

SCUOLA DI INGEGNERIA

- Sede di Bologna -

Corso di Laurea in
INGEGNERIA MECCANICA

Classe LM-33

TESI DI LAUREA

In Ingegnerizzazione del prodotto M

Design for Repair: ottimizzazione metodologie e caso di studio sottogruppo meccanico.

CANDIDATO:

Davide Bove

RELATORE:

Prof. Daniela Francia

CORRELATORI:

Prof. Alfredo Liverani
Ing. Gian Maria Santi

SESSIONE I

Anno Accademico 2021 - 2022

Abstract

Negli ultimi anni si è visto un forte segnale di cambiamento culturale indirizzato verso la sostenibilità affermando sempre più efficacemente i concetti di riciclaggio, riduzione e riutilizzo.

Finora il design dei prodotti si è concentrato su aspetti che sfavorivano tale approccio e piuttosto si ponevano come specifica quella di definire a priori la vita del prodotto. Infatti, si sono sempre più sviluppate tecniche di accoppiamento delle parti che una volta accoppiate non consentivano più il disassemblaggio di queste.

L'obiettivo di tale elaborato è stato quello di definire, nella famiglia di metodologie chiamata Design for X, un criterio che possa valutare e guidare la progettazione in ottica più mirata verso la riparabilità del prodotto "*Design for Repair*". Aumentare la riparabilità del prodotto vuol dire poter aumentare la sua longevità, così da non avere la necessità di sostituirlo con un componente nuovo causando un impatto ambientale doppio, ossia la mancata necessità sia di sfruttare risorse per la realizzazione del sostituto sia di non dover occuparsi del processo di smaltimento del prodotto sostituito.

1	Introduzione.....	5
2	Descrizione del metodo.....	7
2.1	<i>Descrizione metodo per prodotti da realizzare.....</i>	<i>7</i>
2.2	<i>Descrizione metodo per prodotti già esistenti.....</i>	<i>9</i>
3	Analisi del metodo	10
3.1	<i>Distinta base.....</i>	<i>10</i>
3.2	<i>Affidabilità.....</i>	<i>11</i>
3.2.1	<i>Stima del failure rate.....</i>	<i>17</i>
3.3	<i>FMEA Failure mode and effects analysis.</i>	<i>20</i>
3.4	<i>Criteri e consigli re-design. [11].....</i>	<i>24</i>
3.4.1	<i>Standardizzazione e Intercambiabilità.....</i>	<i>24</i>
3.4.2	<i>Modularità.....</i>	<i>25</i>
3.4.3	<i>Accessibilità.....</i>	<i>26</i>
3.5	<i>Metodi di disassemblaggio.....</i>	<i>28</i>
3.5.1	<i>Mitrouchev method. [13].....</i>	<i>28</i>
3.5.2	<i>Jianjun method. [14].....</i>	<i>32</i>
3.6	<i>Qualifica delle Tempistiche.....</i>	<i>35</i>
3.6.1	<i>Tempi Standard Predeterminati.....</i>	<i>35</i>
3.6.1.1	<i>MTM.....</i>	<i>36</i>
3.6.2	<i>MIL-HDBK-472.....</i>	<i>38</i>
4	Applicazione del metodo DfR	38
4.1	<i>Descrizione del componente.....</i>	<i>38</i>
4.2	<i>Ricerca dei sottoassiemi da analizzare.....</i>	<i>40</i>
4.3	<i>Analisi delle criticità del riduttore.....</i>	<i>41</i>
5	Modellazione tramite Reverse Engineering.....	47
6	Calcolo tempi disassemblaggio.....	52
6.1	<i>Applicazione Jianjun Method. [14].....</i>	<i>56</i>
6.2	<i>Mitrouchev Method. [13].....</i>	<i>59</i>
6.3	<i>Stima Tempistiche.....</i>	<i>61</i>

7	Re-Design riduttore turbina eolica	62
7.1	<i>Re-Design focalizzato sulla modularità</i>	<i>62</i>
7.2	<i>Re-design focalizzato sull' accessibilità</i>	<i>65</i>
8	Calcolo tempi disassemblaggio.....	66
8.1	<i>Metodi di disassemblaggio Re-Design Modulare</i>	<i>66</i>
8.1.1	Applicazione Jianjun Method al Re-Design Modulare. [14]	68
8.1.2	Applicazione Mitrouchev Method al Re-Design modulare. [13]	69
8.1.3	Calcolo Tempi Disassemblaggio Re-Design Modulare	71
8.2	<i>Metodi di disassemblaggio Re-Design Accessibile.....</i>	<i>71</i>
8.2.1	Applicazione Jianjun Method al Re-Design Accessibile. [14]	73
8.2.2	Applicazione Mitrouchev Method al Re-Design Accessibile. [13]	75
8.2.3	Calcolo tempi Re-Design Accessibile.....	77
9	Risultati e confronto.....	78
10	Conclusioni.....	82

1 Introduzione

La crescente sensibilizzazione da parte della società verso le tematiche sostenibili come il riciclo e il riuso, e quindi in generale la riduzione dell'utilizzo delle risorse, non può passare inosservata a chi deve pensare in primis ai prodotti che la società deve utilizzare, prodotti appartenenti ad ogni fascia di mercato. Infatti, le parole citate in precedenza quali *riduzione*, *riciclo* e *riuso* sono i capisaldi di un'economia futura più votata alla sostenibilità

Per tale motivo, per quanto riguarda prodotti destinati a tipologie di mercato B to C (Business to Customer) le aziende iniziano già a ideare prodotti più sostenibili poiché richiesti e apprezzati dalla sensibilità della clientela, mentre in tipologie di mercato B to B (business to business) tali aspetti di sostenibilità non sempre vengono attuati.

Spesso si sceglie di sostituire un componente invece che ripararlo. Tale scelta risulta essere la più rapida e veloce, così da ridurre il più possibile il down-time del prodotto. Tale sostituzione genera quindi un rifiuto, il quale deve essere smaltito, e l'immissione nel mercato di un nuovo prodotto equivalente, se non identico.

Stiamo parlando di componenti più o meno complessi i quali vengono sostituiti a fronte di un mal funzionamento di una sola parte o un ristretto gruppo di parti che costituiscono l'intero assieme, facendo diventare "scarto" anche i componenti che svolgono ancora il loro compito.

Tale approccio innesca la necessità di realizzare da zero, per il nuovo assieme, parti che funzionavano correttamente sul vecchio quindi praticamente con un utilizzo doppio delle risorse necessarie quali materie prime ed energie.

Negli ultimi anni la reperibilità delle materie prime più utilizzate nell'ambito della meccanica quali leghe di alluminio e acciaio è diminuito a fronte di una domanda incalzante che ne ha causato un'elevata crescita dei prezzi. Tale fenomeno oltre a essere stato favorito da una ripresa del comparto industriale dopo i primi duri colpi della pandemia è stato ulteriormente favorito dagli scenari geopolitici instabili che si sono venuti a manifestare alle porte dell'Europa.

Tale situazione, oltre al costo puro delle materie prime ha fatto sì che aumentassero velocemente anche i costi energetici che già avevano fatto segnare trend più che positivi.

Di seguito viene mostrato il grafico che riporta il prezzo dell'alluminio che ci può aiutare a capire quale sia il trend che si è venuto a generare negli ultimi anni.

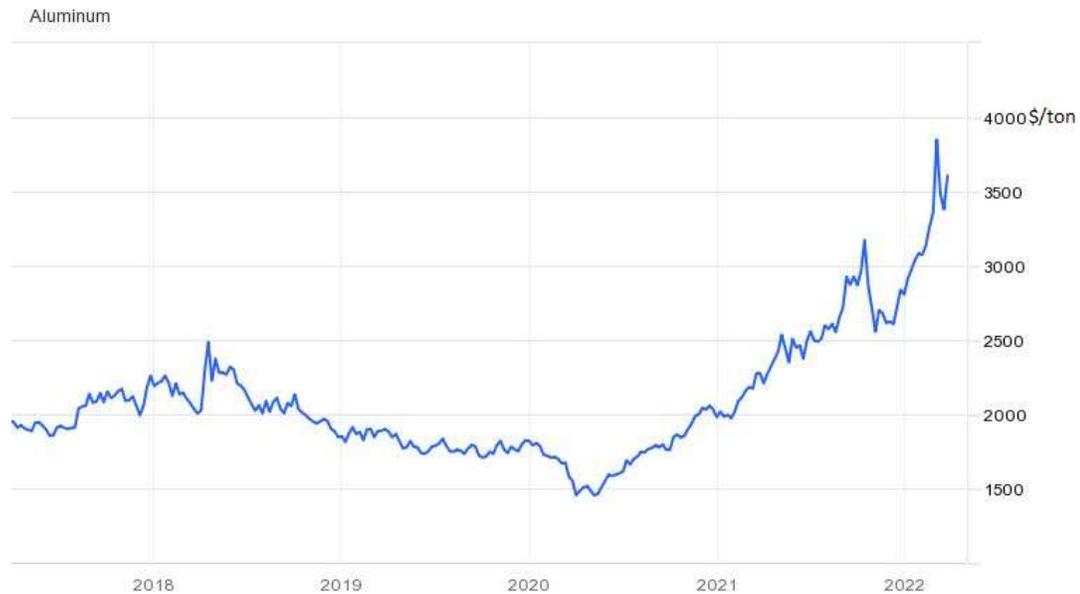


Figura 1- Andamento prezzo alluminio [1]

A mio avviso tale situazione potrebbe favorire la filosofia delle riparazioni in ambito meccanico, poiché consentirebbe il riutilizzo di molte parti del prodotto, le quali svolgono ancora egregiamente il loro compito senza dover essere smaltite e riprodotte per andare ad equipaggiare il nuovo componente con un sempre più elevato risparmio di materiali, energia e quindi i costi ad essi associati

Quindi quello che descrivo in questa tesi è una metodologia che consenta di valutare il design del prodotto in funzione della sua riparabilità, e nel caso valutare l'efficacia di design alternativi sotto tale aspetto.

Per far ciò bisogna andare a identificare quali possano essere i punti deboli del prodotto, in caso di rottura valutare differenti design del prodotto che

possano favorirne la riparazione misurando l'efficacia di tali design in funzione dei costi dell'intervento di riparazione e della complessità del nuovo design ideato.

Per garantire la funzionalità e la sicurezza dei componenti questi devono essere sempre riparati da persone qualificate, che ne possano garantire il corretto funzionamento e sicurezza a posteriori.

Inoltre, le aziende potrebbero iniziare a favorire servizi di sostituzione dei loro prodotti con altri rigenerati (cioè prodotti riparati e forniti in sostituzione di un componente rotto, il quale diventerà un componente rigenerato a sua volta) così da ridurre la produzione ex novo, ridurre costi derivanti dall'energia e dalle materie prime per le nuove realizzazioni fino ad avere una elevata mole di dati sulle criticità dei propri prodotti. In alcuni paesi, come la Svezia, si sta pensando di favorire la riparazione dei prodotti attraverso la detassazione, in modo da rendere sempre più conveniente per le aziende riparare i prodotti a fronte di realizzarli ex novo. [2]

2 Descrizione del metodo

Possiamo andare ad indentificare due strade parallele ma differenti da poter seguire a seconda che il prodotto sia da realizzare o se si voglia operare un re-design per migliorare la riparabilità di un componente già esistente.

2.1 Descrizione metodo per prodotti da realizzare.

Nel caso in cui ci trovassimo di fronte ad un nuovo prodotto in una fase piuttosto avanzata del progetto in cui siano definiti tutti i componenti da utilizzare e le varie specifiche sia del progetto che del prodotto è possibile andare a seguire il seguente approccio.

Definiti i differenti componenti e quindi avendo sviluppato una *distinta base* del prodotto è possibile andare a trovare un discriminante che identifichi su quali componenti andarsi a concentrare. Per far ciò si è pensato di analizzare l'affidabilità delle differenti parti per andare a identificare i componenti che possano presentare rotture più frequenti ed inaspettate.

Nel caso di prodotti in fase di progettazione non sempre si hanno dati relativi alle cause di rotture. Inoltre, sono da considerare anche i possibili danni che l'eventuale rottura del componente possa causare ad altri componenti del prodotto e quindi pensare di intervenire anche sotto questo punto di vista. Per far ciò si possono utilizzare i metodi FMEA (Failure Method Effect and Analysis)

A fronte delle osservazioni fatte è possibile andare a valutare le differenti tipologie di design andando prima a definire delle sequenze di disassemblaggio attraverso metodi quali quelli proposti da Mitrouchev e Jianjun e successivamente andando a valutare le tempistiche di tali operazioni con lo scopo di ridurre il tempo di inutilizzo del prodotto. Infatti, possiamo dire che il down time è uno dei fattori principali che spesso può giustificare una sostituzione a fronte di una riparazione, poiché il costo del fermo potrebbe risultare superiore a quello del componente stesso. Per ridurre gli sprechi in quest'ottica, come accennato in precedenza, e ridurre il down time, le aziende potrebbero proporre componenti rigenerati.

Flow chart:

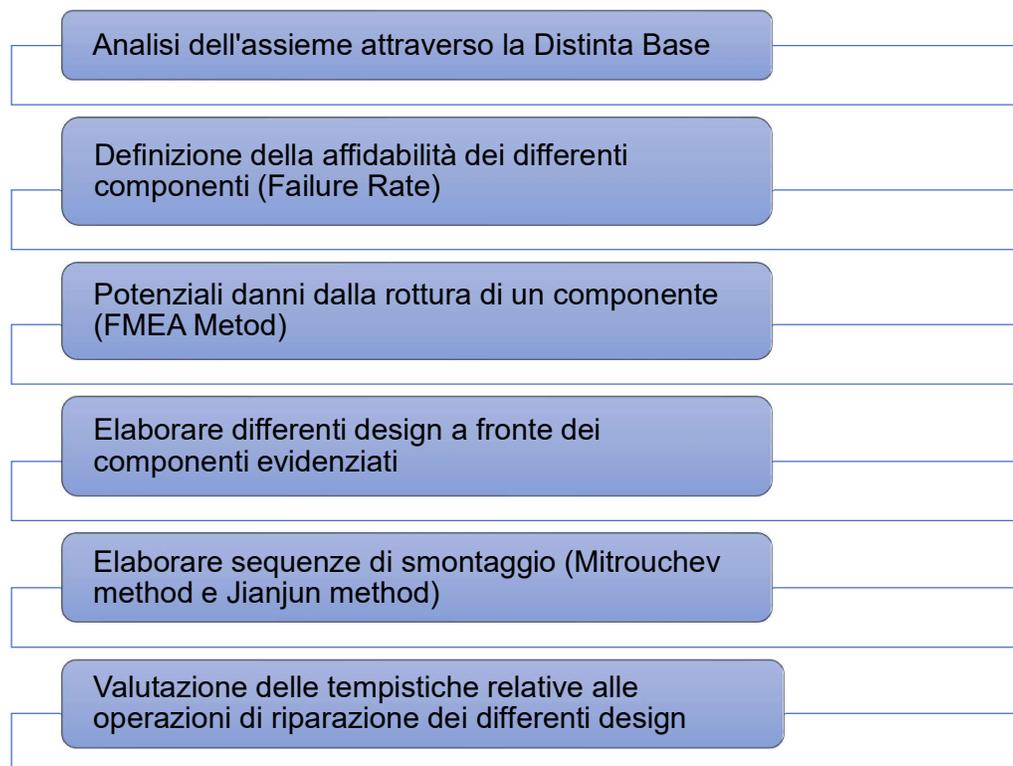


Figura 2 -Flow chart metodo prodotti ex novo

2.2 Descrizione metodo per prodotti già esistenti

A differenza del ragionamento precedente, in questo caso abbiamo un prodotto già immesso sul mercato e quindi ci proponiamo come obiettivo quello di ridurre i tempi necessari alla sua riparazione, andando a studiarne le caratteristiche.

Come per il paragrafo precedente il primo aspetto che bisogna andare ad analizzare è la *Distinta Base* del prodotto per andare a identificare tutti i componenti che lo costituiscono. Analizzati i componenti che costituiscono il prodotto si utilizza lo stesso discriminante per andare a identificare la zona o le zone su cui andare a porre la propria attenzione, utilizzato in precedenza. Quindi si va ad analizzare il failure rate dei vari componenti. In questo caso siccome il prodotto è già stato immesso nel mercato potremmo avere direttamente informazioni sulle prestazioni affidabilistiche dei differenti componenti e nel caso anche stime collegati ai down time (tempi di inutilizzo del prodotto) causate dai differenti guasti per capire al meglio su quale componente andare a concentrarsi.

A questo punto si procede in maniera simile a quanto specificato in precedenza: si compara il design del prodotto in commercio con una possibile alternativa che abbia come scopo la riduzione del tempo di riparazione. La sequenza di smontaggio e riparazione ed i tempi ad essi associati vengono valutati come descritto in precedenza.

La sostanziale differenza tra i due casi è da evidenziare sul fatto che per un prodotto già commercializzato è possibile avere una mole di dati che possano già identificare quali siano i suoi punti deboli per failure rate e down time potenziali così da andare ad intervenire in maniera più specifica. A tal proposito una politica aziendale di ritiro del prodotto guasto, sostituzione immediata del componente con uno rigenerato, oltre ad avere un aspetto interessante per quanto riguarda i costi e i tempi di risposta offerti al cliente, permetterebbe alla azienda stessa di acquisire sempre più dati di buona qualità (perché rilevati direttamente con i propri standard) sulle criticità del proprio prodotto e consentirne un miglioramento continuo.

Flow chart:

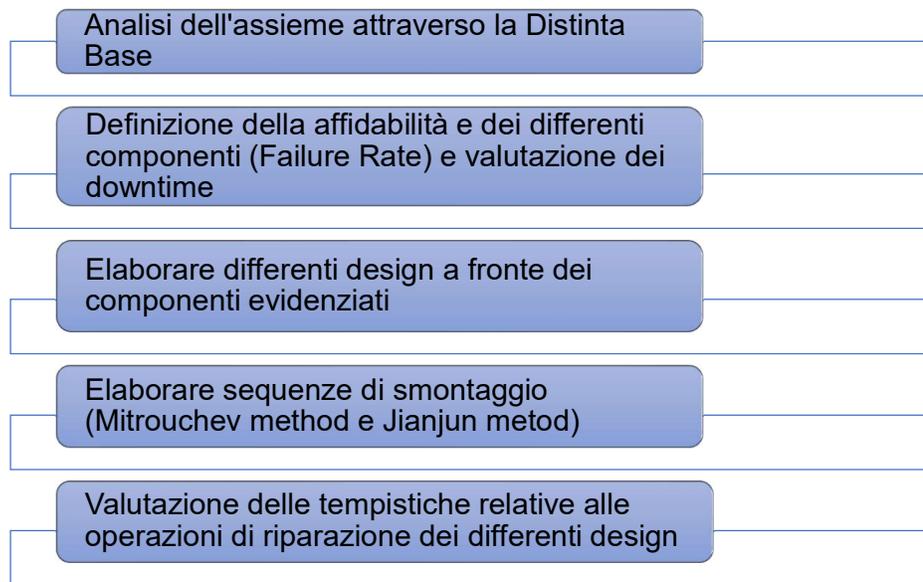


Figura 3- Flow chart prodotti esistenti

3 Analisi del metodo

3.1 Distinta base

La distinta base (DiBa) o Bill of Material (BOM) può essere definita in maniera molto diretta ed esemplificativa come un elenco dei vari componenti che costituiscono il prodotto. Tale elenco risulta essere indispensabile nelle varie fasi della vita del prodotto dalla progettazione alla realizzazione e soprattutto nelle fasi di approvvigionamento del materiale.

La distinta base stabilisce, mediante i numeri di posizione, un legame biunivoco tra i componenti e le informazioni che completano la distinta stessa. [3]

La struttura della distinta base è direttamente collegata alla complessità del prodotto:

- Distinta base a livello singolo: utilizzata per la realizzazione di prodotti dalla bassa complessità quindi quando il prodotto si compone di pochi elementi

- Distinta base a più livelli: utilizzata per componenti più complessi, identifica in maniera chiara e univoca anche le relazioni che possono esserci tra i vari assiemi e sottoassiemi. [4]

Esistono differenti tipologie di BOM a seconda del loro utilizzo:

- *Distinta base tecnica* (Engineering Bill of Materials) che contiene le informazioni necessarie per la progettazione e viene sviluppata durante le fasi di definizione del prodotto.
- *Distinta base di produzione* (Manufacturing Bill of Material) strutturata secondo l'ordine di costruzione o di montaggio, contiene le informazioni utili alla produzione. Le informazioni in tale tipologia di DiBa possono essere anche relative all'imballaggio del prodotto.
- *Distinta base di collaudo e manutenzione* (Service Bill Of Materials) ovvero un elenco di materiali di servizio necessari per le fasi di installazione e riparazione, nonché tutti i componenti riparabili di cui un servizio tecnico deve disporre per garantire il corretto funzionamento di un prodotto. [5]

3.2 Affidabilità

Per andare a comprendere il discriminante che ci serve per identificare i componenti su cui ci interessa concentrarci del nostro prodotto dobbiamo andare a riprendere alcuni concetti della teoria affidabilistica.

Definiamo i concetti di componente e sistema che verranno richiamati nella teoria:

- **Componente:** Oggetto di cui conosco il comportamento al guasto.
- **Sistema:** Assieme di differenti componenti al quale riesco ad attribuire il comportamento al guasto derivandolo dal comportamento dei singoli componenti.

Indichiamo con t_{fi} l'*i*-esimo time to failure cioè il tempo esatto in cui si verifica la rottura del componente, ovviamente tale quantità è un valore aleatorio.

Indichiamo con $f(t)$ la funzione densità di probabilità del guasto con:

$$f(t) * \Delta t = P(t < t_{tf} \leq t + \Delta t), \text{ con } (t \geq 0)$$

Equazione 1

La probabilità che il guasto avvenga nell' intervallo $t;t+dt$. Tale funzione è una funzione puntuale anche chiamata rateo di guasto.

Indichiamo con $F(t)$ la *probabilità di guasto*, tale che:

$$F(t) = \int_0^t f(x)dx$$

Equazione 2

La probabilità di guasto rappresenta una funzione di intervallo, cioè descrive la probabilità che il componente si guasti nell'intervallo $0;t$.

Andando ad integrare da 0 a $+\infty$ la densità di probabilità $f(x)$ avremo:

$$\int_0^{+\infty} f(x)dx = 1$$

Equazione 3

Ciò vuol dire che facendo riferimento ad un tempo potenzialmente infinito abbiamo la certezza che il guasto avvenga.

Da tale osservazione possiamo ovviamente dedurre che la probabilità che il componente sia correttamente funzionante per un tempo superiore a t e cioè, sulla base della definizione data, rappresenta proprio l'affidabilità del componente:

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(x)dx = \int_t^{+\infty} f(x)dx$$

$$R(t) = \int_t^{+\infty} f(x)dx$$

Equazione 4

L'*affidabilità* è la probabilità che il componente o sistema entrato in servizio al tempo 0 svolga correttamente la sua funzione al tempo t a fronte di determinate condizioni di utilizzo. [6]

Andiamo ora a definire il *failure rate*, *hazard rate* o *velocità di rottura* $\lambda(t)$, che è la vera caratteristica che definisce il comportamento al guasto di un componente.

$$\lambda(t) * \Delta t = P(t \leq ttf \leq t + \Delta t | \text{funzionante in } t) \left[\frac{1}{h}; \frac{\text{rotture}}{\text{tempo}} \right]$$

Equazione 5

Tale parametro è anche chiamato *rateo di guasto condizionato* poiché è definito tramite una probabilità condizionata, cioè che il componente sia funzionante in t.

Andiamo ora ad analizzare la relazione che intercorre tra R(t) l'affidabilità e λ(t) il failure rate. Per far ciò applichiamo alcune ipotesi:

- I componenti e i sistemi possono assumere due soli stati univoci, funzionante o non funzionante
- La transizione da uno stato all'altro è istantanea.

Si considerino le seguenti ipotesi e definizioni:

- N numero di componenti messi in funzione nell'istante t0=0;
- NG(t) numero di componenti guasti in un generico istante di tempo t;
- NS(t) numero di componenti funzionanti in un generico istante di tempo t.

Si dovrà avere ovviamente (per ogni t):

$$N_g(t) + N_s(t) = N$$

Equazione 6

La probabilità che un certo evento si verifichi è data dal rapporto tra il numero di esiti favorevoli a tale evento ed il numero totale di eventi possibili, quindi è possibile scrivere:

$$R(t) = \frac{N_s}{N}; \quad F(t) = \frac{N_g}{N}$$

Che si possono scrivere come:

$$N_s = R(t) * N; \quad N_g = F(t) * N$$

Equazione 7

Andiamo a scrivere la funzione di densità di probabilità o anche conosciuta come *rateo di guasto non condizionato* come segue:

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{N_g(t + \Delta t) - N_g(t)}{N * \Delta t}$$

E possiamo definire il failure rate o rateo di guasto condizionato come segue:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{N_g(t + \Delta t) - N_g(t)}{N_s * \Delta t}$$

Poiché ha come condizione che il componente sia funzionante all'istante t

Andando a sostituire le equazioni 3-7 nella 3-8 si ha quanto segue:

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) * N - F(t) * N}{N * \Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} = \frac{dF(t)}{dt}$$

Essendo:

$$F(t) + R(t) = 1 \Rightarrow \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt}$$

Quindi:

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt}$$

Facendo un ragionamento analogo nella 3-9 e considerando anche la 3-10 si ottiene:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) * N - F(t) * N}{R(t) * N * \Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} * \frac{1}{R(t)} = f(t) * \frac{1}{R(t)}$$

$$\lambda(t) = -\frac{dR(t)}{dt} * \frac{1}{R(t)}$$

$$\lambda(t) * dt = -\frac{dR(t)}{R(t)}$$

Integrando la 3-11 si ottiene:

$$\ln R(t) = -\int_0^t \lambda(t) dt$$

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$$

Di conseguenza:

$$F(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$$

Quindi abbiamo trovato la relazione tra *probabilità di guasto* $F(t)$, *affidabilità* $R(t)$ e *failure rate* $\lambda(t)$.

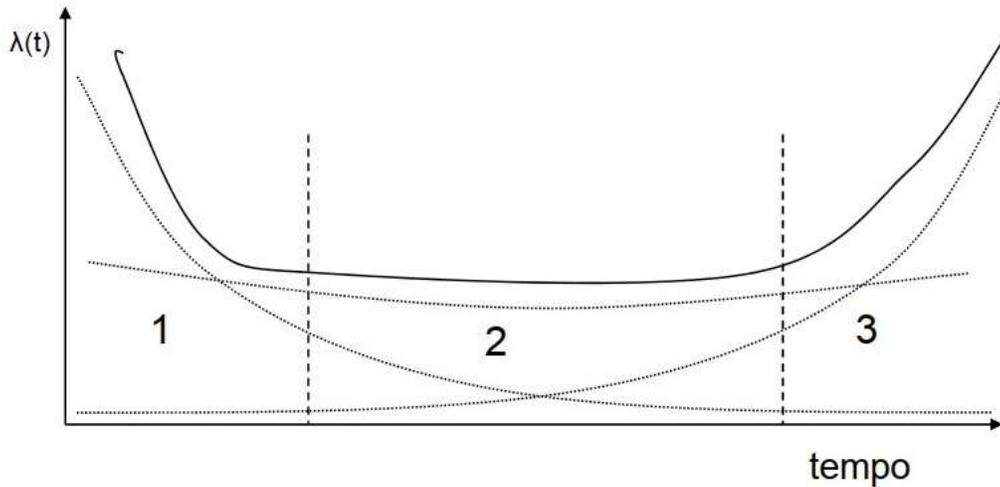


Figura 4 -Andamento generico failure rate

La figura evidenzia il classico andamento del failure rate a cui sono soggetti i componenti meccanici e ne evidenzia tre zone:

- 1 – Mortalità Infantile – Guasti Precoci
- 2 – Vita Utile – Guasti Accidentali o Casuali
- 3 – Vecchiaia – Guasti di Usura

Si definisce approccio a vita utile quando si prende il *failure rate* costante, come nella parte centrale della curva. Con tale ipotesi $\lambda(t)=\text{cost}$ o anche chiamata a vita utile abbiamo:

$$R(t) = e^{-\lambda*t}; \quad F(t) = 1 - e^{-\lambda*t}$$

Il failure rate, coincide con la velocità di guasto ed è anche quindi strettamente correlato a MTTF (Mean Time To Failure).

MTTF è il valore medio del tempo di guasto e quindi per definizione di valore medio legato a una funzione di densità di probabilità possiamo scrivere:

$$MTTF = \frac{\int_0^{+\infty} t * f(t) * dt}{\int_0^{+\infty} f(t) * dt}$$

Dalla quale si ricava:

$$MTTF = \int_0^{+\infty} t * \left(-\frac{dR(t)}{dt}\right) dt$$

Con l'ipotesi di vita utile $\lambda(t)=\text{cost}$ si ricava che:

$$MTTF = \frac{1}{\lambda}$$

Con un ragionamento equivalente fatto per l'*affidabilità* $R(t)$ si può far riferimento alla *manutenibilità* $G(t)$ definita come la probabilità che un componente possa essere riparato pari a t .

Definiamo $g(t)$ funzione di densità di probabilità come *rateo di aggiustamento non condizionato*; quindi, in analogia a quanto visto in precedenza:

$$G(t) = \int_{-\infty}^t g(x) dx$$

In analogia definiamo $\mu(t)$ il *rateo di aggiustamento condizionato* che coincide con la velocità di riparazione.

In analogia:

$$G(t) = 1 - e^{-\int_0^t \mu(t) dt}$$

Quindi ipotizzando $\mu(t)=\text{cost}$:

$$G(t) = 1 - e^{-\mu t}; \quad MTTR(\text{Mean Time to Repair}) = \frac{1}{\mu}$$

Andiamo ora a definire la *disponibilità* e *indisponibilità*

Il concetto di disponibilità di un sistema è fondamentale non solo nel dominio affidabilistico, ma in generale nella pianificazione, gestione e controllo di qualunque sistema produttivo. [6]

A(t), disponibilità, è la probabilità che un componente sia nello stato di funzionamento indipendentemente dai cicli guasto e riparazione già fatti.

Ipotezzando $\lambda(t)=\text{cost}$ e $\mu(t)=\text{cost}$ l'espressione della disponibilità è:

$$A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} * e^{-(\lambda+\mu)*t}$$

Equazione 18

Con t che va all' infinito la 3-18 si traduce nella seguente espressione

$$A = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{MTTF}{MTTR + MTTF}$$

Equazione 19

Il valore della disponibilità del componente con t che tende all'infinito che può far ritenere le prestazioni ottime del componente è nell'intorno dello 0.95.

Andando ad analizzare l'espressione della disponibilità si osserva come sia strettamente dipendente da λ failure rate o velocità di guasto e μ velocità di riparazione. Più sarà elevato il valore di λ più l'affidabilità diminuirà, d'altra parte più sarà elevata la velocità di riparazione μ più la disponibilità del nostro componente risulterà elevata.

In questo elaborato quindi ci poniamo come obiettivo quello di aumentare la velocità di riparazione di un componente- sistema andandone a rivederne il design, riducendo quindi il down time, cercando di rendere economicamente conveniente una riparazione a fronte di una sostituzione.

In particolare, ci si concentrerà su componenti che hanno il valore della velocità di rottura λ più elevato per identificare quali componenti possano risultare più delicati e quindi possano richiedere interventi più frequenti.

3.2.1 Stima del failure rate

Come visto in precedenza il metodo ideato è leggermente differente se bisogna applicarlo a componenti di nuova concezione o a componenti già esistenti di cui potenzialmente si hanno a disposizione differenti informazioni.

Nel caso in cui si dispongano dati sulle varie rotture esistono in letteratura differenti metodi che consentono di andare a ricavare i parametri evidenziati in precedenza da dati empirici.

Modelli quali:

- Metodi empirici dataset completo
 - Direct method
 - Improved direct method
 - Rank method
 - Metodo dei minimi quadrati
- Metodo empirico su dati censurati
- Ecc.

Invece nel caso in cui il prodotto sia di nuova concezione e/o non si abbia la possibilità di accedere ai dati relativi all'affidabilità, è possibile stimare i valori relativi al failure rate dei differenti componenti per identificare le zone su cui concentrarsi. Sono stati identificati alcuni database su cui andare a effettuare tale stima.

Di seguito vengono proposti dei database che consentono di ricavare dei dati relativi al failure rate di componenti meccanici, con la premessa che si è a conoscenza che per la natura di questi componenti la stima della loro λ risulta complessa.

Poiché lo stesso componente può essere soggetto a condizioni molto differenti e quindi avere delle risposte molto varie.

Molti meccanismi di rottura quali, corrosione, creep e fatica possono operare simultaneamente sul componente in percentuali differenti. Inoltre, la tipologia di carico può influenzare pesantemente la vita del componente, le differenti condizioni ambientali in cui si può trovare ed infine anche le caratteristiche intrinseche del materiale di ogni singolo componente. Per tale motivo definire tutte queste variabili che determinano la potenziale vita del componente risulta estremamente complesso.

A tal proposito le strade indicate di seguito sono da considerare solo in prima approssimazione

1. Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment" of the Naval Surface Warfare Center [7]

Tale elaborato raccoglie informazioni relative a differenti componenti meccanici comuni come molle, guarnizioni, frizioni, freni, filtri, cuscinetti e ecc.

Il failure rate di tali componenti viene valutato utilizzando diversi parametri che tengono conto delle variabili che sono state citate in precedenza.

Per chiarire questo aspetto faccio un esempio dei parametri che vengono considerati quando si vuole stimare la vita delle tenute.

Di seguito viene riportata la formula utilizzata per stimare la vita delle guarnizioni o gli O-Ring con applicazione statica:

$$\lambda_{SE} = \lambda_{SE,B} * C_P * C_Q * C_{DL} * C_H * C_F * C_V * C_T * C_N$$

Equazione 20

Dove:

- λ_{SE} =Failure rate della guarnizione in rotture/10⁶ ore.
- $\lambda_{SE,B}$ =Base failure rate of seal, 2.4 failure/10⁶ ore.
- C_P = Coefficiente moltiplicativo che tiene conto della pressione del fluido.
- C_Q =Coefficiente moltiplicativo che tiene conto della perdita ammissibile.
- C_{DL} =Coefficiente moltiplicativo che tiene conto della dimensione della guarnizione
- C_H =Coefficiente moltiplicativo che tiene conto delle tenzioni di contatto e della durezza della guarnizione.
- C_F = Coefficiente moltiplicativo che tiene conto della finitura superficiale della sede.
- C_V =Coefficiente moltiplicativo che tiene conto della viscosità del fluido
- C_T = Coefficiente moltiplicativo che tiene conto della temperatura del fluido
- C_N = coefficiente moltiplicativo che tiene conto della presenza di eventuali agenti contaminanti nel fluido.

Come si può osservare i differenti coefficienti moltiplicativi tengono conto di differenti aspetti che possono influenzare la vita del

componente. Tali coefficienti vengono ricavati da formule, grafici o tabelle riportate sul libro.

2. Non-Electronics Parts Reliability Data [8]

È un database di differenti parti commerciali come quelli citati nel caso precedente. In questo caso vengono registrati i comportamenti di tali componenti in differenti applicazioni di tipo militare, civile, aerospaziale, e ecc.

Di seguito è riportata una tabella che descrive le caratteristiche a seconda delle differenti situazioni di applicazioni.

Part class : GASKET AND SEAL
Type: GENERAL

ENVIRONMENT	APPLICATION		FALIURE RATE/10 ⁶ HOURS				NUMBER OF RECORDS	NUMBER FAILED	OPERATING HOURS (x 10 ⁶)
	MIL .	COML.	$\hat{\lambda}$	60% CONFIDENCE INTERVAL					
				60% UPPER	60% LOWER	60% UPPER			
DOR	X		---	0,004	---	---	3	0	221,68
GRF	X		1,388	---	1,52	1,704	3	16	11,959
GRM		X	1,148	---	1,05	1,256	4	99	86,248
A	X		65,788	---	65,251	66,33	3	10,647	161,838
A		X	1,486	---	0,294	4,518	1	1	0,673
AUT		X	122,271	---	113,516	131,803	1	140	1,145
HEL	X		31,594	---	30,046	32,967	3	301	9,527
SHS	X		3,767	---	2,797	5,073	1	11	2,92

Tabella 1

3. Reliability Prediction of Electronic Equipment MIL-HDBK-217F [9]

Si tratta di un database simile al primo segnalato, ma fa riferimento esclusivamente a componenti elettronici. Viene citato per completezza ma in questo caso non è approfondito poiché la trattazione si concentra sulle parti meccaniche.

3.3 FMEA Failure mode and effects analysis.

Metodo sviluppato durante la Seconda guerra mondiale dall' esercito americano per cercare di prevedere tutti gli eventuali avvenimenti che si potessero verificare durante una missione. Successivamente è stata adottata prima nell'aerospaziale e poi nell'automotive. Ora è una metodologia adottata da tutte le realtà che si orientano verso la Lean Production. [10]

La FMEA è una tecnica che ci permette di valutare in maniera preliminare il prodotto studiandone la sua affidabilità le potenziali difettosità ed eventuali conseguenze.

Tale tecnica per essere applicata richiede un elevato dispendio di energie sia umane, perché sono coinvolti tutti i reparti, sia informative, poiché si ha bisogno di un elevata mole di informazioni.

Esistono due differenti macro-tipologie di metodi relative ai processi PFMEA e al progetto DFMEA.

Il DFMEA è ideale per evidenziare eventuali problematiche relative a prodotti nuovi o utilizzati in nuove condizioni.

Analizziamo le fasi dell'applicazione del metodo:

1. La prima fase consiste nello scomporre il problema da analizzare, e quindi il prodotto, in singoli componenti. Definiti i singoli componenti per ognuno di questi si devono elencare le singole funzioni che svolgono.
2. La seconda fase riguarda l'identificazione dei Modi di Guasto. Per *guasto* si intende quando un componente o un sistema non risulta funzionante o che non svolge le funzioni che sono state individuate in precedenza secondo le specifiche di progetto. Invece con *modo di guasto* si intende in quali modalità il componente può perdere la capacità di assolvere alle sue funzionalità.

Quindi a questo punto per ogni funzione identificata per ogni componente è possibile definire differenti modalità di guasto.

3. La terza fase è quella di definire l'effetto del modo di guasto, cioè come viene percepito dal "cliente" o meglio dall'utilizzatore del prodotto.
4. La quarta fase va a definire la gravità del guasto e a questa viene associata un valore numerico come segue.

	GRAVITA' DELL'EFFETTO PERCEPITA DAL CLIENTE	GRAVITA' DELL'EFFETTO SUL PROCESSO	INDICE
PERICOLO SENZA PREAVVISO	Quando l'effetto del Modo potenziale di guasto influisce senza preavviso sul funzionamento sicuro del veicolo e / o comporta la mancata osservanza della regolamentazione governativa.	Può mettere in pericolo l'operatore (macchina o montaggio) senza preavviso. Fermo linea.	10
PERICOLO CON PREAVVISO	Quando l'effetto del Modo potenziale di guasto influisce con preavviso sul funzionamento sicuro del veicolo e / o comporta la mancata osservanza della regolamentazione governativa.	Può mettere in pericolo l'operatore (macchina o montaggio) con preavviso. Fermo linea.	9

MOLTO ALTO	Veicolo fermo	Il 100% del prodotto deve essere scartato o riparato in un reparto di riparazione con un tempo di riparazione maggiore di un'ora.	8
ALTO	Veicolo operativo ma con una forte riduzione delle performance. Il Cliente è molto insoddisfatto.	Il prodotto deve essere selezionato, e una parte (meno del 100%) deve essere scartata. Oppure, il prodotto o parte di esso deve essere riparato nel reparto riparazione con un tempo tra mezz'ora e un'ora.	7
MODERATO	Veicolo operativo ma con confort e/o costi di riparazione inaccettabili. Cliente insoddisfatto.	Una parte (meno del 100%) del prodotto deve essere scartato senza selezione o inviato al reparto riparazione (tempo di riparazione meno di mezz'ora)	6
BASSO	Veicolo operativo ma con confort e/o costi di riparazione accettabili. Leggera riduzione delle performance. Cliente un può insoddisfatto.	Il 100% del prodotto deve essere rilavorato o riparato a fine linea senza essere inviato nel reparto riparazioni.	5
MOLTO BASSO	Presenza di cigolii, vibrazioni, sibili, rumorini vari. Difetti notati dalla maggior parte dei clienti (più del 75%).	Il prodotto deve essere selezionato. Una parte deve essere rilavorata (meno del 100%) ma non ci sono scarti	4
MINORE	Presenza di cigolii, vibrazioni, sibili, rumorini vari. Difetti notati dal 50% dei clienti.	Una parte (meno del 100%) deve essere rilavorato in linea, fuori postazione, senza produzione di scarti.	3
MOLTO MINORE	Presenza di cigolii, vibrazioni, sibili, rumorini vari. Difetti notati dal 25% dei clienti.	Una parte (meno del 100%) deve essere rilavorato in linea, in postazione, senza produzione di scarti.	2
NESSUNO	Effetto non notato	Piccoli inconvenienti sull'operatore o su una fase di lavoro senza conseguenze sostanziali	1

Tabella 2

5. La quinta fase consiste nell'identificare le cause dei possibili modi di guasto andandole a ricercare in un'inadeguatezza del progetto o processo costruttivo.
6. La sesta fase consiste nell'andare ad indentificare la probabilità con cui avvenga un determinato modo di guasto relazionato alla causa individuata.

DFMEA : INDICE DI PROBABILITA' DI ACCADIMENTO DI UN MODO DI GUASTO LEGATO ALLA CAUSA		
PROBABILITA' DI GUASTO	POSSIBILE TASSO DI GUASTO	P
MOLTO ALTA: GUASTI CONTINUI	>= 100 ROTTURE PER 1000 pz	10
	CIRCA 50 ROTTURE PER 1000 pz	9
ALTA: GUASTI FREQUENTI	CIRCA 20 ROTTURE PER 1000 pz	8
	CIRCA 10 ROTTURE PER 1000 pz	7
	CIRCA 5 ROTTURE PER 1000 pz	6

MODERATA: ROTTURE OCCASIONALI	CIRCA 2 ROTTURE PER 1000 pz	5
	CIRCA 1 ROTTURE PER 1000 pz	4
BASSA: POCHE ROTTURE	CIRCA 0,5 ROTTURE PER 1000 pz	3
	CIRCA 0,1 ROTTURE PER 1000 pz	2
REMOTA: ROTTURE IMPROBABILI	CIRCA 0,010 ROTTURE PER 1000 pz	1

Tabella 3

7. La settima fase consiste nell'individuare in fase di progettazione accorgimenti che impediscano l'accadimento di determinate cause che innescino i fenomeni di rottura e un non corretto funzionamento del prodotto. Ma talvolta in fase di progettazione tali cause non sono facilmente intercettabili. Quindi si vanno a definire dei coefficienti per valutare se si riesce a identificare determinate cause e intercettarle nelle fasi di progettazione.

RILIEVO	CRITERI: Probabilità di intercettazione in fase di PROGETTO	INDICE
Incertezza assoluta	Il controllo di progettazione non può e/o non riesce a rilevare una causa/meccanismo potenziale e una successiva modalità di guasto. Oppure non esiste alcun controllo di progettazione.	10
Molto remota	Possibilità molto remota che in fase di controllo del progetto si possa rilevare una causa/meccanismo potenziale e una successiva modalità di guasto.	9
Remota	Possibilità remota che in fase di controllo del progetto si possa rilevare una causa/meccanismo potenziale e una successiva modalità di guasto.	8
Molto bassa	Possibilità estremamente bassa che in fase di controllo del progetto si possa rilevare una causa/meccanismo potenziale e una successiva modalità di guasto.	7
Bassa	Possibilità bassa che in fase di controllo del progetto si possa rilevare una causa/meccanismo potenziale e una successiva modalità di guasto.	6
Moderata	Possibilità moderata che in fase di controllo del progetto si possa rilevare una causa/meccanismo potenziale e una successiva modalità di guasto.	5
Moderatamente alta	Possibilità moderatamente alta che in fase di controllo del progetto si possa rilevare una causa/meccanismo potenziale e una successiva modalità di guasto.	4
Alta	Possibilità alta che in fase di controllo del progetto si possa rilevare una causa/meccanismo potenziale e una successiva modalità di guasto.	3
Molto alta	Possibilità molto alta che in fase di controllo del progetto si possa rilevare una causa/meccanismo potenziale e una successiva modalità di guasto.	2
Quasi certa	Quasi certezza che in fase di controllo del progetto si possa rilevare una causa/meccanismo potenziale e una successiva modalità di guasto.	1

Tabella 4

Arrivati a questo punto abbiamo completato la prima fase dello studio FMEA, e siamo arrivati a compilare una tabella simile alla seguente:

Componente	Funzione	Modo di Guasto	Effetto	Gravità	Causa	Probabilità	Rilevabilità
1	Funz 1.1	Modo 1.1.1	Effetto 1.1.1.1		Causa 1.1.1.1a		
					Causa 1.1.1.1b		
						
			Effetto 1.1.1.2		Causa 1.1.1.2a		
						
		Modo 1.1.2	Effetto 1.1.2.1		Causa 1.1.2.1a		
			
	Funz 1.2						
						
2						
....							

Tabella 5

A tal punto viene definito un indice che individua quali sono gli elementi che devono essere attenzionati maggiormente e su ciò si vuole agire in fase di progettazione. Tale indice è chiamato *Indice di Priorità del Rischio* IPR frutto del prodotto tra i coefficienti di Probabilità, Gravità e Rilevabilità.

Anche applicando le migliori le miglirie l'indice IPR non potrà essere mai spalmato e reso identico per tutti gli aspetti, quindi la valutazione delle tempistiche di riparazione sarà da intendersi per gli elementi che mostrano indici IPR più elevati dopo che sono state fatte le dovute osservazioni sul progetto.

3.4 Criteri e consigli re-design. [11]

3.4.1 Standardizzazione e Intercambiabilità

I due concetti sono strettamente collegati poiché componenti standardizzati sono tra essi intercambiabili. L'esempio più palese è la filettatura maschio delle lampadine che è stato standardizzato in un paio di tipologie così da garantire l'intercambiabilità con diversi modelli, e in caso di emergenze anche favorire la cannibalizzazione (viene smontato un componente funzionante da una zona non primaria per la funzionalità della macchina, per sostituire quello rotto in una posizione indispensabile)

Allo stesso tempo deve essere garantita una sicurezza nelle operazioni, bisognerebbe garantire che quando due componenti abbiano una intercambiabilità di forma sia verificata anche l'intercambiabilità funzionale, poiché se si

verificasse un'intercambiabilità di forma ma non fosse garantita un'intercambiabilità funzionale potrebbe verificarsi una situazione pericolosa. Riprendiamo esempio precedente relativo alla lampadina. Talvolta alcune portalampada sono realizzate per una determinata potenza massima, ma è possibile montare lampadine con potenza superiore poiché non è verificato il principio espresso in precedenza. Tale situazione, quindi, potrebbe causare un surriscaldamento dei componenti della portalampada e il loro failure con un conseguente cortocircuito. Quindi in questi casi è presente un'intercambiabilità di forma ma non funzionale. Se si verificano condizioni del genere è sempre importante segnalare in modo adeguato con targhette tali potenziali pericoli.

3.4.2 Modularità

Un ulteriore prerequisito per ottenere dei tempi di riparazione efficaci una volta identificato il guasto è la modularità.

Identifichiamo i moduli come una parte, un sottoassieme, un assieme o un componente progettato per essere gestito come una singola unità per facilitare la fornitura e l'installazione e/o la riparazione. Tale obiettivo si ottiene dividendo le macchine in parti che hanno funzionalità distinte.

Tale configurazione è più facilmente gestibile sia in caso di identificazione del guasto sia per quanto riguarda la riparazione. Spesso i moduli sono pensati per essere smontati e sostituiti velocemente senza l'ausilio di particolari attrezzature. Così facendo si riesce ad abbattere il down time ed il modulo rotto può essere rigenerato per una successiva sostituzione.

Per permettere una sostituzione efficace il modulo deve essere plug and play cioè non deve richiedere particolari relazioni.

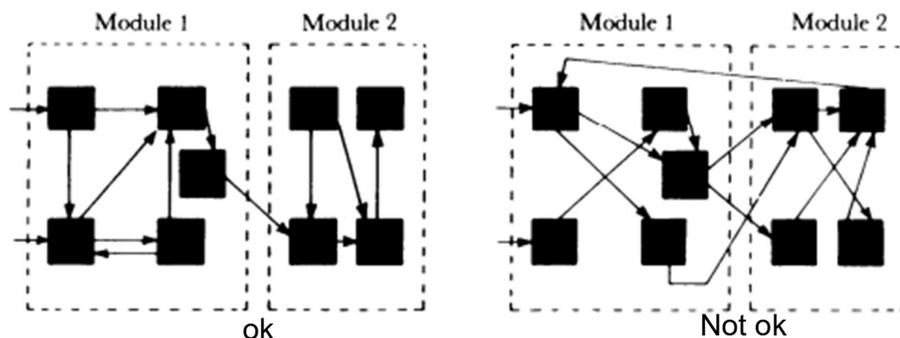


Figura 5 - Esempio sistema modulare

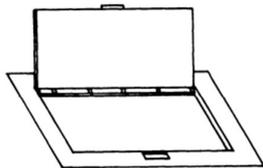
Un esempio di applicazione di moduli è il Fairphone [12], il quale consente di andare ad agire facilmente sui differenti moduli quali batteria fotocamera ecc. a fronte di altri prodotti simili che avevano una filosofia più usa e getta.

3.4.3 Accessibilità

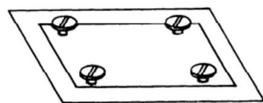
Definiamo un prodotto accessibile quando un componente al suo interno può essere raggiunto attraverso pochi semplici passaggi e l'utilizzo di strumenti semplici e standard. Ma non è detto che se un componente è accessibile (seguendo la definizione proposta) sia facilmente riparabile, è importante anche andare a fare valutazioni a livello ergonomico poiché può accadere che a causa della posizione non riesca a esercitare la corretta forza o eseguire determinate operazioni.

Inoltre, l'accessibilità ai componenti da riparare deve essere strettamente collegata alla sicurezza, bisogna garantire all'operatore condizioni di sicurezza come interruttori che interrompano l'alimentazione della macchina quando vengono rimossi o aperti vani per effettuare le operazioni, quindi predisporre sistemi di sicurezza attiva.

I componenti che hanno un elevato failure rate devono avere un'elevata accessibilità per ridurre il più possibile i down time, per esempio:



Copertura incernierata, veloce da aprire, ottima se provvista di una posizione di equilibrio, deve avere un interruttore che ferma la macchina per sicurezza



Chiusura avvitata solo se non c'è spazio per aprire la cover incernierata e se abbiamo della pressione, cercando sempre di ridurre il più possibile il numero di viti

Figura 6 - Esempio accessibilità

Esempi di aperture incernierate:

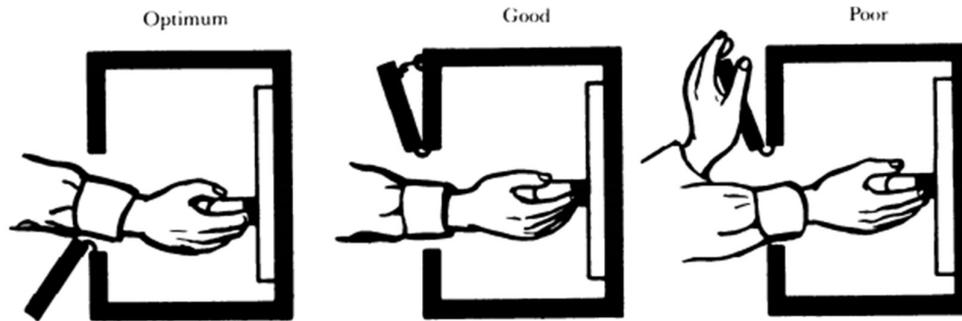


Figura 7 - Esempio accessibilità

Inoltre, sono da considerare sempre i passaggi delle attrezzature necessarie ad effettuare il lavoro e gli aspetti ergonomici, come si può vedere dalle seguenti immagini:

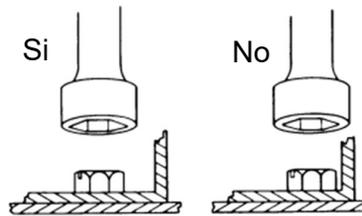


Figura 8 - Esempio accessibilità attrezzatura

Opening Dimensions	Dimensions, mm (in.)		Task
	A	B	
	107 (4.2)	117 (4.6)	Using Common Screwdriver With Freedom to Turn Hand Through 180 Deg
	132 (5.2)	114 (4.5)	Using Pliers and Similar Tools
	135 (5.3)	155 (6.1)	Using "I" Handle Wrench With Freedom to Turn Hand Through 180 deg
	267 (10.6)	203 (8.0)	Using Open-End Wrench With Freedom to Turn Wrench Through 60 Deg
	122 (4.8)	155 (6.1)	Using Allen-Type Wrench With Freedom to Turn Wrench Through 60 Deg
	89 (3.5)	89 (3.5)	Using Test Probe, etc.

Figura 9 - Esempio quote guida accessibilità

Inoltre, è importante anche pensare ad attrezzature che possano favorire il montaggio, disassemblaggio e riparazione dei componenti.



Figura 10 Attrezzatura riparazione motori

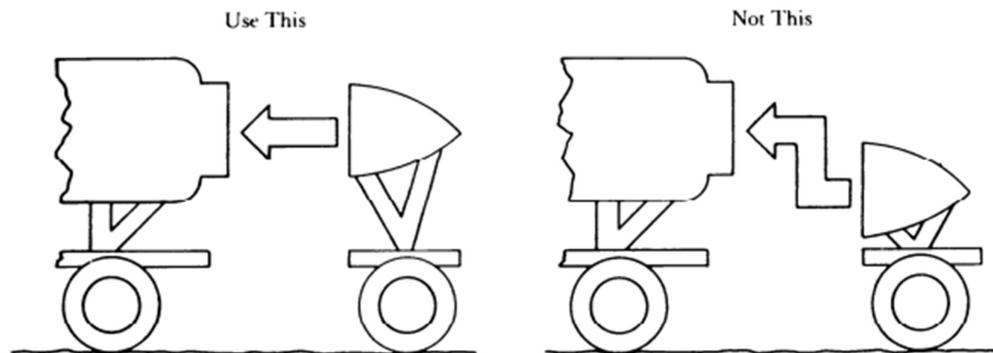


Figura 11 - Esempio attrezzatura smontaggio e assemblaggio

3.5 Metodi di disassemblaggio.

3.5.1 Mitrouchev method. [13]

Per andare a sviluppare tale metodo vengono definiti tre differenti strumenti:

1. Geometric feasibility:

È una caratteristica tra due componenti o sottoassiemi che possono essere assemblati o disassemblati senza collisioni.

Ovviamente i due componenti tra loro avranno delle direzioni nella quali collideranno. Le direzioni limite tra i due componenti sono identificate come le direzioni che hanno come rette di applicazioni le tangenti tra i due componenti. Tali direzioni vengono chiamate Constrain Direction CD_{ij} . Di seguito sono riportati degli esempi.

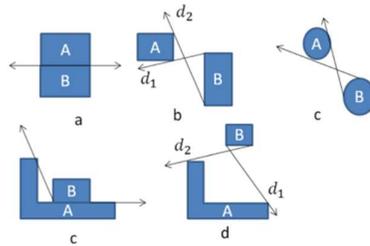


Figura 12 Constrain direction

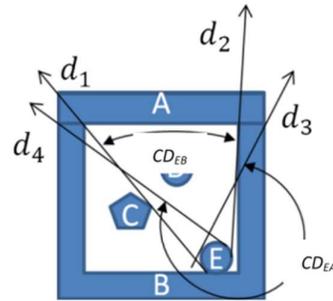


Figura 13 Constrain direction

Nella figura 8 vengono evidenziate le seguenti Constrain Direction:

- $CD_{EB} = d_1; d_2$
- $CD_{EA} = d_3; d_4$

Andando a vedere i corpi A e B con un assieme $S = \{A, B\}$ ho che:

$$CD_{ES} = (d_1; d_2) \cup (d_3; d_4)$$

Se le direzioni CD sono bloccate su tutti i 360° ciò implica che il componente E è bloccato.

2. Set of directions of removal:

Attraverso questo strumento vengono definite le direzioni in cui il componente si può muovere. Se il componente è libero nello spazio, questo può traslare, ruotare o rototraslare in tutte le direzioni. Se abbiamo un

contatto tra due componenti su un piano la sfera di possibili movimenti si dimezza.

Di seguito un'immagine mostra come i possibili movimenti del corpo blu vengono ridotti dai corpi adiacenti:

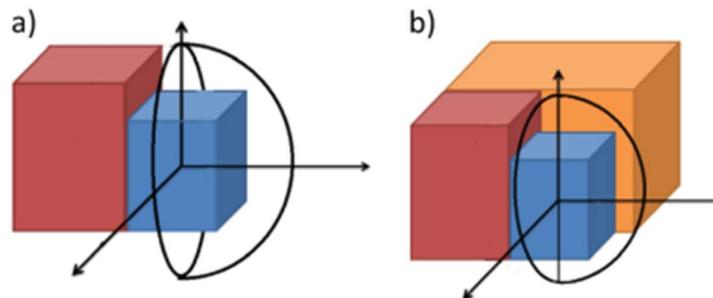


Figura - 14 Set of directions of removal

3. Collision detection:

Tale strumento permette di valutare quali possano essere le collisioni tra vari componenti durante il processo di smontaggio. Per far ciò si proiettano su un sottospazio, cioè su un piano bidimensionale i volumi dei componenti. Se questi volumi in una determinata proiezione non si intersecano, in questa direzione i due volumi non avranno una collisione.

Quindi se il componente non può essere rimosso possono esserci due ragioni principali, la prima è che non ha SDR (Set of directions of removal), la seconda che in tutte le direzioni di proiezione 2D presenta delle collisioni con altri elementi.

Con questo metodo è possibile considerare un sottoassieme del prodotto per non dover considerare ogni singolo componente da smontare.

Definiti gli strumenti precedenti, andiamo ora ad analizzare gli step successivi del metodo, la creazione del DGCG (Disassembly geometry contacting graph)

e la generating the feasible disassembly sequences (creazione delle possibili sequenze di smontaggio).

1. DGCG Disassembly geometry contacting graph

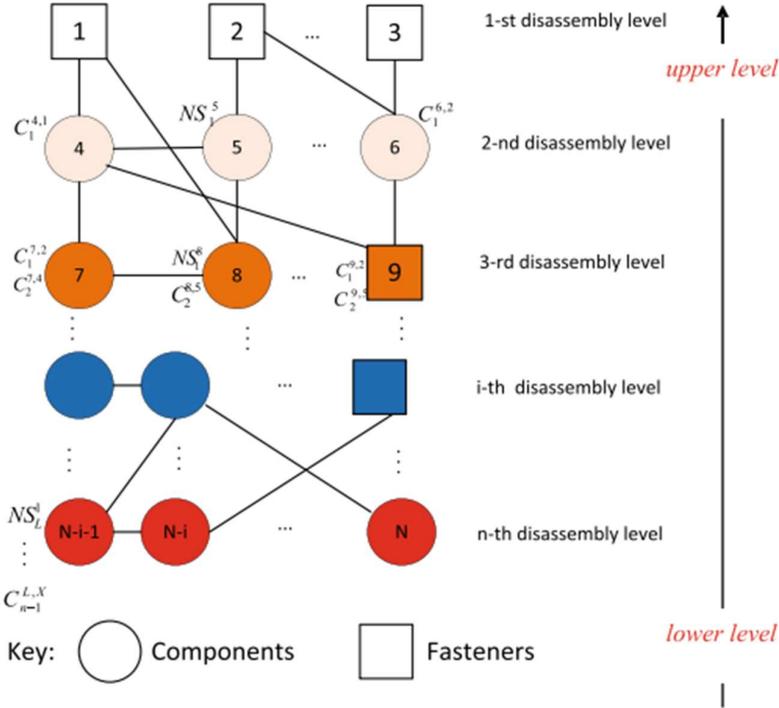


Figura 15 - DGCG Disassembly geometry contacting graph

In primis definiamo alcuni dettagli grafici, si prende come convenzione quella di indicare con un cerchio gli elementi che costituiscono l'assieme e con un quadrato i vari collegamenti (viti, dadi, ecc.)

Quindi nel primo livello vengono indicati i componenti che possono essere disassemblati direttamente. Tutti gli elementi che non possono essere disassemblati vengono considerati come segue:

- L'elemento i -esimo che non può essere disassemblato al livello n -esimo a causa di conflitti con il j -esimo elemento verrà indicato come C_n^{ij} .
- L'elemento i -esimo che non può essere disassemblato al livello n -esimo perché non ha direzioni in cui può essere rimosso SDR verrà indicato con NS_n^i .

Solitamente gli elementi appartenenti allo stesso livello sono identificati con lo stesso colore.

Quindi si procede dall'esterno verso l'interno analizzando su ogni livello i vari vincoli dei differenti componenti e rimuovendoli lungo i differenti livelli fino ad arrivare al componente che ci interessa rimuovere.

A questo punto identificati i livelli e le relazioni è possibile andare a definire il DOG Disassembly order graph dove andiamo a disporre i vari elementi ripercorrendo i livelli in senso opposto rispetto alla loro creazione partendo dal componente obiettivo che ci interessa arrivare a smontare.

3.5.2 Jianjun method. [14]

Tale metodo si basa su un concetto fondamentale chiamato *onda di disassemblaggio* che si propaga dall'obiettivo, cioè il componente o componenti a cui vogliamo arrivare C_x . Propagandosi l'onda incontra i primi componenti che devono essere per forza di cose rimossi per arrivare a C_x . Tali componenti fanno parte del primo livello che incontra l'onda che sarà chiamato τ_a . I componenti di tale livello potranno essere disassemblati andando a rimuovere prima ovviamente i componenti ad essi adiacenti che costituiranno il livello τ_{a+1} .

Quindi tale onda che parte da C_x si propaga attraverso i vari livelli fino a raggiungere il primo componente dell'assieme che deve essere smontato chiamato C_b boundary.

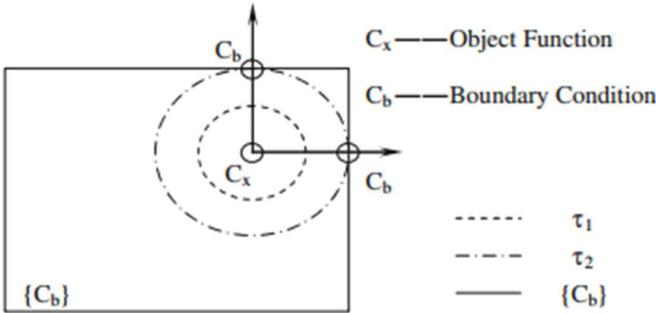


Figura 16 - Esempio propagazione onda

L' i -esimo componente C_i è definito d -dependent se c'è più di un componente adiacente a contatto con C_i che deve essere rimosso per permettere il disassemblaggio locale del componente C_i .

D'altra parte, l' i -esimo componente C_i è definito 1-dependent quando per rimuovere il componente C_i è possibile rimuoverne solo uno.

4. Analizziamo ora l'algoritmo da seguire quando il componente è 1-dependent:

Indichiamo con W l'assieme dei componenti su cui l'onda di disassemblaggio ha impattato fino ad arrivare al livello a -esimo (quindi contiene tutti i componenti fino al livello $a-1$).

Ovviamente bisogna tenere conto delle relazioni topologiche tra le parti di ogni livello.

Introduciamo *il removal influence graph* di cui riportiamo un esempio di seguito:

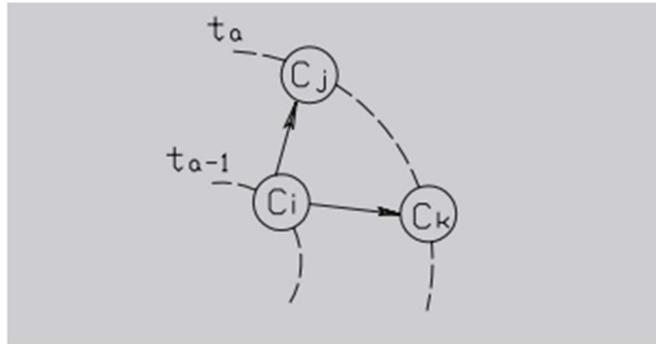


Figura 17 - Livelli removal influence graph

Al livello t_{a-1} abbiamo il componente che dobbiamo rimuovere C_i . L'onda si propaga e raggiunge C_j e C_k . Per rimuovere C_i abbiamo rimuovere o C_j o C_k poiché stiamo analizzando un assieme caratterizzato da componenti 1-dependent. Quindi andiamo a indicare tale relazione con $C_i \rightarrow C_j$, se per accedere a C_i rimuoviamo C_j , altrimenti, $C_i \rightarrow C_k$ se per accedere a C_j rimuoviamo C_k .

Tale operazione va fatta per i vari componenti che si vanno a delineare andandosi a propagare il fronte d'onda.

A seconda di quanti C_b la nostra onda incontra avremo lo stesso numero di sequenze possibili di disassemblaggio.

Partendo da C_b e arrivando a C_x ripercorrendo all'indietro il removal influence graph ho le possibili sequenze di disassemblaggio. Solitamente viene presa quella che ha il numero minore di componenti.

5. Analizziamo ora l'algoritmo da seguire nel caso in cui avessimo dei componenti d-dependent:

Di solito la maggior parte dei componenti presenti in un assieme sono d-dependent. Talvolta lo stesso componente può essere 1-dependent o d-dependent a seconda della sua posizione e dei componenti che si trova accanto.

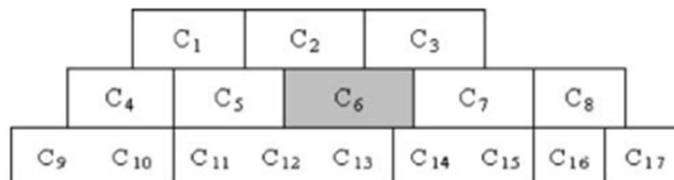


Figura 18 - Esempio relazione componenti

Dall'insieme descritto sopra abbiamo il seguente removal influence graph:

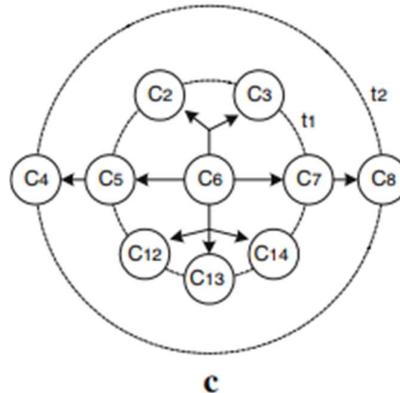


Figura 19 - Removal influence graph

Arrivati ai differenti C_b come visto in precedenza posso ripercorrere la sequenza al contrario per definire i vari percorsi di disassemblaggio da perseguire. Come nel caso precedente solitamente viene presa quella che ha al suo interno il numero minimo di componenti.

In entrambi gli algoritmi se la sequenza di disassemblaggio preferita è quella più breve non è detto che sia quella più economicamente conveniente.

3.6 Qualifica delle Tempistiche.

Per andare a valutare le sequenze di smontaggio relative sia al design attuale e successivamente al re-design si è scelto di utilizzare due metodi che ne consentono di stimare le tempistiche necessarie al disassemblaggio per effettuare l'intervento.

Inoltre, per semplificare il procedimento si ipotizza che la sequenza di ri-assemblaggio sia uguale e contraria a quella dello smontaggio e che quindi le tempistiche necessarie siano simili.

3.6.1 Tempi Standard Predeterminati

I sistemi a Tempi Standard Predeterminati si basano sul principio base che ogni movimento/ elemento/ attività elementare richieda praticamente sempre lo stesso tempo, a parità di condizioni di lavoro e se compiuto da un esecutore sufficientemente abile.

I tempi sono espressi nell'unità particolare TMU (Time Measurement Unit):

- 1 TMU=0,00001 ore = 0,0006 min = 0,036 sec
- 1ora=100.000 TMU

Fasi del metodo a Tempi Standard Predeterminati:

1. Scomposizione del lavoro da svolgere nei suoi microelementi di base
2. Individuazione nelle tabelle appropriate dei valori di TMU relativi ai micromovimenti
3. Aggiustamento dei valori attraverso fattori correttivi
4. Esecuzione della somma dei valori di tutti i microelementi da compiere per svolgere il lavoro
5. Determinazione del tempo standard complessivo

3.6.1.1 MTM

Il principale metodo è il MTM (Method Time Measurement) dal quale poi sono state fatte alcune evoluzioni quali:

- Motion-based systems - MTM 1
- Element-based systems - MTM 2
- Activity-based systems - MOST (Maynard Operation Sequence Technique)

Il metodo originario MTM 1 definisce dei micromovimenti degli arti superiori, quali:

Raggiungere (Reach), Muovere (Move), Ruotare (Turn), Applicare pressione (Apply Pressure), Prendere (Grasp), Rilasciare (Release), Posizionare (Position), Disaccoppiare (Disengage), Girare la chiave (Crank).

Ad ogni movimento corrisponde una tabella che fornisce le TMU in funzione dei fattori al contorno (distanze, pesi, forme degli oggetti).

Per esempio:

TABLE 4 (a) Normal Time Values for MTM-1 Motion Element: Reach (R)

Distance		Time in TMU						Case and Description
						Hand in Motion		
cm	inches	A	B	C or D	E	A	B	
< 2.0	< 0.75	2.0	2.0	2.0	2.0	1.6	1.6	A Reach to object in fixed location, or to object in other hand or on which other hand rests.
2.5	1	2.5	2.5	3.6	2.4	2.3	2.3	
5.1	2	4.0	4.0	5.9	3.8	3.5	2.7	B Reach to single object in location that may vary slightly from cycle to cycle.
7.6	3	5.3	5.3	7.3	5.3	4.5	3.6	
10.1	4	6.1	6.4	8.4	6.8	4.9	4.3	C Reach to object jumbled with other objects in a group so that search and select occur.
12.5	5	6.5	7.8	9.4	7.4	5.3	5.0	
15.2	6	7.0	8.6	10.1	8.0	5.7	5.7	D Reach to a very small object or where accurate grasp is required.
17.8	7	7.4	9.3	10.8	8.7	6.1	6.5	
20.3	8	7.9	10.1	11.5	9.3	6.5	7.2	E Reach to indefinite location to get hand in position for body balance or next motion or out the way.
22.9	9	8.3	10.8	12.2	9.9	6.9	7.9	
25.4	10	8.7	11.5	12.9	10.5	7.3	8.6	
30.5	12	9.6	12.9	14.2	11.8	8.1	10.1	
35.6	14	10.5	14.4	15.6	13.0	8.9	11.5	
40.6	16	11.4	15.8	17.0	14.2	9.7	12.9	
45.7	18	12.3	17.2	18.4	15.5	10.5	14.4	
50.8	20	13.1	18.6	19.8	16.7	11.3	15.8	
55.9	22	14.0	20.1	21.2	18.0	12.1	17.3	
61.0	24	14.9	21.5	22.5	19.2	12.9	18.8	
66.0	26	15.8	22.9	23.9	20.4	13.7	20.2	
71.1	28	16.7	24.4	25.3	21.7	14.5	21.7	
76.2	30	17.5	25.8	26.7	22.9	15.3	23.2	
Additional		0.4	0.7	0.7	0.6	TMU per 2.54 cm > 76 cm (per 1.0 in > 30 in.)		

Figura 20 - Esempio TMU Tabulati

Il metodo MTM 2 è un derivato di MTM-1, corrispondente ad una semplificazione dei movimenti rilevati ed a una specializzazione in settori diversi, è il risultato di un'aggregazione dei movimenti basilari di MTM 1 in elementi di movimentazione principali. Esistono una serie di sottofamiglie di specializzazione di settore, es. MTM-HC (per l'industria healthcare), MTM-C (per lavori di ufficio), MTMM (per lavori al microscopio...)

Il Metodo MOST (Maynard Operation Sequence Technique) è un sistema di MTM più rapido delle famiglie precedenti, poiché identifica delle attività principali e non dei movimenti singoli.

Naturalmente perde il livello di dettaglio e quindi precisione nell'elaborazione dei tempi standard, MOST definisce non una serie di movimenti, ma una sequenza di eventi/ attività che comportano dei movimenti. Gli eventi base di MOST sono:

- La sequenza di movimento di un oggetto.
- La sequenza di controllo di un oggetto.
- La sequenza di impiego di strumenti e di un oggetto.

- La sequenza per utilizzo di gru manuali.

A fianco di ogni sotto attività si indica il tempo di esecuzione, che deriva (come negli altri metodi) da tabelle standardizzate secondo diversi parametri (es. numero di step all'interno della sotto attività).

- Il tempo indicato in indice è 1/10 di una TMU standard
- Il tempo standard si ricava come $TMU + allowance\ factor$, dove $allowance\ factor =$ maggiorazione del tempo standard per riposo personale (P), fatica (F), rallentamenti diversi (D)
- Solitamente l'allowance factor è almeno il 15% del tempo standard calcolato con MOST

3.6.2 MIL-HDBK-472

Tengo a segnalare anche la normativa militare MIL-HDBK-472 poiché, con riferimenti all'appendice A, riporta alcune tempistiche standardizzate necessarie a effettuare operazioni di smontaggio/ montaggio su elementi elettronici come connettori ecc. Tali aspetti potrebbero essere utili poiché talvolta di difficile stima con quanto visto in precedenza.

4 Applicazione del metodo DfR

Si è scelto di andare ad applicare il metodo su un componente già commercializzato per andarne a valutare in maniera più efficace i benefici a fronte di problematiche già emerse nel corso del tempo.

4.1 Descrizione del componente

Dopo una variegata ricerca bibliografica la mia attenzione è ricaduta sulle turbine eoliche e nello specifico nel riduttore presente al loro interno per i motivi che analizzeremo di seguito.

I dati negli ultimi anni mostrano un incremento di interesse dell'eolico sia onshore, più diffuso fin ora, che offshore. Tale interesse è dovuto alla forte richiesta di energia pulita a fronte degli obiettivi di decarbonizzazione che si sono posti differenti nazioni e alla possibilità di progettare ed installare tali impianti

con relativa velocità e facilità se si paragona per esempio ad impianti idroelettrici.

La Verisk Analytics attraverso la società Wood Mackenzie [15] prospetta una crescita annuale del comparto eolico per il prossimo decennio pari al 9% così da passare da 740 GW installati al mondo nel 2020 a 1750 GW.

Anche in Italia le prospettive dichiarate da ANEV (Associazione Nazionale Energia del Vento) attraverso il Sole24Ore sono abbastanza fiduciose [16]. Per favorire la decarbonizzazione l'ANEV dichiara che fino al 2030 il potenziale eolico installabile nel nostro paese è di 19.3 GW che vorrebbe dire circa raddoppiare la potenza attuale installata pari a 10.9 GW fino ad arrivare potenzialmente a 30GW nel 2050.

Viste le potenzialità di tale settore ed i dati disponibili in bibliografia si sono andate ad analizzare le turbine eoliche in ottica di applicare il nostro metodo.

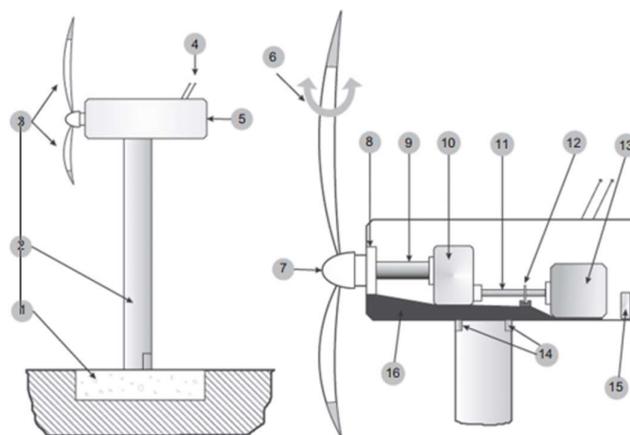


Fig. 2. Components of the WT: 1—base/foundations; 2—tower; 3—blades; 4—meteorological unit (vane and anemometry); 5—nacelle; 6—pitch system; 7—hub; 8—main bearing; 9—low speed (main) shaft; 10—gearbox; 11—high speed shaft; 12—brake system; 13—generator; 14—yaw system, 15—converter, 16—bedplate. N.B. drive train=9+11.

Figura 21 - Macro componenti turbina eolica

Nell'immagine precedente sono rappresentati gli elementi costituenti della maggior parte delle turbine eoliche.

Come detto in precedenza andiamo ad applicare il metodo ipotizzato all'assieme della turbina eolica.

4.2 Ricerca dei sottoassiemi da analizzare

Andiamo ad analizzare i dati relativi all' affidabilità di turbine di taglia dai 2MW ai 3MW [17] calcolando la disponibilità dei vari sotto assiemi come visto in precedenza.

Sub system	Failure Rate λ [n/year]	Failure Rate λ [n/h]	Average downtime [h]	Rateo Agg Cond μ [n/h]	A Disponibilità
Electrical system	0,55	6,27854E-05	72,93	0,013712	0,995441933
Gearbox	0,1	1,14155E-05	260,5	0,003839	0,997035073
Rotor Blades	0,17	1,94064E-05	146,53	0,006825	0,997164445
Control system	0,41	4,68037E-05	55,2	0,018116	0,997423096
Converter	0,24	2,73973E-05	90	0,011111	0,997540312
Generator	0,1	1,14155E-05	126,13	0,007928	0,99856223
Yaw system	0,18	2,05479E-05	67,93	0,014721	0,998606124
Others	0,11	1,25571E-05	105,6	0,00947	0,998675729
Hydraulic system	0,23	2,62557E-05	41,47	0,024114	0,99891236
Main shaft	0,05	5,70776E-06	181,77	0,005501	0,998963575
Structure	0,09	1,0274E-05	97	0,010309	0,999004417
Mechanical Brake	0,13	1,48402E-05	65,6	0,015244	0,999027431

Tabella 6

Dalla tabella, ordinata in ordine crescente di disponibilità, si osserva che il sotto assieme che ha la maggiore indisponibilità è il sistema elettrico seguito subito dopo dal Gearbox. Questo componente è stato preso come obiettivo su cui applicare il metodo poiché oltre ad avere una delle disponibilità più basse ha un elevato down time e costi di intervento elevati causati dalla frequente indisponibilità di effettuare gli interventi all' interno della pala eolica. Il riduttore inoltre risulta essere uno dei componenti che impatta maggiormente nel costo complessivo della turbina

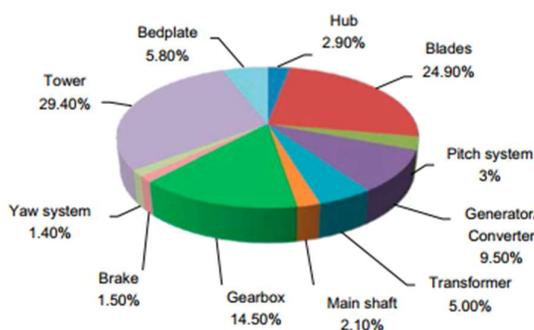


Figura 22 - Distribuzione dei costi di una turbina da 2MW

Come si può vedere il riduttore è l'elemento più costoso della turbina dopo la torre e le pale.

Ed è uno degli elementi che riduce maggiormente l'aspettativa di vita della macchina che è stimata solitamente in 20 anni. [18]

Andiamo ora ad analizzare nello specifico quali elementi del riduttore risultano essere i più “delicati” e che quindi causano un impatto negativo sull’ affidabilità della turbina eolica.

4.3 Analisi delle criticità del riduttore.

Il riduttore, quindi, è l’elemento meccanico all’ interno delle turbine eoliche che ha la più ridotta disponibilità. Ora vogliamo analizzare quali possano essere le cause che ne riducono la vita utile a circa la metà di quella stimata.

Solitamente nelle maggior parte delle turbine installate di taglia media, cioè tra 1MW e 3MW, abbiamo un riduttore che presenta 3 stadi [19]. Il primo è di tipo epicicloidale con ruote che possono essere sia a denti dritti che elicoidali [20] [21]. I successivi due stadi sono solitamente stadi classici a denti elicoidali.

L’ obiettivo di tale riduttore è quello di trasformare un elevata coppia a bassa velocità di rotazione ad un elevata velocità di rotazione affiche possa essere generata energia elettrica. Il rapporto di trasmissione totale di tali riduttori è dell’ordine di 100^{-1} .

Di seguito viene riportata un’immagine che rappresenta i principali componenti di un riduttore per turbine eoliche:

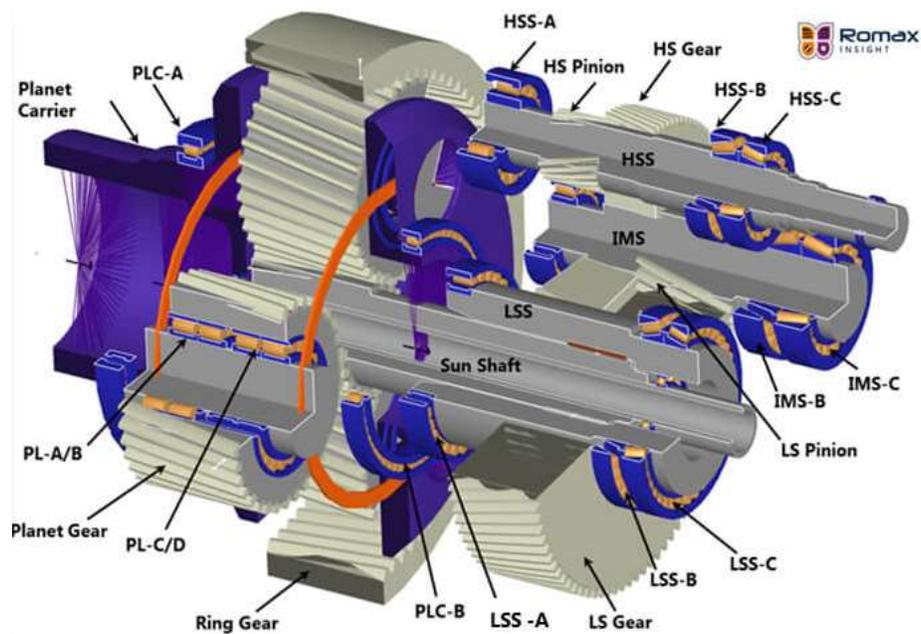


Figura 23 – Schema Riduttore

Come indicato nell'immagine solitamente si utilizzano le seguenti nomenclature per identificare gli alberi dei differenti stadi ed i componenti ad essi associati.

- low-speed shaft (LSS)
- intermediate speed shaft (ISS)
- high-speed shaft (HSS)

Il National Renewable Energy Laboratory (ente americano sull'energia rinnovabile) ha un database che raccoglie tutti i dati relativi alle rotture dei riduttori delle pale eoliche Gearbox Reliability Database. [22]

Tale database in 18 anni di attività ha raccolto 1894 incidenti da 84 impianti eolici. Dal database risulta quanto segue:

Secondo le ultime statistiche del database sull'affidabilità del riduttore, la maggior parte dei guasti a tale componente delle turbine eoliche per il 76,2% è causato dai cuscinetti. Gli ingranaggi sono stati identificati come la seconda causa di guasto nel 17,3% dei casi, seguiti da altri componenti che rappresentano il 6,6% dei guasti. Tra gli altri componenti, predominano i problemi dell'alloggiamento e del sistema di lubrificazione e filtrazione.

Queste statistiche si basano su circa 1050 registrazioni di danni ai riduttori delle turbine eoliche fornite dai proprietari e dagli operatori di impianti eolici dal 2009 ad agosto 2016. I proprietari e gli operatori che partecipano a questo sforzo rappresentano oltre il 40% della capacità eolica degli Stati Uniti.

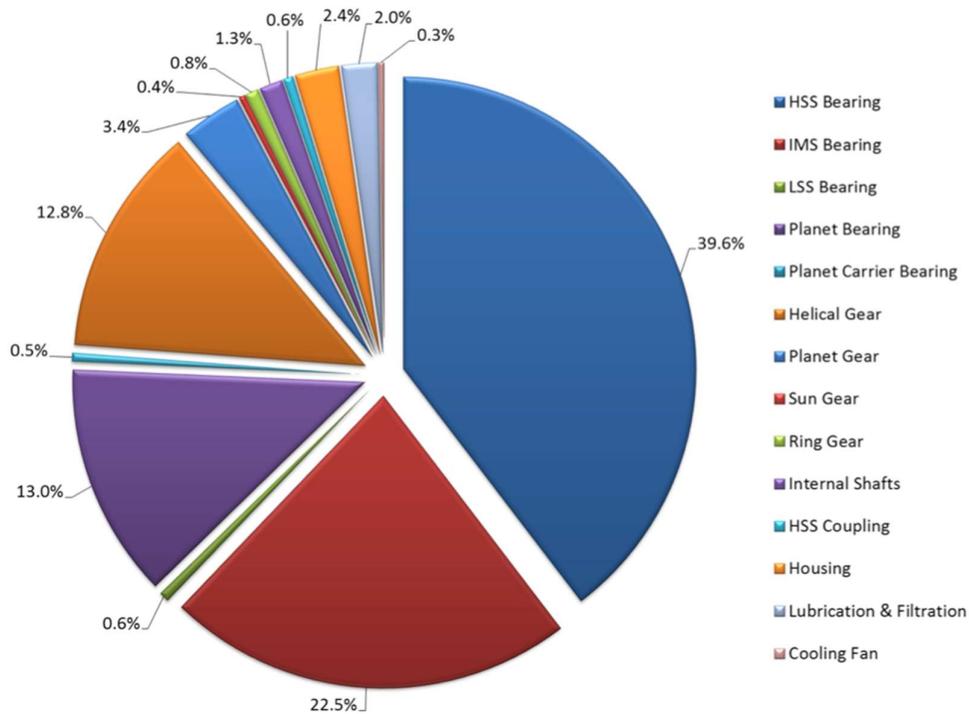


Figura 24 - Cause rottura riduttore

Inoltre, anche la maggior parte delle problematiche relative alle ruote dentate può essere attribuita ai cuscinetti veloci [23].

Come si osserva dal grafico a torta precedente i componenti più delicati risultano essere i cuscinetti relativi all'albero veloce HSS seguiti da quelli dell'albero intermedio IMS.

Tali rotture potrebbero essere causate da una forte variabilità del carico a cui sono soggetti i riduttori. Di seguito ne viene riportato un esempio, si tratta della variazione della potenza in uscita di una turbina eolica in un periodo di 120 secondi.

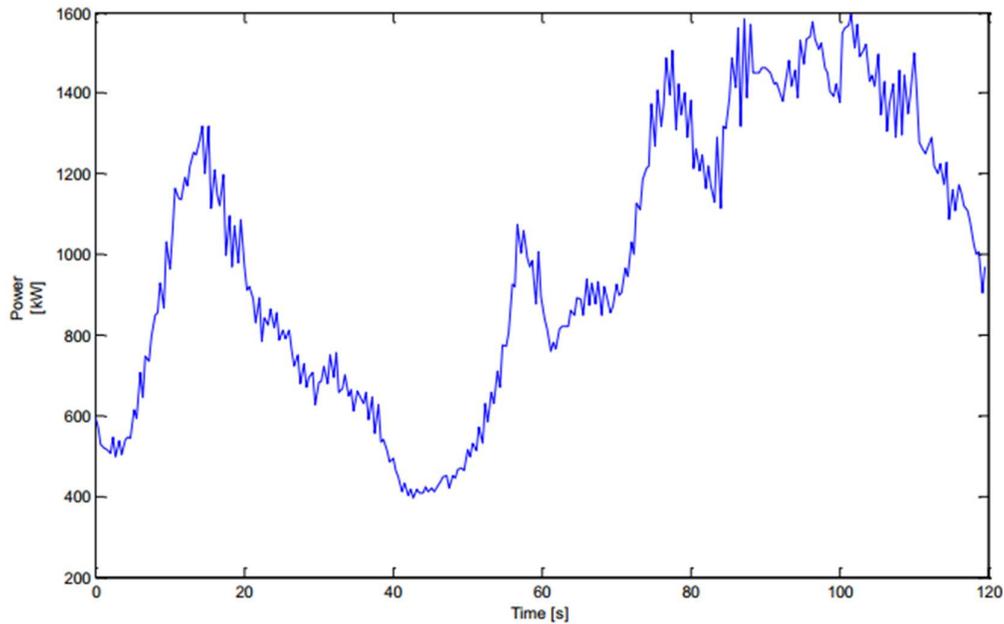


Figura 25 - Esempio potenza prodotta da una turbina in due minuti

Nei cuscinetti di elevate dimensioni soggetti a elevate velocità di rotazione potrebbe verificarsi un fenomeno di scorrimento tra le parti volventi e le sedi.

Tale scorrimento si genera perché nella parte non caricata del cuscinetto la parte volvente a causa della forza centrifuga perde contatto con la sede interna e la sua velocità si abbassa considerevolmente. Appena però entra nella zona sotto carico del cuscinetto questa entra nuovamente a contatto con la sede interna ed è soggetta quindi ad una forte accelerazione. Il recupero di velocità della parte volvente non è istantaneo a causa della sua inerzia; quindi, in tale zona si genera uno slittamento che può causare smearing o adhesive wear. [23]

Inoltre, è stato trovato uno studio [24] che fa riferimento alla medesima tipologia di riduttori per pale eoliche su cui è stato applicato il metodo per la stima della vita dei componenti consigliato in precedenza: "Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment" of the Naval Surface Warfare Center [7]

Nello studio [24] viene utilizzata la metodologia citata in precedenza per analizzare le caratteristiche affidabilistiche di tre differenti design di riduttori, ipotizzati ed applicati su due differenti tipologie di pale eoliche.

Di seguito vengono riportate le seguenti caratteristiche delle due tipologie di turbine:

Characteristic	R80	R100
Nominal Power (MW)	1.5~2.0	3.0~5.0
Rotor Diameter (m)	80~90	120~130
Hub Height (m)	60~100	100~120
Rotational Speed (rpm)	10~20	14~15
Operating Temperature °C	-25~40	-25~40
Number of Blades	3	3

Tabella 7

Si ipotizza l'utilizzo di tre differenti riduttori:

GB-R80: Caratterizzato da un primo stadio epicicloidale e due paralleli con un rapporto di riduzione totale di 100, simile a quello che analizzeremo.

GB-R100-S: Caratterizzato da uno stadio epicicloidale e un successivo stadio parallelo con una riduzione intorno a 35.

GB-R100-A: Caratterizzato da due stadi epicicloidali e uno stadio classico con una riduzione totale di circa 126.

Di seguito viene riportata una immagine che esplicita due delle tre differenti configurazioni e identifica con i nomi alcuni dei punti caratteristici.

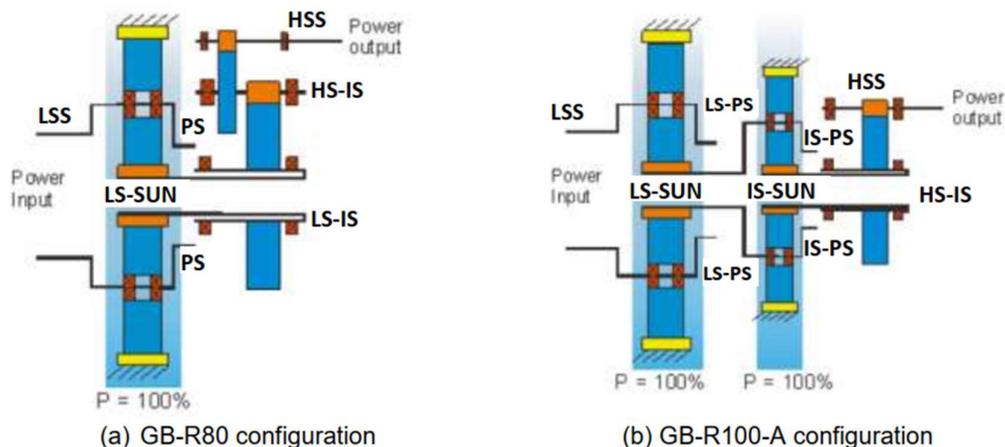


Figura 26 – Tipologia modelli [7]

Attraverso i modelli proposti da [7] si ottengono i seguenti risultati. Nella prima immagine vengono paragonati i failure rate dei differenti stadi per i 3 riduttori.

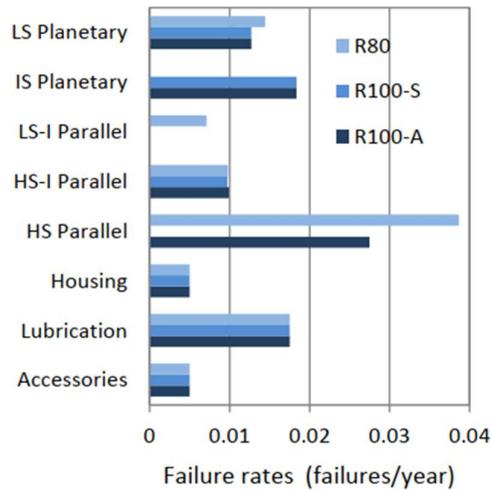


Figura 27

Si osserva che per il riduttore con il design più classico e simile a quello analizzato I R80, si ha il failure rate maggiore per i componenti relativi all'albero veloce HSS.

Inoltre, si osserva che i failure rate complessivi calcolati per i differenti riduttori sono i seguenti:

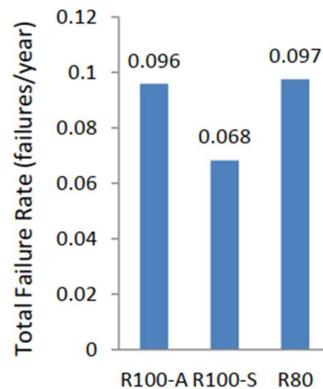


Figura 28

In questo caso risulta che il riduttore R80 con design simile a quelli analizzati finora risulta avere un failure rate calcolato tramite [7] simile a quello derivato dai dati.

Quindi, il [7] calcola un failure rate degli stadi veloci superiore al resto delle parti, come indicato dai dati riportati in precedenza. Inoltre, ricava che i failure rate totale del riduttore simile a quello analizzato, R80, in precedenza risulta essere simile al failure rate ricavato dai dati citati dagli altri studi. Ciò sta a

sottolineare la bontà, almeno qualitativa, del riferimento utilizzato. Quindi nel caso in cui non avessimo dati reali in merito consentirebbe di fare le prime valutazioni per effettuare l'applicazione del metodo, come precedentemente consigliato.

Ricapitolando alla fine della prima fase del metodo abbiamo individuato che il componente meccanico più problematico nelle turbine eoliche risulta essere il riduttore. Inoltre, è stato individuato il componente che causa la maggiore delicatezza dell'assieme riduttore.

Infine, fa capire quanto, anche in questo caso, la scelta tra riparazione o sostituzione del riduttore sia al limite come si può osservare dai dati economici raccolti nell' articolo "Using a Hybrid Cost-FMEA Analysis for Wind Turbine Reliability Analysis" [17] da cui si evince che la differenza di costi tra riparazione e sostituzione è intorno al 10% a sfavore della sostituzione andando a contare esclusivamente i costi persi durante il down time senza quindi contare la manodopera (per questo motivo solo una politica azienda mirata alla rigenerazione dei componenti può favorire in un primo periodo tale approccio).

Sub-System	Failure Rate (N/year) [21,63]	Annual Reliability	Average Replacement Cost (€ (Including Crane + Labor) [66-68]	Average Downtime per Hours [63,64]	Average Cost of Loss of Production; Selling Tariff 0.082 (€/kWh)			Expected Cost of Failure (€)	Criticality (€/kWh)
					2 MW	3 MW	Average		
Gearbox	0.1	0.904	528,253.33	260.50	12,816.60	19,224.90	16,020.75	493,561.76	49,356.18

Figura 29 [17]

5 Modellazione tramite Reverse Engineering

Dai dati ricavati dal paper [20] sono riuscito ad effettuare la modellazione di un riduttore utilizzato nelle turbine eoliche, nello specifico un riduttore di tipologia classica formato dal primo stadio epicicloidale ed i successivi due paralleli.

Il riduttore in oggetto è montato sulla turbina eolica Fuhrlaender FL MD-77 che ha le seguenti caratteristiche:

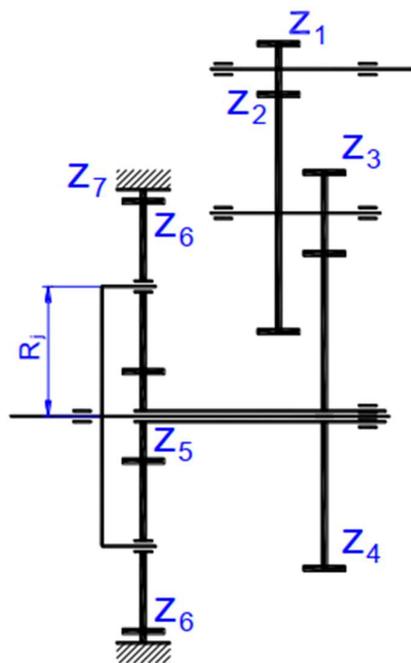
Potenza nominale	1500	kW
Velocità di accensione	3	m/sec
Velocità nominale vento	11,1	m/sec
Velocità di spegnimento	20	m/sec
Velocità di sopravvivenza	50,1	m/sec
Velocita' rotore massima	17,3	rpm

Tabella 8



Figura 30 -Turbina eolica

Di seguito vengono riportate alcune caratteristiche del riduttore installato sulla turbina sopraccitata:



	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7
N° denti	25	116	26	102	22	41	-104
Rapporto Trasmissione	4,64		3,923		5,727		
Rapporto Trasmissione Totale	104,254						
Velocità di rotazione	17,3/1800						

Tabella 9

Figura 31 – Schema riduttore

Come indicato dal [20] primo stadio epicicloidale può essere realizzato sia con ingranaggi a denti dritti sia con profili elicoidali. Ma da come emergerà dal disegno 2D a cui si è fatto riferimento per ricostruire il riduttore si è scelto di

utilizzare i denti dritti poiché i cuscinetti utilizzati per supportare le parti dello stadio epicicloidale non erano adatti a supportare carichi assiali che inevitabilmente si generano con ingranaggi di tipo elicoidale.

Di seguito sono riportati i disegni 2D da cui è stato ricostruito il CAD del riduttore per andare a fare le successive valutazioni sul design.

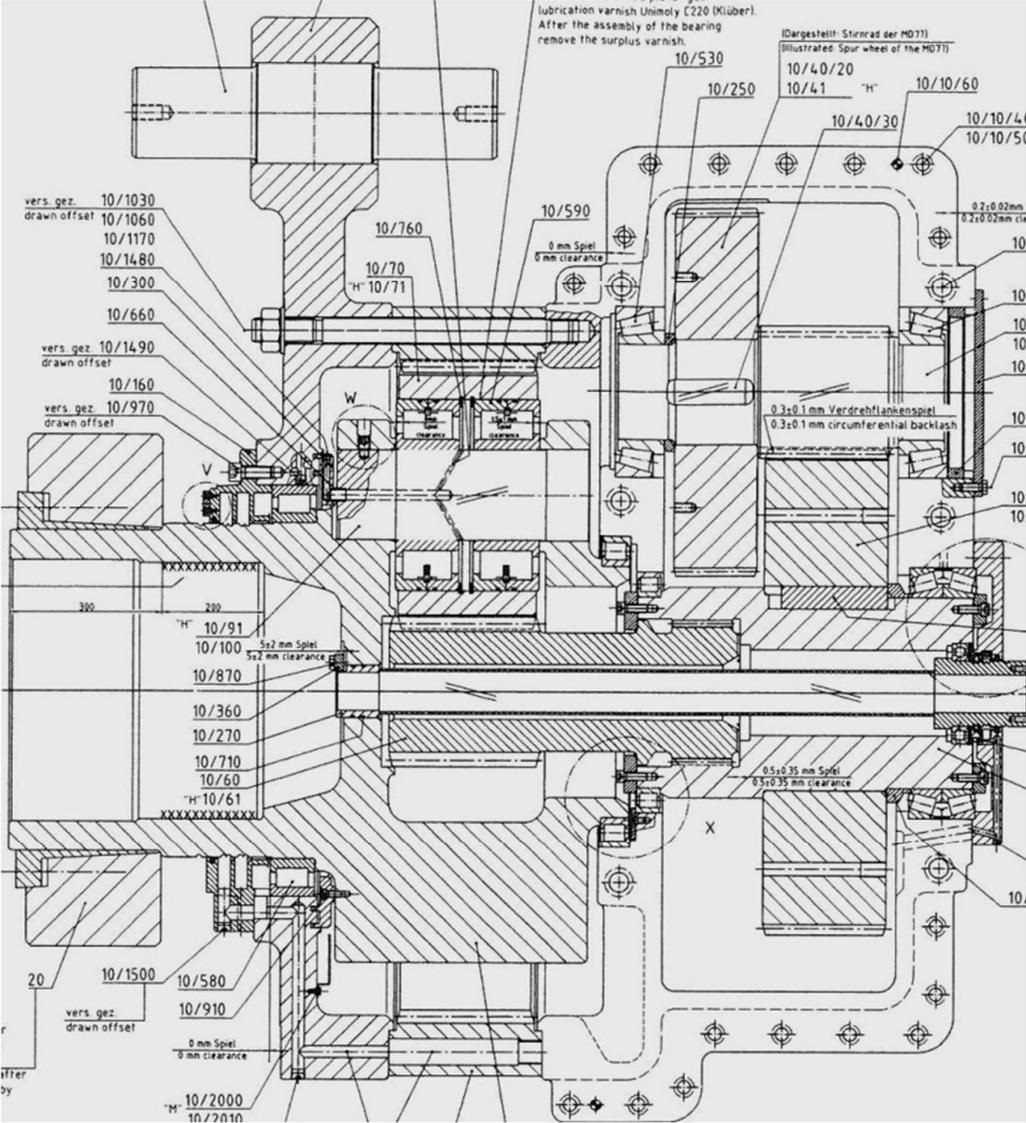


Figura 32 - Sezione riduttore turbina eolica

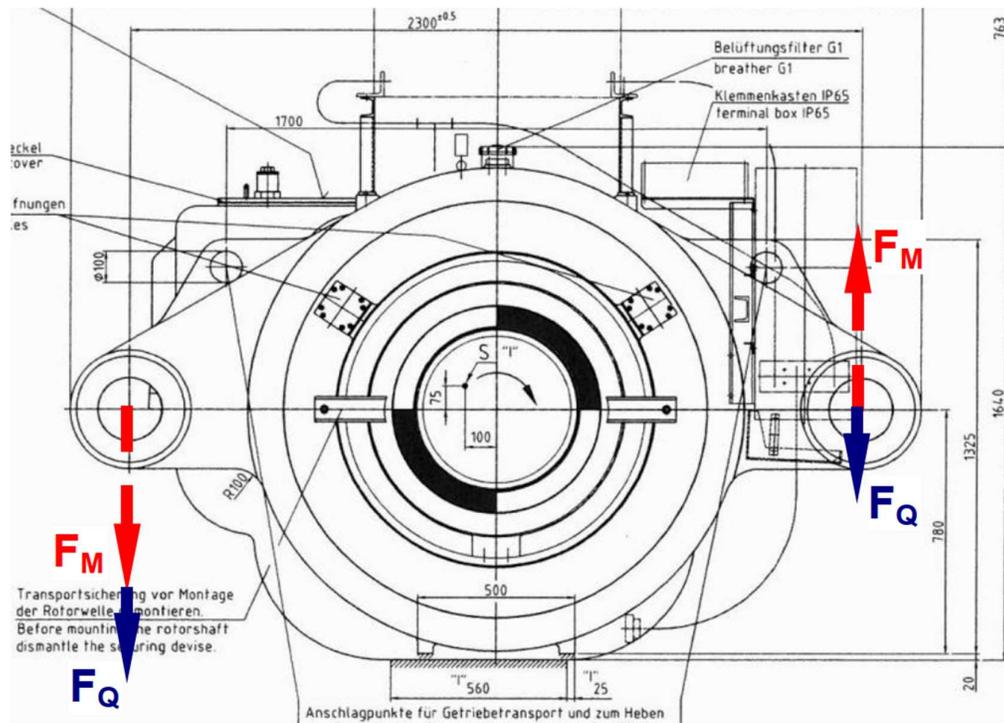


Figura 33 - Vista frontale riduttore turbina eolica

Inoltre, come ulteriore riferimento sono state utilizzate delle immagini ricavate dal datasheet di un riduttore che il fornitore della pala eolica ha identificato come potenziale ricambio che, confrontando con i 2D proposti in precedenza, risultano essere plausibili per ipotizzare i dettagli geometrici non facilmente ricavabili dalle viste 2D disponibili.

Di seguito riporto delle immagini ricavate dal datasheet del Gearbox - PEAS 4390.5



Figura 34 - Immagine Riduttore turbina eolica

La modellazione del riduttore è stata fatta utilizzando Solid Edge 2022 software CAD della Siemens, al quale è stato affiancato KiSSsoft per la modellazione delle ruote dentate. L'integrazione tra Solid Edge e KiSSsoft, software dedicato principalmente alla progettazione di ruote dentate e relativi alberi, ha permesso che dalla definizione delle caratteristiche delle ruote dentate fossero modellate automaticamente a CAD con delle features proprie di Solid Edge.

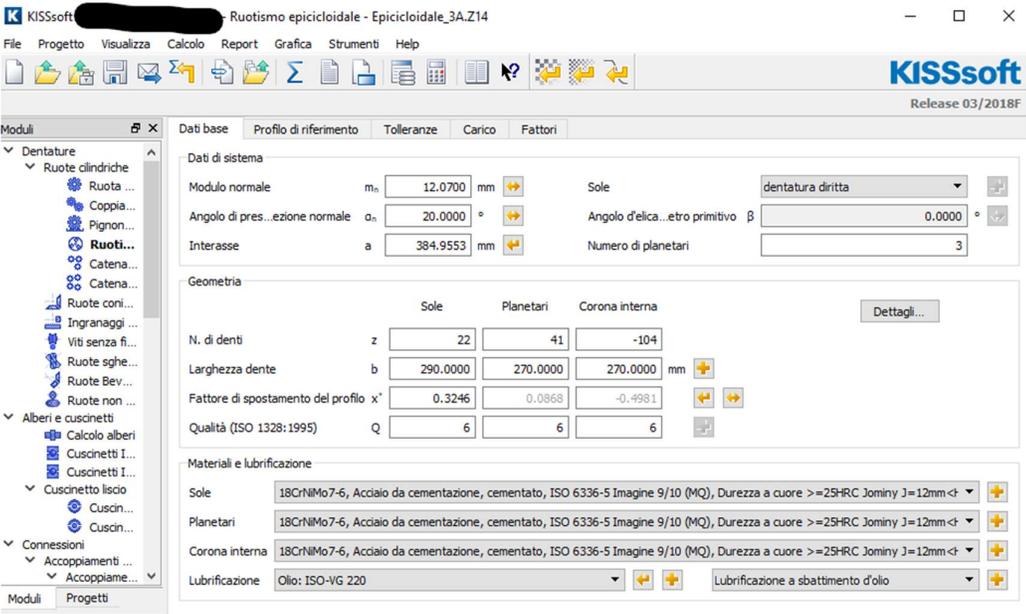


Figura 35-Esempio Conf. Rotismo Epicicloidale Kissoft

Grazie a tale software la modellazione pura delle ruote dentate è risultata molto più agile.

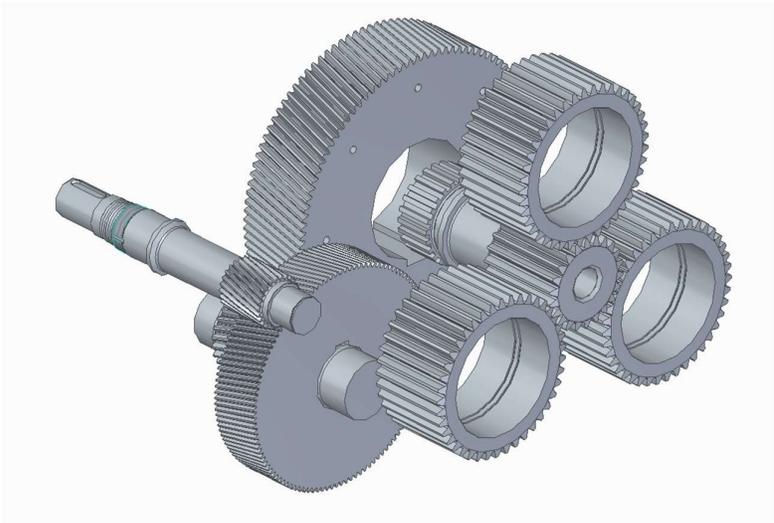


Figura 36-Ruote dentate modellate

Successivamente si è passati alla ricerca dei differenti componenti commerciali e alla modellazione di tutte le parti che costituiscono il riduttore basandosi sulle quote necessarie ricavate dai file 2D, riportati in precedenza e recuperati da [20].

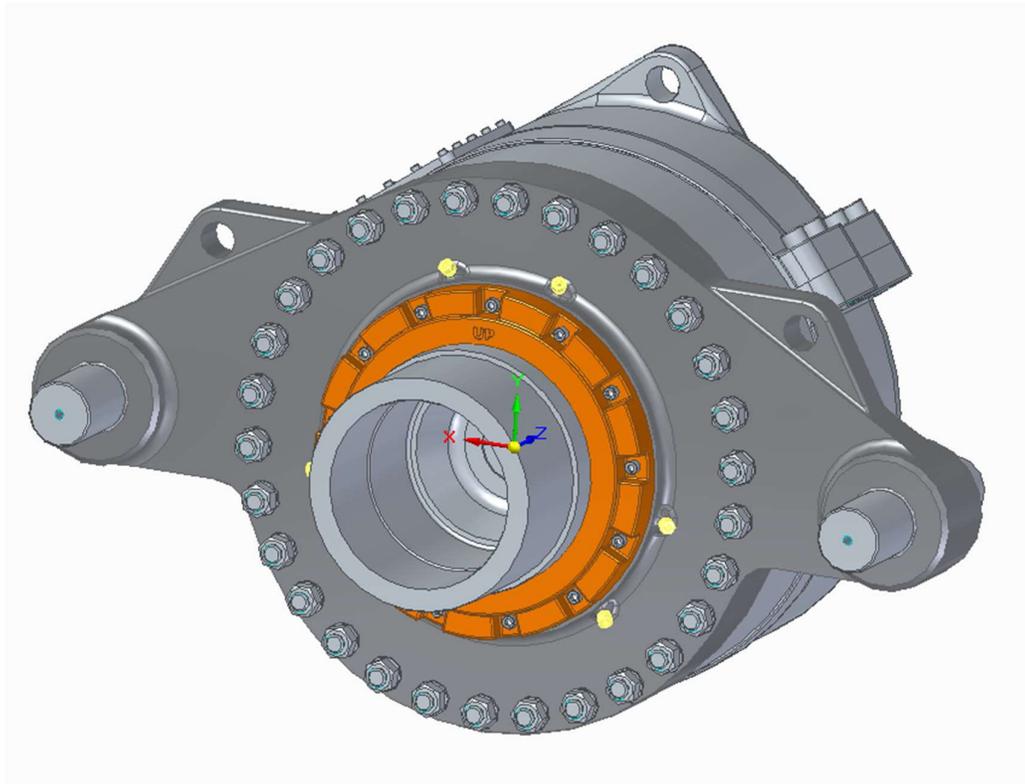


Figura 37-Complessivo Riduttore Modellato

6 Calcolo tempi disassemblaggio

Come analizzato nel paragrafo 4.3 si è osservato che gli elementi più delicati all' interno dell'albero risultano essere in primis i cuscinetti dell'HSS (High Speed Shaft):

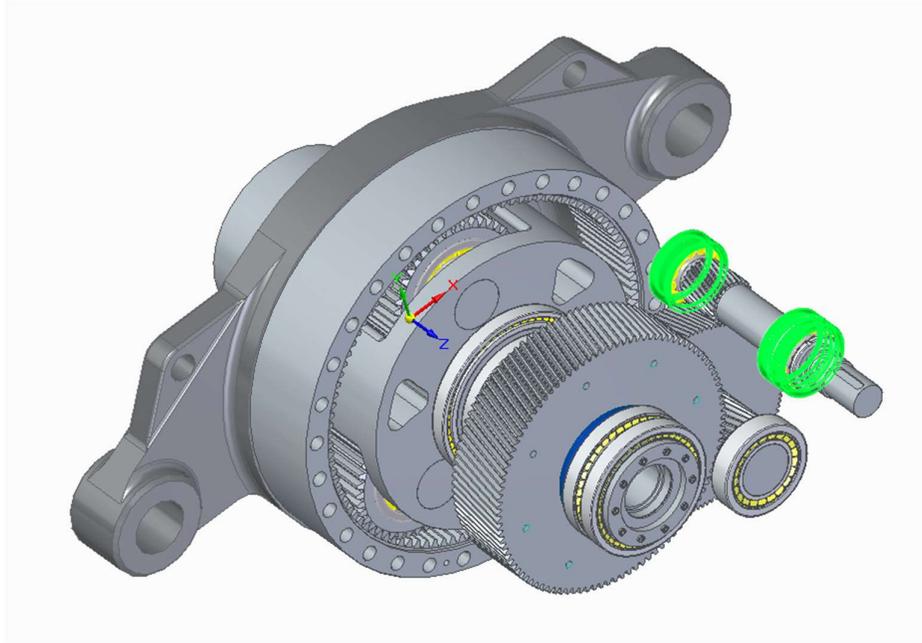


Figura 38 - Evidenziati cuscinetti albero veloce

E successivamente i cuscinetti del ISS (Intermedie Speed Shaft):

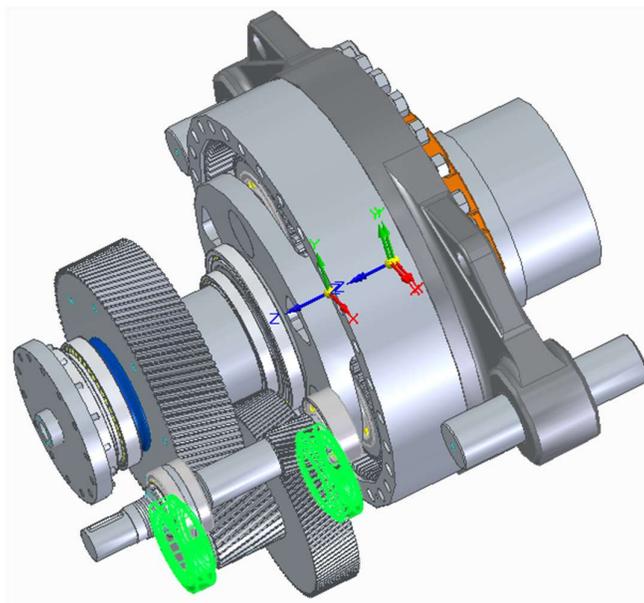


Figura 39 - Evidenziati cuscinetti albero intermedio

Quindi con i metodi visti in precedenza nel paragrafo 3.5 Mitrouchev Method [13] e Jianjun Method [14] andiamo a calcolare due possibili sequenze di disassemblaggio per raggiungere i nostri componenti obiettivo, prima relativi all' albero veloce e poi a quello intermedio.

Per far ciò ci affidiamo alla numerazione identificata dal seguente disegno:

Nello specifico, come detto in precedenza, nella prima fase analizzeremo le sequenze per arrivare ai cuscinetti dell'albero veloce, componente 4 del disegno precedente e successivamente quelli relativi all' albero intermedio, componente 3.

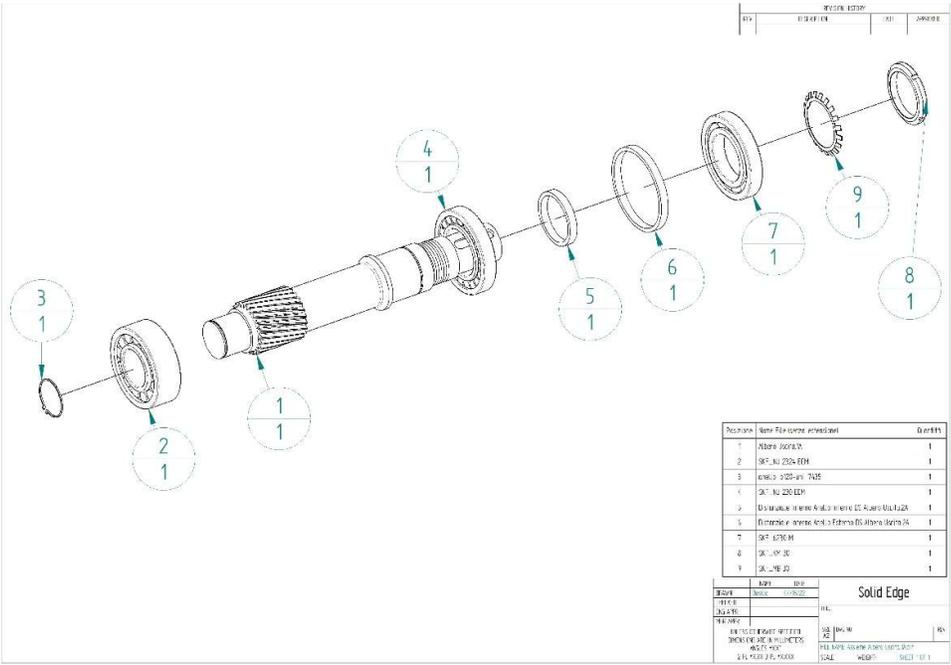


Figura 41 - Albero Veloce, Componente 4 disegno d'assieme

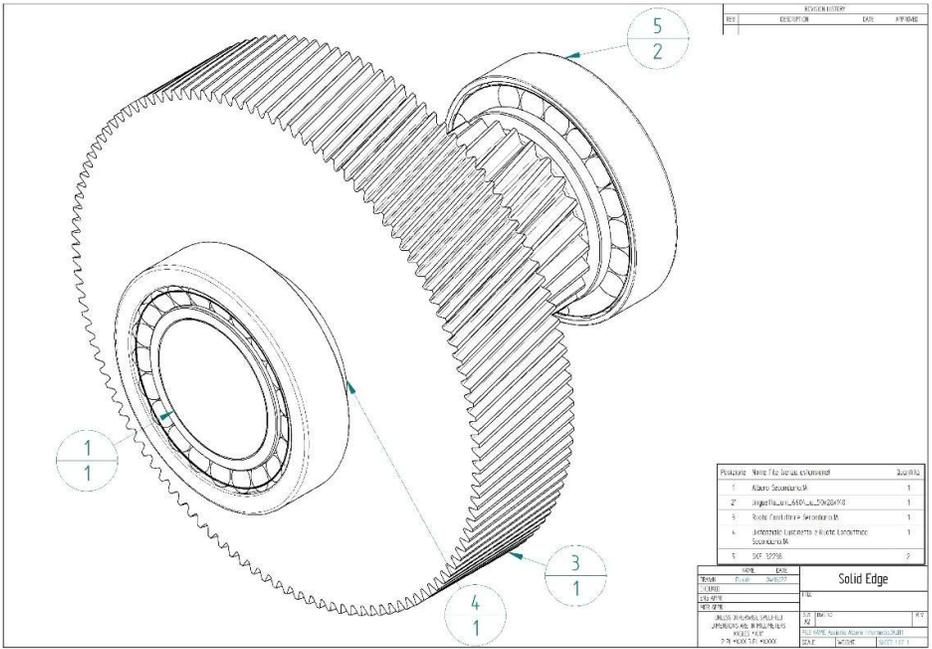


Figura 42 - Albero Intermedio, Componente 3 disegno d'assieme

6.1 Applicazione Jianjun Method. [14]

Concentriamoci in primis sui cuscinetti dell'albero veloce. Quindi ci poniamo come obiettivo quello di applicare il metodo di Jianjun per trovare la sequenza di disassemblaggio per arrivare a tali componenti.

Identifichiamo i componenti con la seguente nomenclatura:

$C_{i,j,k}$ Il pedice i indica il componente rispetto all' identificativo presente nel disegno 2D del livello di cui fa parte; invece, i successivi pedici indicano i sopra livelli.

A_i Indichiamo con A l'assieme ed il pedice relativo all'assieme.

Analizziamo ora la sequenza di smontaggio del primo cuscinetto dell'albero veloce il componente $C_{2,4}$.

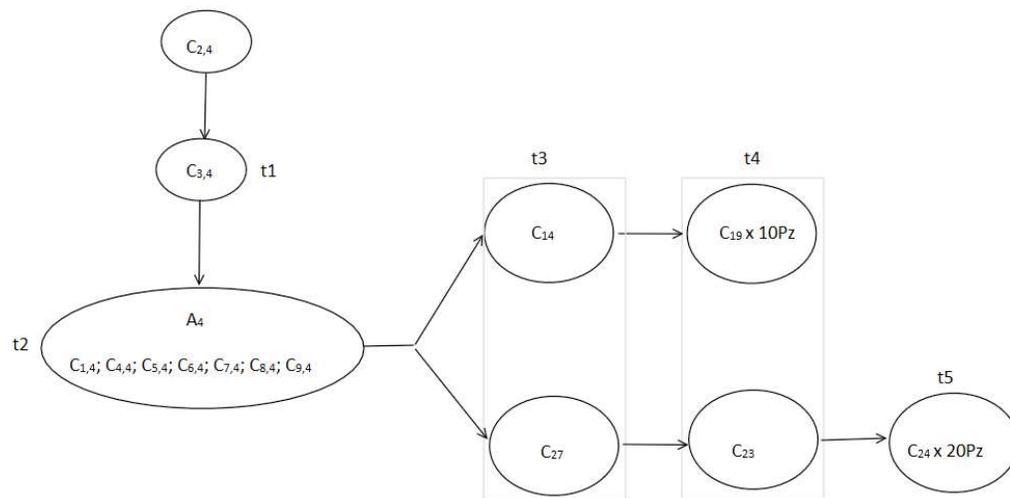


Figura 43 - Removal influence graph $C_{2,4}$

Quindi la sequenza di disassemblaggio si ricava ripercorrendo a ritroso il diagramma:

$C_{24} \times 20Pz$; C_{23} ; C_{27} ; $C_{19} \times 10Pz$; C_{14} ; A_4 ; $C_{3,4}$; $C_{2,4}$;

Per i componenti $C_{4,1}$ e $C_{7,1}$ risultano i seguenti diagrammi e sequenze di smontaggio.

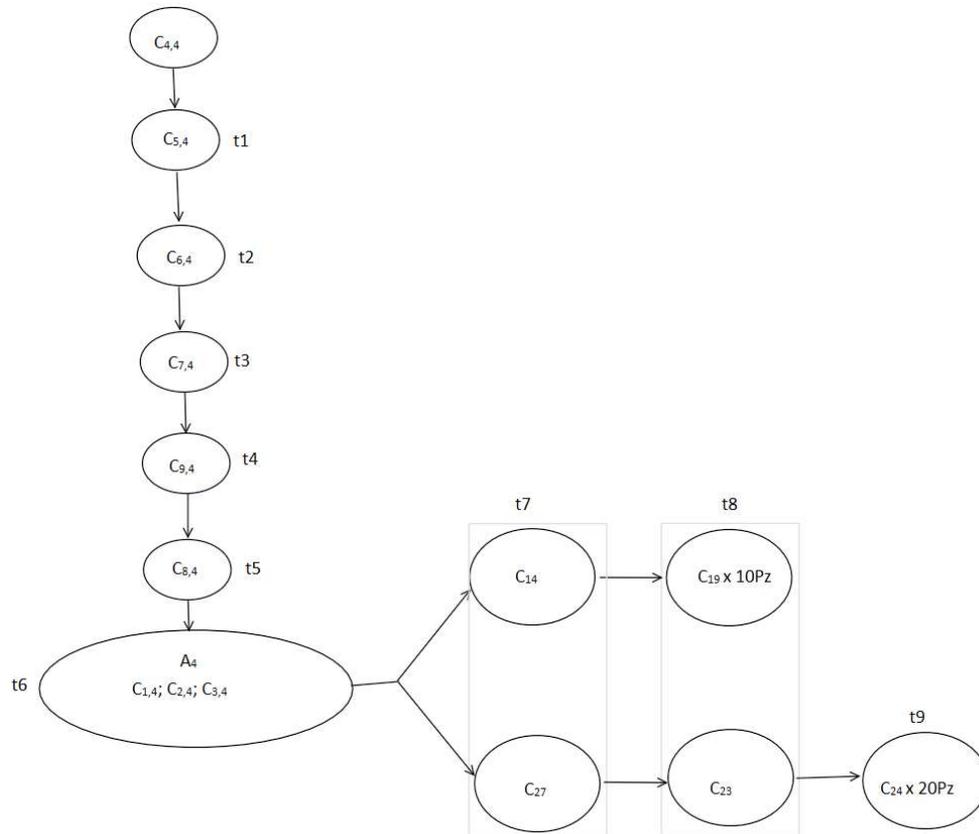


Figura 44 - Removal influence graph C4,4

Sequenza di smontaggio per il componente C4,4:

C24 x 20Pz; C23; C27; C19 x 10Pz; C14; A4; C8,4; C9,4; C7,4; C6,4; C5,4

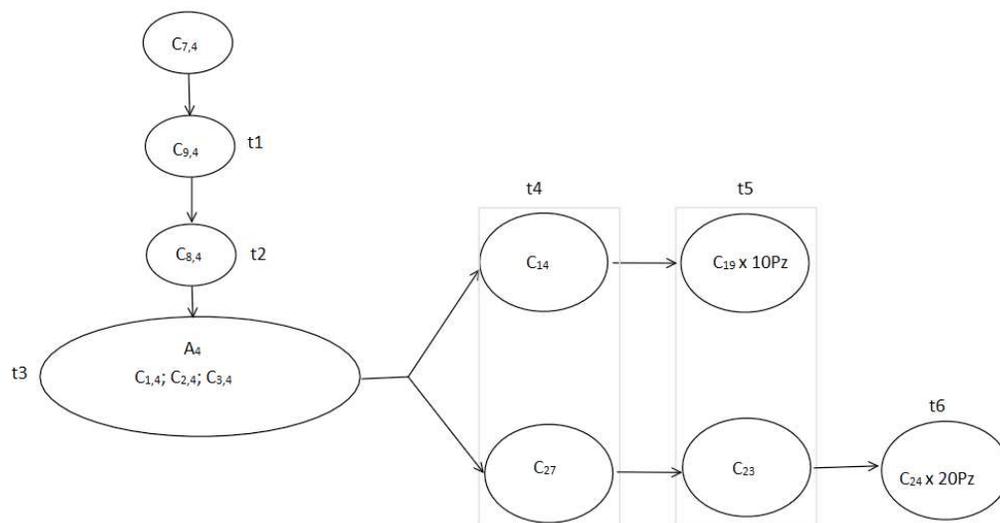


Figura 45 - Removal influence graph C7,4

La sequenza di smontaggio per il componente C_{7,4} risulta:

C₂₄ x 20Pz; C₂₃; C₂₇; C₁₉ x 10Pz; C₁₄; A₄; C_{8,4}; C_{9,4}; C_{7,4}

Applico ora il metodo per andare ad analizzare la sequenza di disassemblaggio relativa ai cuscinetti dell'albero intermedio.

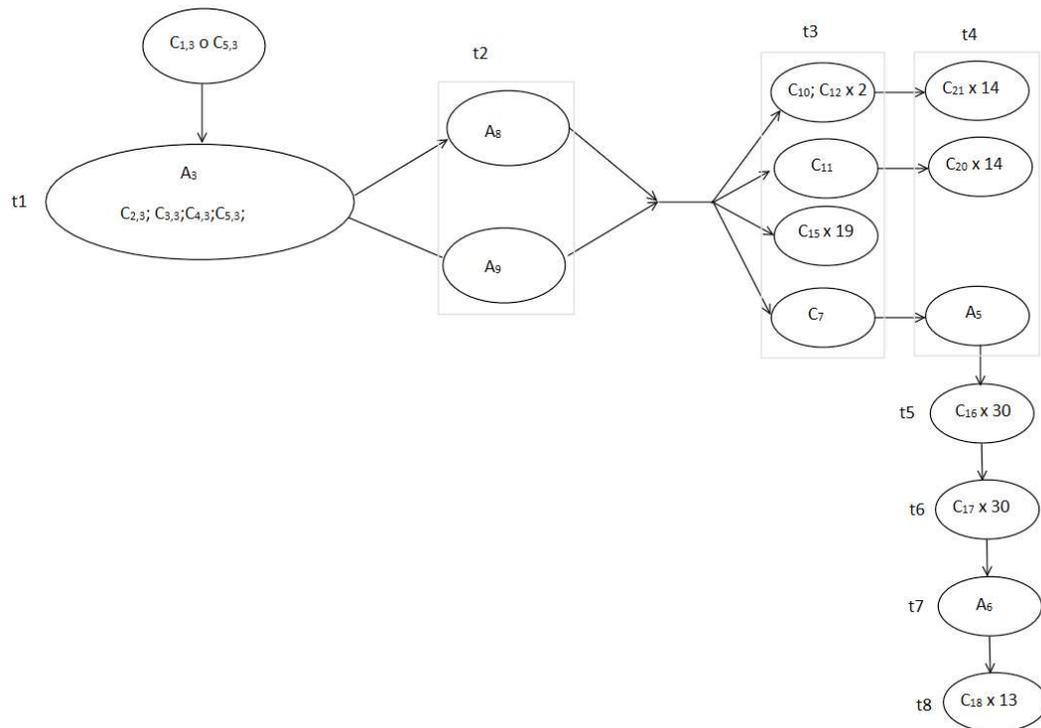


Figura 46 - Removal influence graph C_{1,3} o C_{5,3}

Quindi dal diagramma superiore si ricava che le sequenze di smontaggio per i componenti C_{1,3} e C_{5,3} risultano:

C₁₈ x 13Pz; A₆; C₁₇ x 30pz; C₁₆ x 30Pz; A₅; C₇; C₁₅ x 19Pz; C₂₀ x 14Pz; C₁₁; C₂₁ x 14Pz; C₁₀; A₈; A₃; C_{1,3} o C_{5,3}

In alternativa:

C₁₈ x 13Pz; A₆; C₁₇ x 30pz; C₁₆ x 30Pz; A₅; C₇; C₁₅ x 19Pz; C₂₀ x 14Pz; C₁₁; C₂₁ x 14Pz; C₁₀; A₉; A₃; C_{1,3} o C_{5,3}

Le due sequenze possibili si differenziano esclusivamente per la possibilità di smontare sia l'assieme A₈ che A₉, cioè la parte superiore o inferiore del case posteriore.

6.2 Mitrouchev Method. [13]

Andiamo ora ad applicare il metodo di Mitrouchev per studiare la sequenza di disassemblaggio.

Applichiamo il metodo all'assieme complessivo andando a considerare gli assiemi che costituiscono il riduttore. Quindi la prima fase del metodo ci consente di andare a definire le sequenze di disassemblaggio per arrivare all'albero veloce e a quello intermedio sui quali sono montati i cuscinetti che hanno la frequenza di rottura più elevata.

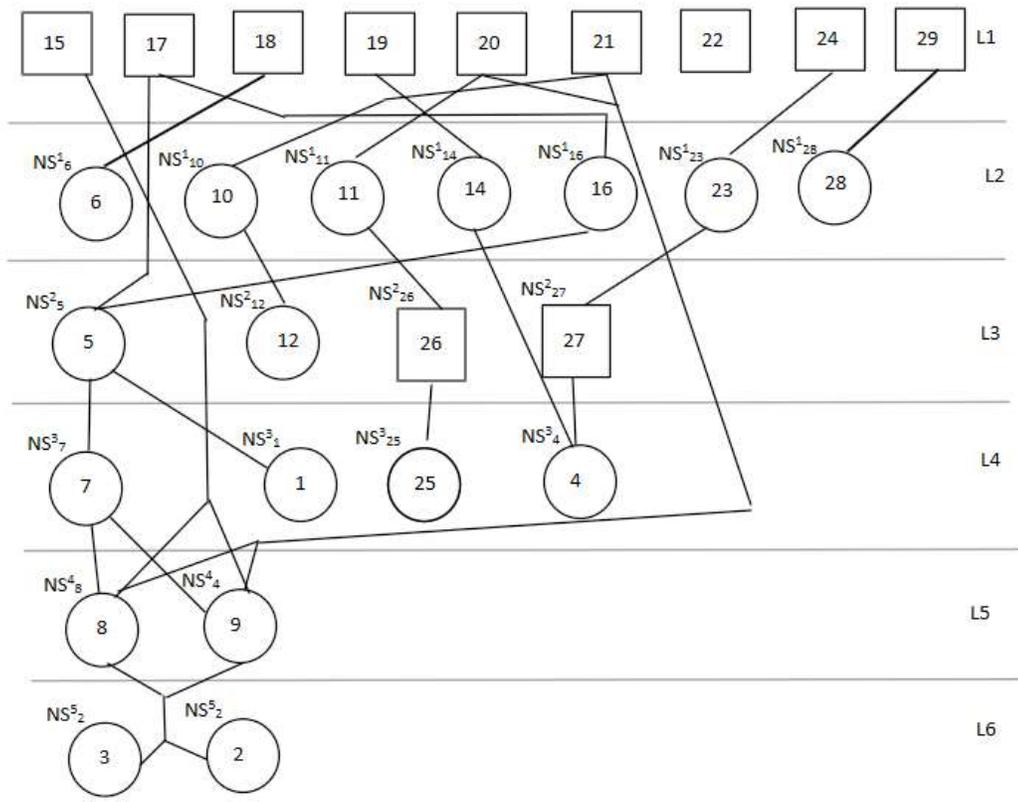


Figura 47 - DGCG Disassembly geometry contacting graph

Dal disegno precedente si osserva che l'albero veloce di uscita HSS è il componente identificato con il numero 4, invece l'albero intermedio ISS è il componente identificato con il numero 3

Sequenza per arrivare all'albero HSS:

24; 19; 23; 14; 27; 4

Una volta arrivati all'albero 4 applichiamo lo stesso metodo all'assieme relativo all'albero HSS n 4:

Diagramma per albero uscita

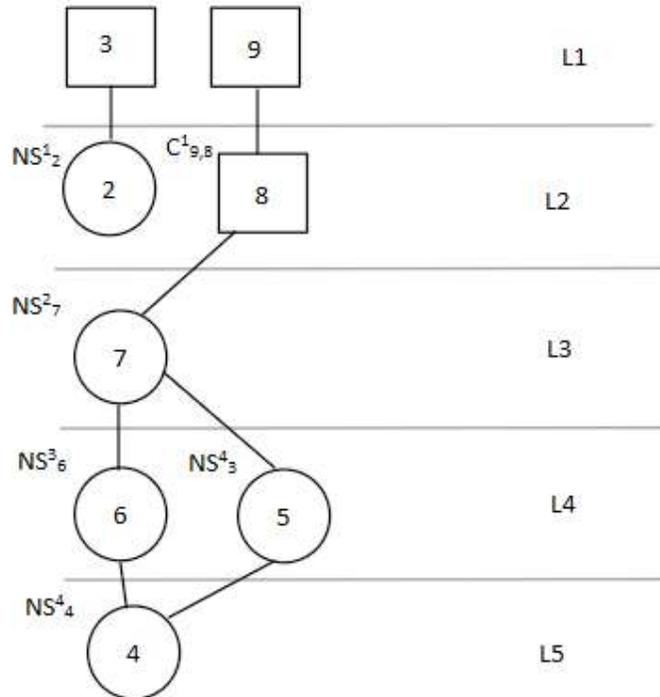


Figura 48 - DGCG Disassembly geometry contacting graph

Dal quale si ricava la seguente sequenza per i differenti cuscinetti:

Cuscinetto N2 assieme albero HSS:

[24; 19; 23; 14; 27; 4] + [3; 2]

Cuscinetto N7 assieme albero HSS:

[24; 19; 23; 14; 27; 4] + [9; 8; 7]

Cuscinetto N4 assieme albero HSS:

[24; 19; 23; 14; 27; 4] + [9; 8; 7; 5; 6; 4]

Andiamo ora a definire la sequenza di disassemblaggio per arrivare all'albero intermedio ISS:

15; 17; 21; 10; 20; 11; 5(+18; +6); 7; 8; 3

In alternativa:

15; 17; 21; 10; 20; 11; 5(+18; +6); 7; 9; 3

Anche se i componenti 10 e 11 non sono a diretto collegamento con i componenti da disassemblare questi vanno rimossi poiché non avrebbero più dei vincoli e quindi non sarebbero sicuri.

Si osserva che i due metodi offrono le stesse sequenze per quanto riguarda il disassemblaggio dei cuscinetti dell'albero di uscita dal riduttore HSS. Invece per quanto riguarda la sequenza di disassemblaggio dell'albero intermedio, il metodo di Mitrouchev identifica una sequenza più breve rispetto a quella trovata dal metodo di Jianjun.

Calcolate le sequenze di smontaggio andiamo a fare una stima dei tempi.

6.3 Stima Tempistiche

La stima delle tempistiche è fatta utilizzando i Tempi Standard Predeterminati nello specifico Method Time Measurement MTM 1 per le operazioni più dettagliate e Maynard Operation Sequence Technique MOST per le operazioni più grossolane come l'utilizzo di gru o carri ponte per la movimentazione dei componenti più ingombranti. Nello specifico va a definire la sequenza standard per eseguire la movimentazione:

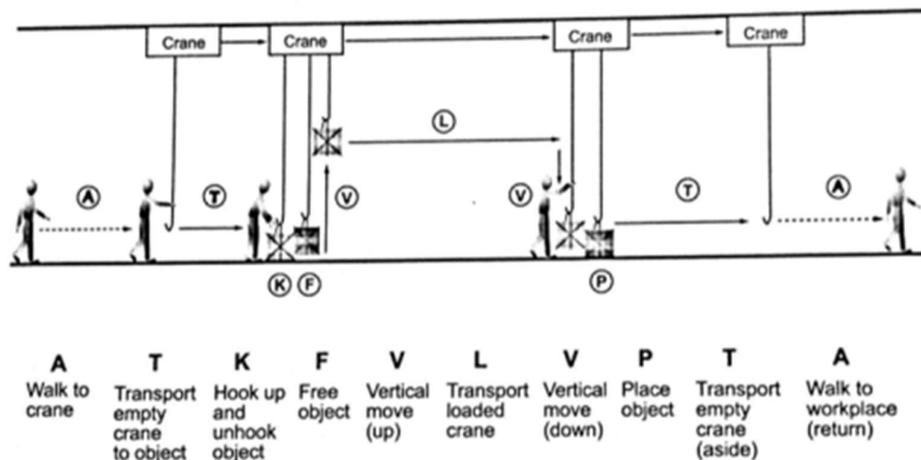


Figura 49 - Schematizzazione metodo MOST utilizzo carro ponte

Alle varie fasi sono assegnati differenti valori di TMU tabulati a seconda dei dettagli dell'operazione.

Come detto in precedenza le sequenze di disassemblaggio relative all'albero veloce sono identiche, quindi anche le tempistiche risulteranno equivalenti.

Per quanto riguarda la stima delle tempistiche relative al disassemblaggio dell'albero intermedio, optiamo per la sequenza che considera lo smontaggio della parte superiore del case posteriore poiché questa presenta degli agganci che favoriscono lo smontaggio.

Per quanto riguarda i tempi calcolati si hanno i seguenti

- Albero veloce:

Non facciamo distinzione tra le sequenze di smontaggio dei due metodi utilizzati poiché danno lo stesso risultato.

- Cuscinetto a rulli interno (SC1)= 7154,25 tmu
- Cuscinetto a rulli esterno (SC2) = 7897,7 tmu
- Cuscinetti a sfere esterno (SC3) = 7365,35 tmu

- Albero intermedio:

- Smontaggio cuscinetto (dx o sx non cambia, SC4):
 - Jianjun = 20810,6 tmu
 - Mitrouchev= 13973,3tmu

Si osserva che il tempo necessario per disassemblare i cuscinetti seguendo la sequenza di Mitrouchev è minore proprio a fronte della minore lunghezza di questa. Infine, la sequenza più breve per montare il cuscinetto dell'albero intermedio risulta sempre essere il 76.9% più lunga rispetto alla maggiore tra le sequenze dell'albero veloce.

7 Re-Design riduttore turbina eolica

Per il re-design del componente si è deciso di percorrere due strade parallele che potessero evidenziare il più possibile i principi di modularità e accessibilità evidenziati nei capitoli precedenti.

7.1 Re-Design focalizzato sulla modularità

In questo paragrafo si sono identificati i sottogruppi del riduttore che potessero lavorare in maniera “autonoma” o meglio con ridotti legami tra le altre parti.

A tal proposito si è diviso il riduttore a valle dello stadio epicicloidale, così da creare due riduttori separati che lavorassero in serie collegati tra di loro tramite un giunto a denti.

Di seguito è riportata un'immagine del design sviluppato:

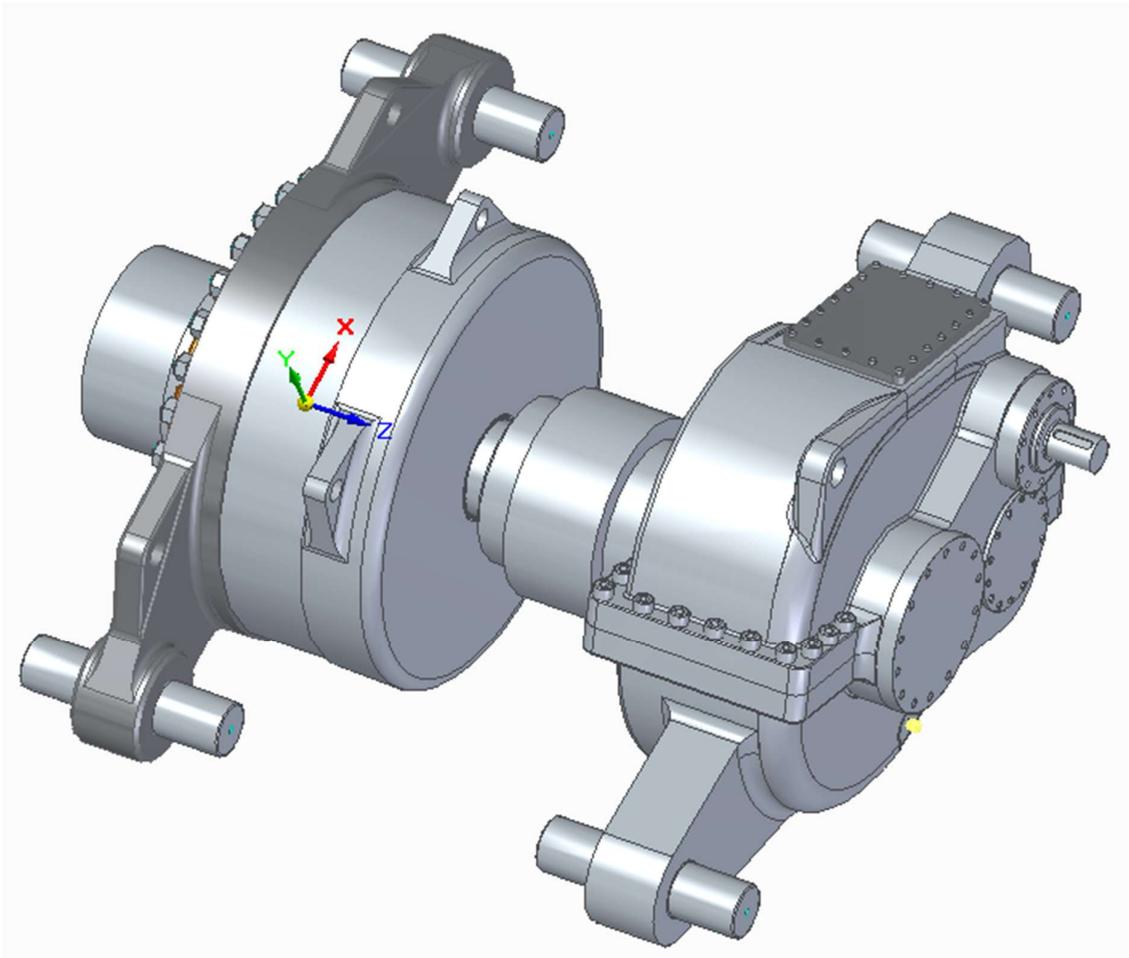
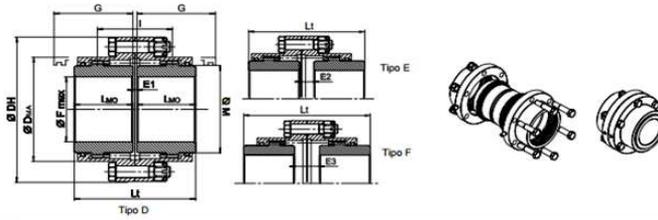


Figura 50 - Re-design Modulare

Il giunto è stato dimensionato seguendo le specifiche del catalogo della SIT S.P.A. per i giunti Sintex e ricavando le sollecitazioni dai dati espressi in precedenza derivati da differenti articoli, citati:

Giunti SITEX® ST esecuzione "CF" D-E-F

Tipologia flangiata con 2 semi giunti. Permette disallineamenti assiali, angolari e radiali.
Nota: è possibile avere le cave in fase su richiesta



Taglia	Dimensioni [mm]										Dati tecnici											
	F _{max} [mm]	DH	D _{MA}	M	L _{MO}	G*	Tipo D			Tipo E			Tipo F		Coppia [Nm]		n _{max} [min ⁻¹]	ΔK _B [mm]	ΔK _T [mm]	ΔK _W [°]	**Momento d'inerzia x10 ⁴ kg·m ²	**W [kg]
							L ₁	E ₁	L ₂	E ₂	L ₃	E ₃	T _{Nxi}	T _{Nmax}	T _{Nxi}	T _{Nmax}						
280	280	505	423	355	220	273	450	10	512	10	512	72	574	134	198200	480000	1800	-/+ 1	0,90	2 x 0,5*	103200	455
325	325	580	475	400	250	-	512	12	-	-	-	-	-	-	275000	551000	1200	-/+ 1	-	2 x 0,5*	206000	685
370	370	630	520	450	275	-	562	12	-	-	-	-	-	-	381000	762000	980	-/+ 1	-	2 x 0,5*	335000	920
400	400	700	556	490	305	-	622	12	-	-	-	-	-	-	452000	904000	900	-/+ 1	-	2 x 0,5*	533000	1210
430	430	760	615	550	330	-	672	12	-	-	-	-	-	-	658000	1315000	800	-/+ 1	-	2 x 0,5*	835000	1590
475	475	825	680	580	355	-	722	12	-	-	-	-	-	-	835000	1669000	700	-/+ 1	-	2 x 0,5*	128400	2060

* = distanza minima necessaria per allineare il giunto o sostituire fanello di tenuta
 ** = i valori riportati in tabella sono riferiti a pezzi senza foro
 Massimo disallineamento statico per un corretto montaggio ΔK_W = 2 x 1°
 Flangia portaguarnizione per grandezze da 325 a 475

T_{Nxi} Coppia nominale trasmissibile dal giunto Nm
 T_{Nmax} Coppia massima trasmissibile dal giunto Nm
 n_{max} Numero di giri max di funzionamento del motore min⁻¹
 ΔK_B Disallineamento assiale massimo mm
 ΔK_T Disallineamento angolare massimo °
 W Peso kg

Figura 51 - Estratto catalogo giunto

Il giunto è stato collegato ai due moduli che costituiscono il riduttore modulare tramite linguette:

b	h	L
70	36	250

Tabella 10

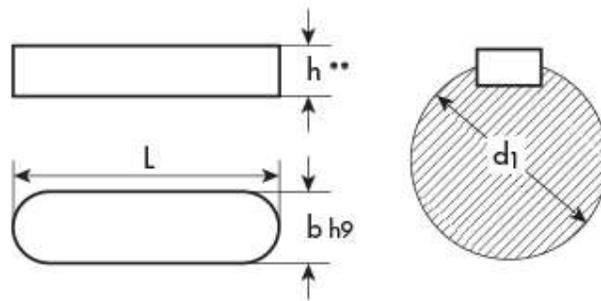


Figura 52 - Immagine linguetta

Tale soluzione consente di separare lo stadio epicicloidale dal resto. Ovviamente tale soluzione risulta più dispendiosa a livello economico sia per la necessità di avere un giunto, che in precedenza non era considerato, sia per il numero di parti che vanno a costituire il riduttore che risulta notevolmente aumentato. Per esempio, avremo la necessità di avere una fusione in più rispetto

a prima per la chiusura del riduttore. Inoltre, anche alcune sovrastrutture saranno più complesse, per esempio il sistema di fissaggio che praticamente raddoppierà. Inoltre, risulterà anche più complesso tutto il sistema di lubrificazione.

D'altra parte, proprio questo ultimo aspetto potrebbe volgere a favore. Si potrebbe ipotizzare di avere due sistemi di filtraggio dell'olio separati così da proteggere da eventuali residui dei danni dei cuscinetti veloci la parte epicicloideale, che spesso viene danneggiata proprio da questi. Inoltre, si potrebbero separare i due sistemi di lubrificazione e scegliere lubrificanti adeguati alle differenti condizioni di funzionamento.

Infine, la modularità consentirebbe di rimuovere dalla turbina solo la parte danneggiata del riduttore (come visto spesso collegata all'albero veloce HSS o intermedio ISS) e sostituirla magari con una rigenerata in precedenza così da ridurre i tempi di fermo impianto.

7.2 Re-design focalizzato sull' accessibilità

In questo caso si è rivisto completamente la carcassa posteriore del riduttore per poter agevolare lo smontaggio dell'albero veloce HSS e quello intermedio. Per far ciò si sono cambiati i piani di separazione dell'assieme posteriore.

Di seguito è riportata un'immagine relativa a tale scelta di redesign che mette in evidenza la separazione della carcassa tramite un esploso.

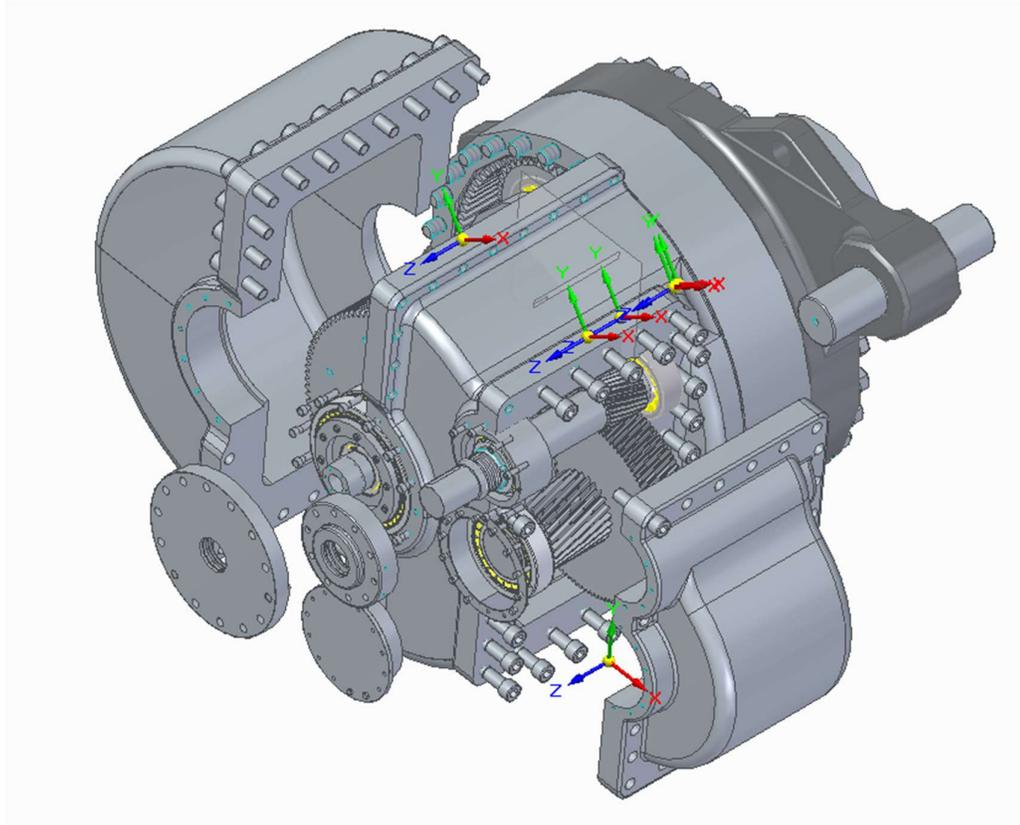


Figura 53 – Re design Accessibile

Rispetto al precedente, tale redesign è meno impattante sia a livello di ingombri sia a livello economico poiché si tratta solo di rivedere la carcassa della parte posteriore dove sono presenti gli stadi classici andandone a ripensare le fusioni.

8 Calcolo tempi disassemblaggio

A tal punto per fare un confronto tra il design precedente e i design proposti bisogna andare a calcolare i tempi di disassemblaggio dei nuovi re-design con gli stessi metodi applicati in precedenza.

8.1 Metodi di disassemblaggio Re-Design Modulare

Per applicare i metodi andiamo ad associare dei riferimenti numerici, come fatto in precedenza alle differenti parti che costituiscono il riduttore. Per comodità, indichiamo con gli stessi pedici utilizzati in precedenza l'albero veloce in uscita e l'albero intermedio. Così da poter utilizzare anche gli stessi disegni per i dettagli costitutivi di tali alberi visti in precedenza. (Vedi figura 37 e figura 38)

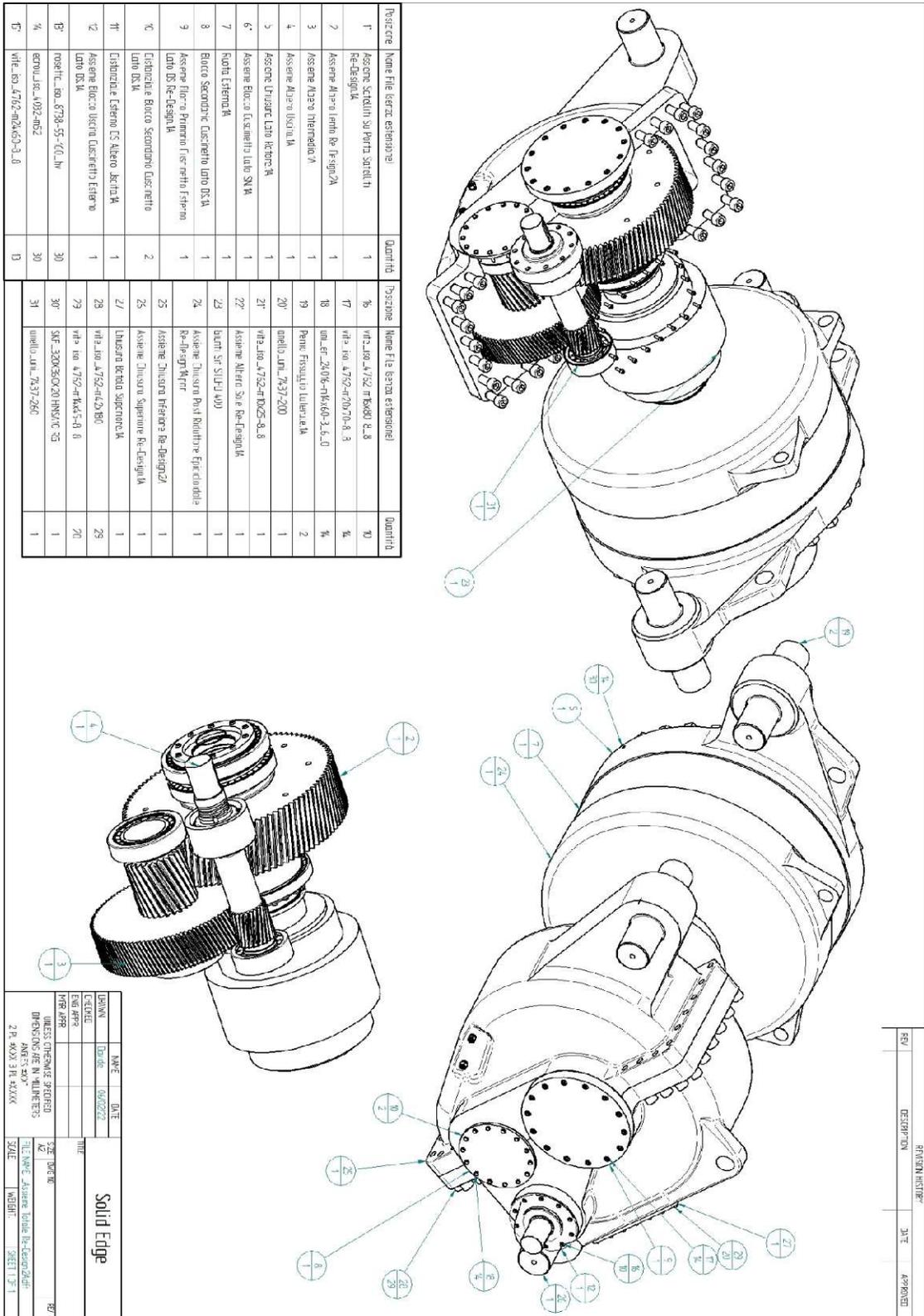


Figura 54 – 2D Design Modulare con riferimenti pallinatura

Si nota che per accedere ai cuscinetti dell'albero veloce HSS e dell'albero intermedio ISS si può rimuovere dalla navicella solo la parte posteriore del riduttore.

8.1.1 Applicazione Jianjun Method al Re-Design Modulare. [14]

Come fatto in precedenza applichiamo tale metodo prima all'albero veloce. La sequenza di accesso all' albero veloce HSS non cambia rispetto a quella del vecchio design e quindi riportiamo i seguenti risultati: (Le differenze di nomenclatura dipendono esclusivamente dal fatto che è leggermente cambiata la sequenza di pallinatura nei due disegni).

Sequenza smontaggio cuscinetto C_{2,4}:

C₂₉ x 20Pz; C₂₇; C₃₁; C₁₆ x 10Pz; C₁₂; A₄; C_{3,4}; C_{2,4};

Sequenza di smontaggio per il componente C_{4,4}:

C₂₉ x 20Pz; C₂₇; C₃₁; C₁₆ x 10Pz; C₁₂; A₄; C_{8,4}; C_{9,4}; C_{7,4}; C_{6,4}; C_{5,4}

Sequenza di smontaggio per il componente C_{7,4}:

C₂₉ x 20Pz; C₂₇; C₃₁; C₁₆ x 10Pz; C₁₂; A₄; C_{8,4}; C_{9,4}; C_{7,4}

Andiamo ora ad analizzare la sequenza di disassemblaggio dei cuscinetti collegati all'albero intermedio ISS. In precedenza, per accedere a tale albero bisognava rimuovere gran parte dello stadio epicicloidale. Invece ora ci si può accedere rimuovendo esclusivamente la carcassa.

Sequenza di disassemblaggio dei cuscinetti C_{1,3} e C_{5,3}:

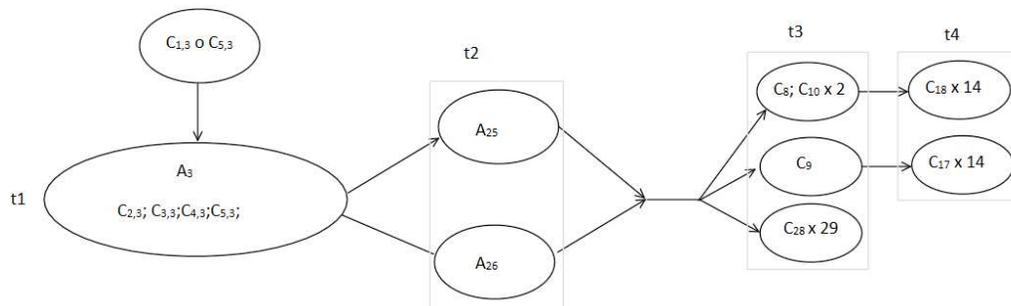


Figura 55 - Removal influence graph C_{1,3} o C_{5,3}

Ripercorrendo a ritroso il diagramma trovato si ottiene la seguente sequenza di disassemblaggio.

C₁₈ X 14; C₈; C₁₀ X 2; C₁₇ X 14; C₉; C₂₈ X 29; A₂₆; C_{1,3} o C_{5,3}

In alternativa:

C₁₈ X 14; C₉; C₁₀ X 2; C₁₇ X 14; C₉; C₂₈ X 29; A₂₅; C_{1,3} o C_{5,3}

8.1.2 Applicazione Mitrouchev Method al Re-Design modulare. [13]

Essendo gli stadi classici completamente separati dallo stadio epicicloidale possiamo analizzarli come un complessivo a sé stante e realizzare un Disassembly Geometry Contacting Graph dedicato a tale assieme.

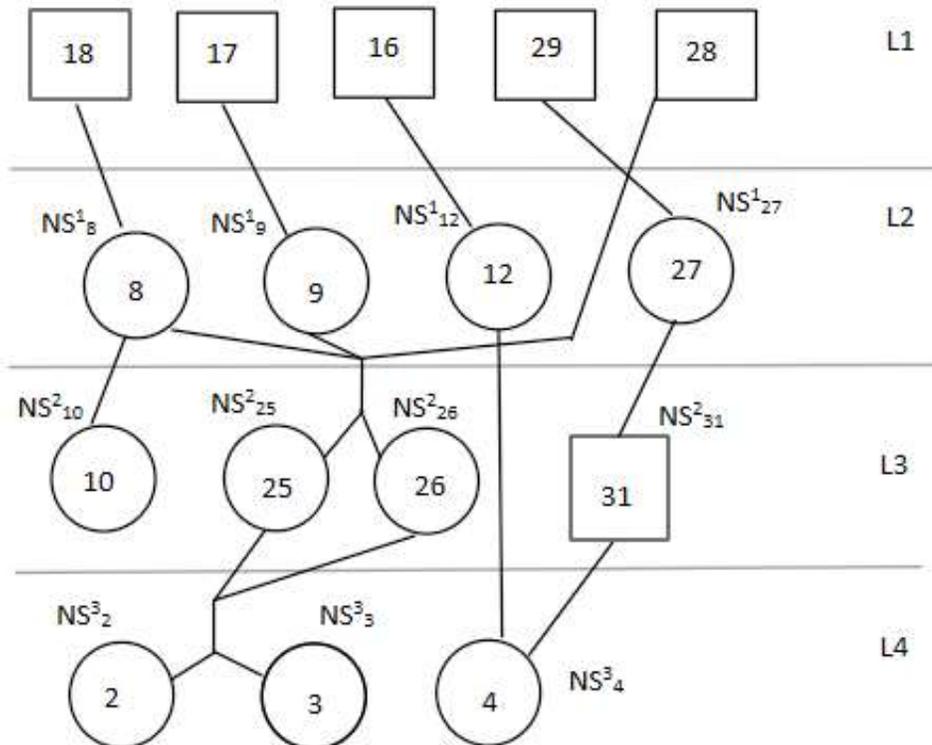


Figura 56 - Disassembly geometry contacting graph

Riportiamo ora il Disassembly Geometry Contacting Graph relativo al sottoassieme dell'albero veloce HSS così da poter definire l'intera sequenza relativa al metodo di Mitrouchev.

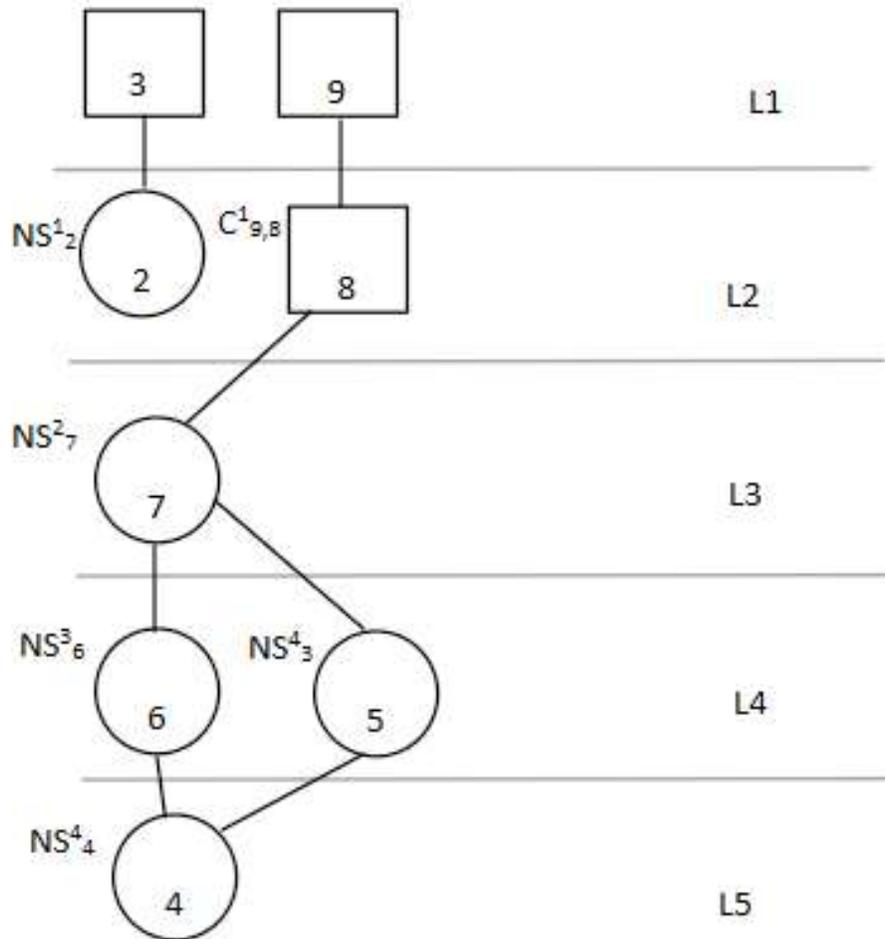


Figura 57 - Disassembly geometry contacting graph

Dal quale si ricava la seguente sequenza per i differenti cuscinetti:

Cuscinetto N2 assieme albero HSS:

[16; 12; 29; 27; 31; 4] + [3; 2]

Cuscinetto N7 assieme albero HSS:

[16; 12; 29; 27; 31; 4] + [9; 8; 7]

Cuscinetto N4 assieme albero HSS;

[16; 12; 29; 27; 31; 4] + [9; 8; 7; 5; 6; 4]

Definisco ora la sequenza per arrivare all' albero intermedio ISS identificato con il numero 3 nel disegno dell'assieme generale. Come fatto in precedenza non ci si addentra nel diagramma di tale albero perché per rimuovere entrambi i cuscinetti che lo sostengono serve solo un ulteriore passaggio.

17 ;18 ;28 ;8 ;9 ;26; 25; 3

8.1.3 Calcolo Tempi Disassemblaggio Re-Design Modulare

Come osservato in precedenza per quanto riguarda le sequenze di smontaggio relative all'albero veloce sono identiche alla sequenza trovata per il design standard perché quella specifica zona dell'assieme non è cambiata.

Quindi per entrambi i metodi esaminati si ottiene:

- Cuscinetto a rulli interno (MC1) = 7154,25 tmu
- Cuscinetto a sfere esterno (MC3) = 7365,35 tmu
- Cuscinetti a rulli esterno (MC2) = 7897,7 tmu

D'altra parte, per i cuscinetti dell'albero intermedio con entrambi i metodi si ha lo stesso risultato:

- Smontaggio cuscinetto (dx o sx non cambia) (MC4) = 8997,9 tmu

8.2 Metodi di disassemblaggio Re-Design Accessibile

Anche in questo caso creiamo un disegno 2D della versione del re-design che privilegia l'accessibilità affinché possano essere associabili i diversi componenti a identificativi numerici.

8.2.1 Applicazione Jianjun Method al Re-Design Accessibile. [14]

Come fatto per il caso precedente andiamo a cercare la sequenza di disassemblaggio dei cuscinetti dell'albero veloce HSS e intermedio ISS con il metodo di Jianjun: (come in precedenza per i riferimenti numerici riguardanti i componenti che fanno parte dei sotto assiemi è possibile fare riferimento alle figure 37 e 38)

Diagramma relativo al cuscinetto identificato con il numero 2 nell'assieme dell'albero veloce HSS, figura 37:

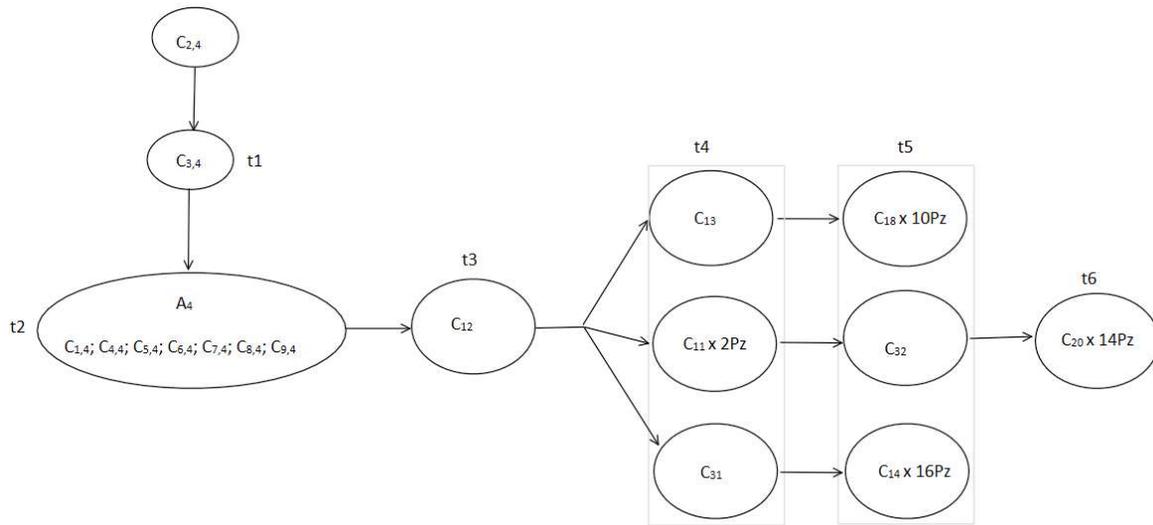


Figura 59 - Removal influence graph C2,4

Sequenza di disassemblaggio del cuscinetto

C₂₀ x 14Pz; C₃₂; C₁₁ x 2Pz; C₁₈ x 10Pz; C₁₃; C₁₄ x 16 Pz; C₃₁; C₁₂; A₄; C_{3,4}; C_{2,4}

Diagramma relativo al cuscinetto identificato con il numero 4 nell'assieme dell'albero veloce HSS, figura 37:

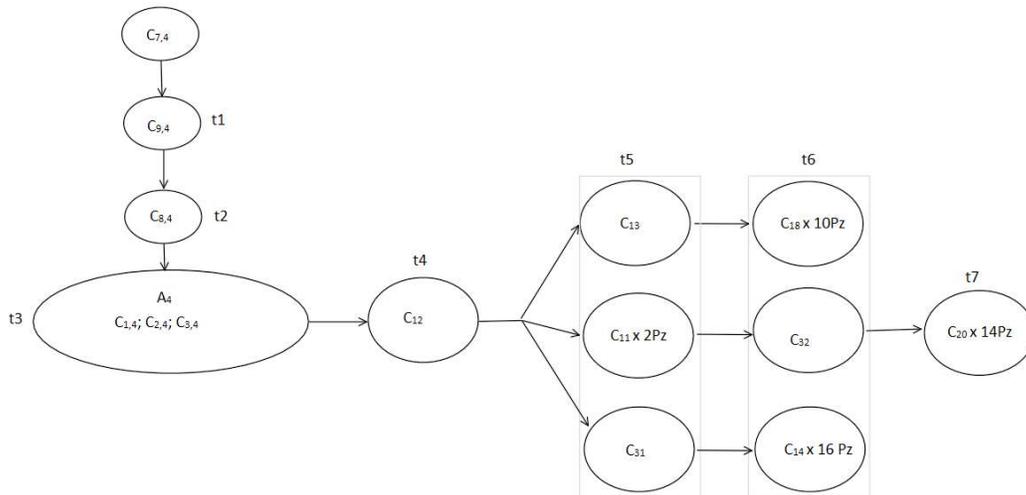


Figura 60 - Removal influence graph C7,4

Sequenza di disassemblaggio del cuscinetto

C₂₀ x 14Pz; C₃₂; C₁₁ x 2Pz; C₁₈ x 10Pz; C₁₃; C₁₄ x 16Pz; C₃₁; C₁₂; A₄; C_{8,4}; C_{9,4}; C_{7,4}

Diagramma relativo al cuscinetto identificato con il numero 4 nell'assieme dell'albero veloce HSS, figura 37:

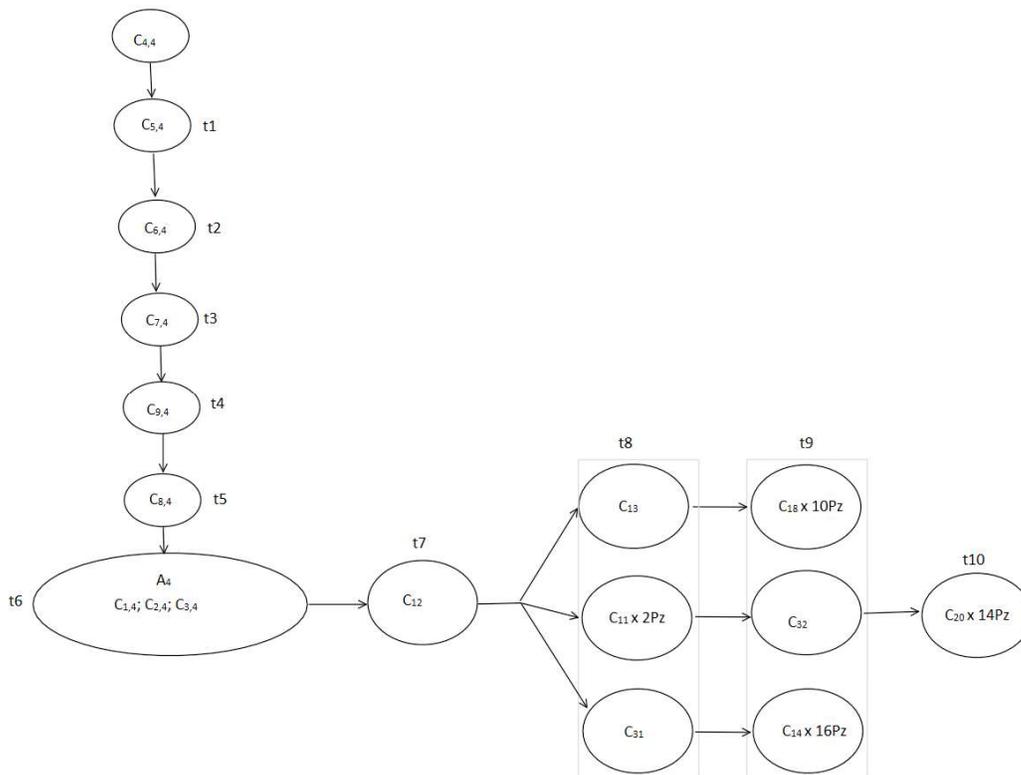


Figura 61 - Removal influence graph C4,4

Sequenza di disassemblaggio del cuscinetto

C₂₀ x 14Pz; C₃₂; C₁₁ x 2Pz; C₁₈ x 10Pz; C₁₃; C₁₄ x 16Pz; C₃₁; C₁₂; A₃; C_{8,4}; C_{9,4}; C_{7,4}; C_{6,4}; C_{5,4}; C_{4,4}

Diagramma relativo a entrambi i cuscinetti dell'albero intermedio ISS figura 38

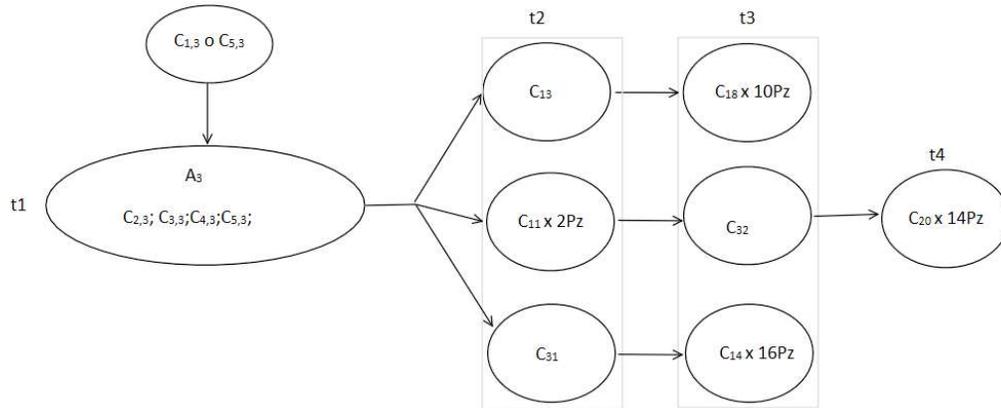


Figura 62 - Removal influence graph C_{1,3} o C_{5,3}

Sequenza di disassemblaggio del cuscinetto

C₂₀ x 14Pz; C₃₂; C₁₁ x 2Pz; C₁₈ x 10Pz; C₁₃; C₁₄ x 16Pz; C₃₁; A₃; C_{1,3} o C_{5,3}

8.2.2 Applicazione Mitrouchev Method al Re-Design Accessibile. [13]

Andiamo ora a sviluppare il Disassembly geometry contacting graph per il desing sopra citato.

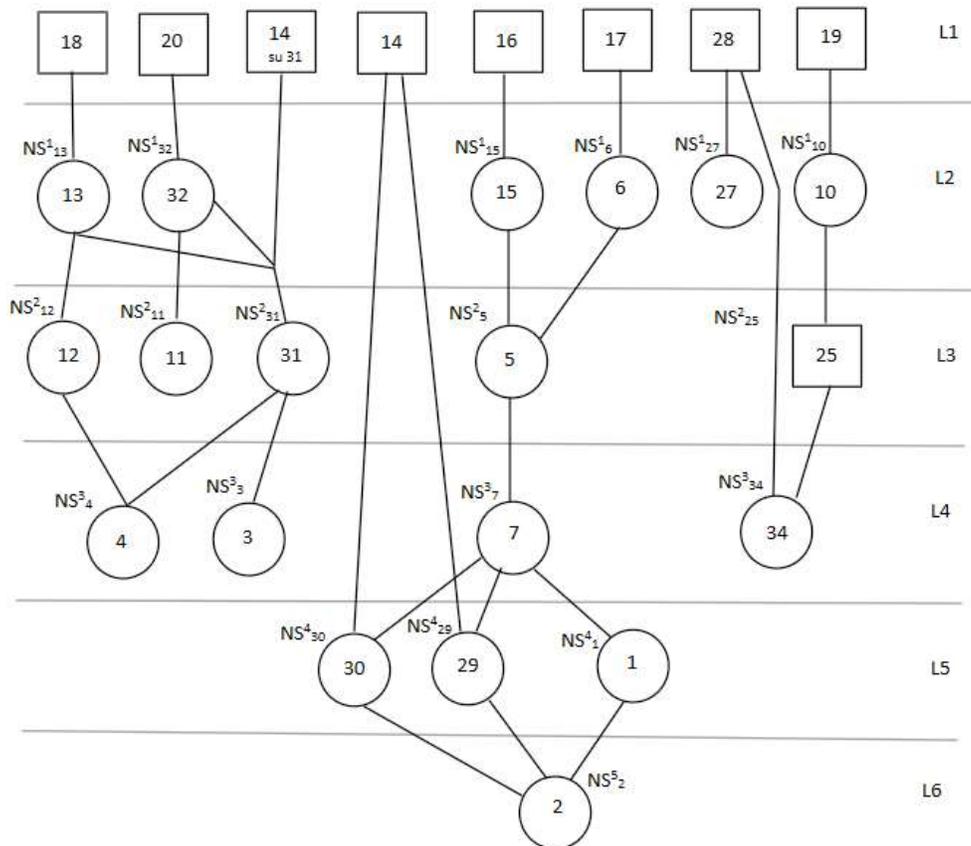


Figura 63 - Disassembly geometry contacting graph

Dal diagramma ricavo la sequenza di disassemblaggio per arrivare all' albero veloce HSS componente indicato con il numero 4 e l'ISS, componente indicato con il numero 3, per successivamente arrivare ai differenti cuscinetti.

Sequenza smontaggio albero ISS numero 3:

20; 18; 14; 32; 13; 31; 3

In questo caso i cuscinetti si smontano con il passaggio successivo.

Sequenza smontaggio albero HSS numero 4:

20; 18; 14; 32; 13; 31; 12; 4

Per l'albero 4 per arrivare ai cuscinetti è necessaria la sequenza già vista nel caso iniziale

Diagramma per albero uscita HSS

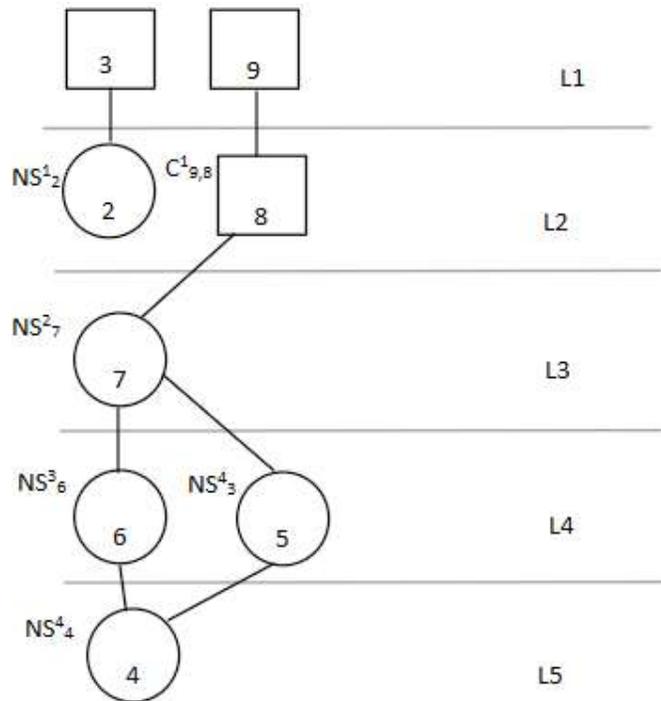


Figura 64 - Disassembly geometry contacting graph

Quindi abbiamo per il cuscinetto N° 2:

[20; 18; 14; 32; 13; 31; 12; 4] + [3; 2]

Per il cuscinetto N° 7:

[20; 18; 14; 32; 13; 31; 12; 4] + [9; 8; 7]

Per il cuscinetto N°4:

[20; 18; 14; 32; 13; 31; 12; 4] + [9; 8; 7; 5; 6; 4]

8.2.3 Calcolo tempi Re-Design Accessibile

Attraverso i metodi considerati tale tipologia di re-design si trovano sequenze di disassemblaggio identiche per entrambi i metodi ma differenti rispetto a quelle trovate in precedenza per il design standard.

Quindi per il re-design per entrambi i metodi si ottengono i seguenti tempi di disassemblaggio:

- Albero veloce:
 - Cuscinetto a rulli interno (AC1) = 7565,75 tmu
 - Cuscinetto a sfere esterno (AC3) = 7776,85 tmu
 - Cuscinetti a rulli esterno (AC2) = 8309,2 tmu

- Albero Intermedio:
 - Cuscinetti Ds o Sn (AC4) = 7559,7tmu

9 Risultati e confronto

In questa ultima sezione viene proposto il confronto dei tempi che si ricavano dalle sequenze di disassemblaggio trovate tramite i metodi considerati, Jianjun e Mitrouchev, per le differenti tipologie di design.

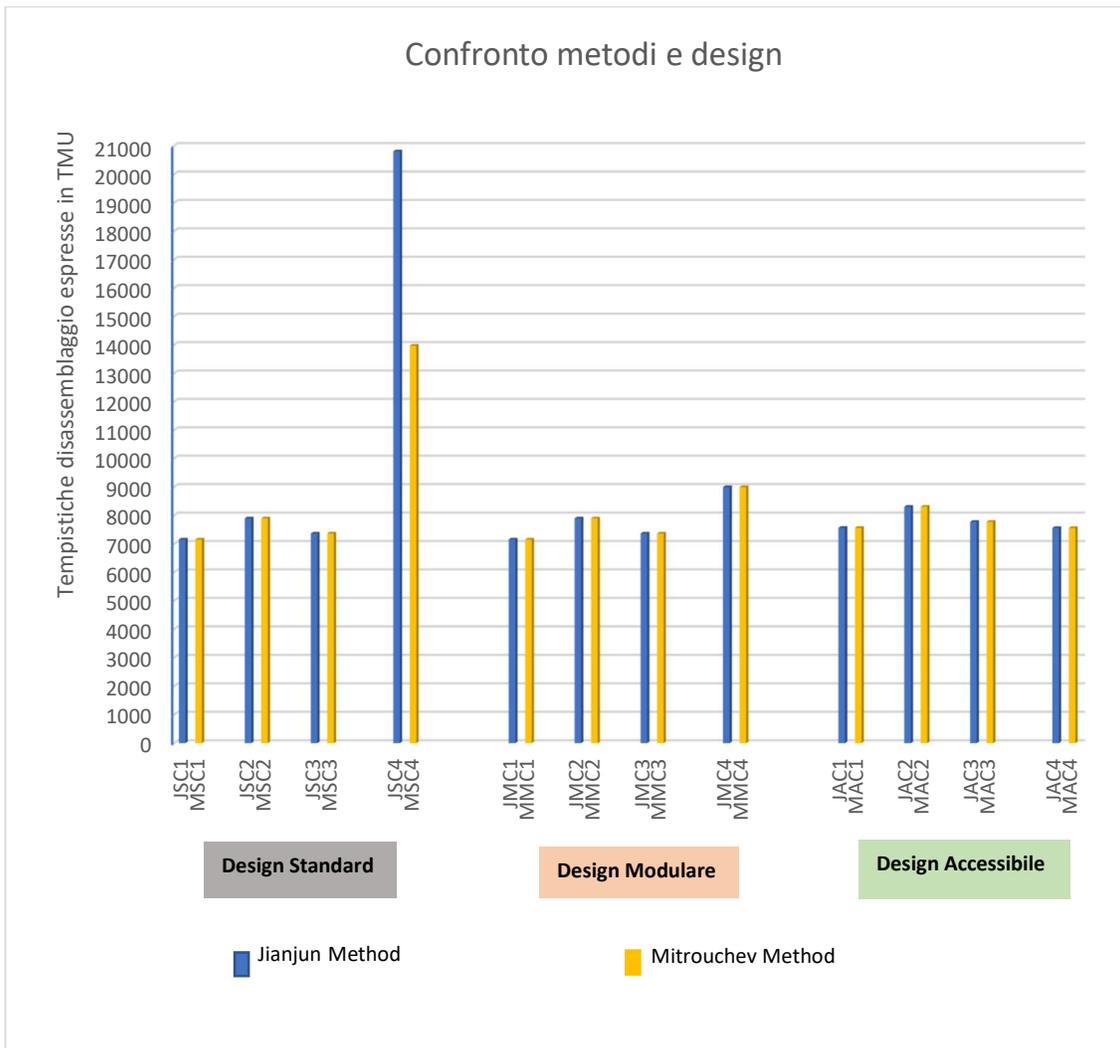


Figura 65 – Confronto tra i differenti metodi applicati ai differenti design

Di seguito riporto una legenda della nomenclatura utilizzata nel grafico e nei successivi per sintetizzare le considerazioni che verranno fatte.

Design Standard		Design Modulare		Design Accessibile	
Albero Veloce		Albero Veloce		Albero Veloce	
Cuscinetto a rulli interno:		Cuscinetto a rulli interno:		Cuscinetto a rulli interno:	
Jianjun Method	JSC1	Jianjun Method	JMC1	Jianjun Method	JAC1
Mitrouchev Method	MSC1	Mitrouchev Method	MMC1	Mitrouchev Method	MAC1
Cuscinetto Rulli Esterno		Cuscinetto Rulli Esterno		Cuscinetto Rulli Esterno	
Jianjun Method	JSC2	Jianjun Method	JMC2	Jianjun Method	JAC2
Mitrouchev Method	MSC2	Mitrouchev Method	MSC2	Mitrouchev Method	MAC2
Cuscinetto Sfere Esterno		Cuscinetto Sfere Esterno		Cuscinetto Sfere Esterno	
Jianjun Method	JSC3	Jianjun Method	JMC3	Jianjun Method	JAC3
Mitrouchev Method	MSC3	Mitrouchev Method	MMC3	Mitrouchev Method	MAC3
Albero Intermedio		Albero Intermedio		Albero Intermedio	
Cuscinetti Rulli Conici		Cuscinetti Rulli Conici		Cuscinetti Rulli Conici	
Jianjun Method	JSC4	Jianjun Method	JMC4	Jianjun Method	JAC4
Mitrouchev Method	MSC4	Mitrouchev Method	MMC4	Mitrouchev Method	MAC4

Tabella 11

Dal grafico precedente si osserva come i differenti metodi in quasi tutte le circostanze diano dei risultati simili tranne nel caso del design standard per il disassemblaggio dell'albero intermedio in cui il metodo di Mitrouchev da una sequenza più conveniente.

Fatta tale considerazione ho deciso di effettuare i differenti ragionamenti e confronti utilizzando esclusivamente le sequenze elaborate tramite il metodo di Mitrouchev.

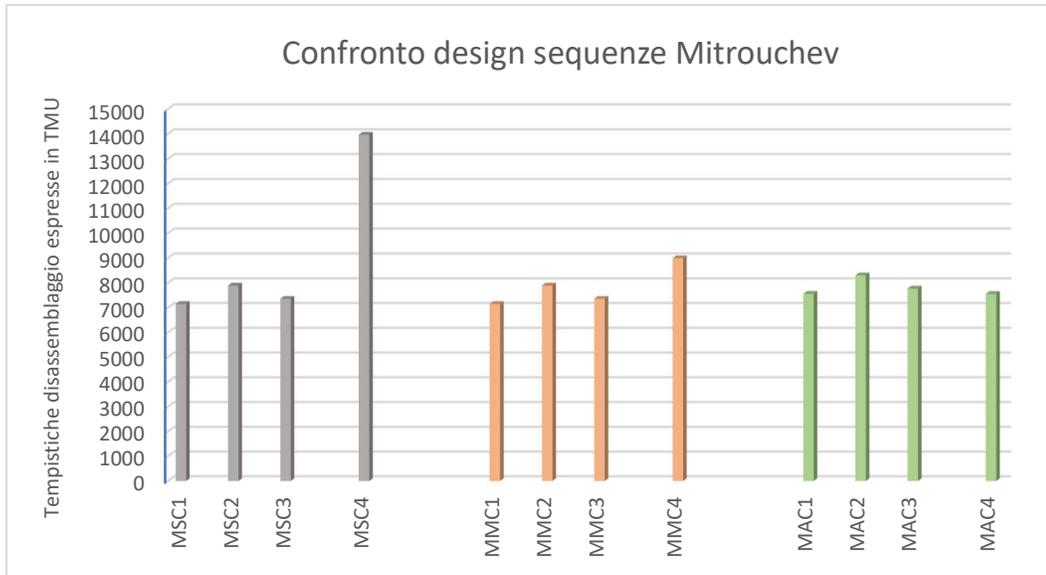


Figura 66 – Confronto tra differenti design applicando esclusivamente il metodo di Mitrouchev

Andiamo adesso a confrontare i tempi calcolati per arrivare alle parti di nostro interesse in maniera relativa ai tempi calcolati per il design standard poiché, credo, sia più significativa una valutazione in questi termini rispetto ad una in termini assoluti, dato che questi sono stimati e non valutati sul campo.

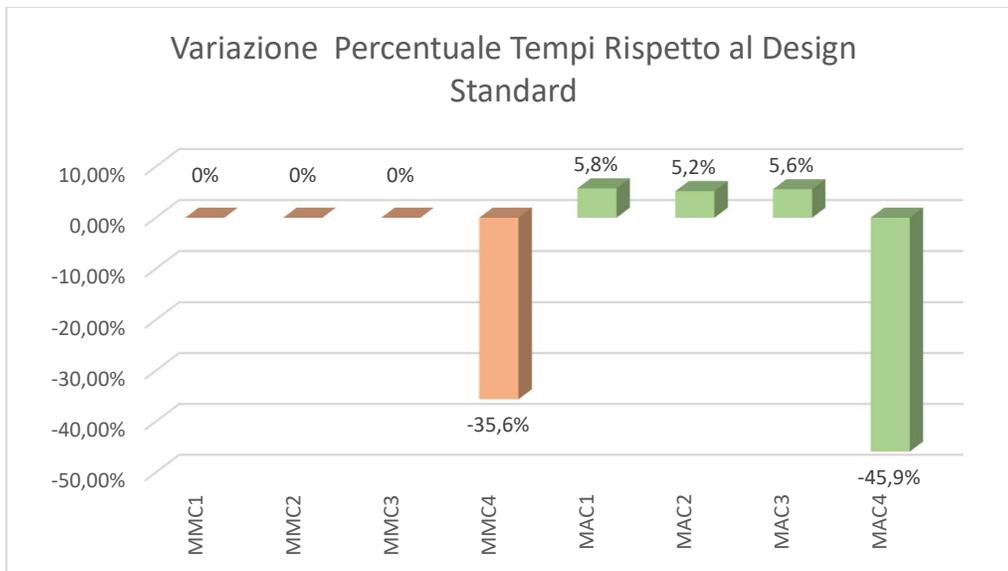


Figura 67 – Confronto percentuale differenti design rispetto allo standard applicando solo il metodo di Mitrouchev

Si osserva che per il *design standard* e il *design modulare* i tempi relativi al disassemblaggio dei differenti componenti correlati al HSS, albero veloce,

risultano identici poiché, ipotizzando sempre di andare a lavorare con il riduttore in officina e non in navicella, i componenti da rimuovere e movimentare per accedere alle parti di interesse risultano essere identici, con un netto miglioramento per quanto riguarda l'albero intermedio IMS.

D'altro canto, il *design accessibile* riscontra un leggero peggioramento relativo ai tempi di disassemblaggio dei componenti relativi all'albero veloce HSS che si traducono in netto miglioramento relativo all'accessibilità dell'albero intermedio IMS. A favore di questo metodo di design abbiamo inoltre un'univoca direzione di rimozione di entrambi gli alberi e rispetto a questo aspetto farò delle considerazioni in seguito.

Analizzo ora come i tempi necessari alla rimozione dei componenti normalizzati, le parti a disegno e il componente obiettivo impattino sul calcolo complessivo della tempistica. Di seguito è riportato un grafico che evidenzia tali aspetti per le tre tipologie di design:

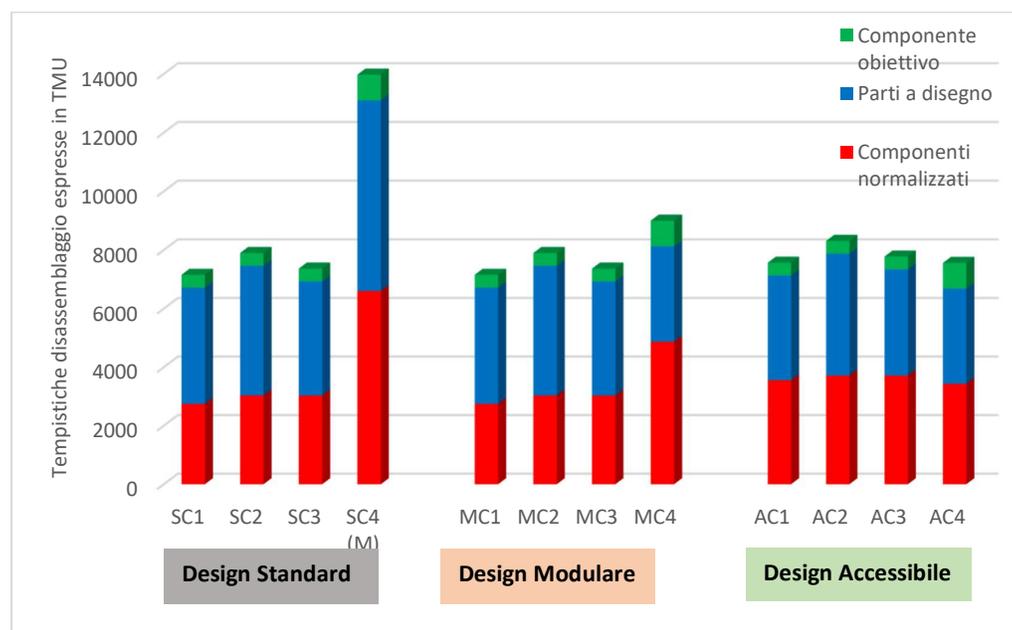


Figura 68 – Confronto design evidenziando la composizione dei tempi

Immediatamente si osserva che nel design standard per accedere all'albero intermedio si ha una tempistica nettamente superiore rispetto a quella necessaria per accedere ai componenti dell'albero veloce.

Tale tempistica maggiorata è causata sia da un numero maggiore di componenti commerciali presenti, sia dalle molte parti dell'assieme che devono

essere rimosse, (come risulta evidente dal grafico, gli elementi rossi = collegamenti da rimuovere, elementi blu = parti a disegno da rimuovere).

A tal proposito con i due design proposti ci si è posto come obiettivo principale quello di ridurre i tempi di tutte queste operazioni evidenziate in precedenza oltre a favorire altri aspetti già trattati o che verranno approfonditi di seguito, quale la rapida intercambiabilità dei sottoassiemi nel design modulare con componenti rigenerati e la potenziale accessibilità direttamente nella navicella per quanto riguarda il design accessibile.

Nel *design modulare* osserviamo ancora delle tempistiche superiori, rispetto a quelle dell'albero veloce, per la rimozione dei collegamenti relativi al disassemblaggio dell'albero lento, ma un netto miglioramento dei tempi relativi al disassemblaggio delle parti dell'assieme rispetto al *design standard*.

Infine, per quanto riguarda il *design accessibile* si è riusciti ad abbattere anche il tempo di disassemblaggio dei collegamenti per arrivare all'albero intermedio a discapito di un leggero aumento di quelli relativi all'albero veloce. Tale aumento è causato da un numero maggiore di componenti commerciali da rimuovere, che attraverso uno studio dettagliato dell'accoppiamento della carcassa potrebbero essere ridotti.

10 Conclusioni

Nel corso di questa tesi sono state messe a confronto due strategie di design affiancate ad un design tradizionale di un sottogruppo meccanico di turbina eolica. È stato mostrato come, nel complesso, le due tipologie di re-design proposte, design modulare e design accessibile, migliorino i tempi di disassemblaggio del riduttore e quindi riducano potenzialmente il ttr (time to repair), con l'obiettivo di aumentare la disponibilità del prodotto in modo da avere una riparazione rapida che possa giustificare la scelta del 'Repair' invece che la sostituzione del sottoassieme. Le valutazioni di tali operazioni sono state fatte tutte ipotizzando che il riduttore venisse comunque rimosso dalla navicella della turbina eolica e che quindi tale tempistica fosse identica per tutti i casi e

che non andasse a influire sul confronto, poiché non si hanno a disposizione dati dettagliati degli aspetti di tali operazioni.

Facendo solo una valutazione qualitativa si può però intuire come i design proposti possano potenzialmente favorire un intervento diretto in navicella.

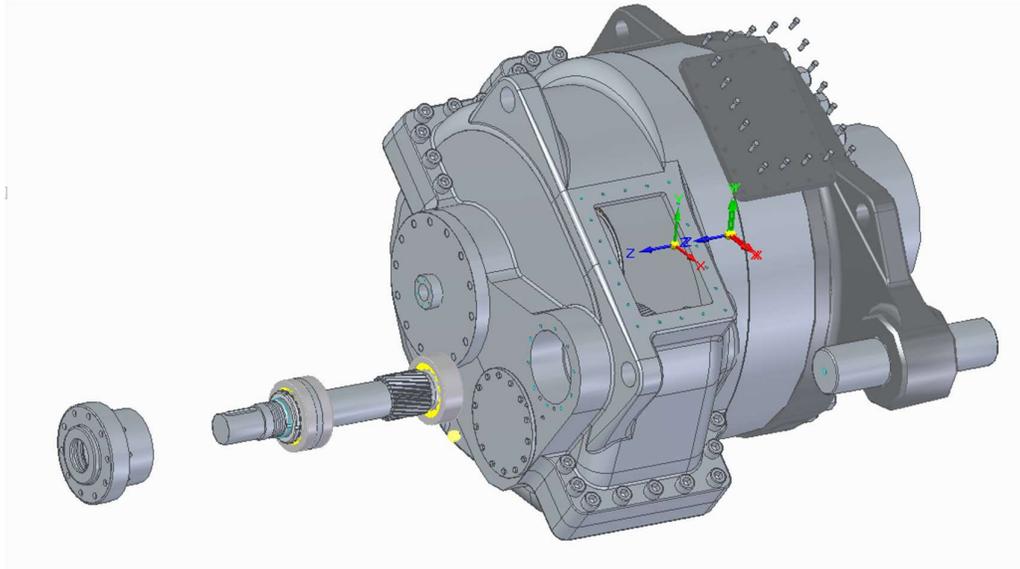


Figura 69- design standard

Dalla figura 69 si osserva come, secondo la soluzione di design standard, per la rimozione dell'albero veloce sia necessario spostarsi nella direzione dell'asse della turbina eolica e del riduttore: tale traslazione non è sempre agevolata dalle dimensioni della navicella. Inoltre, per arrivare all'albero intermedio è obbligatorio il disassemblaggio dell'intero riduttore, come si può vedere dall'immagine seguente in figura 70.

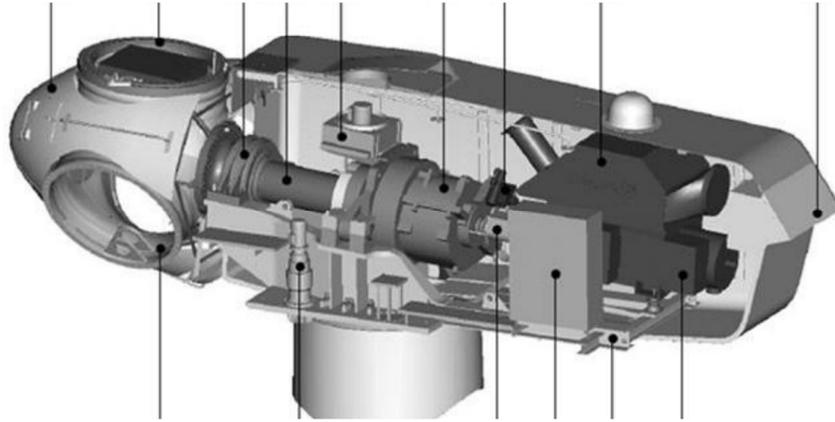


Figura 70 – Navicella pala eolica

Subito dopo l'albero veloce del riduttore sono collocati il freno ed il generatore quindi, per garantire la rimozione dell'albero veloce, dovremmo rimuovere i componenti sopraccitati per avere una libertà assiale di almeno 740mm. Inoltre, per rimuovere l'albero intermedio saremmo obbligati a disassemblare l'intero riduttore, quindi, sarebbe impossibile effettuarlo in navicella.

D'altra parte, con il re-design accessibile si riesce a rimuovere sia l'albero veloce che l'albero intermedio in una direzione normale all'asse che potrebbe essere più compatibile con interventi diretti nella navicella della turbina, vedi figura 71.

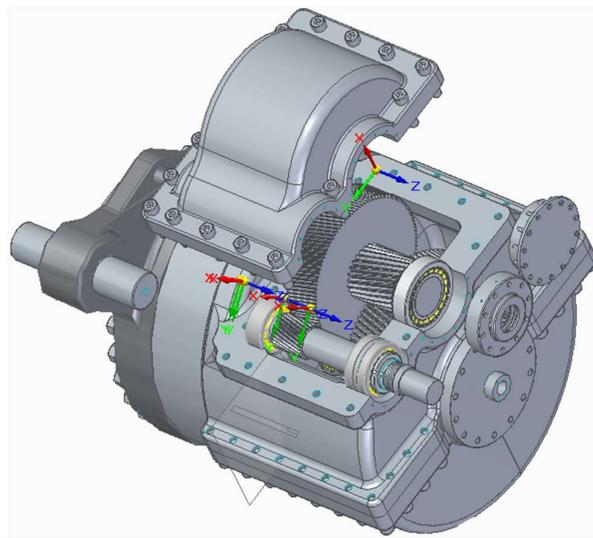


Figura 71- Design Accessibile

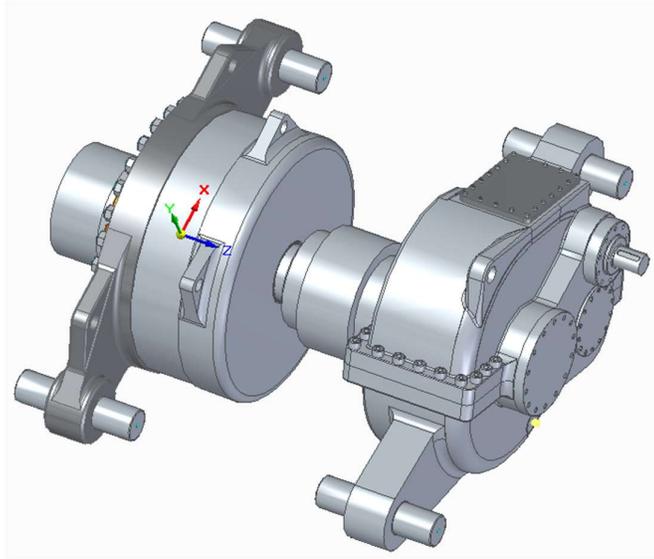


Figura 72 - Design Modulare

Invece, come già espresso in precedenza, il *design modulare*, figura 72, è stato pensato con l'obiettivo di cercare di intervenire in un'ottica più diretta sul sottoinsieme voluto e lasciare gli altri componenti in grado di svolgere le proprie funzionalità. Quindi, come già detto, le strategie di design di questo tipo sono l'ideale se fosse possibile sostituire i sottoinsiemi danneggiati con quelli rigenerati.

Inoltre, nel modello di valutazione del design possono essere inseriti in futuro indicatori che valutano i design sia in termini ergonomici che economici.

I design proposti devono risultare economicamente convenienti affinché il progetto sia giustificato. Il vantaggio economico della eventuale velocità di riparazione deve superare il costo maggiorato, causato da un design dedicato. Andrà dimostrato che, come accennato in precedenza, a causa dei costi maggiori di materie prime e dell'energia converrà sempre più riparare che sostituire.

Nel prossimo futuro la riparazione dei prodotti, e quindi l'applicazione del design for repair per ottimizzare tale aspetto, potrebbe entrare a far parte anche del business delle aziende. Il mercato legato ai prodotti di diverso genere sta sempre più dirigendosi verso i servizi ad essi collegati, per garantire all'utente un'esperienza di utilizzo del prodotto più elevata ed un ridotto tempo di inutilizzo.

- [1] "Trading Economics," 03 2022. [Online].
- [2] «Knowledge Hub,» [Online].
- [3] P. A. Liverani e P. D. Francia, «PDM-PLM-Distinta Base».
- [4] «Mecalux,» [Online].
- [5] «Wikipedia,» [Online].
- [6] P. A. Regattieri e P. R. Manzini, *Manutenzione dei sistemi di produzione*, Bologna: Esculapio, 2007.
- [7] *Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment*, Naval Surface Warfare Center , 2010.
- [8] *Non Electronics Parts Reliability Data NPRD*.
- [9] *Reliability Prediction Of Electronic Equipment MIL-HDBK-217F*, Military Handbook.
- [10] P. D. Camillis, «FMEA,» [Online].
- [11] Department of Defense, DOD-HDBK-791. *Maintainability Design Techniques*, Philadelphia Navy Publishing and Printing Office, 1988.
- [12] «<https://www.fairphone.com/it/>,» [Online].
- [13] P. M. & C. G. W. & L. X. L. & G. Q. Li, *Selective disassembly sequence generation based on lowest level*.
- [14] J. Y. & B. Y. & L. D. & C. L. & D. Hu, *Research on the selectable disassembly strategy of mechanical*.
- [15] W. Mackenzie, *Global wind power market outlook update: Q4 2021*.

- [16] A. Capozzi, «Anev: «L'Italia ha il potenziale eolico per centrare i target e abbassare i prezzi. Ma la burocrazia è freno»,» *Sole24Ore*, 2022.
- [17] *. E. C. 1. a. Y. B. 2. Nacef Tazi 1, *Using a Hybrid Cost-FMEA Analysis for Wind*, 2017.
- [18] F. P. G. M. ,. A. T. M. P. Jesús María Pinar Pérez, *Wind turbine reliability analysis*.
- [19] S. B. W. Musial, «Improving Wind Turbine Gearbox Reliability, 2007 European Wind Energy Conference».
- [20] M. Wasilczuk, «Drivetrain of a Wind Turbine».
- [21] A. T. C. G. S. U. Bhardwaj, «Reliability prediction of an offshore wind turbine gearbox».
- [22] S. (. Sheng, «Gearbox Reliability Database (GRD),» [Online].
- [23] M. Wasilczuk, «Analysis of Failures of High Speed Shaft Bearing System in a Wind».
- [24] H. L. Y. F. P. T. K. Smolders, «Reliability Analysis and Prediction».
- [25] D. Khowala, «Designing to enable repair,» 2018.
- [26] E. C. a. Y. B. Nacef Tazi, «Using a Hybrid Cost-FMEA Analysis for Wind».