



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali
Corso di laurea triennale in Ingegneria Gestionale

Tesi di Laurea

GIM come strumento per analisi cinematiche e dinamiche: realizzazione di un tutorial applicativo su un inversore di spinta per motori aeronautici

Relatore
Prof.ssa Ilaria Palomba

Laureando
Elisa Xixa

Anno Accademico 2025-2026

“Pareva che il viso, tutt’a un tratto, gli si fosse allargato. Pareva che i paraocchi gli fossero tutt’a un tratto caduti, e gli si fosse scoperto, spalancato d’improvviso all’intorno lo spettacolo della vita.”

- Luigi Pirandello (1867-1936), *‘Il treno fischiò’*, 1914

Sommario

ABSTRACT.....	1
INTRODUZIONE.....	2
CAPITOLO 1	4
1.1 INVERSORI A CONCHIGLIA.....	4
1.2 INVERSORI A BERSAGLIO.....	5
1.3 INVERSORI A CASCATA.....	6
1.4 BREVETTO DI RIFERIMENTO;	7
1.4.1 <i>Descrizione struttura</i>	7
1.4.2 <i>Componenti principali</i>	8
1.4.2.1 <i>Manicotto</i>	8
1.4.2.2 <i>Struttura fissa</i>	9
1.4.2.3 <i>Elementi d'azione</i>	9
1.5 MOTIVAZIONI SCELTA BREVETTO	9
CAPITOLO 2	11
2.1 PANORAMICA DELLE FUNZIONALITÀ PER L'ANALISI;	11
2.1.1 <i>Geometria</i>	11
2.1.2 <i>Cinematica</i>	12
2.1.3 <i>Dinamica</i>	13
2.2 MODELLAZIONE A PARTIRE DALLE COORDINATE REALI DA BREVETTO;.....	15
CAPITOLO 3	17
3.2 ANALISI VELOCITÀ;.....	17
3.2.1 <i>Legge di moto d'ingresso</i> ;.....	17
3.3 ANALISI ACCELERAZIONE	21
CAPITOLO 4	24
4.1 STIMA DELLE FORZE AEREODINAMICHE ESTERNE;	24
4.2 ANALISI DINAMICA	25
4.2.1 <i>Analisi mappe cromatiche</i>	26
4.2.2 <i>Analisi Energia e Potenza</i>	28
CAPITOLO 5	30
RINGRAZIAMENTI.....	31
SITOGRAFIA E BIBLIOGRAFIA.....	32

ABSTRACT

Gli inversori di spinta rappresentano componenti critici dei moderni sistemi propulsivi aeronautici, contribuendo in modo determinante alla sicurezza e all'efficienza delle fasi di atterraggio. Il presente elaborato si propone di indagare, mediante un approccio numerico-computazionale, il comportamento cinematico e dinamico di un inversore di spinta a cascata, prendendo come riferimento l'architettura descritta nel brevetto "*US 10,309,343 B2 – Slip Sleeve Hidden Door Thrust Reverser*".

A partire dalle informazioni geometriche disponibili nella documentazione brevettuale, è stato ricostruito un modello piano del meccanismo, successivamente implementato nel software open source GIM, strumento scelto per le sue capacità di analisi geometrica, cinematica e dinamica di sistemi articolati. Il ciclo di funzionamento, comprendente le fasi di apertura e chiusura, è stato descritto attraverso una legge di moto polinomiale di quinto grado, costruita imponendo condizioni di velocità e accelerazione nulle agli estremi della corsa, così da assicurare un movimento privo di discontinuità.

Il modello è stato quindi arricchito con l'introduzione delle forze aerodinamiche stimate sui componenti esposti al flusso, delle forze peso e del momento motore richiesto per l'azionamento, permettendo di condurre un'analisi dinamica completa del sistema. Particolare attenzione è stata dedicata all'individuazione delle configurazioni cinematiche più gravose e alla distribuzione delle sollecitazioni interne lungo i membri del meccanismo, supportata dall'utilizzo di mappe cromatiche e dal bilancio energetico del sistema.

Il lavoro svolto ha permesso non solo di caratterizzare il comportamento del meccanismo brevettato, ma anche di verificare l'idoneità di GIM come strumento didattico e applicativo per l'analisi di meccanismi piani complessi, evidenziandone al contempo potenzialità e limiti operativi

INTRODUZIONE

Di fondamentale importanza, fin dall'inizio dell'aeronautica, è stato lo sviluppo e l'implementazione di tecniche (o tecnologie) d'atterraggio, finalizzate a migliorarne la sicurezza e le prestazioni.

Durante le prime fasi dell'aviazione commerciale, prima dell'introduzione di sistemi dedicati alla reversibilità della spinta, la fase di atterraggio veniva gestita principalmente attraverso l'impiego dei freni del carrello (freni meccanici o impianto idraulico), dagli aerofreni (*spoiler*) e dalle pavimentazioni ad elevato attrito sulle piste. Tuttavia, con l'aumento progressivo della massa, della velocità di avvicinamento e delle prestazioni dei velivoli a reazione questi sistemi si sono rivelati alquanto carenti e si è reso necessario introdurre un dispositivo in grado di ridurre la distanza di frenata e di aumentare la sicurezza operativa, soprattutto in condizioni di pista bagnata o scivolosa o in condizioni non ottimali, adoperando apparecchi capaci di sfruttare la stessa energia prodotta dal motore per generare una forza opposta al moto di avanzamento.

Da questa esigenza nacquero gli invertitori di spinta, essi rappresentano oggi una componente fondamentale dei sistemi propulsivi aeronautici, soprattutto sui velivoli commerciali dotati di motori turbofan¹, distinguibili per la presenza di una grande ventola frontale che gestisce l'aria in ingresso dividendola in due flussi distinti. La loro funzione principale è quella di contribuire alla decelerazione dell'aeromobile durante la fase di atterraggio, riducendo la distanza necessaria per l'arresto e alleggerendo il lavoro dei sistemi di frenata convenzionali, come freni delle ruote e aerofreni.

Il loro impiego permette, inoltre, di ridurre l'usura dei freni del carrello - alleggerendo il lavoro dei sistemi di frenata -, aumentare la sicurezza in condizioni di meteo avverse e migliorare la gestione di eventuali aborti di decollo.

Il principio di funzionamento di un inversore di spinta è relativamente semplice: parte del flusso d'aria generato attorno al core caldo del motore, definito tipicamente come il flusso bypass, viene deviato in avanti anziché essere espulso posteriormente. Questo cambiamento di direzione produce una componente di spinta orientata verso la parte anteriore dell'aeromobile, contribuendo significativamente al rallentamento. L'utilizzo dell'aria di bypass è preferito rispetto a quella calda proveniente dal core perché è più sicura da gestire, sottopone i componenti a sollecitazioni termiche inferiori, e richiede soluzioni meccaniche meno complesse e meno esposte a rischi termici.

Con il progredire delle tecnologie aeronautiche sono state sviluppate differenti architetture di inversori di spinta, ciascuna soluzione presenta specifici compromessi in termini di efficienza aerodinamica, peso strutturale, ingombro e complessità di manutenzione. Tra questi, gli invertitori di tipo a bersaglio (*bucket*) ed a cascata (*cascade*), hanno trovato ampia diffusione nei motori turbofan moderni, grazie alla loro capacità di integrarsi in maniera aerodinamicamente pulita alla struttura del motore durante il volo di crociera e di offrire un'elevata efficienza di deviazione del flusso durante l'inversione di spinta.

¹ Motore che adopera due flussi d'aria separati, uno caldo ed uno freddo.

Per quanto siano importanti questi sistemi di inversione è importante notare che essi non sono obbligatori per la certificazione FAA². Infatti, la normativa richiede che un aeromobile dimostri l'abilità di prestazioni di atterraggio, anche in condizioni non adeguate, senza l'uso degli inversori di spinta.

Questo perché un uso non conforme di questi strumenti potrebbe generare effetti pericolosi e potenzialmente catastrofici [5], specialmente se attivati durante il volo. A tal proposito, il loro impiego è rigidamente controllato dai computer di bordo e dai sistemi di sicurezza consentendo l'attivazione unicamente al suolo o in condizioni eccezionali.

Tuttavia, le compagnie aeree li richiedono quasi sempre, soprattutto per garantire un margine di sicurezza aggiuntivo su piste corte o con scarsa aderenza ed è per questo motivo, che gli invertitori di spinta rappresentano un campo di grande interesse sia dal punto di vista aeronautico che ingegneristico, richiedendo studi approfonditi sulla loro cinematica, dinamica e integrazione strutturale.

² Amministrazione aviazione federale statunitense

CAPITOLO 1

Presentazione struttura d'analisi, l'inversore di spinta.

Come già citato sono tre le principali architetture degli inversori di spinta.

Gli inversori a conchiglia [2, 3, 9] rappresentano una delle prime architetture adottate nell'aviazione a reazione, diffuse principalmente sui propulsori turbogetto e sui primi turbofan a basso rapporto di diluizione, detti anche low-bypass.

1.1 Inversori a conchiglia

Il sistema si basa su due porte deflettrici curve, una superiore ed una inferiore, installate all'interno della sezione terminale del condotto di scarico. In posizione di riposo, le porte possono essere ripiegate all'interno dell'ugello oppure costituire il cono di coda terminale. Durante il normale funzionamento del motore, i condotti di deviazione rimangono sigillati e le prestazioni aerodinamiche del velivolo non subiscono alcuna alterazione.

All'attivazione della spinta inversa, un sistema di attuazione, tipicamente di tipo pneumatico o idraulico, aziona i cinematismi di movimentazione. Le porte ruotano internamente convergendo come le valve di una conchiglia, da cui deriva la denominazione del sistema, ostruendo la sezione di gola dell'ugello e bloccando il naturale percorso di espulsione dei gas. In questo modo, il flusso di scarico viene forzato ad uscire attraverso apposite feritoie disposte lateralmente, generando la componente di spinta contraria al moto dell'aeromobile.

Nonostante la concettuale semplicità funzionale, questa struttura presenta diffuse criticità che ne limitano significativamente l'efficacia operativa. La problematica principale risiede nell'uso diretto del flusso primario dei gas di scarico caldi, che espone l'intero meccanismo a severe sollecitazioni termiche. I meccanismi interni e le superfici di scorrimento devono riuscire a garantire la loro corretta movimentazione in assenza di lubrificazione ed a temperature d'esercizio che superano normalmente i 600 °C. Questo comporta, inoltre, la necessità di adottare come materiale di costruzione dell'inversore superleghe metalliche e strutture ad alta resistenza termica, portando ad un inevitabile incremento della massa complessiva del propulsore, al quale si somma un'elevata rumorosità durante la fase di azionamento.

Tali svantaggi costruttivi, soprattutto per quanto riguarda l'efficienza, si erano già evidenziati dai primi test in galleria del vento³ condotti da Boeing sulle prime generazioni degli aeromobili 727 e 737 [8]. Da tali analisi è emerso come tale configurazione non sfruttasse al massimo l'energia cinematica dei gas, infatti, un'aliquota significativa non veniva deviata efficacemente in avanti, ma veniva espulsa con un angolo prossimo a 90° rispetto all'asse del motore, fornendo un contributo marginale alla decelerazione del velivolo.

Il definitivo tramonto degli inversori a conchiglia si è verificato con l'avvento dei moderni turbofan con un alto rapporto di diluizione. L'ingente incremento del diametro della ventola e i ridotti margini di altezza dal suolo sotto l'ala hanno reso fisicamente impossibile la presenza e la rotazione di porte a conchiglia che avessero dimensioni

³ Prove aerodinamiche che studiano il comportamento di un oggetto esposto ad un flusso d'aria controllato.

adeguate alla nuova portata massica. Tali vincoli geometrici, uniti alle citate criticità termiche, hanno condotto al progressivo abbandono di questa tecnologia a favore degli inversori a griglie traslanti, divenuti lo standard pressoché universale per la flotta commerciale moderna.

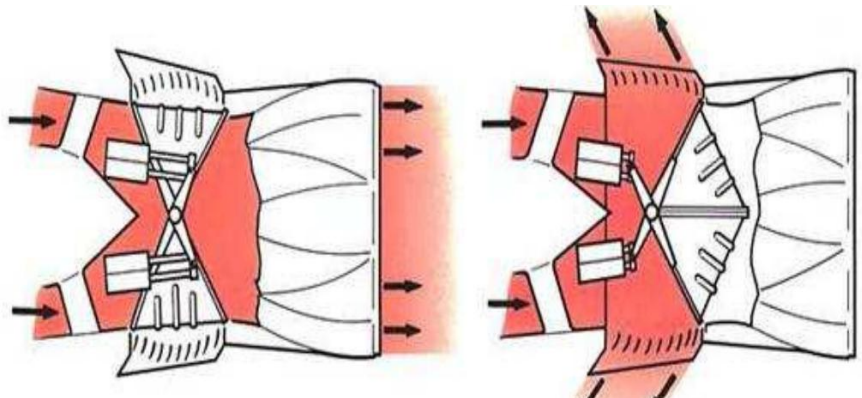


Figura 1: Rappresentazione inversore a conchiglia in fase di chiusura e di apertura.

Fonte: <https://www.academia.edu/figures/2917133/figure-8-thrust-reverser-system-using-clamshell-doors-which>

1.2 Inversori a bersaglio

Un'altra architettura fondamentale è rappresentata dagli inversori di spinta a bersaglio [2, 3, 7, 11], comunemente noti come inversori target. Questo sistema si è diffuso ampiamente sui primi turbofan e sui motori turbogetto a basso rapporto di diluizione, nei quali la quota maggiore della complessiva spinta è generata dal flusso primario del core. Per questi motori, infatti, è necessario bloccare direttamente i gas caldi di scarico per generare una spinta contraria sufficiente a frenare l'aereo. Tra le applicazioni storiche più rilevanti si annoverano le prime generazioni del Boeing 737 ed il Douglas DC-9 [3].

Dal punto di vista concettuale e cinematico, l'inversore a bersaglio si distingue per essere uno dei dispositivi più riconoscibili dall'esterno durante le fasi operative. Il meccanismo si compone di due ampie porte deflettrici ad orientamento simmetrico posizionate a sbalzo sulla sezione finale del condotto di scarico; dunque, non si trovano incassate all'interno del condotto di scarico come negli inversori a conchiglia, ma sono montate oltre l'estremità posteriore dell'ugello.

In posizione di riposo, le porte si raccordano perfettamente alla geometria posteriore del motore, andando a costituire il profilo aerodinamico continuo dell'ugello, evitando così perdite per resistenza. Il sistema di attuazione, solitamente idraulico per garantire rapidità d'intervento, avvia un meccanismo a leve e bielle. I deflettori ruotano verso l'esterno e all'indietro posizionandosi a valle dell'ugello, bloccando fisicamente la sezione d'uscita ed intercettando il getto proprio nel punto di massima energia cinematica, garantendo un'elevata efficienza nel reindirizzare il flusso verso la parte anteriore dell'aeromobile, migliorando quindi quella criticità già riscontrata negli inversori a conchiglia.

La storia evolutiva di questo dispositivo affonda le radici nei primi brevetti sulla deviazione del getto risalenti al 1945, per poi giungere all'architettura finale moderna, sviluppata per essere capace di invertire fino al 50% della spinta nominale del motore.

Una peculiarità operativa di questi inversori, per questo preferita all'inversore a conchiglia, risiede nella flessibilità d'impiego in volo: mentre la maggior parte dei sistemi viene azionata esclusivamente dopo il contatto delle ruote con la pista, alcune applicazioni storiche sono state certificate per consentire l'apertura degli inversori anche in fase di volo per l'aggiustamento della velocità o a pochissimi metri dal suolo prima del touchdown.

Nonostante la spiccata efficacia nel deviare l'aria calda di scarico, la configurazione a bersaglio ha progressivamente incontrato gli stessi vincoli di integrabilità dei sistemi a conchiglia. Con l'avvento dei turbofan ad alto rapporto di diluizione ad ampio diametro frontale, l'ingombro esterno delle ampie porte a bersaglio e la loro complessa articolazione idraulica esposta ad elevate sollecitazioni termiche hanno reso impraticabile questa soluzione sui moderni aerei di linea, lasciando il campo all'adozione generalizzata dei sistemi a cascata nel canale di bypass.

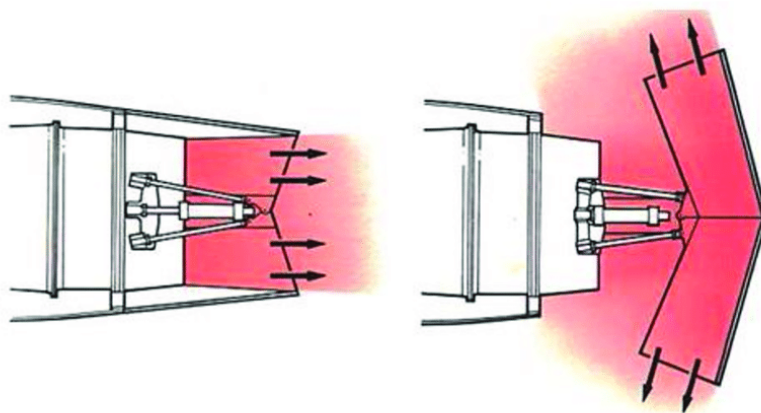


Figura 2: Rappresentazione inversore a bersaglio in fase di chiusura e di apertura.

Fonte: <https://www.academia.edu/figures/2917129/figure-9-the-bucket-target-system-is-hydraulically-actuated>

1.3 Inversori a cascata

L'evoluzione della propulsione aeronautica verso i turbofan [1] ad alto rapporto di diluizione ha imposto un cambio di struttura nell'architettura dei sistemi di inversione di spinta. In questi propulsori, la grande ventola frontale genera la quota maggioritaria della spinta totale del motore. Di conseguenza, i moderni inversori agiscono esclusivamente sulla massa d'aria fredda secondaria, sfruttando al meglio la configurazione del motore, evitando l'intercettazione diretta dei gas di scarico caldi del core. Tra le soluzioni sviluppate per questi motori, l'inversore a cascata rappresenta oggi l'architettura più diffusa nell'aviazione commerciale per ragioni di efficienza aerodinamica, peso ed affidabilità.

Il sistema a cascate [2, 3, 8, 9] si compone di una serie di griglie deflettrici con alette orientate, disposte radialmente attorno alla circonferenza dell'involucro del motore e collegate a porte di blocco collocate nel condotto di bypass.

In condizioni di volo normale, la struttura rimane completamente disattivata, in stato di riposo, le griglie restano coperte dal manicotto esteso della capottina esterna, il quale garantisce una superficie aerodinamicamente continua e priva di discontinuità,

riducendo le perdite per resistenza. Quando il pilota seleziona la spinta inversa in fase di atterraggio, un sistema di attuazione fa scorrere il manicotto verso la parte posteriore, scoprendo le griglie a cascata.

Contemporaneamente, il meccanismo trasla le portiere di blocco all'interno del canale di bypass, ostruendo il naturale percorso di espulsione posteriore dell'aria fredda. Il flusso ad alta portata viene così costretto ad uscire lateralmente attraverso i passaggi radiali delle griglie, le quali indirizzano l'aria in avanti e verso l'alto per generare la contromossa utile alla decelerazione. Durante questo processo, i gas caldi del flusso primario continuano il loro scarico centrale senza ostacoli, fornendo una minima spinta residua ampiamente compensata dalla componente contraria del flusso secondario.

L'efficacia della spinta inversa risulta maggiore alle velocità più elevate, quando la portata massica d'aria elaborata dal propulsore è maggiore. Con la progressiva decelerazione dell'aeromobile, anche l'efficacia del sistema diminuisce; per questo motivo, al raggiungimento di velocità sufficientemente basse, la spinta inversa viene ridotta e il sistema riportato gradualmente nella configurazione di riposo. Tale procedura permette inoltre di limitare il rischio di aspirazione di detriti, FOD⁴, poiché il flusso deviato in avanti potrebbe sollevare sabbia, acqua o altri materiali presenti sulla pista, favorendone la successiva ingestione da parte del motore.

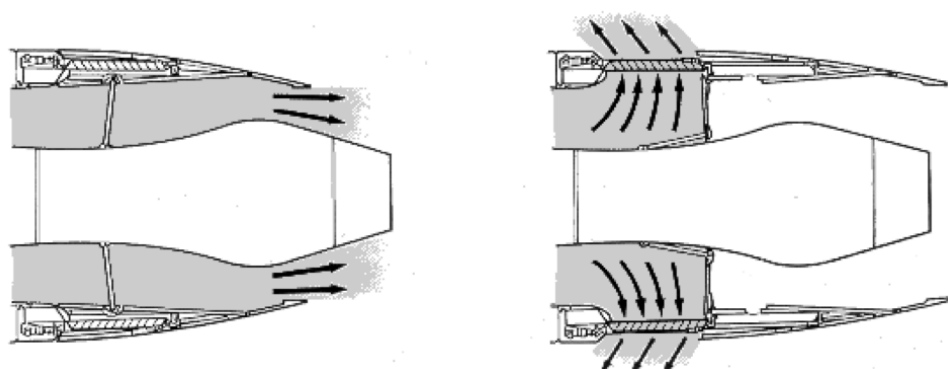


Figura 3: Rappresentazione inversore a cascata in fase di chiusura e di apertura.

Fonte: <https://www.expertsmind.com/questions/layout-and-operation-of-typical-thrust-reversing-system-30111604.aspx>

1.4 Brevetto di riferimento;

Al fine di comprendere nel dettaglio l'evoluzione tecnologica dei sistemi cascata, di seguito viene presentata l'analisi descrittiva e cinematica della soluzione protetta da brevetto. La trattazione ne esamina l'architettura generale, i componenti principali e i relativi vantaggi funzionali, evidenziando le innovazioni introdotte rispetto ai sistemi tradizionali.

1.4.1 Descrizione struttura

La struttura oggetto del presente studio fa riferimento al brevetto “US 10,309,343 B2 – Slip Sleeve Hidden Door Thrust Reverser”.

⁴ Foreign Object Debris

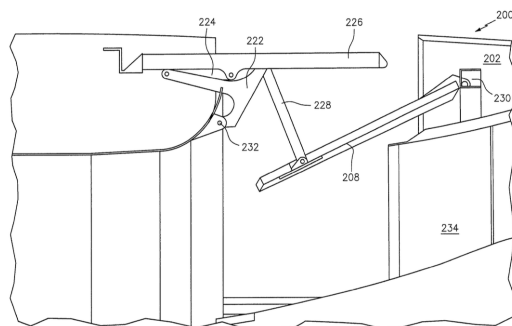


Figura 4: FIG. 2B del brevetto IUS 10,309,343 B2 – Slip Sleeve Hidden Door Thrust Reverser'

Il brevetto è sviluppato al fine di migliorare l'efficienza dei sistemi di inversori di spinta dei motori. L'innovazione principale introdotta è la presenza di un sistema di porte a scomparsa nel quale le porte di blocco risultano nascoste durante tutto il normale funzionamento del motore. Questo al fine di ridurre le perdite aerodinamiche dovute all'aumento della resistenza.

L'introduzione di questi componenti permette, inoltre, di aumentare il grado di libertà di progettazione: poiché la geometria delle portiere di blocco in posizione chiusa non deve più soddisfare i vincoli di continuità aerodinamica della parete del condotto, la loro forma e la loro struttura possono essere ottimizzate esclusivamente in funzione della resistenza meccanica e delle prestazioni di deviazione del flusso.

1.4.2 Componenti principali

Possiamo dividere i vari membri del meccanismo in tre gruppi principali: manicotti, struttura fissa e gli elementi di azionamento.

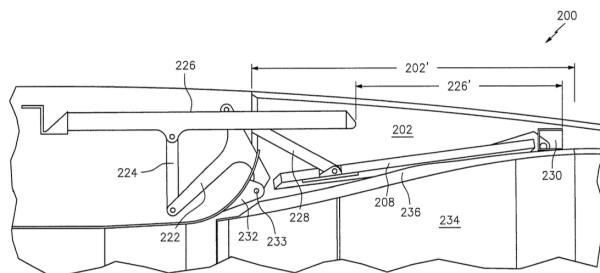


Figura 5: FIG. 2A del brevetto IUS 10,309,343 B2 – Slip Sleeve Hidden Door Thrust Reverser'

1.4.2.1 Manicotto

Il manicotto primario (202) costituisce la parte esterna dell'involucro del motore ed integra la superficie esterna (236), all'interno della quale è posta la portiera di blocco (208) quando il sistema si trova in configurazione chiusa.

Ad esso si affianca il manicotto secondario (226), una struttura mobile che, durante l'attivazione del sistema, trasla per rendere operative le griglie a cascata, costituite da una serie di alette metalliche opportunamente orientate per deviare il flusso d'aria in direzione contromano e generare così la spinta inversa. La traslazione del

manicotto secondario è generalmente guidata e stabilizzata mediante appositi supporti ausiliari, denominati pattini di scorrimento, che ne assicurano il corretto movimento lungo la struttura del motore.

Una caratteristica rilevante della struttura presentata è che, a differenza di altre composizioni, il manicotto primario e quello secondario non sono rigidamente collegati tra loro, ma scorrono su guide distinte. Questo porta alla possibile co-presenza di due velocità differenti durante l'attuazione del sistema, migliorandone la distribuzione dei carichi.

1.4.2.2 Struttura fissa

Gli elementi della struttura fissa sono contrassegnati come 230 e 232, con il relativo accoppiamento rotoidale indicato dal numero 233.

Entrambi gli elementi fissi svolgono la funzione di supporto meccanico del sistema solidale con il motore, ospitando i punti di articolazione e le guide di scorrimento dei due manicotti.

L'accoppiamento rotoidale 233, in aggiunta, consente di collegare la manovella principale (222) con l'involucro del motore e permette la rotazione dell'intero meccanismo.

1.4.2.3 Elementi d'azione

L'elemento centrale del sistema è costituito dalla manovella principale (222) legata all'accoppiamento rotoidale 233 tramite il componente fisso 232. Da essa si unisce un'asta di collegamento (224), il cui movimento, sviluppandosi quasi parallelamente al manicotto secondario, ne accompagna la traslazione.

La stessa manovella costituisce il punto di collegamento con il link d'unione (228), connesso direttamente alla porta di blocco (208). In questo modo, la rotazione della manovella viene trasmessa alla portiera, determinandone il movimento rotazionale e consentendole di passare dalla configurazione nascosta a quella operativa.

Dal punto di vista cinematico il sistema può essere interpretato come la combinazione di due meccanismi a quattro barre, coordinati tra loro mediante la manovella principale. Il primo sistema è costituito dal componente fisso (232), dal manicotto principale, dall'asta di collegamento e dal manicotto secondario. Il secondo comprende, invece, l'accoppiamento rotoidale (230), la portiera di blocco, il link d'unione e la manovella principale.

La manovella principale svolge, quindi, una funzione di raccordo tra i due sottosistemi, coordinandone i movimenti e garantendo la corretta sequenza cinematica dell'intero meccanismo.

1.5 Motivazioni scelta brevetto

La scelta di analizzare ed implementare la soluzione strutturale proposta da questo brevetto deriva da precisi vantaggi di natura aerodinamica, meccanica e di affidabilità operativa che esso possiede in un contesto reale.

Dal punto di vista della progettazione, la possibilità che la portiera di blocco si ritragga completamente all'interno della sagoma dell'involucro del motore, rimanendo isolata dal flusso primario del condotto di bypass, garantisce la continuità della superficie interna del condotto. Questo elimina le discontinuità geometriche tipiche dei sistemi convenzionali e riduce al minimo la resistenza aerodinamica parassita.

A tali vantaggi dinamici si affianca una marcata ottimizzazione strutturale, legata all'architettura stessa del meccanismo.

A differenza dei sistemi di inversione di spinta tradizionali, nei quali l'inclinazione dell'attuatore rispetto alla direzione di scorrimento generava elevati momenti flettenti che portavano a deformare o danneggiare i manicotti guidati, l'architettura brevettata introduce l'elemento ausiliario (224). Questo componente opera con una traiettoria quasi parallela all'asse di traslazione del manicotto secondario, eliminando le sollecitazioni flettenti.

Inoltre, durante la fase di apertura, la manovella principale insieme all'asta d'unione (228) assumono un allineamento quasi parallelo rispetto alla direzione della forza aerodinamica trasmessa dalla portiera di blocco. Tale cinematica scarica la quasi totalità della reazione direttamente sull'accoppiamento rotoidale fisso ancorato alla struttura del motore. Questo permette di eliminare i picchi di flessione sugli altri membri del cinematismo, minimizzando gli effetti della flessione, ed incrementa la rigidità globale del sistema, assicurando una vita a fatica superiore.

CAPITOLO 2

Modellazione del Sistema Meccanico in Ambiente GIM

2.1 Panoramica delle funzionalità per l'analisi;

L'impiego del software GIM [14, 15, 16] costituisce un ottimo supporto computazionale per la modellazione, permettendo l'analisi cinematica e la simulazione dinamica non solo di meccanismi simili all'inversore di spinta preso in studio, ma innumerevoli ulteriori sistemi. L'ambiente di calcolo e di simulazione si strutturano in relazione a tre moduli integrati principali: geometria, cinematica e dinamica.

2.1.1 Geometria

La prima fase di modellizzazione consiste nella costruzione adeguata dell'architettura geometrica del meccanismo. Questo passaggio risulta fondamentale per permettere la corretta e coerente analisi successiva cinematica e dinamica.

Il programma dispone di molteplici strumenti che permettono di costruire la geometria del meccanismo attraverso approcci differenti:

Attraverso le coordinate puntuali, che prevede l'inserimento dei nodi fondamentali tramite le coordinate cartesiane (Figura 6) derivate dall'analisi geometrica preliminare della struttura; a cui fa seguito la creazione delle connessioni fisiche, le quali possono essere costituite da semplici aste o da elementi solidi più complessi (Figura 6);

Modellazione dinamica, è possibile ridurre i tempi di tracciamento generando direttamente i membri in sequenza ed inserendo, qualora necessario, ulteriori nodi intermedi lungo gli elementi stessi (Figura 6)



Figura 6: Dall'alto verso il basso si hanno le funzioni di inserimento:

nodi di ancoraggio; elementi solidi complessi; aste semplici; nodi intermedi.



Figura 7: Dall'alto verso il basso si hanno le funzioni di inserimento:

pistoni; apertura/chiusura elemento; attivare/disattivare riempimento elemento; ruota.



*Figura 8: Dall'alto verso il basso inserimento vincoli:
rotoidali; prismatica; accoppiamenti doppi; traslatori.*

Il software supporta la definizione di elementi strutturali complessi (non-binari, come corpi triangolari) che possono essere convertiti in corpi solidi rigidi o alleggeriti per ottimizzare le proprietà inerziali (Figura 7).

L'ambiente consente, inoltre, l'inserimento di svariati tipologie di vincoli e coppie cinematiche, garantendo una modellazione più aderente alla realtà fisica del sistema. Nello specifico, è possibile definire delle coppie rotoidali o traslatorie, cerniere rigide, guide di scorrimento ed accoppiamenti doppi (Figura 8).

Al fianco di questi vincoli si è in grado di aggiungere degli elementi particolari quali pistoni o ruote (Figura 7)

L'insieme di tali strumenti consente di realizzare un meccanismo il più simile al reale non solo dal punto di vista geometrico, ma anche per ciò che concerne la cinematica dei movimenti stessi. A tal proposito, durante la fase di tracciamento, GIM valuta in tempo reale la coerenza della struttura, calcolando automaticamente i gradi di libertà (DOF) del sistema e rilevando l'eventuale presenza di iperstaticità o ridondanze vincolari.

2.1.2 Cinematica

Una volta validata la geometria, si accede all'ambiente di simulazione cinematica, in cui si potrà esaminare la posizione, velocità ed accelerazione. In relazione a tale indagine il software offre tre distinte modalità di analisi del moto.

L'analisi della singola posizione (*single position analysis*), limita lo studio all'ultima posizione salvata dall'ambiente di calcolo geometrico. Permette di valutare la risposta del meccanismo in una singola configurazione istantanea senza però applicare una vera e propria legge di moto temporale continua;

Il controllo del movimento (*controlled motion*), rappresenta la modalità operativa principale per l'analisi avanzata. Consente di assegnare all'attuatore una legge di moto specifica in base alla risposta richiesta. Anche qui il range di velocità che si possono applicare è estremamente ampio:

- Attuatore bloccato, blocco rigido dell'attuatore per la verifica delle posizioni limite, molto simile alla single position analysis;
- Velocità stazionaria, impostazione di una velocità angolare o lineare costante;

- Interpolazione polinomiale, definendo le velocità e le accelerazioni iniziali e finali, il software calcola automaticamente la legge polinomiale, fino ad un massimo di terzo grado. Questa funzione è particolarmente indicata per la simulazione di rampe di avviamento;
- Moto sinusoidale, modellazione di azionamenti a regime ciclico o alternato.

Riservata ai meccanismi ad un singolo grado di libertà è il movimento automatico (*automatic motion*). La funzione impone un moto automatico privo di controllo da parte dell'utente; infatti, è il software stesso a definire l'attuatore, rivelandosi utile in fase di esplorazione preliminare per identificare la presenza di posizioni singolari o blocchi cinematici prima di definire il profilo per effettuare l'analisi finale tramite la funzione del 'controllo movimento'.

Successivamente, per l'estrazione ed il confronto dei risultati, sono due i principali strumenti adoperabili.

Il primo è costituito dai grafici comparativi, reperibili dalla finestra *Query*, i quali consentono di tracciare l'andamento temporale o spaziale selezionando liberamente le variabili di output per nodi o elementi finiti. Ogni fattore può essere posto in relazione con un ampio range di grandezze cinematiche, quali la velocità lineare e angolare, le componenti tangenziali e normali dell'accelerazione, l'accelerazione di Coriolis e il raggio di curvatura (Figura 9).

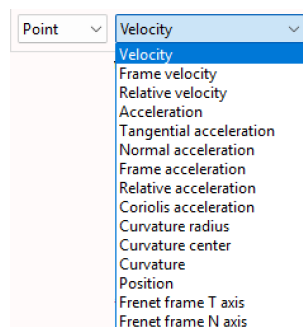


Figura 9: Parametri cinematici associati ai nodi

Il secondo strumento è la mappa cromatica (*Color Map*), una rappresentazione ad alto impatto visivo che mostra, mediante variazioni di colore, la distribuzione dei moduli di velocità ed accelerazione lungo la traiettoria di ciascun membro durante la corsa. Permettendo così una più veloce focalizzazione delle aree critiche da revisionare.

2.1.3 Dinamica

Il modulo Dinamica di GIM consente di analizzare il comportamento dinamico del meccanismo a partire dalla legge di moto precedentemente definita nell'analisi cinematica. In questa fase è quindi possibile valutare gli effetti delle forze e dei momenti agenti sul sistema, tenendo conto delle proprietà inerziali dei singoli componenti e delle condizioni di carico a cui il meccanismo è sottoposto.

Nel modulo considerato è possibile caratterizzare con maggior dettaglio i singoli elementi tramite la funzione di modifica entità (*Edit entity*). Qui è possibile inserire la

densità lineare e la massa complessiva del singolo membro, nonché ottenere informazioni relative alla posizione del baricentro, sia rispetto al sistema di riferimento locale sia rispetto a quello globale. È possibile modificare il momento di inerzia per garantire una massima aderenza alle proprietà di massa dei componenti reali.

Figura 10: Dettaglio della funzione 'modifica entità'

A completamento di queste funzionalità, l'ambiente dinamico permette di simulare le forze operative agenti sul meccanismo, quali, ad esempio, la spinta aerodinamica e le forze di resistenza associate ai cinematismi, attraverso la definizione di diverse tipologie di carico.

È possibile introdurre forze e momenti concentrati direttamente sui nodi del meccanismo, oppure carichi distribuiti lungo gli elementi.

Tra gli ulteriori strumenti disponibili per l'interpretazione dei risultati assume particolare interesse nuovamente la mappa cromatica, che consente di rappresentare graficamente la distribuzione della grandezza analizzata attraverso una scala cromatica applicata direttamente sugli elementi del meccanismo. In questo modo è possibile individuare rapidamente le zone del sistema maggiormente sollecitate dalla forza considerata e identificare aree critiche, che potrebbero richiedere un successivo intervento di verifica o di ottimizzazione geometrica.

La distribuzione visualizzata dalla mappa cromatica è dinamica, quindi dipende dal punto esatto d'analisi considerato. Per questo motivo, prima di procedere con tale rappresentazione, risulta opportuno effettuare un'analisi preliminare mediante la funzione di distribuzione del carico (*Query load*), così da individuare e selezionare i punti del meccanismo maggiormente significativi per lo studio.

Un'ulteriore possibilità d'analisi è fornita dalla funzione Energia e Potenza, che consente di studiare gli scambi energetici associati al movimento del sistema. Per quanto riguarda l'energia, è possibile determinare, tra le diverse grandezze disponibili, il lavoro compiuto dai carichi, distinguendo tra quelli noti e quelli non direttamente definiti.

Energy and Power			Energy and Power		
Energy		Power	Energy		Power
Kinetic energy	10.62434		Kinetic energy derivat.	-59.16021	
Gravit. potential energy	5.058705		Gravit. energy derivat.	-64.09397	
TOTAL energy	15.68305		TOTAL energy derivat.	-123.2542	
Known loads work	142.9173		Known loads power	1072.387	
Unknown loads work	-141.5402		Unknown loads power	-1195.641	
TOTAL work	1.377067		TOTAL power	-123.2542	
Deviation	0.0001374		Deviation	0	

Figura 11: Finestra della funzione Energia [J] e Potenza [W] con le rispettive variabili

Analogamente, l'analisi della potenza permette di valutare la potenza associata alle forze e dei momenti agenti sul meccanismo. Queste informazioni risultano particolarmente utili per completare la valutazione dinamica del sistema, permettendo di correlare il comportamento del meccanismo non soltanto alle forze e alle accelerazioni sviluppate durante il moto, ma anche agli scambi di energia e potenza

2.2 Modellazione a partire dalle coordinate reali da brevetto;

La fase di modellizzazione del brevetto ha richiesto una ricostruzione geometrica del meccanismo. Non essendo disponibili le quotate nominali dettagliate, in quanto tutelate da segreto industriale della casa costruttrice, le coordinate dei nodi e le proporzioni dimensionali sono state stimate attraverso l'analisi delle figure e delle viste riportate nel documento.

Per la costruzione si è scelto di fare riferimento alla configurazione di apertura, quando il meccanismo si trova totalmente esteso. Tale scelta risulta ottimale in quanto facilita il rilievo delle coordinate nei punti critici del cinematismo; in particolare, i punti riferiti alla manovella principale ed alla portiera di blocco, dato che assumono un allineamento pressoché parallelo. Come precedentemente citato, tale geometria rappresenta uno dei punti di forza dell'architettura brevettata, poiché consente di scaricare i carichi aerodinamici primari direttamente sui vincoli fissi, preservando la portiera di blocco da sollecitazioni eccessive.

L'operazione di modellazione si è articolata nelle seguenti fasi:

- Individuazione delle coordinate cartesiane dei nodi del meccanismo, utilizzando come riferimento le guide e le rappresentazioni presenti nelle figure del brevetto;
- Trasposizione nella griglia di lavoro del software GIM e successiva generazione dei corpi di collegamento tra i nodi individuati.

In particolare, per la rappresentazione della manovella principale, si è optato per una schematizzazione ideale basata sulla linea baricentrica dell'elemento, al fine di riprodurre la funzione cinematica senza ricostruirne nel dettaglio la geometria.

Un'attenzione particolare, inoltre, è stata dedicata alla modellazione del pattino di scorrimento con l'asta di collegamento. Per ottenere una configurazione del cinematismo più coerente al vero, il nodo che collega il pattino al manico non è stato posizionato esattamente sull'asse teorico di scorrimento, ma leggermente traslato verso l'alto. Questo accorgimento introduce un lieve angolo *offset*, ovvero un disallineamento, tra l'asse del pattino e la linea di collegamento con l'elemento di connessione. Tale scelta si è resa

necessaria per ottenere una geometria del cinematismo compatibile con le proporzioni e con la configurazione osservabile nelle rappresentazioni del brevetto.

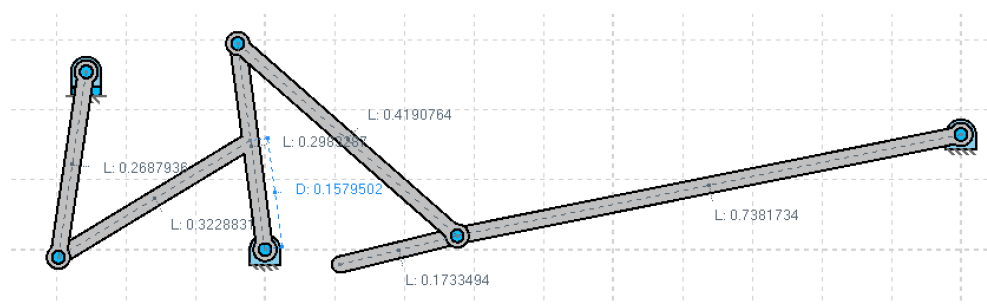


Figura 12: Rappresentazione dell'inversore di spinta nel software GIM

CAPITOLO 3

Analisi cinematica

3.1 Analisi posizione;

Definita la corretta geometria del meccanismo, è possibile procedere con l'analisi di posizione, considerando tutte le configurazioni che il meccanismo può assumere lungo l'intera corsa dell'attuatore.

In questo modo è possibile seguire l'evoluzione della configurazione geometrica del sistema, ricavando, al variare della posizione dell'attuatore, i valori degli angoli di interesse e le coordinate dei nodi che lo compongono.

L'analisi è affiancata dallo strumento Misure (*Measure*), attraverso il quale è possibile monitorare puntualmente, durante l'intera corsa, i principali parametri cinematici del meccanismo. Ciò consente di analizzare il movimento ed il posizionamento dei diversi nodi di interesse e la variazione degli angoli associati alle configurazioni assunte dal sistema.

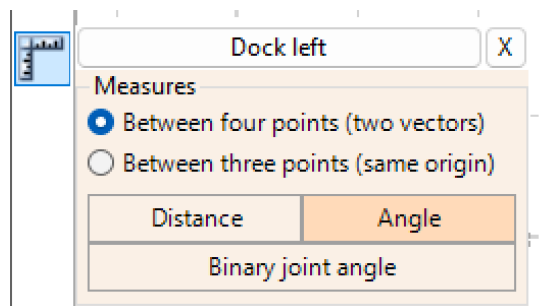


Figura 13: Dettaglio della funzione 'Misure'

3.2 Analisi velocità;

L'analisi cinematica ha l'obiettivo di valutare la risposta del meccanismo di inversione di spinta in termini di posizione, velocità e accelerazione dei membri condotti che lo compongono, a fronte della legge di moto nota e controllata applicata dall'attuatore, in questo caso la manovella principale.

Lo scopo di questo processo è verificare la fluidità del movimento durante la fase apertura, andando ad individuare quelli che sono gli eventuali punti critici o di discontinuità. L'identificazione di tali criticità consente di analizzarne le cause e, se necessario, di apportare eventuali modifiche.

Gli elementi di maggiore interesse, sui quali verrà concentrata l'analisi diretta delle velocità e delle accelerazioni, sono manovella principale, il pattino di scorrimento e la porta di blocco.

3.2.1 Legge di moto d'ingresso;

Per modellare in maniera il più possibile realistica il meccanismo, la legge di moto imposta all'attuatore corrisponde ad una curva di interpolazione polinomiale.

$$f(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0 \quad (3.1)$$

Il calcolo della curva è stato effettuato manualmente poiché il software GIM mette già a disposizione una funzione di interpolazione polinomiale fino al terzo grado. Tuttavia, tale approccio non consente di descrivere in maniera soddisfacente l'intero ciclo di movimento, comprendente sia la fase di apertura sia quella di chiusura del meccanismo.

Si adoperava, a tal proposito, la funzione 'Inserimento dei valori di posizione' che permette di definire la legge di moto dell'attuatore attraverso l'associazione tra l'angolo di posizione di quest'ultimo ed il corrispondente istante temporale. In questo modo è possibile costruire un'unica legge di moto in grado di descrivere l'intero ciclo di apertura e successiva chiusura del meccanismo.

È inoltre necessario evidenziare che il software consente l'inserimento di un massimo di 101 righe quando si adoperava questa funzione. Tale limitazione porta ad una riduzione del numero di valori che possono essere inseriti, con conseguenti ripercussioni sulla possibilità di ottenere tempi di attuazione più elevati. Comportando un livello di dettaglio inferiore nella rappresentazione del moto, a causa della ridotta quantità di valori disponibili.

Considerando un periodo complessivo di funzionamento dell'invertitore di spinta pari a circa 10 secondi, escludendo il periodo di permanenza nella configurazione aperta durante il quale avviene l'effettiva deviazione del flusso d'aria, è stata scelta un'interpolazione polinomiale di quinto grado. Tale scelta consente di imporre un numero di condizioni sufficientemente elevato da garantire la continuità della posizione, della velocità e dell'accelerazione nelle configurazioni iniziale e finale.

Le sei condizioni considerate sono relative alla posizione, alla velocità e all'accelerazione dell'attuatore nei punti iniziale e finale del movimento. In particolare, per la fase di apertura sono state imposte condizioni di velocità e accelerazione nulle sia all'inizio sia al termine della corsa. La stessa impostazione è stata adottata per la fase di chiusura, considerando, naturalmente, il verso opposto del movimento.

Tramite l'analisi di posizione precedentemente effettuata è possibile ricavare i valori angolari corrispondenti alle configurazioni di riposo e di completa apertura dell'attuatore. Tali valori costituiscono i vincoli di posizione utilizzati per la determinazione della legge polinomiale.

Le condizioni imposte possono essere sintetizzate come segue:

$$\theta(0) = 1,6964 \text{ [rad]} \quad (3.2)$$

$$\theta(5) = -0,65976 \text{ [rad]} \quad (3.3)$$

$$\theta'(0) = 0 \text{ [rad/s]} \quad (3.4)$$

$$\theta'(5) = 0 \text{ [rad/s]} \quad (3.5)$$

$$\theta''(0) = 0 \text{ [rad/s}^2\text{]} \quad (3.6)$$

$$\theta''(5) = 0 \text{ [rad/s}^2\text{]} \quad (3.7)$$

A seguito del calcolo si ricavano come equazioni d'apertura (3.7) e di chiusura (3.8):

$$\theta(t) = 1,696438 - 0,1884955 * t^3 + 0,0565487 * t^4 - 0,00452389 * t^5 \quad (3.8)$$

$$\theta(t) = -0,659756 + 0,1884955 * (t - t_{-1})^3 - 0,0565487 * (t - t_{-1})^4 + 0,00452389 * (t - t_{-1})^5 \quad (3.9)$$

Nell'equazioni, il termine t_{-1} fa riferimento al valore ultimo relativo al tempo di andata. Nel caso in esame, considerando che la durata complessiva del percorso è pari a 10 secondi, tale valore corrisponde a 5 secondi, ovvero al termine della fase di apertura.

Le due equazioni permettono di determinare, per ogni istante di tempo considerato, l'angolo di posizione dell'attuatore e di trasferire successivamente tali valori all'interno del modello cinematico realizzato in GIM. In questo modo è stato possibile simulare l'intero ciclo di apertura e chiusura del meccanismo mediante una legge di moto continua.

Ponendo la lista di valori all'attuatore, la manovella principale, si ottengono i seguenti grafici relativi alla velocità ed accelerazione:

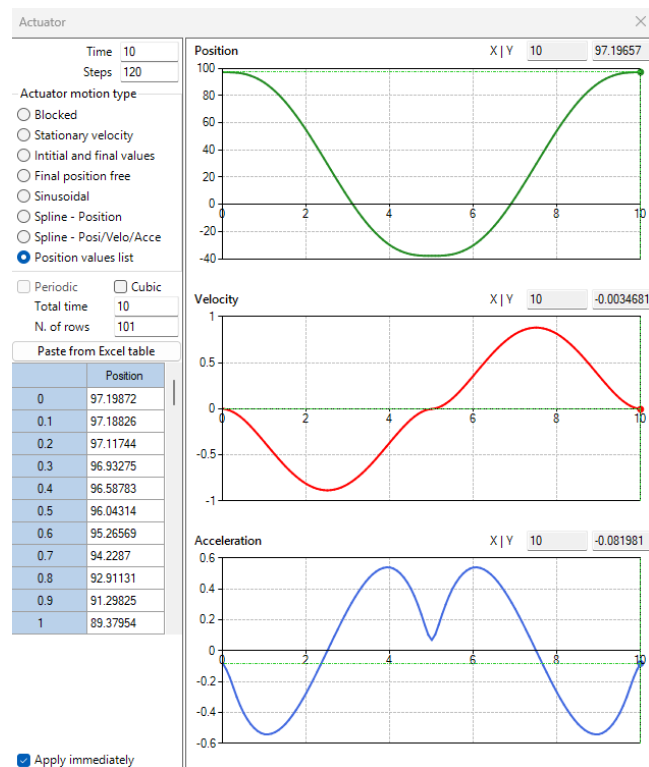


Figura 14: Grafici velocità ed accelerazione

Velocità= ascissa: tempo [s]; ordinata: valore velocità [rad/s]

Accelerazione= ascissa: tempo [s]; ordinata: valore accelerazione [rad/s²]

Oltre al comportamento della manovella principale, risulta di interesse analizzare la cinematica degli altri elementi mobili del meccanismo, in particolare del pattino e della portiera di blocco. L'analisi delle rispettive velocità consente, infatti, di caratterizzare in maniera più completa il movimento del sistema.

Per quanto riguarda il pattino, il vincolo imposto dalla guida e la sua costruzione geometrica ne limita il movimento alla sola traslazione lungo la direzione assegnata. Di conseguenza, per tale elemento, è possibile considerare esclusivamente la velocità lineare, non essendo associata al pattino una rotazione significativa ai fini dell'analisi. Il relativo andamento della velocità in funzione del tempo è riportato nella figura seguente.

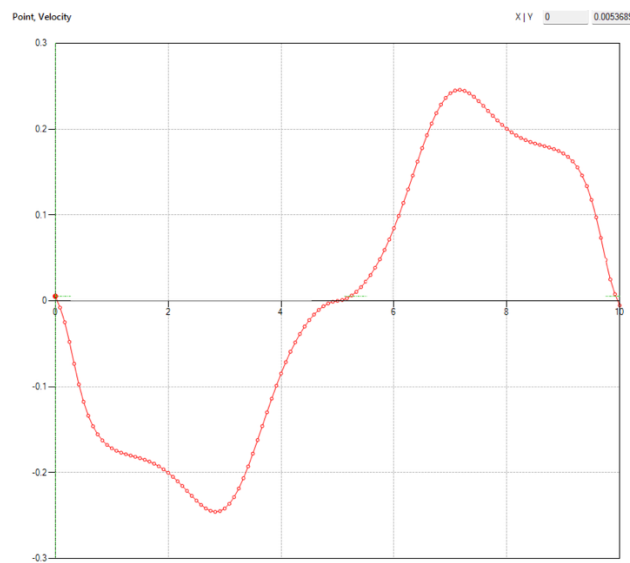


Figura 15: Grafico velocità pattino (ascisse: tempo [s]; ordinate: valore velocità [m/s])

Diversamente, la porta di blocco è soggetta ad un movimento rotatorio attorno al proprio asse di riferimento. Per questo componente risulta pertanto significativo analizzare la velocità angolare.

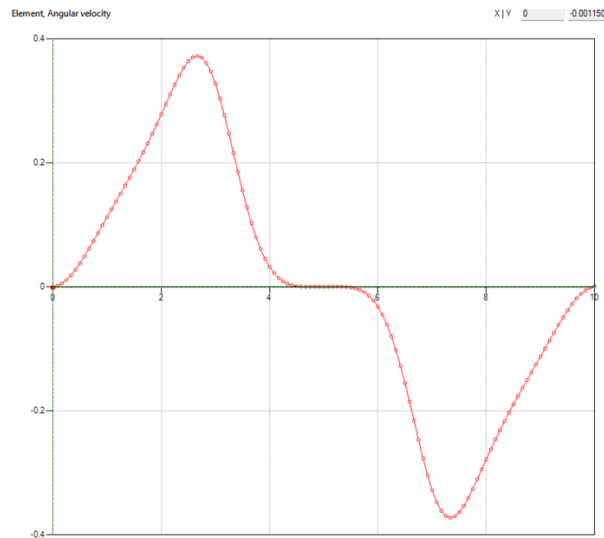


Figura 16: Grafico velocità angolare porta di blocco (ascisse: tempo [s]; ordinate: valore velocità angolare [rad/s])

È possibile poi visionare in maniera completa la distribuzione della velocità nei diversi elementi del meccanismo tramite l'ausilio della mappa cromatica. Tale rappresentazione consente di evidenziare le zone caratterizzate da una maggiore o minore intensità di moto.

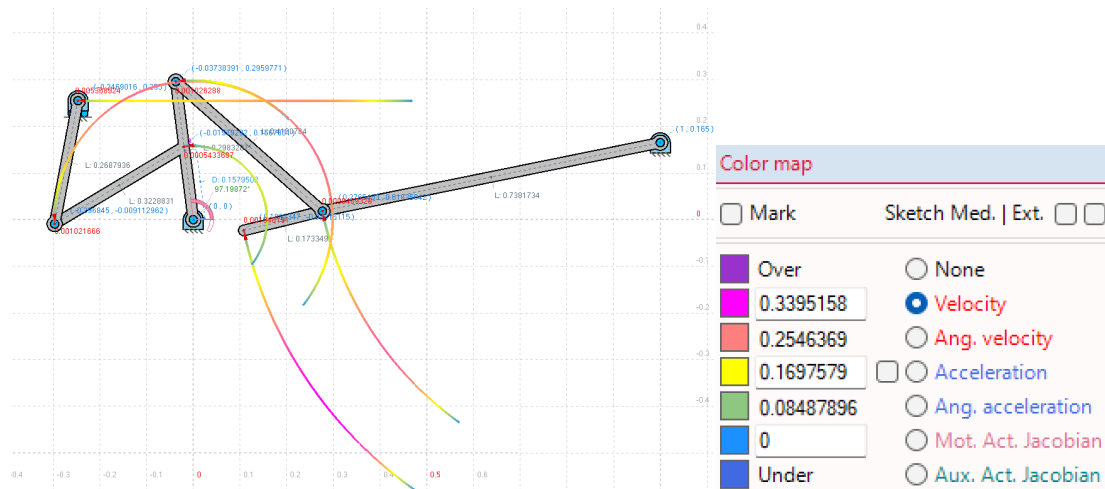


Figura 17: Mappa cromatica della velocità [m/s] con la relativa legenda

Il confronto tra gli andamenti temporali delle velocità e la corrispondente rappresentazione cromatica permette, quindi, di ottenere una lettura più completa del comportamento cinematico del meccanismo, mettendo in evidenza la relazione tra il movimento dell'attuatore e quello dei componenti da esso azionati.

3.3 Analisi accelerazione

Analogamente a quanto effettuato per l'analisi delle velocità, è possibile ricavare dal software GIM le informazioni relative all'accelerazione dei principali elementi mobili del meccanismo. L'analisi di tale grandezza permette di completare la descrizione del

comportamento cinematico del sistema e di individuare le configurazioni nelle quali si verificano le variazioni più significative del moto.

In riferimento all'attuatore l'andamento dell'accelerazione in funzione del tempo può essere visualizzato direttamente dalla schermata relativa all'impostazione di moto (Figura 14), potendo osservare la variazione dell'accelerazione durante l'intero ciclo di apertura e chiusura del meccanismo.

Per quanto riguarda il pattino, in accordo con la natura traslazionale del movimento, viene considerata l'accelerazione lineare lungo la direzione di scorrimento. Il relativo andamento temporale permette di valutare come la variazione della velocità del pattino si distribuisca durante la corsa e di individuare eventuali condizioni di maggiore sollecitazione cinematica.

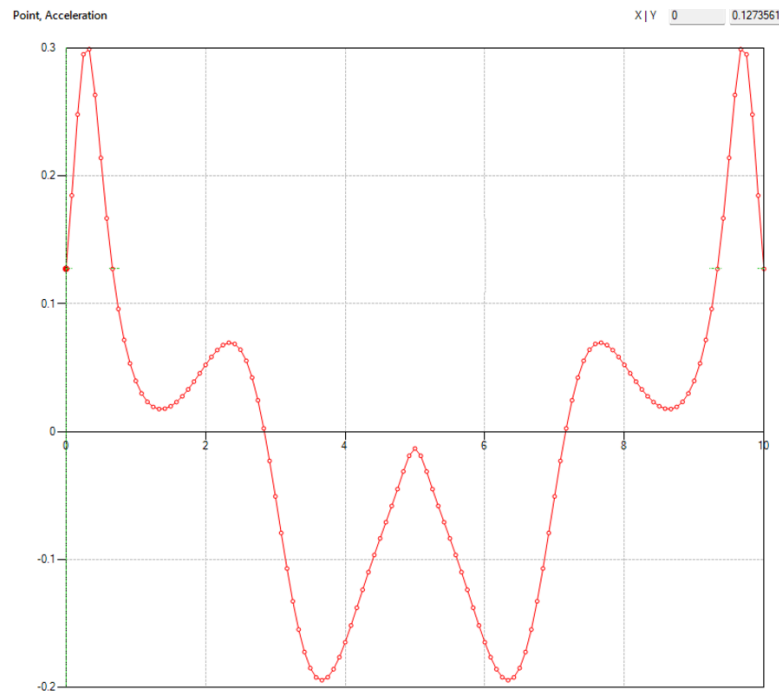


Figura 18: Grafico accelerazione pattino (ascisse: tempo [s]; ordinate: valore accelerazione [m/s²])

Per la portiera di blocco, invece, essendo il movimento caratterizzato da una rotazione attorno al proprio asse, risulta significativo analizzare l'accelerazione angolare. Il grafico seguente mostra l'andamento di tale grandezza durante il ciclo di movimento, permettendo di evidenziare le fasi nelle quali la portiera è soggetta alle maggiori variazioni della velocità angolare.

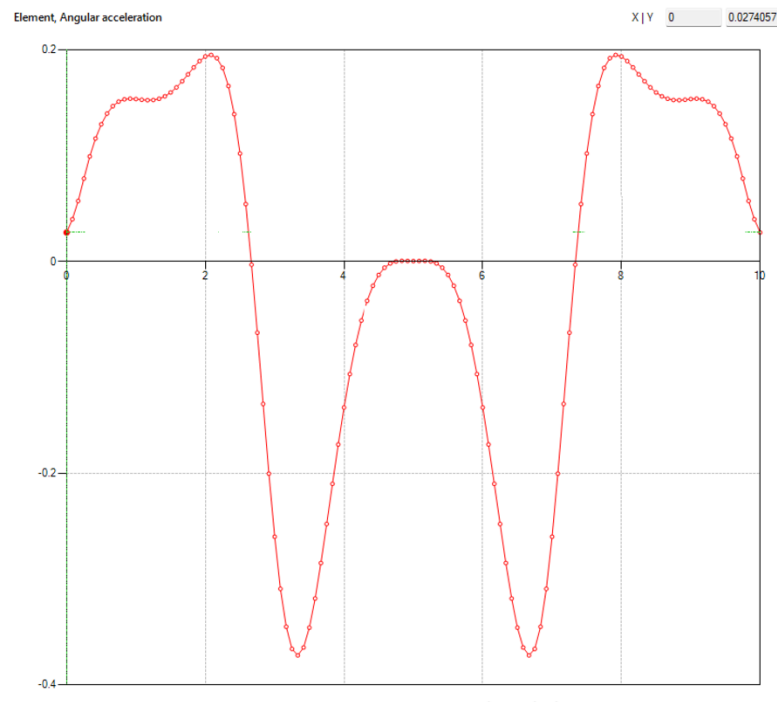


Figura 19: Grafico accelerazione angolare porta di blocco (ascissa: tempo [s]; ordinata: valore accelerazione angolare [rad/s²])

A completamento dell'analisi, i valori ottenuti dai singoli grafici possono essere, nuovamente, correlati con la mappa cromatica dell'accelerazione. Tale rappresentazione consente di associare l'andamento temporale dell'accelerazione alla configurazione istantanea del meccanismo, evidenziando visivamente la distribuzione di tale grandezza tra i diversi elementi durante il movimento.

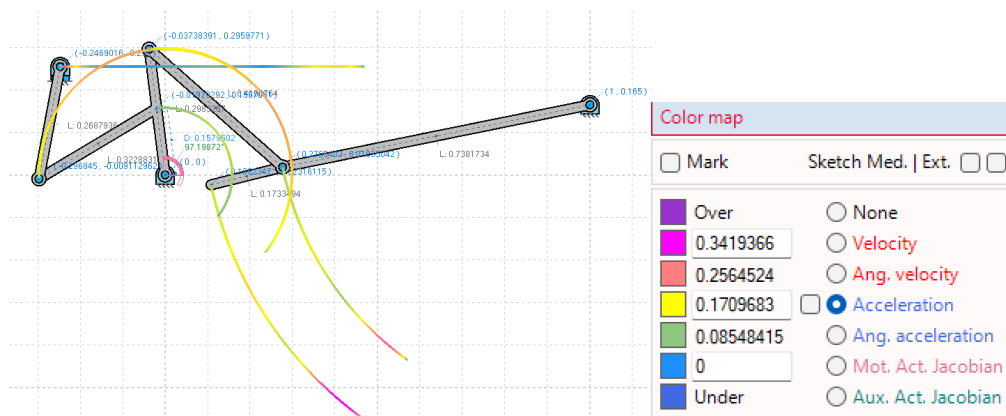


Figura 20: Mappa cromatica dell'accelerazione [m/s²] con relativa legenda

CAPITOLO 4

ANALISI DINAMICA

4.1 Stima delle forze aereodinamiche esterne;

Durante la fase di atterraggio, il flusso d'aria presente nel condotto di bypass può investire direttamente gli elementi del cinematismo che si trovano nella regione esposta, generando su di essi una forza aerodinamica. Per determinare il valore della forza aerodinamica applicata al meccanismo è stata utilizzata la relazione generale:

$$F_{ad} = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_f \quad (4.1)$$

L'elemento considerato in questa prima analisi è l'asta di collegamento con il pattino, in quanto rappresenta uno dei componenti maggiormente esposti al flusso d'aria durante la fase di apertura dell'inversore di spinta.

Nella relazione (4.1) adoperata, ρ rappresenta la densità dell'aria ed assume il valore standard di $1,225 \text{ kg/m}^3$, corrispondente alle condizioni dell'Atmosfera Standard Internazionale (ISA) al livello del mare. La velocità del flusso (v) è assunta pari a circa 100 m/s .

Il coefficiente C_f rappresenta il coefficiente adimensionale di forza aerodinamica, esso dipende dalla geometria del corpo investito dal flusso e dal suo orientamento rispetto alla direzione dell'aria. Poiché, ai fini della presente analisi, il membro considerato può assumere un'interfaccia colpita pari ad un corpo affusolato, geometria finalizzata a ridurre l'interazione aerodinamica con il flusso, il valore corrispondente del coefficiente su tale ipotesi assume un valore pari a $0,04$.

Infine, con S si fa riferimento alla superficie laterale esposta al flusso d'aria. La determinazione di quest'ultimo valore ha richiesto un'ulteriore fase di stima geometrica, dal momento che il brevetto non fornisce le dimensioni reali del meccanismo. Per ottenere una prima approssimazione delle proporzioni geometriche sono state utilizzate alcune quote geometriche relative all'Airbus A380 (Figura 21).

A partire da tali proporzioni è stata stimata una lunghezza dell'asta pari a circa $0,90 \text{ m}$. Per il diametro è stato invece assunto un valore approssimato di 12 cm . Sulla base di queste dimensioni è stata quindi calcolata la superficie laterale di riferimento esposta al flusso, di circa $0,108 \text{ m}^2$.

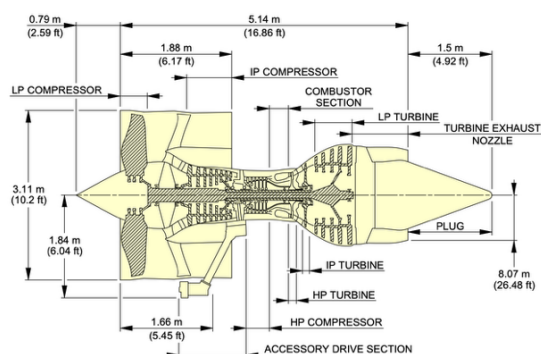


Figura 21: Particolare delle quote motore dell'Airbus A380

Fonte: https://www.aircraft.airbus.com/sites/g/files/jlcbta126/files/2025-12/AC_A380_20251201.pdf, sezione 2.14.0 pagina 14 [12, 13]

Il valore della forza aerodinamica così ottenuto risulta pari, nell'ambito delle ipotesi adottate, a circa 26,5 N. Tale forza viene applicata alla manovella principale durante la successiva analisi dinamica.

Oltre all'asta di collegamento, è stata considerata anche una forza agente sulla porta di blocco. Come analizzato in precedenza, la particolare configurazione geometrica del meccanismo durante la fase di apertura è progettata per favorire una trasmissione dei carichi verso i punti di vincolo e, in particolare, verso l'accoppiamento rotoidale collegato alla struttura fissa. Di conseguenza, anche la porta di blocco è soggetta alle azioni derivanti dal flusso aerodinamico e dalle reazioni trasmesse attraverso il cinematiso.

Poiché non sono disponibili dati sperimentali o geometrici sufficientemente dettagliati per determinare con precisione il valore di tale forza, ai fini della simulazione è stata adottata un'ulteriore ipotesi semplificativa, assumendo per la forza applicata alla porta di blocco un valore pari al (60%) della forza calcolata per la manovella. Tale valore deve quindi essere interpretato come una condizione di carico approssimata, introdotta per valutare qualitativamente la risposta dinamica del meccanismo.

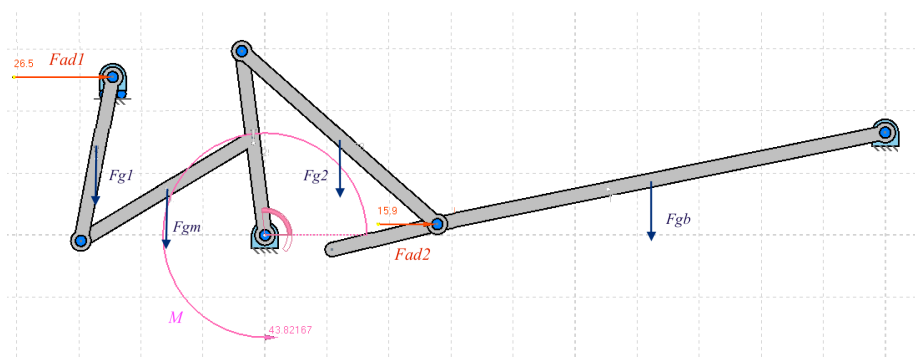


Figura 22: Rappresentazione delle forze esterne agenti (in rosso, [N]; con Fad1 si intende la forza aerodinamica sul pattino, con Fad2 la forza aerodinamica sulla porta di blocco), del momento M agente sul meccanismo (in rosa, [Nm]) e delle forze di gravità (in blu, [N]; con Fg1 si intende la forza gravitazionale dell'asta di collegamento, con Fgm quella della manovella principale, con Fg2 quella del link di collegamento con la porta di blocco e con Fgb la forza gravitazionale della porta di blocco)

4.2 Analisi dinamica

Dopo aver definito le due forze esterne agenti sul meccanismo e il momento incognito applicato all'accoppiamento rotoidale, è stata eseguita l'analisi dinamica diretta del sistema sulla base degli elementi di velocità ed accelerazione definiti in precedenza nell'analisi cinematica diretta.

Nel meccanismo, per essere il più possibile assimilabile ad una situazione reale, vengono considerate nell'insieme le forze di gravità provocate dalle masse dei singoli membri. A riguardo di quest'ultima, essa questa viene calcolata automaticamente dal software GIM a partire dalla geometria dei corpi già creati e dalla densità del materiale assegnato. Per la simulazione è stata adottata una densità pari a $2,7 \text{ g/cm}^3$, valore rappresentativo delle leghe di alluminio [8]. Tale scelta costituisce un'approssimazione delle proprietà dei materiali potenzialmente impiegati nella realizzazione di componenti di questo tipo.

La prima analisi viene condotta attraverso la funzione della distribuzione del carico di GIM, prendendo in considerazione il momento incognito applicato all'accoppiamento rotoidale. Questo parametro consente di individuare le configurazioni cinematiche nelle quali il sistema richiede il massimo momento di azionamento e, di conseguenza, di identificare le condizioni potenzialmente più gravose per il dimensionamento del meccanismo.

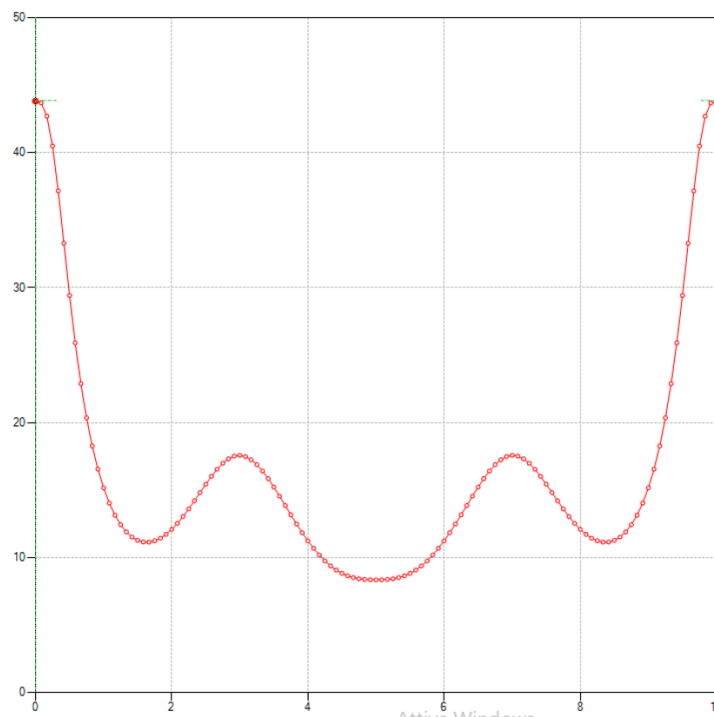


Figura 23: Grafico andamento valore del Momento applicato all'attuatore (ascisse: tempo [s]; ordinate: valore Momento [Nm])

4.2.1 Analisi mappe cromatiche

L'ausilio delle mappe cromatiche delle forze consente di analizzare più dettagliatamente il comportamento del meccanismo nelle configurazioni corrispondenti ai leggeri picchi di momento registrati dall'attuatore, individuati in corrispondenza di circa 3 e 7 secondi. L'osservazione di tali configurazioni permette di individuare le zone

del cinematismo maggiormente interessate dalla trasmissione delle forze e, di conseguenza, quelle che richiedono maggiore attenzione in fase di progettazione.

Dall'analisi della mappa cromatica delle forze normali si osserva una maggiore concentrazione delle forze in corrispondenza delle aste di collegamento con il pattino e con la portiera di blocco, nonché nelle vicinanze dell'accoppiamento rotoidale dell'attuatore. Tali regioni risultano particolarmente coinvolte nella trasmissione degli sforzi lungo il cinematismo e rappresentano punti di interesse per la valutazione strutturale dei componenti.

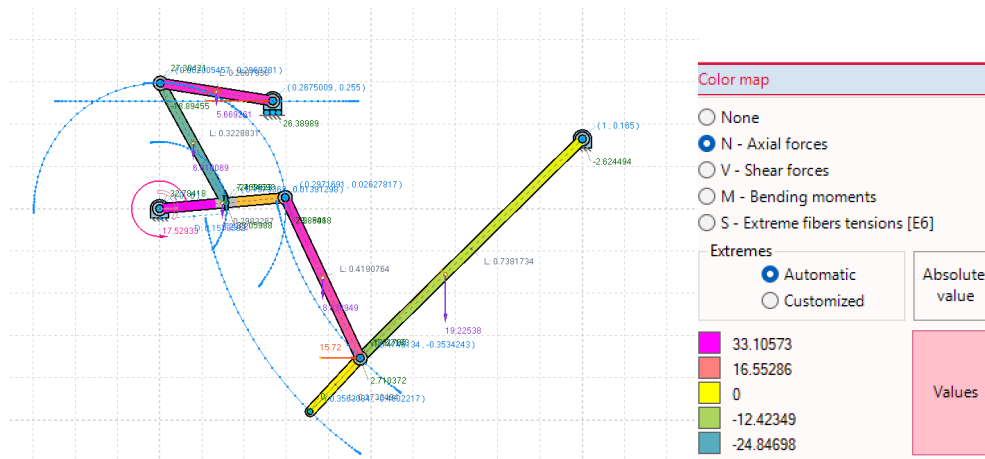


Figura 24: Mappa cromatica delle forze normali [N] con rispettiva leggenda

Un comportamento differente si osserva analizzando la mappa cromatica delle forze di taglio. In questo caso, la distribuzione delle forze interessa in maniera più estesa la manovella principale, con una maggiore presenza degli sforzi lungo il componente nel suo complesso.

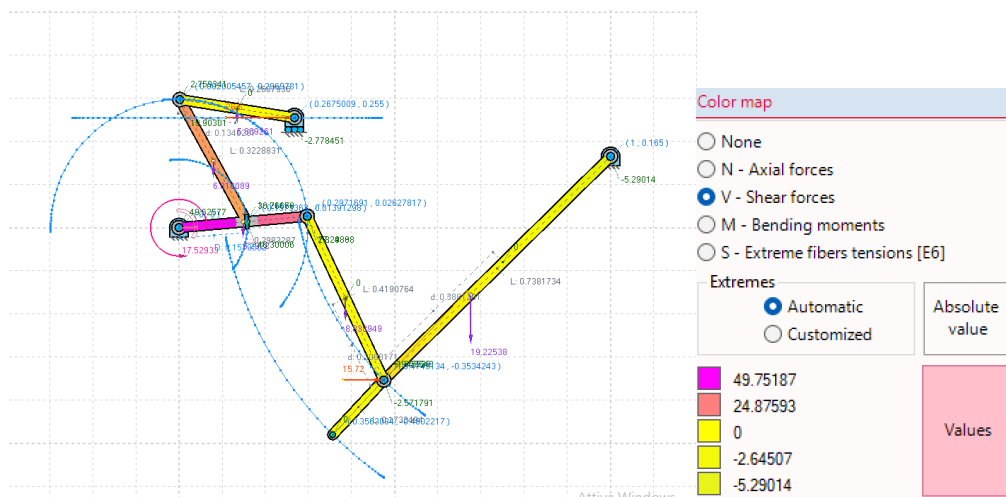


Figura 25: Mappa cromatica delle forze di taglio [N] con rispettiva leggenda

Nella configurazione analizzata emerge una maggiore concentrazione degli sforzi nella zona in prossimità dell'accoppiamento rotoidale della manovella principale. Tale regione assume pertanto particolare rilevanza dal punto di vista progettuale, in quanto

costituisce una delle aree maggiormente sollecitate del componente e richiede un'adeguata valutazione sia della geometria sia delle modalità di collegamento.

Nel complesso, la manovella principale risulta caratterizzata da sollecitazioni assiali e di taglio leggermente superiori rispetto agli altri membri del meccanismo. Tale comportamento può essere ricondotto alla particolare configurazione geometrica dell'elemento che, in corrispondenza dei cambi di inclinazione, risulta maggiormente esposta alle forze agenti. La corretta progettazione di tale componente risulta, quindi, fondamentale non solo per garantire il corretto funzionamento cinematico del meccanismo, ma anche per assicurare un'adeguata resistenza strutturale e una sufficiente durabilità nel tempo.

4.2.2 Analisi Energia e Potenza

I grafici dell'Energia e della Potenza mostrano entrambi un andamento complessivamente simmetrico nell'intervallo di tempo considerato. Le curve partono da valori prossimi allo zero, raggiungono un estremo in corrispondenza della parte centrale del ciclo, per poi ritornare progressivamente verso lo zero al termine dell'intervallo. Andamento coerente con il ciclo completo del meccanismo, nel quale il movimento di ritorno determina un'inversione dei contributi energetici e delle potenze associate ai diversi carichi.

Nel grafico dell'Energia, il lavoro associato ai carichi noti, rappresentato dalla curva arancione, e quello associato ai carichi incogniti, rappresentato dalla curva magenta, presentano valori simili di segno opposto, evidenziando un comportamento equilibrante tra i contributi energetici associati alle forze esterne e quelli riconducibili al momento applicato all'accoppiamento rotoidale.

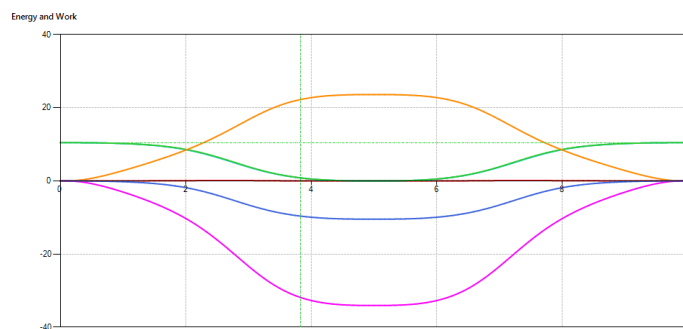


Figura 26: Grafico Energia e Lavoro, per la legenda si riveda Figura 11 (ascissa: tempo [s], ordinata: valore Energia, Lavoro [J])

Si osserva un comportamento analogo anche per il grafico per la Potenza, in cui le curve relative alla potenza dei carichi noti e incogniti assumono valori simili di segno opposto e mostrano un'inversione durante il passaggio dalla fase di apertura a quella di chiusura.

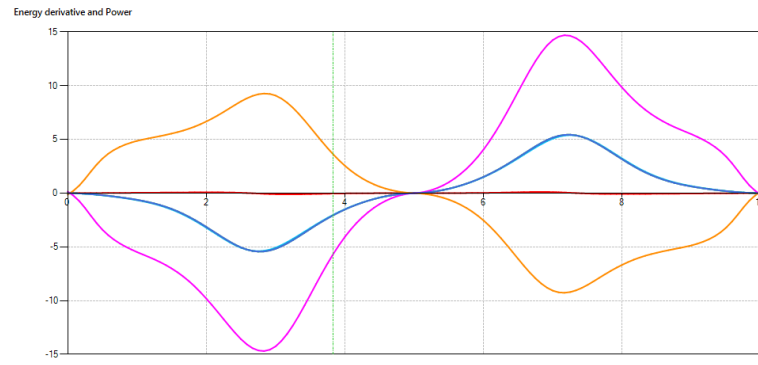


Figura 27: Grafico Potenza, per la leggenda si riveda Figura 11 (ascissa: tempo [s], ordinata: valore Potenza [W])

CAPITOLO 5

Conclusione

Il software GIM mette a disposizione numerose funzionalità che consentono di analizzare in modo relativamente semplice ed intuitivo anche meccanismi di una certa complessità. Nel caso analizzato è stato considerato un meccanismo caratterizzato da un unico grado di libertà, tuttavia, come evidenziato anche dalla libreria disponibile all'interno del software, è possibile costruire e studiare meccanismi dotati di due o più gradi di libertà.

Nonostante ciò, la costruzione geometrica non risulta sempre immediata e può richiedere una definizione dettagliata preliminare della struttura. Questo al fine di riuscire a disporre correttamente le relative coordinate geometriche ed i nodi intermedi, la cui aggiunta può risultare più difficoltosa qualora non siano stati previsti nella fase iniziale di costruzione. Una volta completata la definizione geometrica, tuttavia, l'analisi di posizione per le diverse configurazioni del meccanismo risulta particolarmente efficiente. La possibilità di analizzare nel dettaglio una configurazione consente, infatti, di ottenere rapidamente le informazioni relative alle successive configurazioni del sistema, facilitando il confronto tra i diversi assetti assunti durante il movimento.

I moduli dedicati alla cinematica e alla dinamica mettono a disposizione diverse funzionalità che consentono di approfondire l'analisi del meccanismo. È possibile, ad esempio, studiare l'andamento della velocità e dell'accelerazione dei diversi componenti ed analizzare il comportamento del sistema in presenza di azioni dinamiche, quali forze e momenti applicati. Tali strumenti permettono, inoltre, di individuare condizioni limite e configurazioni potenzialmente critiche, fornendo indicazioni utili per le successive fasi di progettazione e verifica del meccanismo.

L'utilizzo del software presenta, tuttavia, alcune limitazioni che devono essere considerate nell'interpretazione dei risultati. Nel caso analizzato, ad esempio, il sistema non riesce, mediante le funzioni di interpolazione disponibili, a definire una legge di moto polinomiale in grado di descrivere l'intera corsa del meccanismo, in quanto l'interpolazione si interrompe poco dopo il raggiungimento della configurazione d'apertura. Per analisi più semplici o limitate a specifiche configurazioni, tale aspetto può risultare superfluo; al contrario, nel caso in cui si voglia riprodurre un ciclo di movimento completo ed ottenere risultati più vicini al comportamento reale del sistema, può rendersi necessario intervenire manualmente sulla definizione della legge di moto.

Nel complesso, GIM si è dimostrato uno strumento efficace per lo studio cinematico e dinamico di meccanismi piani, permettendo di integrare l'analisi geometrica con quella del moto e delle sollecitazioni. I risultati ottenuti consentono di individuare le configurazioni maggiormente significative e di fornire una prima valutazione del comportamento del meccanismo. Per uno studio progettuale completo del sistema sarebbero, tuttavia, necessarie ulteriori verifiche, basate su dati geometrici, proprietà dei materiali, condizioni di carico e parametri di funzionamento maggiormente rappresentativi del sistema reale.

RINGRAZIAMENTI

“Bojë mirë, bojë vetë” è un ottimo motto di vita, sentito a bizzeffe in casa. Quanto vorrei poter dire che si addice anche a me.

Il risultato di questi tre anni di lavoro è solo in parte frutto del mio impegno personale, è soprattutto il risultato del supporto e del sostegno immenso che ho ricevuto dalle persone che mi sono state accanto.

Ai miei genitori, Ermelinda Qoshja e Altin Xixa, che mi hanno dato e insegnato tutto, permettendomi di costruire un futuro; nonostante siano arrivati qui con niente, se non una determinazione immensa.

Grazie per il vostro supporto, soprattutto durante quelle nottate in cui mi sentivo in balia delle onde. Grazie per avermi sempre spronato a fare di più, a non accontentarmi e a credere nelle mie abilità.

Alle mie sorelle, Sara e Chiara Xixa, che, nonostante il caos che portano in casa disturba il mio quieto vivere, sono state, in fondo, il rumore di sottofondo fondamentale delle mie giornate.

SITOGRAFIA e BIBLIOGRAFIA

- [1] <https://it.wikipedia.org/wiki/Turboventola>
- [2] <https://community.infiniteflight.com/t/a-guide-to-reverse-thrust/123434>
- [3] <https://pilotinstitute.com/thrust-reversal/>
- [4] https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC_25.933-1.pdf
- [5] <https://safetyfirst.airbus.com/thrust-reverser-unlock-in-flight/>
- [6] <https://alloysintl.com/current-aircraft-trends/materials-and-processes-used-in-aircraft-engine-manufacturing/>
- [7] https://en.wikipedia.org/wiki/Target-type_thrust_reversal
- [8] <https://migflug.com/afterburner/boeing-737-200-jt8d-clamshell-bucket-thrust-reverser-history/>
- [9] <https://engineering.purdue.edu/~propulsi/propulsion/jets/basics/reverse.html>
- [10] <https://skybrary.aero/articles/cascade-reverser>
- [11] <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19950014289/downloads/19950014289.pdf>
- [12] **Boeing Commercial Airplanes**, *737 MAX Airplane Characteristics for Airport Planning*, Document No. D6-38A004, Rev. K, July 2025.
- [13] **CFM International S.A.**, *Type-Certificate Data Sheet No. E.003 for CFM56-5B and CFM56-5C Series Engines*, Issue 06, 9 January 2023
- [14] Erik Macho, Mónica Urizar, Víctor Petuya, Alfonso Hernández. “Improving Skills in Mechanism and Machine Science Using GIM Software”. *Applied Sciences*, Vol. 11(17), 7850, Special Issue Computational Modeling and Simulation of Solids and Structures: Recent Advances and Practical Applications, 2021. <https://doi.org/10.3390/app11177850>
- [15] Víctor Petuya, Erik Macho, Oscar Altuzarra, Charles Pinto, Alfonso Hernández. “Educational Software Tools for the Kinematic Analysis of Mechanisms”. *Computer Applications in Engineering Education*, Vol. 22(1), pp: 72-86, 2011. <https://doi.org/10.1002/cae.20532>
- [16] The authors wish to acknowledge Erik Macho, Alfonso Hernández, CompMech, Department of Mechanical Engineering, UPV/EHU, for the permission to use the GIM® software. <https://www.ehu.eus/compmech/software/>