

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

TESI DI LAUREA TRIENNALE
IN
PROGETTAZIONE ASSISTITA DAL CALCOLATORE T

**Studio e ottimizzazione
di un'elica a passo variabile elettromeccanica
con messa in bandiera automatica**

Applicazione per Lockheed C-130J *SuperHercules*

Candidato:
Luca Zappalorti

Relatore:
Prof. Luca Piancastelli

A mia nonna Piera.

Abstract

La maggior parte dei velivoli commerciali fanno impiego di eliche a passo variabile con sistemi di cambio passo a circuito idraulico. Una loro valida alternativa può essere rappresentata dall'adattamento dei sistemi con motori a passo, più semplici e leggeri, utilizzati sugli ultraleggeri. Il passaggio dalla prima soluzione all'alternativa proposta deve tenere conto dei necessari adattamenti conseguenti ai maggiori carichi che questo ambito applicativo introduce.

L'obbiettivo di questo studio è proprio lo sviluppo e l'ottimizzazione di una soluzione di massima, a meno delle verifiche dimensionali, di un sistema elettromeccanico per la gestione del passo di un'elica a passo variabile con messa in bandiera automatica. In particolare lo sviluppo del processo progettuale si basa sullo studio di una soluzione per l'aeromobile Lockheed C-130J *SuperHercules*, che di serie adotta una soluzione a circuito idraulico. Il lavoro ha preso piede a partire dall'analisi di un prototipo di partenza basato su di un sistema con rotismi sincronizzati e si è protratto correggendone criticità e carenze. Una volta raggiunto un modello congruente alle specifiche tecniche richieste dall'ambito di applicazione, si è introdotto il sistema di messa in bandiera automatica delle pale, facendo uso di una soluzione integrata nel sistema di gestione del passo. Sia chiaro che l'implementazione del sistema di *feathering* delle pale, di cui il modello originale era sprovvisto, è un passo fondamentale per definire un prodotto sicuro o quantomeno dotato di tutti i migliori strumenti emergenziali. Il risultato finale è un prototipo completo che può essere considerato una valida alternativa, con le opportune verifiche dimensionali, ai sistemi esistenti in commercio per i velivoli commerciali come il *SuperHercules*, con alcuni vantaggi in termini di leggerezza, semplicità e precisione del comando sul passo.

Indice

Introduzione	2
1 Introduzione all'elica di riferimento	3
1.1 Eliche a passo variabile	3
1.2 Sistema di cambio di passo obiettivo	4
1.3 Prototipo di un'elica a passo variabile	6
1.4 Elementi dell'elica	7
2 Problematiche e aree di intervento	10
2.1 Analisi preliminare	10
2.2 Aree di intervento	11
2.3 Cestello	13
2.4 Sistema di cuscinetti per le pale	15
2.5 Movimento centrale	16
2.6 Alberi di comando	18
2.7 Attacco all'albero motore	19
2.8 Lubrificazione, ingrassaggio e carteratura	20
2.9 Feathering	20
3 Soluzioni e loro implementazione	22
3.1 Cestello	22
3.2 Sistema di cuscinetti per le pale	25
3.2.1 Scelta dei cuscinetti	26
3.2.2 Disposizione dei cuscinetti	29
3.3 Movimento centrale	30
3.3.1 Sistema di cuscinetti centrale	31
3.3.2 Supporto e albero centrale	32
3.4 Alberi di comando e pala completa	34
3.5 Ruote dentate	35
3.6 Attacco all'albero motore	37
3.7 Soluzioni di lubrificazione e tenuta	38

3.7.1	Cuscinetti a rulli conici appaiati	38
3.7.2	Cuscinetti radiali a sfere	40
3.7.3	Cuscinetti obliqui a sfere	41
3.7.4	Ruote dentate	42
3.8	Chiusura dell'elica	46
3.8.1	Coperchio mozzo	46
3.8.2	Ogiva	50
3.9	Assemblaggio	51
4	Feathering delle pale	55
4.1	Introduzione ai sistemi di <i>feathering</i>	55
4.2	Soluzioni di feathering proposte	56
4.2.1	Prerogative progettuali	56
4.2.2	Soluzioni proposte	57
4.2.3	Scelta delle soluzioni	59
4.3	Soluzione di feathering C	60
4.3.1	Elementi di manovra	60
4.3.2	Funzionamento della manovra	60
4.3.3	Implementazione	62
4.3.4	Caratteristiche e problematiche	63
4.4	Soluzione di feathering D	65
4.4.1	Elementi e funzionamento della manovra	65
4.4.2	Implementazione	66
4.4.3	Caratteristiche e problematiche	68
5	Conclusioni	70
Bibliografia		73

Elenco delle figure

1.1	Vista d'assieme del prototipo di riferimento	7
1.2	Profilo della pala Dowty 391 che di serie viene montata sui Lockheed C-130J	9
2.1	Principali aree di intervento del prototipo	12
2.2	Cestello del prototipo di partenza	13
2.3	Dettagli sull'interno del mozzo	14
2.4	Cestello del prototipo di partenza	15
2.5	Sezione completa dell'elica originale	17
2.6	Albero di comando originale	19
2.7	Cestello del prototipo di partenza	20
3.1	Nuovo modello di mozzo	23
3.2	Montaggio del supporto motori sul mozzo	24
3.3	Confronto tra le versioni del mozzo	25
3.4	Diagramma angolo di contatto SKF	27
3.5	Schema dei cuscinetti impiegati	28
3.6	Disposizione dei cuscinetti	30
3.7	Sezione integrale dell'elica	31
3.8	Nuovo movimento centrale	32
3.9	Supporto e albero centrale	33
3.10	Pala completa in sezione	34
3.11	Confronto tra le versioni della corona	36
3.12	Nuovo modello di mozzo	37
3.13	Sistema di lubrificazione per cuscinetti a rulli conici	39
3.14	Sistemi di tenuta integrati	41
3.15	Carterature di protezione	44
3.16	Elica con carter completo	45
3.17	Confronto tra le versioni del coperchio mozzo	47
3.18	Confronto tra le versioni del sistema di serraggio	48
3.19	Retro del coperchio	48
3.20	Soluzione <i>quarter turn fastener</i>	49

3.21	Prototipo di ogiva	50
3.22	Elica a montaggio ultimato	53
4.1	Schemi semplificati delle soluzioni di feathering	58
4.2	Configurazioni di funzionamento reali	61
4.3	Implementazione della soluzione C	62
4.4	Dettaglio su elementi di manovra per <i>feathering</i> C	63
4.5	Configurazioni del sistema di <i>feathering</i> D	65
4.6	Implementazione della soluzione C	66
4.7	Dettaglio sull'accoppiamento camma-punteria	67

Introduzione

Il *passo* è uno dei parametri fondamentali di un'elica ed è la grandezza che esprime la distanza percorsa da questa in un giro: nello specifico si fa distinzione fra passo *geometrico*, ovvero la distanza percorsa in una rotazione trascurando la cedevolezza del fluido in cui questa lavora, e il passo *reale* che è invece l'avanzamento effettivo. In generale il passo e gli altri principali parametri che definiscono la geometria di un'elica non possono essere scelti arbitrariamente, ma devono essere studiati al fine di ottimizzare il rendimento dell'elica nelle condizioni di funzionamento considerate.

I sistemi di propulsione ad elica a *passo fisso* sono quindi progettati a fronte di un necessario compromesso fra le condizioni di decollo del velivolo e quelle di crociera in modo che il rendimento risulti ottimizzato per un intervallo più ampio di funzionamento. I sistemi di propulsione ad elica a *passo variabile* sono una famiglia di propulsori caratterizzati dalla possibilità di variare il passo dell'elica. La modifica del passo, per questo tipo di propulsori, viene realizzata per mezzo di servomeccanismi che adattano la configurazione dell'elica alla condizione operativa, permettendo l'ottimizzazione del rendimento in ogni circostanza. Detto questo è facile dedurre che i sistemi a passo variabile sono i più vantaggiosi in termini di rendimento e di manovra del velivolo, ma d'altro canto, rispetto a quelli a passo fisso, comportano la complicazione progettuale e realizzativa del servomeccanismo che modifica il passo.

Oggigiorno i sistemi di cambio del passo sono per lo più basati su sistemi a circuito idraulico a comando centrifugo o per mezzo di motori elettrici a passo comandati elettronicamente. Se la prima famiglia di servomeccanismi è la più diffusa tra i velivoli di aviazione generale e commerciale, a fronte della loro affidabilità e capacità di operare a carichi elevati, i sistemi a comando elettronico sono sempre più frequenti per la loro ampia possibilità di sviluppo. Oltre alle applicazioni per ultraleggeri, dove contribuiscono ad una notevole riduzione del peso, i sistemi a comando elettronico permettono controllo e modifica del passo con precisioni superiori in confronto ad un normale sistema idraulico, concedendo una semplificazione generale del mozzo.

L'obiettivo di questo elaborato è dunque quello di studiare e ottimizzare una soluzione di cambio di passo a controllo elettronico per carichi ed efficienza elevati, in particolare da impiegare per la propulsione quadrimotore turboelica del *Lockheed C-130J SuperHercules*¹, che come la maggior parte dei velivoli di questa classe è dotato di un'elica a passo variabile con un circuito di modifica del passo idraulico. Il processo di progettazione e ottimizzazione che tratteremo ha preso piede a partire da un modello di riferimento inizialmente fornito, frutto dello studio di massima di un sistema di cambio di passo motorizzato. Essendo il risultato di soluzioni ancora allo stato pressoché concettuale è stato necessario sottoporlo ad un'analisi critica che ne potesse evidenziare problematiche e mancanze, ma anche gli aspetti positivi: il risultato sarà quindi un'evoluzione del modello iniziale. Considerando poi l'impiego del velivolo in questione il prototipo sviluppato dovrà essere adatto a sostenere i carichi di competenza e a rispondere a livelli di affidabilità elevati. Per questo motivo oltre a progettare il sistema di cambio del passo, sulla base dei concetti di ridondanza, sarà necessario lo sviluppo di una soluzione di *messa in bandiera* automatica delle pale, ovvero il riposizionamento di queste, in caso di avaria al motore, in configurazione neutra (parallele al flusso d'aria) facilitando il volo *asimmetrico* e riducendo la resistenza dell'elica non operativa.

Sia chiaro infine che l'elaborato esula dal simulare o verificare le soluzioni proposte dal punto di vista resistenziale: si vuole invece proporre una soluzione preliminare, ma con sufficiente dettaglio, per un sistema di cambio di passo elettromeccanico basato sull'integrazione tra rotismi e motori elettrici con sistema di messa in bandiera automatica.

¹Il *Lockheed C-130J Superhercules* è un velivolo da trasporto militare spinto da quattro motori Rolls-Royce AE 2100 da 4.700 Hp ciascuno.

Capitolo 1

Introduzione all'elica di riferimento

1.1 Eliche a passo variabile

Considerando che l'oggetto del presente elaborato è la progettazione di un sistema di controllo del passo per un'elica a passo variabile ad uso aeronautico è necessario introdurre alcuni concetti teorici alla base del funzionamento di questo dispositivo. In generale "l'*elica* (o elica propulsiva o propulsore ad elica) è un organo intermediario in grado di trasformare la potenza meccanica di un albero rotante in variazione della quantità di moto di un fluido, allo scopo di generare una propulsione secondo il principio di azione e reazione" [1], dove per applicazioni aeronautiche il fluido considerato è l'aria. Le eliche sono costituite da un certo numero di elementi fluidodinamici detti *pale* calettati su di un mozzo collegato all'albero motore: nella rotazione le pale imprimono al fluido un moto elicoidale, ovvero la combinazione di un moto rettilineo, lungo l'asse e di un moto di rotazione.

Le eliche sono caratterizzate da alcuni parametri fondamentali che ne definiscono le caratteristiche geometriche e ne quantificano il comportamento e le prestazioni. Il *passo*, ad esempio, è uno tra i parametri più importanti per un'elica e sarà fondamento per la nostra trattazione. Ricordando che un'elica, durante il funzionamento, è in moto elicoidale rispetto al fluido lavorato, il passo *geometrico* è una grandezza fisica che esprime la distanza rettilinea percorsa dall'elica in una rotazione. Il passo geometrico differisce pertanto in definizione con il passo *reale* che tiene conto della cedevolezza del fluido e quindi dell'avanzamento effettivo. Le eliche, sia in ambito nautico che aeronautico, si suddividono in due importanti categorie in funzione di come viene gestito o scelto il passo:

- *Eliche a passo fisso*: sono sistemi di propulsione ad elica per cui il passo è un parametro fissato in fase di progettazione come compromesso per ottimizzare il funzionamento e le prestazioni dell’elica.
- *Eliche a passo variabile*: sono sistemi di propulsione ad elica per cui il passo è un parametro che può essere variato in funzione delle condizioni di funzionamento.

Dalle definizioni risulta evidente che le eliche a passo fisso devono scontare un compromesso tra le varie modalità di funzionamento in quanto il parametro del passo è fissato; viceversa le eliche a passo variabile possono essere ottimizzate per la condizione di lavoro che si sta affrontando, a patto di dover costruire e gestire un sistema di propulsione più complesso e costoso. Per i vantaggi discussi noi tratteremo sistemi a passo variabile, in particolare svilupperemo un sistema che permetta la gestione e il cambio del passo di un elica per Lockheed C-130J *SuperHercules*.

1.2 Sistema di cambio di passo obiettivo

Dal punto di vista cinematico la variazione del passo di un’elica corrisponde alla rotazione delle sue pale attorno al loro asse longitudinale [2]: più propriamente per variazione del passo di un’elica si intende l’azione che modifica l’angolo di calettamento delle pale rispetto al mozzo. Dunque un sistema di cambio di passo è un generico complesso meccanico che possa permettere la rotazione controllata di tutte le pale dell’elica in modo sincronizzato, determinando una variazione o modifica del passo.

I sistemi di cambio di passo possono essere realizzati a partire dal più differente meccanismo, purché consenta la rotazione sincronizzata delle pale di un angolo certo. Dal punto di vista pratico, in commercio, i sistemi per la regolazione del passo fanno riferimento a due modelli di base:

- Sistemi a circuito idraulico: sfruttano la pressione dell’olio motore per comandare la variazione del passo.
- Sistemi elettromeccanici a motore elettrico: impiegano uno o più motori a passo per la rotazione delle pale.

I sistemi a circuito idraulico sono di largo impiego nei velivoli da trasporto o commerciali come il Lockheed C-130J *SuperHercules*, in quanto in genere i motori sono predisposti per questo utilizzo: i sistemi con motore elettrico a passo sono invece impiegati nel segmento dei velivoli ultraleggeri, in quanto molto spesso il circuito olio motore non consentirebbe la regolazione del

passo. Fino ad oggi i sistemi a circuito idraulico costituiscono la tecnologia preponderante nel campo dei sistemi di controllo del passo, ma comporta innumerevoli complicazioni dovute alla gestione dell'olio e del meccanismo stesso. I sistemi elettromeccanici consentono d'altra parte una precisione superiore nel controllo della rotazione angolare e un'importante riduzione del peso grazie alla semplificazione dello schema di funzionamento, ma sono inusuali le applicazioni per velivoli di stazza medio-elevata. Sarà dunque nostro interesse valutare l'impiego di un sistema di cambio di passo elettromeccanico a motori a passo per i grandi velivoli come il Lockheed C-130J, in modo da usufruire dei vantaggi dedotti e definire un'alternativa al già collaudato sistema idraulico.

Essendo ancora in una fase preliminare del processo di studio e progettazione è importante definire le specifiche che il sistema di cambio di passo dovrà soddisfare.

Sistema elettromeccanico con motori a passo Come anticipato l'obiettivo di questo elaborato è quello di realizzare una soluzione per il cambio del passo che adotti un sistema elettromeccanico con propulsione elettrica. Il trasferimento di coppia dal motore alla pala, che determinerà il controllo della rotazione di ciascuna di queste, sarà implementato attraverso l'uso di rotismi in presa diretta: un pignone a denti dritti sull'albero motore e una corona, in rapporto d'ingranaggio unitario con il pignone, calettata sull'albero di pala. In particolare sarà considerato l'impiego di un numero di motori elettrici a passo pari al numero delle pale, così da avere propulsioni elettriche dedicate e autonome, in modo da poter controllare la rotazione angolare di ogni singola pala.

Uso di rotismi di sincronizzazione Noto che la propulsione di ogni pala sia in principio indipendente si consideri necessaria l'implementazione di un sistema di sincronizzazione meccanica, così da garantire la variazione di passo contemporanea e della stessa quantità angolare per ogni pala; a partire dal collegamento dentato tra motori e pale, considereremo l'introduzione una corona conica centrale ingranante con dei pignoni calettati sui rispettivi alberi di pala. L'implementazione di un sistema di sincronizzazione è necessaria non solo per poter assicurare il movimento coordinato delle pale, ma anche per garantire un comportamento affidabilistico ottimale in caso di avaria o malfunzionamento di uno dei motori elettrici. Imponendo l'ingranamento collettivo di ogni pala su di un'unica corona centrale, di fatto, ogni motore elettrico contribuisce al sostentamento dell'intero sistema di cambio

di passo, giustificando la ridondanza nel numero di motori elettrici impiegati. In definitiva sovradimensionando i motori elettrici sarà possibile che questi, nel complesso, garantiscano il funzionamento del sistema anche nel caso in cui uno venga meno, in quanto la pala in avaria è vincolata a seguire le altre attraverso la corona centrale.

Messa in bandiera automatica Per completare gli accorgimenti affidabilitistici fino ad ora considerati è necessario che la soluzione che svilupperemo disponga di un sistema di un sistema di *messa in bandiera* automatica o *feathering*. Un sistema di messa in bandiera automatica è un qualsiasi apparato che consenta il riposizionamento delle pale in configurazione di passo neutro a partire da una condizione di passo generica. Nell'impiego di pale a passo variabile è una prerogativa importante ed utile in caso di avaria del motore che sostenta la rotazione dell'elica: in tal caso è necessario riportare l'elica in una configurazione che possa ridurre la resistenza aerodinamica e agevolare le manovre in *volo asimmetrico*.

Come si può notare la componente affidabilitistica gioca un ruolo preponderante nel definire le specifiche del sistema di cambio di passo obiettivo, proprio in conseguenza al fatto che si tratti di un'applicazione per il settore aeronautico.

1.3 Prototipo di un'elica a passo variabile

Dichiarate le macro-specifiche che il nostro sistema deve poter soddisfare, può cominciare lo studio preliminare per redigere le prime soluzioni costruttive. Come in tutti i processi di progettazione è importante e di aiuto iniziare valutando sistemi o prodotti esistenti a livello commerciale o come prototipo. Nel nostro caso, al momento, non esistono in commercio eliche a passo variabile elettromeccaniche per Lockheed C-130J, che di serie impiega un sistema a circuito idraulico, pertanto sarà necessario far riferimento ad un prototipo fornito che trae spunto dallo stesso modello di serie.

Il prototipo che utilizzeremo come riferimento è un modello concettuale, il risultato di uno studio di massima di un sistema elettromeccanico di cambio di passo basato sulla combinazione di rotismi e propulsioni elettriche. Il modello in questione si rifà, in forme ed ingombri, all'elica che di serie viene montata sul *SuperHercules*, ma è talvolta il risultato di un processo di studio volto a dare una forma all'idea di fondo di sviluppare un elica con un sistema di cambio di passo che segue le stesse prerogative che abbiamo discusso in 1.2. Nonostante quindi si possa considerare che tale modello sia

costituito nel rispetto delle specifiche fissate e degli schemi di funzionamento che abbiamo iniziato a considerare, a meno del sistema di *feathering*, rimane ancora un oggetto allo stato embrionale, con diverse criticità dovute alla sua costituzione come *concept* preliminare. In definitiva possiamo ritenere che sia giustificato il suo impiego come base di partenza e che l'analisi e la risoluzione delle problematiche di cui è afflitto costituiranno il processo che darà vita al nostro modello obiettivo di cui sopra.

1.4 Elementi dell'elica

Prima di addentrarci nelle fasi di analisi e progettazione è bene conoscere gli elementi e i principi di funzionamento del prototipo che vogliamo utilizzare come riferimento. In Figura 1.1 è riportata la vista d'assieme del prototipo di

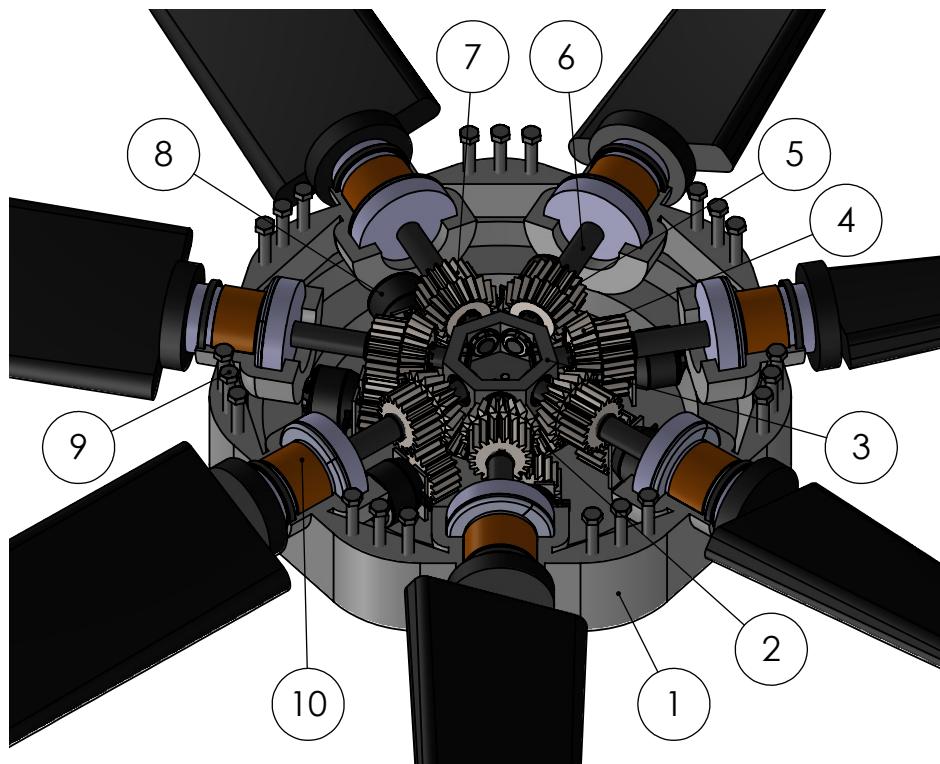


Figura 1.1: Vista d'assieme del prototipo di riferimento

riferimento, in particolare dopo aver rimosso il coperchio del mozzo di modo da permettere la vista dei componenti all'interno del mozzo: i componenti soggetti a bollatura sono i principali che concorrono alla costituzione del sistema di cambio di passo e al funzionamento dell'elica. Per poter chiarire

la trattazione e agevolare la comprensione del presente elaborato, d'ora in avanti, faremo riferimento ai componenti dell'elica attraverso la nomenclatura riportata in Tabella 1.1.

1	Mozzo	2	Corona centrale
3	Supporto alberi	4	Pignone conico
5	Ruota a denti dritti di rinvio	6	Albero di comando
7	Pignone a denti dritti	8	Motore elettrico
9	Viti di chiusura	10	Pala completa

Tabella 1.1: Distinta base semplificata

Come anticipato in 1.3 il prototipo di riferimento è costruito a partire dagli ingombri e forme dell'elica che di serie viene impiegata sul *SuperHercules* e analogamente a questa la struttura dell'elica si sviluppa a partire dal mozzo (1) che funge da basamento e contenitore per l'intero sistema di cambio di passo. In particolare la conformazione del bordo è tale da poter accogliere le radici delle pale, con i rispettivi cuscinetti, e i fori filettati per l'imbullonamento di chiusura dell'elica con il coperchio o cestello superiore. Allo stesso tempo il fondo del mozzo è organizzato in modo da poter accogliere il complesso di rotismi e motori elettrici che compongono il sistema di cambio del passo e per il collegamento con l'albero motore dell'elica: questo prototipo articola il collegamento di trasmissione con una piastra intermedia da saldare sulla faccia esterna del mozzo.

L'operazione di modifica del passo consiste nell'azionare i motori elettrici affinché questi operino una rotazione, attorno all'asse longitudinale, della pala associata attraverso l'ingranamento con una ruota di rinvio (5) solidale con la radice della pala. Per avere un cambio di passo omogeneo e congruente su tutte le pale la rotazione viene sincronizzata attraverso una corona conica centrale (2) che ingranà con i pignoni conici (4) disposti all'estremo di ogni albero di comando (6). Ogni pala² è solidale alla rotazione con il rispettivo albero di comando attraverso la propria radice: gli alberi di comando consentono il controllo delle pale nella rotazione in quanto ospitano il calettamento degli organi di trasmissione. La rotazione di pale e dei rispettivi alberi di comando è coadiuvata da propri sistemi di cuscinetti:

- Le eliche sono collegate al mozzo attraverso la combinazione di un cuscinetto radente o bronzina e di un cuscinetto volvente assiale per le spinte in asse;

²Per *pala completa* si intende il profilo aerodinamico completo di sistema di cuscinetti

- Gli alberi di comando sono solidali alla rotazione con le pale per mezzo di un accoppiamento scanalato ad un'estremità e guidati nel moto con un cuscinetto volvente radiale a sfere: il complesso di cuscinetti degli alberi di comando trova sede nel supporto centrale (3) solidale al mozzo;
- La corona conica centrale poggia su di un cuscinetto volvente a rulli conici accoppiato con una sede ricavata sul fondo del mozzo.

Introdotti i componenti o sistemi del prototipo che si rifanno al modello di serie dell'elica a circuito idraulico o in risposta alle specifiche sopraccitate, è importante ricordare che le pale impiegate nel modello fornito sono una copia del profilo di quelle originali. Rispetto alle Dowty 391 originali, le cui specifiche tecniche, assieme a quelle delle varianti, sono riportate in [3], le pale del prototipo hanno, pur mantenendone il profilo, una radice differente per poter realizzare le sedi dei cuscinetti e l'attacco dell'albero di comando per la modifica del passo.

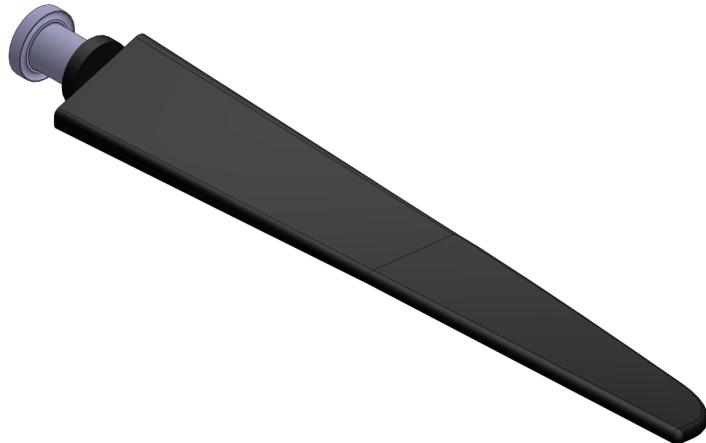


Figura 1.2: Profilo della pala Dowty 391 che di serie viene montata sui Lockheed C-130J

Nel complesso il prototipo illustrato rispetta gli obiettivi tecnici prestabiliti a meno del sistema di messa in bandiera automatica; tuttavia sarà importante studiare le soluzioni con cui queste specifiche sono state implementate nel prototipo e verificarne la fattibilità pratica.

Capitolo 2

Problematiche e aree di intervento

Nel capitolo precedente abbiamo introdotto il prototipo che costituirà la base per la nostra attività di progettazione, finalizzata alla realizzazione di un modello di elica a passo variabile con comando elettromeccanico. In questo e nei successivi capitoli ci occuperemo prima dell’analisi e dell’individuazione delle problematiche o carenze di tale prototipo di riferimento e poi della risoluzione delle stesse, implementando soluzioni opportune: questo processo di evoluzione del prototipo di riferimento, composto da molteplici interventi tra loro integrati, costituirà nell’insieme lo sviluppo di un nuovo prototipo, finalizzato a rispettare le specifiche obiettivo. Possiamo quindi concludere che il prodotto finale dell’attività appena descritta coincide con quello che inizialmente ci eravamo prefissati di ottenere.

2.1 Analisi preliminare

La fase di analisi delle soluzioni realizzative adottate sul prototipo di riferimento è fondamentale per ricercare le aree di intervento, soprattutto se si vuol considerare l’attività di correzione come propedeutica alla costituzione di un modello funzionale. Ritenendo che il prototipo di partenza sia una base per la progettazione del modello obiettivo, è necessario, in primo luogo, considerare come metro di analisi il rispetto delle specifiche tecniche prefissate in 1.2. Oltre a queste importanti prerogative considereremo per l’analisi i seguenti come elementi di valutazione:

- Specifiche prestabilite: il prototipo finale deve rispettare le specifiche tecniche evidenziate in 1.2, ovvero deve avere un sistema di gestione del passo elettromeccanico basato su un complesso di rotismi sincronizzati;

- Ambito dell'applicazione: si ricordi che il sistema che stiamo valutando trova impiego nel settore aeronautico e di conseguenza deve rispettare determinati (elevati) standard qualitativi e affidabilitistici;
- Soluzioni ottimizzate: le soluzioni proposte devono essere frutto di un processo di studio e comparazione finalizzato all'implementazione della migliore realizzabile;
- Processi tecnologici: i componenti dell'intero sistema devono essere valutati dal punto di vista dei processi tecnologici impiegabili per la loro realizzazione;
- Operazioni di montaggio: i meccanismi impiegati devono tenere conto delle modalità di montaggio dei loro componenti, in particolare deve essere possibile e ragionevolmente facilitato.

Oltre ad essere elementi per l'analisi preliminare sarà importante nel seguito considerarli come fondamenti per l'attività di progettazione, di modo che il prodotto finale sia conforme agli stessi principi utilizzati nella valutazione del prototipo di riferimento.

2.2 Aree di intervento

Svoltasi l'attività di analisi del prototipo di riferimento sono stati individuati i seguenti elementi o aree che necessitano di intervento o risoluzione:

- (a) Cestello: Il cestello o mozzo utilizzato nel prototipo di partenza non è impiegabile nella realtà in quanto è puramente realizzato in risposta alla conformazione della radice della pala, senza tenere in considerazione i processi tecnologici necessari per la sua fabbricazione. Deve essere inoltre rivista la conformazione delle sedi dei cuscinetti centrali su cui è accoppiata la ruota conica di sincronizzazione.
- (b) Cuscinetti pale: Il sistema di cuscinetti impiegati non è appropriato all'applicazione studiata e non è adatto e sufficiente ad assolvere le sollecitazioni a cui le pale sono sottoposte.
- (c) Movimento centrale: L'intero movimento centrale deve essere ripensato, in particolare la disposizione dei cuscinetti sulla corona conica centrale, la conformazione della ruota stessa e il montaggio di questi e del supporto degli alberi di comando sul cestello dell'elica.

- (d) Alberi di comando: Deve essere modificato l'attacco degli alberi di comando alla radice delle pale, oltre a ripensare la disposizione delle ruote dentate sugli stessi.
- (e) Attacco all'albero motore: La parte del mozzo che costituisce il collegamento dell'elica con l'albero motore deve essere ridisegnata e, rispetto all'originale, incorporata al cestello.
- (f) Supporto motori elettrici: I supporti dei motori elettrici non possono essere saldati o ricavati di pezzo sul fondo del cestello.
- (g) Lubrificazione e ingassaggio: Introdurre una soluzione per gestire la lubrificazione dei cuscinetti e l'ingassaggio dei ruotismi.
- (h) Carteratura: Introdurre una carteratura dedicata per il contenimento della lubrificazione dei ruotismi.
- (i) Feathering o messa in bandiera: Sviluppare e implementare una soluzione per la messa in bandiera automatica delle pale; questa parte verrà ampiamente trattata nel capitolo dedicato.

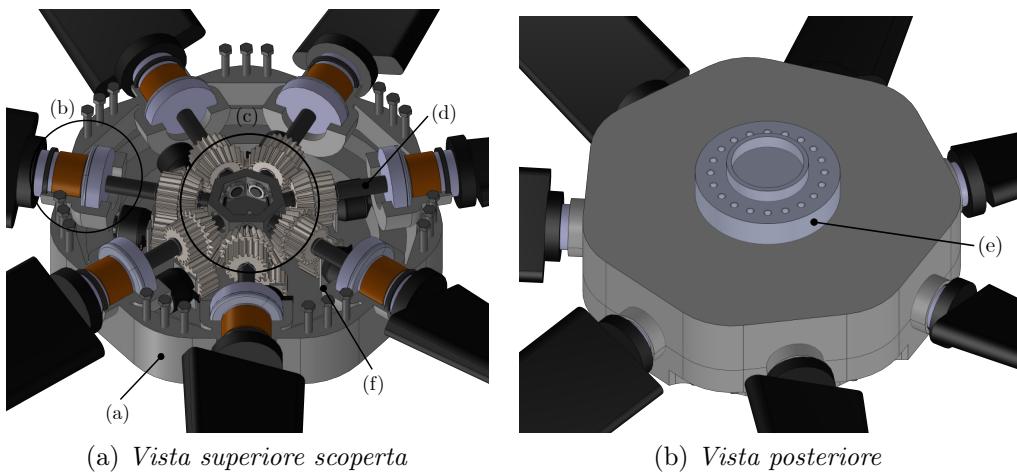


Figura 2.1: Principali aree di intervento del prototipo

Nelle sezioni successive verranno illustrate in modo specifico ed esaustivo tutte le voci fin qui elencate al fine di condurre un'indagine completa che interessi ogni singolo aspetto delle problematiche evidenziate. Una volta dedotta tale analisi è possibile ipotizzare modifiche e/o implementazioni che verranno trattate nei capitoli successivi.

2.3 Cestello

In un'elica il cestello è la struttura portante in quanto è costituito da un blocco unico e rigido che contiene tutti gli elementi del complessivo, dall'attacco delle pale al sistema di cambio di passo. Per il suo impiego come *telaio* il cestello deve essere un componente massiccio e con un determinato livello di rigidezza che possa assolvere la caratteristica di struttura portante per gli altri componenti dell'elica. Le principali soluzioni di fabbricazione per un componente di questa tipologia e conformazione determinano l'impiego di materiali come acciaio o alluminio. Date le considerevoli dimensioni del modello è conveniente scegliere un ciclo produttivo che preveda la fabbricazione per asportazione di truciolo da un getto di fusione, anziché ricavare il pezzo "dal pieno" per asportazione integrale. A seguito di queste considerazioni generali è necessario modificare la geometria del cestello di partenza semplificandola, affinché possano ridursi il numero di operazioni e la quantità di materiale asportato.

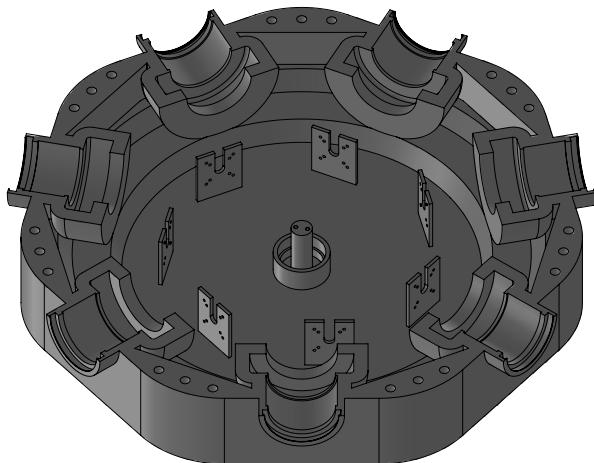
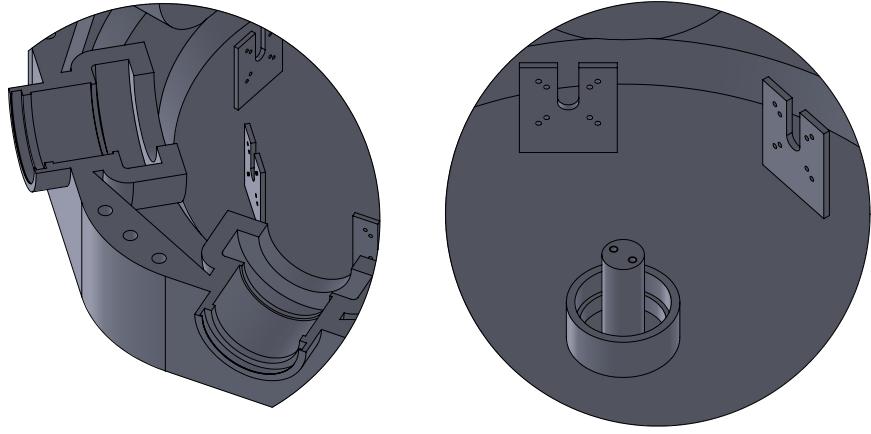


Figura 2.2: Cestello del prototipo di partenza

Fabbricazione La soluzione adoperata nel prototipo di riferimento (Figura 2.2) ha evidenti criticità e difetti progettuali dovuti al mancato rispetto della fattibilità tecnologica del suo ciclo di fabbricazione. L'area che maggiormente concentra problematiche di carattere realizzativo interessa l'intorno delle sedi dell'attacco delle pale, dove la conformazione originale del cestello segue la geometria delle radici senza tenere conto dei reali metodi di produzione. Volendo realizzare un getto di partenza che consenta di ridurre le lavorazioni per asportazione si noti che in questa zona il cestello presenta

degli spigoli vivi interni che non faciliterebbero la costruzione della forma per la fusione. Oltre che a complicare la geometria del modello con dei sottosquadri (vedi Figura 2.3a) si conclude che tale soluzione comporterebbe dei rischi legati alla capacità resistenziale dello stesso, in quanto tali spigoli non hanno scopo funzionale, bensì rappresentano un pericolo di innesco di cricche o danneggiamenti. Nel complesso è molto importante per il mozzo, in qualità di componente con dimensioni maggiori nell'insieme elica, che la geometria venga curata in funzione della sua produzione, semplificando alcune *feature* del modello per ottenere una forma più lineare.



(a) *Sede attacco radici delle pale*

(b) *Supporti motori e sede centrale*

Figura 2.3: Dettagli sull'interno del mozzo

Assemblaggio Valutate le difficoltà costruttive che ne complicavano la fabbricazione è importante rivedere gli apparati necessari ad accogliere i componenti del sistema di passo. Tenendo in considerazione che alcune delle sedi del mozzo verranno trattate in seguito in quanto considerate modifiche di adattamento delle nuove soluzioni per il sistema di cuscinetti delle pale (Sez. 2.4), per il movimento centrale e il sistema di feathering (Sez. 2.5 e 2.9) e per l'attacco all'albero motore (Sez. 2.7) è chiaro fin da subito che il fondo deve essere profondamente rivisto. In particolare in Figura 2.3b sono riportati in dettaglio i supporti per l'installazione dei motori elettrici e le sedi per il movimento centrale:

- L'intera area dedicata alla sede del movimento centrale e del sistema di feathering deve essere modificata in virtù delle modifiche che saranno introdotte con le nuove soluzioni.

- I supporti per i motori elettrici, di cui il modello originale è provvisto, sono realizzati da semplici piastrine saldate sul fondo del cestello: questo tipo di soluzione è sicuramente di semplice realizzazione, ma risulta inadeguata ("grossolana") per il tipo di applicazione, oltre che sconveniente per le operazioni di montaggio non facilitate. Nel seguito dovranno essere sostituiti con una soluzione più flessibile che faciliti il riferimento sul fondo del mozzo e un semplifichi il montaggio, sia dei supporti che dei motori elettrici su di questi.

L'evoluzione del mozzo dovrà in definitiva combinare in modo intelligente sia gli aspetti legati alla sua fabbricazione sia le specifiche necessarie a garantire un corretto montaggio del sistema che deve contenere per poter essere considerata corretta.

2.4 Sistema di cuscinetti per le pale

In un elica a passo variabile il sistema di cuscinetti all'attacco pala è il complesso di collegamento tra il profilo aerodinamico della pala e il mozzo. Un sistema di cuscinetti di questo tipo deve consentire la rotazione in asse della pala per variare l'angolo di calettamento o meglio il passo e provvedere ai carichi combinati trasmessi dal sistema di cambio di passo alla pala e dal fluido esterno a quest'ultima. Il modello originale (vedi Figura 2.4) prevede l'impiego di un cuscinetto radente (1) alla radice della pala e due cuscinetti volventi a sfere, uno assiale alla radice (2) e uno radiale (3) all'estremità dell'albero di comando.

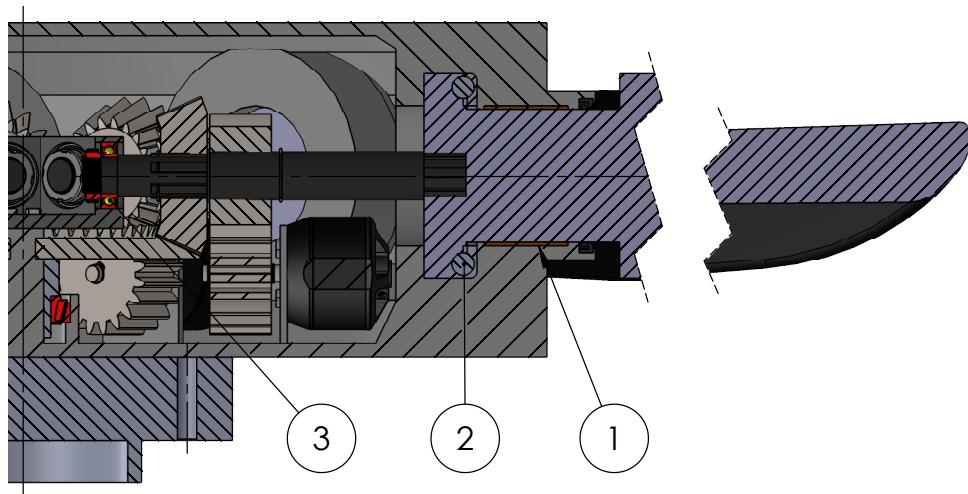


Figura 2.4: Cestello del prototipo di partenza

Scelta dei cuscinetti Nonostante questo tipo di arrangiamento sia stato scelto per poter assolvere ai carichi assiali e radiali (*combinati*) a cui la pala è sottoposta sono discutibili le sue caratteristiche in termini di resistenza ed efficienza in confronto ad altre soluzioni dedicate. D'altra parte l'impiego di un cuscinetto radente o bronzina non è da scartare per le rotazioni lente e di ampiezze angolari contenute che caratterizzano la gestione del passo.

Arrangiamento e montaggio Trascurando la scelta dei cuscinetti, che può essere discussa sulla base del dimensionamento e delle verifiche resistentziali, anche l'implementazione e il montaggio di questi presenta importanti criticità. Considerando che la soluzione del prototipo sia corretta la disposizione dei cuscinetti ha problemi con gli accoppiamenti utilizzati e nella gestione del gioco, in particolar modo con il cuscinetto assiale. Di fatto, per come è disposto e per come è realizzata la sua sede, nella rotazione la radice può essere sottoposta a strisciamento sia sulla faccia interna interno che sulla superficie radiale esterna se non vengono prese le giuste cautele:

- Ammettendo che per la forza centrifuga a cui le pale sono sottoposte la faccia interna non sia a contatto con la sede del mozzo per la presenza del gioco, se questa venisse meno le superfici a contatto potrebbero creare resistenza fino ad impuntarsi. L'interferenza delle facce può venir meno modificando la sede sul mozzo o lo spallamento offerto dall'albero di comando.
- Allo stesso modo è necessario scegliere con accortezza il diametro di accoppiamento tra la radice della pala e la sede del mozzo: è necessario che la sede sia modificata così da garantire del gioco nominale tra albero e foro.

D'altro canto questo arrangiamento non consente il recupero dei giochi se non per il cuscinetto radiale a sfere sul supporto centrale: il sistema di cuscinetti alla radice non ha scorrimento assiale se non dovuto al gioco di montaggio tra i dischi del cuscinetto assiale a causa della sopracitata geometria delle sedi. Nella sezione 3.2 vedremo che alcune di queste problematiche verranno meno per l'impiego di soluzioni completamente differenti.

2.5 Movimento centrale

Con la denominazione di movimento centrale ci si riferisce al complesso di componenti che prendono il posto al centro del fondo del mozzo e operano la sincronizzazione delle pale oltre che la loro messa in bandiera automatica.

I principali componenti che costituiscono questo modulo sono:

- (1) Sistema di cuscinetti per la corona conica di sincronizzazione;
- (2) Corona conica di sincronizzazione;
- (3) Supporto centrale;
- (4) Albero centrale (porzione del cestello che si prolunga dal mozzo)
- (5) Sistema di *feathering*: non verrà trattato tra le problematiche in quanto non è stato implementato nel prototipo di riferimento.

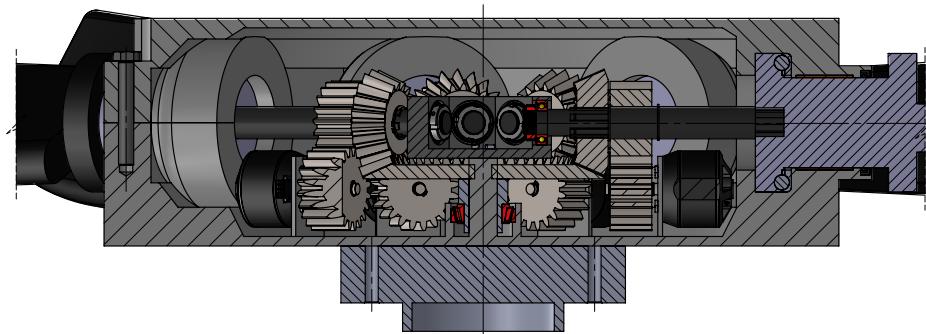


Figura 2.5: Sezione completa dell'elica originale

L'intero modulo è strutturato a partire dal riferimento offerto dall'albero centrale: essendo un'estensione diretta del fondo del mozzo funge da sede per l'anello esterno del cuscinetto conico e da riferimento per il supporto centrale. Il cuscinetto adoperato provvede alla rotazione relativa della corona conica centrale e assolve i carichi combinati a cui è sottoposta attraverso un prolungamento cilindrico di cui questa è dotata. Il supporto centrale poggia sulla faccia superiore dell'albero di mozzo ed è fissato a questo attraverso un collegamento filettato a vite mordente.

Sistema di cuscinetti centrale La soluzione a corona singola adottata dal prototipo originale presenta notevoli criticità concettuali e realizzative che non potranno essere trascurate nella progettazione del modello obiettivo. Dal punto di vista teorico i cuscinetti a rulli conici, come quello utilizzato, sono soluzioni dedicate a sopportare carichi combinati e devono essere sempre montati in coppia secondo schemi a X o ad O: montaggi a corona singola sono normalmente sconsigliati in quanto non consentono di equilibrare le spinte. Detto questo anche l'implementazione del sistema deve essere rivisto in quanto la disposizione attuale vanifica i vantaggi in termini di attrito offerti dal cuscinetto a causa dello strisciamento presente tra albero e corona conica.

Supporto centrale Il supporto centrale ricopre il compito di raccogliere i cuscinetti degli alberi di comando e di conseguenza deve garantire un certo grado di precisione in termini di allineamento. La soluzione adottata nel prototipo originale è al quanto approssimativa sotto questo punto di vista, dato che la superficie di spallamento è ridotta e che le viti di bloccaggio costituiscono anche gli organi di riferimento. Nel seguito sarà importante adottare una nuova soluzione che provveda al riferimento del supporto rispetto al mozzo attraverso uno strumento disaccoppiato da quello di bloccaggio, in quanto il gioco nominale presente tra vite e sede filettata determinerebbe piazzamenti imprecisi.

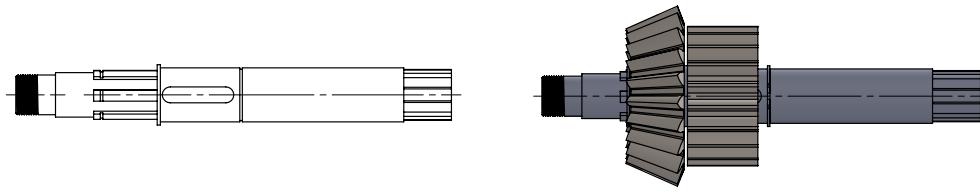
Detto questo, nel complesso, l'architettura (Figura 2.5) del modulo centrale sarà ripreso anche nel prototipo finale, fino ad implementarvi all'interno il dispositivo che realizza la mesa in bandiera delle pale.

2.6 Alberi di comando

L'albero di comando è l'organo che guida la pala nella rotazione di cambio di passo e nella sincronizzazione. Ogni albero di comando è caratterizzato da diversi calettamenti funzionali:

- Corona a denti dritti Calettata con linguetta consente di trasferire con rapporto di ingranaggio unitario la coppia motrice dal motore elettrico all'albero.
- Radice pala Ogni albero di comando è solidale alla rotazione con la radice della pala alla quale è assegnato attraverso un tratto scanalato per consentirne la guida nella rotazione. Il collegamento assiale è unilaterale per la sola presenza dello spallamento sull'albero.
- Pignone conico di sincronizzazione Ogni pignone conico è calettato all'estremità scanalata opposta rispetto a quella delle pale: ingranando con la corona centrale sincronizza la rotazione della pala con quella delle altre

Ogni calettamento viene riferito assialmente attraverso soluzioni combinate di spallamenti e anelli elastici seeger. La soluzione originale prevede uno spallamento centrale a separazione della ruota a denti dritti da quella conica di sincronizzazione: gli estremi a sezione inferiore permettono il corretto montaggio delle ruote. Tuttavia questo arrangemento non consente di avere solidità assiale tra albero di comando e pala per la presenza del solo spallamento alla radice che costituisce un vincolo unilaterale.



(a) *Vista frontale dell'albero*

(b) *Albero di comando completo di ruote*

Figura 2.6: Albero di comando originale

Detto questo, come si nota in Figura 2.4, il cuscinetto radiale a sfere montato sull'estremità sinistra³ con ghiera di sicurezza non ha riferimenti in senso assiale sulla sede del supporto centrale, permettendo in via teorica la libera traslazione dell'albero verso il centro dell'elica (le traslazioni centrifughe sono impeditate dallo spallamento sulla radice dell'elica). Questo movimento è tuttavia limitato dall'accoppiamento conico del pignone con la corona centrale e dalla spinta centrifuga di rotazione dell'elica che lo porta a battuta sulla radice: rimane comunque un gioco dovuto all'ingranamento conico che potrebbe danneggiare i denti in presa nel caso di una traslazione centripeta inaspettata. Nel seguito sarà importante impedire questa libertà di movimento, rendendo l'albero di comando del tutto solidale con la propria pala.

2.7 Attacco all'albero motore

Per attacco all'albero motore si intende la parte posteriore del mozzo adibita al collegamento con l'albero motore dell'elica per la trasmissione di potenza. Come per le principali applicazioni aeronautiche la trasmissione viene realizzata da un collegamento bullonato con viti mordenti, dove la parte filettata in presa è sul mozzo. Nel modello originale la parte dedicata all'attacco con l'albero motore è costituita da una piastra cilindrica da unire al fondo posteriore del mozzo con un cordone di saldatura. Questa soluzione in due pezzi non è congegnale all'applicazione che stiamo trattando e sarebbe preferibile integrare l'intero attacco nella struttura del mozzo, riducendo il numero di componenti.

³I riferimenti di posizione sono relativi all'immagine

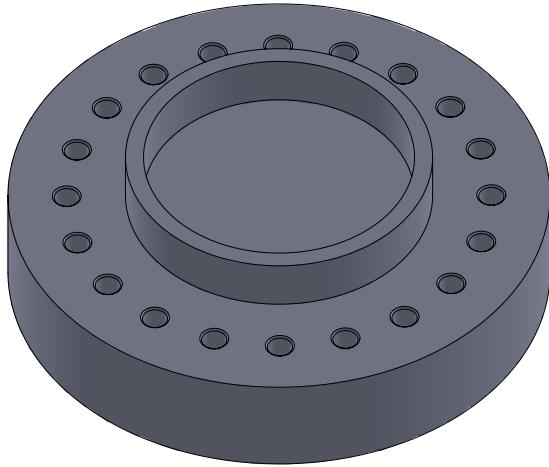


Figura 2.7: Cestello del prototipo di partenza

2.8 Lubrificazione, ingrassaggio e carteratura

Il complesso di rotismi e cuscinetti introdotti con il sistema di cambio del passo ha differenti necessità di lubrificazione e ingrassaggio che non devono essere trascurate per non inficiare sulla loro affidabilità. Il modello originale, essendo frutto di uno studio di massima, non presenta alcun tipo di accorgimento di questo tipo, presupponendo che per i regimi rotazionali previsti non siano necessari provvedimenti. Al fine di mantenere il meccanismo di cambio di passo in sicurezza ed efficienza non sarà possibile tollerare l'assenza di soluzioni dedicate che possano migliorare il funzionamento e limitare la possibilità di guasti o malfunzionamenti. Per questo motivo sarà di ulteriore supporto considerare l'impiego di coperture e *carter* per poter isolare e proteggere cuscinetti e ingranaggi da corpi estranei che potrebbero interferire con il normale funzionamento.

2.9 Feathering

L'ambito con cui ci stiamo interfacciando con la nostra applicazione, quello aeronautico, richiede elevati standard qualitativi e affidabilistici per la salvaguardia degli utenti del velivolo in primis e per l'elevato costo di questo e del danno che potrebbe arrecare. A tal ragione fin dal principio della disamina del prototipo (vedi Sez. 2.1) ci siamo prefissati l'obiettivo di introdurre soluzioni che potessero attivamente contribuire al miglioramento dell'affidabilità del sistema e della sua sicurezza.

La manovra di cambio di passo, come è già stato discusso, consente di migliorare le prestazioni e l'efficienza dell'elica, adattando la configurazione di volo alla specifica condizione che il velivolo deve affrontare (decollo, crociera o atterraggio). In caso di avaria può tuttavia determinare un fattore di pericolo, dato che, se fuori controllo (angolo di calettamento scorretto e bloccato), può seriamente compromettere il comando e le manovre del pilota. Indipendentemente dal tipo di malfunzionamento, sia che interessi l'elettronica di gestione del cambio di passo che il motore di propulsione, deve essere possibile ripristinare l'assetto neutro dell'elica per facilitare le manovre di messa in sicurezza. Con *messa in bandiera automatica* o *feathering* in lingua inglese si intende la tecnica di riposizionamento automatico delle pale dell'elica da una configurazione di passo qualsiasi a quella neutra per facilitare il controllo del mezzo in caso di emergenza. Questa modalità di funzionamento emergenziale è da tempo comune in tutte le applicazioni che coinvolgono l'impiego di un'elica a passo variabile per il supporto che può dare nella gestione delle avarie ed è pertanto importante che sia implementata nel prototipo che stiamo sviluppando. Come vedremo ampiamente nel capitolo dedicato esistono vari sistemi che possono consentire l'implementazione di tale funzione, tuttavia la sua introduzione è stata valutata solo a sistema di cambio del passo ultimato, così che possa che i sistemi possano nell'insieme integrarsi e combinarsi.

Capitolo 3

Soluzioni e loro implementazione

In questo capitolo saranno presentate le soluzioni sviluppate in risposta alle aree di intervento evidenziate in precedenza e la loro implementazione all'interno del prototipo originale. Di fatto, come già anticipato, il modello finale obiettivo è stato costruito come l'evoluzione di quello di riferimento, ovvero come miglioramento della base offerta da chi ha già condotto in precedenza lo studio di massima del sistema. L'esposizione delle soluzioni ripercorre l'ordine con cui le problematiche sono state studiate nel Capitolo 2, che è anche l'ordine con cui è stato realmente condotto il progetto, e verranno articolate su tre temi:

1. Presentazione della soluzione come risposta agli spunti operativi sollevati nello studio dell'area o del modulo trattato;
2. Implementazione della soluzione nel prototipo di riferimento;
3. Integrazione della soluzione con gli interventi sulle altre aree;

3.1 Cestello

Il nuovo modello di mozzo è il risultato di un importante processo di semplificazione della geometria e riorganizzazione delle features in risposta al contemporaneo sviluppo degli altri componenti e/o moduli che costituiscono il sistema di cambio di passo.

Cordolo perimetrale L'area che ha concentrato il maggior impegno nell'intervento è quella del cordolo perimetrale, più in particolare nella zona prossima alle sedi del sistema di cuscinetti delle pale: questa presentava sul bordo spigoli vivi interni e sottosquadri non funzionali che complicavano la

forma di fusione del pezzo fino a renderla impossibile. Adottare un cordolo perimetrale con una conformazione semplificata come quella di Figura 3.1 (offset di quella del perimetro esterno) implica però un bordo più massiccio e pesante. L'effetto dovuto al maggior impiego di materiale può tuttavia essere contenuto introducendo degli scavi di alleggerimento tra una sede e l'altra del sistema di cuscinetti per le pale. La combinazione di questi due accorgimenti permette quindi di facilitare la creazione della forma di fusione e il processo di fabbricazione, incrementando la rigidità nell'intorno dell'attacco delle pale senza incrementare la quantità di materiale impiegato.

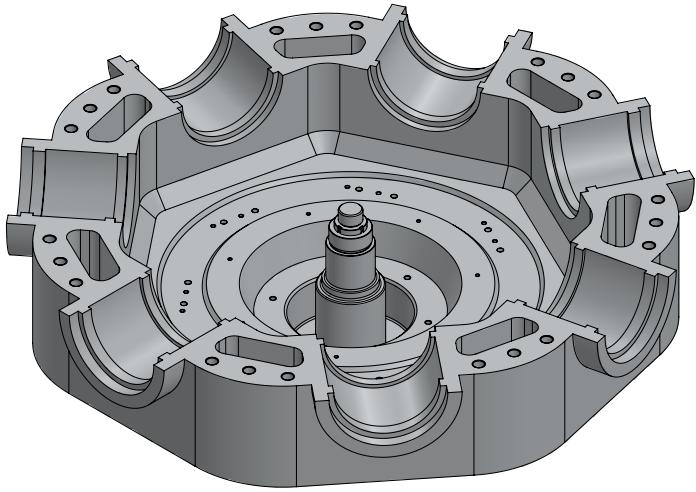


Figura 3.1: Nuovo modello di mozzo

Il risultato è in sostanza un cestello dal cordone più ampio che permette maggior superficie di chiusura con il coperchio dell'elica e maggior spazio per la realizzazione delle sedi dei cuscinetti di attacco e dei fori di chiusura. In particolare le cave di tali sedi verranno dimensionate e conformate in seguito all'implementazione del sistema di cuscinetti (vedi 3.2).

Supporto dei motori Un'altra importante incongruenza da cui il mozzo originale è afflitto si manifesta nella soluzione dei supporti per i motori. La loro integrazione di pezzo sul fondo del mozzo rappresenta una notevole complicazione in termini di fabbricazione e montaggio per qualunque strategia si scelga:

- (a) Se si sceglie di realizzarle di pezzo con il cestello durante la fusione diventa particolarmente complesso poter manipolare il pezzo per effettuare le lavorazioni necessarie ad accogliere il gruppo motore.

- (b) Se si sceglie di realizzare a parte le piastre di supporto da lamiera per poi integrarle sul fondo con un cordone di saldatura è difficile garantire il corretto riferimento di queste sul fondo, con il rischio di compromettere poi l'ingranaggio tra il pignone motore e l'omologo sull'albero di comando.

Il nuovo modello di mozzo è stato studiato per prevedere l'introduzione di una staffa di supporto da riferire e fissare sul fondo del mozzo rispettivamente attraverso un collegamento spinato ed un collegamento bullonato. Questa soluzione consente dunque integrare il vantaggio delle due precedenti, ovvero di garantire un posizionamento preciso sul fondo (a) e la possibilità di lavorare facilmente il supporto (b) per adattarlo all'interfaccia di collegamento dei motori elettrici.

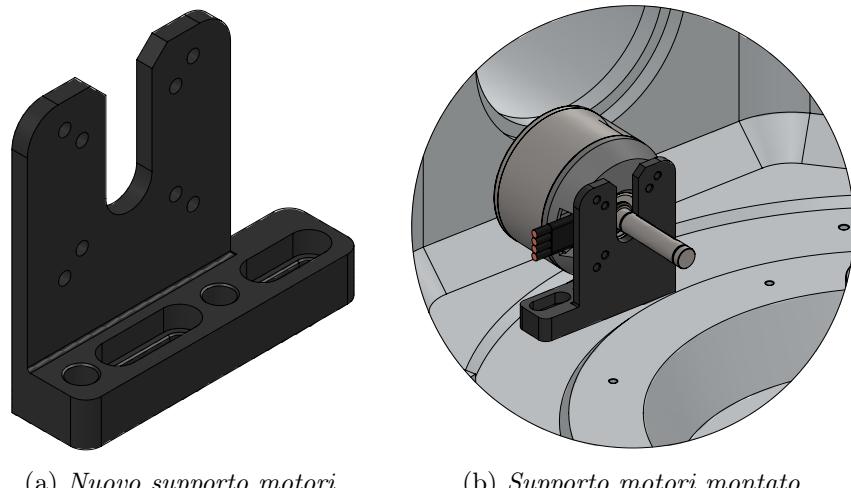


Figura 3.2: Montaggio del supporto motori sul mozzo

Feathering Oltre a quelle già presentate, come si intuisce dalle immagini del modello finale del mozzo, verranno considerate altre importanti modifiche, ma che tratteremo nel momento in cui verranno discusse altre importanti implementazioni (e.g. movimento centrale). Talvolta è importante specificare che nell'introdurre il sistema di *feathering* valuteremo differenti soluzioni alternative che implicano differenti arrangiamenti del fondo del mozzo: queste sono identiche nelle loro features principali, ma si differenziano per l'arrangiamento della zona centrale del mozzo. La soluzione di mozzo, e di conseguenza di elica, che discuteremo da qui in seguito sarà quella rappresentata in Figura 3.1, o meglio quella che chiameremo **soluzione di feathering D** (vedi Capitolo 4).

Ciclo di fabbricazione Nel complesso possiamo concludere che l'introduzione del nuovo modello di mozzo consenta di realizzare il pezzo con un ciclo di lavorazione più snello e lineare. A grandi linee una soluzione di fabbricazione può essere così riassunta:

- i Realizzazione del grezzo di partenza mediante fusione⁴;
- ii Lavorazioni di asportazioni di truciolo: lavorazione delle superfici funzionali (e.g. sedi cuscinetti, albero centrale) grezze mediante tornitura e fresatura;
- iii Lavorazioni di asportazione di truciolo: realizzazione di tutte le lavorazioni ausiliarie di foratura, maschiatura, rettifica ecc.

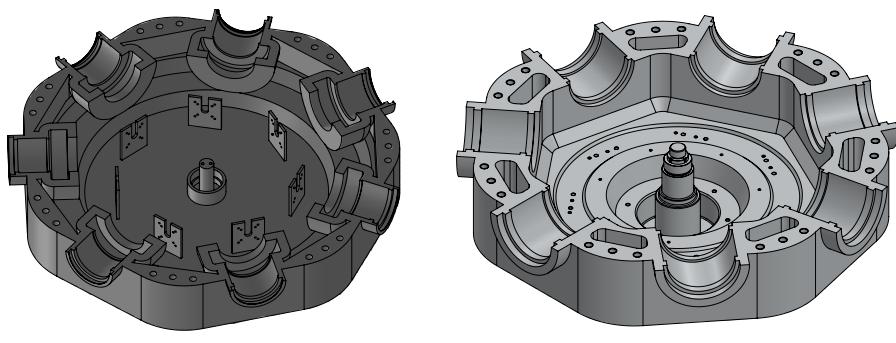


Figura 3.3: Confronto tra le versioni del mozzo

3.2 Sistema di cuscinetti per le pale

L'arrangiamento originale dei cuscinetti per la radice delle pale rappresentava una delle maggiori criticità del prototipo originale, sia nella scelta di questi che nella loro disposizione. Nel discutere la miglior soluzione per il sistema faremo riferimento ai dati e alle linee guida raccolte nel catalogo SKF [4].

⁴Il materiale è supposto essere trattabile per fonderia (alluminio o acciaio): ulteriori studi e verifiche sulla costruzione potranno fornire più elementi per definire la strategia corretta

3.2.1 Scelta dei cuscinetti

La scelta dei cuscinetti da impiegare è il primo passo per sviluppare un sistema in grado di rispondere alle nostre prerogative. Il modello originale prevedeva l'utilizzo combinato di un cuscinetto assiale a sfere e di una bronzina per la radice della pala e un cuscinetto radiale a sfere per l'estremità interna dell'albero di comando ad essa collegato. Nel trattare tale area di intervento (2.4) è stata sottintesa la necessità di adottare soluzioni specifiche e più preformanti in termini di resistenza all'attrito. Pertanto la realizzazione del nuovo sistema di cuscinetti per le pale verterà sulla gamma di cuscinetti a corpi volventi anziché adottare soluzioni radenti.

Per poter scegliere il cuscinetto più adatto alle condizioni operative che caratterizzano la nostra applicazione faremo riferimento ai principali fattori di influenza secondo⁵ [5, p. I-92]:

- Entità del carico: L'entità del carico sollecitante influenza la scelta del corpo volvente impiegato e la struttura del cuscinetto. A parità di dimensioni i cuscinetti a rulli possono sopportare carichi più pesanti rispetto a quelli a sfere; analogamente per i cuscinetti a pieno riempimento rispetto ai corrispondenti muniti di gabbia. Per poter valutare il tipo di cuscinetto sulla base di una stima di carico sarà d'aiuto riferirci alla sezione *Idoneità dei cuscinetti volventi per applicazioni industriali* di [4, p. 72].
- Direzione del carico: La valutazione della direzione conclude la disamina sul carico; l'idoneità di un cuscinetto sottoposto ad un generico carico combinato, ovvero con componenti radiale e assiale, si valuta in funzione dell'*angolo di contatto* α : quanto più grande è l'angolo di contatto tanto maggiore è la capacità del cuscinetto di sostenere carichi assiali. La scelta in funzione del carico, sia per entità che per direzione, è riassunta dal diagramma in Figura3.4.
- Allineamento delle sedi: Le sedi dei cuscinetti possono presentare errori di allineamento sensibili che richiedono soluzioni adeguate per poterli compensare; in base al tipo di cuscinetto la compensazione avviene con tecniche differenti:
 - I cuscinetti orientabili possono compensare il disallineamento grazie alla struttura del cuscinetto stesso;

⁵Sono anche i principali fattori che SKF considera nel catalogo [4] che adottiamo come riferimento.

- I cuscinetti di allineamento sopportano disallineamenti statici iniziali;
- I cuscinetti rigidi consentono di sopportare disallineamenti entro i limiti del loro gioco interno: eventuali eccessi determinano la riduzione della durata del cuscinetto.

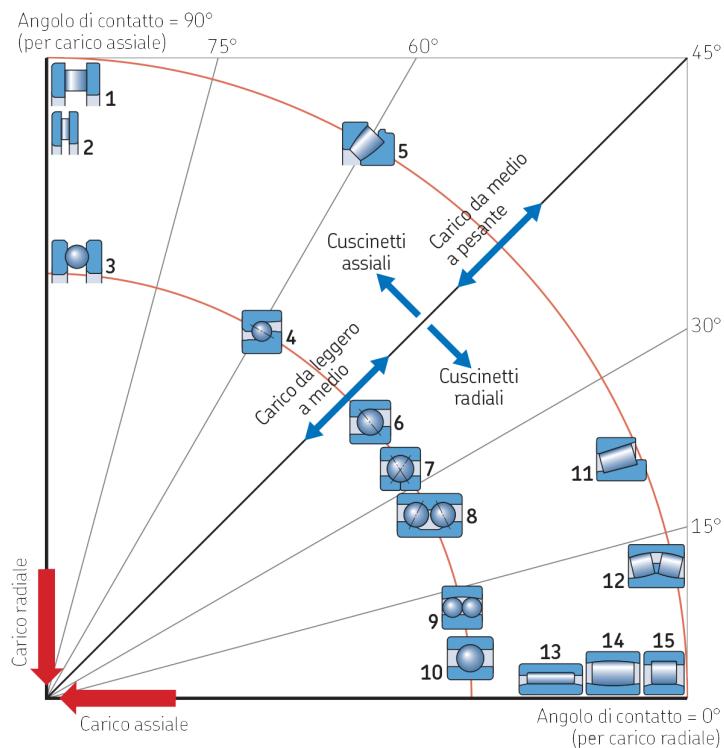


Figura 3.4: Diagramma angolo di contatto SKF

- Velocità e temperature: La velocità di esercizio dei cuscinetti ha importanti ricadute sulla temperatura per il calore di attrito, limitando i regimi rotazionali.
- Lubrificazione: La lubrificazione dei cuscinetti è fondamentale, se adeguata, per operare in modo affidabile, riducendo l'attrito, evitando l'usura e proteggendo le superfici. In particolare la scelta del lubrificante e dei sistemi di lubrificazione saranno argomenti della Sezione 3.7.

Chiariti gli elementi che verranno considerati nella scelta dei cuscinetti, saranno due le configurazioni da studiare per un sistema nel complesso unico: l'attacco delle pale e l'estremità dell'albero di comando.

Soluzione attacco pale Senza entrare nello specifico dell’entità e direzione delle azioni gravanti sulle pale si può generalmente concludere che i cuscinetti che dovremo installare saranno sottoposti ad un carico combinato considerevole. Detto questo possiamo ragionevolmente considerare la condizione sollecitante come equivalente ad un carico da medio a pesante con un angolo di contatto prossimo ai 30° : asservendoci del diagramma in Figura 3.4 i cuscinetti a rulli conici risultano essere i più adatti alle necessità della nostra applicazione. Tuttavia i cuscinetti che sopportiscono a carichi combinati (obliqui a sfere o a rulli conici) vanno sempre adoperati in coppia per compensare le azioni a cui sono sottoposti e alle quali rispondono, in particolare secondo disposizioni di contrasto: ad O oppure ad X. Tenendo conto che adotteremo una disposizione a contrasto ravvicinata è possibile verificare l’idoneità della nostra scelta alle condizioni sollecitanti consultando le proprietà relative ai *cuscinetti obliqui appaiati ad una corona di tipo A* da [4, pp. 72–73]. Da [4] si riscontra inoltre che tale sistema a corone di rulli conici risponde alle esigenze di rigidezza richieste, oltre ad essere adatto alle basse velocità con attrito ridotto: le uniche pecche riguardano le medie performance nel sopportare carichi da momento ribaltante.

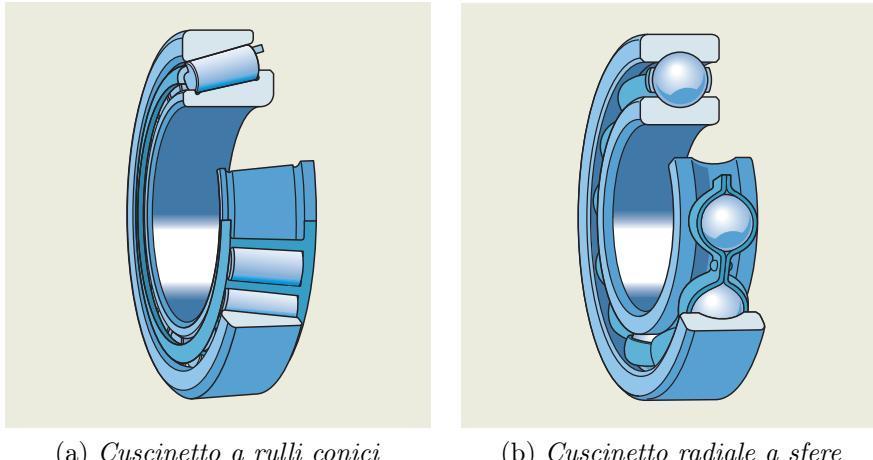


Figura 3.5: Schema dei cuscinetti impiegati

Soluzione albero di comando Nell’esaminare la soluzione per la radice delle pale abbiamo imposto delle condizioni di carico combinato caratterizzate da una componente assiale prevalente. Questo ci consente di poter considerare che le azioni assiali dell’intero sistema di cuscinetti siano per lo più a carico dei due a rulli conici in ambedue⁶ le direzioni e quindi di valutare

⁶Vedi proprietà nella tabella di idoneità in [4, pp. 72–73]

la condizione sollecitante per l'estremità dell'albero equivalente ad un carico da leggero a medio prevalentemente radiale: con l'ausilio del diagramma in Figura 3.4 si ricava come il cuscinetto radiale a sfere sia il più idoneo. Come vedremo in seguito oltre ad un ridotto coefficiente di attrito è caratterizzato da un ottimale trattenimento del grasso lubrificante grazie al sistema di tenuta integrato.

3.2.2 Disposizione dei cuscinetti

I cuscinetti sono dispositivi che supportano e vincolano l'albero che asserviscono in senso assiale e radiale rispetto agli alloggiamenti. Normalmente si fanno necessari due sistemi di supporto, di uno o più cuscinetti, per posizionare l'albero:

- Lato di vincolo (cerniera): Il supporto nella posizione di vincolo realizza il vincolo assiale dell'albero rispetto all'alloggiamento. Consultando [4, p. 70] si verifica l'idoneità dei cuscinetti a rulli conici ad una corona appaiati per il ruolo di posizione di vincolo.
- Lato libero (carrello): Il supporto nella posizione libera consente gli spostamenti assiali dovuti a dilatazioni termiche, regolazioni dei giochi e recupero delle tolleranze. La condizione di lato libero può essere realizzata utilizzando un tipo di cuscinetto che consenta uno spostamento assiale al suo interno oppure utilizzare un accoppiamento libero (in senso assiale) tra l'anello del cuscinetto e la sua sede. Preferendo la soluzione a spostamento assiale sulla sede il catalogo [4] convalida entrambi i cuscinetti scelti come idonei a ricoprire il ruolo di vincolo libero: dato che il ruolo di vincolo è già stato posto non ci resta che considerare il cuscinetto radiale a sfere come lato libero.

Una volta scelti i cuscinetti e la loro configurazione all'interno del sistema la loro disposizione e l'arrangiamento delle sedi deve assecondarne le esigenze. La coppia di cuscinetti a rulli conici appaiati dovrà essere assialmente vincolata con la sede per il ruolo di lato di vincolo; nella soluzione in Figura 3.6b la cuffia sulla radice della pala che realizza lo spallamento deve essere serrata per completare il vincolamento assiale senza regolazioni di gioco in quanto il recupero dello spostamento assiale è realizzato sull'altro lato dell'albero. Di conseguenza l'anello esterno del cuscinetto radiale in lato libero non è vincolato assialmente (vedi Figura 3.6a) sulla sede realizzata sul supporto centrale, permettendo così eventuali spostamenti dovuti a dilatazioni termiche. L'anello interno è invece riferito con una ghiera di sicurezza a fissaggio integrato, ovvero dotata di grano di serraggio interno.

Per quanto riguarda invece gli accoppiamenti tra anelli e sedi si consideri la tabella di [4, p. 142]:

- per la radice i carichi di pala sono rotanti con gli anelli interni delle corone a rulli conici e quindi questi verranno montati con gioco, mentre gli anelli esterni con interferenza;
- per il lato di supporto centrale i carichi possono considerarsi stazionari sull’anello interno rotante, pertanto questo verrà montato con interferenza, mentre l’anello esterno con gioco, permettendo lo spostamento assiale rispetto alla sede.

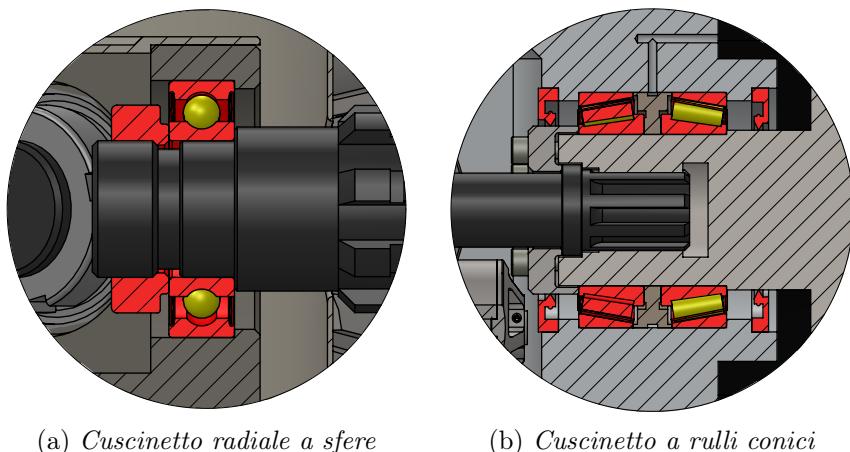


Figura 3.6: Disposizione dei cuscinetti

Si noti che come è stato anticipato nell’introduzione le soluzioni presentate sono ancora da considerarsi come studio di massima del sistema, pertanto tutte le considerazioni fin qui svolte dovranno subire il vaglio del dimensionamento e della verifica con i dati sui carichi. Nel caso la soluzione presentata non sia sufficiente per carichi assiali eccessivi si può considerare di combinare un cuscinetto assiale sulla radice con una coppia di cuscinetti conici: uno sulla radice e uno sul supporto centrale.

3.3 Movimento centrale

La nuova configurazione del complesso che costituisce il movimento centrale sopperisce alle importanti incongruenze riscontrate nel modello originale, integrandosi con il sistema di feathering all’interno del nuovo cestello.

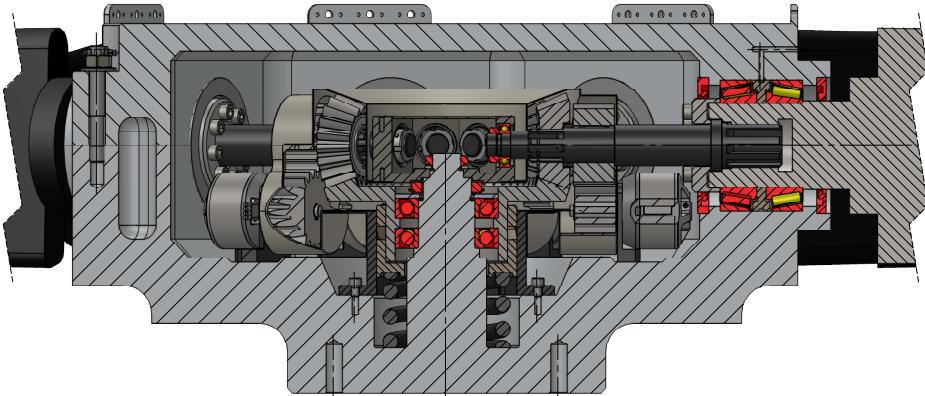


Figura 3.7: Sezione integrale dell'elica

3.3.1 Sistema di cuscinetti centrale

Il principale intervento per la ricostruzione del movimento centrale si è focalizzato sullo sviluppo di un sistema di cuscinetti che permetta di sopportare ai carichi combinati agenti sulla corona centrale di sincronizzazione, a sostituzione dell'incompleta soluzione originale a singolo anello a rulli conici. La scelta dei cuscinetti più idonei ha ancora fondamento sugli elementi d'influenza valutati in Sezione 3.2.1 e sulla consultazione di [4]. Considerando che la corona di sincronizzazione è sottoposta ad un complesso sollecitante⁷ supposto equivalente ad un carico combinato con angolo di contatto prossimo ai 45° si sceglie di impiegare una coppia di cuscinetti obliqui a sfere. Data la ridotta estensione assiale della parte di albero centrale interessata dal sistema, per questo tipo di supporti, il manuale consiglia una disposizione a contrasto (ad O) con registrazione. Secondo questo arrangiamento dei supporti il recupero dello spostamento assiale viene demandato alla corretta registrazione del gioco o del precarico al montaggio: l'albero è completamente vincolato assialmente. Per consentire l'agevole regolazione del gioco al montaggio la chiusura del pacco di cuscinetti si realizza mediante una ghiera di bloccaggio con rosetta di sicurezza coadiuvata da un rondella di pressione.

A riguardo degli accoppiamenti tra anelli e sedi, considerando che l'anello esterno ruota e che il carico è stazionario rispetto a quello interno, la tabella di [4, p. 142] suggerisce l'impiego di un accoppiamento con gioco sull'anello interno e con interferenza su quello esterno. Questa disposizione scelta degli accoppiamenti agevola inoltre le operazioni di montaggio, soprattutto a

⁷Le azioni di carico sono dovute, oltre che all'ingranamento con la serie polare di pignoni, anche dal sistema di *feathering* nel solo caso della soluzione D (rappresentata in Figura 3.7) che agisce direttamente sulla corona.

seguito dell'integrazione del sistema di *feathering* di tipo D: l'introduzione del complesso per la messa in bandiera delle pale necessita l'installazione dei cuscinetti sulla ruota conica e poi, compatibilmente con il gioco sull'anello interno, l'introduzione dell'aggregato corona conica – camma a tamburo – collare a tamburo.

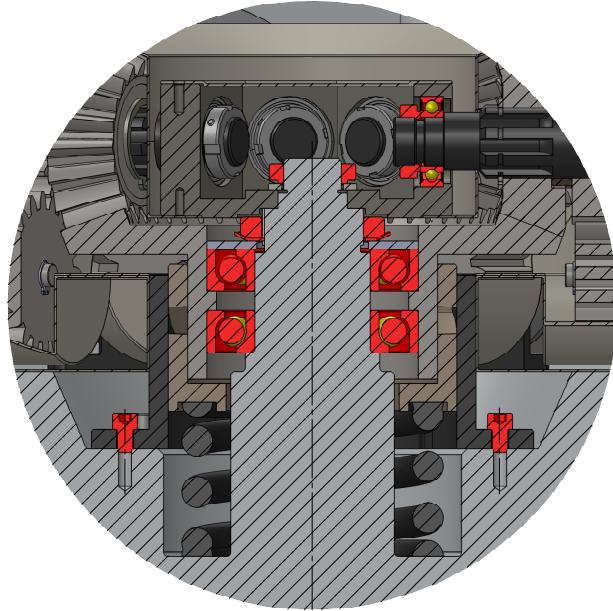


Figura 3.8: Nuovo movimento centrale

3.3.2 Supporto e albero centrale

Come era stato anticipato in 3.1 il mozzo ha subito notevoli modifiche nell'area del fondo (vedi Figura 3.8) per poter accogliere il movimento centrale completo di soluzione di *feathering*. Oltre agli scavi toroidali che discuteremo nel Capitolo 4 l'albero centrale è stato oggetto di interventi sostanziali per adattarsi all'alloggiamento del sistema di cuscinetti e del supporto centrale. L'introduzione dei cuscinetti obliqui a contrasto o ad O, rispetto alla raffazzonata soluzione originale, richiedono infatti spallamenti appositi sia sull'albero, che ha ora un maggior ingombro radiale, sia nella parte cava della ruota dentata conica. L'installazione del nuovo supporto centrale prevede invece l'accoppiamento con un tratto scanalato semplificato e il serraggio con ghiera di bloccaggio a fissaggio integrato; l'accoppiamento albero-supporto originale è stato rivisto in più punti per garantire un montaggio corretto.

- Viene introdotto uno spallamento maggiorato in senso radiale affinché il riferimento assiale più ampio assicuri una maggior stabilità.
- L'uso di un tratto scanalato consente il corretto posizionamento planare del supporto rispetto al mozzo: è importante che le sedi dei cuscinetti sul supporto siano allineate con quelle sul mozzo. Nell'eventualità che vi siano dei disallineamenti tra le due il cuscinetto radiale a sfere impiegato ne permette la compensazione in quanto organo flottante⁸.
- Il serraggio con ghiera di bloccaggio filettata permette di bloccare assialmente il supporto sul riferimento dello spallamento. Rispetto alla soluzione originale il dispositivo di bloccaggio asserve solo questa funzione in quanto il riferimento è a carico della sezione dell'albero centrale: la ghiera di bloccaggio è anche dotata di dispositivo antisvitamento per minimizzare possibili giochi assiali.

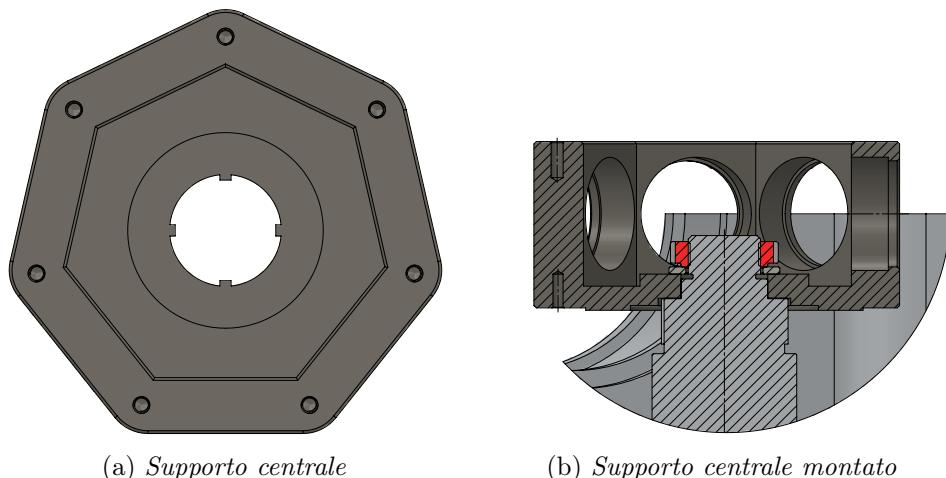


Figura 3.9: Supporto e albero centrale

Nel complesso gli accorgimenti implementati sul nuovo modulo del movimento centrale ne consentono un montaggio più agevole oltre che un posizionamento più rigido e preciso. Infine si noti che il nuovo modello del supporto centrale è stato predisposto per l'installazione di un sistema di carteratura attraverso una serie perimetrale di fori filettati sia sulla faccia anteriore che su quella posteriore.

⁸vedi 4, p. 73.

3.4 Alberi di comando e pala completa

Il nuovo modello di albero di comando deve rispondere alle prerogative messe in luce con l'analisi della soluzione adottata nel prototipo originale. In particolare dovrà essere ridisegnato per potersi integrare con la radice della rispettiva pala così da costituire un elemento contiguo, solidale alla rotazione e alla traslazione assiale. Il risultato è un albero riorganizzato nel posizionamento degli spallamenti, ma che mantiene le principali scelte tecnologiche per il calettamento dei componenti.

- Radice pala: Gli alberi di comando sono ora collegati alla propria radice di modo che nel complesso costituiscano un elemento contiguo; ogni radice è calettata con un tratto scanalato che si estende fino allo spallamento principale dell'albero: il collegamento si completa con una cuffia di pressione che oltre a bloccare a battuta l'albero funge da spallamento per i cuscinetti appaiati sulla radice. La cuffia di pressione è serrata con una serie polare di viti mordenti in presa sulla faccia della radice ed è conformata di modo che sia in contatto solamente con gli elementi che deve riferire.

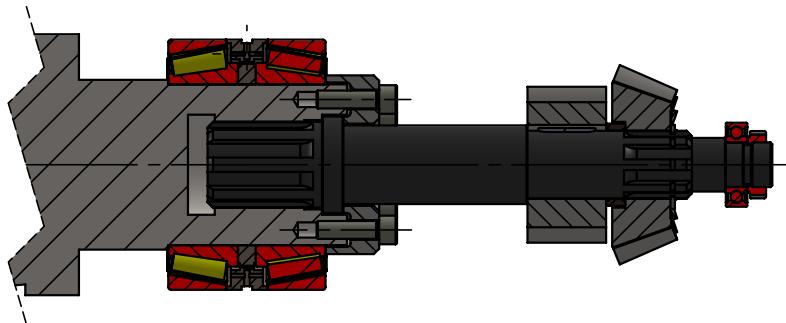


Figura 3.10: Pala completa in sezione

- Ruota di rinvio: Il calettamento della ruota a denti dritti di rinvio avviene come nella soluzione originale per mezzo di un collegamento con linguetta. La ruota, che trasferisce all'albero la coppia motrice elettrica, è poi riferita assialmente da uno spallamento sull'albero e da una ralla interposta tra la ruota e il pignone conico contiguo.
- Pignone conico: Il pignone conico consente, ingranando con la corona centrale, la sincronizzazione nella rotazione degli alberi di comando e quindi delle pale. Nel rispetto della soluzione originale questo è calettato con un tratto scanalato, ma è riferito assialmente con l'ausilio di

un anello elastico seeger e di una ralla intermedia: l'anello seeger, la cui sede è ricavata sull'estremità scanalata, consolida il posizionamento delle due ruote dentate sull'albero, raggruppandole a pacco con la ralla.

- Cuscinetto radiale: Il cuscinetto radiale a sfere introdotto in 3.2 viene montato secondo i criteri già discussi, ovvero in battuta sullo spallamento dell'estremità interna dell'albero di comando e con una ghiera di bloccaggio a fissaggio integrato.

La rielaborazione del modello dell'albero di comando come elemento contiguo alla pala ci permette di poter riorganizzare i componenti da questo interessati in un modulo o sottoassieme a cui faremo riferimento con l'appellativo di *pala completa*. Questa riorganizzazione dei componenti congiunti alla pala non è solamente un atto formale, ma ha lo scopo di semplificare e rendere sistematico il montaggio di questi per formare un complesso di più facile installazione all'interno dell'elica.

Montaggio della pala completa Rispetto alla soluzione originale il riordinamento degli spallamenti dell'albero di comando implica un differente ordine di montaggio dei componenti. L'aggiornata posizione dello spallamento principale obbliga infatti l'introduzione dei rotismi da un'unica estremità. Il montaggio vedrà, nell'ordine, l'inserimento della linguetta, della ruota a denti dritti, della ralla di riferimento e infine del pignone conico: il cuscinetto radiale a sfere verrà introdotto solo nella messa in sede sul supporto centrale. L'intero albero di comando così assemblato viene accoppiato, fino al riferimento dello spallamento principale, con la sede scanalata della radice, già provvista dei due cuscinetti appaiati: tale posizionamento assiale è mantenuto dal bloccaggio bullonato offerto dalla cuffia sulla radice. L'intera *pala completa* è pronta ora ad essere implementata all'interno del mozzo dell'elica.

3.5 Ruote dentate

Il complesso di rotismi che anima il sistema di cambio di passo costituisce il principale mezzo con cui la variazione dell'angolo di attacco viene messa in pratica. Tuttavia nessuna delle parti da questo impiegato, ovvero nessuna delle ruote, è stata interessata dall'elenco di incongruenze o inadeguatezze stilato per il prototipo originale. Detto questo nel corso dello sviluppo del nuovo modello di elica i componenti dentati hanno comunque subito degli interventi, prevalentemente per adattarsi ai cambiamenti che hanno interessato i restanti sistemi.

Corona conica centrale La corona conica centrale svolge l'importante ruolo di organo di sincronizzazione dell'operazione del cambio di passo su tutte le pale e pertanto è l'elemento principale del movimento centrale. Per adempiere tale proposito è asservito dal sistema di cuscinetti descritto in 3.3 che ne permette la rotazione rispetto al mozzo. Avendo modificato gli organi di supporto sarà necessario che la cava predisposta ad accoglierli sia modificata in accordo con la disposizione delle corone scelta. Rispetto alla soluzione originale in cui l'elongazione cava posteriore era ottenuta per saldatura, la corona è ora costituita in un sol pezzo, con uno spallamento interno per poter disporre i due cuscinetti obliqui a sfere a contrasto. Detto questo ulteriori e importanti modifiche verranno dettate dall'introduzione del sistema di messa in bandiera automatica, specie nella soluzione finale (D) che si integra con il movimento centrale, e pertanto trattate in tale capitolo dedicato.

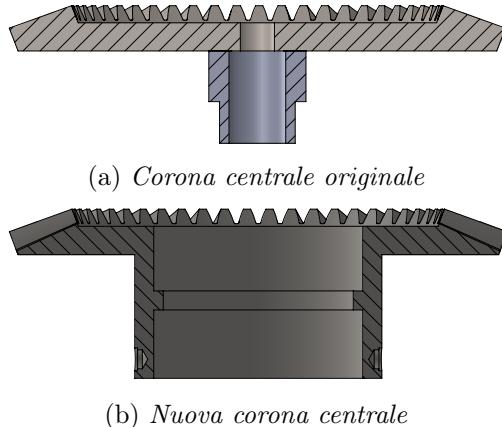


Figura 3.11: Confronto tra le versioni della corona

Pignone conico Ogni pignone conico montato sull'albero di comando coordina la sincronizzazione delle pale ingranando con la corona centrale in un rapporto di ingranaggio:

$$\frac{z_{corona}}{z_{pignone}} = \frac{52}{20}$$

Nonostante il nuovo albero di comando abbia subito una riorganizzazione di quella che era la disposizione dei suoi spallamenti, la nuova ruota conica è simile all'originale. Mantenuto il tratto scanalato (maggiorato) per il calettamento i minimi interventi si sono concentrati nella realizzazione di uno scasso che permettesse l'alloggiamento della ralla di distanziamento per mantenere il posizionamento originale del pignone rispetto alla corona conica.

Ruote a denti dritti Le ruote a denti dritti impiegate all'interno del sistema di cambio di passo sono sostanzialmente le medesime a meno della cava di calettamento, dato che la trasmissione tra motore elettrico e albero di comando ha rapporto unitario: in base alla sezione della cava la ruota può svolgere la funzione di ruota condotta o di motrice. A differenza delle ruote originali solo quella condotta sull'albero di comando ha subito delle variazioni legate alla nuova sezione di questo, in particolare la cava è stata adattata per accogliere una linguetta di dimensioni superiori.

3.6 Attacco all'albero motore

Il sistema di attacco del mozzo all'albero motore costituiva una tra le maggiori inefficienze che caratterizzavano il prototipo originale. Realizzare l'attacco sulla base di una piastra forata e saldata compromette di fatti l'integrità strutturale del complesso, oltre a rendere necessaria la produzione di un codice superfluo e che ben può integrarsi con il resto del cestello. La conformazione del nuovo modello di mozzo vuole sopperire a questa incongruenza incorporando l'attacco sul fondo esterno e ridistribuendo i fori filettati di modo che non interferiscano con le cavità interne: il risultato si riassume in una raccordata sporgenza cilindrica con una serie polare di fori. In conclusione questo minimo intervento ci ha permesso, rispetto alla soluzione antecedente, eliminare un componente superfluo integrandolo e rendere il collegamento di trasmissione più solido per la rimozione dei cordoni di saldatura come possibili concentratori di cricche.

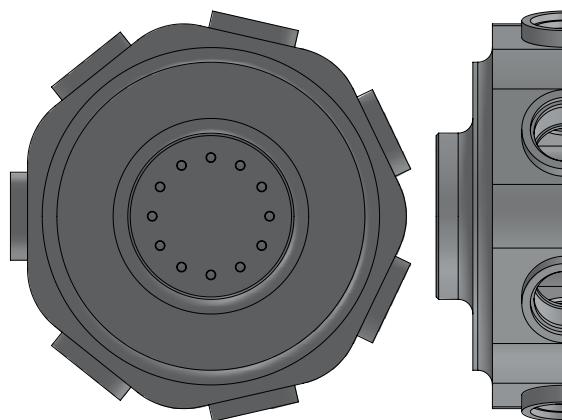


Figura 3.12: Nuovo modello di mozzo

3.7 Soluzioni di lubrificazione e tenuta

L'introduzione dei sistemi dentati e volventi che governano il meccanismo di cambio di passo deve essere auspicabilmente seguita da accorgimenti che promuovano il loro mantenimento in efficienza e affidabilità. Tali sistemi necessitano, per loro natura, di soluzioni di lubrificazione e protezione delle parti accoppiate o in moto relativo; pertanto si può pensare che le implementazioni trattate fino a questo punto sul prototipo siano naturalmente predisposte ad accogliere tali accorgimenti. A differenza del modello originale, che ne era sprovvisto, saranno analizzati sistemi integrati di lubrificazione e di tenuta dedicati per ogni organo in movimento del meccanismo:

3.7.1 Cuscinetti a rulli conici appaiati

Affinché operino in maniera affidabile ed efficiente è necessario che i cuscinetti volventi siano lubrificati in risposta alle loro esigenze, di modo da ridurre attrito e usura, proteggere le superfici dalla corrosione e talvolta garantire il raffreddamento delle sedi e dei corpi volventi. La sezione dedicata alle soluzioni di lubrificazione e alla loro gestione di [4] tiene conto di molteplici fattori di influenza sulla scelta del tipo di lubrificante da utilizzare e propone in definitiva un diagramma di flusso per agevolare il processo decisionale.

Nel sistema di cambio di passo dell'elica i cuscinetti a rulli conici sono impiegati come sistema di supporto per le radici delle pale, in corrispondenza dell'attacco sulla sede del mozzo. La loro disposizione affiancata e la conformazione delle corone con piste per rulli conici non permette l'impiego di un sistema di tenuta integrato, di conseguenza deve essere adottato il metodo di lubrificazione, per cuscinetti aperti, più idoneo. Attenendosi al processo decisionale offerto da [4] la soluzione più congegnale si dimostra essere quella che impiega una lubrificazione a grasso anziché ad olio:

- Le velocità di rotazione sono estremamente ridotte e di conseguenza la necessità di dissipare calore attraverso il ricircolo dell'olio viene meno;
- Il costo dei lubrificanti allo stato di grasso e dei sistemi per la sua gestione hanno il favore economico rispetto alla lubrificazione ad olio;
- I lubrificanti a grasso sono caratterizzati da un'estrema facilità di applicazione in quanto naturalmente si trattengono all'interno del cuscinetto e della sua sede, pertanto le soluzioni di tenuta richieste sono notevolmente più semplici rispetto a quelle necessarie per l'olio;
- Per l'applicazione l'olio di lubrificazione non è necessario per altri scopi come può essere per i riduttori.

I cuscinetti a rulli conici appaiati scelti vengono forniti dal produttore come gruppo pronto al montaggio, per cui i distanziali sono già accoppiati con le corone in produzione. Il distanziale impiegato dal fornitore è già dotato di un passaggio per il reintegro del lubrificante, pertanto il sistema di lubrificazione dovrà provvedere ad un adattamento del mozzo che consente al flusso di lubrificante di giungere dall'esterno in corrispondenza dei fori di trafileamento.

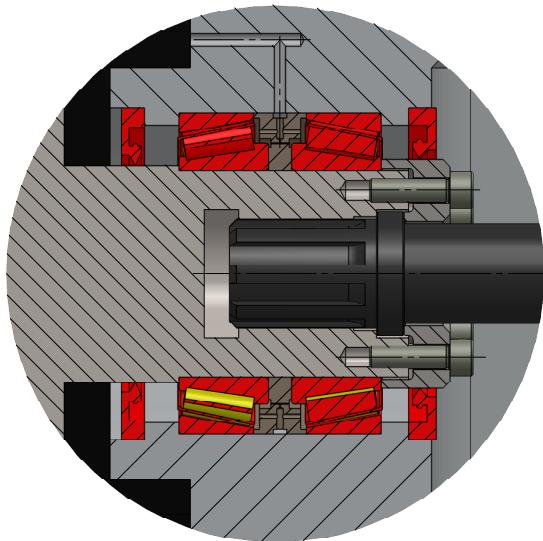


Figura 3.13: Sistema di lubrificazione per cuscinetti a rulli conici

Il corretto reintegro del flusso di lubrificante è garantito da un semplice passaggio ricavato sul coperchio del mozzo attraverso due semplici operazioni di foratura ortogonali intersecanti: la procedura di rilubrificazione comprende l'introduzione manuale del grasso lubrificante, attraverso i nippri esterni montati sul coperchio, che risale il condotto fino a distribuirsi fra le due corone di cuscinetti. Un parametro fondamentale per la gestione della lubrificazione è il *tempo di rabbocco*, ovvero l'intervallo temporale che intercorre tra un'operazione di reintegro del lubrificante e la successiva. Secondo [4] questo è stimabile in funzione delle dimensioni del cuscinetti, della sua tipologia, del regime di rotazione e del carico a cui è sottoposto. Le piccole rotazioni angolari necessarie per le operazioni di cambio di passo contribuiscono ad estendere l'intervallo di rabbocco, ma è importante tenere conto di altre condizioni di esercizio quali la temperatura, le vibrazioni o l'orientamento dell'albero asservito. Di fatto, l'effetto centrifugo a cui il grasso è sottoposto nella rotazione dell'elica, ne obbliga l'introduzione al centro, tra le due corone, così che per effetto della spinta sia forzato al passaggio attraverso

gli elementi volventi del cuscinetto radialmente più esterno. Di conseguenza è importante la quantità e le modalità con cui avviene il primo riempimento al montaggio: per prevenire l'insufficiente apporto di lubrificante sul cuscinetto radialmente più interno per l'effetto centrifugo è necessario che al montaggio sia introdotto il corretto quantitativo di lubrificante nella zona prossima alla tenuta assiale, di modo che in rotazione questo possa trafiglarvi attraverso.

Rispetto alle indicazioni del manuale [4], il sistema di lubrificazione illustrato in Figura 3.13 non è provvisto di passaggio per lo spурго automatico del grasso esausto. Considerando che l'intera elica sia sottoposta a ispezioni periodiche in quanto apparato meccanico di uso aeronautico, si ipotizza che l'operazione di rimozione del grasso esausto possa facilmente sostenersi in concomitanza della verifica degli organi interni del complesso di cambio di passo. A sostegno di quest'ipotesi è facile dimostrare che per la semplicità di montaggio del mozzo le operazioni di ispezione possono svolgersi rapidamente, con la sola apertura delle due metà di cui è composto. Ritenendo plausibile la sincronizzazione delle operazioni di spурго e rabbocco del lubrificante con quelle di ispezione dell'elica, consideriamo valida la disposizione priva di condotto di spурго, ma dotata di tenute assiali a labbro. Di fatto, la messa in opera di un sistema di lubrificazione a grasso come questo non può fare a meno di considerare delle tenute assiali sue entrambe le estremità, di modo che il lubrificante sia confinato nelle camere a lui dedicate e che sia impedito ad agenti contaminanti esterni di compromettere il funzionamento dei cuscinetti.

3.7.2 Cuscinetti radiali a sfere

Nel sistema di cambio di passo dell'elica i cuscinetti radiali a sfere sono impiegati come sistema di supporto degli alberi di comando: vengono montati sull'estremità interna del rispettivo albero. Dalla tabella di idoneità e dalla sezione di prodotto dedicata su [vedi 4, pp. 142–144] si evince la compatibilità di questo tipo di cuscinetto con i sistemi di tenuta integrati. In generale i sistemi di tenuta integrati consentono di prolungare notevolmente la durata di esercizio dei cuscinetti rispetto alle soluzioni aperte, in quanto realizzano la ritenzione del lubrificante e la protezione da agenti contaminanti. Per i cuscinetti radiali a sfere il produttore di riferimento⁹ mette a disposizione un'ampia gamma di soluzioni di protezione fra schermi e tenute: seguendo le linee guida disposte in [4, p. 242] la soluzione più adatta risulta l'impiego

⁹Per l'intera stesura del progetto e dell'elaborato si è fatto ad SKF come unico fornitore di riferimento per gli organi volventi e correlati: questa scelta è dipesa dal fatto che è un'azienda leader del proprio mercato e che mette gratuitamente a disposizione materiale documentale di livello.

di una tenuta a basso attrito di tipo RST (vedi Figura 3.14a). Questo tipo di tenuta su entrambi i lati, abbinata ad un grasso lubrificante per basse temperature di esercizio di tipo LT, rende il cuscinetto lubrificato e protetto a vita, o meglio esente dalla manutenzione fino alla sua sostituzione per prevenirne la naturale rottura. D’altro canto eventuali interventi sono agevolati dalla praticità con cui questi cuscinetti possono essere smontati dalle sedi sul supporto centrale (vedi 3.9).

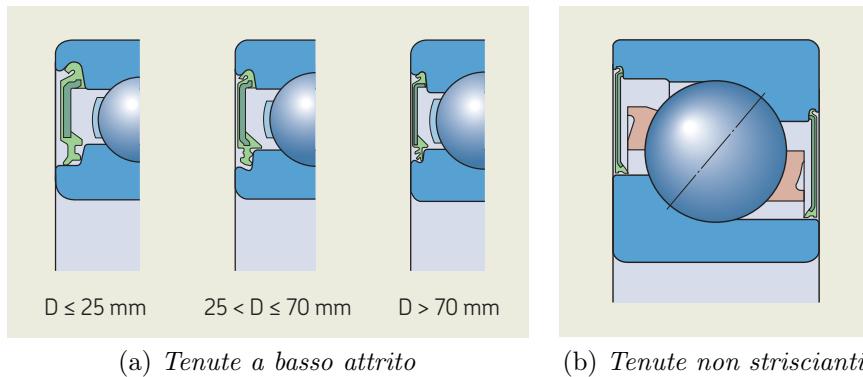


Figura 3.14: Sistemi di tenuta integrati

3.7.3 Cuscinetti obliqui a sfere

I cuscinetti obliqui a sfere sono impiegati, all’interno del sistema di cambio, come supporto alla rotazione della corona conica centrale di sincronizzazione. Come i corrispettivi cuscinetti radiali sono predisposti ad accogliere un sistema di tenuta integrato, ma nel caso di corona singola la scelta si riduce alle sole tenute non strisciante (vedi Figura 3.14b). Questo tipo di tenuta, formando una piccolissima luce con lo spallamento dell’anello interno, consente di operare alle stesse velocità limite dei cuscinetti aperti senza generare momenti di attrito supplementari. Anche in questo caso l’abbinamento con un grasso per basse temperature consente ai cuscinetti una manutenzione ridotta a meno di eventuali interventi di ispezione o sostituzione. A differenza degli altri sistemi di supporto però, i due cuscinetti obliqui contrapposti sono allogenati tra la corona e l’albero centrale, all’interno del complesso del movimento centrale: causa l’elevato livello di integrazione tra i vari elementi di questo blocco, specialmente nella soluzione di feathering definitiva (D), l’accesso a questi elementi ne richiede il disassemblaggio totale. D’altro canto la combinazione tra questo tipo di disposizione e le tenute integrate consentono di avere un vantaggio sulla protezione delle parti attive da agenti contaminanti.

3.7.4 Ruote dentate

Il sistema costituito dai rotismi è il complesso essenziale per il funzionamento delle operazioni di cambio di passo in quanto si occupa sia della trasmissione della potenza che della sincronizzazione della rotazione. Di conseguenza deve essere mantenuto in condizioni di lavoro efficienti e affidabili.

Lubrificazione La lubrificazione delle ruote dentate è fondamentale per migliorarne l'efficienza riducendo l'attrito e l'usura, ed aumentarne l'affidabilità, prevenendo guasti o rotture dovute a fatica superficiale, corrosione e fenomeni di *scoring*, *pitting*, *scuffing* ed abrasione. Per poter valutare correttamente la soluzione ottimale è necessario considerare le condizioni operative dell'intero sistema di rotismi:

- Le rotazioni sono particolarmente lente e ridotte in ampiezza;
- Le rotazioni sono intermittenti e possono invertire il loro senso di moto;
- I carichi sono medio elevati;
- A causa dell'esposizione ad elevate¹⁰ altitudini le temperature sono molto ridotte;
- L'intero sistema è sottoposto ad un'elevata azione centrifuga durante il funzionamento.

Considerando le prerogative richieste dall'ambito di applicazione e le difficoltà tecniche imposte dalle provanti condizioni operative, si reputa necessario affidarsi alle soluzioni speciali offerte dai prodotti Molykote¹¹. Questo tipo di soluzioni consentono di operare in campi di applicazione fallimentari per i prodotti tradizionali grazie alla formulazione della base di oli e lubrificanti solidi che consente di mantenere invariate le prestazioni in condizioni difficili per le temperature o le velocità o le pressioni.

La guida alle soluzioni di lubrificazione [6] offre una generale organizzazione dei prodotti per ambito di applicazione: le soluzioni indicizzate sotto la denominazione di ruote, trasmissioni e pompe raggruppano prodotti di differente composizione e performance che rispondono alle diverse esigenze tecniche imposte da tali utilizzatori. Ricordando le caratteristiche delle condizioni operative considerate possiamo escludere a priori l'uso di lubrificanti

¹⁰La tangenza massima per un Lockheed *SuperHercules* C-130J è di 9.315 m

¹¹Analogamente a quanto detto per SKF, è stato scelto di seguire le soluzioni offerte dalla gamma Molykote di Dupont per la ricca documentazione tecnica disponibile gratuitamente, oltre che per l'elevata qualità dei prodotti ad alte prestazioni in catalogo.

in forma oleosa per le complicazioni e l'ingombro che richiederebbe una sua struttura di gestione all'interno del mozzo e per le difficoltà derivanti dalle azioni centrifughe durante il funzionamento; allo stesso modo posso essere esclusi i lubrificanti in forma di grasso, in quanto si distaccherebbero dalle dentature per effetto centrifugo lasciandole, prive di protezione. Tra le restanti soluzioni consigliate, l'ottimo è rappresentato dal rivestimento anti-atrito MOLYKOTE D-7409, per le sue proprietà (vedi [7]) di lubrificante ad alto carico con ampio intervallo di temperature. Questo tipo di lubrificante secco termoindurente è infatti ideale per accoppiamenti metallo su metallo con velocità da bassa a moderata, carichi da medio ad elevati, temperature estreme (-70°C) e movimenti oscillanti ed intermittenti. L'uso di questo rivestimento prevede una fase di preparazione ed una di applicazione del prodotto:

- (i) Preparazione: Le superfici da trattare devono essere adeguatamente pulite e sgrassate prima dell'applicazione; l'adesione è incentivata da pre-trattamenti come la fosfatazione e la sabbiatura. Le operazioni di pre-trattamento e la rugosità ottenuta sulla superficie preparata hanno diretta influenza sulla durata del rivestimento: secondo [8] la maggior estensione in durata è incentivata da superfici sabbiate e fosfatate a rugosità di rettifica (R_a 0,5 μm)
- (ii) Applicazione: Il rivestimento può essere applicato attraverso nebulizzazione, immersione del componente o con spazzola; si raccomanda uno strato da 5 a 20 μm .

Questa soluzione ci permette di ottenere un gruppo di rotismi rivestiti che non necessitano particolare manutenzione o gestione della lubrificazione, se non normali controlli di integrità del rivestimento lubrificante.

Carteratura di protezione Nonostante il rivestimento anti-atrito utilizzato consenta eccezionali proprietà lubrificanti di protezione da corrosione, resistenza ad usura, resistenza all'azione di oli, grassi o solventi e riduzione di fretting si reputa necessaria una barriera fisica che possa confinare i rotismi dal resto dei componenti del mozzo. La progettazione di un carter protettivo deve prevedere il contenimento completo di tutti gli organi dentati, da quelli di potenza a quelli di sincronizzazione, affinché ogni accoppiamento dentato sia schermato da corpi esterni o agenti contaminanti che possono comprometterne il funzionamento. Volendo asservire ogni rotismo con una struttura unica il carter deve assumere una forma complessa che possa seguire dettagliatamente ogni ingombro: per garantirne poi il montaggio all'interno

dell'elica è necessario suddividere il corpo carter in più porzioni da assemblare al momento dell'installazione nell'elica.

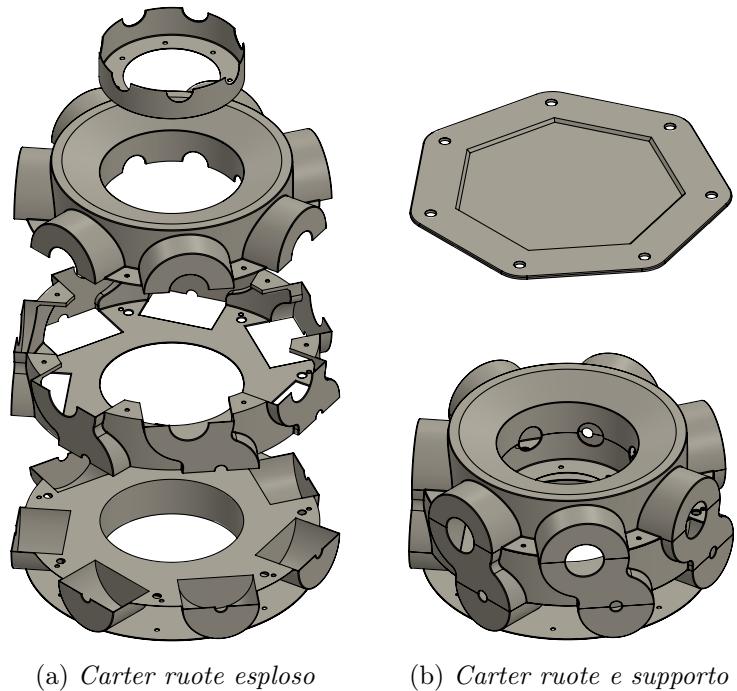


Figura 3.15: Carterature di protezione

Il sistema di carteratura per le ruote è suddiviso in quattro sezioni complementari:

- (1) La sezione inferiore è la parte del carter che poggia direttamente sul fondo del mozzo, a cui viene fissato attraverso viti mordenti. Questa sezione ha un piano di taglio in asse con l'albero dei motori elettrici per permettere il posizionamento dello stesso e del pignone cilindrico: per consentirne il montaggio sul mozzo sono realizzati dei fori di passaggio per poter accedere alle sedi delle viti altrimenti nascoste dalla superficie superiore.
- (2) La sezione intermedia si accoppia con quella inferiore e complementare. Il piano di taglio in asse con la pala completa consente l'inserimento del movimento centrale e la posa dell'intero complesso di pale, alberi di comando e pignoni conici: il fissaggio alla sezione sottostante è assicurato da una serie polare di bullonamenti.

- (3) La sezione superiore è l'ultima porzione della copertura ad essere installata, in quanto completa la struttura di protezione su tutti i rotismi: è fissata alla porzione intermedia con una serie polare di viti mordenti.
- (4) La sezione minore viene installata sul fondo esterno del supporto centrale con viti mordenti, costituendo un pezzo unico con questo. Quest'ultima porzione consente di chiudere la carteratura sugli alberi di comando

Pur avendo suddiviso il carter in più porzioni per consentirne il montaggio la conformazione delle varie sezioni risulta ancora complessa. Considerando che nel complesso ha come unica funzione quella di proteggere i rotismi possiamo pensare di realizzare le porzioni in materiale plastico e di provvedere alla loro fabbricazione adoperando la fusione o metodi di *additive manufacturing* che permettono di risolvere i problemi sulla complessità geometrica delle forme. Infine, per completare la trattazione sulle coperture, si considera di aggiungere un coperchio di protezione sulla faccia superiore del supporto centrale, così da proteggere ulteriormente i cuscinetti radiali già schermati con soluzione integrata, ma anche le ghiere di fissaggio e regolazione.

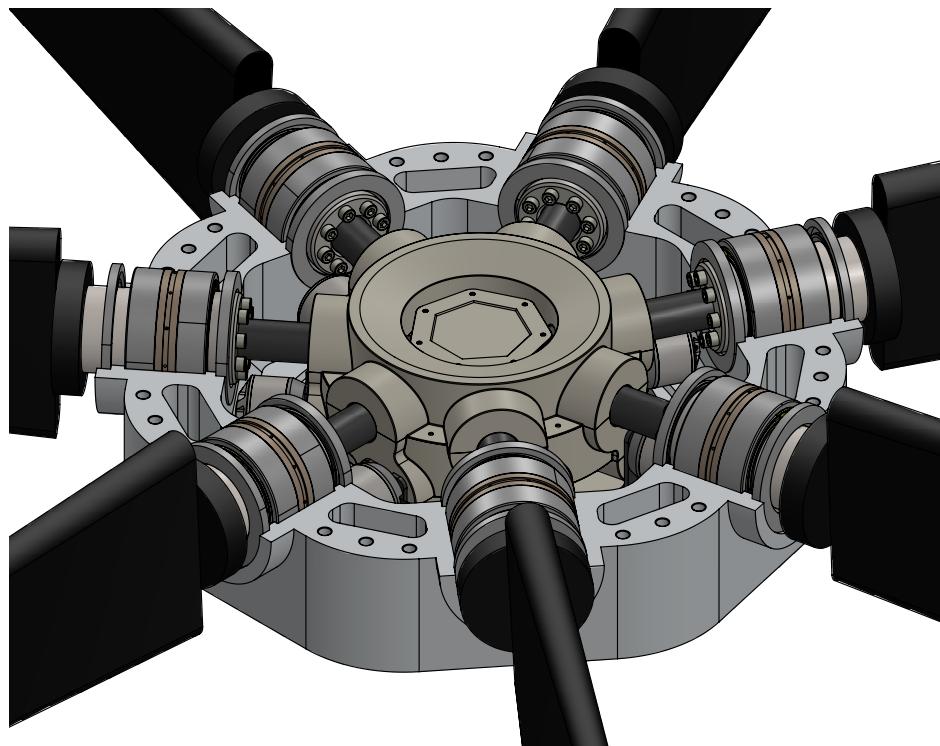


Figura 3.16: Elica con carter completo

3.8 Chiusura dell'elica

Fin dall'inizio della disamina del prototipo originale non è stata posta la dovuta attenzione ad alcuni elementi ausiliari dell'elica quali il coperchio del mozzo e l'ogiva. Entrambi ricoprono il ruolo di coperture di chiusura del complesso, in particolare, nell'ordine, per la sua protezione e la sua efficienza aerodinamica.

3.8.1 Coperchio mozzo

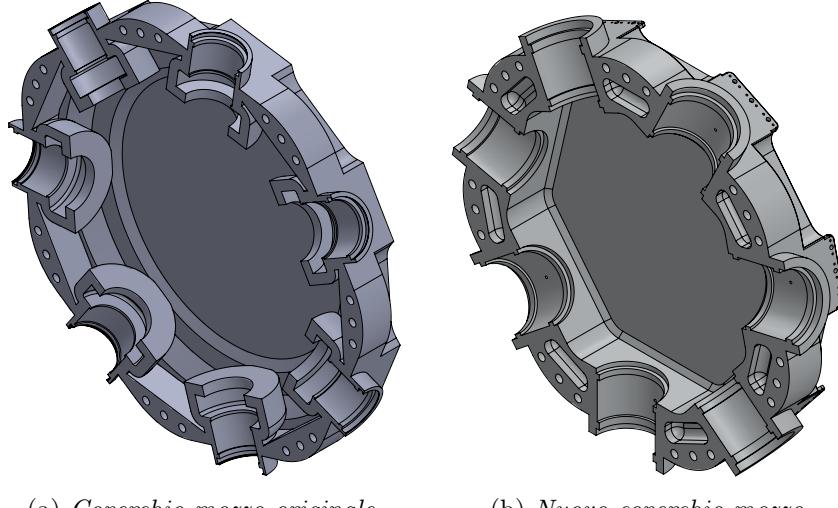
Il coperchio del mozzo è l'elemento di chiusura dell'elica in quanto completa gli accoppiamenti sulle radici di attacco e la copertura offerta dal mozzo per il sistema di rotismi interno. La modellazione del coperchio deve dunque seguire le sue esigenze funzionali:

- Congruenza con il mozzo: Il coperchio deve essere in forma e superfici congruenti con quelle del mozzo con cui deve realizzare la chiusura. Le interfacce di serraggio devono combaciare per garantire il montaggio dei cuscinetti alle radici, oltre che per sigillare gli organi dell'elica.
- Chiusura dell'elica: Le features del coperchio devono permetterne la compatibilità con il sistema di serraggio scelto per la chiusura dei due componenti.
- Compatibilità con l'ogiva: Il coperchio deve provvedere, sia in termini di geometria che di supporti dedicati, ad agevolare il montaggio dell'ogiva di copertura dell'elica, che non era presente nel modello originale.

La sua conformazione, già a partire dal modello originale (vedi Figura 3.17a), dovrà quindi seguire la geometria del mozzo, perlomeno all'interfaccia. Di conseguenza, come nel caso del mozzo, è stato necessario intervenire sulle geometrie incongruenti affinché queste potessero rispettare i criteri di un ciclo di fabbricazione realistico: il risultato è un coperchio con geometria equivalente a quella di un modello di mozzo a fondo spoglio.

Congruenza con il mozzo La peculiarità dell'accoppiamento *mozzo-coperchio* sta nel fatto che alla chiusura questi completano la sede in due parti del sistema di cuscinetti alla radice. Affinché le sedi siano realizzate correttamente e i cuscinetti ben disposti nel rispetto degli accoppiamenti preventivati, è necessario che le lavorazioni del coperchio seguano le analoghe del mozzo. In generale l'intero cordolo perimetrale deve essere eseguito in modo speculare,

per poter permettere agli organi interni di rispettare gli ingombri e seguirne¹² la filosofia costruttiva: il *modus operandi* con cui è stato fabbricato il mozzo è già stato verificato in 3.1, pertanto è conveniente riproporlo.



(a) *Coperchio mozzo originale*

(b) *Nuovo coperchio mozzo*

Figura 3.17: Confronto tra le versioni del coperchio mozzo

Il modello di coperchio del mozzo vedremo successivamente che potrà variare a seconda della soluzione di *feathering* scelta: anche in questo caso, come premesso, è stata presentata la soluzione di coperchio corrispondente alla configurazione D di messa in bandiera.

Sistema di chiusura dell'elica Con la denominazione di sistema di chiusura ci si riferisce alla tecnologia scelta per serrare la sovrapposizione dei due semigusci di cestello e coperchio. Il prototipo originale adotta una soluzione con serie polare di viti mordenti in presa sul cordone del mozzo, senza alcuna misura cautelativa di antisvitamento. Per assolvere questa lacuna le viti mordenti verranno sostituite da dei prigionieri con dadi esagonali ad intagli e copiglia. La soluzione di antisvitamento ad ostacolo offerta dalla combinazione della copiglia e del dado ad intagli è tipica delle applicazioni aeronautiche per l'elevato grado di sicurezza rispetto invece, ad esempio, ad una soluzione a doppio dado. Rispetto al prototipo originale verrà rispettata la disposizione dei fori filettati sul cordone di bordo del mozzo e di conseguenza su quello del cestello (vedi Figura 3.19).

¹²Nel rispetto del ciclo di fabbricazione del mozzo sono state replicate sul coperchio anche le cave di alleggerimento.

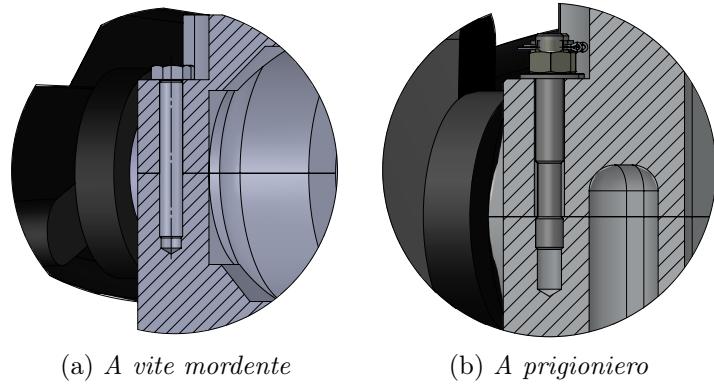


Figura 3.18: Confronto tra le versioni del sistema di serraggio

Sistema di montaggio dell’ogiva Per sistema di montaggio dell’ogiva si fa riferimento alla conformazione esterna del coperchio e ai supporti di montaggio che agevolano l’installazione dell’ogiva sull’elica: se sulla conformazione del coperchio è possibile intervenire in maniera ridotta, per la sua obbligata corrispondenza con quella del mozzo, i supporti devono permetterne il corretto bloccaggio.

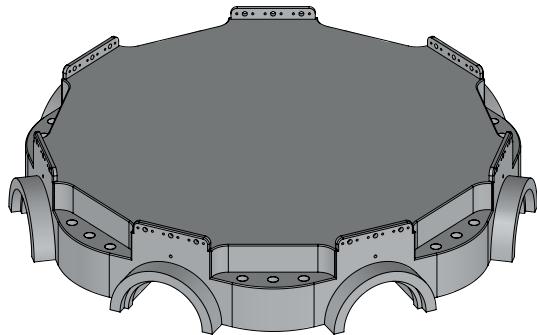


Figura 3.19: Retro del coperchio

Per il tipo di applicazione che stiamo trattando è necessario che la soluzione di serraggio ne rispetti le dovute esigenze. Tipicamente per il fissaggio delle carterature esterne si fa riferimento a soluzioni che possano concedere rapidità e praticità di montaggio/smontaggio per le ispezioni frequenti, ma che al contempo garantiscano elevata robustezza ed affidabilità. I sistemi di ritegno di più comune impiego in ambito aeronautico si basano sull’utilizzo di filettature rapide o *viti ad quarto di giro*, ovvero dispositivi di fissaggio il cui bloccaggio per combinazione di elementi elastici e ad ostacolo si consolida con una rotazione di soli 90° (quarto di giro).

Considerando le soluzioni *quarter turn fasteners* presentate da Soutcho in [9] il sistema di fissaggio è composto da un perno o "vite", un dispositivo di ritegno e un ricettacolo. L'accoppiamento tra lo scavo toroidale del perno e il ritegno a molla fa sì che:

- Il fissaggio e il rilascio sono rapidi per la rotazione di un quarto di giro;
- La forza di fissaggio si mantiene elevata anche dopo operazioni ripetute;
- Il fissaggio rimane saldo anche se sottoposto a vibrazioni;
- Il perno rimane prigioniero del pannello/carter, prevenendo la perdita dei componenti.

La soluzione *quarter turn* scelta tra l'ampia gamma offerta da Soutcho in [9] adopera un ricettacolo a molla semplice, da rivettare sul supporto di sostegno ricavato sul coperchio. Il supporto dovrà quindi essere provvisto di un'interfaccia con due fori per i rivetti di fissaggio del ricettacolo e un foro per il passaggio del perno. Una volta introdotto il perno con testa bombata ed intagliata è sufficiente un quarto di giro perché si accoppi con lembo del ricettacolo e garantisca il bloccaggio.

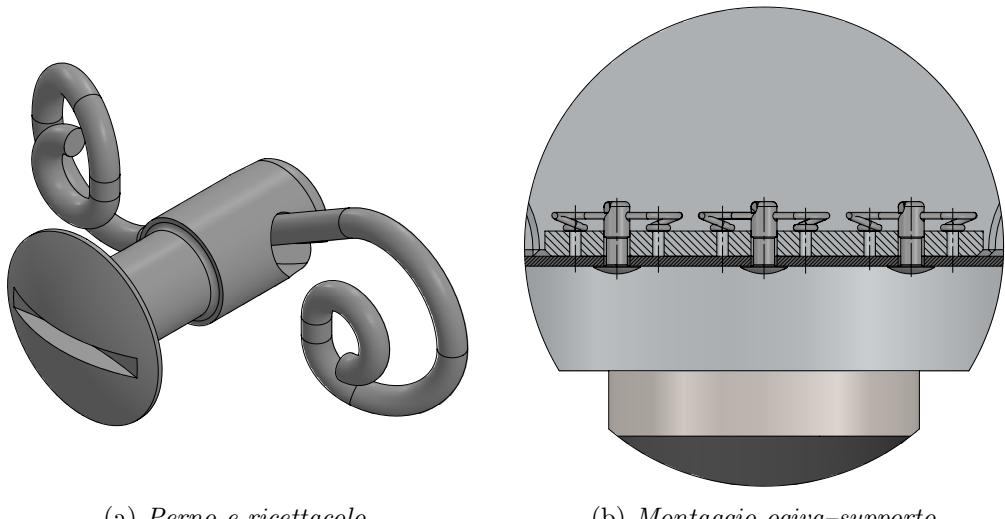


Figura 3.20: Soluzione *quarter turn fastener*

3.8.2 Ogiva

Con la denominazione di *ogiva* ci si riferisce al componente che occupa la porzione anteriore di un generico corpo che deve attraversare un fluido comprimibile e che è caratterizzata da una conformazione a simmetria assiale studiata per offrire la minor resistenza fluidodinamica possibile [10]. L'aggiunta di questo componente all'insieme fin qui sviluppato e la sua trattazione sono solo a scopo rappresentativo, per poter visualizzare e valutare un rendering completo dell'elica. Di fatto, se in generale è importante definire la geometria di rivoluzione sulla base degli studi fluidodinamici e compatibilmente con le esigenze costruttive, il prototipo di ogiva presentato è solamente un abbozzo da illustrazione.

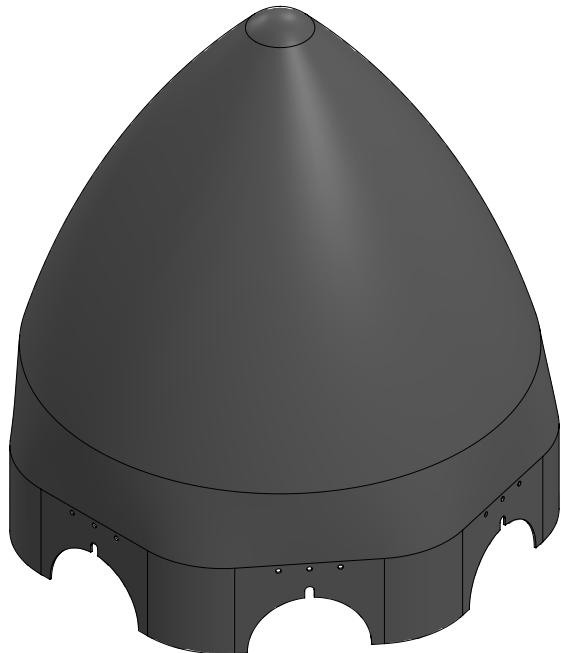


Figura 3.21: Prototipo di ogiva

Il profilo utilizzato per la creazione dell'ogiva sperimentale in Figura 3.21 non è puramente assalsimmetrico in quanto le operazioni di montaggio e riferimento richiedono una porzione retta che segua il profilo del mozzo. Pertanto la prima porzione dal basso si unisce al profilo a cono superiore dalla punta affusolata con un'estruzione "con loft", generando una geometria inedita non comprovata dagli studi fluidodinamici. Sul primo profilo retto vengono infatti realizzati i fori e i passaggi per il movimento delle pale e l'introduzione dei rivetti di montaggio e degli ugelli di ingrassaggio.

Come anticipato questo profilo è stato disegnato con l'obbiettivo di realizzare una copertura aerodinamica che segua il profilo del mozzo, mantenendo uno spessore sottile. Nel caso questo non soddisfi le prove sperimentali di fluidodinamica si può considerare un'ogiva a base circolare che evolve con un profilo a simmetria assiale, considerando però un adattamento interno alla base che possa compensare la differente geometria della porzione di appoggio e fissaggio sul mozzo. In definitiva si ricordi che l'aggiunta del modello dell'ogiva, non presente nel prototipo originale, è da intendersi solo come ausilio per la comprensione visuale del modello e pertanto non è richiesta la sua precisa correttezza dal punto di vista dell'efficienza aerodinamica.

3.9 Assemblaggio

Quest'ultima sezione del capitolo intende verificare la fattibilità delle soluzioni fino ad ora trattate dal punto di vista del loro montaggio all'interno dell'elica. Questo tipo di valutazione ha un'importante rilevanza per il tipo di dispositivo che stiamo studiando: le frequenti ispezioni a cui gli apparati aeronautici sono sottoposti durante il loro servizio impongono la più semplice e rapida procedura di montaggio/smontaggio possibile per il sistema. Tralasciando nello specifico le normative, ma mantenendo una valutazione critica sulla semplicità e velocità, proviamo ad indicare una possibile strategia di montaggio (vedi Figura 3.7) considerando ancora l'ipotesi di soluzione di *feathering* D:

- (I) A partire dal mozzo spoglio i primi componenti a poter essere messi in posa sul fondo sono il collare di guida del sistema di feathering e i supporti per i motori elettrici, ognuno con i relativi sistemi di inbullonamento.
- (II) Disposti i supporti vengono calati i motori elettrici con il relativo pignone: allo stesso tempo viene posizionato la porzione inferiore del carter con le relative viti di fissaggio. Infine si inserisce la porzione intermedia del carter.
- (III) L'ampio spazio al centro del sistema fino ad ora assemblato è predisposto per l'introduzione del movimento centrale comprensivo di sistema di *feathering*. L'integrazione del meccanismo di *feathering* all'interno del movimento centrale rende l'intero sistema particolarmente compatto e complesso: la sua composizione sarà chiarita nel capitolo (4) dedicato. Prima di calare il modulo è necessario posizionare la molla per il ritorno del sistema di messa in bandiera.

- (a) Considerando l'accoppiamento di interferenza sull'anello esterno dei cuscinetti di movimento centrale, questi saranno disposti per primi all'interno della sede sulla corona conica.
- (b) La corona così montata viene introdotta nella corrispondente sede sulla camma a tamburo con la quale realizza un accoppiamento cilindrico.
- (c) Allineando le sedi dei perni camma sull'esterno della corona con le asole della camma a tamburo si completa l'accoppiamento fra i due con l'inserimento forzato (sulla sede) dei perni di camma.

L'intero movimento centrale, messo in posizione completamente retratta, viene calato sull'albero centrale grazie all'accoppiamento con gioco disposto sugli anelli interni dei cuscinetti. Il complesso è bloccato e regolato nel gioco assiale con ghiera e rosetta di sicurezza.

- (IV) Una volta posizionato il movimento centrale possiamo pensare di introdurre i moduli di pale e supporto come un unico sistema che denominiamo *complesso stellare*, ovvero il complesso costituito da tutte le *pale complete* e dal supporto centrale. La loro contemporanea introduzione è dovuta all'assenza di soluzioni alternative per poter accoppiare gli alberi di comando con le sedi sul supporto centrale. La costituzione del complesso "a stella" ha come principio il montaggio di ogni *pala completa*:
 - (a) A partire dalla pala si inseriscono, fino a spallamento sulla radice, i due cuscinetti a rulli conici appaiati, forniti come gruppo dal produttore.
 - (b) L'albero di comando viene introdotto accoppiando la cava scanalata sulla radice con la corrispondente estremità: il posizionamento assiale di questo (e del gruppo di cuscinetti) è assicurato dalla cuffia imbullonata sulla faccia della radice.
 - (c) La corona cilindrica di trasmissione viene calettata con la relativa linguetta: il posizionamento assiale ha come riferimento lo spallamento sull'albero di comando.
 - (d) Montata la corona di trasmissione è possibile introdurre il pignone di sincronizzazione sul tratto scanalato, limitandola assialmente tra un anello seeger ed una ralla distanziometrica riferita sulla ruota di sincronizzazione.

Ogni pala così "completa" viene introdotta, dal lato dell'albero di comando, all'interno delle sedi sul supporto centrale, così da poter inserire

i cuscinetti radiali a sfere e bloccarli assialmente con le ghiere di sicurezza a bloccaggio integrato. Una volta montato la porzione intermedia di carter sul fondo del supporto centrale la struttura così costituita può essere posata sul mozzo: i cuscinetti delle pale sulle proprie sedi e il supporto sullo spallamento dell'albero centrale.

- (V) Una volta messo in posizione il supporto centrale può essere fissato con una ghiera filettata impegnata sull'estremità dell'albero. Assicurato il grano di bloccaggio integrato nella ghiera è possibile completare la carteratura di protezione con la porzione superiore e il coperchio del supporto centrale.
- (VI) Il coperchio del mozzo viene posato a chiusura di questo solo nel momento in cui i componenti interni sono tutti allocati. La chiusura del mozzo impiega una serie polare di prigionieri e dadi ad intagli che assicurano da sistema di antisvitamento: con la chiusura del mozzo si completa l'accoppiamento tra i cuscinetti di radice e le sue sedi in due parti.
- (VII) Completata la chiusura dell'elica si provvede al montaggio dell'ogiva aerodinamica attraverso i supporti ricavati sul fondo esterno del coperchio e i sistemi di bloccaggio a sgancio rapido.

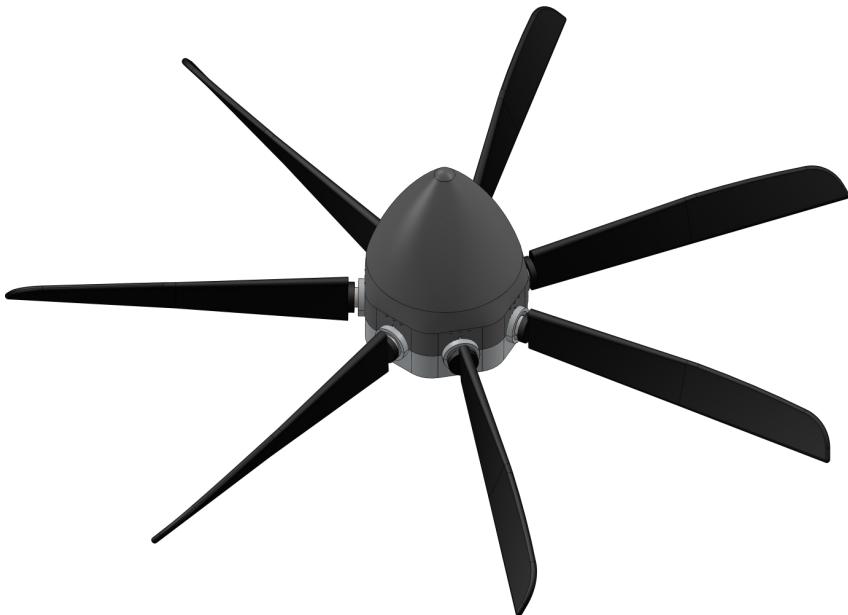


Figura 3.22: Elica a montaggio ultimato

Dal processo di montaggio descritto si denota che alcuni componenti o moduli sono di facile accesso e ispezione, mentre altri, a causa dell'elevato livello di integrazione che consente di abbattere gli ingombri, necessitano la rimozione di altre parti o sistemi con passaggi e manovre obbligati. Nel complesso i principali moduli o componenti, come i cuscinetti di radice, che richiedono interventi manutentivi o ispettivi più frequenti sono disposti in modo tale da renderli accessibili con la sola apertura dei due gusci che costituiscono il mozzo. Unica eccezione riguarda gli elementi del movimento centrale, in particolare i cuscinetti della corona conica e il sistema di *feathering*. Premesso che quest'ultimo verrà trattato con la dovuta attenzione alle sue esigenze nel capitolo successivo, la limitazione sulla rapidità di ispezione dei cuscinetti obliqui ci ha spinto nelle sezioni precedenti a scegliere una soluzione a schermi e ingrassaggio integrato, così da dover rimuovere il cuscinetto solo al fine vita.

Lo studio del modello attraverso la sua copia digitale ci permette di verificare la correttezza al montaggio delle soluzioni impiegate già dalla costituzione del *CAD assembly*: nel nostro caso, come è chiaro dall'ipotetico processo di montaggio, è evidente che alcuni passaggi sono critici, sia per l'insieme di componenti da dover movimentare che per la complessità dei loro accoppiamenti. La maggior criticità nella fase di montaggio, e che rende gli altri moduli o componenti di difficile accesso, è rappresentata dalla costituzione e messa in posa del complesso "a stella" di *pale complete* e supporto centrale. Se di per sé ogni pala è composta da un insieme compatto di elementi, la disposizione di queste sulle sedi del supporto centrale determina la composizione di un complesso ingombrante e difficile da manovrare e deporre sul mozzo. Di conseguenza l'eventuale accesso ispettivo o manutentivo ad elementi sottostanti (movimento centrale) richiederanno la rimozione di quota parte del sistema di cambio di passo e quindi un processo più lungo. In conclusione, se d'altro canto la combinazione che porta ad un modulo così articolato ci permette di compattare l'intero sistema di sincronizzazione, irrididendolo rispetto alla soluzione prototipale iniziale, si deve tenere conto dell'ulteriore complicazione dovuta al coretto posizionamento di ingranamento al momento della messa in posa. Di fatti, per garantire la corrispondenza tra la variazione reale dell'angolo di attacco e i comandi di cambio passo è necessario installare i componenti ingrananti del sistema di sincronizzazione nella posizione di riferimento, ovvero nella configurazione di passo neutro. Così facendo, avendo predisposto il sistema di feathering in posizione compatta, ad ogni modifica del passo il ritorno elastico riporterà le pale in passo neutro.

Capitolo 4

Feathering delle pale

4.1 Introduzione ai sistemi di *feathering*

Un sistema di *feathering* o messa in bandiera automatica è un apparato impiegato nei velivoli turboelica o con motore a pistoni che consente di riportare le pale dell'elica in condizioni di passo neutro o *feathered mode* a partire da una condizione di passo qualsiasi. Il meccanismo di *autofeather* è un sistema di sicurezza indispensabile per la gestione dei velivoli con eliche a passo variabile, in quanto previene la perdita di controllo del mezzo durante i guasti o i malfunzionamenti dei propulsori. La messa in bandiera entra automaticamente in servizio ogni qualvolta l'elica non genera contributo alla spinta, per perdite di potenza o avaria del motore, oppure qualora venga meno la possibilità di comandarne il passo; riportando le pale in configurazione di angolo di attacco neutro si minimizza la loro resistenza aerodinamica, migliorando il controllo del velivolo e incrementando le probabilità di rientro in sicurezza:

- Nei velivoli monomotore la riduzione del *drag* aerodinamico delle pale consente una maggior distanza di planata;
- Nei velivoli plurimotore la messa in bandiera dell'elica fuori uso (senza controllo o potenza motrice) aiuta il velivolo a rimanere in altitudine e in velocità con le eliche operative, stabilizzando l'assetto asimmetrico.

L'aiuto significativo che questo dispositivo di sicurezza fornisce ai piloti nel controllo del velivolo in condizioni di emergenza lo rendono un sistema in dotazione standard del Lockheed C-130J *SuperHercules*. Considerando che le eliche del velivolo in questione hanno, di serie, un meccanismo di cambio di passo a circuito oleodinamico, anche l'*autofeather* sfrutterà la mandata di olio in pressione del propulsore per comandare il ritorno delle pale in configurazione neutra.

4.2 Soluzioni di feathering proposte

A partire da un dato sistema di gestione del passo delle pale possono seguire differenti soluzioni per realizzarne la messa in bandiera, pur rimanendo un dispositivo vincolato alle scelte progettuali precedenti.

4.2.1 Prerogative progettuali

In generale, come tutti i sistemi di emergenza, è necessario che l'*autofeather* sia estremamente affidabile e mantenuto in efficienza: questo significa che come risorsa emergenziale deve essere sempre disponibile ad entrare in uso e pertanto manutenuto a tale scopo. Per rispettare le prerogative affidabilistiche di tali condizioni di esercizio è necessario che:

- L'apparato che lo costituisce sia indipendente dalle avarie che possono interessare l'elica o il propulsore così da poter asservire il pilota in qualsiasi condizione operativa.
- Il sistema deve essere *normalmente attivo*; questo significa che in condizioni di ordinario funzionamento la messa in bandiera delle pale viene impedita dall'azione del sistema di cambio di passo, ma che ad una disfunzione di questo o della propulsione tale azione decade e la spinta verso la configurazione neutra prevale. Un accorgimento di questo tipo consente l'attivazione immediata della configurazione di sicurezza, senza dipendere dal tempo di attivazione e dalla prontezza di un sistema normalmente spento.
- La progettazione del sistema tenga conto dei concetti affidabilistici, in particolare che sia favorito il ricorso a sistemi meccanici (indipendenti da qualsiasi alimentazione elettrica) anziché elettromeccanici.
- Il sistema deve potersi integrare con le soluzioni adottate per il meccanismo di cambio di passo, sia dal punto di vista di ingombri e allocazione che dal punto di vista funzionale: la messa in bandiera deve necessariamente realizzarsi attraverso il sistema di cambio di passo in quanto è questo l'unico apparato che consente di movimentare le pale.

Le soluzioni che verranno proposte considereranno questi punti come propri cardini progettuali. Pertanto i sistemi di feathering che valuteremo saranno puramente meccanici, indipendenti (nel meccanismo di funzionamento) dall'alimentazione dell'elica, integrati con il sistema di cambio di passo e normalmente attivi, ovvero tali per cui il *feathering* delle pale entra in servizio qualora non vi sia un'azione di ritegno che le mantenga nella posizione di passo modificato.

4.2.2 Soluzioni proposte

Tutte le soluzioni di *autofeathering* proposte sono state progettate come dispositivi di sicurezza per movimentare le pale di fronte all'emergenza e, considerando che il sistema di cambio di passo è l'unico apparato dell'elica che regola la rotazione delle pale, la manovra di *feathering* deve realizzarvisi attraverso. Pertanto, vedremo che ognuna di queste è strutturata con l'obiettivo di controllare il movimento di un componente mobile del sistema, primario¹³ (corona conica centrale) o secondario (alberi di comando, radici pale) che sia, così che attraverso questo sia possibile operare il ritorno delle pale. In particolare verranno presentate due soluzioni ad azione su elementi secondari e altrettante su elementi primari: tra queste solo quelle ritenute più promettenti, verranno sviluppate e implementate sul modello dell'elica.

Feathering A La soluzione di *feathering* di tipo A (Figura 4.1a) considera l'aggiunta di una dentatura calettata sull'albero di comando di ogni pala, all'altezza della radice, ingranante con una cremagliera traslante. Limitando la traslazione della cremagliera con due elementi elastici di estremità vincolati al mozzo, questa, ad ogni spostamento orizzontale, è obbligata a tornare in posizione centrale o di *default*: attraverso l'ingranamento il ritorno elastico della cremagliera comporta il riposizionamento dell'albero di comando e di conseguenza della pala. Predisponendo al montaggio la corrispondenza tra la posizione centrale della cremagliera e la configurazione neutra delle pale, ad ogni modifica del passo (rotazione dell'albero di comando), se la posizione modificata delle pale non è mantenuta, le azioni elastiche di compressione e trazione riportano le pale automaticamente in bandiera.

Feathering B La soluzione di *feathering* B (Figura 4.1b) considera l'impiego di un sistema articolato a due aste le cui estremità agiscono, rispettivamente, sulla faccia frontale della radice e sul fondo del mozzo attraverso un vincolo di cerniera. Interponendo un elemento elastico calibrato tra la cerniera intermedia alle due aste e il fondo è possibile comandare il riposizionamento del sistema articolato, e quindi della pala, ad ogni azione di modifica dell'angolo di calettamento di questa. Anche in questo caso l'azione dell'elemento elastico interposto è prevalente e riporta in configurazione di *default* il sistema articolato e la pala in bandiera solo se viene meno il mantenimento della posizione modificata da parte del sistema di cambio di passo.

¹³La qualificazione di *primario* o *secondario* assegnata ad un componente del sistema di cambio di passo dipende se, rispettivamente, questo movimenta sincronicamente le pale nel complesso oppure ne movimenta una singola.

Feathering C La soluzione di *feathering* C (Figura 4.1c) considera l'introduzione di un sistema centrifugo a contrappesi che possa agire contemporaneamente su tutti gli alberi di comando. Nel complesso è costituita dalla combinazione di un meccanismo centrifugo, che rappresenta l'apparato di innesto della messa in bandiera, ed uno biella-manovella, che opera la manovra di *feathering* sugli alberi di comando. Il funzionamento dell'intero sistema è strettamente legato all'entità della rotazione dell'elica, in quanto l'innesto della manovra di riposizionamento dipende dalle azioni centrifughe esercitate sui contrappesi mobili: in assenza di propulsione motrice le masse pesanti non hanno più un sostegno centrifugo e determinano lo scorrimento della guida centrale, riposizionando di conseguenza le pale attraverso la biella agente sulla faccia degli elementi centrali.

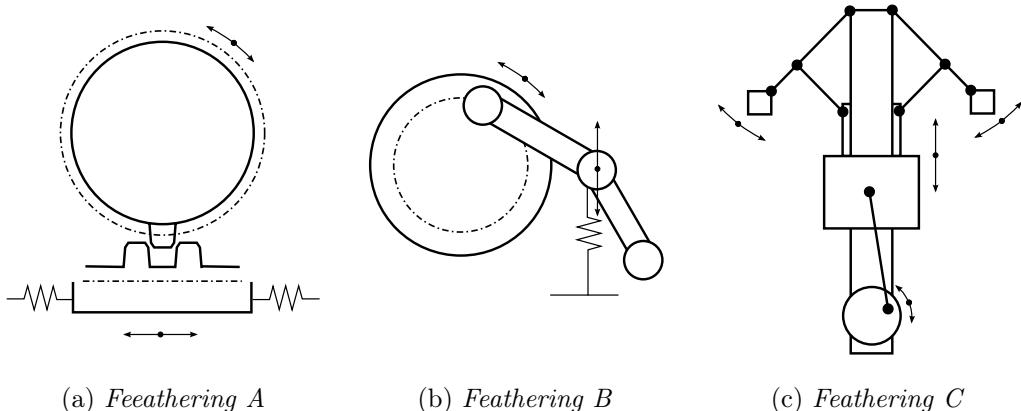


Figura 4.1: Schemi semplificati delle soluzioni di feathering

Feathering D La soluzione di *feathering* D (Figura 4.5) considera l'impiego di una camma a tamburo, con cava elicoidale, accoppiata con la corona di sincronizzazione. Vincolando la camma alla sola traslazione ogni rotazione della corona, dovuta alle manovre di cambio di passo, ne comporta uno spostamento rettilineo: le traslazioni assiali della camma causano la deformazione dell'elemento elastico interposto tra il fondo del mozzo e la medesima, generando il richiamo verso la posizione neutra. La spinta elastica, in assenza di azioni che possano mantenere la posizione modificata, tende quindi a riportare la camma nella configurazione di *default* o di montaggio determinando, attraverso l'accoppiamento elicoidale che vige fra i due, la rotazione della corona conica centrale: così facendo, se la posizione di *default* della camma è corretta, le pale sono riportate in bandiera.

4.2.3 Scelta delle soluzioni

Illustrate le soluzioni è necessario ora scegliere quelle più promettenti per poterle sviluppare nei dettagli. In generale si noti come ogni sistema schematizzato sia stato proposto come sviluppo del prototipo di elica introdotto con il capitolo precedente e che ogni soluzione sia stata pensata nel rispetto delle prerogative tecniche che ci eravamo prefissati: ogni sistema presentato è puramente meccanico, indipendente dall'alimentazione elettrica e normalmente attivo. Per poter scegliere le sottoponiamo ad un'analisi preliminare che tenga conto delle caratteristiche e problematiche di ognuna.

- (A) Come tutte le soluzioni che interessano elementi mobili secondari rappresenta un sistema ad elevata ridondanza, in quanto ogni albero di comando sarebbe interessato dal sistema di *feathering*: così facendo, a bene dell'affidabilità, anche il malfunzionamento di uno dei sistemi può essere sopportato dal contributo di quelli funzionanti attraverso la corona di sincronizzazione. D'altro canto la posizione di *default* della cremagliera è definita solo dalla corretta calibrazione degli elementi elastici: la posizione neutra è labile e può essere influenzata dalle azioni derivanti dalla rotazione dell'elica, oscillando attorno a quella corretta. Detto questo, pur avendo un vantaggio di ridondanza, la ripetizione del sistema per ogni pala comporta un elevato numero di componenti e il consumo di spazio non abbondante nella zona della radice per la presenza dei motori di manovra.
- (B) Come la precedente anche in questo caso la ridondanza del sistema può avvantaggiare l'affidabilità del complesso, ma allo stesso tempo incrementa il numero di pezzi, complicando l'organizzazione dell'interno del mozzo. D'altra parte il sistema articolato illustrato è poco pratico per lo scopo, sia in termini di regolazioni che di gestione: come per il precedente la posizione neutra è labile per via dell'elemento elastico.
- (C) Questa soluzione non controlla un organo mobile primario come è stato anticipato, ma può essere considerata come tale in quanto movimenta sincronicamente ogni albero di comando con un unico elemento, rendendola una soluzione ad elevata ridondanza. Nonostante implichi un maggior numero di componenti impiegati è studiata per occupare lo spazio libero nel mezzo del supporto centrale, limitando gli ingombri.
- (D) Come la precedente si sviluppa su spazio interno libero, ma a differenza di questa si integra nel movimento centrale, riducendo il numero di componenti e agendo direttamente dall'organo di sincronizzazione: verranno scelte per lo sviluppo.

4.3 Soluzione di feathering C

A seguito delle analisi preliminari a cui sono state sottoposte le soluzioni presentate, il sistema di *feathering* di tipo C è il primo che consideriamo valido per lo sviluppo e l'implementazione.

4.3.1 Elementi di manovra

In riferimento allo schema di Figura 4.1c si denota che il sistema di messa in bandiera di tipo C sia la combinazione di un sistema centrifugo a ritorno elastico, dedicato all'innesto della messa in bandiera, e da un sistema biella–manovella per l'esecuzione di questa.

Sistema elasto–centrifugo Il sistema centrifugo è caratterizzato da aste, denominate *centrifughe*, provviste di contrappesi di estremità e vincolate a ruotare attorno alle cerniere dell'albero centrale. Nella loro rotazione queste comandano la traslazione di un *collare premente* attraverso delle bielle intermedie o *aste prementi*. Il collare, scorrevole sulla superficie esterna dell'albero centrale, è normalmente mantenuto in spinta sull'anello scorrevole ad esso sottostante da un elemento elastico a molla (non rappresentato nello schema di figura), interposto tra il primo e la sommità dell'albero centrale.

Sistema biella–manovella Il sistema biella–manovella è l'apparato meccanico che si interfaccia con gli elementi mobili considerati da questa soluzione, ovvero gli alberi di comando. Di fatto, ogni biella collega l'anello scorrevole centrale con la faccia interna degli alberi di comando: ogni biella è incernierata alla faccia degli alberi di comando attraverso un perno mordente fuori centro. Così facendo gli alberi di comando si comportano da manovelle del sistema e le traslazioni che subisce il collare scorrevole si ripercuotono, sotto forma di rotazione, sulle pale.

4.3.2 Funzionamento della manovra

Nel complesso l'intero sistema di *autofeathering* basa il suo funzionamento sulle azioni centrifughe generate nella rotazione dell'elica. L'innesto della manovra, di fatti, è causato dall'assenza o dall'insufficiente intensità delle azioni gravanti sui contrappesi mobili: in tal caso la spinta elastica della molla di ritorno ha la meglio sul sistema centrifugo, obbligando il collare premente ad agire sull'anello scorrevole. Nel normale funzionamento, in cui l'elica ha un regime di rotazione rilevante, i contrappesi tendono a sollevare il collare premente, vincendo la resistenza elastica della molla e lasciando libero lo

scorrimento dell'anello, quindi la modifica del passo. Infatti, per come è costruito il sistema biella–manovella, una modifica dell'angolo di calettamento delle pale (rotazione degli alberi di comando) comporta la traslazione assiale dell'anello scorrevole verso il collare premente, anche invertendo le pale (in entrambi i sensi di rotazione). In conclusione il sistema possono manifestare due configurazioni di funzionamento:

- a. Se il regime di rotazione è consono al normale funzionamento le azioni centrifughe sui contrappesi richiamano il collare premente comprimendo l'elemento elastico e lasciando libera la modifica del passo delle pale (Figura 4.2a).
- b. Se il regime di rotazione, a causa di mancata propulsione o guasti all'elica, non è sufficiente per la compressione della molla di ritorno l'azione elastica ha il sopravvento e il collare premente riporta l'anello scorrevole in posizione di *default* (Figura 4.2b). Le condizioni di rotazione ridotta o nulla innescano quindi automaticamente la messa in bandiera, ripristinandola attraverso la configurazione di default dell'anello scorrevole che comanda le pale.

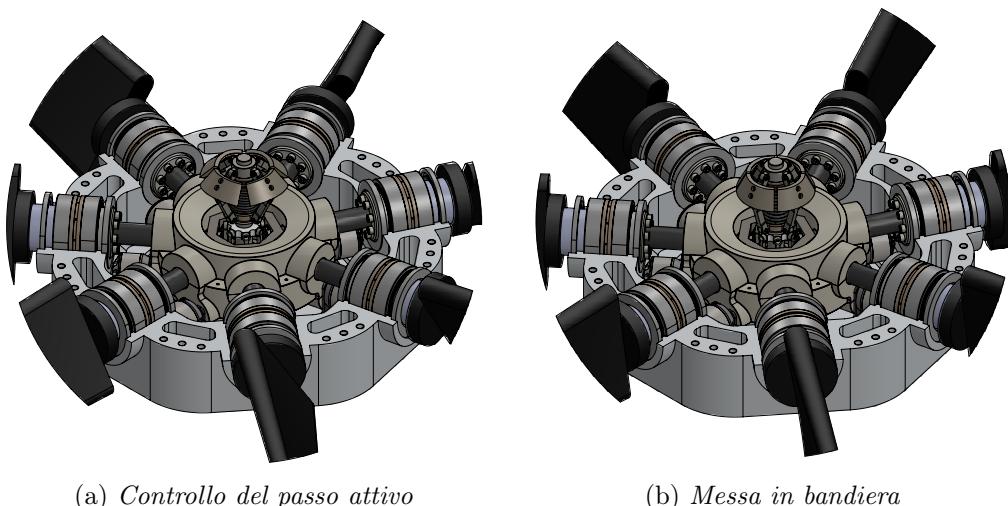


Figura 4.2: Configurazioni di funzionamento reali

Per come sono organizzate le due possibili configurazioni di funzionamento, in particolare per la presenza dell'elemento elastico di richiamo che deve essere compresso per permettere la libera modifica del passo, il sistema è normalmente attivo e completamente indipendente da qualsiasi tipo di alimentazione elettrica.

4.3.3 Implementazione

L'implementazione pratica del sistema descritto fino a questo punto non differisce di molto dallo schema funzionale illustrato in Figura 4.1: gli elementi di manovra precedentemente descritti in forma e funzionamento sono tutti presenti.

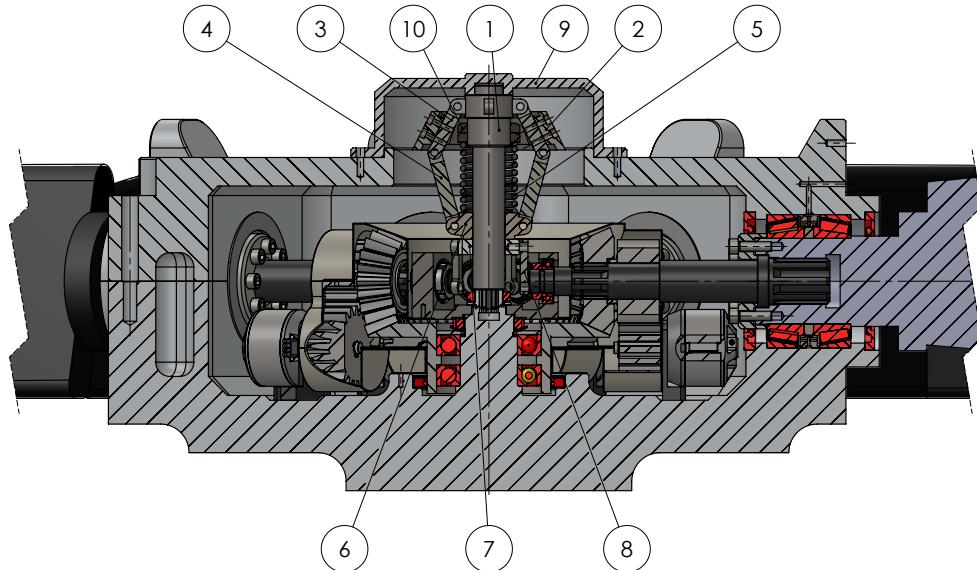


Figura 4.3: Implementazione della soluzione C

1	Albero centrale	2	Contrappesi
3	Asta centrifuga	4	Asta premente
5	Molla di ritorno	6	Collare premente
7	Anello scorrevole	8	Bielletta di collegamento
9	Coperchio <i>feathering</i>	10	Ghiera di serraggio

Tabella 4.1: Elementi di manovra del *feathering* C

Sistema centrifugo Nel processo di implementazione gli organi di innesci, ovvero i contrappesi, sono stati conformati e montati diversamente da quanto schematizzato. Invece di essere ricavati di pezzo sulle aste centrifughe, per esigenze di semplificazione della loro geometria, vengono implementati come elementi conici separati da imbullonare sulla loro superficie esterna, riducendo gli ingombri in configurazione aperta (Figura 4.2a). Restano fedeli

allo schema di funzionamento le aste, il collare premente e l'albero centrale, se non per minimi interventi di modifica dovuti alla loro realizzazione pratica e all'adattamento con il cestello. In particolare l'albero centrale è stato realizzato di modo che possa godere di un'allocazione stabile e rigida, permettendo lo scorrimento dei corpi mobili senza grippaggi: viene riferito assialmente da due spallamenti, uno sul mozzo e l'altro sul coperchio di feathering, e bloccato in rotazione da un accoppiamento scanalato. Nel complesso l'implementazione del sistema centrifugo comporta la creazione di un passaggio al centro del coperchio del cestello per poter consentire l'impiego dello spazio sovrastante: questo intervento non avrà risvolti sull'efficienza aerodinamica dell'elica in quanto l'intero mozzo sarà sovrastato dall'ogiva opportunamente conformata.

Sistema biella manovella A differenza dello schema funzionale l'anello scorrevole, che funge da stantuffo per il sistema, è realizzato di modo che ogni biella sia parallela alla corrispondente faccia dell'albero di comando con cui deve interagire: per questo motivo avrà una conformazione particolare (vedi Figura 4.4b) che permetta la corretta realizzazione del meccanismo di manovellismo di spinta (inverso).

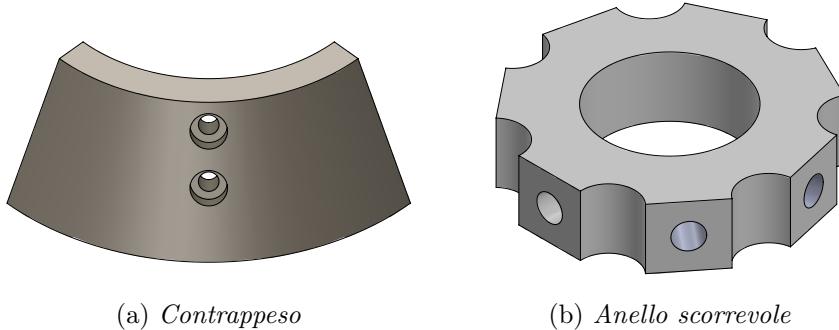


Figura 4.4: Dettaglio su elementi di manovra per *feathering C*

4.3.4 Caratteristiche e problematiche

La soluzione di *feathering* fino a qui illustrata è costituita da un complesso di soli componenti meccanici il cui principio di funzionamento è alla base della cinetica fisica: a vantaggio della sua affidabilità, questo fa sì che il sistema sia indipendente da alimentazioni o controlli elettronici. Avendo poi scelto la posizione di *default* dell'anello scorrevole, o condizione di passo neutro,

come punto morto inferiore del manovellismo di manovra, la messa in bandiera delle pale può essere svolta anche all'inversione del passo. Di fatti, per le proprietà di punto morto, qualsiasi modifica del passo, o meglio qualsiasi rotazione sull'albero di comando che costituisce la manovella, determina la risalita dell'anello scorrevole e quindi il medesimo comportamento del sistema a rotazioni inverse. C'è da aggiungere che questo tipo di disposizione potrebbe causare dei problemi di carico di punta sulle bielette al momento dell'esecuzione della manovra di messa in bandiera.

D'altro canto, pur avendo un semplice modello di funzionamento, il meccanismo proposto richiede un consistente quantitativo di componenti, influendo sull'efficienza della manovra e sul montaggio e costo del sistema. Nel complesso, oltre al contributo dovuto alla contemporanea movimentazione degli alberi di comando, anche il dispositivo centrifugo di innesci richiede un cospicuo uso di aste e contrappesi, i quali dovranno anche essere calibrati rispetto all'elemento elastico per prestabilire l'inizio della manovra in termini di regime di rotazione dell'elica.

Ancor più critica è l'impossibilità di intervento in condizioni di emergenza in cui l'avaria non interessa il regime di rotazione dell'elica. Nel caso di problemi di natura diversa da quella propulsiva, come la caduta di alimentazione elettrica per i motori di cambio passo o il malfunzionamento del loro controllo elettronico, la manovra di messa in bandiera non può essere eseguita a meno dell'arresto dell'elica interessata. Di fatto, avendo organizzato l'innesci in funzione del comportamento dei contrappesi alle azioni centrifughe, l'esecuzione della manovra sarà strettamente dipendente dall'entità della rotazione che le genera. Se questa modalità di intervento (arresto dell'elica) può essere tollerata per certi versi su un velivolo plurimotore, non è ammissibile in caso di propulsione singola. In generale si può concludere che la soluzione di *feathering* di tipo C, nonostante alcune sue importanti peculiarità, sia soggetta ad altrettanti elementi critici che ne mettono in dubbio la reale applicazione, soprattutto in vista di quest'ultimo problema di sicurezza e della complessità dell'insieme. Detto questo si ritiene necessario lo studio e lo sviluppo di una soluzione di messa in bandiera alternativa che possa beneficiare, almeno in parte, degli aspetti positivi della soluzione C, ma correggere o prevenire le sue limitazioni.

4.4 Soluzione di feathering D

A differenza di tutte le altre soluzioni proposte il sistema di *feathering* di tipo D adotta una soluzione integrata con il movimento centrale, riducendo gli ingombri e agendo direttamente sull'organo di sincronizzazione del cambio di passo.

4.4.1 Elementi e funzionamento della manovra

Per potersi integrare agilmente all'interno del complesso del movimento centrale, la soluzione di *fethering* di tipo D sfrutta un meccanismo con camma a tamburo che consente la trasformazione della traslazione assiale dell'elemento camma in una rotazione sullo stesso asse della corona sincronizzatrice. La camma, che si sviluppa con assialsimmetria, guida la rotazione della corona conica tra due valori limite di angolo di calettamento definiti dagli estremi della cava elicoidale percorsa dalla punteria: l'angolo di passo massimo (Figura 4.5a) e quello di passo neutro (Figura 4.5b).

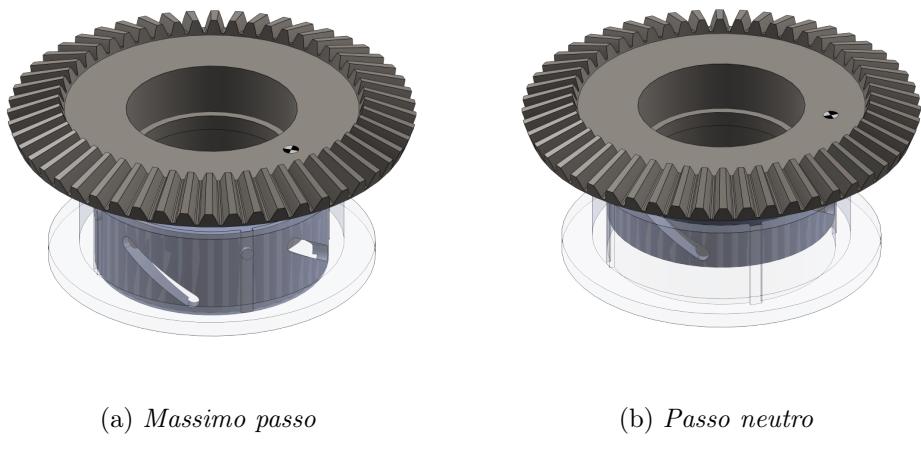


Figura 4.5: Configurazioni del sistema di *feathering* II

o sisteme combinatori può cambiare configurationi in funzione delle condizioni esterne.

Nel caso in cui sia possibile modificare la posizione dei pedali, quale fra i due organi sia promotore del moto:

- rotazione delle pale: è quindi la corona a determinare lo spostamento della camma attraverso i perni-punteria, ad essa solidali, impegnati sulle scanalature elicoidali.

- Nel caso generico in cui si comanda la messa in bandiera delle pale viene meno il mantenimento in posizione della corona e la traslazione di ritorno della camma, dovuta all'espansione elastica della molla sottostante, la riporta in configurazione di *default* o di passo neutro.

Riassumendo, la generica modifica del passo comporta la rotazione¹⁴ della corona centrale e quindi la traslazione della camma per la soluzione di *feathering* adottata: nel caso in cui la modifica del passo è condotta per allontanarsi dalla condizione di *default* si consegue nella compressione della molla di ritorno; nel momento in cui le azioni di ritegno della corona conica vengono meno (interruzione motori) la molla di ritorno si espande determinando la messa in bandiera.

4.4.2 Implementazione

L'implementazione pratica del sistema di *feathering* abbozzato in Figura 4.5 è sfidante dal punto di vista della sua integrazione all'interno del movimento centrale già completamente definito; d'altra parte questa filosofia di fusione dei due sistemi ci consente di minimizzare gli ingombri senza stravolgere il progetto definito prima dell'introduzione di questa manovra di sicurezza.

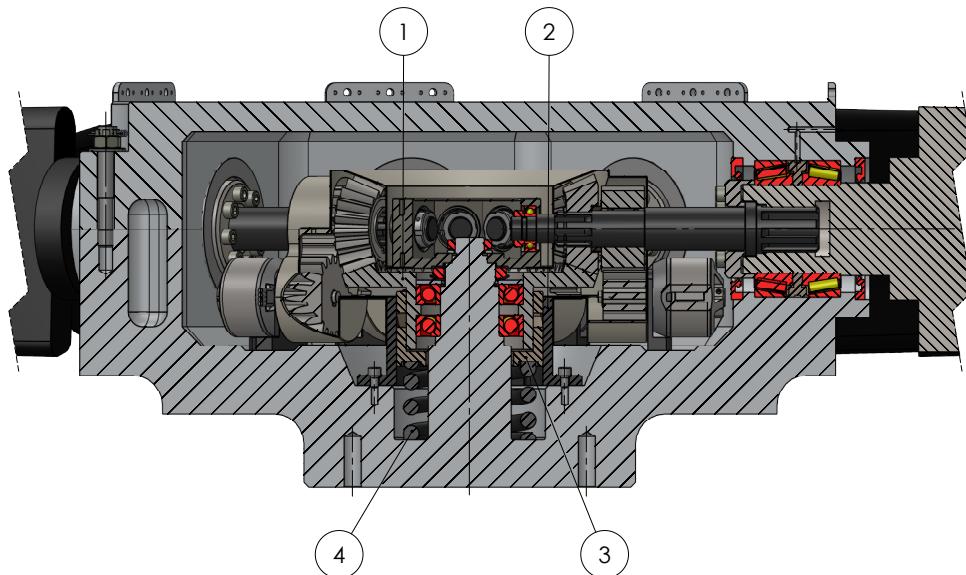


Figura 4.6: Implementazione della soluzione C

¹⁴In Figura 4.5 il centroide sulla superficie della corona consente di visualizzare l'intervallo di spostamento angolare della corona durante le manovre.

Rispetto al prototipo precedentemente illustrato, l'implementazione pratica, riportata in Figura 4.6 in configurazione di messa in bandiera, non si discosta di molto se non per gli adattamenti di mozzo e carter rispetto alla soluzione precedente. In particolare, anche dalla distinta in Tabella 4.2, si denoti la minima quantità di componenti necessari a realizzare il sistema nel complesso. L'elemento camma è nel complesso il componente che guida la

1	Corona conica	2	Collare guida
3	Camma	4	Molla di ritorno
5	Perno-punteria		

Tabella 4.2: Elementi di manovra del *feathering C*

manovra e trasmette le azioni di messa in bandiera, ovvero le azioni di risalita che obbligano la corona conica a ruotare in posizione neutra. Pertanto, la camma deve essere progettata assicurandosi che l'elicoide su cui è costruita l'asola guida consenta di coprire l'intervallo angolare di configurazioni di passo utili: queste generalmente spaziano tra la messa in bandiera e la posizione antecedente l'inversione del passo. Definita la geometria funzionale alla guida della manovra, è necessario che il fondo della camma, rispetto al prototipo schematizzato, sia adatto a controllare la compressione ed espansione della molla di richiamo; allo stesso tempo, l'anello su cui poggia la molla deve essere ben disegnato affinché nella risalita la camma non urti il fondo della corona circolare.

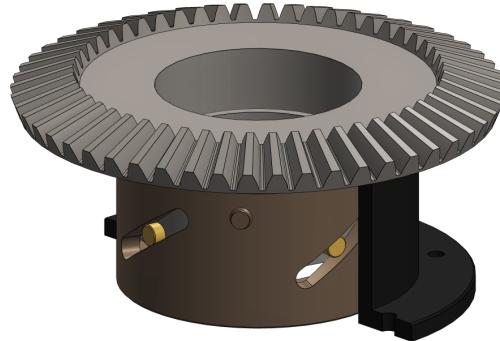


Figura 4.7: Dettaglio sull'accoppiamento camma–punteria

Per adesso abbiamo considerato che la camma sia vincolata a traslare assialmente, ma questo non è assicurato con il solo accoppiamento camma–punteria considerato. Affinché non segua la corona conica nella rotazione,

la camma deve essere affiancata da un collare che la guida nel moto assiale, permettendole di trasmettere alla corona solo la quota parte del moto della rotazione: nella pratica la camma è dotata di pezzo di una sporgenza superficiale circolare che si accoppia con una scanalatura realizzata sul collare solidale al cestello. Oltre a costituire l'elemento guida, il collare è estremamente rilevante per l'orientamento di montaggio della camma: affinché la configurazione di *default* o di montaggio (a molla estesa) corrisponda alla messa in bandiera è determinante l'orientamento planare di questo supporto. Di conseguenza, nella fase di montaggio, è importante dedicare attenzione a come posizionare il collare guida sui fori predisposti sul fondo del mozzo.

A differenza della Figura 4.6 in cui è rappresentata la configurazione di messa in bandiera, in Figura 4.7 è possibile osservare il perno di camma impegnato nella scanalatura elicoidale, in precedenza coperto. Quest'ultimo, a causa delle necessità di montaggio che hanno i componenti del sistema di *feathering* in questa soluzione, non può essere ricavato di pezzo sulla superficie esterna della corona conica, ma dovrà essere aggiunto come pezzo a se stante. In questo caso tutti i perni di camma sono inseriti con accoppiamento forzato sulle apposite cave ricavate sulla superficie esterna della corona.

4.4.3 Caratteristiche e problematiche

La soluzione di *feathering* D rappresenta l'ottimale compromesso tra integrazione dei sistemi e semplicità di funzionamento. Se la sua implementazione ha richiesto una maggior attenzione per poterlo introdurre all'interno del preesistente modulo centrale, il risultato finale ci consente di ridurre notevolmente gli ingombri, soprattutto rispetto alla soluzione precedente, e di comandare la messa in bandiera direttamente dalla corona di sincronizzazione. L'accesso diretto all'organo del meccanismo di cambio del passo ci consente di eseguire la messa in bandiera di tutte le pale contestualmente senza avere organi intermedi a complicare il meccanismo. D'altro canto, questo approccio diretto limita l'affidabilità del sistema al funzionamento di un singolo meccanismo di manovra: diversamente, le altre soluzioni potevano contare su più elementi, uno per ogni albero, che nel complesso garantivano la messa in bandiera anche nel caso in cui uno di questi veniva meno. Per sopprimere in parte a questa tematica, che può essere in parte rilevante trattandosi di un sistema camma–punteria, l'elemento camma è strutturato su quattro cave di scorrimento elicoidale con altrettanti perni–punteria. In particolare, l'accoppiamento tra perni e cave è di tipo strisciante e non volvente per ridurre l'introduzione di nuovi componenti in una zona di dimensioni già ridotte al minimo. Detto questo, il dimensionamento dei perni e delle loro sedi di accoppiamento dovrà essere condotto con particolare attenzione affinché questi

possano sopportare le sollecitazioni dovute all'azione di messa in bandiera. I perni sono infatti l'organo più sollecitato in quanto devono trasmettere l'azione elastica di risalita alla corona centrale che ruoterà di conseguenza.

In generale il ridotto ingombro offerto da questa soluzione, che si integra agevolmente nel progetto originale, privo di soluzioni di *feathering*, senza l'impiego di un quantitativo eccessivo di pezzi e agendo direttamente sull'organo di movimentazione principale, ci permette di concludere il sistema così congegnato sia la scelta migliore¹⁵ per implementare un'importante misura di sicurezza quale la messa in bandiera.

¹⁵Per questo motivo tutte le immagini presentate nell'elaborato hanno sempre fatto riferimento alla soluzione di *feathering C*

Capitolo 5

Conclusioni

Lo studio e l'attività di progettazione che sono stati condotti nei capitoli precedenti si concludono avendo definito, come obiettivo dell'elaborato, i principali dettagli che caratterizzano i sistemi di un'elica a passo variabile con messa in bandiera automatica. La soluzione redatta rappresenta, di fatto, l'ottimo tra i complessi elettromeccanici che possano soddisfare le nostre prerogative, sia per il sistema di cambio di passo che per quello di messa in bandiera. Il processo creativo/progettuale condotto per stilare le specifiche di prodotto, o meglio le migliori strutture tecniche da adottare, non hanno tenuto conto di simulazioni dinamiche o verifiche dimensionali proprio per lo scopo esplorativo di questo lavoro. Il nostro impegno si è concentrato infatti sullo sviluppo di una soluzione tecnica di massima, ma con sufficiente dettaglio da poter definire i meccanismi e i sistemi specifici del caso, oltre a ingombri e forme. Nel complesso il compromesso tecnico raggiunto, seppur non verificato al dimensionamento, rappresenta un'importante innovazione nell'ambito dei sistemi di cambio di passo, in quanto permette di adattare una soluzione normalmente utilizzata per velivoli ultraleggeri a mezzi commerciali pesanti che sul mercato odierno impiegano tutt'altre soluzioni. Adattando l'uso dei motori elettrici alla gestione del passo di velivoli commerciali come il Lockheed C-130J *SuperHercules* ci ha permesso di studiare un sistema a rotismi che supera i meccanismi a circuito idraulico di uso comune in leggerezza (numero degli organi), semplicità costruttiva e precisione. Di pari passo si comporta il sistema di messa in bandiera adottato: completamente meccanico limita i componenti necessari agendo sui principali organi di manovra delle pale. Oltre all'innovazione in termini di efficienza e peso è particolarmente rilevante l'elevato livello di apparati completamente meccanici, specialmente nel sistema di *feathering*, che garantiscono, seppur su base teorica, un elevato grado di affidabilità per il meccanismo.

Gli apparati meccanici impiegati, nonostante detengano un elevato livello di innovazione per il loro ambito di applicazione, potrebbero presentare delle criticità in fase di funzionamento sugli elementi accoppiati, in particolare quelli striscianti, che in uno studio di massima non possono essere valutate. Per questo motivo è importante che futuri spunti operativi sul progetto prendano in considerazione simulazioni dinamiche, combinate o asincrone, oltre ai diversi processi di dimensionamento e verifica preliminari. Alcuni degli elementi maggiormente sollecitati, specialmente i cuscinetti di pala e i perni-punteria di *feathering*, potrebbero infatti andare in crisi durante l'esercizio non avendoli sottoposti a verifica per i carichi che devono assolvere. Proprio in vista di un possibile aggravio delle azioni agenti rispetto alle previsioni di massima abbozzate, futuri sviluppi, potranno vedersi obbligati a seguire soluzioni in parte differenti da quelle descritte (ad esempio l'uso di un cuscinetto assiale combinato con due obliqui sulle pale) per le esigenti entità di carico. Al di là delle dovere prove resistenziali, che rappresenteranno il fulcro di eventuali interventi nell'avvenire, è importante sottolineare, come parte rilevante del contributo innovativo che caratterizza questo ambizioso progetto, i progressi raggiunti nel processo di montaggio del complessivo. L'organizzazione dei moduli che compongono il sistema elica, coadiuvata dalla semplicità di funzionamento dei suoi apparati meccanici, hanno permesso il conseguimento di risultati inaspettati, rispetto alle soluzioni concorrenti sul mercato, in termini di accessibilità manutentiva. La modularità multilivello dell'assieme, sviluppata con la soprintendenza del sistema CAD, concede il facile accesso ai principali organi da manutenere con maggiore frequenza attraverso la rimozione di alcune coperture protettive o di interi blocchi funzionali. Questo tipo di assetto organizzativo è la diretta conseguenza dell'approccio modulare tenuto durante la progettazione dei sistemi, oltre al frequente uso di componenti commerciali: in generale il numero limitato di pezzi e il raggruppamento in macro-sistemi abbatte i tempi di montaggio o accesso ai particolari critici rispetto ai sistemi concorrenziali a circuito idraulico.

Per finire l'aggiunta del sistema di messa in bandiera, in qualità di importante strumento di emergenza, completa l'elica dal punto di vista tecnico e commerciale. In aggiunta, adottando l'ultima soluzione presentata, la manovra si completa con efficacia e affidabilità, senza incorrere in soluzioni con un elevato quantitativo di componenti o con l'introduzione di sistemi elettronici: la sua integrazione all'interno del modulo centrale è l'ultima prova dell'approccio modulare che è stato tenuto lungo tutto lo sviluppo del progetto. Future evoluzioni o sperimentazioni sul prototipo di elica raggiunto potranno interessare lo sviluppo delle soluzioni di *feathering* scartate, in particolare quella centrifuga, cercando di risolvere le criticità che le hanno sfavorite a

confronto con la soluzione con camma a tamburo.

Bibliografia

- [1] Wikipedia. *Elica — Wikipedia, L'enciclopedia libera.* 2021. URL: <https://it.wikipedia.org/wiki/Elica>.
- [2] Wikipedia. *Elica a passo variabile — Wikipedia, L'enciclopedia libera.* 2021. URL: https://it.wikipedia.org/wiki/Elica_a_passo_variabile.
- [3] EASA. *Dowty Propellers R391 series propellers.* EASA.P.087. Rev. 3. Dic. 2018. URL: https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/TCDS%20P.087%20Issue%2003_11.12.18.pdf.
- [4] SKF. *Cuscinetti volventi.* PUB BU/P1 17000/1 IT. Ago. 2021. URL: <https://www.skf.com/it/products/rolling-bearings>.
- [5] Luigi Caligaris, Stefano Fava e Carlo Tomasello. *Manuale di Meccanica.* 2^a ed. Milano: Hoepli, 2016.
- [6] MOLYKOTE. *Products: Gear, Gearboxes and Pumps.* 2021. URL: <https://www.dupont.com/molykote/gears-gear-boxes-pumps.html>.
- [7] MOLYKOTE. *MOLYKOTE D-7409 Anti-Friction Coating.* 80-3466B-01 (07/19) AGP16093. Lug. 2019.
- [8] MOLYKOTE e Dow Corning. *Anti-Friction Coatings Selection Guide.* 71-0250B-01. 2004. URL: <https://www.generaladhesivos.com/catalogo-pegamento/molykote-anti-friction-coatings-selection-guide.pdf>.
- [9] Southcho. *Soluzioni tecniche per l'accesso.* 201508-HB-IT. Ago. 2015. URL: <https://files.southco.com/static/documents/marketing/hb65/it/index.html#p=427>.
- [10] Wikipedia. *Ogiva — Wikipedia, L'enciclopedia libera.* 2021. URL: <http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Ogiva&oldid=123648125>.