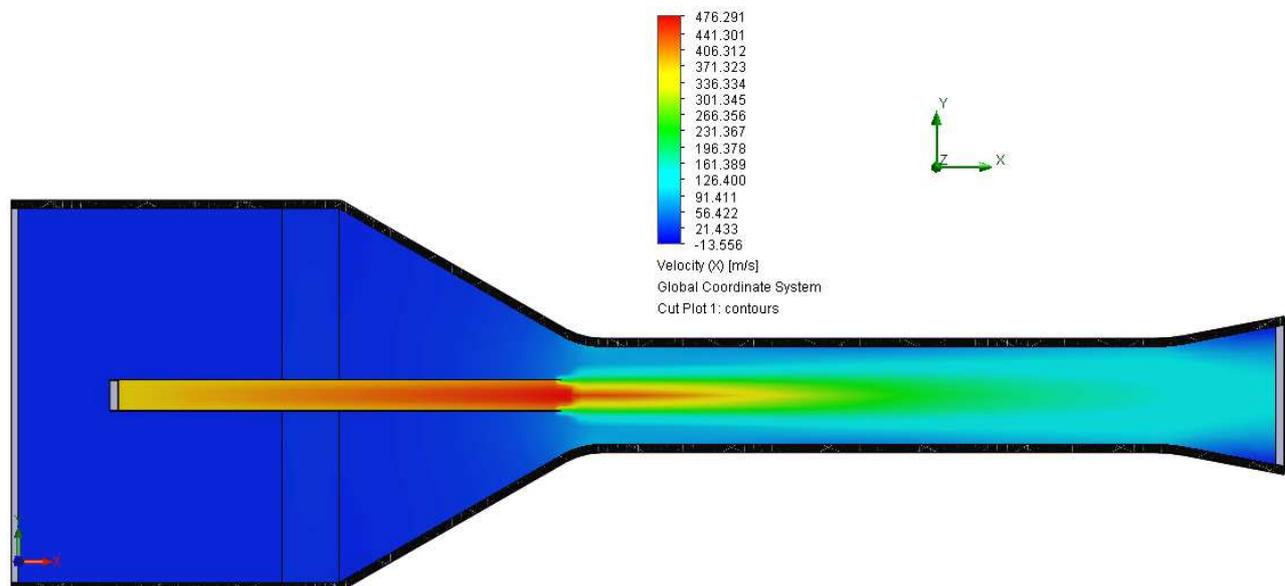
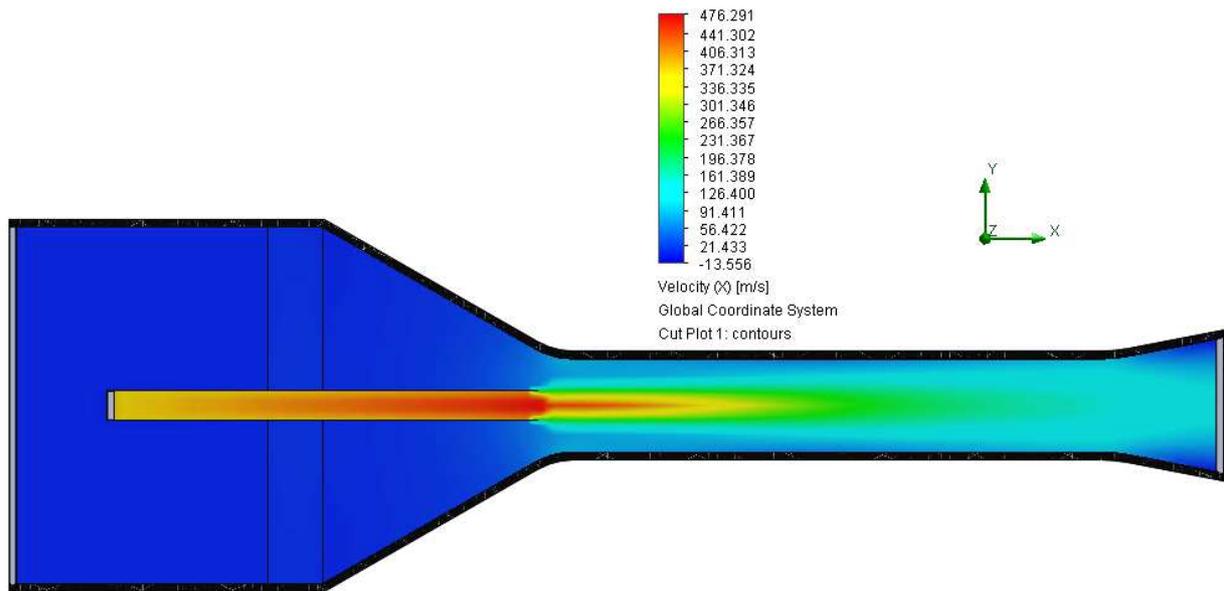


Immagine 5.5: simulazione di flusso exhaust augmenter lungo e scarico a 250mm dal radiatore



*Immagine 5.6: simulazione di flusso exhaust augmenter lungo e scarico a 275mm dal radiatore*

Osservando le immagini sopra riportate, risulta essere migliore la configurazione in cui lo scarico si trova ad una distanza dal radiatore di 250mm (si ha un flusso totalmente sviluppato in tutto il diametro dell'exhaust augmenter), ragion per cui nelle prossime simulazioni lo scarico verrà sempre mantenuto a questa distanza.

Una volta analizzate le varie simulazioni di flusso in base alla posizione dello scarico, si è presa in considerazione la lunghezza del condotto di miscelazione. Le condizioni per la simulazione di flusso sono rimaste le medesime delle simulazioni precedenti, a parte la lunghezza del settore di miscelazione che è passata da 720mm a 446 mm. Al termine della simulazione è stata riportata anche quest'ultima sulla stessa scala delle precedenti per rendere agevole il confronto.

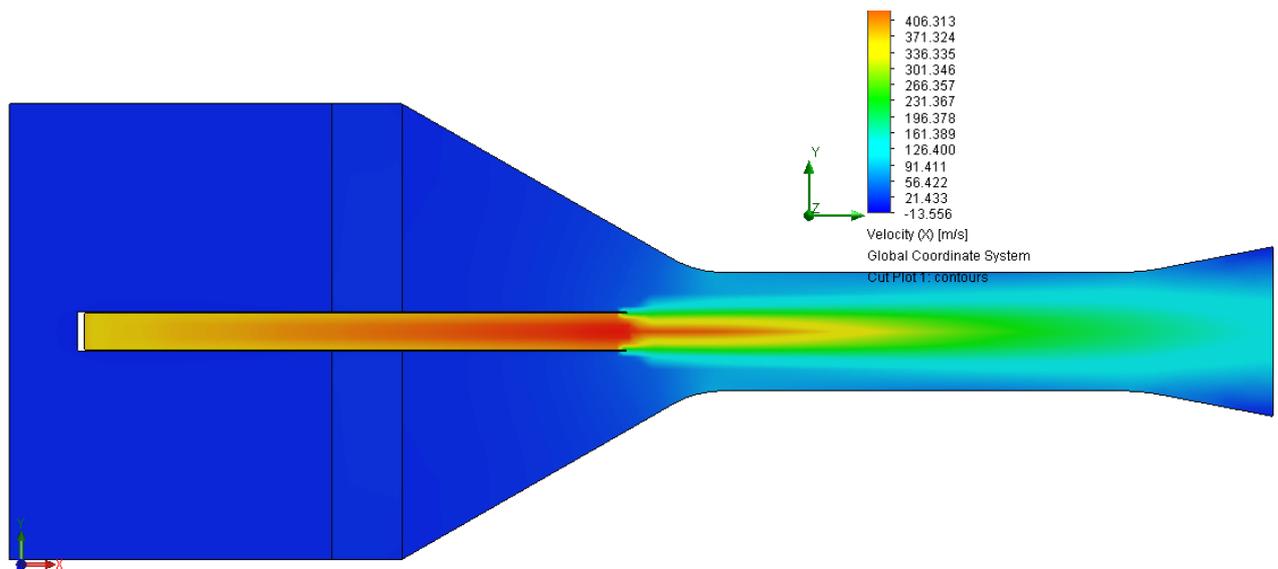


Immagine 5.7: simulazione exhaust augmenter accorciato e scarico spostato verso il radiatore

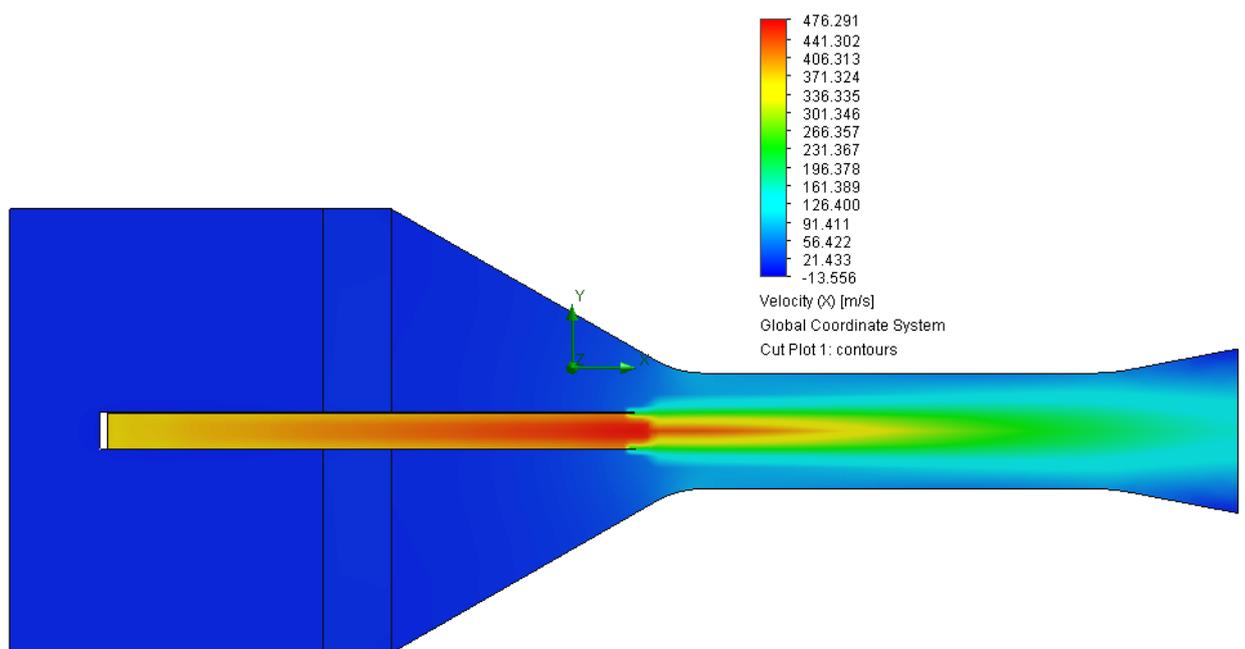


Immagine 5.8: simulazione exhaust augmenter accorciato e scarico sulla sezione di miscelazione (250mm dal radiatore)

Confrontando le immagini non risulta esserci nessuna notevole variazione rispetto alle simulazioni precedenti, quindi, per questioni di peso, risulta più idoneo l'utilizzo dell'exhaust augmenter con il settore di miscelazione più corto.

È stato testato anche un settore di miscelazione ulteriormente più corto, ma, come è possibile vedere dall'immagine 5.9, il risultato non è migliore di quello precedente, poiché il flusso d'aria dei gas di scarico non è completamente sviluppato, ragion per cui le prossime simulazioni verranno eseguite utilizzando esclusivamente il secondo tipo di exhaust augments ora analizzato, con la configurazione che prevede lo scarico ad una distanza di 250mm dal radiatore, potendola valutare come la condizione migliore tra quelle testate.

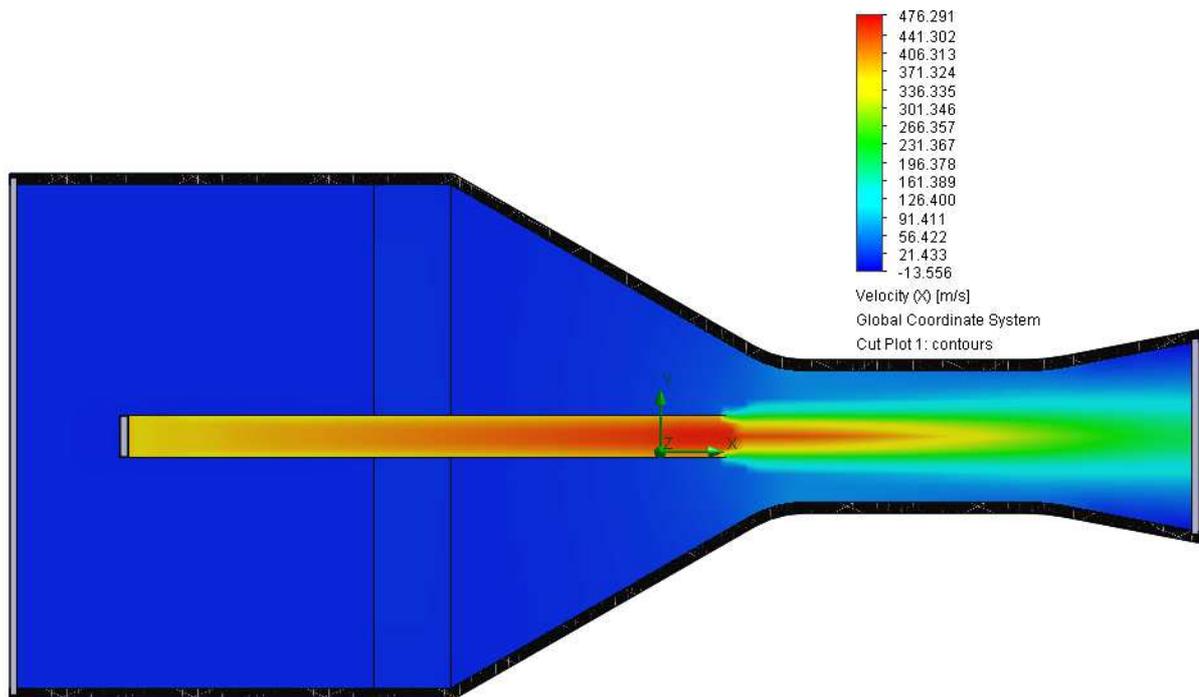
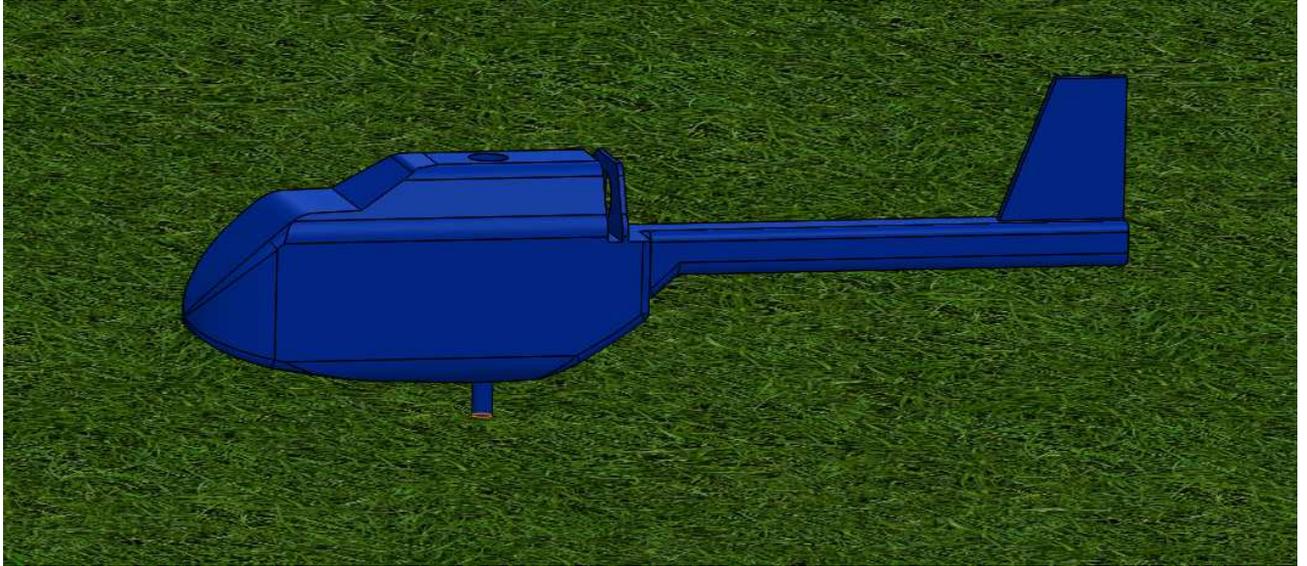


Immagine 5.9: simulazione con settore di miscelazione ulteriormente più corto, circa 200mm

### 5.3 Simulazioni di flusso elicottero

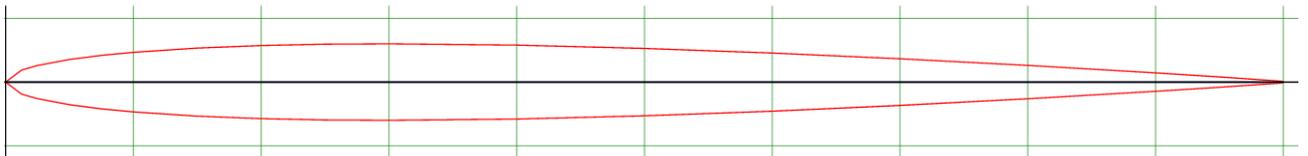
Per prima cosa è stato necessario disegnare un modello semplificato dell'elicottero Eurocopter EC120 colibrì, tenendo in considerazione le dimensioni di massima già descritte nel capitolo 2. Sono state disegnate solo le parti rilevanti

ai fini delle simulazioni di flusso, in modo da rendere più veloce il calcolo. Il modello utilizzato per la simulazione è quello riportato nell'immagine seguente.



*Immagine 5.10: modello dell'elicottero utilizzato per le simulazioni*

Una volta disegnato l'elicottero si è passato al disegno delle pale dello stesso. Per queste si è utilizzato un profilo alare NACA 006, che è un profilo simmetrico, con una corda di 400mm ed un diametro totale dell'elica di 10000mm, come riportato nella scheda tecnica dell'elicottero.



*Immagine 5.11: profilo alare NACA 006*

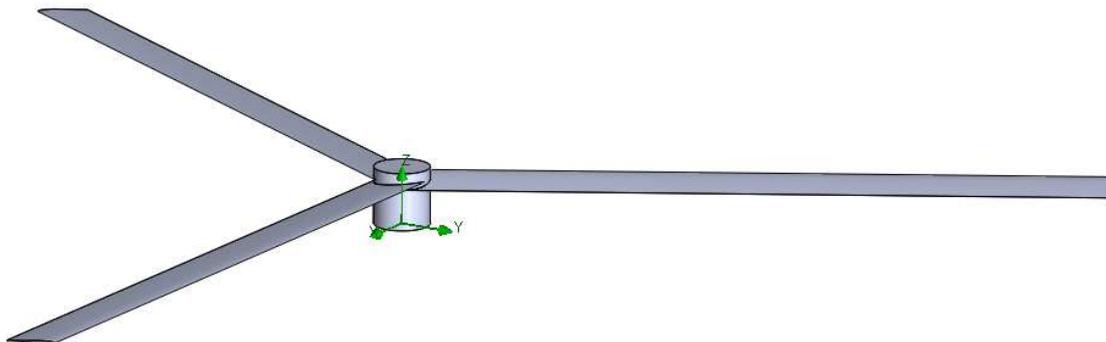
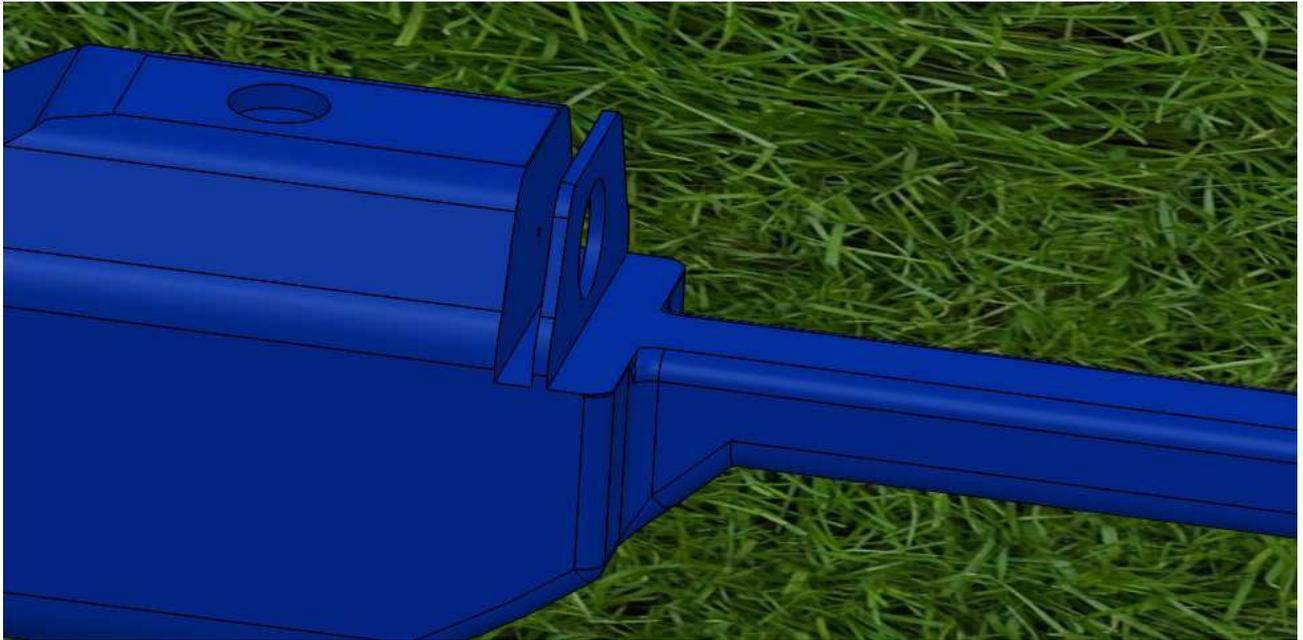


Immagine 5.12: pale elicottero

L'elica è stata disegnata con le pale aventi un'ncidenza pari a  $6^\circ$ , valore questo stimato non avendo potuto trovare la giusta incidenza. Per quanto riguarda, invece, l'inclinazione dell'elica, questa sembra essere posizionata in posizione orizzontale, quindi nelle simulazioni manterremo questa configurazione.

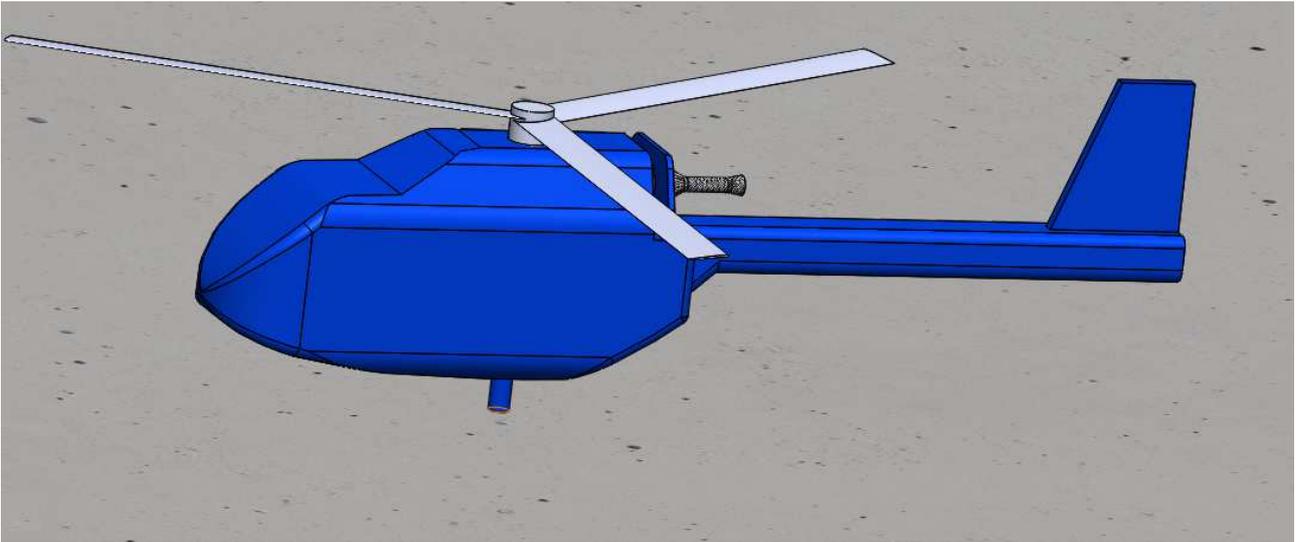
È stato necessario apportare delle modifiche anche alla parte posteriore del cofano motore dell'elicottero, semplificando la rete vista nei disegni dei paragrafi precedenti con un'apertura totale, eliminando quindi le fenditure, sempre ai fini della simulazione di flusso. È stata quindi lasciata una superficie separata dal corpo dell'elicottero di 160mm, che è la lunghezza degli intagli applicati sul cofano motore, sulla quale andrà poi montato l'exhaust augmenter con il radiatore.



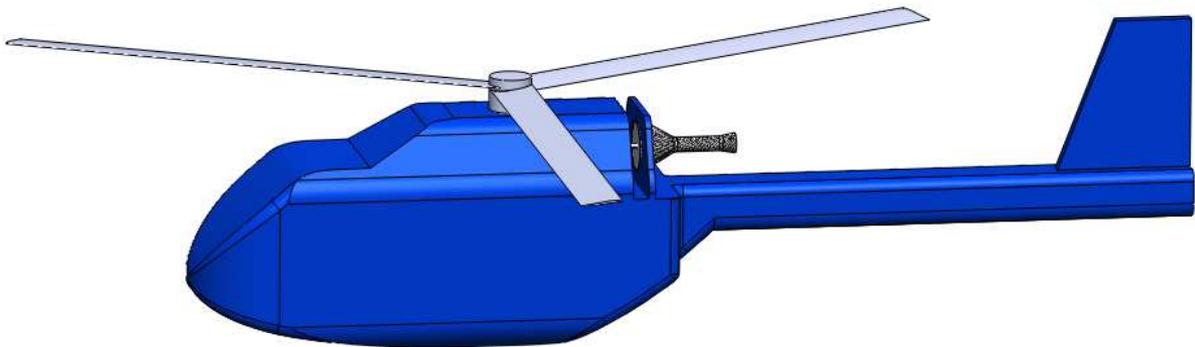
*Immagine 5.13: zoom della parte posteriore dell'elicottero*

Una volta disegnati, tutti i componenti sono stati assemblati e si è poi passati alle simulazioni di flusso. Inizialmente sono state effettuate tre simulazioni di flusso con parametri rappresentanti diverse condizioni, per mettersi nelle condizioni peggiori in cui potrebbe venire a trovarsi l'elicottero:

- Simulazione di decollo in condizioni ISA -50 a 0m, ossia la condizione in cui l'elicottero si trovi a decollare sul livello del mare, con una temperatura esterna di 238.15 K e una pressione di 101325 Pa
- Simulazione di hovering in condizioni ISA -50 a 1000m, dove è stato eliminato il terreno per valutare il raffreddamento dell'elicottero una volta in quota, ad una temperatura quindi di 231.65 K e ad una pressione di 89874.6Pa.
- Simulazione di decollo in condizioni ISA -50 a 1000m. Questa condizione è stata simulata per verificare che, in caso di decollo a 1000m, il motore abbia comunque un adeguato raffreddamento. I valori della temperatura e della pressione sono gli stessi della simulazione precedente, ma in questo caso c'è l'aggiunta del terreno ai piedi dell'elicottero.



*Immagine 5.14: elicottero assemblato a terra*



*Immagine5.15: elicottero assemblato in volo*

Per una simulazione più realistica è stata anche impostata la rotazione delle pale, tramite il comando “rotating region”, che ci permette di simulare la rotazione degli elementi racchiusi all’interno della regione considerata, impostando la velocità di rotazione in rad/sec. La velocità periferica di rotazione delle pale presa in

considerazione è di  $0,93 \cdot \text{Mach}$ . Qui di seguito verrà banalmente calcolata la velocità di rotazione delle pale.

Consideriamo prima il calcolo nella condizione ISA -50 a 1000m di quota, dove la velocità del suono risulta essere di 335,113m/s. Avremo quindi:

$$V_{p1000} = 0,93 * \text{Mach} = 0,93 * 335,113 \simeq 283,75 \frac{m}{s}$$

Considerando la lunghezza di una pala come la metà del diametro dell'elica totale:

$$R = \frac{10000}{2} = 5000 \text{ mm} = 5m$$

Con questi dati possiamo calcolare la velocità angolare dell'elica:

$$\omega_{1000} = \frac{V_{p1000}}{R} = \frac{283,75}{5} = 56,75 \frac{rad}{sec}$$

Nel caso in cui ci si trovi sul livello del mare, la velocità del suono aumenterebbe, raggiungendo un valore di 309.364 m/s. Ripetendo i calcoli si ottiene:

$$V_{p0} = 0,93 * 309,364 = 286,7 \frac{m}{s}$$

$$\omega_0 = \frac{286,7}{5} = 57,54 \frac{rad}{sec}$$

Essendo, quella tra le due velocità angolari, una differenza irrilevante ai fini delle nostre simulazioni, verrà sempre considerata una velocità di rotazione di 56,75 rad/sec.

Una volta calcolata la velocità angolare dell'elica, non resta che impostare le diverse simulazioni, ricordandosi d'impostare il radiatore come un setto poroso e d'impostare le giuste condizioni al contorno dello scarico, ossia una velocità dei fumi di 386 m/s ed una temperatura di 923,15 K. Durante le simulazioni si è incorsi principalmente in un problema, ossia l'impossibilità di selezionare la presenza di flussi supersonici all'interno del dominio. Infatti questa possibilità veniva meno dal momento in cui veniva impostata la presenza di una regione rotante (rotating region). Le simulazioni sono comunque state effettuate ed i risultati sono sembrati

accettabili, esclusa la simulazione dell'elicottero in volo in condizione di hovering, per la quale è stato necessario ripetere più volte la simulazione per ottenere dei risultati plausibili. Di seguito verranno elencate le immagini relative alle diverse simulazioni.

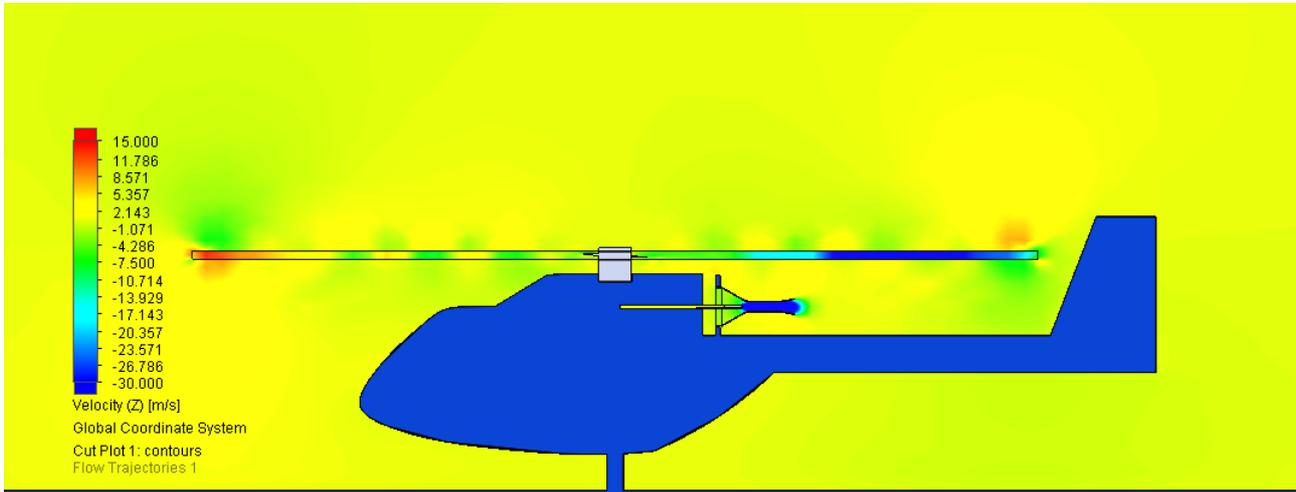


Immagine 5.16: simulazione del decollo in condizioni ISA-50 a 0m di altitudine. Rappresentazione dell'andamento delle velocità nei dintorni dell'elicottero.

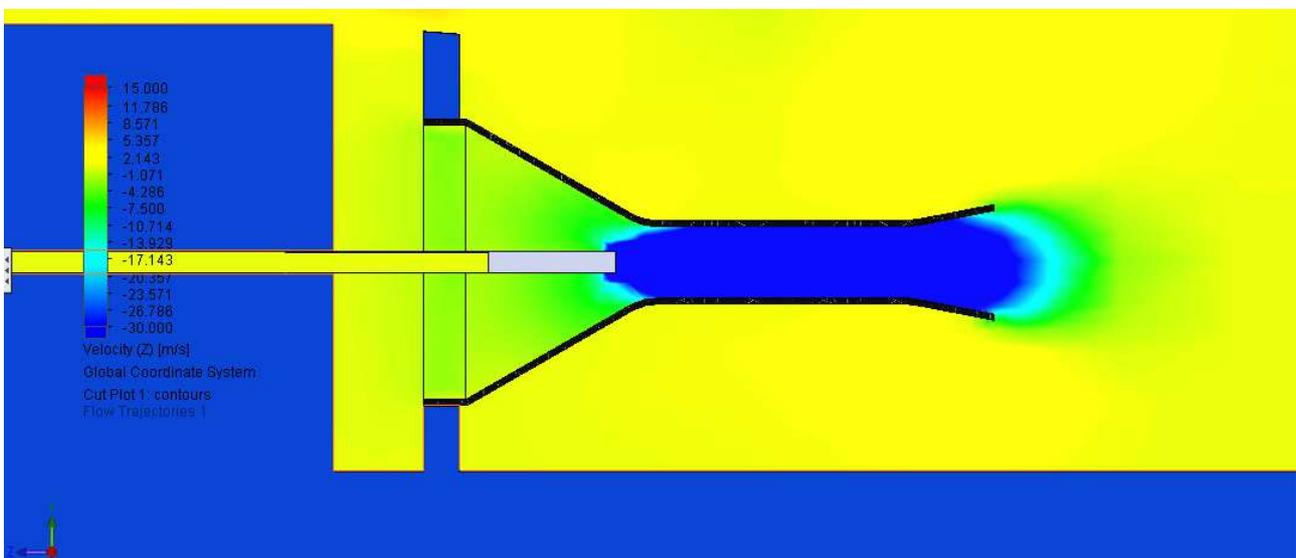


Immagine 5.17: simulazione del decollo in condizioni ISA-50 a 0m di quota. Dettaglio delle velocità all'interno dell'exhaust augmenter.

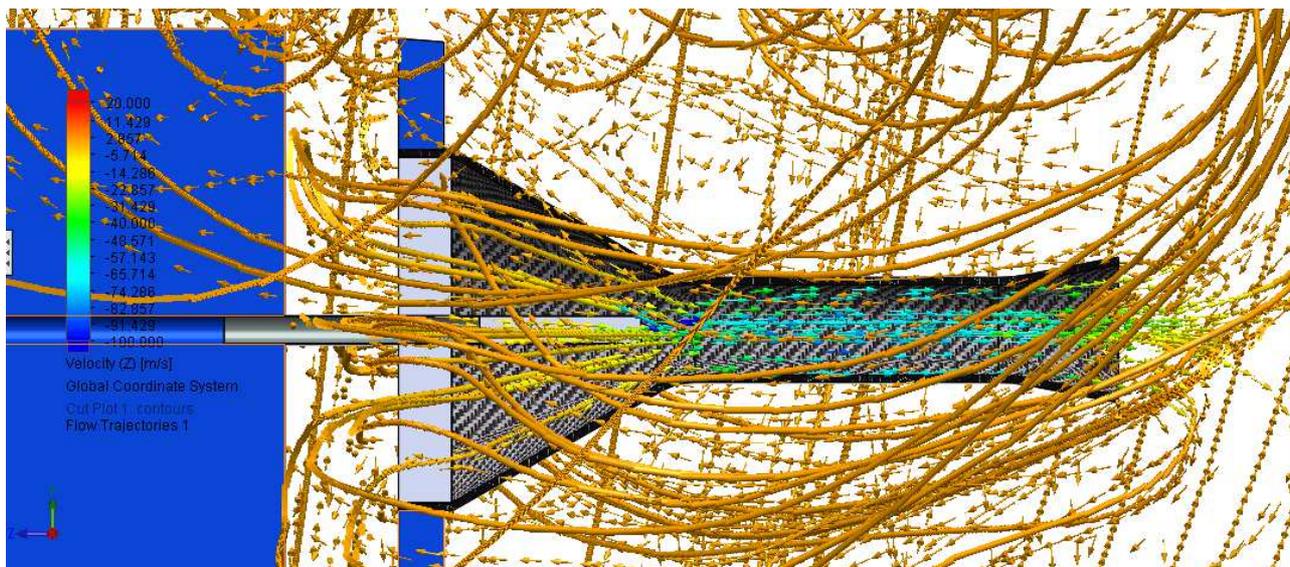


Immagine 5.18: simulazione del decollo in condizioni ISA-50 a 0m di quota. Rappresentazione tramite frecce delle velocità nei dintorni dell'elicottero.

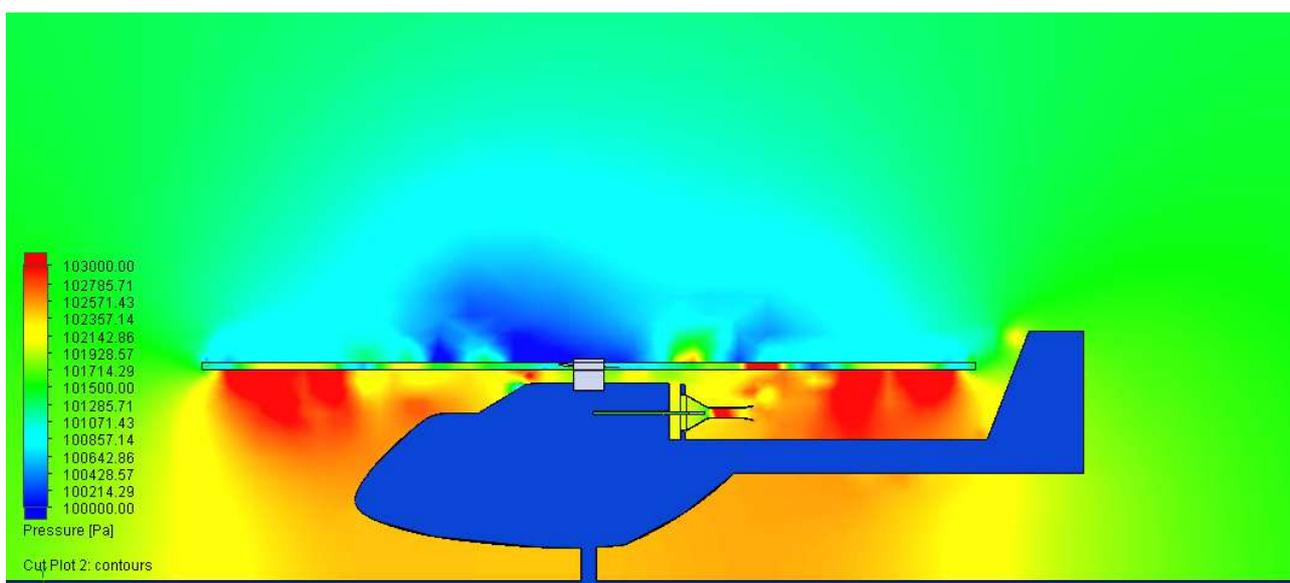


Immagine 5.19: simulazione del decollo in condizioni ISA-50 a 0m di quota. Rappresentazione generale dell'andamento delle pressioni intorno all'elicottero.

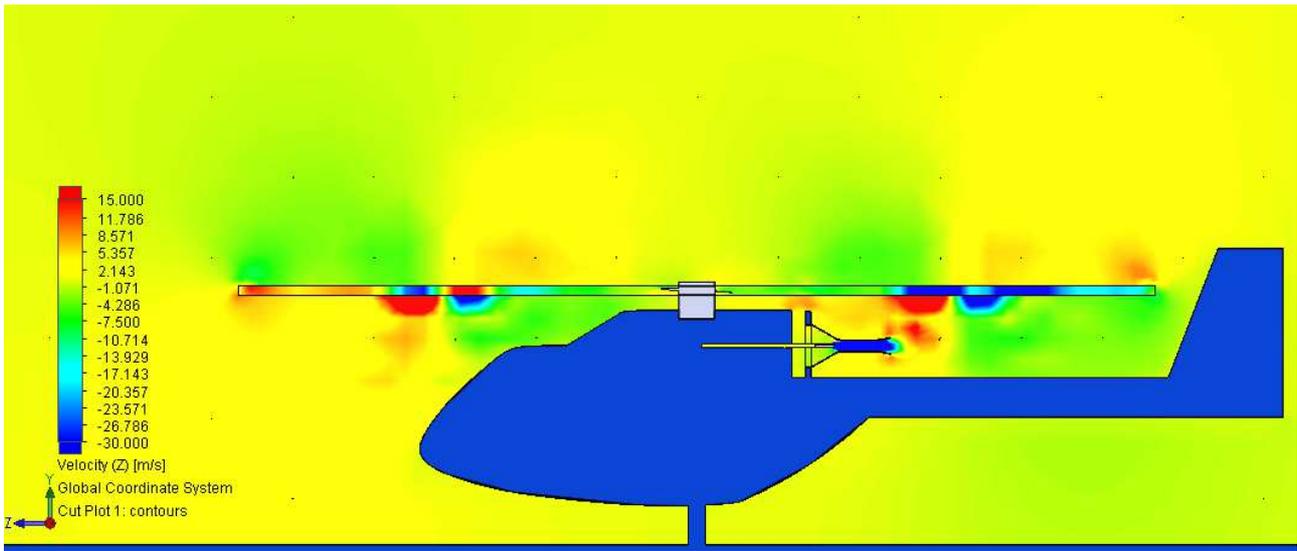


Immagine 5.20: simulazione del decollo in condizioni ISA-50 a 1000m di quota. Rappresentazione dell'andamento delle velocità nei dintorni dell'elicottero.

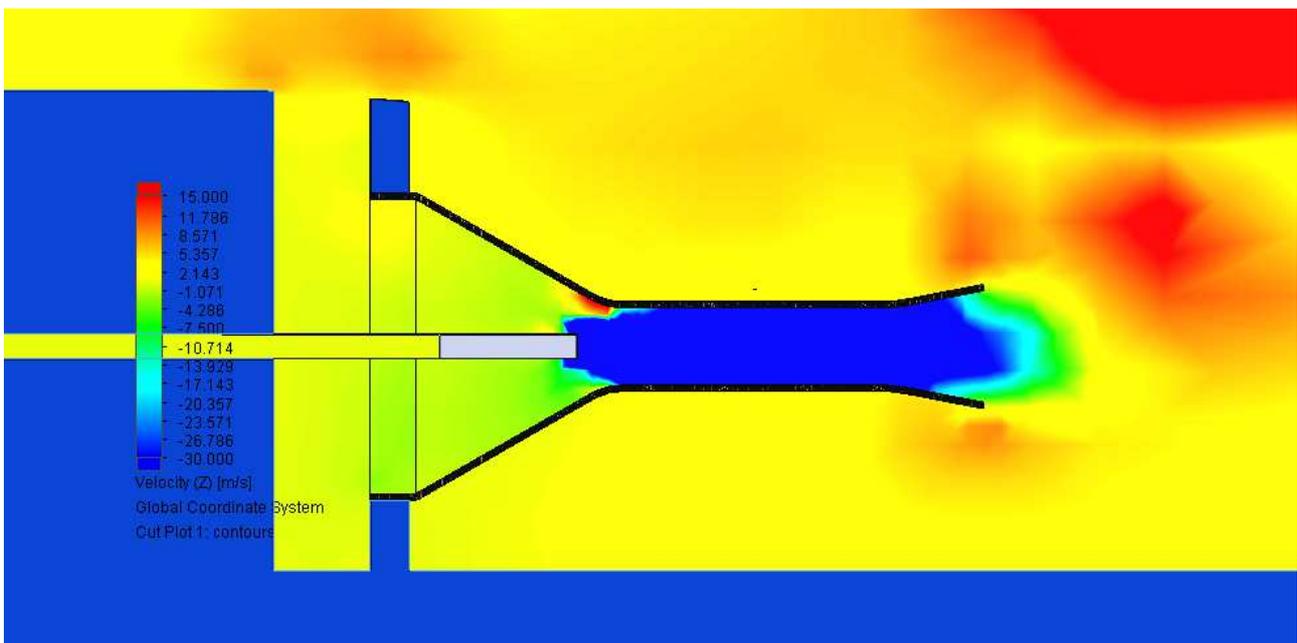


Immagine 5.21: simulazione del decollo in condizioni ISA-50 a 1000m di altitudine. Dettaglio delle velocità all'interno dell'exhaust augmenter.

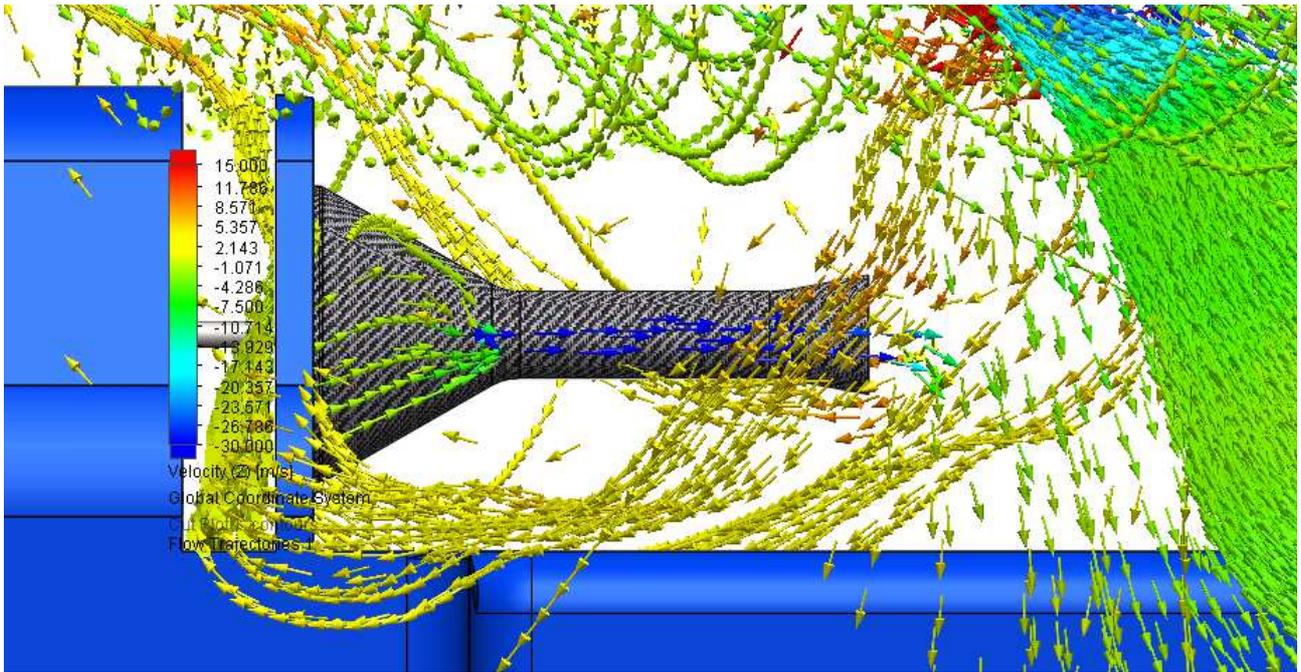


Immagine 5.22: simulazione del decollo in condizioni ISA-50 a 1000m di altitudine. Rappresentazione tramite frecce delle velocità all'interno dell'exhaust augmenter.

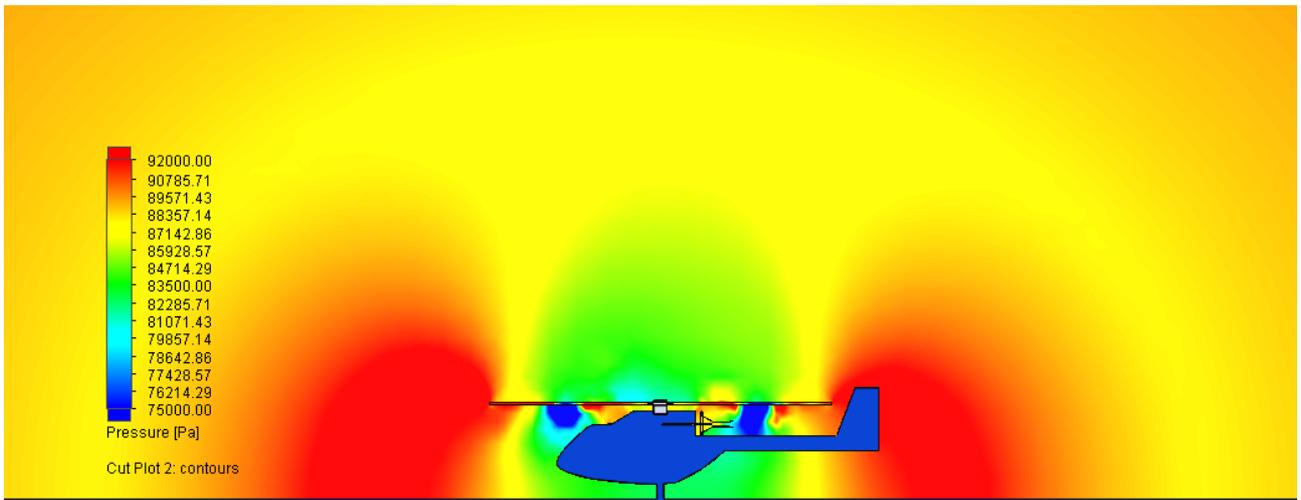
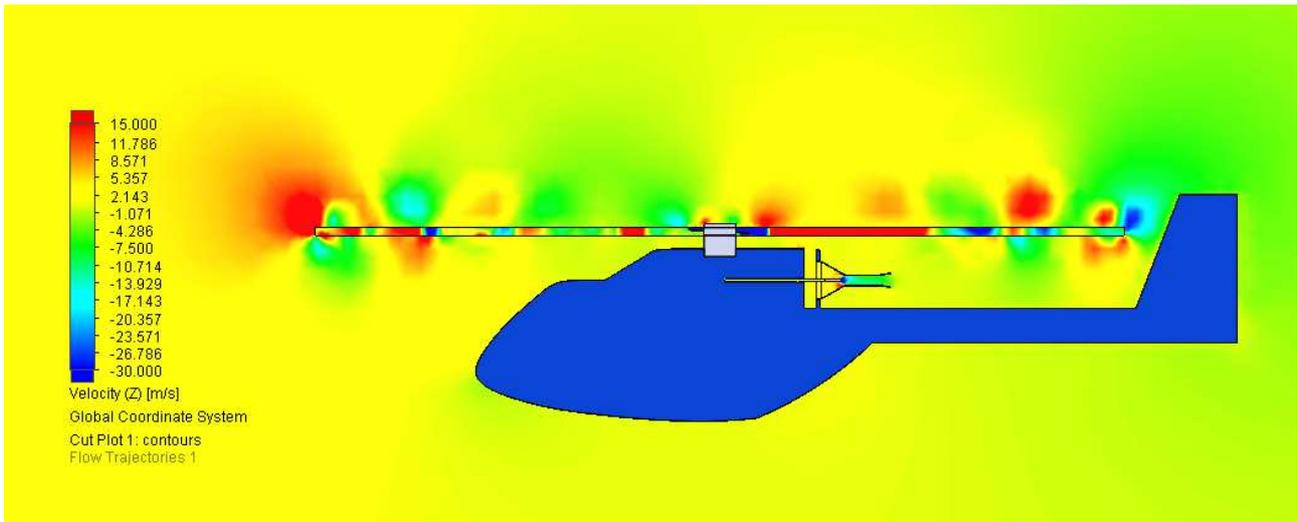
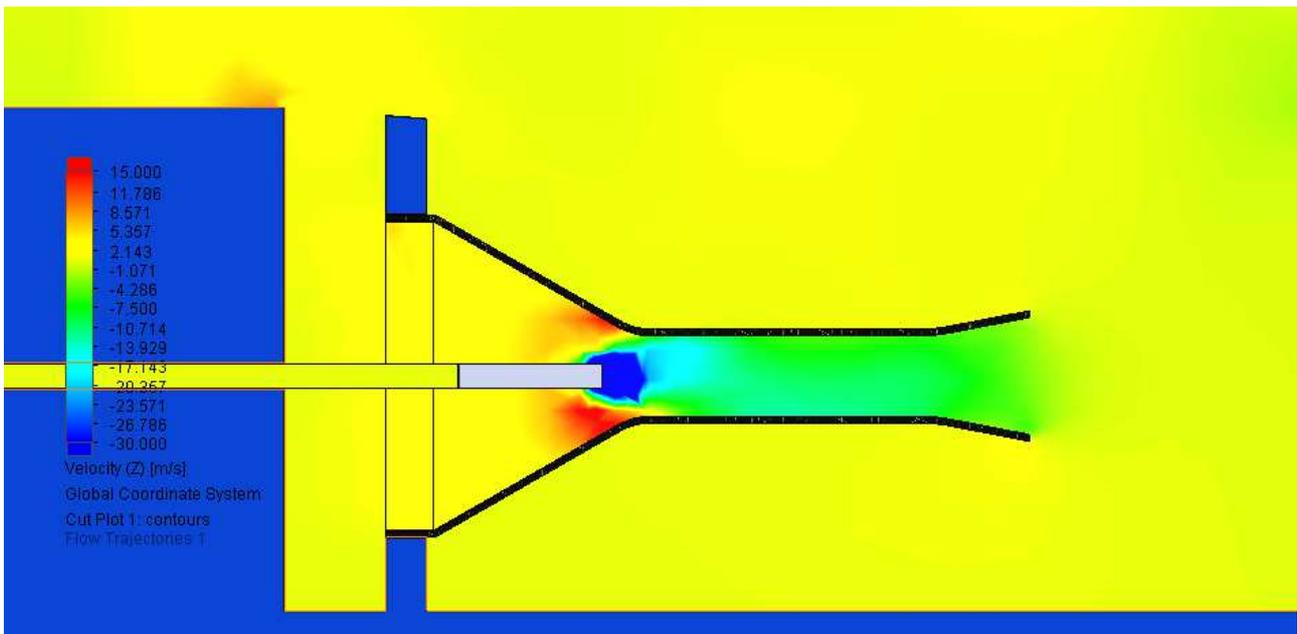


Immagine 5.23: simulazione del decollo in condizioni ISA-50 a 1000m di altitudine. Rappresentazione generale dell'andamento delle pressioni intorno all'elicottero.



*Immagine 5.24: simulazione di hovering in quota in condizioni ISA-50 a 1000m di altitudine. Rappresentazione dell'andamento delle velocità nei dintorni dell'elicottero.*



*Immagine 5.25: simulazione di hovering in quota in condizioni ISA-50 a 1000m di altitudine. Dettaglio delle velocità nei dintorni dell'elicottero.*

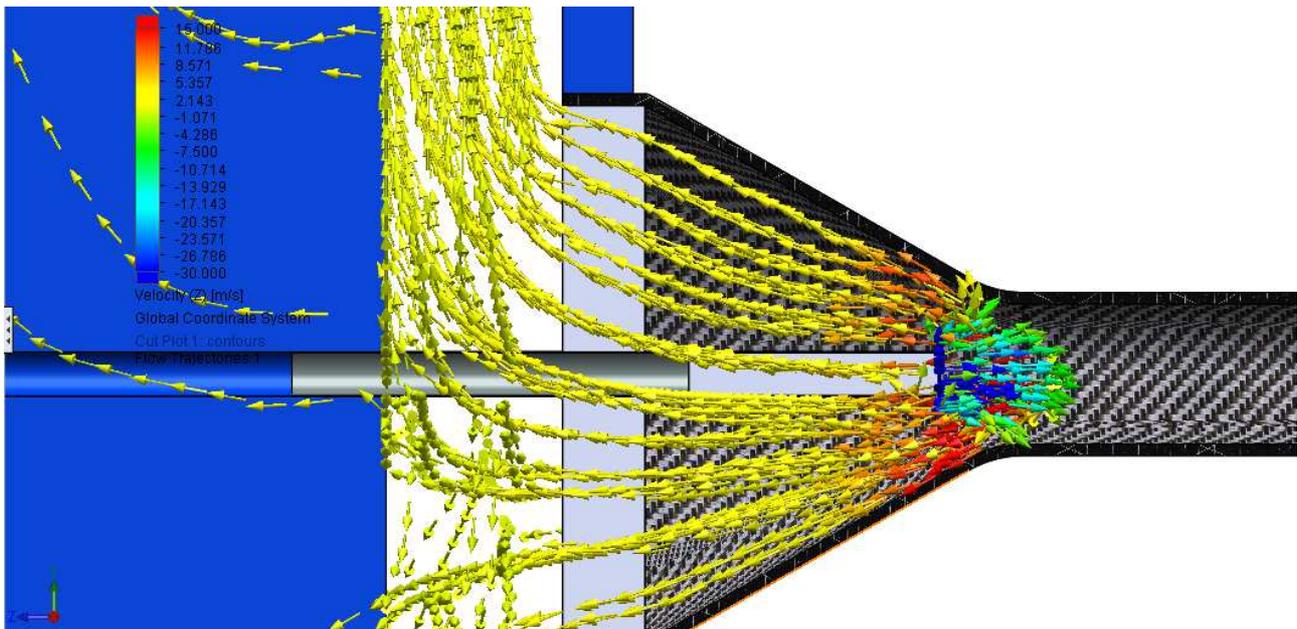


Immagine 5.26: simulazione di hoovering in quota in condizioni ISA-50 a 1000m di altitudine. Rappresentazione tramite frecce delle velocità nell'interno dell'exhaust augmeter.

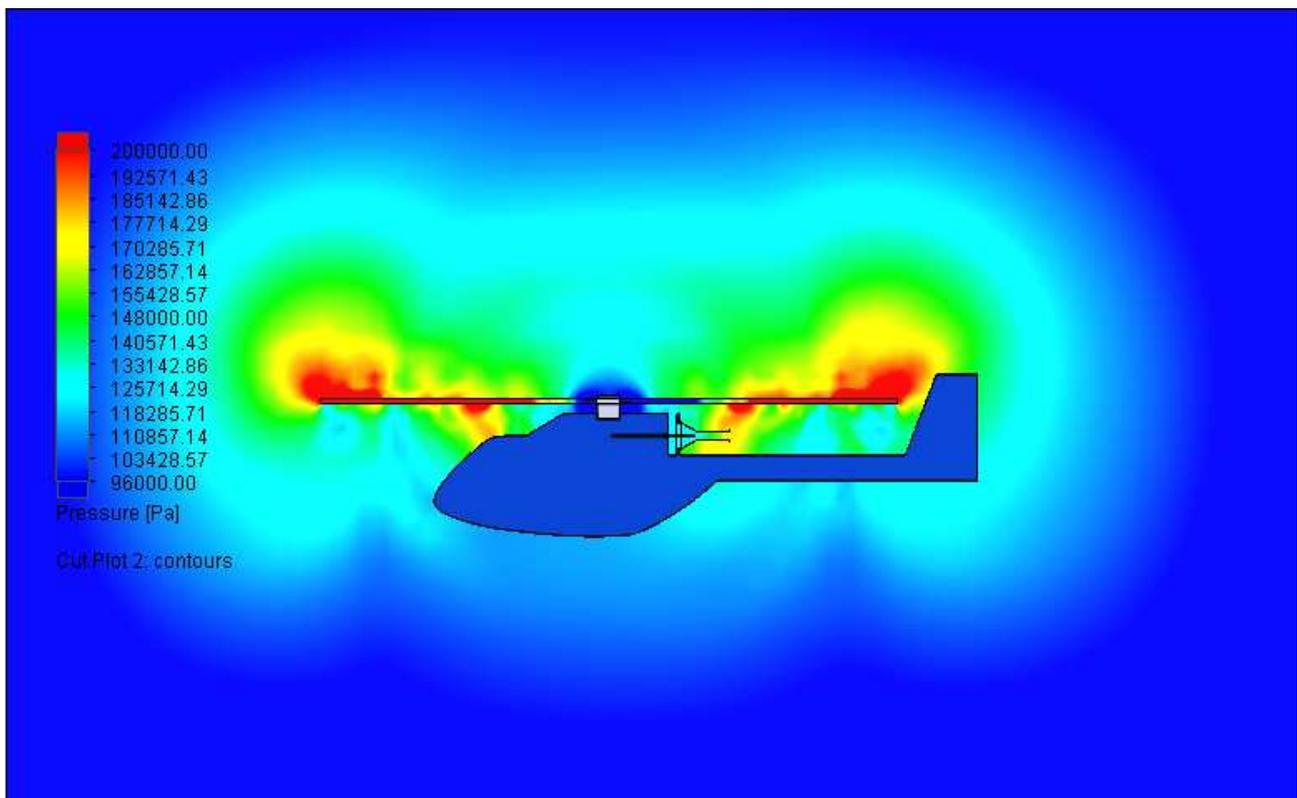


Immagine 5.27: simulazione di hoovering in quota in condizioni ISA-50 a 1000m di altitudine. Rappresentazione generale dell'andamento delle pressioni intorno all'elicottero.

Quello che si nota da queste simulazioni è che fondamentale è sbagliato il posizionamento dello scarico dell'exhaust augmenter. Infatti si ha sempre una condizione nella quale l'aspirazione si trova ad una pressione minore di quella di espulsione, generando un passaggio dell'aria nel verso opposto a quello richiesto, come illustrato nelle figure rappresentanti le velocità tramite frecce. Il caso più eclatante lo si può notare nella terza simulazione, dove l'andamento dell'aria è addirittura opposto a quello da noi voluto.

# Capitolo 6 – Proposte di soluzione

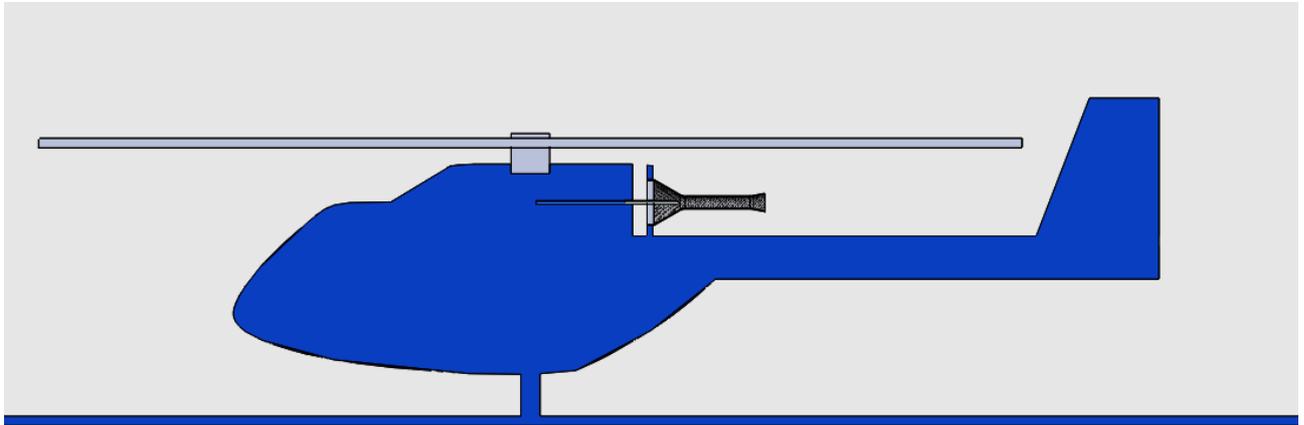
## 6.1 Analisi del problema

Come osservato nel capitolo precedente, si è riscontrato un problema nel funzionamento dell'exhaust augmenter. Osservando attentamente le simulazioni si può arrivare ad ipotizzare diverse soluzioni, basandosi sempre sull'analisi delle pressioni nei dintorni dell'elicottero. Osservando infatti le immagini del capitolo precedente, si nota che la zona in cui l'exhaust augmenter dovrebbe scaricare il gas è collocata a più alta pressione rispetto a quella in cui aspira aria dall'esterno. Questo ci spinge a cercare una nuova configurazione sia per l'exhaust augmenter, che deve essere spostato più verso la coda dell'elicottero, sia per la presa d'aria, posizionandola in una zona di più alta pressione. Le simulazioni relative alle prossime ipotesi di soluzioni, saranno effettuate tutte in condizioni ISA-50 ad una quota di 1000m, essendo questa la condizione che ha generato le condizioni peggiori per il funzionamento dell'exhaust augmenter.

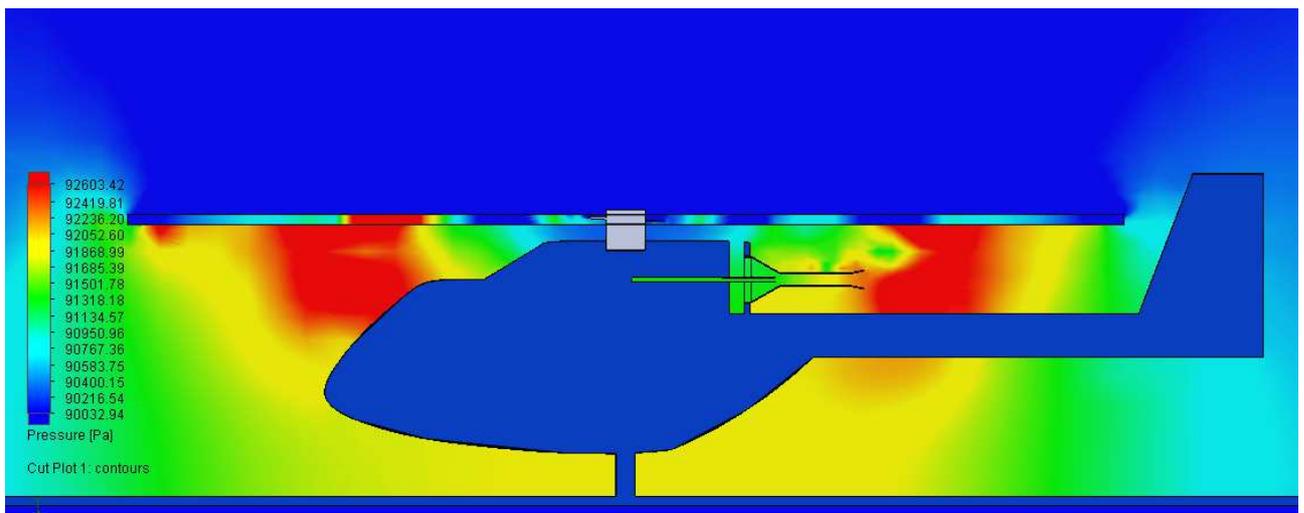
## 6.2 Ipotesi di soluzione 1

La prima soluzione ipotizzata è quella che prevede di lasciare invariata la configurazione iniziale dell'aspirazione, quindi quella considerata nel capitolo precedente, ma di utilizzare un exhaust augmenter più lungo, in modo da portare lo scarico dello stesso in una zona di più bassa pressione. Utilizzeremo l'exhaust augmenter analizzato con le prime simulazioni ed utilizzato anche nel capitolo sopra, quindi quello con il settore di miscelazione lungo 720mm. Si è pensato a questa soluzione in modo tale da mantenere contenuti i pesi, senza dover creare

un condotto che attraversi longitudinalmente l'elicottero. La configurazione ottenuta è la seguente:



*Immagine 6.1: sezione della configurazione con cofano motore semplificato ed exhaust augmenter lungo.*



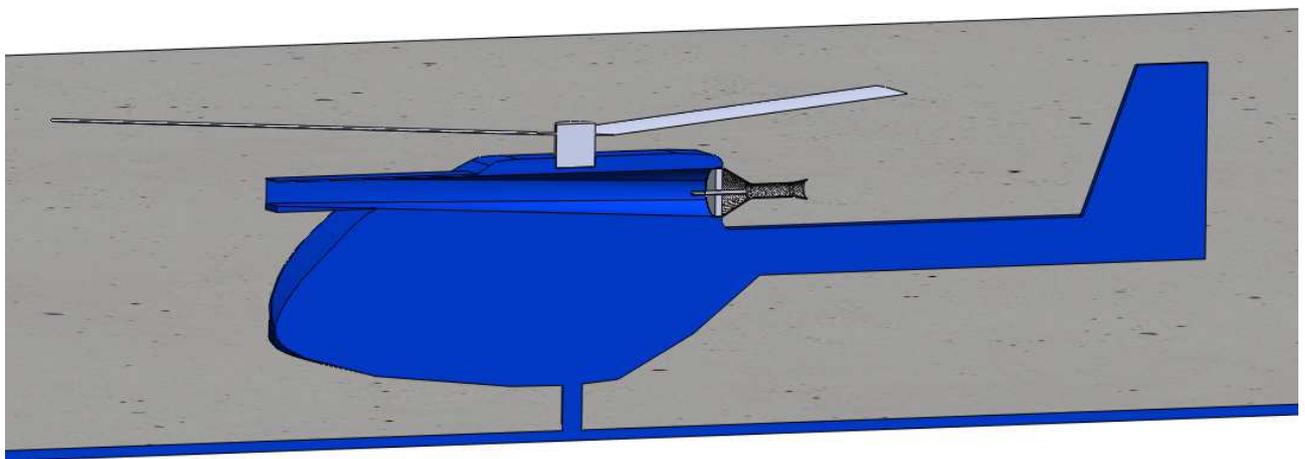
*Immagine 6.2: simulazione delle pressioni nei dintorni dell'elicottero.*

Osservando l'immagine rappresentante l'andamento delle pressioni, ci si può rendere conto di non aver trovato una situazione ottimale per l'exhaust augmenter, in quanto la zona di scarico dello stesso si trova in una zona di più alta pressione rispetto alla pressione regnante nella zona di aspirazione. Per questo motivo è stato valutato superfluo continuare con la simulazione comprendente i gas di

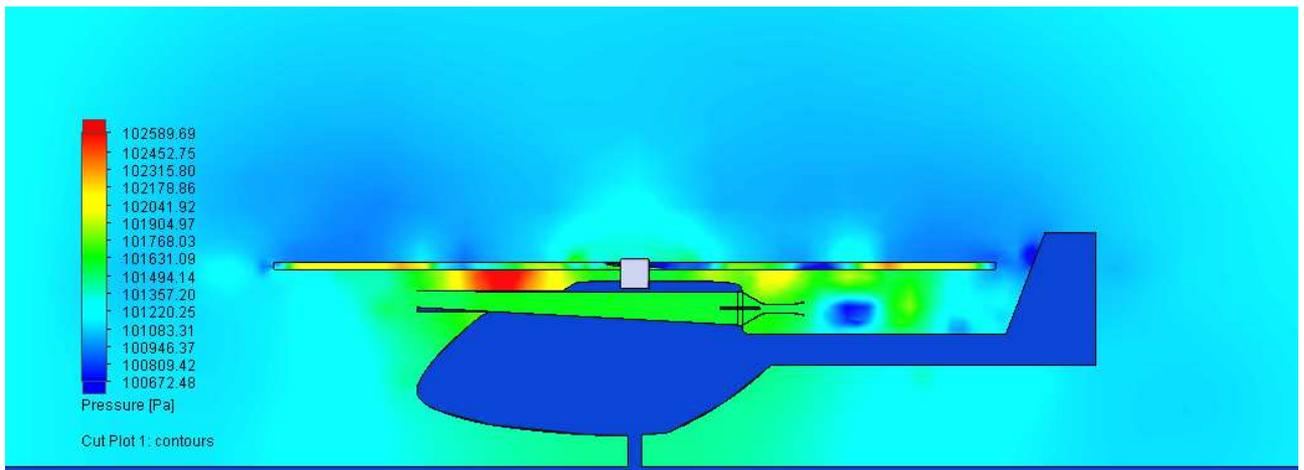
scarico, scartando questa configurazione per la stessa motivazione della precedente.

### 6.3 Ipotesi di Soluzione 2

Come seconda soluzione ci si è proposti di spostare la presa d'aria sulla parte anteriore dell'elicottero, ispirandoci ad altri modelli di elicotteri visti. È stato lasciato inizialmente l'exhaust augmenter più corto, con il settore di miscelazione da 446mm. Prima di procedere con le simulazioni complete, includendo anche i gas di scarico, è stato ritenuto opportuno fare una simulazione escludendoli, in modo da individuare le zone di alta e bassa pressione che si generano intorno all'elicottero. Questa configurazione ha l'ulteriore vantaggio di raffreddare anche il rotore della pala.

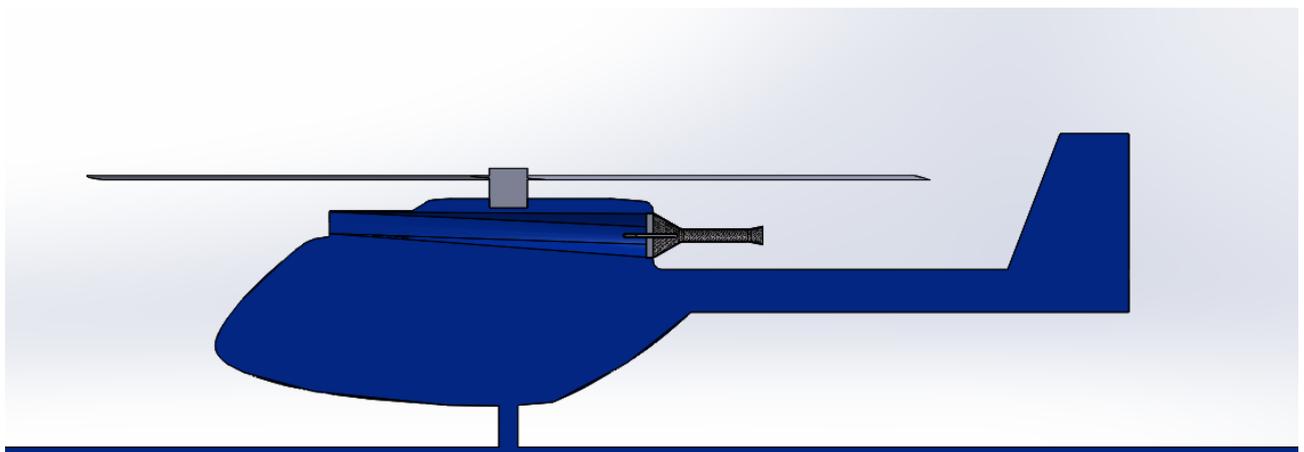


*Immagine 6.3: ipotesi di soluzione 1*



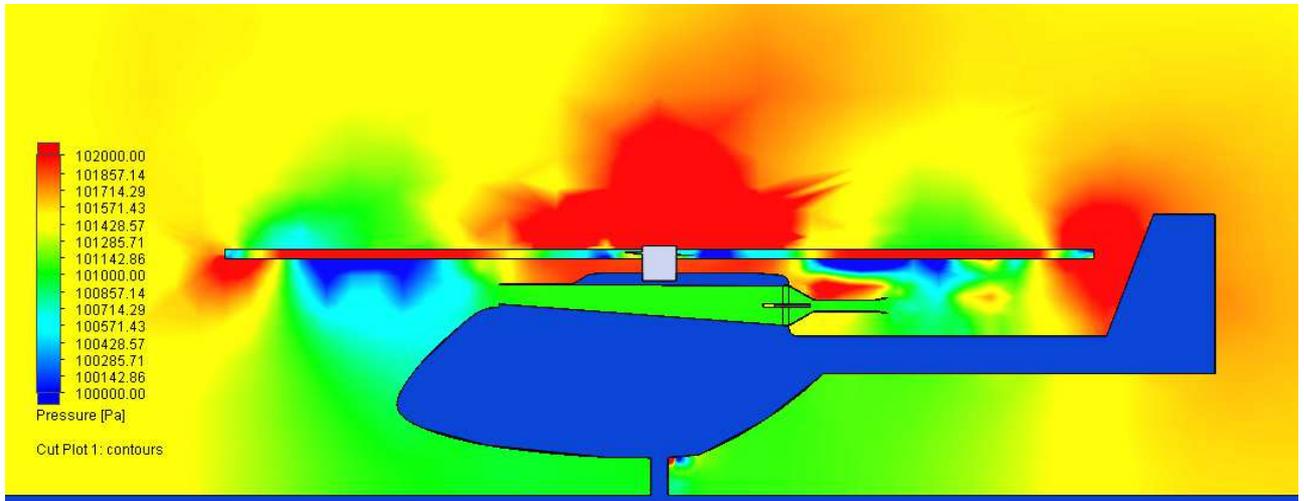
*Immagine 6.4: Risultato della simulazione per la valutazione dell'andamento delle pressioni intorno all'elicottero.*

Come si vede dalla seconda immagine, la simulazione evidenzia due regioni importanti dell'area circostante l'elicottero: una frontale di alta pressione ed una posteriore di bassa pressione. Questo è esattamente quello che stavamo cercando, quindi ora potremo modificare il condotto d'aspirazione in modo da posizionarlo nella zona migliore. Per quanto riguarda, invece, la zona posteriore, proveremo ad utilizzare l'exhaust augmenter con il settore di miscelazione iniziale, ovvero quello con una lunghezza di 720mm.



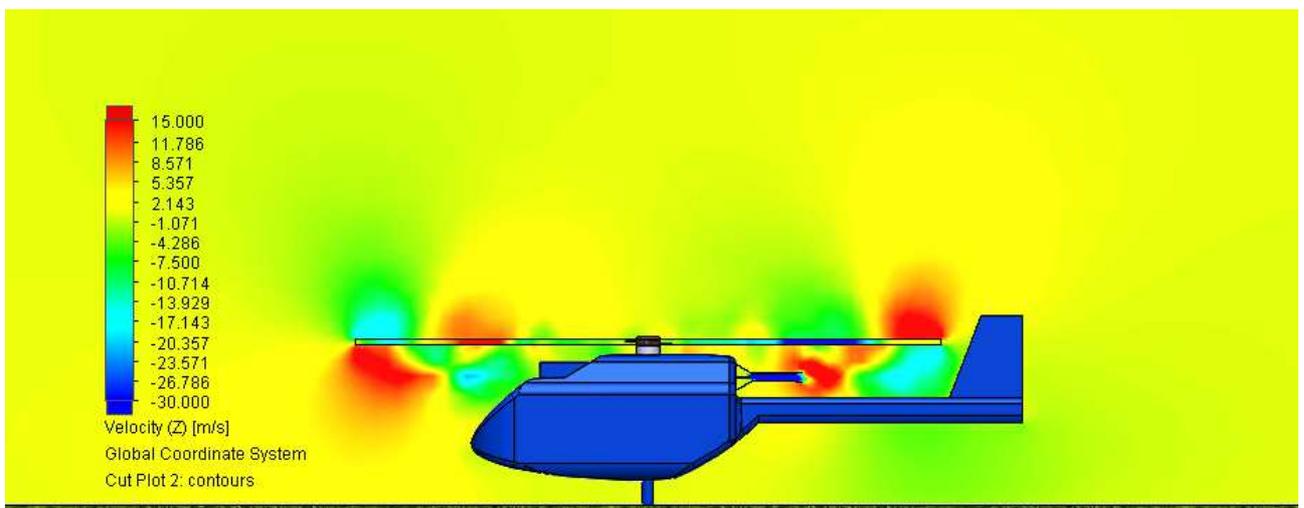
*Immagine 6.5: sezione con il condotto d'aspirazione accorciato ed exhaust augmenter con sezione di miscelazione di 720mm*

Come nel caso precedente è stata fatta prima una simulazione escludendo i gas di scarico, in modo da poter valutare esclusivamente la presenza di zone ad alta e bassa pressione.



*Immagine 6.6: Simulazione dell'andamento delle pressioni intorno all'elicottero.*

Esaminando l'immagine 6.6, si può osservare un miglioramento rispetto a tutte le altre configurazioni fino ad ora prese in considerazione. È stato quindi ritenuto opportuno procedere con una simulazione di flusso che includesse anche i gas di scarico.



*Immagine 6.7: simulazione delle velocità longitudinali.*

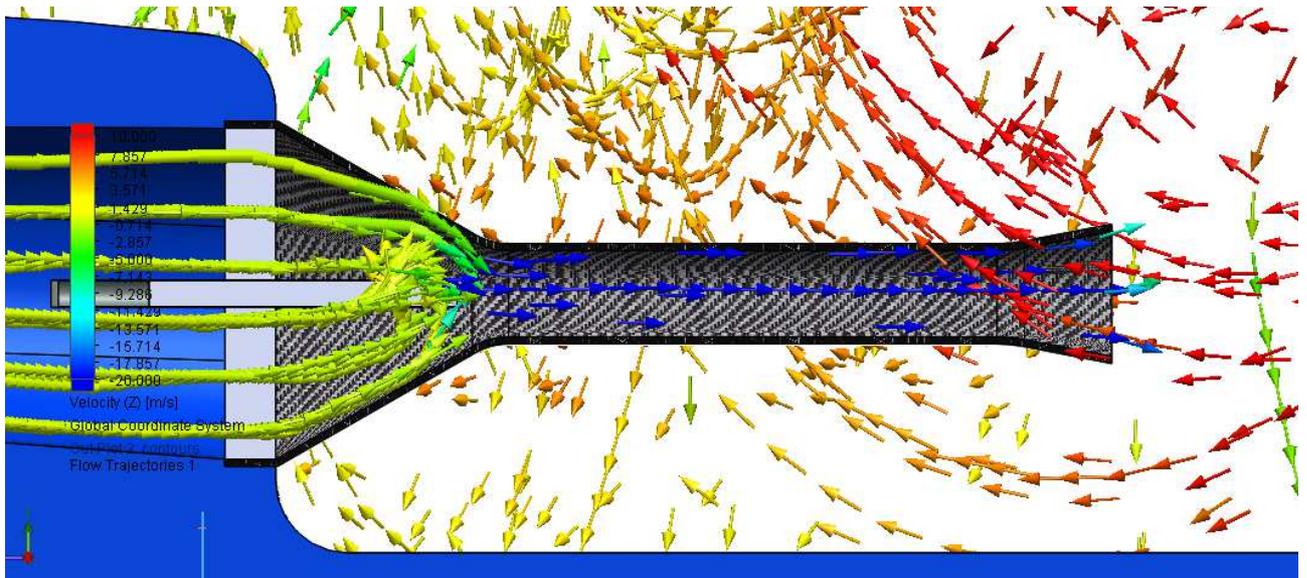


Immagine 6.8: Simulazione con inclusi i gas di scarico. Rappresentazione delle velocità all'interno dell'exhaust augmenter.

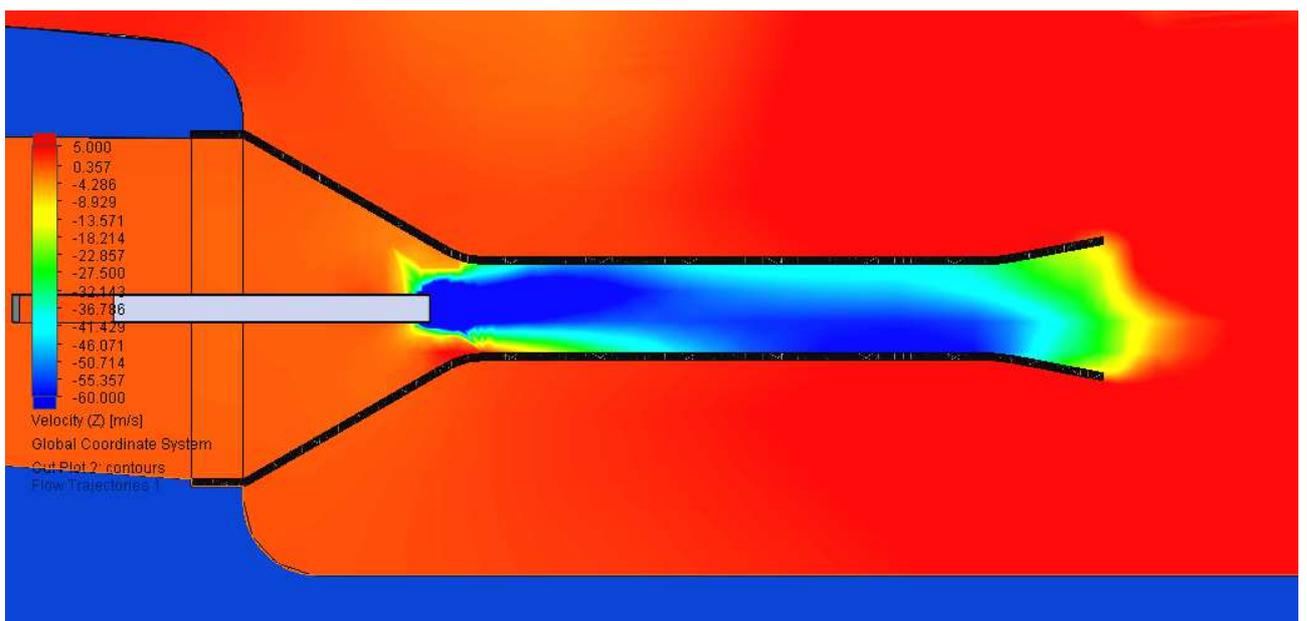


Immagine 6.9: dettaglio delle velocità complessive all'interno dell'exhaust augmenter nella simulazione con i gas di scarico inseriti.

La configurazione così ottenuta risulta accettabile per ottenere un adeguato raffreddamento del motore. Questa configurazione andrà poi testata nelle stesse condizioni in cui è stata testata anche quella analizzata nel capitolo precedente.

Il problema di questa configurazione sta nel dimensionare un condotto ottimale, tenendo in considerazione anche il posizionamento del motore.

# Capitolo 7 – Conclusioni

## 7.1 Considerazioni sui materiali

Nulla è ancora stato detto riguardo ai materiali che verranno utilizzati per la costruzione dei vari componenti dell'impianto di raffreddamento. Questi andranno ad incidere notevolmente sul peso finale dell'elicottero.

Tenendo in considerazione gli aspetti importanti di questo progetto, avremo bisogno sicuramente di materiali leggeri. Per costruire l'exhaust augmenter e limitare l'apporto di peso si è pensato inizialmente alla vetroresina, ma, considerando le elevate temperature ( $\sim 200^{\circ}\text{C}$ ) a cui dovrà lavorare a regime, potrebbe causare qualche problema. Si è così deciso di realizzare i condotti in fibra di carbonio e resine epossidiche, che garantiscono un'elevata leggerezza e soprattutto buone proprietà meccaniche, anche ad elevate temperature, quali quelle menzionate.

Per quanto riguarda il radiatore, questo sarà costruito in alluminio, materiale già molto leggero che sembra perciò rappresentare un'ottima soluzione, in quanto, tra l'altro, già ampiamente utilizzato anche per la costruzione di radiatori di uso automobilistico.

Per quanto riguarda lo scarico, è normalmente impiegato un acciaio inossidabile, poiché questo deve sottostare ad elevate sollecitazioni termiche. Un gruppo di acciai inossidabili molto utilizzato è quello ottenuto aggiungendo una certa quantità di alluminio, il quale forma, con il cromo, un ossido in grado di resistere alla corrosione ed all'usura anche nell'ambiente da noi preso in considerazione. I principali acciai inossidabili sono quindi necessariamente al cromo oppure al nichel-cromo.

È comunque possibile utilizzare la fibra di carbonio con resina epossidica, la quale è in grado di resistere fino a 1100°C può quindi risultare indicata per il nostro fine.

## 7.2 Conclusioni

Il lavoro svolto in questa tesi aveva come scopo principale la valutazione dell'utilizzo di un exhaust augmenter per il raffreddamento di un motore diesel montato su un elicottero modello Eurocopter EC120 Colibrì. Come abbiamo visto ed ampiamente discusso nei capitoli precedenti, il modello inizialmente preso in considerazione non era in grado di garantire un adeguato raffreddamento al motore. Questa considerazione si basa sull'analisi delle simulazioni fatte nelle varie configurazioni dalle quali, come abbiamo potuto appurare, risulta addirittura un flusso d'aria di verso opposto da quello da noi atteso. Il risultato ottenuto è comunque sicuramente ottimo, anche se non quello auguratoci, poiché, basandoci su questo, sappiamo come procedere con la ricerca di una soluzione efficiente, ma soprattutto abbiamo constatato l'inefficacia di questa configurazione senza aver dovuto affrontare oneri dal punto di vista economico per la costruzione ed il test.

Questo risultato non implica che l'utilizzo degli exhaust augmenter per questo fine sia da considerarsi un fallimento ma, più semplicemente, che la configurazione da noi analizzata non fornisca risultati soddisfacenti. Abbiamo già detto che le scarse prestazioni ottenute da questa configurazione sono connesse al posizionamento nelle zone sbagliate sia della presa d'aria che della sezione di scarico dell'exhaust augmenter.

Nell'ultimo capitolo abbiamo offerto infatti soluzioni plausibili, cercando dei punti tattici per il posizionamento di queste parti. Sono state proposte così due configurazioni risolutive, che potrebbero risolvere il problema. Le analisi ottenute hanno fornito dei dati interessanti che spingono ad approfondire l'argomento

lavorando sia sul miglioramento delle posizioni, sia sulle forme dei condotti. Restano comunque da analizzare e testare queste due ipotesi di soluzione, o delle nuove configurazioni, prima di considerare risolto il problema del raffreddamento di un motore diesel su un elicottero tramite exhaust augmenter.

## **Bibliografia**

- 1) Daniel R. Nicoson, Cooling Systems with Exhaust Augmenters;
- 2) NACA report No. 818, an experimental investigation of rectangular exhaust-gas ejectors applicable for engine cooling;
- 3) Tesi di Michele Gardella, studio e ottimizzazione della rimotorizzazione di un elicottero a turbina con un motore diesel;
- 4) Tesi di Paris Monesi, studio, ottimizzazione e valutazione prestazioni di un diesel per elicottero;
- 5) Tesi di Riccardo Bagnara, studio e ottimizzazione di un propulsore diesel avanzato per elicotteri leggeri;

## **Sitografia**

<http://www.digitaldutch.com/atmoscalc/>

<http://www.eurocopter.com>

<http://airbushelicoptersinc.com/products/EC120-specifications.asp>

[https://it.wikipedia.org/wiki/Eurocopter\\_EC\\_120\\_Colibri](https://it.wikipedia.org/wiki/Eurocopter_EC_120_Colibri)

<http://www.aersud.it/modelli/h120-colibri-ec-120-b/>

## **Programmi utilizzati**

Solidworks 2014

## Ringraziamenti

Sono quindi giunto al termine di questa tanto bramata quanto sudata triennale. Non posso sicuramente dire che sia stata una cosa facile arrivare, per quanto mi sia ancora possibile dirlo, sano di mente alla fine. Mi sembra quindi giusto scrivere due righe di ringraziamento. Un doveroso GRAZIE va ai miei genitori ed a mio fratello che, non senza difficoltà, mi sono sempre stati vicini, senza dubitare mai delle mie capacità o della mia persona. Senza il loro supporto questo traguardo non sarebbe stato raggiungibile. Secondo alcuni è semplicemente un dovere da genitore quello di rendere possibile ai propri figli il realizzarsi dei propri sogni facendo loro stessi dei sacrifici non banali, ma ritengo che questa cosa non sia da ritenere così scontata, penso, anzi, per questo di potermi ritenere un ragazzo fortunato. Un ringraziamento va anche ai miei nonni ed ai miei zii, i quali sono sempre stati pronti ad accogliermi calorosamente nei miei rientri a casa e non solo.

Nel corso di questi anni ho avuto modo di conoscere un sacco di persone tra colleghi, coinquilini e semplicemente persone incontrate per caso, alcune delle quali sono poi passate dall'essere semplici conoscenti ad amici; iniziare un percorso con persone totalmente sconosciute, con le quali si condivide inizialmente solo la voglia di studiare e concluderlo potendole ritenere parte della propria vita è un'esperienza fantastica. Questo vale maggiormente per i coinquilini avuti nel corso di questi anni e per uno in particolare dei compagni di università. Voglio quindi ringraziare queste persone, che, oltre ad aver contribuito ad arricchire il mio bagaglio culturale, sono riusciti a distogliermi ogni tanto dallo studio ed a rallegrarmi le giornate, facendo risultare il tutto meno gravoso. Un grazie va anche, ovviamente, ai miei cari amici marchigiani, i quali non sono usciti un secondo dalla mia vita; sempre disponibili per una chiacchierata o per fare baldoria, che ci fosse qualcosa da festeggiare o da dimenticare... oppure, perché no, anche qualcosa da far succedere. Un sentito ringraziamento va anche a quelle persone che stanno tra l'amicizia e qualcosa di più, che mi abbiano accompagnato

## Ringraziamenti

negli anni passati o che siano entrate nella mia vita nell'ultimo periodo, mi hanno fornito un forte sostegno ed hanno lasciato un segno indelebile.

Un ringraziamento va anche al mio relatore di tesi, Luca Piancastelli, che mi ha dato la possibilità di sviluppare questa tesi sotto la sua supervisione, contribuendo con il suo sapere, la sua simpatia e la sua disponibilità. Voglio quindi ringraziare tutte le persone che hanno interagito con me durante tutto questo percorso, perché ognuno ha lasciato un segno del suo passaggio, contribuendo così a farmi diventare quello che sono oggi.

L'ultimo ringraziamento va a me stesso che, che nonostante gli ostacoli, sono comunque riuscito a portare a termine questa parte non semplice del mio percorso di studi, anche se non l'ultima.

Detto ciò non vedo il motivo per rimandare ulteriormente i festeggiamenti, mi sembra d'altronde di aver già atteso abbastanza!