

POLITECNICO DI TORINO

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA MECCANICA

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

ANALISI CFD SU SISTEMI DI CONDIZIONAMENTO PER VEICOLI

RELATORI

CANDIDATO

Francesco Gordiano SUMA

Prof. Marco Simonetti

Prof. Marco Carlo Masoero

Dott. Fabio Restagno

Anno Accademico 2017/2018

INDICE

PREFAZIONE

- 1. INTRODUZIONE
 - a. Climatizzazione autoveicoli
 - b. Autoveicoli oggi e futuri
 - c. Perché la CFD
- 2. PROVA DI COOL-DOWN
 - a. Articoli
 - b. Descrizione della prova
 - c. Teoria: analisi a parametri concentrati
- 3. COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC (CFD)
 - a. Introduzione alla CFD
 - b. Equazioni della fluidodinamica
 - c. Software STAR-CMM+
 - d. Modello fisico/numerico
 - i. Mesh
 - ii. Physics Continua
 - iii. Turbolenza
 - iv. Modelli di turbolenza per STAR-CCM+
 - v. Solvers e Stopping Criteria
 - vi. Post-processing
- 4. SIMULAZIONI
 - a. Modello semplice 1
 - b. Modello semplice 2
 - c. Modello finale
 - i. Simulazioni stazionarie con modelli di turbolenza K-Epsilon e K-Omega
 - ii. Simulazioni in regime transitorio con modello di turbolenza K-Epsilon e con diversa finezza della mesh
 - iii. Simulazione in regime transitorio con modello di turbolenza K-Omega
 - d. Modello finale con l'aggiunta dei manichini
 - i. Modello con Solar Load
 - ii. Modello con flussi termici applicati alle superfici esterne
 - iii. Modello con fari
 - e. Modello con sedili ruotati
 - i. Modello con Solar Load
 - ii. Modello con flussi termici applicati alle superfici esterne
 - iii. Modello con fari
- 5. CONCLUSIONI E SVILUPPI

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

PREFAZIONE

Questo lavoro di tesi riguarda la creazione di un modello che rappresenti un autoveicolo con il quale effettuare una analisi CFD di una prova di cool-down, facendo riferimento a dati reali ottenuti da una prova di cool-down effettuata dall'azienda Italdesign.

Le prove di cool-down sono prove che le aziende effettuano sui propri veicoli per testare il potere refrigerante del climatizzatore dell'autoveicolo.

Attraverso l'utilizzo del software STAR-CCM+ è stato creato un modello dotato di scocca, superfici vetrate, sedili, manichini, ingresso ed uscita aria, e due sonde poste in corrispondenza della zona teste, e sono state impostate le condizioni di prova. Sono state effettuate diverse simulazioni in quanto si è preferito partire da un modello più semplice in modo da aggiungere particolari di volta in volta fino ad avvicinarsi quanto più possibile alle condizioni reali della prova.

È stato preso come riferimento il transitorio che si registra nella zona teste dei passeggeri anteriori in quanto la prova di cool-down è utilizzata proprio per valutare la temperatura raggiunta in quelle zone. Una volta che il modello ha raggiunto una certa complessità, è stato confrontato il transitorio di temperatura ottenuto, con il transitorio fornito dall'azienda. Tutti i modelli utilizzati mostrano un transitorio che subisce un raffreddamento iniziale maggiore rispetto al transitorio fornito dall'azienda. La simulazione che più permette di avvicinarsi al transitorio di temperatura reale, è quella che contiene tutti i modelli finali e nonostante questo, si registra sempre un raffreddamento iniziale maggiore ed una temperatura finale raggiunta che risulta essere di qualche grado inferiore rispetto al transitorio fornito.

Anche se i transitori ottenuti dalle simulazioni presentano andamento simile al transitorio reale, e raggiungono circa la stessa temperatura, non si può affermare con certezza se i modelli risultino validati o meno in quanto non è detto che ripetendo una simulazione, si ottengano gli stessi risultati, senza contare il fatto che il punto di misura sul quale l'azienda ha effettuato la misura, potrebbe non coincidere perfettamente con quello scelto nella simulazione.

Poiché sono state comunque ottenute soluzioni soddisfacenti, si è proceduto a studiare una nuova configurazione interna per la cabina, vale a dire ruotando i sedili anteriori di 180 gradi rispetto alla posizione originale in modo che passeggeri anteriori e posteriori si trovino in posizione frontale.

Questa nuova configurazione è la rappresentazione di veicoli futuristici nei quali non è prevista la necessità di un guidatore che quindi può svolgere altre attività all'interno del veicolo. Sono state ripetute le simulazioni in modo da confrontare il transitorio ottenuto da questa nuova

configurazione, con il transitorio ottenuto dalla configurazione standard. In tutti i casi i risultati hanno mostrato un transitorio più lento per la nuova configurazione rispetto alla configurazione standard; anche la temperatura finale raggiunta si attesta a valori superiori rispetto alla configurazione originale.

Da questi risultati si deduce che potrebbero essere necessari modifiche all'impianto di condizionamento (cosa che le aziende vorrebbero evitare) per tentare di ottenere il medesimo transitorio ottenuto per la configurazione originale con sedili in posizione standard.

CAPITOLO 1: INTRODUZIONE

a. Climatizzazione autoveicoli

L'aumento continuo di richiesta di comfort e di sicurezza da parte degli utenti ha spinto i costruttori di autoveicoli alla ricerca di soluzioni mirate all'eliminazione, o quantomeno diminuzione, di tutte quelle fonti di varia origine e natura causa di disagio per i passeggeri.

Dal punto di vista della climatizzazione, questi interventi hanno fatto si che il calore proveniente dall'esterno, fluisse più facilmente all'interno dell'abitacolo, soprattutto attraverso le aumentate superfici vetrate. All'interno degli abitacoli delle vetture si sono determinati livelli termici insopportabili, uniti ad un eventuale alto tasso di umidità, che sono andati a rappresentare un motivo di disagio per gli utenti.

Per mantenere la temperatura e l'umidità interne a livelli desiderati si è applicato all'abitacolo un vero e proprio impianto frigorifero chiamato condizionatore d'aria. Provvedendo ad abbinare al condizionatore un riscaldatore, un opportuno sistema di ventilazione ed un adeguato sistema di regolazione, è possibile mantenere le condizioni climatiche interne dell'abitacolo entro i valori desiderati. Detto apparato prende il nome di climatizzatore.

Nel bilancio termico dell'abitacolo di una vettura, entrano in gioco svariate fonti dalle quali il calore esterno viene trasmesso all'interno attraverso l'irraggiamento solare, aria circostante che si infiltra all'interno, emissione termiche del motore e dei suoi accessori, ed infine il calore prodotto dagli stessi occupanti soprattutto attraverso la respirazione. Tutto questo calore immesso contribuisce all'innalzamento della temperatura interna dell'abitacolo a valori non sopportabili dal corpo umano, pregiudicando il livello di attenzione e quindi di sicurezza.

L'impianto di condizionamento è costituito da quattro elementi principali: evaporatore, compressore, condensatore e valvola di espansione. Lo scopo dell'impianto viene realizzato facendo subire ad un fluido refrigerante, circolante ovviamente nell'impianto, un ciclo termodinamico frigorifero, comprendente salti di pressione realizzati grazie al compressore ed alla valvola di espansione, e trasformazioni dello stato fisico attraverso i due scambiatori di calore, evaporatore e condensatore.

Il primo componente è l'evaporatore: questo provvede ad estrarre il calore dall'abitacolo ed è quindi posizionato strettamente in contatto con l'abitacolo stesso e deve ovviamente essere ad una temperatura minore rispetto a quella dell'abitacolo in modo da riuscire a raffreddarlo. Il refrigerante che attraversa l'evaporatore, riceverà il calore sottratto all'abitacolo passando dalla fase liquida alla

fase vapore mantenendo costante pressione e temperatura ma sarà caricato della quantità di calore cedutagli dall'aria dell'abitacolo.

Affinché il calore possa trasferirsi spontaneamente dal refrigerante all'ambiente esterno, occorre che la sua temperatura sia elevata ad un valore superiore rispetto a quella dell'ambiente esterno. A questo provvede il condensatore che aspira il vapore a bassa pressione uscente dall'evaporatore, lo comprime e lo scarica ad alta pressione e temperatura verso il condensatore.

Il condensatore, che rappresenta il secondo scambiatore di calore presente nell'impianto, ha il compito di smaltire il calore assorbito dal fluido refrigerante. Per fare ciò, esso è attraversato da aria proveniente dall'esterno che, essendo ora ad una temperatura minore rispetto a quella del refrigerante, lo raffredda e subisce un passaggio di stato dalla fase vapore alla fase liquida. Poiché la condensazione avviene a temperatura e pressione costante, il fluido refrigerante cede calore detto calore latente di condensazione ma si trova ancora a temperatura e pressione elevate. Per riportarlo alle condizioni iniziali occorre farlo passare attraverso la valvola di espansione.

La valvola di espansione fa subire al fluido refrigerante una drastica diminuzione di pressione con conseguente abbassamento della temperatura. Questa trasformazione si chiama laminazione isoentalpica.

b. Autoveicoli oggi e futuri

Oggigiorno gli autoveicoli sono sempre più utilizzati e risulta quindi fondamentale, per quanto detto sopra, il buon funzionamento del condizionatore in quanto chi è a bordo del veicolo, desidera un certo comfort in base alle condizioni climatiche esterne.

Per un futuro prossimo, invece, alcune aziende stanno già pensando a veicoli con guida autonoma, cioè veicoli in grado di portare i passeggeri nella destinazione desiderata senza la necessità di un guidatore. Basti solo pensare che già oggi, molti veicoli sono dotati di guida assistita, in grado ad esempio di "vedere" a che distanza si trova il veicolo che lo precede, e regolare di conseguenza la marcia, e possono anche parcheggiarsi in modo autonomo.

Si sta già pensando a veicoli in grado di volare o anche di andare su strada in base alle necessità ed in base al traffico, prenotabili attraverso applicazioni del proprio cellulare dal quale è possibile selezionare la destinazione, e farsi trasportare mentre magari si sta ancora lavorando o ci si vuole riposare. Ovviamente qui si parla di progetti in fase di sviluppo ai quali dovrebbero far fronte città in grado di agevolare l'utilizzo di questi veicoli su più piattaforme di trasporto ed in assoluta sicurezza.

Il fatto molto importante di non avere più la necessità di un guidatore, potrebbe portare anche ad alcuni cambiamenti della normale fisiologia dell'autoveicolo. Si sta studiando, infatti, la possibilità di poter ruotare i sedili del guidatore e del passeggero anteriore in modo che i due siano rivolti con lo sguardo verso i passeggeri posteriori. In questo modo l'autoveicolo com'era inteso assume nuove funzionalità oltre a quella del semplice trasporto di passeggeri: potrebbe ad esempio essere utilizzato per svolgere meeting tra soci mentre ci si sposta da un punto ad un altro, per permettere a tutti gli occupanti di aver le mani libere e godersi il viaggio, per svolgere quindi attività che prima non era possibile svolgere.



Immagine di una cabina futuristica

Dal punto di vista della climatizzazione, potrebbero sorgere, anche in questo caso, nuove necessità per i passeggeri: se fino ad oggi quando si entrava in un autoveicolo (magari rimasto sotto il sole per un certo numero di ore, in estate), gli occupanti avevano la necessità di ricevere l'aria fresca proveniente dal climatizzatore in definite zone del corpo (testa, spalle, piedi), in questi veicoli del futuro le necessità saranno altre. In primo luogo, non volendo in alcun modo modificare il classico sistema di climatizzazione dei veicoli, i passeggeri sono rivolti di spalle rispetto alle bocchette di immissione aria quindi il getto freddo che di solito arriva sul proprio corpo quando si accende il climatizzatore non è più presente. Come si nota dalla foto precedente, l'autoveicolo assume la fisionomia di una stanza che deve, nel caso in cui serva, essere rinfrescata.

c. Perché la CFD

Prima di progettare l'autoveicolo in questione, è norma effettuare simulazioni attraverso l'utilizzo di computer, in modo da avere una prima stima e previsione del progetto in questione e poter fare le dovute considerazioni prima di procedere con la sua realizzazione. Per quanto riguarda la

climatizzazione, le prove che le aziende effettuano per verificare il potere di raffrescamento del climatizzatore, sono chiamate prove di cool-down, attraverso le quali si valutano i transitori di temperatura delle parti o delle zone di interesse all'interno del veicolo. Per quanto detto sopra, si deduce che prima di andare ad effettuare prove di cool-down su questa nuova tipologia di veicoli, si effettuano delle analisi CFD per mezzo di computer, in modo da valutare molteplici casistiche e ogni possibilità prima di andare a costruire il modello reale.

Tuttavia, prima di poter dare un primo sguardo sulla climatizzazione di questi veicoli "futuristici" (sempre attraverso l'analisi CFD), bisogna validare il modello CFD per quanto riguarda i veicoli tradizionali, quelli cioè che necessitano di un guidatore e con i sedili posizionati classicamente. Di conseguenza, sulla base di prove di cool-down tradizionali, si creerà un modello CFD che simula il normale funzionamento del climatizzatore; una volta che questo modello sarà validato, si potrà procedere ad ipotizzare i cambiamenti (se necessari) da effettuare per ottenere un certo livello di comfort nei veicoli con sedili ruotabili.



Grafico del transitorio iniziale di una prova reale di cool-down

Le curve riportate sopra, rappresentano la prima parte di una prova reale di cool-down fornita dall'azienda Italdesign, in particolare si fa riferimento ai transitori di temperatura per quanto riguarda la zona teste e le quattro bocchette vent poste sulla plancia dell'autoveicolo. Si fa riferimento solo alla prima parte della prova, in quanto quello che interessa è appunto il transitorio dalla temperatura di inizio prova fino al raggiungimento della condizione alla quale il condizionatore inizia a regolare.

Per quanto detto sopra, risulta molto funzionale l'utilizzo dell'analisi CFD: questa consente infatti di effettuare una analisi computerizzata della prova di cool-down in modo da verificare se il transitorio di temperatura che si ottiene, è sufficientemente simile all'andamento ottenuto dalle prove reali. Ovviamente non ci si aspetta minimamente di ottenere subito un andamento di temperatura che soddisfi le richieste, tuttavia, effettuare molte simulazioni CFD andando a variare gli input in modo da avvicinarsi quanto più possibile alla curva reale, è sicuramente più agevole rispetto all'andare ad apportare modifiche sul veicolo.

Questo studio è quindi rivolto alla creazione di un modello CFD che simuli il transitorio iniziale di una prova di cool-down per una cabina tradizionale. Solo quando questo modello sarà validato, si potrà procedere con l'effettuare una prima analisi per la stessa cabina ma con sedili anteriori ruotati di 180°, sempre con riferimento allo stesso transitorio della stessa prova di cool-down.

CAPITOLO 2: PROVA DI COOL-DOWN

a. Articoli

Di seguito si riportano alcuni articoli trovati riguardanti la climatizzazione attraverso l'utilizzo di analisi CFD. È stato trovato un solo articolo riguardante l'analisi CFD effettuata su di un climatizzatore facendo riferimento ad una reale prova di cool-down, forse perché, essendo prove che le aziende effettuano per valutare le prestazioni dei condizionatori dei loro veicoli, tendono a non divulgarle per non diffondere segreti aziendali.

A real time numerical analysis of vehicle cool-down performance [1.]

Le prestazioni di raffreddamento di un veicolo passeggeri sono influenzate da diversi componenti, ad esempio il sistema di climatizzazione, il vano motore e le condizioni termiche ambientali. Pertanto sono richieste informazioni sufficienti nella fase iniziale della progettazione per garantire prestazioni sufficienti per il condizionamento dell'aria per i passeggeri. In questo studio sono stati accoppiati più programmi per simulare un vero sistema di condizionamento d'aria e sono stati messi in comunicazione le varie condizioni al contorno. Tutte le condizioni termiche sono state definite esattamente con una Galleria Climatica del Vento (CWT) utilizzata per lo sviluppo di un'automobile reale. È stato riscontrato che questo metodo fornisce risultati molto simili ai risultati del test durante l'intero processo di simulazione.

Performance evaluation of radiant cooling system integrated with air system under different operational strategies [2.]

Il documento descrive uno studio sviluppato per stimare il potenziale di risparmio energetico di un sistema di raffreddamento radiante installato in un edificio commerciale in India. Per valutare le prestazioni termiche e il consumo di energia, sono state eseguite simulazioni utilizzando rispettivamente il software FLUENT e EnergyPlus. La simulazione CFD ha mostrato che il sistema radiante offre temperature più uniformi, oltre a un migliore intervallo di temperatura media dell'aria, rispetto ad un sistema convenzionale.

An introduction to turbulence in fluids, and modelling aspects [3.]

Questo articolo è inteso principalmente come un testo introduttivo, una piattaforma pedagogica, sul fenomeno della turbolenza nei fluidi. Per semplicità, la discussione è per lo più limitata al caso di un fluido newtoniano incomprimibile (a proprietà costante) in semplici flussi turbolenti tridimensionali. Lo scopo principale consiste nell'esporre la problematica generale della turbolenza in un ambiente fisico il più semplice possibile. Viene anche sviluppato il prospetto di modellizzazione, che mira a elaborare modelli matematici di turbolenza numericamente tracciabili.

Quality control of computational fluid dynamics in indoor environments [4.]

La fluidodinamica computazionale (CFD) viene utilizzata di routine per prevedere il movimento dell'aria e la distribuzione della temperatura e delle concentrazioni negli ambienti interni. In questo articolo sono discussi degli aspetti di modellazione della turbolenza e delle condizioni al contorno, nonché degli aspetti relativi agli errori numerici, con enfasi sulla scelta dello schema di differenziazione e della griglia computazionale. Infine, vengono fornite raccomandazioni per migliorare la qualità dei calcoli CFD, nonché linee guida per le informazioni minime che dovrebbero accompagnare tutte le pubblicazioni relative alla CFD per consentire un giudizio scientifico sulla qualità dello studio.

Evaluation of room air distribution systems using computational fluid dynamics [5.]

In questo studio è stata utilizzata la fluidodinamica computazionale (CFD) per prevedere l'ambiente interno di una stanza ventilata meccanicamente, e l'efficacia complessiva della ventilazione dei sistemi di distribuzione dell'aria. La previsione del comfort termico interno si basa sulle equazioni di comfort di Fanger incorporate nel modello CFD. È stato riscontrato che il sistema di distribuzione dell'aria più efficace per il funzionamento del riscaldamento differisce da quello per il raffreddamento. È dimostrato che un sistema di distribuzione dell'aria che determina una ventilazione con spostamento verso l'alto, si comporta meglio di altri in termini di qualità dell'aria interna e consumo energetico, ma può causare disagio termico locale.

Performance evaluation of an integrated automotive air conditioning and heat pump system [6.]

Questo studio si occupa delle caratteristiche di prestazione di un sistema di condizionamento d'aria automobilistico R134a in grado di funzionare come una pompa di calore aria-aria che utilizza l'aria ambientale come fonte di calore. È stato osservato che il funzionamento della pompa di calore fornisce un riscaldamento adeguato solo in condizioni climatiche miti e la capacità di riscaldamento diminuisce drasticamente con la diminuzione della temperatura esterna.

Modeling and experimental evaluation of an automotive air conditioning system with a variable capacity compressor [7.]

In questo studio è stato sviluppato un modello di simulazione computerizzata stazionario per i circuiti di refrigerazione dei sistemi di condizionamento dell'aria delle automobili. I risultati del modello si discostano da quelli sperimentalmente ottenuti entro un intervallo del 20% sebbene la maggior parte di essi si trovi entro un intervallo del 10%. Sono stati anche valutati sperimentalmente gli effetti dell'inventario del refrigerante con risultati che non mostrano effetti sulle prestazioni del sistema in un'ampia gamma di cariche di refrigerante.

Experimental and computer performance study of an automotive air conditioning system with alternative refrigerants [8.]

In questo studio è presentato un modello computazionale con l'obiettivo di simulare le prestazioni di un sistema di climatizzazione automobilistico ideale, funzionante con diversi refrigeranti. La funzione principale di questo modello era determinare il refrigerante alternativo più adatto per R-12. Vengono considerati 5 refrigeranti alternativi, R-12 incluso, R-134a, R-290, R-600a e una miscela di propano e isobutano R290 / R600a (62/38, percentuale molare).). Il modello ha predetto che la miscela (R290 / R600a) era l'alternativa più adatta per R-12 e che bisognerebbe eseguire diverse modifiche quando gli altri refrigeranti alternativi sono utilizzati nel sistema R-12. I risultati di questo lavoro hanno mostrato un buon accordo con i risultati sperimentali e teorici disponibili in letteratura.

An experimental analysis of automotive air conditioning system [9.]

In questo articolo, è stato studiato e sperimentato in dettaglio un sistema di condizionamento automobilistico dell'aria. Sono stati variati la temperatura ambiente, l'evaporatore e il condensatore e la velocità del compressore e sono state studiate le prestazioni del sistema. Sono stati analizzati il carico di raffreddamento, il consumo energetico del compressore, la portata massica del refrigerante, il valore COP, le fluttuazioni delle pressioni minime e massime del sistema, i risultati sono presentati in forma grafica e vengono determinate le condizioni operative ottimali.

b. Descrizione della prova

Le prove di cool-down sono prove nelle quali si effettuano dei test per valutare le prestazioni HVAC di un veicolo dotato di sistema di climatizzazione in condizioni di caldo (40 – 50 °C) e ce ne sono diverse: con varie velocità del veicolo, periodi di sosta, accelerazioni. Le aziende possiedono ognuna la propria normativa che fornisce indicazioni su come effettuare i test per valutare le prestazioni HVAC. Seguire questi documenti mentre si esegue il test aiuta a garantire che ogni test sia coerente in termini di metodologia. Ciò consente un confronto più accurato dei risultati da test a test e una misura migliore del raggiungimento degli obiettivi funzionali.

Le prove sono effettuate in apposite celle adeguate alle caratteristiche della prova e, prima di iniziare il test, si deve controllare che tutte le condizioni della prova siano realizzabili dalla cella (carico solare, velocità del vento, temperature). A volte sono anche richiesti strumenti aggiuntivi che dipendono dal tipo di veicolo sul quale si vuole eseguire la prova. Inoltre, prima di iniziare la prova, si deve lasciare il veicolo nella cella per un certo periodo di tempo (2-4 ore) in modo che raggiunga le condizioni di inizio prova.

Nelle prove di cool-down, le temperature che interessano principalmente sono la temperature di uscita aria dalle bocchette vent (bocchette poste sulla plancia del veicolo) e la temperature raggiunta nella zona teste. La prova è eseguita impostando il climatizzatore in modalità "max vent" quindi alla massima velocità del ventilatore e direzionando le bocchette in modo che vadano ad indirizzare l'aria verso le teste del guidatore e del passeggero, mantenendo I finestrini completamente chiusi. La vettura è allestita con un certo numero di termocoppie, indispensabili per valutare appunto la temperature nelle zone di interesse durante l'intero svolgimento del test: è importante che le termocoppie siano "investite" correttamente dal flusso d'aria in modo da poter ottenere la massima velocità possibile di lettura. Le termocoppie sono installate in corrispondenza di tutte le bocchette dalle quali l'aria viene immessa nel veicolo, in corrispondenza degli elementi che compongono il climatizzatore (evaporatore, compressore, ecc), per misurare la temperatura dell'olio, aria ambiente, temperatura del refrigerante, sui manichini (otto termocoppie per manichino), e zona teste e piedi.

Solitamente, le prove di cool down sono organizzate in più fasi: può essere presente un precondizionamento fino al raggiungimento dell'obiettivo, fasi a diverse velocità e per tempi diversi, periodi di sosta, tratti guidati per simulare la marcia nelle città.

Accanto ad ogni cella di prova, è posta una stanza nella quale è possibile seguire la prova e soprattutto monitorare tutte le termocoppie (e sono davvero molte) con le quali è allestito l'autoveicolo. Sono presenti un certo numero di computer utilizzati per più funzioni: c'è un computer che permette di verificare che l'autovettura stia realmente seguendo la prova di cool-down in questione; un altro computer che controlla le condizioni della cella di prova e, se necessario, permette di modificare manualmente i dati in input per la cella; un altro computer è invece utilizzato per raccogliere i dati inerenti alla prova, quindi ci si sta riferendo alla temperatura di ogni termocoppia presente sull'autoveicolo, campionante per ogni secondo di prova.

Si inizia a registrare i dati ancora prima che la prova abbia inizio, in quanto, una volta che il test ha inizio, si è sicuri che tutte le termocoppie siano collegate e posizionate adeguatamente in modo da non dover ripetere la prova (ripetere la prova vuol dire lasciare nuovamente la macchina nella cella in modo che si ritorni alle condizioni iniziali con un conseguente spreco di tempo e comporta quindi il ricominciare la prova da capo). Quando la prova ha inizio, non è più possibile entrare nella cella in quanto, anche se di poco, si andrebbero a modificare le condizioni della prova stessa. È anche importante che il guidatore (durante la prova, sull'autoveicolo, sono presenti uno o due operai specializzati in questi tipi di prove) non esca dal veicolo e segua attentamente i vari step della prova in modo che l'autoveicolo segua quanto più possibile il test in questione.

I dati raccolti a fine prova, vengono quindi salvati in un foglio di calcolo Excel che assume solitamente questa forma:

tempo	termocoppia 1	termocoppia 2	termocoppia n
0	то		
1	T1		
2	T2		
n	Tn		

Questi dati, in seguito, vengono riformulati: prima di tutto non vengono considerati i dati presi prima dell'inizio della prova; i dati relativi ad alcune termocoppie (ad esempio quelle che fanno riferimento alle bocchette vent, quelle relative ai singoli manichini, quelle relative alle zone del corpo, ...) vengono uniti facendo una media delle temperature per ogni secondo di prova. Quando tutti i dati raccolti sono stati sistemati, si può procedere a creare grafici che mostrano gli andamenti delle temperature per le parti che interessano, si fanno confronti magari con la stessa vettura dell'anno precedente, e si traggono le dovute conclusioni per definire se il veicolo (o meglio il climatizzatore del veicolo) ha superato la prova o meno.

Dal punto di vista fisico, bisogna tener conto di tre transitori diversi:

 Transitorio della termocoppia: è il transitorio più veloce in quanto le termocoppie sono oggetti di dimensioni estremamente ridotte e, nonostante siano sottoposte al medesimo carico termico dell'autoveicolo, la loro capacità termica non andrà ad influenzare i risultati della prova;

- Transitorio dell'aria interna all'autoveicolo: l'aria all'interno dell'autoveicolo, sottoposta al carico termico, raggiungerà anch'essa le condizioni di inizio prova. Questo transitorio sarà più lungo rispetto a quello delle termocoppie in quanto l'aria immessa nell'autoveicolo dal climatizzatore, si mischierà con l'aria presente in cabina e, dopo un certo periodo di tempo, si raggiungerà la condizione di equilibrio che favorisce un certo livello di confort all'interno della cabina stessa;
- Transitorio delle parti componenti l'autoveicolo: è il transitorio più lungo in quanto le varie parti che compongono l'autoveicolo (scocca, sedili, parti in plastica, stoffa) sono dotate ognuna di una certa capacità termica che influirà notevolmente sul raffreddamento delle parti rendendo il transitorio di temperatura considerevole.

Le condizioni del test di cool -down che si vogliono replicare, per questo studio, su STAR-CCM+ sono:

- Temperatura ambiente 40 °C
- Umidità relativa 40%
- Radiazione solare 1000 W/m2
- Portata di aria 480 kg/h (che corrisponde a 0,133 kg/s)
- Vettura ferma
- Assenza di vento

c. Teoria: analisi a parametri concentrati

Il punto di partenza è stato quello di effettuare un'analisi preliminare a parametri concentrati. È stato considerato un corpo puntiforme di massa "m" con un calore specifico " c_p " che deve passare da una temperatura iniziale " t_i " ad una temperatura finale " t_f " con $t_i > t_f$.

Aspetto fondamentale per poter procedere con un'analisi a parametri concentrati è l'ipotesi [10.] che la resistenza termica superficiale prevalga rispetto alla resistenza interna di conduzione del corpo. Questa ipotesi, che corrisponde a valori del numero di Biot molto piccoli (Bi<<1), permette di approssimare la distribuzione di temperatura sulla superficie del corpo come uniforme. Il numero di Biot rappresenta il rapporto tra lo scambio termico del solido con l'esterno e la conduzione termica interna al corpo definito come:

$$Bi = \frac{h \times L}{\lambda}$$

dove:

- h è il coefficiente di scambio termico con l'esterno $[W/m^2K]$
- L è una lunghezza caratteristica
- λ è la conducibilità termica del solido [W/mK]

Volendo quindi determinare la temperatura del corpo che varia con il tempo, si parte dalla seguente equazione [10.]:

$$\alpha A \big(t_f - t \big) d\tau = c \rho V \, dt$$

con condizione al contorno $t = t_i \text{ per } \tau = 0.$

Integrando e dopo alcuni passaggi matematici si ottiene:

$$t = t_i + (t_f - t_i) \times (1 - e^{-\tau/\tau_0})$$

avendo posto $\frac{\alpha A}{c\rho V} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha A}} \times \frac{1}{c\rho V} = \frac{1}{R} \times \frac{1}{C} = \frac{1}{\tau_0}$

Nella tabella di seguito sono riportati i dati necessari per poter calcolare l'andamento della temperatura:

ti	340	К
tf	297	К
τ0	1515,857	s
1/τ0	0,00066	1/s
α	15	W/m2K
А	20	m2
С	450	J/kgK
ρ	7860	kg/m3
V	0,45	m3

dove "c" e "p" sono calore specifico e densità del ferro, l'area A è stata calcolata ipotizzando la superficie dei vari componenti che si trovano all'interno di un'auto (sedili, parti in plastica, ecc.), mentre il volume è stato calcolato come prodotto dell'area A per uno spessore di prova pari a 3 cm.

È stata quindi scritta l'equazione della temperatura su Excel in modo da ottenere un valore di temperatura "t" per ogni variazione di tempo " τ ".

Di seguito si riporta il grafico ottenuto:



Curva ottenuta da parametri concentrati

Una volta ottenuto l'andamento della temperatura, questo è stato confrontato con andamenti di temperatura ottenuti da prove di cool-down realmente eseguite su autovetture in commercio. Si fa riferimento, come detto precedentemente, all'andamento di temperatura della zona teste.

È stato quindi necessario procedere alla calibrazione della nostra curva sperimentale in modo che il suo andamento si avvicinasse quanto più possibile all'andamento delle curve reali.

Di seguito si riportano i dati necessari al calcolo della curva di temperatura dopo la calibrazione e si riporta inoltre il grafico con le curve reali e la curva sperimentale calibrata.

ti	340	К
tf	297	К
τ0	277,3333	S
1/τ0	0,003606	1/s
α	15	W/m2K
А	20	m2
С	320	J/kgK
ρ	80	kg/m3
V	3,25	m3

I parametri che sono stati variati, sono il calore specifico "c" e la densità " ρ ", che sono stati variati per tentativi fino ad ottenere un andamento quanto più possibile vicino all'andamento della curva reale.

Si nota come il valore di "τ0" sia diminuito di molto dopo la calibrazione (circa un terzo del valore iniziale); questo implica il fatto che la condizione finale di temperatura sarà ovviamente raggiunta molto prima rispetto alla curva non calibrata.



Si riporta di seguito il grafico di confronto con la curva calibrata e la curva reale:

Grafico di confronto tra curva reale e curva calibrata

Come si può notare dal grafico, le curve sono simili nel senso che raggiungono la condizione finale di temperatura circa nel medesimo tempo; tuttavia, quando si procederà a creare il modello su STAR-CCM+, ci si aspetta di dover modificare nuovamente alcuni di questi parametri.

Inoltre, bisogna considerare il fatto estremamente importante che nella capacità termica appena calcolata per calibrare la curva, è presente la capacità termica dell'aria e di tre solidi che sono scocca, vetri e sedili. Attraverso l'analisi a parametri concentrati si vuole dimostrare che la capacità termica del solido ha poca influenza rispetto a quella dell'aria.

Per l'aria abbiamo:

- calore specifico pari a 1004.5 J/kgK
- densità pari a 1,225 kg/m³
- volume di aria interno alla cabina pari a 3,15 m³

Per il solido è stata fatta una media di calore specifico e densità dei tre materiali:

- calore specifico pari a 1047 J/kgK
- densità pari a 2843 kg/m³
- volume delle parti solide in riferimento ad un certo spessore pari a 0,1 m³

É stata quindi calcolata una capacità C pari al prodotto di volume per densità per calore specifico facendo distinzione tra aria, solido, e parametri concentrati. Di seguito si riporta la tabella:

	ARIA	SOLIDO	PC
densità	1,225	2843,333	100
ср	1004,5	1046,667	300
volume	3,15	0,0945	3,2445
С	3876,114	281234,1	97335

A questo punto è stata scritta l'equazione:

$$C_{PC} = a \times C_{aria} + b \times C_{solido}$$

Si cercano i valori da "a" e "b" in modo che l'equazione sia soddisfatta. Dopo alcuni tentativi sino stati ottenuti i valori di 0,663 per l'aria e 0,337 per il solido. Da questo risultato si deduce che la capacità del solido influisce molto meno (la metà) rispetto all'aria.

Da questa analisi a parametri concentrati si può comunque concludere che lo spessore precedentemente ipotizzato, ed i valori scelti di c e ρ , rendono valida l'ipotesi di numero di Biot molto piccolo e quindi rendono valida questa analisi a parametri concentrati.

Attraverso questa analisi quindi sono stati ottenuti dei valori che saranno utilizzati come parametri di prova iniziali per costruire il modello su STAR-CCM+ e che forniscono un ottimo punto di partenza per poter creare il modello e poterlo successivamente validare.

CAPITOLO 3: COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC (CFD)

a. Introduzione alla CFD

La CFD (Fluidodinamica Computazionale) è l'analisi dei sistemi che involvono movimento di fluidi, scambio di calore ed i fenomeni a loro relativi attraverso l'uso di simulazioni tramite computer. La CFD si basa sul modello fisico e sul modello numerico [11.].

La CFD presenta alcuni vantaggi rispetto al solo sperimentale:

- Tempi e costi di progettazione ridotti;
- Analisi o valutazioni preliminari di sistemi in condizioni difficili da replicare;
- Valutazione di grandezze del sistema difficili da misurare direttamente;
- Livello praticamente illimitato di dettagli dei risultati;

Oggi la CFD ha un ruolo importante nell'ingegneria, ed è comunemente utilizzata per complementare studi sperimentali e teorici. L'utilizzo della CFD per predire flussi interni ed esterni è cresciuto molto nella scorsa decade. Negli anni '80 la CFD era utilizzata principalmente da ricercatori accademici, post-dottorati o post-laureati con molti anni di esperienza nell'area. La diffusa disponibilità di workstation di ingegneria insieme a algoritmi efficienti e sofisticate strutture di pre- e post-processing consentono l'utilizzo di programmi CFD commerciali da parte di ingegneri laureati per attività di ricerca, sviluppo e progettazione nell'industria. Il programma attualmente in commercio è estremamente potente ma richiede comunque un alto livello di preparazione ed abilità da parte dell'operatore al fine di ottenere risultati soddisfacenti in situazioni complesse. Sebbene recentemente è entrata in commercio la CFD basata sul metodo agli elementi finiti, il mercato è dominato da quattro programmi, PHOENICS, FLUENT, FLOW3D, STAR-CD, che sono tutti basati sul metodo ai volumi finiti che consiste nei seguenti step:

- Integrazione formale delle equazioni dominanti del flusso di fluido su tutti i volumi di controllo del dominio della soluzione.
- La discretizzazione comporta la sostituzione di una varietà di approssimazioni di tipo differenze finite per i termini nell'equazione integrata che rappresentano i processi di flusso come la convezione, la diffusione e le fonti. Converte le equazioni integrali in un sistema di equazioni algebriche.
- Soluzione delle equazioni algebriche con metodo iterativo.

Essendo estremamente potente, la CFD è utilizzata in molti campi industriali e non, come ad esempio:

- Ingegneria industriale;
- Processi chimici;
- Ambiente interno ed esterno di un edificio;
- Correnti marine;
- Ingegneria ambientale;
- Meteorologia;
- Ingegneria biomedica;

I programmi CFD sono strutturati attorno agli algoritmi numerici che possono affrontare i problemi di flusso del fluido. Al fine di fornire un facile accesso alla loro capacità di risoluzione, tutti i pacchetti CFD commerciali includono interfacce utente sofisticate per inserire i parametri di problema e per esaminare i risultati. Quindi tutti i codici contengono tre elementi principali: pre-processore, un risolutore e un post-processore.

Il *pre-processore* consiste nell'introduzione di un problema di flusso in un programma CFD mediante un'interfaccia intuitiva e la successiva trasformazione di questo input in una forma adatta per l'utilizzo da parte del risolutore.

A grandi linee i metodi numerici che costituiscono la base del *risolutore* eseguono le seguenti fasi:

- Approssimazione delle variabili di flusso sconosciute mediante semplici funzioni;
- Discretizzazione mediante la sostituzione delle approssimazioni nelle equazioni di flusso e le successive manipolazioni matematiche;
- Soluzione delle equazioni algebriche.

Come nel pre-processing, un enorme lavoro di sviluppo ha avuto luogo di recente nel campo del *post-processing*. A causa della crescente popolarità delle workstation di ingegneria, molte delle quali hanno capacità grafiche eccellenti, i principali pacchetti CFD sono ora dotati di strumenti versatili di visualizzazione dei dati. Questi includono:

- Geometria del dominio e visualizzazione della mesh;
- Grafici di vettori;
- Grafici di contorno lineari e ombreggiati;
- Grafici di superficie 2D e 3D;
- Tracciamento delle particelle;
- Visualizzare la manipolazione;
- Uscita postscript a colori.

Più recentemente queste strutture possono anche includere animazioni per la visualizzazione dinamica dei risultati e oltre alla grafica tutti i codici generano un affidabile output alfanumerico e dispongono di strutture di esportazione dei dati per ulteriori manipolazioni esterne al programma e le capacità di output grafico dei codici CFD hanno rivoluzionato la comunicazione delle idee a chi non è del campo.

Quando si cerca di risolvere un problema sullo studio del flusso di un fluido, bisogna essere consapevoli che la fisica che c'è alla base è complessa, quindi, prima di impostare e far partire una simulazione CFD, si devono identificare e formulare i problemi del flusso dal punto di vista fisico e chimico e le semplificazioni fatte andranno ad influenzare i risultati generati dall'analisi CFD. È anche importante una buona conoscenza dell'algoritmo utilizzato per la soluzione. Per determinare il successo o meno di un algoritmo si utilizzano tre concetti matematici: convergenza, consistenza e stabilità. Poiché la convergenza teoricamente è molto difficile da stabilire, in pratica si utilizza il teorema dell'equivalenza di Lax che afferma che per un problema lineare, condizione necessaria e sufficiente affinché ci sia convergenza è che il metodo sia consistente e stabile. Quando si affronta invece un problema non lineare, consistenza e stabilità sono condizioni necessarie di convergenza, ma non sufficienti.

Il calcolo CFD comporta la creazione di un insieme di numeri che costituisce un'approssimazione realistica di un sistema di vita reale. Uno dei vantaggi della CFD è che l'utente ha una scelta quasi illimitata del livello di dettaglio dei risultati. Dovremmo assicurarci che il risultato principale di qualsiasi esercizio CFD sia una migliore comprensione del comportamento di un sistema, ma dal momento che non ci sono garanzie riguardo all'accuratezza di una simulazione, dobbiamo convalidare i nostri risultati frequentemente e rigorosamente.

È chiaro che esistono linee guida per una buona pratica operativa che possono aiutare l'utente di un codice CFD, e la convalida ripetuta svolge un ruolo chiave come meccanismo di controllo qualità finale. Tuttavia, gli ingredienti principali per il successo nell'utilizzo della CFD sono l'esperienza e una conoscenza approfondita della fisica dei flussi di fluido e dei fondamenti degli algoritmi numerici. Senza questi è molto improbabile che l'utente ottenga il meglio da un codice.

b. Equazioni della fluidodinamica

Le equazioni che governano il flusso dei fluidi sono le rappresentazioni matematiche delle leggi di conservazione in fisica:

• La massa di un fluido è conservata.

- La velocità della variazione della quantità di moto è uguale alla somma delle forze agenti su una particella fluida (seconda legge di Newton).
- La velocità di variazione dell'energia è uguale alla somma del calore aggiunto e del lavoro fatto su una particella fluida (primo principio della termodinamica)

Il fluido è considerato come un continuo. Una particella fluida o un punto in un fluido è quindi l'elemento più piccolo possibile di fluido le cui proprietà macroscopiche non sono influenzate dalle singole molecole. Un resoconto sistematico dei cambiamenti nella massa, quantità di moto ed energia dell'elemento fluido dovuti al flusso di fluido attraverso i suoi confini ed a causa dell'azione di fonti all'interno dell'elemento, porta alle equazioni del flusso del fluido. Le equazioni di conservazione differenziali sono le equazioni fondamentali che interpretano il fenomeno fisico di un fluido in movimento. In esse compaiono le grandezze fisiche incognite e le loro derivate: sono pertanto equazioni differenziali. Con riferimento ad assi cartesiani, le variabili indipendenti sono x, y, z e t; quelle dipendenti sono la pressione p, la velocità V, la temperatura T e le proprietà del fluido (densità, viscosità, calore specifico, conduttività).

Conservazione della massa

Si parte dallo scrivere un bilancio di massa per l'elemento fluido [12.]:



Si considera sempre un volume di controllo infinitesimo (che può essere rigido o no ed è delimitato da una superficie di controllo) per risalire alle condizioni locali, usando equazioni differenziali, che devono poi essere integrate al sistema che si vuole. Nella figura seguente sono rappresentate le variabili dipendenti u e r (velocità lungo x e densità), funzioni delle variabili indipendenti x e t. Il volume di controllo infinitesimo di lati (dx, dy, dz) è fisso rispetto al sistema di riferimento.



Considerando prima la direzione x, l'equazione di bilancio sarà:

$$\rho \ u \ dx \ dy \ dz \ dt = \left(\rho u + u \frac{\partial \rho}{\partial x} dx + \rho \frac{\partial u}{\partial x} dx\right) dy \ dz \ dt + \frac{\partial \rho}{\partial t} dx \ dy \ dz \ dt$$

entrante uscente accumulata

Eseguendo lo stesso procedimento anche per le altre facce si ottiene:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$$

Ovvero

$$div(\rho \mathbf{V}) = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$$

Se il fluido è incomprimibile o a regime, allora div(V) = 0

Conservazione della quantità di moto

Ogni particella ferma o in moto ubbidisce alla seconda legge di Newton: la variazione nel tempo della quantità di moto è uguale alla somma delle forze esterne. L'equazione della quantità di moto [12.] del fluido in movimento è un'espressione matematica della seconda legge di Newton, applicata a masse di fluido che scorrono. Si tratta quindi di determinare la forza d'inerzia del fluido che scorre in ogni direzione coordinata ed uguagliarla alle forze esterne. Le forze esterne sono le forze normali dovute alla pressione, le forze normali e tangenziali di tipo viscoso e le forze di campo.

Ogni problema nel moto dei fluidi che comporti la determinazione della velocità del fluido come funzione dallo spazio e del tempo, implica la soluzione dell'equazione della continuità e della quantità di moto.

Considerando il caso più semplice in cui densità e viscosità sono costanti:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho \frac{\partial PE}{\partial x} - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)$$

nota come equazione di Navier-Stokes.

Per le altre direzioni y e z:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho \frac{\partial PE}{\partial y} - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \rho \frac{\partial PE}{\partial z} - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu (\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2})$$

Conservazione dell' energia

Per la formulazione dell'equazione differenziale di conservazione dell'energia [13.], si esprime inizialmente il lavoro L_{τ} sviluppato nell'unità di tempo dagli sforzi normali e tangenziali agenti sulla superficie di un volumetto infinitesimo di fluido in moto, che costituisce un sistema termodinamico chiuso; a tale sistema è quindi applicato il primo principio della termodinamica.

L'equazione differenziale di conservazione dell'energia assume quindi la seguente forma:

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - div(q_r) + \mu \Phi + q_v$$

avendo inoltre considerato conducibilità termica costante e fluido incomprimibile (ρ = costante). Per i gas ideali:

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = k \nabla^2 T + \frac{Dp}{Dt} + q_v + \mu \Phi$$

c. Software STAR-CMM+

Si procede ora con la creazione del modello sperimentale attraverso l'utilizzo del software STAR-CCM+ che ci permette di effettuare l'analisi CFD al fine di verificare se il modello creato soddisfa le specifiche richieste.

STAR-CCM + è uno strumento completo per la simulazione della fisica ingegneristica [14.]:

- Unico pacchetto integrato;
- Fornisce un intero processo di simulazione;
- Risolve problemi che coinvolgono il flusso, il trasferimento di calore, lo stress e le interazioni tra più modelli fisici (fluidi, solidi ed interfacce di comunicazione);
- Funzionalità di modellazione 3D-CAD;
- Preparazione delle superfici;
- Generazione automatica della mesh (tetraedrica, poliedrica, tagliata, esagonale);
- Modellazione fisica avanzata;
- Modellistica della turbolenza;
- Post elaborazione potente;
- Integrazione CAE;

il software garantisce inoltre un completo controllo durante l'intero processo di simulazione e permette di creare report, plot e scene per visualizzare i risultati della simulazione.

d. MODELLO FISICO/NUMERICO

Per creare il modello su STAR-CCM+ sono state effettuate varie simulazioni in quanto, scopo della prova, era ottenere un andamento di temperatura per la zona teste quanto più simile all'andamento della curva sperimentale ottenuta da prove reali di cool-down, riuscendo a raffreddare l'ambiente interno della cabina.

Di conseguenza, oltre all'impiego dell'analisi a parametri concentrati, che ci ha permesso di stimare un primo spessore della cabina e una prima stima delle costanti termiche per scegliere i materiali, per avvicinarsi quanto più possibile alla curva reale, sono state necessarie innumerevoli simulazioni per ottenere il risultato riportato in questo studio.

La diversità nelle varie simulazioni sta nel fatto che alcune prove hanno una *mesh molto fine* e si è impostato per la simulazione 20 iterazione ogni mezzo secondo per 1800 secondi (30 minuti); altre prove sono state effettuate con mesh più grossolane e stesso numero di iterazioni; altre ancora con minor numero di interazioni (come 5/10/15 iterazioni ogni mezzo secondo). Altre simulazioni sono state effettuate con lo stesso tipo di griglia ma cambiando i materiali utilizzati o andando a variare i valori delle costanti dei materiali utilizzati, come ad esempio calore specifico, coefficiente di scambio termico. Altre simulazioni ancora sono state effettuate variando le condizioni iniziali di temperatura dei parametri e/o dei modelli. Poiché per effettuare alcune simulazioni si richiedeva un tempo estremamente lungo, è stato utilizzato anche un computer del Politecnico con una RAM di 32GB ed anche lì, le simulazioni più pesanti sono andate avanti per svariate ore.

Quando si apre il programma e si inizia una nuova simulazione, ci si trova di fronte alla seguente interfaccia:

_					_	
Star 2 - STAR-CCM+				-	٥	×
File Edit Mesh Soluti	on Tools Window	Help				
🔁 🗁 🖶 🗣 🐘			- 好 ば [1] が ぼ [1] ま オ 目 [1] 図 図 다 电 キ ナ か な 田 田 目 [12] 図 다 乳 ト 日 引 ト ● [1] 国 ゆ 4-1 🚭			
Servers Star 2 ×		-				
Simulation	1	g 🔻				
Secrety Geometry Geometry Contrua Regions Solution Histories Solution Histories Pois Montors Pois Tools		0				
		_				
Star 2 Bropartian X		-				
- Properties		_				
Collaboration			Output - Star 2 ×			-
Name	Star 2		STAR-CCM+ 12.02.011 (win64/intel15.0)			^
			License build date: 10 February 2015			
			This version of the code requires license version 2017.02 or greater.			
			Checking license file: 1999&flex.cd-adapco.com			
			l copy of comppower checked out from 1999@flex.cd-adapco.com			
			Feature comprover expires in 145 days			
			Thu Feb 08 18:23:01 2018			
a		0	Server::start -host DESKTOP-UIOBFQT:47827			
star z			Started default macro:			
A STAR-CCM+ simulation			C:\Users\cicci\AppData\Local\CD-adapco\STAR-CCM+ 12.02.011\var\journal\star2790692861169994885.java			
						~

Interfaccia STAR-CCM+

Il nostro modello finale consiste in una cabina auto dotata di scocca, superfici vetrate, sedili, ingresso ed uscita dell'aria. Sono inoltre presenti due manichini posizionati sui sedili anteriori e le alette delle bocchette in modo da dividere il flusso d'aria. Con STAR-CCM+ è stato creato il modello CAD 3D della cabina con i vetri e gli ingressi aria con relative alette e manichini, mentre i sedili sono stati importati e successivamente posizionati all'interno della cabina. Sono stati inoltre creati dei piccoli blocchetti in corrispondenza della zona teste che serviranno, durante la simulazione, come "sonda" per valutare la temperatura in corrispondenza di quelle zone (questo è esattamente lo scopo della prova di cooldown). È stato infine estratto il volume di aria interno in quanto anche l'aria stessa contenuta all'interno del veicolo deve essere raffreddata. Il modello risulta il seguente:



Immagine del modello



Vista interna del modello



Immagine dei manichini

Si distinguono in tutto 6 corpi diversi:

- Solido (scocca);
- Sei vetri;
- Due sedili;
- Due manichini;
- Due sonde;
- Aria (volume d'aria interno alla cabina).

Ogni corpo è formato da varie superfici e si è proceduto ad identificare e rinominare le superfici d'interesse; bisogna prestare particolare attenzione alle superfici dei corpi che sono in contatto con altri corpi in quanto si formeranno delle interfacce di comunicazione ed è quindi molto importante non fare confusione. Di seguito si riporta una tabella con la nomenclatura delle varie superfici; per ogni vetro si distinguono la facciata a contatto con l'ambiente esterno, la facciata a contatto con l'aria interna alla cabina, ed il contorno a contatto con la cabina stessa.

CABIN	Windscreens	Air
BackWindscreen Cab	Windscreen Cab	BackWindscreen Int
BackWindscreen Ext	Windscreen Ext	BackWindscreen Int Cont
BackWindscreen Int Cont	Windscreen Int	Cabin Int
Cabin Ext		DxWindscreen 1 Int
Cabin Int		DxWindscreen 2 Int
DxWindscreen 1 Cab		FrontWindscreen Int
DxWindscreen 2 Cab		FrontWindscreen Int Cont
FrontWindscreen Cab		Inlet
FrontWindscreen Ext		Outlet
FrontWindscreen Int Cont		SxWindscreen 1 Int

SxWindscreen 1 Cab	SxWindscreen 2 Int
SxWindscreen 2 Cab	

Per tutti i corpi, vengono create delle "regioni" che permettono di assegnare delle condizioni alle varie parti dei corpi stessi. Per le superfici esterne del modello (scocca esterna e vetri esterni) è stata assegnata la condizione di "environment" in quanto è necessario che interagisca con l'esterno che si trova ad una temperatura T = 40°C.

Per le parti della cabina che sono interne al veicolo è stata assegnata la condizione di "convection" in quanto saranno assegnate loro una temperatura iniziale, un coefficiente di scambio termico e scambieranno calore con l'ambiente che li circonda.

Per le superfici interne che sono a contatto, cioè le interfacce solido-aria e aria-aria per le sonde, sarà assegnata la condizione di "conjugated heat transfer" in quanto è previsto il trasferimento di calore simultaneo sia in un solido che in un fluido che sono inoltre a contatto. Le interfacce aiutano a trasferire informazioni tra le regioni: le interfacce interne permettono di trasferire massa, momenti, energia, mentre le interfacce di contatto permettono di trasferire solo energia.

Per i manichini invece è stata assegnata una condizione di temperatura alle teste a alle braccia, mentre per il corpo e le gambe che sono coperti dai vestiti è stata assegnata una condizione di convezione. Il motivo per il quale sono stati inseriti i manichini nel modello è dovuto al fatto che nella prova effettuata da Italdesign a bordo del veicolo sono presenti due persone ed inoltre ci permettono di calcolare lo scambio termico superficiale. Le condizioni al contorno si assegnano dopo aver creato la mesh e la fisica per i vari corpi e si andrà più in dettaglio nel capitolo riguardante le simulazioni.

i. Mesh

Per poter effettuare la simulazione bisogna creare la mesh. Una mesh è banalmente un insieme organizzato di vertici, spigoli e facce che definiscono la forma di un oggetto tridimensionale nello spazio. La suddivisione[14.] che la mesh crea dell'oggetto rappresenta una discretizzazione dello stesso e permette quindi al software di applicare il calcolo numerico su ognuna di queste celle per poter studiare il problema. È inoltre possibile creare sia mesh di superficie (discretizzazione mediante triangolazione), sia mesh di volume (discretizzazione mediante solidi poliedrici).

L'accuratezza di una soluzione fornita da calcolo numerico dipende fortemente dal numero di celle della mesh; in genreale, maggiore è il numero di celle, migliore sarà la soluzione. Tuttavia, quando si vogliono creare mesh con un elevatissimo numero di celle (milioni), sono necessari computer estremamente potenti che richiederanno comunque molto tempo per completare il calcolo comportando comunque un costo aggiuntivo oltre al costo dei computer stessi. Quello che si cerca di fare è di ottimizzare la mesh[14.]: una mesh ottimale è spesso non uniforme, vale a dire più fine nelle zone di interesse dove ci si aspetta forti variazioni, più grossolana nelle zone relativamente calme. Bisogna quindi cercare di trovare un giusto compromesso tra accuratezza della soluzione e soluzione in termini di costi.

Tornando al problema, si procede quindi a creare una nuova mesh scegliendo i vari modelli ed impostando i valori di default. Per tutti i corpi del caso in esame, sono stati scelti i modelli:

- Surface remesher (migliora la qualità complessiva superficiale ed ottimizza sia la mesh di volume che l'opzione prism layer[14.]);
- Polyhedral mesher (fornisce una soluzione bilanciata quando ci sono problemi nella realizzazione di mesh complesse. In STAR-CCM +, uno speciale schema di duplicazione viene utilizzato per creare la mesh poliedrica da una mesh tetraedrica sottostante, che viene automaticamente creata come parte del processo[14.]);
- Prism layer mesher (è integrato alla mesh volumetrica per generare celle prismatiche ortogonali accanto alle superfici o ai contorni. Questo strato di celle è necessario per migliorare l'accuratezza della soluzione di flusso. Un prism layer è definito da spessore e numero di layers all'interno[14.]);
- Automatic surface repair (fornisce una procedura automatica per correggere una serie di problemi di tipo geometrico che possono esistere nella superficie una volta completato il processo di rimodellamento della superficie e sono utilizzate diverse metriche per determinare se sono necessarie correzioni automatiche[14.])

I parametri di default che interessano sono:

- Base size (dimensione caratteristica della discretizzazione);
- Minimun surface size (specifica il limite inferiore delle lunghezze dei bordi sulla mesh superficiale. È possibile specificare la dimensione minima della superficie come relativa o assoluta[14.]);
- Prism layer total thickness (controlla la distanza tra i vari layer).

Prima di creare la mesh, è utile usufruire dei controlli di superficie e di volume che ci permettono di definire, all'interno del nostro modello, delle zone in cui andare ad infittire o allargare la mesh. In questo caso si sceglie di infittire la mesh in corrispondenza delle due sonde poste nella zona teste dei

passeggeri anteriori in quanto, scopo della prova, è proprio valutare la temperatura raggiunta in corrispondenza di quelle sonde.

ii. Physics continua

A questo punto, è stato possibile creare la fisica da assegnare ai vari corpi del modello di studio. Quando si crea una nuova mesh, il programma STAR-CCM+ crea automaticamente un nuovo "physics" al quale bisogna poi assegnare i modelli di interesse. In questo caso sono stati creati quattro diversi physics, uno per aria, sonde e manichini, uno per la scocca, uno per le superfici vetrate, ed uno per i sedili.

Modello per l'aria:

- Three dimensional;
- Implicit unsteady (ogni passo temporale fisico comporta un certo numero di iterazioni interne per far convergere la soluzione per quel dato istante di tempo[14.]);
- Gas;
- Segregated flow (risolve a turno ciascuna equazione del momento, una per ogni dimensione[14.]);
- Gradients (utilizzati in diversi punti all'interno della metodologia della soluzione dell'equazione di trasporto[14.]);
- Ideal gas;
- Segregate fluid temperature (risolve l'equazione di energia totale con la temperatura come variabile risolta. L'entalpia è calcolata dalla temperatura secondo l'equazione di stato[14.]);
- Turbulent;
- Reynolds-Averaged Navier-Stokes (fornisce le relazioni di chiusura delle equazioni regolando il trasporto delle quantità di flusso medie[14.]);
- k-ε turbulent;
- Realizable k-ε two-layer (il modello ottiene la flessibilità aggiuntiva di un totale trattamento a parete[14.]);
- Exact wall distance (esegue un calcolo preciso della proiezione nello spazio reale, basato su una triangolazione della mesh superficiale[14.]);
- Two-layer all y+ wall treatment (utilizzato per le condizioni al contorno della parete[14.]);
- Cell quality remediation (identifica le celle di scarsa qualità, utilizzando una serie di criteri predefiniti e migliora la robustezza della soluzione[14.]);
- Gravity;

- Radiation;
- Surface to surface radiation (il mezzo che riempie lo spazio tra le superfici non è partecipe e consente di simulare lo scambio di radiazioni termiche tra le superfici diffuse formando un insieme chiuso[14.]);
- View factors calculator (consente il calcolo automatico del fattore di vista[14.]);
- Multi-band thermal radiation (consente di simulare la radiazione diffusa e speculare che dipende dalla lunghezza d'onda o dalla frequenza[14.]);

Modello per la scocca:

- Three dimensional;
- Implicit unsteady;
- Solid;
- Segregated solid energy;
- Gradients;
- Constant density;
- Cell quality remediation;
- Radiation;
- Surface to surface radiation;
- View factor calculator;
- Multi-band thermal radiation.

Per *sedili* e *vetri* i modelli fisici sono gli stessi utilizzati per la scocca ma si procederà a sostituire il materiale utilizzato e ad assegnare condizioni diverse.

Per tutti i corpi, è stata impostata una temperatura iniziale di 67 °C che rappresenta il valore di input per la prima iterazione.

Bisogna inoltre specificare alcuni dati per alcuni modelli dei physics continua, in particolare per il modello Solid e il modello Multi-band thermal radiation.

Il modello Solid rappresenta il materiale di cui il corpo è formato e poiché abbiamo più corpi formati da diversi materiali, bisogna modificare il materiale di default scelto da STAR-CCM+. Per la scocca è stata scelta una lega di alluminio senza modificare le sue proprietà (densità e coefficiente di scambio termico) mentre per le superfici vetrate si sceglie come materiale appunto il vetro. Per i sedili, nei quali è contenuta tutta la resistenza interna delle varie parti che compongono la cabina internamente, non è importante quale materiale si sceglie, in quanto le proprietà del materiale scelto

saranno modificate sia in base ai risultati ottenuti dall'analisi a parametri concentrati (usati come dati di partenza), sia per tentativi in modo da avvicinarsi quanto più possibile alla curva sperimentale.

Il modello Multi-band thermal radiation consente di simulare la radiazione diffusa e speculare che dipende dalla lunghezza d'onda o dalla frequenza. È necessario definire una temperatura di radiazione, impostata a 40 °C, e le tre bande spettrali alta, visibile, bassa per le quali è stato impostato il limite inferiore e superiore.

iii. Turbolenza

Per quanto riguarda la scelta del modello di turbolenza, è necessario fare un discorso a parte facendo prima di tutto una panoramica sulla turbolenza stessa: cercare di capire il comportamento della turbolenza nel flusso dei fluidi è uno dei più importanti, intriganti e irrisolti problemi della fisica classica [15.]. È risaputo che la maggior parte dei fluidi ha un flusso turbolento e in molti casi rappresentano la fisica dominante. Il fenomeno della turbolenza è stato studiato dai più grandi fisici ed ingegneri del XIX e XX secolo, ed ancora non è stato pienamente compreso come la turbolenza si verifichi, ne possiamo prevedere un comportamento turbolento con ogni grado di affidabilità, anche in situazioni di flusso molto semplici. Pertanto, lo studio della turbolenza è motivato sia dalla sua intrinseca sfida intellettuale sia dall'utilità pratica di una comprensione approfondita della sua natura.

L'osservazione di flussi turbolenti [16.] è un'esperienza quotidiana che si identifica con il moto non stazionario, irregolare ed apparentemente caotico di un fluido, ma non è chiaro l'effetto che la turbolenza ha sulle caratteristiche globali di un flusso.

Le fluttuazioni di velocità indotte nel fluido dal moto turbolento, infatti, hanno la capacità di trasportare una quantità molto rapidamente anche in assenza di moto medio. Ciò porta ad assimilare l'effetto della turbolenza con un notevole aumento della diffusività del fluido che arriva ad essere anche due o tre ordini di grandezza maggiore rispetto al valore molecolare.

Esperienze di laboratorio sul flusso all'interno di tubi a sezione circolare sono state condotte per la prima volta da Reynolds nel 1883 il quale, osservò che combinando la velocità media del flusso U, il diametro del tubo d e la viscosità cinematica del fluido v nel fattore Ud/v (numero di Reynolds) si poteva descrivere la dinamica del flusso in 3 categorie differenti:

 Per Re ≤ 2100 il flusso si manteneva stazionario e si comportava come se delle lamine rettilinee (da cui il temine flusso laminare) scorressero le une sulle altre interagendo solo attraverso degli sforzi tangenziali. Questo comportamento fu notato osservando l'evoluzione di una "streakline" di inchiostro rilasciata da una posizione fissa all'interno del condotto; la linea di colorante, infatti, si manteneva rettilinea diffondendo molto debolmente mentre si allontanava dalla sorgente.

- Per 2100 ≤ Re ≤ 4000 la linea di colorante perdeva la sua stazionarietà e si propagava lungo una traiettoria ondulata con caratteristiche dipendenti dal tempo. La traccia di colorante preservava comunque la sua coerenza spaziale rimanendo confinata in una linea sottile.
- Per Re ≤ 4000, dopo un tratto iniziale con oscillazioni di ampiezza crescente la traccia d'inchiostro veniva diffusa in tutta la sezione trasversale del tubo fino a distribuirsi omogeneamente in tutto il flusso. Quest'ultimo regime è detto turbolento ed è caratterizzato da un moto disordinato, completamente tridimensionale e non stazionario e dà delle fluttuazioni di velocità con caratteristiche non deterministiche.



Si può in realtà affermare che [15.], sebbene il risultato finale della miscelazione turbolenta sia lo stesso di quello della miscelazione diffusiva, i meccanismi fisici sono molto diversi. Infatti, la turbolenza si verifica quando gli effetti di diffusione molecolare sono in realtà piuttosto piccoli rispetto a quelli del trasporto macroscopico. Chiaramente, se v è piccolo, dovremmo aspettarci che il comportamento avveniente e non lineare sia dominante, e questo è il caso di moto turbolento. Al contrario, se v è relativamente grande, la diffusione molecolare sarà dominante, e il flusso sarà laminare. Ricordando che v = μ/ρ , vediamo che il caso di trasporto non lineare e macroscopico corrispondente alla turbolenza si verifica quando il numero di Reynolds è grande.

Si sostiene spesso che non esiste una buona definizione di turbolenza, e molti ricercatori sono inclini a rinunciare a una definizione formale a favore di caratterizzazioni intuitive. Una delle definizioni più note è dovuta a Richardson, nel 1922:

> Le grandi spirali hanno piccole spirali, che si nutrono della loro velocità;

E le piccole spirali hanno spirali minori, E così via alla viscosità.

T. von Karman è in accordo con G. I. Taylor con la seguente definizione di turbolenza: La turbolenza è un movimento irregolare che, in generale, fa la sua comparsa in fluidi, gassosi o liquidi, quando fluiscono oltre le superfici solide o anche quando flussi vicini dello stesso fluido fluiscono oltre o l'uno sull'altro

Hinze formula un'altra definizione:

Il movimento del fluido turbolento è una condizione irregolare del flusso in cui le varie quantità mostrano una variazione casuale con le coordinate del tempo e dello spazio, in modo da poter distinguere i valori medi statisticamente distinti.

Data l'assenza di una definizione precisa della turbolenza, questo comporta l'incapacità di risolvere questo problema: se infatti non si può affermare cosa sia la turbolenza, e in quali circostanze si verifica, è altrettanto chiaro che non si riesca a darne una sua definizione quantitativa.

Grazie all'utilizzo di concetti deterministici, oggi è possibile dare una definizione più precisa della turbolenza (ma che resta comunque una definizione piuttosto vaga):

La turbolenza è una qualsiasi soluzione caotica alle equazioni 3-D di Navier-Stokes che è sensibile ai dati iniziali e che si verifica a seguito di instabilità successive dei flussi laminari poiché un parametro di biforcazione viene aumentato attraverso una successione di valori.

In particolare ci si può aspettare che un flusso turbolento abbia le seguenti caratteristiche:

- comportamento disorganizzato, caotico, apparentemente casuale;
- non ripetibilità (cioè sensibilità alle condizioni iniziali);
- intervallo estremamente ampio di scale di lunghezza e tempo (ma tale che le scale più piccole siano ancora sufficientemente grandi per soddisfare l'ipotesi del continuo);
- diffusione avanzata (miscelazione) e dissipazione (entrambe mediate dalla viscosità a scala molecolare);
- tridimensionale, dipendenza dal tempo e dalla rotazione (quindi, il flusso potenziale non può essere turbolento in quanto per definizione è irrotazionale);

• intermittenza nello spazio e nel tempo.

Un'altra caratteristica comune a tutti i flussi turbolenti [16.] è che se si ripete lo stesso esperimento e si misura la stessa quantità nello stesso punto per lo stesso intervallo temporale si ottengono dei segnali notevolmente differenti nonostante abbiano le stesse caratteristiche statistiche (valore medio, deviazione standard).

Questa osservazione sembra a prima vista inconciliabile con la natura delle equazioni che governano il fenomeno, cioè le equazioni di Navier-Stokes; essendo infatti le equazioni di tipo deterministico ed avendo condizioni iniziali ed al contorno definite si ha che anche la soluzione deve essere deterministica nello spazio e nel tempo.

Facendo un parallelo con le equazioni di Navier-Stokes possiamo annoverare tra i parametri iniziali sicuramente il campo di velocità, la pressione e la geometria del condotto, ma anche la distribuzione iniziale di temperatura (che determina la viscosità del fluido) la presenza di eventuali impurità e le condizioni di finitura superficiale del tubo. Ma poiché questi parametri non possono essere controllati in modo preciso, ciò comporta (attraverso la non linearità delle equazioni) la dinamica non deterministica precedentemente descritta. In altre parole, per quanto si cerchi di mantenere controllati tutti i parametri di un esperimento è impossibile che due realizzazioni successive dello stesso fenomeno abbiano le condizioni iniziali replicate con una precisione infinita e ciò porta inevitabilmente, per numeri di Reynolds sufficientemente grandi, a soluzioni divergenti nel tempo.

I termini non lineari sono anche gli artefici della produzione di fluttuazioni "locali" di velocità che comportano la generazione di strutture fluidodinamiche di piccola scala.

Il processo di trasferimento di energia dalle grandi strutture vorticose verso scale sempre più piccole che ne causano la dissipazione è un fenomeno che osserviamo quotidianamente in molte azioni usuali.

Alla base di questo fenomeno c'è l'instabilità dei vortici di grandi dimensioni che si frammentano in strutture sempre più piccole producendo la "cascata" di energia dalle grandi verso le piccole scale.

Questo scenario è possibile se il tempo di sopravvivenza della singola struttura è superiore al tempo caratteristico di crescita delle instabilità. Un'analisi quantitativa della fenomenologia descritta richiederebbe la conoscenza della forma iniziale della struttura e del meccanismo di crescita dell'instabilità; tuttavia osservando che le strutture più piccole avranno sopravvivenza più breve mentre la crescita delle instabilità sarà la stessa a tutte le scale, si può dire che dopo un certo numero di "frammentazioni" il meccanismo di cascata si arresterà in quanto le strutture avranno
dimensioni così piccole da venire dissipate prima che l'instabilità abbia avuto il tempo di amplificarsi. Il fatto che sia la dissipazione a porre un limite alla cascata di energia ci fa intuire che la viscosità del flusso deve avere un ruolo importante nella dinamica della turbolenza.

Ricordando l'esperimento di Reynolds, si può affermare che se il numero di Reynolds è piccolo (Re < 2100) gli effetti viscosi prevalgono su quelli inerziali (non lineari) e, essendo inibito ogni trasferimento di energia, il moto medio a grande scala non degenera in strutture più piccole. Quando invece gli effetti inerziali prevalgono su quelli viscosi (Re > 4000) il trasferimento tra i modi sarà attivato ed il moto inizialmente uniforme produrrà strutture fluidodinamiche più piccole.

La fisica del trasferimento di energia dalle grandi scale alle piccole dove viene dissipata, è contenuta interamente nelle equazioni di Navier-Stokes. Purtroppo dal punto di vista pratico, l'estremo dettaglio con cui queste equazioni descrivono il flusso costituisce al tempo stesso la debolezza del modello in quanto le risorse di calcolo necessarie per la risoluzione di queste equazioni crescono vertiginosamente con il numero di Reynolds. Possiamo osservare che dato un qualunque segnale dipendente dal tempo, è possibile decomporlo in un valore medio ed una componente fluttuante alla quale si assegna tutta la non stazionarietà:

$$u(x,t) = U(x) + u'(x,t)$$

Questa decomposizione la si può effettuare per tutte le variabili dipendenti delle equazioni di Navier-Stokes e di conservazione della massa. Il problema sta nel fatto che le equazioni disponibili non soddisfano il numero di incognite rendendo impossibile la soluzione esatta del problema.

Esistono infatti solo pochissime soluzioni esatte [15.], e queste sono ottenute attraverso l'introduzione di semplificazioni e assunzioni spesso fisicamente irrealizzabili. Pertanto, si possono ottenere pochi progressi nella comprensione della turbolenza tramite soluzioni analitiche di queste equazioni e, di conseguenza, le prime descrizioni della turbolenza si basavano principalmente su osservazioni sperimentali.

iv. Modelli di turbolenza per STAR-CCM+

In STAR-CCM+ i modi per implementare i modelli di turbolenza sono essenzialmente due[14.]: modelli che forniscono la chiusura delle equazioni Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS); simulazioni che risolvono grandi scale di turbolenza e modellano i movimenti su piccola scala (LES e DES). La maggior parte delle simulazioni si basa sul primo approccio (come questo studio). Ci sono quattro principali classi di modelli di turbolenza RANS attualmente in STAR-CCM+: modello Spalart-Allmaras, modello K-epsilon, modello K-omega e modello Reynolds Stress Transport (RST).

I modelli Spalart-Allmaras [14.] sono una buona scelta per le applicazioni in cui gli strati limite sono in gran parte collegati e la separazione è lieve se si verifica. I modelli Spalart-Allmaras per equazioni RANS non sono adatti a flussi dominati da strati a taglio libero, flussi in cui si verifica un ricircolo complesso (in particolare con trasferimento di calore) o convezione naturale.

I modelli K-Epsilon [14.] offrono un buon compromesso tra robustezza, costo computazionale e precisione. Sono generalmente adatti per applicazioni di tipo industriale che contengono ricircolazione complessa, con o senza trasferimento di calore. Il modello di turbolenza di K-Epsilon è un modello a due equazioni che risolve le equazioni di trasporto per l'energia cinetica turbolenta k e la velocità di dissipazione turbolenta ε al fine di determinare la viscosità turbolenta del vortice.

Il modello di turbolenza di K-Omega [14.] è un modello a due equazioni che risolve le equazioni di trasporto per l'energia cinetica turbolenta k e la velocità di dissipazione specifica ω (velocità di dissipazione per unità di energia cinetica turbolenta) per determinare il viscosità turbolenta del vortice.

I modelli Reynolds Stress Transport [14.] sono i modelli più complessi e computazionalmente costosi offerti in STAR-CCM + e sono consigliati per situazioni in cui la turbolenza è fortemente anisotropa, come ad esempio per un flusso vorticoso in un separatore a ciclone.

In questo studio sono stati scelti il modello K-epsilon ed il modello K-omega in quanto i più adatti per questo studio senza appesantire ulteriormente la simulazione. I modelli di K-Omega sono simili ai modelli K-Epsilon in quanto risolvono due equazioni di trasporto, ma differiscono nella scelta della seconda variabile di turbolenza trasportata. È probabile che le differenze nelle prestazioni siano il risultato delle sottili differenze nei modelli, piuttosto che di un grado più elevato di complessità nella fisica che viene catturata.

Un vantaggio del modello K-Omega rispetto al modello K-Epsilon è la sua prestazione migliorata per gli strati limite sotto gradienti di pressione avversi. Forse il vantaggio più significativo, tuttavia, è che può essere applicato su tutto lo strato limite, inclusa la regione dominata dal viscoso, senza ulteriori modifiche. Inoltre, il modello standard K-Omega può essere inoltre utilizzato senza richiedere il calcolo della distanza della parete.

Il più grande svantaggio del modello K-Omega, nella sua forma originale, è che i calcoli dei boundary layer sono sensibili ai valori di ω nel flusso libero. Ciò si traduce in un'estrema sensibilità alle condizioni al contorno di ingresso per i flussi interni, un problema che non esiste per i modelli di K-Epsilon. Le varianti del modello K-Omega incluse in STAR-CCM + sono state modificate nel tentativo di ovviare a questa mancanza.

Durante le numerose prove effettuate, è stato scelto di usare principalmente il modello K-epsilon. Sono comunque state effettuate alcune simulazioni che utilizzavano il modello K-omega per poter verificare quali differenze ci fossero rispetto al modello K-epsilon e se queste differenze fossero significative o meno.

v. Solvers e Stopping Criteria

In STAR-CCM+, i solvers (risolutori) controllano la soluzione[14.] e vengono attivati una volta per iterazione (o una volta per passo temporale). Tipicamente, un modello sceglie i solvers che sono richiesti. Diversi modelli possono utilizzare lo stesso solver e talvolta i modelli richiedono più di uno. Alcuni modelli controllano altri modelli e alcuni eseguono solo attività quando la soluzione viene inizializzata. Per questo motivo, non tutti i modelli utilizzano i solvers. I modelli possono anche utilizzare solvers che svolgono compiti secondari oltre al solver che il modello ha scelto per controllarlo.

In questo caso interessa solo impostare il passo temporale di un secondo o mezzo secondo a seconda delle simulazioni mentre per gli altri solvers si lasciano le impostazioni di default.

Gli stopping criteria (criteri di arresto) consentono[14.] di specificare per quanto tempo viene eseguita la soluzione e in quali condizioni si interrompe l'iterazione e / o la marcia nel tempo. Ogni stopping criteria specificato viene valutato al completamento di ogni passaggio di simulazione e viene utilizzata una regola logica per determinare se l'interazione di tutti i criteri interrompe il solver. Il nodo del gestore degli stopping criteria, che dispone di un proprio menu a comparsa, contiene tutti i nodi dei criteri di arresto nella struttura di simulazione.

In questo caso, poiché si sta simulando un transitorio, si impostano un certo numero di iterazioni per ogni passo temporale, ed un numero totale di secondi di simulazione.

vi. Post-processing

Prima di avviare la simulazione, è importantissimo creare scene e plot per poter visualizzare i risultati della simulazione e fare le dovute analisi e confronti. STAR-CCM+ permette di creare diversi tipi di scene: scalari, vettoriali, geometriche, mesh. In questo caso, interessano principalmente le scene

scalari e sono utilizzate essenzialmente per verificare la temperatura delle varie parti che compongono il modello.

Quando si apre una "New Scalar Scene" si devono scegliere le parti di interesse e scegliere una funzione; per creare invece un nuovo Plot, bisogna prima creare dei report: con STAR-CCM+ se ne possono creare di svariati, ma quelli che interessano questo studio sono i "Surface Average" e "Volume Average" dove si va a selezionare la parte (per la surface average) o il corpo (per la volume average) e la solita field function (che per questo studio è sempre la temperatura). A questo punto si può scegliere se creare un plot per ogni report oppure inserire più report nello stesso plot se si vuole magari fare un confronto tra alcuni report o magari ancora per poter tenere insieme dei report che rappresentano più parti dello stesso corpo.

Tutto quello che riguarda il post-processing può inoltre essere visualizzato e monitorato anche mentre la simulazione è in esecuzione.

CAPITOLO 4: SIMULAZIONI

a. Modello semplice 1

I primissimi modelli costruiti su STAR-CCM+ sono relativamente semplici in quanto era necessario acquisire una certa dimestichezza col programma ed era inoltre necessario testare i vari modelli per capire bene come poter replicare al meglio la prova di cool-down in questione. È stato quindi costruito il seguente modello:



Immagine del modello

Il modello, di 1 m \times 0,5 m \times 0,5 m, consiste in un guscio pieno di aria e sono presenti un ingresso aria che dovrebbe rappresentare l'ingresso aria del condizionatore dalle bocchette poste sulla plancia del veicolo, ed una uscita. È stata costruita una mesh contenente i modelli:

- Surface remesher;
- Polyhedral mesher;
- Prism layer mesher;
- Extruder (genera una mesh di volume al fine di produrre celle estruse ortogonali per superfici di confine specifiche).

È stata impostante inoltre una base della mesh di 8 mm.

Si riportano di seguito le immagini della mesh superficiale e volumetrica:



Immagine della mesh di superficie



Immagine della mesh di volume

Per quanto riguarda la fisica da assegnare al corpo, sono stati scelti i seguenti modelli:

- Three dimensional;
- Steady;
- Gas;
- Segregated flow;
- Gradients ;
- Ideal gas;
- Segregate fluid temperature;
- Turbulent;
- Reynolds-Averaged Navier-Stokes;
- k-ε turbulent;
- Realizable k-ε two-layer;
- Exact wall distance;
- Two-layer all y+ wall treatment;

- Gravity;
- Radiation;
- Surface to surface radiation;
- View factors calculator;
- Gray thermal radiation (consente di simulare la radiazione diffusa indipendentemente dalla lunghezza d'onda ed è stata impostata una temperatura di 30°C [14.]);
- Solar load.

Il modello Solar load è utilizzato per modellare i carichi di radiazione solare, sia diretti che diffusi, e si vanno a specificare i dati manualmente. In particolare: azimut (270°), altitude (45°), direct solar flux (700 W/m²), diffuse solar flux (300 W/m²). Cosi facendo, il sole è posto di fronte al vetro anteriore ed irradia quindi il veicolo da un solo lato. Nelle prove reali di cool-down, la radiazione solare è simulata attraverso un certo numero di fari posizionati tutti sulle pareti della cella di prova, circondando la vettura (quindi la vettura è irradiata da ogni direzione) in modo da simulare una radiazione di 1000 W/m².

Si possono ora assegnare le condizioni alle varie parti:

- È stata definita una portata di aria di 0,1 kg/s ed una temperatura di ingresso di 17 °C;
- Per il tetto ed il pavimento della cabina è stata scelta una condizione di convezione a contatto con una ambiente esterno alla temperatura di 30 °C. È stato specificato un coefficiente di scambio termico di 30 W/m²K ed un coefficiente di assorbimento pari a 0,8 mentre il coefficiente di trasmissività è pari a 0;
- Per il vetro anteriore è stata assegnata anche in questo caso una condizione di convezione sempre per scambiare calore con un ambiente alla temperatura di 30 °C ma è stato scelto un coefficiente di scambio termico pari a 15 W/m²K con coefficiente di assorbimento pari a 0,6 e coefficiente di trasmissività pari a 0,3 in quanto si desidera che il sole irraggi la cabina internamente;
- Per le altre parti è stata scelta una condizione di adiabaticità.

Prima di avviare la simulazione sono state creata delle scene di temperatura e velocità; inoltre è stato costruito un plot per monitorare le temperature di tetto, parabrezza, pavimento, ingresso e uscita aria. È stato scelto infine di effettuare 500 iterazioni.

Si riportano di seguito i risultati ottenuti:



Grafici residui

I grafici dei monitor residui [14.] sono utili per giudicare la convergenza (o divergenza) di una soluzione e vengono creati automaticamente all'interno di ogni simulazione. Tuttavia, è importante capire sia il significato dei residui che i loro limiti. Mentre è vero che la quantità residua tende verso un numero piccolo quando la soluzione è convergente, i monitor residui non possono essere considerati come l'unica misura di convergenza. Il residuo in ciascuna cella rappresenta il grado in cui l'equazione discretizzata è soddisfatta. Se la soluzione iniziale soddisfa perfettamente le equazioni discretizzate, i residui non diminuiscono affatto. Se la simulazione è stazionaria (come in questo caso), la convergenza viene visualizzata sul numero totale di iterazioni. Se la soluzione è dipendente dal tempo, bisogna assicurarsi che la convergenza si verifichi all'interno di ciascuna fase temporale.

I residui calcolati sono i seguenti:

- Tdr (turbulent dissipation rate) (velocità di dissipazione turbolenta) è la velocità con cui l'energia cinetica turbolenta è convertita in energia termica interna [14.].
- Tke (turbulent kinetic energy) (energia cinetica turbolenta) è l'energia cinetica media per unità di massa associata ai vortici nel flusso turbolento. Fisicamente, l'energia cinetica della turbolenza è caratterizzata da fluttuazioni di velocità quadrate medie misurate [14.].
- Sono inoltre calcolati i residui riguardanti l'equazione di energia, di moto e di massa.



Plot di temperatura delle parti del modello

Come si può notare dal grafico sopra, le varie parti che scambiano calore, vedono diminuire la loro temperatura fino a stabilizzarsi ad un certo valore, sintomo che l'aria in ingresso raffresca effettivamente la cabina. La temperatura del pavimento della cabina diminuisce di più rispetto alla temperatura di tetto e vetro anteriore in quanto non subisce direttamente il carico solare ed inoltre riceve prima l'aria fresca in ingresso.



Immagine della temperatura esterna del modello

L'immagine sopra rappresenta la temperatura raggiunta dalle varie parti della cabina e si possono distinguere le parti più calde da quelle più fredde e si può notare come l'immagine sia in accordo con il plot di temperatura mostrato precedentemente.



Stramline di temperatura



Stramline di temperatura

Queste due immagini rappresentano il moto dell'aria in ingresso e la sua temperatura. Si può notare come l'aria fredda in ingresso tenda a muoversi giustamente verso il basso della cabina per poi mescolarsi con l'ambiente interno.



Vista in sezione della velocità dell'aria all'interno della cabina

Quest'ultima immagine rappresenta invece una vista in sezione della cabina nella quale è possibile vedere la velocità che l'aria assume in ingresso e all'interno della cabina stessa. Si vede come l'aria entri con una certa velocità per poi diminuire fino ad arrivare in zone nelle quali è quasi ferma.

Attraverso questa simulazione molto semplificata è stato quindi possibile capire i principali modelli da utilizzare, le scene e i plot che permettono di visualizzare al meglio la soluzione, come il programma lavora ed un punto di partenza per poter avvicinarsi alla prova richiesta. Il getto risulta inoltre molto coeso.

b. Modello semplice 2

Il passo successivo è stato quello di aggiungere ulteriori dettagli al modello in modo da avvicinarci ulteriormente alla prova reale.



Immagine del modello

Il modello ora presenta uno spessore per la cabina, due sedili, ed è stato possibile considerare il volume di aria all'interno della cabina. Il modello presenta quindi un corpo solido (cabina) ed un corpo fluido che è appunto l'aria interna. Cosi facendo sarà possibile applicare il modello di "conjugated heat transfer" utilizzato per applicazioni che prevedono il trasferimento di calore simultaneo sia in un solido che in un fluido e si vedrà come questi due corpi interagisco con l'aria fresca immessa dalle bocchette.

La mesh, costruita con una base di 10 mm, contiene i seguenti modelli già utilizzati in precedenza:

- Surface remesher;
- Polyhedral mesher;
- Prism layer mesher.



Immagini della mesh di volume

In questo caso è stata creata la fisica da assegnare sia alla cabina, sia all'aria interna. Per quanto riguarda l'aria, i modelli scelti sono gli stessi visti in precedenza, fatta eccezione che per i modelli che riproducono il carico solare in quanto sono stati assegnati solo alla fisica del solido. È stata inoltre impostata una condizione iniziale di temperatura pari a 60 °C per la cabina e 45°C per l'aria; questi due valori indicano il punto di partenza della simulazione in quanto la prima iterazione assumerà questi valori come dati in ingresso per poter calcolare il profilo di temperatura dei due corpi. La simulazione è eseguita in regime stazionario.

Per quanto riguarda le condizioni da assegnare alle parti del modello, non ci sono variazioni riguardanti l'ingresso dell'aria nel veicolo. Per la cabina, è stata assegnata una condizione di convezione a tutte le superfici esterne che interagiscono con l'ambiente esterno; per le superfici interne, a contatto con l'aria interna alla cabina, è stata assegnata la condizione di conjugated heat transfer. Le condizioni di temperatura dell'ambiente esterno ed i coefficienti di scambiano termico per le superfici sono gli stessi della simulazione precedente (30°C, 15 W/m²K per il vetro, 30 W/m²K per le altre parti della cabina).

Per questa simulazione, oltre ad utilizzare il modello di turbolenza K-Epsilon, è stata impostata anche una soluzione che utilizza il modello di turbolenza K-Omega. Il modello K-Omega quando viene scelto nel physics continua dell'aria, richiede alcuni moduli differenti rispetto al modello K-Epsilon, e sono i seguenti:

- K-Omega Turbulence;
- SST (Menter) K-Omega (sfrutta l'insensibilità alle condizioni del flusso libero del modello K-Epsilon nel campo lontano, pur mantenendo i vantaggi del modello K-Omega vicino alle pareti);
- All y+ Wall Treatment (per il trattamento a parete);
- Gamma Transition (basato su correlazione ad equazioni univoche che fornisce un approccio veramente locale per l'inizio della transizione in uno strato limite turbolento).

Si riportano di seguito i risultati:

Report di temperatura per modello K-Epsilon



Report di temperatura per modello K-Omega



Dai grafici riportati sopra si nota come le due soluzioni per i due differenti modelli siano molto simili fatta eccezione per il fatto che nella soluzione che utilizza il modello K-Omega si raggiunge una condizione finale di temperatura leggermente minore (di circa 1°C). La differenza è più apprezzabile per quanto riguarda il profilo di temperatura dell'output dove la condizioni finali di temperatura differiscono di circa 5°C, anche se questo non è rilevante ai fini della prova.

Scene di temperatura per il modello K-Epsilon



Dalle immagini riportate sopra si può vedere la temperatura raggiunta nelle varie parti della cabina. Nelle viste in sezione si può osservare il flusso di aria che entra all'interno della cabina ed il suo moto che in questo caso risulta ostacolato dalla presenza dei sedili.

Scene di temperatura per il modello K-Omega





Le immagini relativa alla temperatura per la simulazione che utilizza il modello K-Omega, mostrano come la massima temperatura raggiunta alla fine della simulazione sia leggermente inferiore rispetto

al caso che utilizza il modello di turbolenza K-Epsilon. In questo caso inoltre si può osservare come l'aria che entra all'interno della cabina si sviluppi più orizzontalmente e con un flusso più sottile.

Scene di velocità per il modello K-Epsilon



Scene di velocità per il modello K-Omega



Nelle immagini sopra riportate relative ad entrambi i modelli di turbolenza, si può notare appunto la velocità dell'aria che entra in cabina e si possono fare considerazioni analoghe a quelle fatte per le scene di temperatura.

c. Modello finale

Il modello seguente rappresenta la cabina di prova fornita dall'azienda Italdesign, fatta eccezione per le alette che dividono il flusso in entrate e la presenza dei manichini che saranno aggiunti nella simulazione finale nella quale si cercherà anche di considerare carico solare differentemente per simulare al meglio la presenza dei fari durante la prova reale:



Immagine del modello



Vista interna del modello

Il modello di dimensioni (3 m x 1,4 m x 1,5 m) (lunghezza x larghezza x altezza) è dotato di scocca, vetro anteriore, vetro posteriore, due finestrini per lato, due sedili, ingresso ed uscita aria, due sonde poste in corrispondenza della zona teste per valutare la temperatura in quelle zone. Anche in questo caso si considera l'aria interna al veicolo in modo da applicare il modello di "conjugated heat transfer". Questo modello [17.] descrive lo scambio termico tra un solido ed un fluido che interagiscono. I processi fisici e le soluzioni delle equazioni sono considerate separatamente per i due corpi. Le condizioni di corrispondenza all'interfaccia per queste soluzioni forniscono le distribuzioni di temperatura e il flusso di calore lungo l'interfaccia corpo / flusso, non necessitando di un coefficiente di scambio termico.

Per questo modello sono state eseguite diverse simulazioni:

- Simulazione in regime stazionario con modello di turbolenza K-Epsilon;
- Simulazione in regime stazionario con modello di turbolenza K-Omega;
- Simulazioni in regime transitorio con modello di turbolenza K-Epsilon con diversa finezza della mesh;

• Simulazione in regime transitorio con modello di turbolenza K-Omega.

Per quanto riguarda le diverse mesh create, se ne riportano solo le immagini relative alla mesh più fine che contiene i modelli finali descritti in precedenza.



Immagine della mesh di volume



Immagine degli interni della mesh di volume



Vista dei particolari della mesh

Nelle viste in sezione che seguono, si può osservare come i controlli di superficie di volume abbiano permesso di infittire la mesh nelle zone di interesse, vale a dire in corrispondenza delle sonde di temperatura.



Vista in sezione della mesh



Vista del particolare dove la mesh è particolarmente fitta

Anche per quanto riguarda la fisica da assegnare i corpi si è discusso in precedenza e queste simulazioni riprendono esattamente quei modelli, fatta eccezione per il carico solare in quanto si sta utilizzando sempre il modello Solar Load.

i. Simulazioni stazionarie con modelli di turbolenza K-Epsilon e K-Omega

Le due soluzioni di tipo stazionario che utilizzano entrambi i modelli sopra citati, sono riportate di seguito insieme in quanto non si notano apprezzabili variazioni della soluzione in base al modello di turbolenza scelto. Per quanto riguarda le condizioni da assegnare alle regioni, si considera sempre convezione per le superfici esterne, e coniugated heat transfer per le interfacce.

Plot di temperatura per modello K-Epsilon



Plot di temperatura per modello K-Omega



Come si nota dai due grafici sopra riportati, le due soluzioni sono praticamente identiche, fatta accezione per il fatto che nel modello di turbolenza K-Omega, in 600 iterazioni, si raggiunge, per i sedili e per l'aria interna, una temperatura inferiore di circa 2°C. Si può inoltre osservare come le curve non siano orizzontali ma tendono ancora a diminuire la loro temperatura, sintomo che non è stata raggiunta la condizione finale di temperatura.

Soluzioni di questo genere non soddisfano la prova, ma rappresentano il punto di partenza per effettuare le simulazioni in regime transitorio ed inoltre rappresentano una soluzione iniziale del flusso.

Scene di temperatura e velocità per il modello K-Epsilon



Da queste scene di temperatura si può notare sia l'effetto del carico solare, sia l'effetto dell'aria fredda all'interno della cabina; si osserva infatti come la parte dei sedili nella zona teste sia molto fredda dovuto proprio al fatto che l'aria è indirizzata in quella direzione per poi diffondersi in tutta la cabina.



Stramline di temperatura



Streamline di velocità

Nelle due immagini precedenti si può osservare il moto dell'aria all'interno della cabina con diverse temperatura e velocità e come il flusso di aria sia ostacolato dai due sedili.

Scene di temperatura e velocità per il modello K-Omega

Per le immagini che seguono si possono fare esattamente le stesse considerazioni fatte per il modello di turbolenza precedente.



Streamline di temperatura



Streamline di velocità

ii. Simulazioni in regime transitorio con modello di turbolenza K-Epsilon e con diversa finezza della mesh

Queste simulazioni riprendono esattamente i modelli finali che servono per simulare la prova di cooldown, sia per quanto riguarda la fisica assegnata ai vari corpi, sia le condizioni assegnate alle varie regioni. La sostanziale differenza rispetto alle simulazioni precedenti sta nel fatto che, per questa e per le prossime simulazioni mostrate, si sceglie di effettuare simulazioni in regime transitorio. Poiché la prova reale di cool-down serve a valutare il transitorio di temperatura che si ha in determinate zone del veicolo, la soluzione del transitorio della curva di temperatura nella zona teste, sarà confrontata con la curva fornita da Italdesign.

Per effettuare questo tipo di simulazioni, bisogna scegliere il modello appropriato, specificare il passo temporale, il numero di iterazioni per ogni passo temporale, e la durata totale della simulazione.

Pertanto, si riporteranno le scene di temperatura che permettono di apprezzare visivamente la temperatura raggiunta nelle varie parti della cabina, ed i plot di temperatura per il confronto delle curve.

Soluzione con mesh grossolana



Per questa simulazione sono state eseguite 15 iterazioni ogni secondo per 1800 secondi

Immagine della temperatura esterna del modello



Immagine della temperatura degli interni



Vista in sezione della temperatura

Le immagini riportate sopra rappresentano le scene di temperatura ottenute per questa simulazione. Le prime due immagini mostrano la temperatura delle varie parti dove si può osservare l'effetto del carico solare che irradia internamente il veicolo per mezzo delle superfici vetrate ed impatta principalmente sui due sedili anteriori, e le temperature relativamente basse raggiunte dalle due sonde poste in corrispondenza della zona teste. Nella vista in sezione si può osservare come il carico termico posseduto dalla scocca influenzi l'ambiente interno che risulta comunque raffreddato per mezzo dell'aria entrante dalle bocchette che sembra svolgere quindi la giusta funzione.



Grafico del transitorio di temperatura per la sonda zona teste

Il plot sopra riportato mostra l'intero transitorio di temperatura effettuato da una delle due sonde (si riporta un solo plot in quanto i due andamenti di temperatura per le due sonde sono estremamente simili) e rappresenta il transitorio di temperatura effettuato dall'aria in quella precisa zona all'interno del veicolo. Questa curva è stata esportata su Excel e quindi confrontata con la curva fornita da Italdesign e se ne riporta di seguito il grafico.



Grafico di confronto tra la curva reale e la curva simulata

Si può facilmente osservare come le curve abbiano simile andamento e raggiungono la temperatura richiesta dopo poco più di dieci minuti di prova; nonostante leggere differenze nel primo tratto della curva, nel la curva simulata presenta un maggiore raffreddamento, si può affermare che la curva ottenuta soddisfa le specifiche richieste ma non si può affermare con certezza che il modello risulta validato. Questo accade perché l'intera simulazione è stata costruita sulla base delle condizioni della prova reale di cool-down, e sul transitorio di temperatura delle sole zone teste e ingresso aria. Quindi

non è detto che effettuando l'analisi CFD in un punto anche di poco diverso rispetto a quello calcolato, si ottengano gli stessi risultati.

Soluzione con mesh fine



Immagine della temperatura esterna del modello



Immagine della temperatura dei particolari interni





Per quanto riguarda le scene di temperatura sopra riportate, si possono fare considerazioni analoghe a quelle fatte per la simulazione precedente. Tuttavia, questa simulazione ha una durata di 1200 secondi in quanto per poter validare il modello è sufficiente questo tempo di simulazione. Rispetto al caso precedente, quindi, si può osservare dalle immagini come le varie parti che compongono il modello risultino leggermente più calde in quanto hanno avuto meno tempo per raffreddarsi. Nonostante ciò, dalla vista in sezione si può notare come la temperatura interna della cabina sia già diminuita di molto e permette comunque un certo livello di comfort agli eventuali occupanti.





Il transitorio di temperatura sopra riportato fa sempre riferimento alla stessa sonda come nel caso precedente ma con mesh più fine.



Grafico di confronto tra curva reale e curva simulata

Confrontando le curva ottenuta per questa simulazione, con la curva sperimentale fornita, si può osservare come la curva ottenuta dall'analisi CFD segua lo stesso andamento della curva sperimentale, ma la curva simulata si posiziona circa $2 \div 4$ °C al di sotto della curva sperimentale.

Anche questo transitorio di temperatura ottenuto può considerarsi accettabile in quanto il raffreddamento è effettivamente avvenuto ed ha un andamento simile a quello richiesto; attraverso questa simulazione sono state ottenute addirittura temperature minori in tempi minori restando comunque molto vicini alla curva da replicare.



Grafico di confronto tra le soluzioni ottenute con diverse mesh

Il grafico sopra, riporta la curva sperimentale fornita da Italdesign, e le curve ottenute dalle simulazioni. La cosa molto interessante che si può osservare è la differenza tra le curve simulate dipendente dalla finezza della mesh. Una mesh più grossolana infatti, tende a mediare il risultato permettendoci di ottenere una curva più lineare e che si avvicina di più alla curva sperimentale. Una mesh più fine tuttavia, permette di ottenere un risultato più corretto in quanto le varie equazioni saranno risolte in più punti del modello. Inoltre la mesh più fine permette anche osservare i fenomeni dovuti alla turbolenza del flusso che provocano appunto queste fluttuazioni della curva.

iii. Simulazione in regime transitorio con modello di turbolenza K-Omega

Questa simulazione, che utilizza una mesh fine è esattamente identica alle simulazioni precedenti, fatta eccezione per il modello di turbolenza scelto, che in questo caso è il modello K-Omega. Si è scelto di effettuare questa simulazione in quanto si vogliono valutare le differenze tra i due modelli di turbolenza scelti.



Immagine della temperatura esterna del modello



Immagine della temperatura dei particolari interni



Vista in sezione della temperatura

Le scene di temperatura sopra riportate, permettono di effettuarle stesse valutazioni fatte per le simulazioni precedenti. Facendo un confronto con la soluzione che utilizza la stessa base per la mesh

ma con modello di turbolenza K-Epsilon, non si osservano sostanziali differenze in quanto gli intervalli di temperatura sono gli stessi e l'effetto di raffreddamento dell'aria in ingresso è comunque ottenuto.



Grafico del transitorio di temperatura effettuato dalla sonda

Le differenze maggiori si possono notare nel plot di temperatura sopra riportato che fa sempre riferimento ad una due sonde poste in corrispondenza della zona teste. Si possono facilmente osservare le fluttuazioni di temperatura che si sono avute durante il transitorio. Sembra quasi che il modello di turbolenza K-Omega permetta di considerare maggiormente il fenomeno della turbolenza che si riscontra all'interno della cabina e che è dovuto proprio al moto dell'aria al suo interno, proprio come accade quando ci utilizza una mesh con una base più piccola.



Grafico di confronto tra curva reale e curva simulata

Come per i casi precedenti, si riporta il grafico di confronto tra la curva fornita da Italdesign e la curva ottenuta dall'analisi CFD. Mettendo da parte queste fluttuazioni e considerando una sua media, si osserva come le due curve abbiano circa lo stesso andamento ma la curva simulata si posiziona ad una temperatura di qualche grado inferiore rispetto alla curva reale. Il modello rispetta comunque il transitorio di temperatura cosi come la temperatura finale da raggiungere.



Grafico di confronto tra due simulazioni con la stessa mesh e diverso modello di turbolenza

Si riporta infine un grafico, che mette a confronto la curva che mostra il transitorio reale di temperatura, con i due transitori ottenuti dall'analisi CFD che presentano la stessa mesh ma diverso modello di turbolenza. Come detto prima, si può osservare che la curva ottenuta con il modello K-Omega, presenta molte più fluttuazioni rispetto alla curva che utilizza il modello K-Epsilon. Queste fluttuazioni sono in realtà dovute al fatto che il modello K-Omega mostra una estrema sensibilità alle condizioni al contorno di ingresso per i flussi interni, un problema che non esiste per i modelli di K-Epsilon. Il modello di turbolenza K-Omega inoltre modella meglio vicino alle pareti se la mesh è sufficientemente fine, cosa che a quanto pare non è in questo caso, in quanto ci si è concentrati sulla zona teste.

Tutto questo permette di concludere che il modello K-Epsilon si presta meglio al problema che si sta affrontando.

d. Modello finale con l'aggiunta dei manichini

Questo modello è esattamente identico a quello utilizzato nelle precedenti simulazioni, fatta eccezione per la presenza di due manichini posizionati sui sedili anteriori e per la presenza di alette che andranno a dividere il flusso. Quindi questo rappresenta il modello finale con tutti i parametri descritti nel capitolo riguardante la CFD ed è il modello che dovrebbe permetterci di simulare al meglio la prova reale di cool-down.

L'unico parametro ancora da specificare è la radiazione solare. Come detto, nella prova reale di cooldown, il veicolo è circondato da una serie di fari che lo irraggiano da ogni direzione e simulano un flusso di 1000 W/m². Per questo modello, quindi, verranno effettuate tre diverse simulazioni:

- Simulazione che utilizza il Solar Load;
- Simulazione nella quale si è deciso di assegnare alle superfici esterne, oltre che la condizione di "environment", anche una condizione di "radiation flux" che permette di assegnare alle varie superfici un flusso radiativo di 1000 W/m² diviso in tre bande in base allo spettro della radiazione solare;
- Simulazione che utilizza fari posti intorno al veicolo dotati di una certa temperatura.

Sono inoltre stati estruse verso l'esterno le bocchette di inlet in modo da creare una minima turbolenza per il flusso ancora prima dell'ingresso in cabina.

Di seguito si riportano le immagini relative alla mesh più fine con la quale sono state eseguite tutte le diverse simulazioni (le immagini relative alla geometria sono state mostrate nel capitolo della CFD quando si è parlato del modello fisico/numerico).



Immagine della mesh di volume del modello



Vista dei particolari delle alette

Nell'immagine sopra riportata si possono notare le piccole griglie che rappresentano le alette che servono per indirizzare il flusso dalle bocchette, che nella realtà sono mobili, ma nella prova reale di cool-down sono tenute fisse ed indirizzate in modo da convogliare il flusso di aria verso le teste.

Non ci si aspetta comunque di ottenere risultati significativamente diversi dopo l'aggiunta delle alette.



Vista dei particolari interni della mesh



Vista dei particolari interni della mesh

Nelle immagini sopra si può osservare la mesh ottenuta per i particolari interni; dei manichini interessa solo lo scambio termico superficiale e si cerca di tenere inoltre conto del fatto che nella prova reale sono presenti due operatori a bordo della vettura.



Vista in sezione della mesh



Vista in sezione del particolare della mesh

Nelle due viste in sezione precedenti si possono notare le zone nelle quali la mesh risulta più fine; proprio come per le simulazioni precedenti, l'attenzione è focalizzata in corrispondenza della zona teste. i. Simulazione che utilizza il Solar Load



Immagine della temperatura esterna del modello



Immagine della temperatura interna del modello

Le due immagini sopra rappresentano le scene di temperatura raggiunte a fine transitorio. Nonostante la scocca esternamente sia ancora calda, in quanto la macchina è ferma e riceve la radiazione solare, le parti interne risultano comunque raffreddate, sintomo che il climatizzatore ha svolto la sua funzione in modo corretto.



Vista in sezione della temperatura interna

Dalla vista in sezione sopra, si riesce ad apprezzare al meglio la temperatura raggiunta. Si possono osservare infatti le zona più fredde che corrispondono proprio alla zona teste, ed inoltre in tutta la cabina sembra essere stata raggiunta una temperatura ragionevole.







Grafico del transitorio di temperatura della sonda 2

I due plot di temperatura riportati sopra, mostrano il transitorio effettuato dalle due sonde. Si può osservare come i due transitori abbiano simile andamento e come ci sia un rapido raffreddamento iniziale, seguito da una fase di assestamento nella quale si notano moltissime fluttuazioni dovute al moto turbolento catturato da una mesh molto fine. Come visto in precedenza, infatti, utilizzando una mesh più grossolana, queste fluttuazioni spariscono ma si ottiene una soluzione più mediata e meno corretta.



Grafico di confronto tra i due transitori reale e simulato

Dal confronto tra il transitorio di temperatura reale e il transitorio ottenuto dall'analisi CFD, si nota come la curva simulata presenti un raffreddamento iniziale maggiore e raggiunge una temperatura finale inferiore di circa 2 °C rispetto alla temperatura raggiunta dalla curva reale. Nonostante queste differenze, il transitorio da effettuare risulta rispettato ma, come visto in precedenza, non si può affermare con certezza se il modello risulti validato o meno. Il fatto che il transitorio iniziale della curva ottenuta su STAR-CCM+ scenda di temperatura più velocemente, può dipendere da molteplici cause come ad esempio un flusso troppo coeso che investe troppo violentemente le sonde, o magari un punto di misura diverso rispetto a quello calcolato dall'azienda.



ii. Simulazione con flussi applicati alle superfici esterne

Immagine della temperatura esterna del modello
L'immagine sopra rappresenta la scena di temperatura per l'esterno del modello, ottenuta dopo 1200 secondi di simulazione.

Rispetto ai casi precedenti, alcune superfici risultano più calde di circa 20 °C rispetto alle simulazioni precedenti, sintomo che l'applicazione del flusso radiativo sulle superfici esterne ha effettivamente svolto il suo compito. Quello che però interessa è l'ambiente interno e la temperatura raggiunta.



Immagine della temperatura dei particolari interni

Nell'immagine sopra si può osservare la temperatura delle varie parti interne raggiunta a fine simulazione. Si nota come la temperatura interna sia molto minore rispetto all'esterno e questo sta a significare che l'aria fredda immessa svolge la sua funzione. La temperatura superficiale dei manichini si attesta intorno ai 30 °C e sono stati quindi raffreddati dall'aria, così come accade per le sonde per le quali si mostrerà di seguito il plot di temperatura.



Vista in sezione della temperatura

La vista in sezione mostra ancora meglio il profilo interno di temperatura dove si può osservare come la zona più fredda sia proprio quella in corrispondenza delle teste dei manichini. Anche l'ambiente interno risulta abbastanza raffreddato nonostante rispetto alle simulazioni precedenti la temperatura risulta superiore di circa 5°C. Si può inoltre osservare l'influenza che il flusso radiativo applicato alle superfici esterne, svolge sull'interno del veicolo, dove si può notare come le zona più calde siano vicino ai bordi mentre la temperatura diminuisce spostandosi verso il centro della cabina.



Grafico del transitorio di temperatura della sonda 1



Grafico del transitorio di temperatura della sonda 2

I due plot di temperatura sopra riportati mostrano il transitorio effettuato dalle due sonde poste in corrispondenza della zona teste all'interno della cabina di prova. Nonostante i due transitori non siano esattamente uguali (cosa che comunque ci si aspettava), si può osservare come abbiano comunque lo stesso andamento e raggiungano la medesima temperatura a fine simulazione.

Prendendo quindi in considerazione una delle due sonde (si sceglie la sonda numero due cosi come è stato fatto per le simulazioni precedenti), si esportano i dati su Excel e si confronta la curva ottenuta con quella fornita da Italdesign.



Grafico di confronto tra la curva reale e la curva simulata

Dal grafico di confronto soprastante, si può osservare come nel tratto iniziale del transitorio la curva simulata si attesta a valori di temperatura di qualche grado inferiore rispetto alla curva reale. Inoltre sono presenti le solite fluttuazioni dovute al moto turbolento visibili proprio per la finezza della mesh utilizzata. Nonostante queste differenze, le due curve possiedono simile andamento, raggiungono la stessa condizione finale di temperatura e ma anche questo modello non risulta validato con certezza.

iii. Modello con fari

Il seguente modello presenta una serie di fari posti intorno al veicolo e ad una certa distanza, ai quali è stata assegnata una temperatura fissa in modo che la superficie esterna del veicolo ricevesse una radiazione di circa 1000 W/m². Di seguito si riportano le immagini della geometria:



Immagini del modello con l'aggiunta dei fari

È stato necessario creare anche la fisica da assegnare ai fari che è esattamente identica a quella delle altre parti solide che compongono il modello.

Di seguito si riporta la soluzione ottenuta effettuando 15 iterazioni ogni mezzo secondo per 1800 secondi:



Immagine della temperatura esterna del modello



Vista della temperatura dei particolari interni del modello

Le due immagini sopra mostrano la temperatura raggiunta dalle varie parti a fine transitorio. Si può osservare come le parti interne abbiano visto diminuire molto la loro temperatura mentre la cabina esterna sembra sentire la presenza dei fari che la circondano. A parte le alette, utilizzate solo per dividere il flusso e creare maggiore turbolenza, le parti che risultano più fredde sono proprio le sonde che ricevono direttamente il flusso di aria fredda entrante in cabina.



Vista in sezione della temperatura interna del modello

La vista in sezione permette di visualizzare la temperatura interna raggiunta e come si può vedere, le zone più fredde si trovano nell'intorno del manichino ed in tutta la cabina la temperatura è diminuita molto.



Grafico del transitorio di temperatura della sonda 1



Grafico del transitorio di temperatura della sonda 2

I due plot di temperatura sopra riportati, mostrano il transitorio effettuato dalle due sonde. Le due curve hanno medesimo andamento e raggiungono circa la stessa temperatura per tanto ne è stata scelta una ed è stata confrontata con la curva reale fornita dall'azienda.



Grafico di confronto tra le curve

Anche da questo confronto, si possono trarre le medesime conclusioni effettuate per le due simulazioni precedenti: la curva simulata presenta un raffreddamento leggermente maggiore nella prima fase del transitorio e raggiunge una temperatura finale di qualche grado inferiore rispetto alla curva reale. Il transitorio di temperatura risulta comunque rispettato ma non si può dire con certezza se il modello risulti validato o meno.



Grafico di confronto tra le tre simulazioni con diverso modello di radiazione solare

Quest'ultimo grafico, mette a confronto la curva reale del transitorio fornito da Italdesign, con le tre curve ottenute dall'analisi CFD con diverso modello della radiazione solare. Le tre curve simulate, sono quasi sovrapposte, soprattutto nella primissima fase del transitorio, presentano giustamente fluttuazioni diverse, e si attestano tutte nell'intorno della stessa temperatura finale. Tuttavia, la simulazione che utilizza i flussi termici applicati alle superfici, sembra essere quella che più si avvicina alla curva reale e lo si può notare sia nell'intervallo di tempo tra i 150 e i 450 secondi, dove possiede una temperatura superiore alle altre due curve; sia dai 750 secondi in poi, dove le fluttuazioni vanno ad intersecare più volte la curva reale. Nonostante queste differenze, non è detto che ripetendo le stesse simulazioni, si ottengano nuovamente questi stessi risultati, anzi, è più probabile ottenere risultati altrettanto simili ma che presenteranno sicuramente diverse fluttuazioni dovute ai moti turbolenti che si creeranno di volta in volta.

e. Modello con sedili ruotati

Il seguente ed ultimo modello, rappresenta il passo successivo richiesto dall'azienda cioè valutare, una volta ottenuto un transitorio simile al transitorio reale per il modello in configurazione standard, cosa accade nel momento in cui i sedili vengono ruotati di 180 gradi. Di seguito sono riportate le immagini riguardanti la geometria del modello da simulare:



Immagine del modello con sedili ruotati



Immagine del modello con sedili ruotati



Vista dei sedili e dei manichini all'interno del modello

La prima considerazione che si può fare è che quando si entra in un veicolo che è rimasto per tante ore sotto il sole in una calda giornata di estate, si avverte immediatamente un certo disagio dovuto alla temperatura interna dell'autoveicolo. Accendendo il condizionatore ed impostandolo in modo che produca il massimo del freddo, quando ci si indirizza le bocchette sul corpo, si avverte quasi subito una sensazione di comfort che permette di adattarsi mentre diminuisce la temperatura interna del veicolo.

Con questa nuova configurazione, invece, non è più possibile direzionarsi le bocchette addosso in quanto i sedili non permettono al flusso di aria di passare.

Non ci si aspetta, quindi, di ottenere risultati simili a quelli ottenuti in precenza, anzi, ci si aspetta di ottenere curve con un transitorio di temperatura più lento.

Di seguito si riportano anche le immagini della mesh solo per quanto riguarda i particolari interni (l'esterno è rimasto esattamente lo stesso).



Immagine della mesh dei particolari interni



Vista in sezione della mesh



Particolare con mesh molto fitta

Anche per questo modello saranno effettuate tre diverse simulazioni in base al modello utilizzato per simulare il carico solare, esattamente come fatto precedentemente. Per questi modelli, inoltre, non si riportano le immagini relative alle superfici esterne, in quanto interessa osservare cosa accade all'interno della cabina con questa nuova configurazione.



i. Modello con Solar Load

Vista della temperatura interna del modello



Vista della temperatura interna del modello

Dalle due immagini sopra si può osservare come si è avuta una diminuzione della temperatura interna, nonostante questa sia minore rispetto a quella ottenuta con i sedili in configurazione standard. Si osserva infatti come l'aria entrante dalle bocchette, impatta sul retro dei sedili raffreddando principalmente quelli e disperdendosi poi nel resto della cabina.



Vista in sezione della temperatura interna

Dalla vista in sezione si può notare l'effetto del carico solare sulla cabina e l'effetto dell'aria fredda che impatta sui sedili e si distribuisce in tutta la cabina. Si osserva come la temperatura finale raggiunta sembri comunque soddisfacente, ma non è detto che il fatto di non ricevere direttamente aria fredda alla zona teste non provochi situazioni sfavorevoli.



Grafico del transitorio di temperatura della sonda 1



Grafico del transitorio di temperatura della sonda 2

I due plot di temperatura sopra riportati, mostrano il transitorio effettuato dalle due sonde. Le due curve presentano simile andamento con qualche differenza e sembrano raggiungere entrambe una temperatura di circa 30 °C. Di seguito si riporta il confronto tra le due curve ottenute dall'analisi CFD che utilizzano gli stessi modelli ma con configurazione dei sedili diversa.



Grafico di confronto tra i due transitori

Dal confronto tra le due curve si nota come nella prima parte del transitorio, le due curve vedano diminuire la loro temperatura ma il transitorio che rappresenta la nuova configurazione è più lento ed arriva ad una temperatura finale di 30 °C, superiore di circa 8°C rispetto alla configurazione originale. Proprio come ci si aspettava ci sono differenze dovute proprio a questa nuova configurazione nella quale potrebbero essere necessarie modifiche da apportare per poter raggiungere la temperatura richiesta.



ii. Modello con flussi applicati alle superfici esterne

Vista della temperatura interna del modello



Vista della temperatura interna del modello

Dalle due scene di temperatura riportate sopra si può osservare come c'è effettivamente stata una diminuzione della temperatura delle parti interne ma, questa diminuzione, risulta minore rispetto alla simulazione con sedili in posizione standard. Si può inoltre notare come il flusso radiativo applicato alle superfici influisca in particolar modo sulla parte superiore dei sedili che, con questa nuova configurazione, sono molto vicini al vetro anteriore della cabina che essendo trasparente, permette un maggiore passaggio del flusso. Inoltre, sempre sui sedili, si può osservare l'effetto del flusso di aria fredda che entra nella cabina che va ad impattare sulla parte posteriore dei sedili stessi.



Vista in sezione della temperatura interna

Dalla vista in sezione sopra, si riesce ad osservare meglio la temperatura interna e si può notare come la temperatura sia effettivamente diminuita. Si possono notare le zone piu calde, cioè quelle vicine alla scocca, e le zone più fredde, cioè nell'immediata vicinanza delle bocchette. Sembra come se il flusso di aria entrante, a causa dell'opposizione dei sedili, diffonda più velocemente all'interno di tutta la cabina permettendo un raffreddamento che, a fine simulazione, resta comunque inferiore rispetto alla simulazione precedente.







Grafico del transitorio di temperatura della sonda 2

I due plot sopra riportati, mostrano il transitorio di temperatura effettuato sempre dalle due sonde. Nonostante l'andamento sia simile, in quanto c'è un iniziale diminuzione di temperatura con successiva stabilizzazione, la temperatura finale raggiunta è più alta rispetto a quella richiesta. Diversamente dalle altre simulazioni, questa presenta più fluttuazioni all'inizio del transitorio e meno verso il tratto centrale.



Facendo un confronto tra le due configurazioni della cabina si possono osservare le differenze

Grafico di confronto tra i due transitori per le due configurazioni

Analizzando il grafico infatti, si osserva come la curva ottenuta, mostra più raffreddamento minore nel tratto iniziale, e questo accade perché le sonde non ricevono più un flusso diretto e quindi si raffreddano meno velocemente; dopo circa 200 secondi di simulazione, tuttavia, la temperatura si attesta intorno al valore di 35 °C, valore superiore di circa 10 °C rispetto alla condizione da raggiungere.

Il fatto che le due sonde poste in corrispondenza della zona teste, non siano più investite interamente dal flusso d'aria uscente dalle bocchette, porta giustamente ad un diverso transitorio che non permette quindi di raggiungere la temperatura richiesta a fine simulazione.

Questo porta a concludere che, proprio come ci aspettava, nella configurazione con sedili ruotati, risulta necessario apportare alcune modifiche in modo da poter raggiungere la temperatura richiesta.

iii. Modello con fari



Vista della temperatura interna del modello



Vista della temperatura interna del modello

Dalle due immagini sopra, si può osservare che la temperatura interna è effettivamente diminuita, ma meno rispetto alla configurazione precedente. Il flusso di aria fredda impatta principalmente sulla parte posteriore dei sedili per poi diffondere in tutta la cabina. La temperatura superficiale dei manichini si attesta intorno ai 30 °C e le sonde sembrano possedere una temperatura di poco inferiore. Le superfici vetrate risultano ancora calde quindi i fari stanno continuando ad irradiare la superficie della cabina.



Vista in sezione della temperatura interna

La vista in sezione permette di osservare meglio la temperatura raggiunta in cabina; si può osservare la parte più fredda situata nella zona di ingresso dell'aria e le zona più calde vicino alla scocca e i sedili internamente. Nonostante la temperatura risulti superiore rispetto alla configurazione standard, c'è effettivamente stata una diminuzione di temperatura ma non è detto che sia assicurato il comfort agli occupanti in quanto il flusso di aria fredda non impatta direttamente sul corpo.









I due grafici sopra riportati mostrano il transitorio di temperatura effettuato dalle due sonde. L'andamento soddisfa le specifiche richiesta ma il valore finale di temperatura raggiunto risulta ancora troppo alto e si attesta intorno ai 30 °C.



Grafico di confronto tra i transitori per le due configurazioni

Quest'ultimo grafico mette a confronto le due soluzioni che utilizzano come modello solare i fari, ma presentano configurazione diversa per quanto riguarda la disposizione di sedili, sonde e manichini. Come si può notare, la nuova configurazione mostra un transitorio più lento ed inoltre presenta meno fluttuazioni in quanto la sonda non è più investita direttamente dall'aria che subito dopo va ad impattare con manichini e sedili.

Anche in questo caso, quindi, risulterebbero necessarie modifiche per fare in modo che la curva ottenuta dalla nuova configurazione si avvicini quanto più possibile alla curva ottenuta dalla configurazione standard e non è detto che la si possa ottenere con questo tipo di impianto.

CAPITOLO 5: CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

In questo lavoro di tesi, è stata effettuata una analisi CFD attraverso l'utilizzo del software STAR-CCM+ per simulare una prova di cool-down, sulla base di dati reali di una prova di cool-down fornita dall'azienda Italdesign. È stato creato un modello da sottoporre alla prova e sono state effettuate simulazioni in modo da riprodurre il transitorio di temperatura relativo alla zona teste all'interno del veicolo fornito dall'azienda.

È stato studiato prima di tutto un modello semplice per prendere confidenza con il software e con i vari modelli da implementare; poi si è passati al modello finale al quale di volta in volta sono state apportate modifiche ed aggiunti particolari in modo da avvicinarsi quanto più possibile alla prova reale di cool-down fornita dall'azienda. Sono state effettuate simulazioni in regime stazionario prima, per poi passare al regime transitorio verificando quale fosse il modello di turbolenza migliore da utilizzare.

I transitori ottenuti hanno mostrato un raffreddamento iniziale maggiore e la temperatura finale raggiunta si è attestata nell'intorno del valore da raggiungere ma non si può sapere con certezza se il modello risulta validato o meno. Il raffreddamento iniziale maggiore potrebbe essere dovuto al fatto che il getto sia troppo coeso ed investa troppo violentemente le due sonde.

Con i transitori di temperatura ottenuti, che risultano comunque accettabili, si è proceduto ad effettuare le simulazioni ruotando sedili e manichini di 180 gradi rispetto alla posizione originale. Da quest'ultima analisi si è visto come il transitorio di temperatura per quanto riguarda la zona teste, è stato rispettato solo in parte, in quanto, c'è effettivamente una diminuzione considerevole di temperatura ad inizio transitorio, che resta comunque minore rispetto alla configurazione standard, ma con il proseguire della prova, la temperatura è rimasta ad un valore superiore rispetto alla temperatura da raggiungere.

Da Italdesign, è stato specificato che qualsiasi modifica che si possa pensare di effettuare, deve essere fatta dalla plancia in giù, quindi non è possibile usufruire del tetto della cabina. Ma anche pensando ad una diversa geometria di condotti, non è detto che si possano ottenere i risultati desiderati:

 Si potrebbe pensare a delle bocchette che dalla plancia si allungano verso il centro della cabina, ma questo porterebbe ad ingombri molto fastidiosi presenti tra i passeggeri, senza contare che condotti più lunghi portano inevitabilmente a perdite maggiori con la necessità magari di immettere l'aria in cabina ad una temperatura differente, e ad una maggiore turbolenza nei condotti stessi;

- Si potrebbe pensare di utilizzarla scatola centrale posta tra i sedili anteriori e posteriori in modo che tutti gli occupanti del veicolo possano ricevere direttamente aria fredda. Tuttavia, è risaputo che l'aria fredda che nei veicoli arriva ai passeggeri posteriori, è relativamente modesta, quindi, anche per questa idea, sarebbe necessario modificare l'impianto di climatizzazione;
- Si potrebbe anche pensare all'utilizzo di sedili traspiranti o addirittura bucati in alcune parti in modo da permettere il passaggio di aria dalle bocchette poste sulla plancia senza modificare l'impianto; questa soluzione, però, potrebbe non essere ben vista da molti utenti in quanto, se l'aria fredda viene direzionata su alcune parti del corpo, come ad esempio la nuca, potrebbe provocare disagio agli utenti stessi;
- Si potrebbe provare a diminuire la temperatura dell'aria immessa in cabina, e bisognerebbe inoltre assicurarsi di non provocare problemi di ghiacciamento nei condotti o di non creare disagio agli occupanti a causa delle temperature eccessivamente basse.

Si può quindi concludere che per quanto riguarda la configurazione standard, sono stati ottenuti buoni risultati che non si discostano di molto dal transitorio da replicare, ma, per quanto detto sopra, non si ha la certezza assoluta della validità del modello. Per quanto riguarda la configurazione con sedili ruotati, invece, nonostante la temperatura sia diminuita, non ha raggiunto il valore desiderato e le differenze rispetto alla configurazione standard risultano comunque considerevoli, per tanto potrebbe essere necessario modificare l'impianto di climatizzazione.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1.] Rok, S., & Pasthor, H. (2007). A real time numerical analysis of vehicle cool-down performance. *Hyundai Motor Company*. Retrieved from http://www.theseus-fe.com/images/downloads/publications/VTMS2007Hyundai_hq.pdf
- [2.] Khan, Y., Khare, V. R., Mathur, J., & Bhandari, M. (2015). Performance evaluation of radiant cooling system integrated with air system under different operational strategies. *Energy and Buildings*, 97, 118–128. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.03.030
- [3.] Lévêque, E. (2006). An introduction to turbulence in fluids, and modelling aspects. *EAS Publications Series*, 21, 7–42. https://doi.org/10.1051/eas:2006105
- [4.] Sorensen, D. N., & Nielsen, P. V. (2003). Quality control of computational fluid dynamics in indoor environments. *International Journal of Indoor Environment and Health*, *13*(1), 2–17.
- [5.] Gan, G. (1995). Evaluation of room air distribution systems using computational fluid dynamics. *Energy and Buildings*, 23(2), 83–93. https://doi.org/10.1016/0378-7788(95)00931-0
- [6.] Hosoz, M., & Direk, M. (2006). Performance evaluation of an integrated automotive air conditioning and heat pump system. *Energy Conversion and Management*, *47*(5), 545–559. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.05.004
- [7.] Jabardo, J., Mamani, W., & Ianella, M. R. (2002). Modeling experimental evaluation of an automotive air conditioning system with a variable capacity compressor. *International Journal of Refrigeration*, *25*(8), 1157–1172. https://doi.org/10.1016/S0140-7007(02)00002-6
- [8.] Joudi, K. A., Mohammed, A. S. K., & Aljanabi, M. K. (2003). Experimental and computer performance study of an automotive air conditioning system with alternative refrigerants. *Energy Conversion and Management*, 44(18), 2959–2976. https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00051-7
- [9.] O.Kaynakh, & I.Horuz. (2003). An experimental analysis of automobile air conditioning system. Int. Comm. Heat Mass Transfer, 30(2), 273–284. https://doi.org/10.1016/S0735-1933(03)00038-1
- [10.] C. Bonacina, A. Cavallini, L. Mattarolo. Trasmissione del calore
- [11.] Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (1995). An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method. *Fluid Flow Handbook. McGraw-Hill* https://doi.org/10.2514/1.22547
- [12.] Conservazione, E. D. I. (2004). 14/03/2004 Equazioni di conservazione 1, 1–18.
- [13.] Conservazione, E. D. I. (2004). 14/03/2004 Equazioni di conservazione 2,19-26.
- [14.] https://documentation.thesteveportal.plm.automation.siemens.com/starccmplus_la test_en/index.html
- [15.] Mcdonough, J. M. (2007). INTRODUCTORY LECTURES on TURBULENCE Physics, Mathematics and Modeling.
- [16.] Verzicco, R. (2012). Turbolenza Verzicco, 1–56. Retrieved from papers2://publication/uuid/5BE5221E-BBDC-4EEF-9C53-138C60EC3324
- [17.] https://en.wikipedia.org/wiki/Conjugate_convective_heat_transfer