

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica



Tesi di Laurea Magistrale

Sviluppo di un banco test di motori elettrici per giroscopi
navali

Relatore

Prof. Ing. Carlo Rosso

Candidato

Pietro Maria Micheletti

Anno accademico 2019/2020

Indice

1. Capitolo 1 - Giroscopio

1.1. Il motore

1.2. Prestazioni

1.2.1. Gyro 20 mm

1.2.2. Gyro 20 mm

2. Capitolo 2 - Il banco di prova

2.1. La sezione fissa

2.1.1. Silent Block

2.1.2. Piastra di base

2.1.3. Supporto albero

2.1.4. Magnete encoder

2.1.5. Supporto magnete

2.1.6. Rotore

2.1.7. Volano

2.1.8. Albero

2.1.9. Cuscinetto 6206-2z

2.1.10. Molla a onde

2.1.11. Flangia interfaccia volano

2.1.12. Chiavetta 10x8

2.1.13. Socket head cap screw _ ISO 4762 M8 x 25 mm

2.2. Le slitte

2.2.1. Piastra di base

2.2.2. Pattini NBS SNC 15 P0 N

2.2.3. Piastra verticale

2.2.4. Triangoli

2.2.5. Distanziale inverter

2.2.6. Finecorsa

2.2.7. Inserto reggiplastiche

2.2.8. Plastiche portacavi

2.3. Il sistema di movimentazione

3. Capitolo 3 - Il montaggio

3.1. Le slitte

3.2. La struttura rotorica

4. Capitolo 4 - Il test di prova

5. Bibliografia

Capitolo 1

Giroscopio

Gli Stabilizzatori MC² Quick Gyro sono giroscopi navali prodotti dall'azienda Quick s.p.a. Le varie taglie degli stabilizzatori coprono un ventaglio ampio di tonnellaggio sulle barche di piccola e media taglia. La svolta nell'utilizzo di queste macchine è il fatto che vengono alimentate a 12 V in DC. Questo permette di collegare gli stabilizzatori direttamente ad un pacco batterie, senza la necessità di montare un inverter, impattando non solo sulla quantità dei componenti imbarcati, ma anche sul risparmio energetico. Inoltre questa possibilità permette, anche alle imbarcazioni di piccola taglia, di imbarcare e utilizzare uno stabilizzatore.

L'azienda Quick s.p.a. si è appoggiata alla Mavel s.r.l. per lo sviluppo del motore dello stabilizzatore.



Figura 1.1

Il motore

I motori prodotti dall'azienda Mavel s.r.l. sono motori sincronoriluttanti formati da una struttura anisotropa rotorica in cui sono annegati dei magneti permanenti. La parte statorica comprende gli avvolgimenti e un nucleo ferromagnetico laminato in cui sono state realizzate delle cave atte ad alloggiare gli avvolgimenti.

La parte di potenza è gestita da un inverter con tecnica di controllo P.W.M. (pulse width modulation) e l'encoder, fornendo un segnale funzionale di velocità, serve per chiudere l'anello di controllo di retroazione della velocità.

Per il funzionamento di questi motori sono evidenziati due assi, l'asse **q** e l'asse **d** contrassegnati tramite le grandezze L_q ed L_d il cui rapporto è definito come rapporto di anisotropia i cui valori oscillano tra i 10 e i 20 in media. Le regioni di funzionamento in cui il motore lavora sono definite dalla regolazione di corrente lungo gli assi:

- Per lavorare nella regione a coppia costante, la corrente sull'asse q viene variata e quella sull'asse d rimane costante
- Per lavorare nella regione a potenza costante, il funzionamento viene realizzato modulando il flusso dell'asse d variando la componente " i_d "

Per il motore di questa serie di stabilizzatori navali, l'azienda Mavel s.r.l. ha scelto un motore elettrico alimentato in DC a 12 V a rotore esterno.

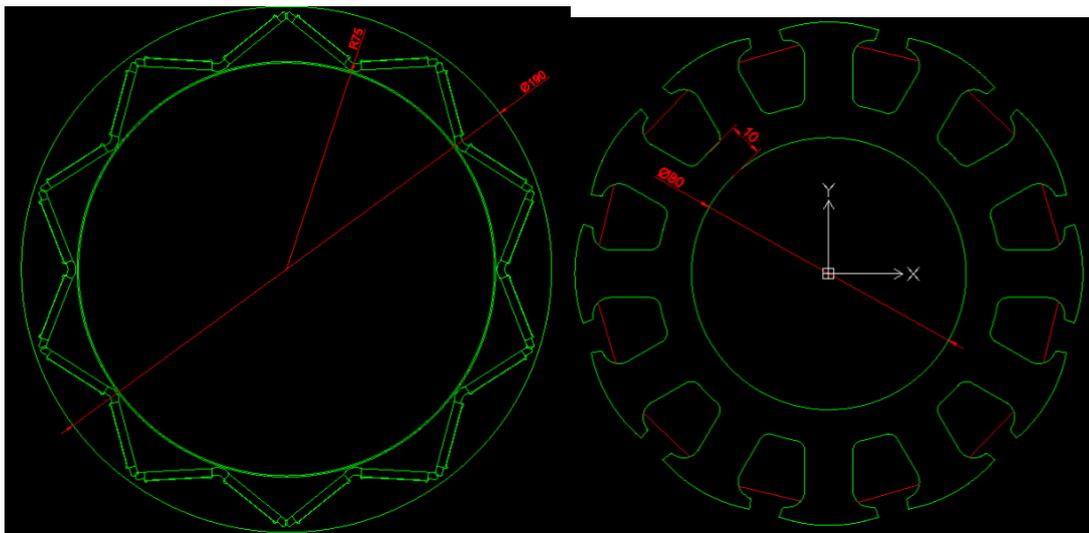


Figura 1.2

Per coprire tutte le richieste a livello di prestazioni di Quick s.p.a. sono stati sviluppati 2 tipi di motori gemelli, differenti per la lunghezza attiva: di 10 mm per il motore da 2 kW e di 20 mm per la versione da 4 kW.

Per il rotore sono stati usati 20 magneti N38UH posizionati in modo da formare 10 poli magnetici. Il diametro esterno di statore misura 190 mm e il diametro interno 150.

Il traferro presente tra statore e rotore è di 1 mm.

Lo statore presenta 12 cave di area 281 mm^2 e gli avvolgimenti sono fatti sulla metà dei denti in modo tale da avere due bobine in parallelo per ogni fase. La struttura del motore presenta un foro interno per l'albero di 80 mm e la corona circolare su cui sono previsti i 10 fori di fissaggio per la flangia è di 10 mm.

Sia lo statore che il rotore sono concepiti come modulari e vengono pressati insieme fino a formare un pezzo unico. I moduli per lo stampo sono i seguenti:

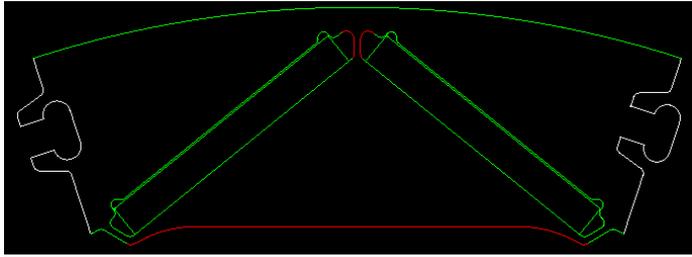


Figura 1.3

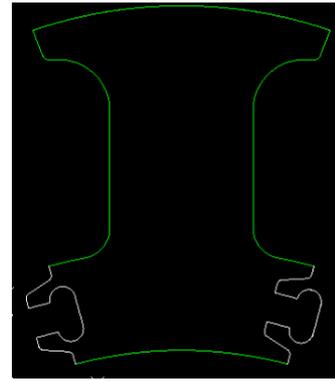


Figura 1.4

Prestazioni

Una volta stabilite le caratteristiche fisiche si è proceduto a simulare, tramite software, i comportamenti dei motori per avere delle stime sul loro funzionamento.

Gyro 20 mm

Per il motore da 4 kW avvolto a 14 spire si è ipotizzato un rendimento del 35. È stata misurata una resistenza di fase a 100°C di 0,0012 Ω.

Sono in seguito allegati i grafici più significativi per la descrizione del motore.

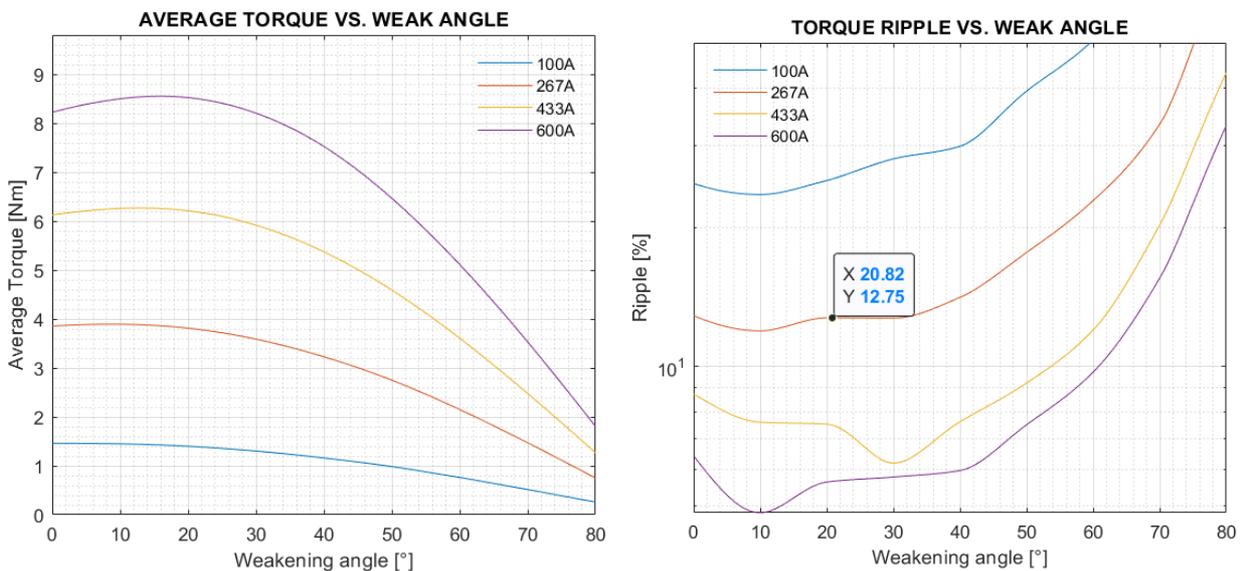


Figura 1.5

Si può notare come nel primo grafico la coppia sia funzione della corrente assorbita e dell'angolo di pilotaggio. Naturalmente la coppia sarà tanto maggiore quanto maggiore la corrente assorbita. Inoltre sarà funzione dell'angolo di pilotaggio, cioè di quanto la corrente sia inclinata rispetto agli assi q e d , ovvero gli assi elettrici ottenuti tramite il modello di Clarke e riferiti alle grandezze di statore. Un basso angolo di pilotaggio significa che la maggioranza della corrente assorbita è impiegata produrre coppia. Le simulazioni sulla coppia vengono reiterate in modo da ottenere un certo numero di valori per ogni

punto del grafico. Dunque il primo grafico è plottato su una media dei valori di coppia ottenuti, ma per avere una comprensione più profonda del funzionamento della macchina sono indicate le oscillazioni dei risultati ottenuti per ogni punto andando a formare il grafico del Ripple di coppia espresso in grandezze percentuali e sempre riferito alla corrente assorbita e all'angolo di pilotaggio.

Una volta definiti questi parametri, per la descrizione del motore sono necessarie delle informazioni su velocità e potenza assorbita.

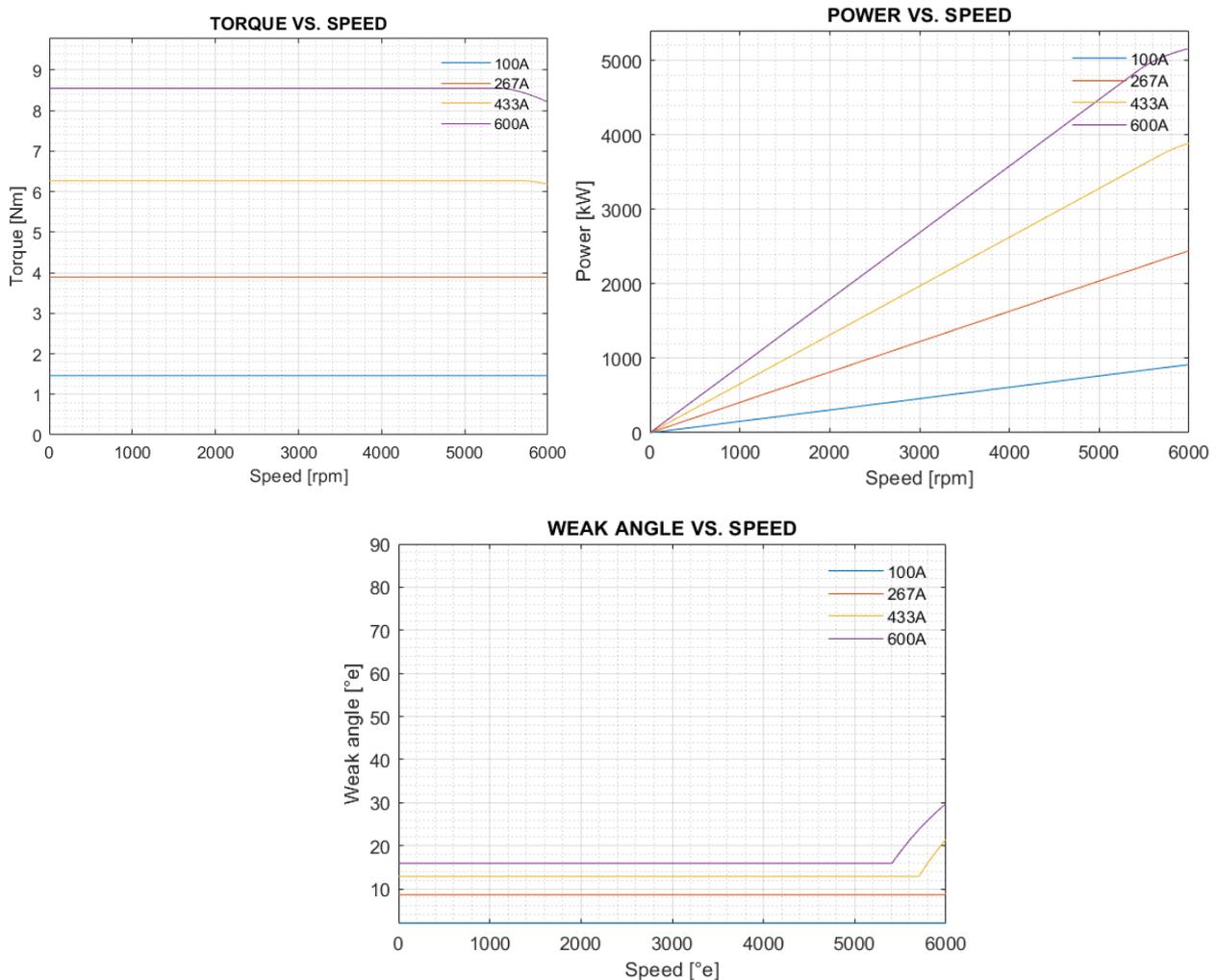


Figura 1.6

Si può notare come il motore sia stato progettato per un utilizzo nella regione “a coppia costante” e non sia necessario un pilotaggio sull’asse d. L’angolo di pilotaggio rimane costante per praticamente tutta la zona di funzionamento del motore, in quanto al motore non saranno mai richieste prestazioni ottenibili nella zona di deflussaggio, o regione “a potenza costante”. Si può notare come si vada solo a sfiorare il confine delle due regioni ma con richieste da parte del motore di correnti importanti, intorno ai 600 A.

Per una comprensione approfondita del funzionamento nella simulazione sono state calcolate le perdite delle varie componenti del motore, per poi sommarle e avere una mappa generale, necessaria per poi andare a definire una cartografia dei rendimenti di tutte le regioni di impiego del motore.

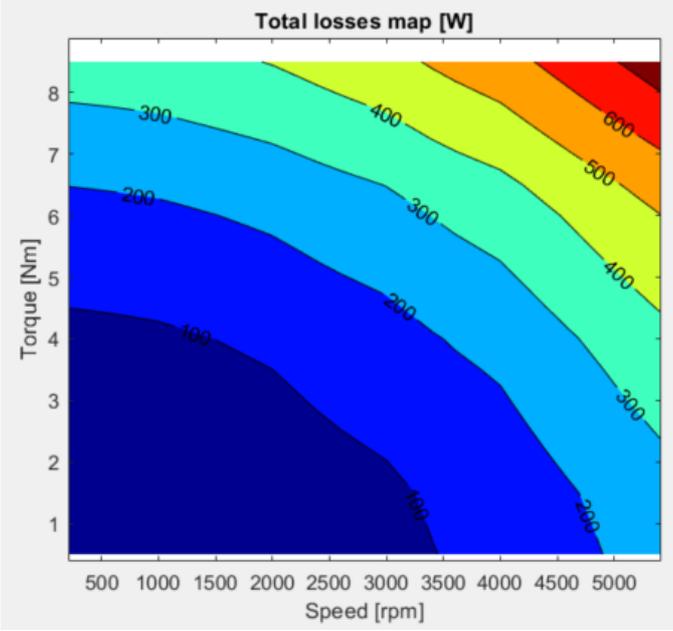


Figura 1.7

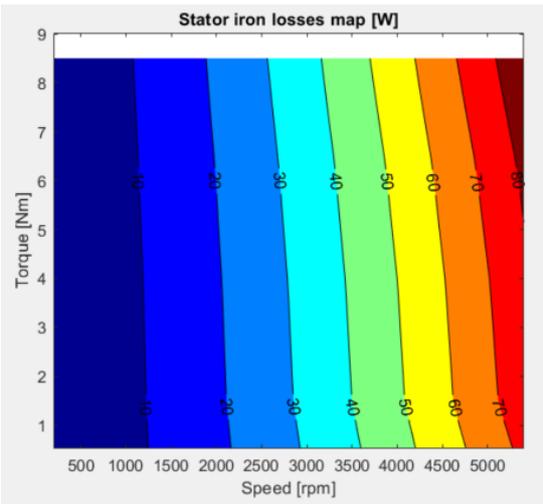
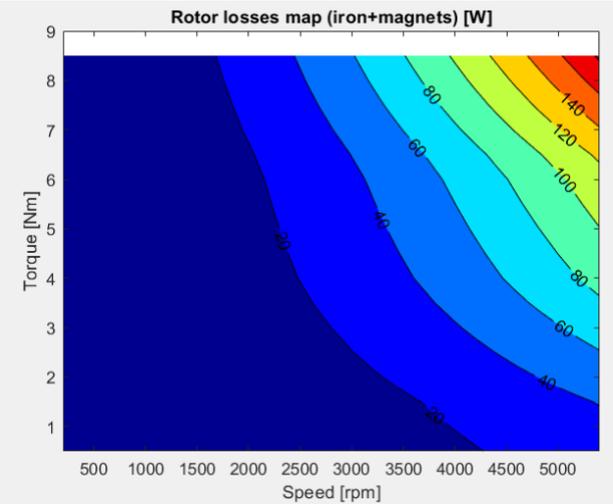


Figura 1.8

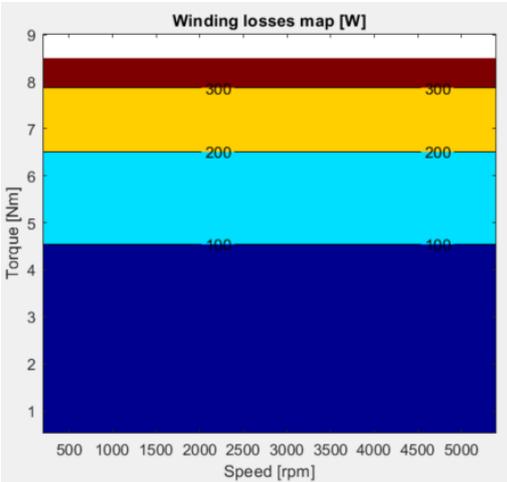


Figura 1.9

Queste perdite sono state utili per poi andare a definire una cartografia dei rendimenti di tutte le regioni di impiego del motore.

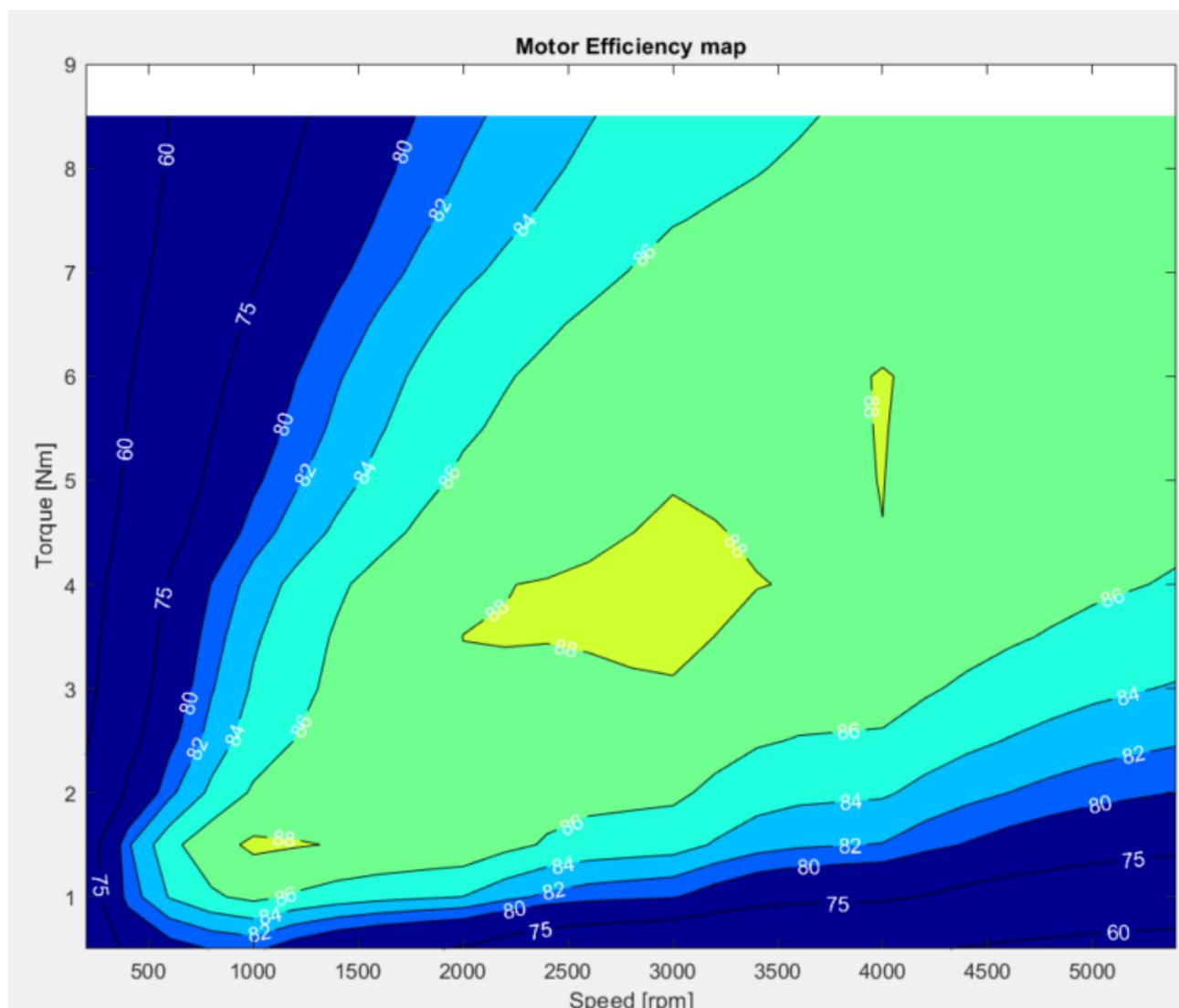


Figura 1.10

Una volta costruito il motore, esso verrà testato e, dopo avere ottimizzato il controllo a banco, tramite un torsiometro coppia e un Wattmetro, verrà mappato, in modo tale da ottenere una cartografia reale che dovrà essere corrispondente a quella simulata tramite software.

Gyro 10 mm

Discorso analogo si può fare per il motore di taglia minore e lunghezza attiva 10 mm. Il riempimento ipotizzato è del 35% ed è avvolto a 8 spire. Tra le fasi è stato simulato un collegamento a stella e la resistenza di fase misurata a 100 °C è di 0,0045 Ω .

In seguito sono riportati i grafici ottenuti dalle simulazioni, calcolati e plottati come prima esposto per il motore da 20 mm.

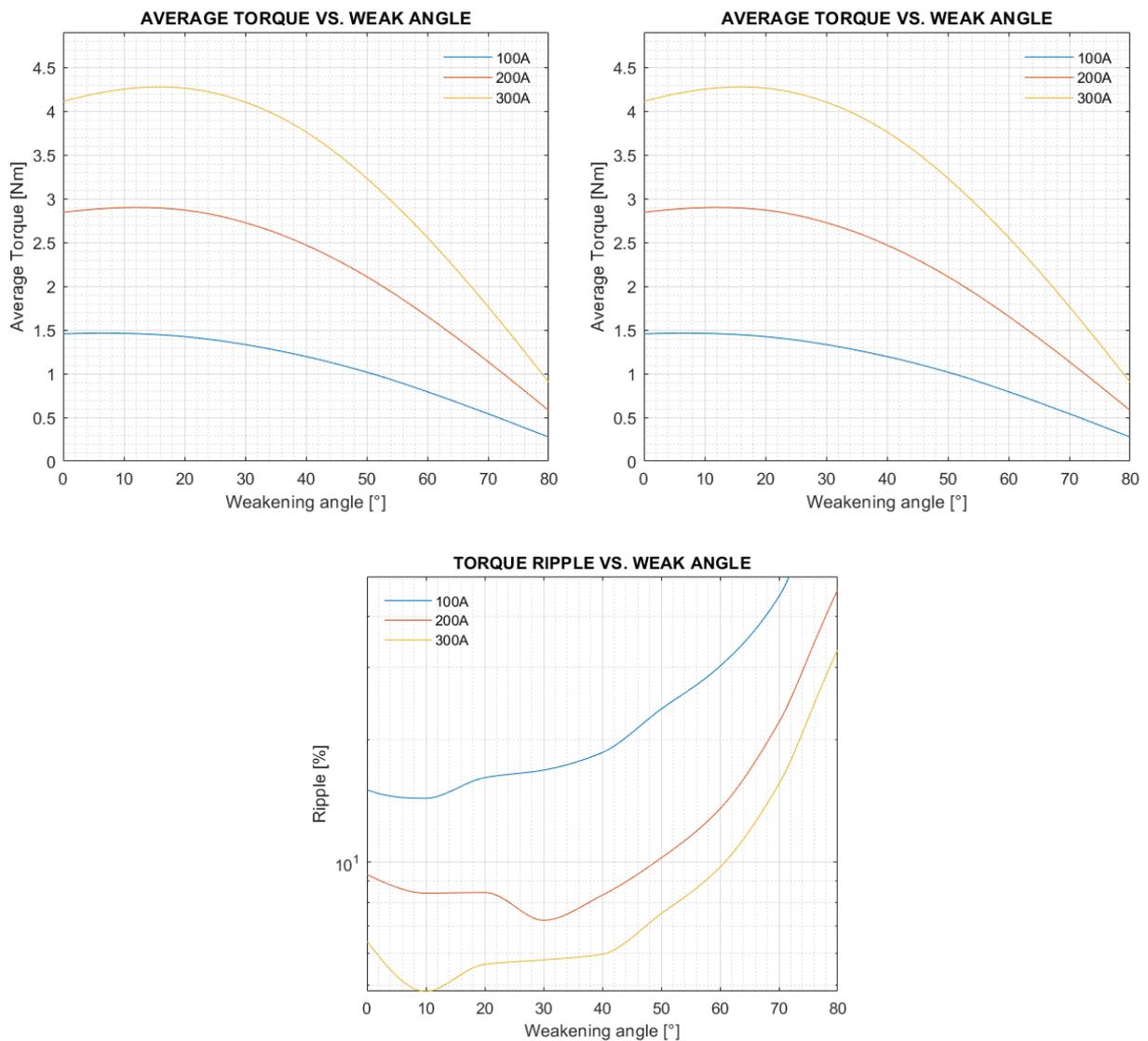


Figura 1.11

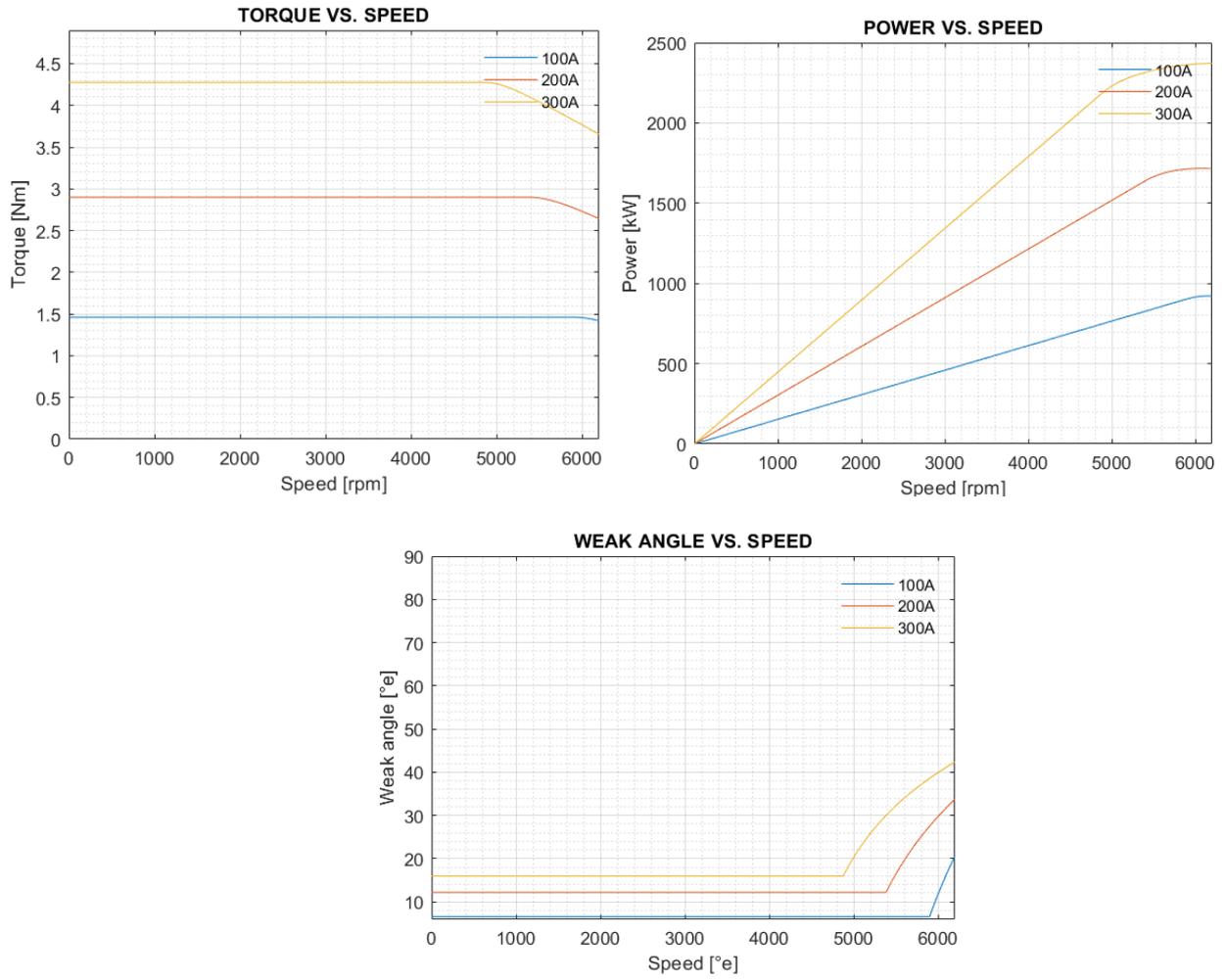


Figura 1.12

Capitolo 2

Il banco di prova.

Il motore è formato da tre componenti essenziali: l'inverter, il rotore e lo statore, che vengono montati sulla massa giroscopica e connessi tra loro elettricamente e meccanicamente. Il banco dunque è stato progettato per simulare il funzionamento della macchina al completo, non solo dare delle risposte tecniche alle sue specifiche generali, ma anche per testare il singolo funzionamento dei tre componenti. Il firmware di controllo della macchina è in grado di fornire a display un grande ventaglio di parametri utili a mappare completamente il funzionamento del motore. Grazie a questo si è capaci di monitorare il funzionamento delle tre componenti fondamentali.

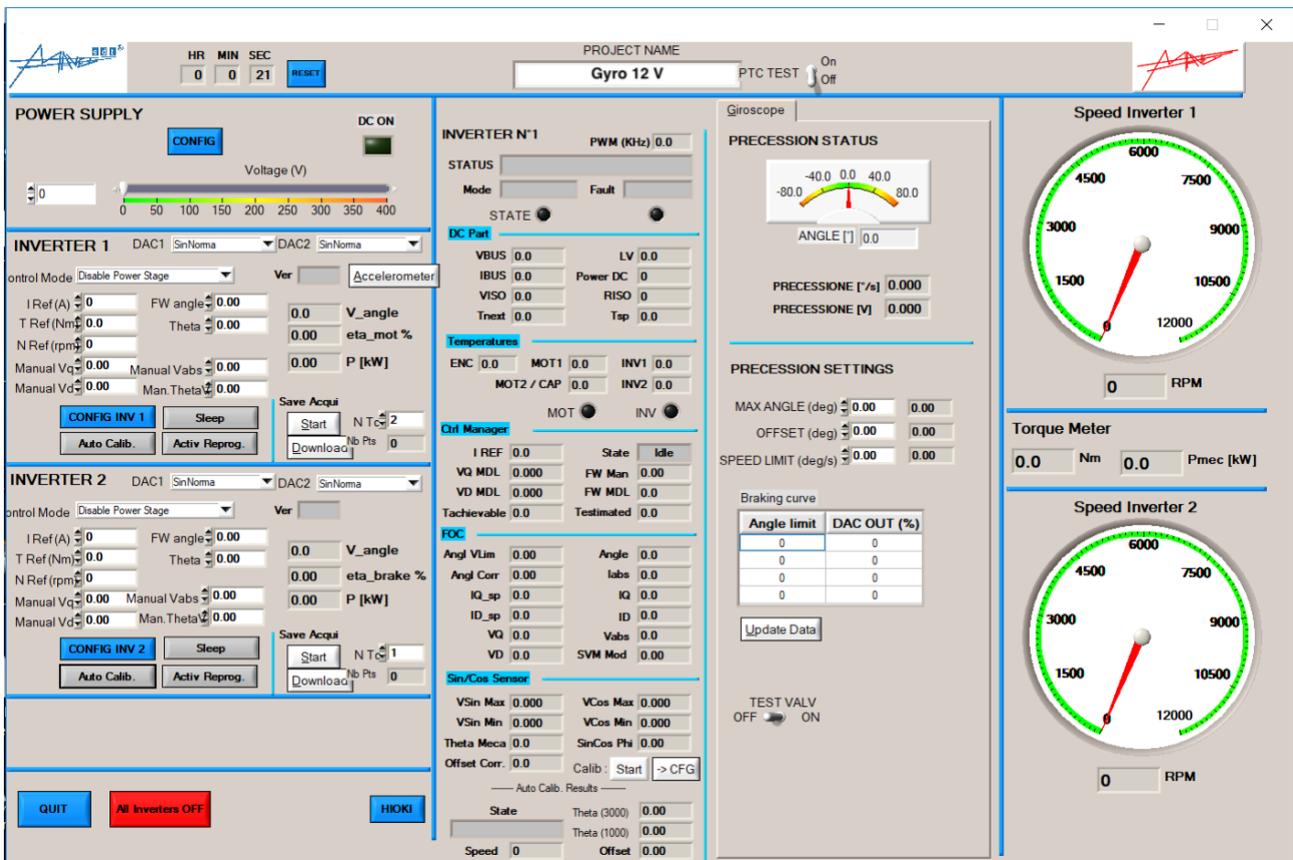


Figura 2.1

Oltre a questa possibilità, è stato richiesto che il banco possa anche funzionare come banco di test per la produzione e non solo la prototipazione, dunque è stata necessaria un'implementazione per la quale si potessero smontare e montare i tre componenti con relativa facilità e sicurezza. Inoltre il tempo per il cambio di ogni componente è necessario fosse rapido, per sopprimerne a volumi di produzione rilevanti.

Partendo da questi presupposti si è pensata a una configurazione back to back, con due motori montati uno di fronte all'altro e funzionanti uno da motore e uno da freno rigenerativo, collegati insieme tramite un Bus capacitor di potenza, in modo tale da avere un risparmio di energia richiesta all'alimentatore DC. Una volta definita la famiglia del banco si è arrivati a considerare la simulazione della macchina per poter progettare la parte su cui sarebbe stato posizionato il motore. È stata fatta la scelta di simulare il più possibile il modello costruttivo della macchina, rispettando le varie posizioni e collegamenti che erano stati pensati e messi in pratica sul giroscopio. Inoltre, dal momento che la produzione era

richiesta per due tipi di motori, uno da 2 kW e uno da 4 kW, il banco doveva essere in grado di testare tutte e due le tipologie dei motori. Naturalmente per motore utilizzato da freno, che dunque non dovrà essere sostituito sovente, verrà utilizzato il motore da 4 kW, in grado di avere potenza necessaria per frenare tutte e due le tipologie di motore.

Prendendo esempio da un vecchio banco si è cominciato a pensare alla struttura e alle parti riutilizzabili. Essendo un macchinario molto semplice è stato difficile poterne sviluppare una simile a quella di partenza e anche utilizzare alcune componenti fondamentali.



Figura 2.2

Si è quindi pensato a una piastra di base su cui sono fissati due volani e i rotori esterni collegati tra loro. Le due slitte accoppiate si muovono lungo le guide e sostengono la parte statorica del motore e l'inverter. Riproducendo tramite software Solidworks una simulazione 3D del banco e modificando volta per volta ogni componente si è arrivati al risultato finale, che è il banco mostrato in seguito.

Quello rappresentato in figura è il banco a nudo, con una vista assometrica e in sezione, in modo tale da renderne più semplice la comprensione. Il motore è presente nel disegno del banco, mentre è stato preferito nascondere gli inverter in quanto erano una struttura solida che copriva molte viste e appesantiva di molto il modello 3D.

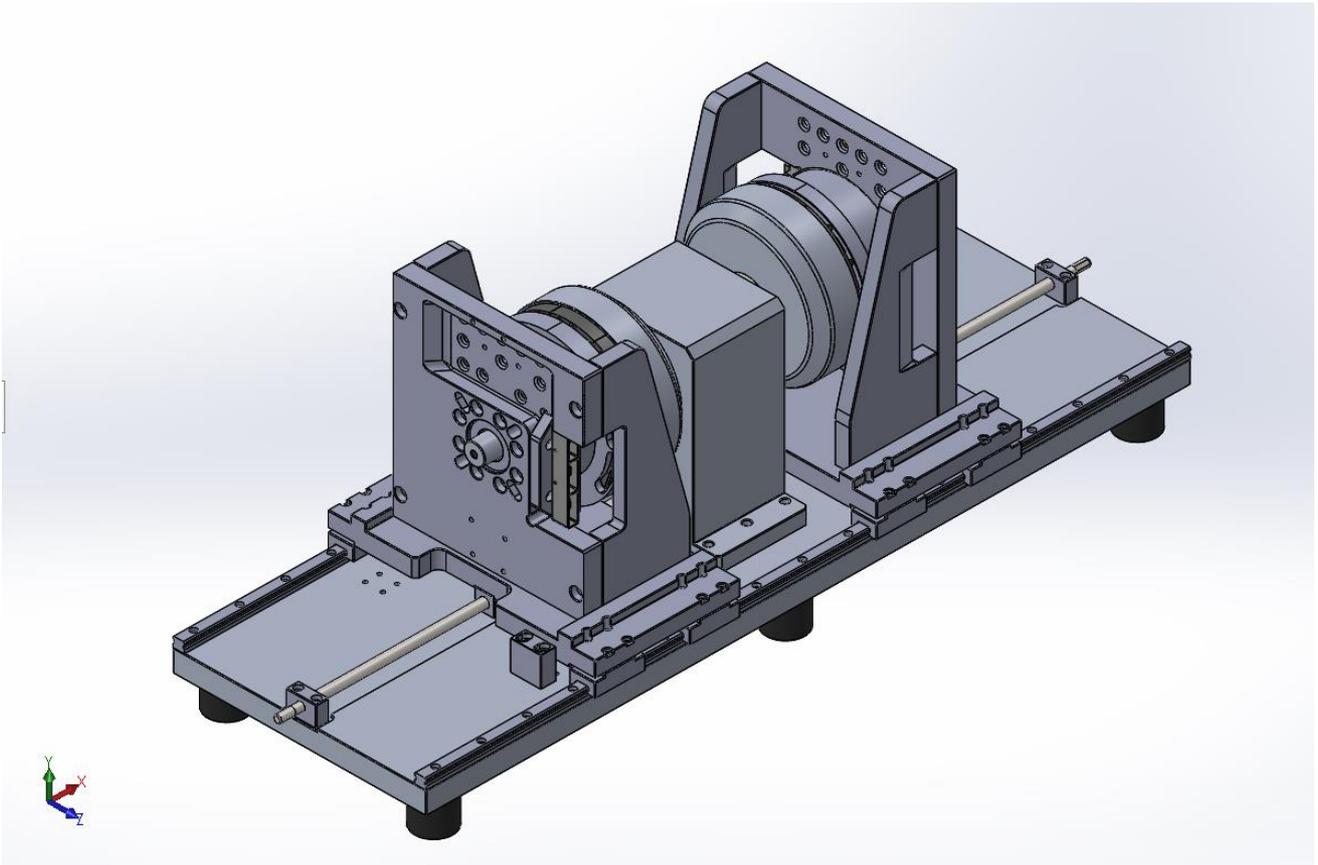


Figura 2.3

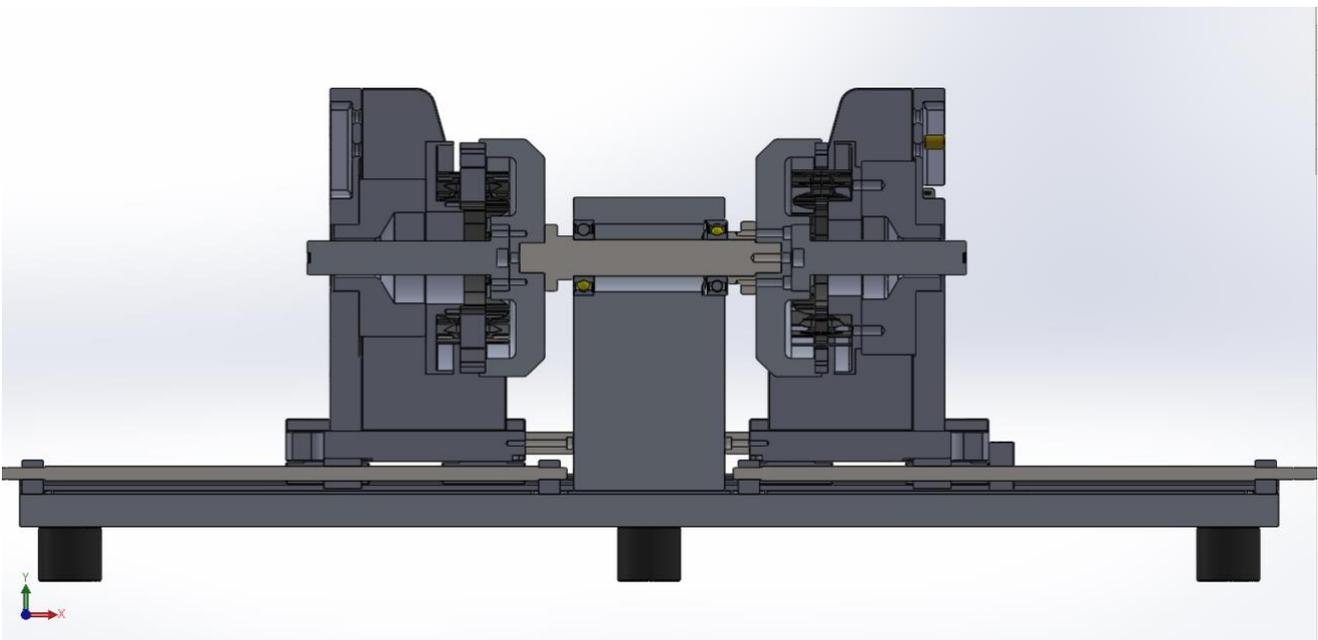


Figura 2.4

Oltre alla parte meccanica è stata sviluppata una parte elettrica ed è stato ordinato un banco fisico per il supporto e una piastra di raccordo tra banco e zona di test.

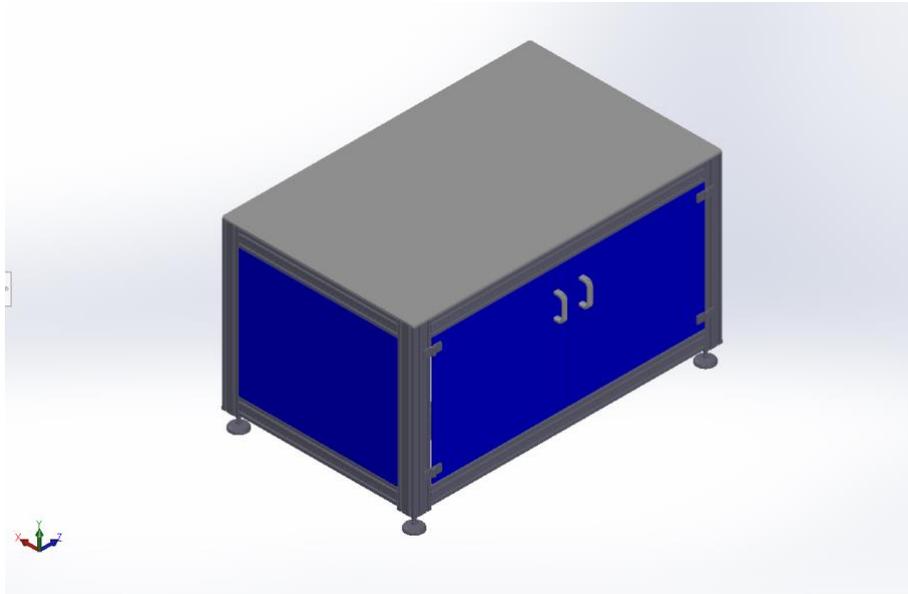


Figura 2.5

Si può notare come la complessità rispetto al vecchio modello sia aumentata in modo da soddisfare tutte le richieste di partenza. Dal vecchio banco si è riuscito a recuperare un pezzo particolarmente massivo, il sostegno centrale dell'albero, risparmiando sull'investimento e sull'utilizzo di nuovo materiale, dal momento che il vecchio banco era diventato inutilizzabile.

Il banco può essere diviso in 3 sottogruppi di componenti:

- La parte fissa o dei rotori
- La parte mobile o le slitte
- La parte della movimentazione

Per ognuna di queste differenti famiglie verranno esaminati uno per uno i componenti e esplicate le scelte fatte nella realizzazione di ognuno. I particolari verranno mostrati sia tramite immagine CAD 3D sia attraverso particolari delle tavole approvate e spedite ai fornitori per i successivi preventivi.

La sezione fissa.

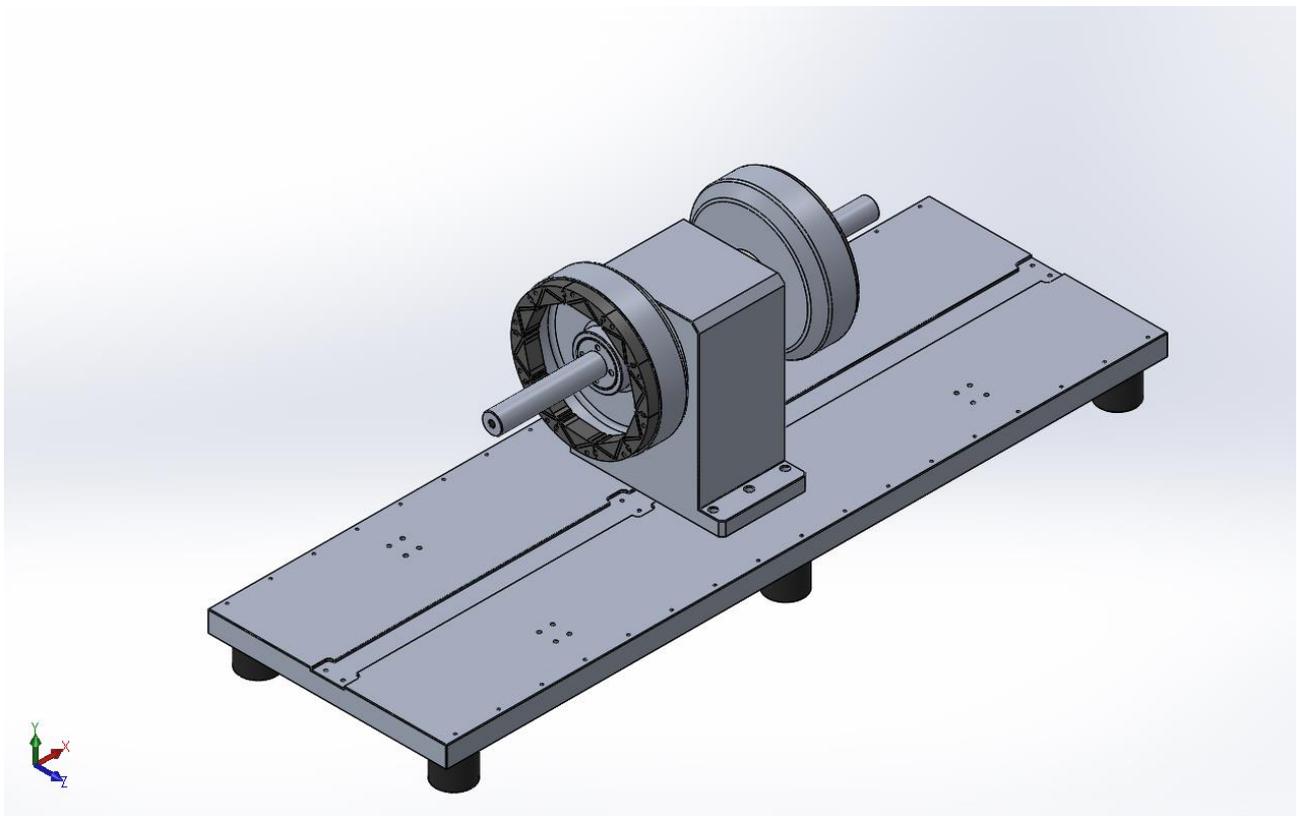


Figura 2.6

La sezione fissa comprende la parte movimentata dei volani e dei rotor del motore. Questa sezione include le parti in rotazione rispetto all'asse Z, ma ferme rispetto agli assi X e Y, ovvero l'albero di collegamento, i cuscinetti, i volani e le varie componenti di sostegno e trasferimento delle coppie. Le criticità sono affrontate componente per componente e presenteranno molti particolari di tolleranza sia dimensionale che geometrica, dal momento che in questo assieme di componenti le tolleranze sono fondamentali per riuscire ad ottenere un allineamento preciso, necessario per il funzionamento ottimale del banco di prova.

Essendo richiesto il funzionamento per i due tipi di motori, le parti del banco sono state progettate in funzione delle caratteristiche del motore Gyro da 4 kW che ha modalità di test e funzionamento maggiormente prestazionali sia dal punto di vista della coppia che della velocità, quindi saranno considerate solamente le prestazioni di quest'ultimo.

La sezione fissa comprende le seguenti componenti:

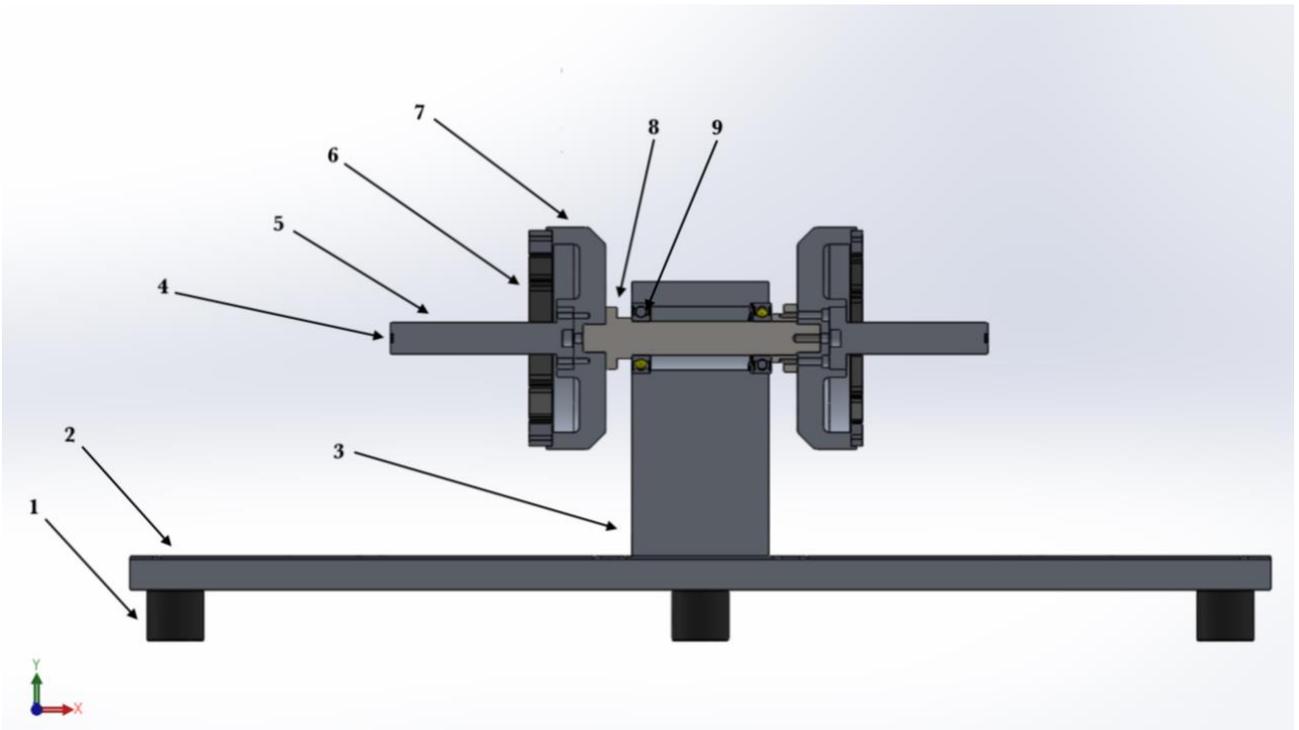


Figura 2.7

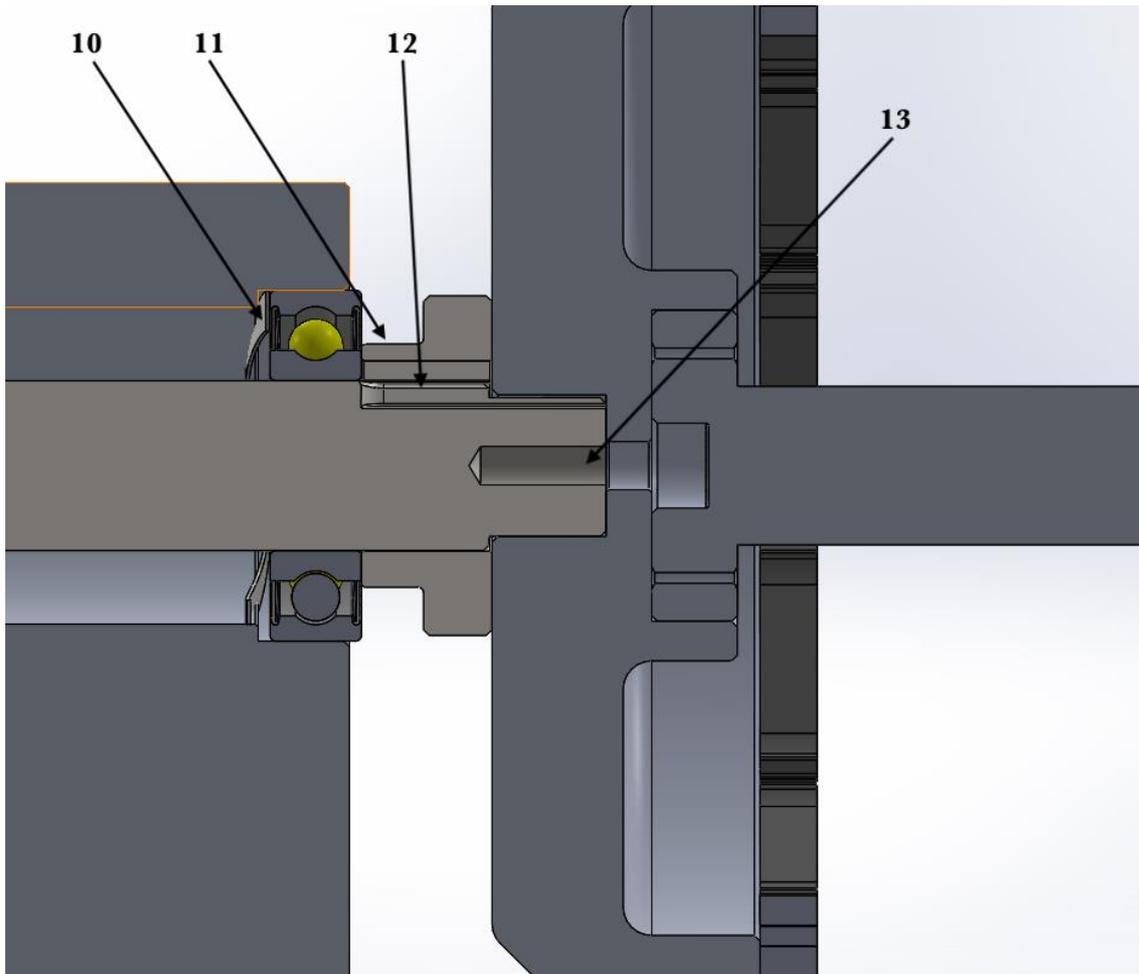


Figura 2.8

- 1) Silent Block
- 2) Piastra di base
- 3) Supporto albero
- 4) Magnete encoder
- 5) Supporto magnete
- 6) Rotore
- 7) Volano
- 8) Albero
- 9) Cuscinetto 6206-2z
- 10) Molla a onde
- 11) Flangia interfaccia volano
- 12) Chiavetta 10x8
- 13) Socket head cap screw _ ISO 4762 M8 x 25 mm

1) Silent Block

Date le caratteristiche strutturali e funzionali del banco, per i supporti di raccordo con il banco di sostegno sono stati scelti sei sostegni antivibranti in gomma, tenendo presente i carichi massimi e le massime velocità raggiungibili dei motori, anche se non richieste dalla prova, di una velocità massima di 3000 RPM e un peso totale delle componenti del banco di circa 90 kg (900 N). Avendo deciso di utilizzare sei supporti, dal momento che gran parte del peso è concentrato nella parte centrale della piastra si è calcolato il minimo valore di deflessione ottenuto. Da questo si è anche ottenuta la rigidezza del giunto tramite il carico e la deflessione ottenuta in tabella, in mm.

$$K = \frac{P_{tot}/6}{Deflessione}$$

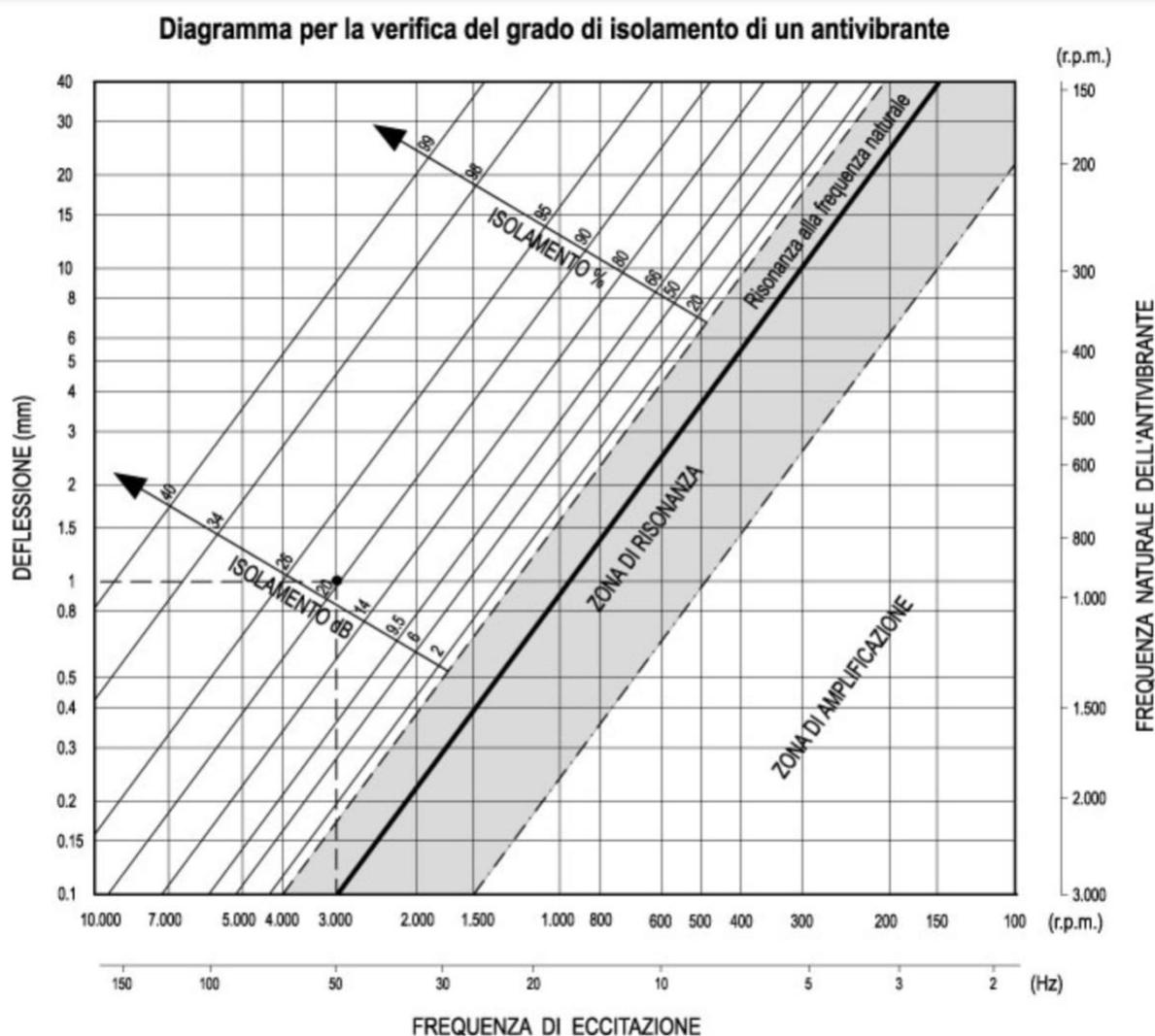
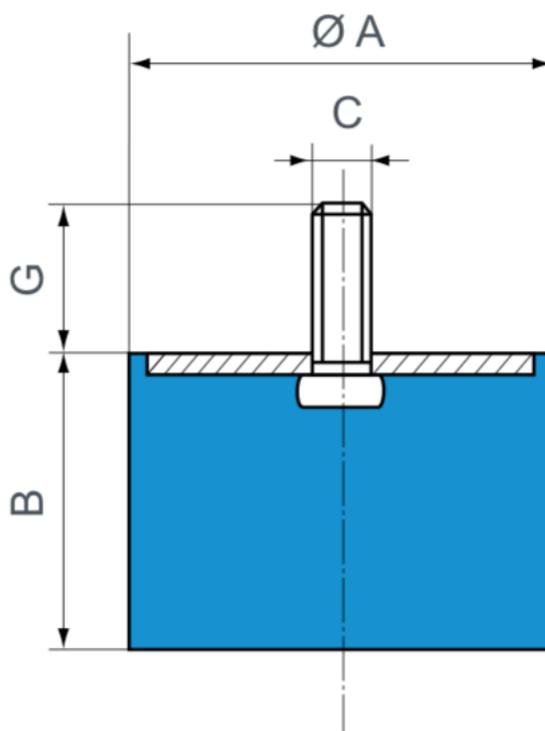


Figura 2.9

Una volta calcolate le caratteristiche minime sono stati scelti dei supporti sovradimensionati in modo tale da avere un ampio margine di manovra nel caso venissero fatte delle modifiche future ai componenti del banco e ai motori testati su di esso.

In questo caso la scelta è ricaduta sui Silent Block Radial flex 408-8161 della Paulsta®, in particolare i Φ 50 da 45 mm, a singola vite.



Ø A (mm)	B (mm)	C	G (mm)	Compression		Ref.
				Max. load (daN)	Deflection (mm)	
50	25	M10	25	300	6	511525
	35			250	9	511535
	45			190	11	511545

Figura 2.10

Dalla figura precedente si nota che i silent block possono sopportare un carico massimo di 190 daN, quindi sufficiente a qualsiasi modifica apportabile in futuro.

2) Piastra base

La piastra di base è il supporto principale del banco ed è fondamentale per l'allineamento delle slitte e il buon funzionamento del banco e la sua efficienza generale. Infatti durante il montaggio questa piastra sarà utilizzata come riferimento per l'allineamento.

Parlando delle sue caratteristiche generali la piastra è di alluminio con dimensioni 331x1000 mm di 30 mm di spessore per avere una rigidezza e resistenza meccanica sufficienti a sostenere la struttura. Considerando le dimensioni dei componenti e lo spazio di lavoro e movimento delle slitte sono state scelte le dimensioni prima indicate per avere una buona stabilità e libertà di movimento sia durante il funzionamento sia durante il montaggio e lo smontaggio.

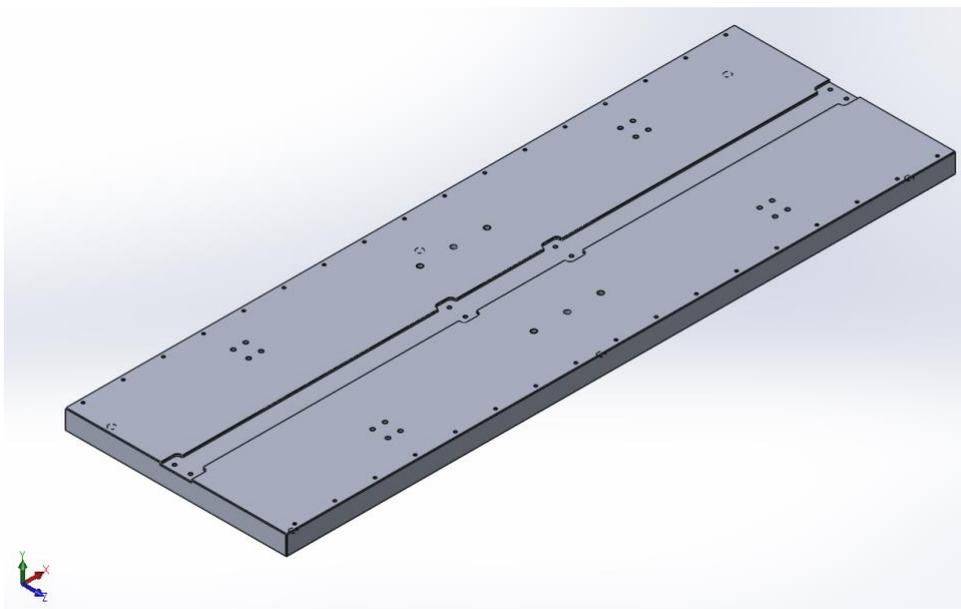


Figura 2.11

Dal disegno si nota subito il lungo scarico centrale, fatto per consentire il passaggio della vite senza fine pensata per la movimentazione delle slitte.

Inoltre, sono importanti da notare due particolari:

- I quattro fori centrali M8, pensati per il fissaggio sono posizionati specularmente al centro e a uno scarico circolare di $\Phi 8$, dal momento che il sostegno dell'albero è un pezzo di recupero e aveva delle spine di centraggio. I fori sono stati scaricati in modo che le spine avessero un minimo gioco così da non dare esagerate difficoltà in fase di montaggio.
- Alla larghezza dei bordi è stata data una tolleranza di $\pm 0,1$ mm, come mostrato da disegno su una lunghezza di un metro. Questo è stato fatto poichè le slitte scorreranno su delle piste che verranno allineate grazie alla parete laterale della piastra.

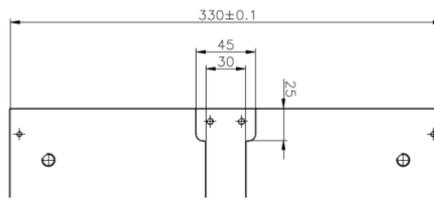


Figura 2.12

3) Supporto albero

Il seguente componente è stato recuperato dal banco precedente dal momento che era un pezzo particolarmente massivo e quindi costoso da realizzare. Come si nota da disegno la struttura è piena ma forata in corrispondenza dell'albero. Lungo questa foratura sono state realizzate anche le sedi dei cuscinetti 6206-2z. Partendo da questo tipo di struttura si è ingegnerizzato il banco in modo che il montaggio fosse realizzabile e compatibile con una parte già esistente.

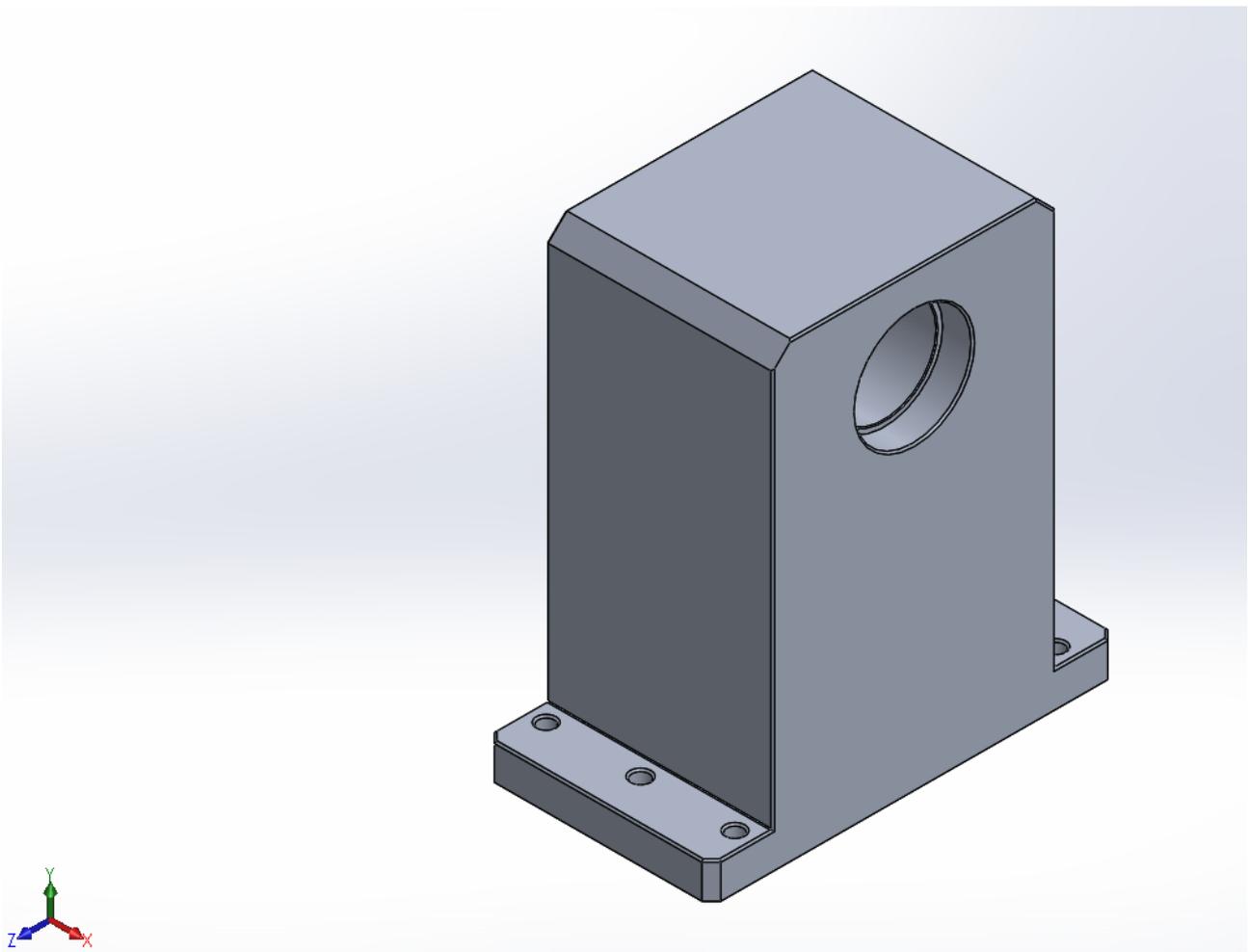


Figura 2.13

Sono state verificate le altezze degli spallamenti all'interno della foratura in modo tale da avere la conferma che fossero conformi ai bloccaggi richiesti dai cuscinetti. Una volta verificate queste dimensioni dai disegni del vecchio banco si è risaliti alle dimensioni del pezzo.

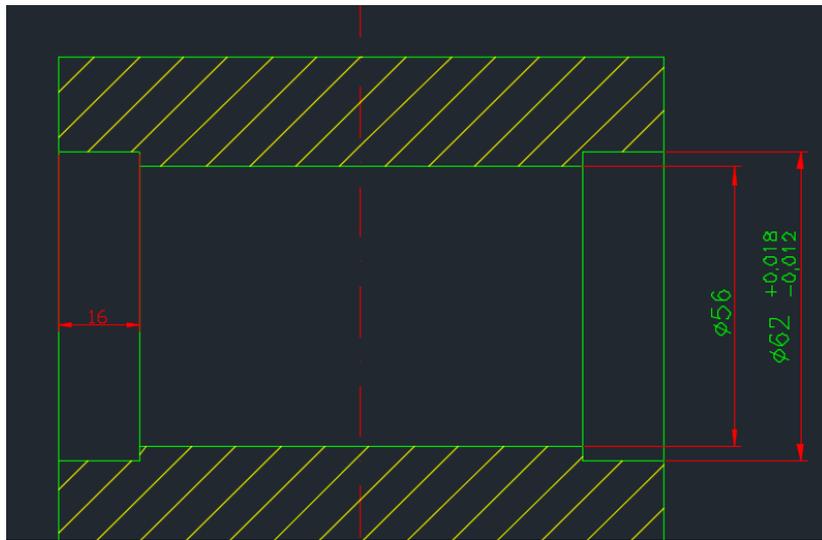


Figura 2.14

Dopo aver controllato le dimensioni e le tolleranze e trovato una corrispondenza si è misurato per un'ulteriore sicurezza il pezzo con delle misurazioni vere e proprie sul banco di marmo. Le caratteristiche richieste dai cuscinetti verranno esposte in seguito nella sezione riguardante questi ultimi.

4) Magnete Encoder

Questo piccolo magnete di $\Phi 8$ mm viene inserito e incollato sul suo supporto di alluminio. Pur essendo un componente che non ha bisogno di una spiegazione estesa è importante da considerare dal momento che buona parte della struttura è stata pensata in funzione di questo componente. Il magnete, infatti, deve essere posizionato in un punto preciso all'interno dell'inverter del giroscopio in quanto fornisce la posizione dell'albero e dunque informazioni fondamentali per il pilotaggio del motore e per il suo utilizzo. È stato realizzato uno studio all'interno della MAVEL s.r.l. per stabilire il corretto funzionamento dell'encoder. In quanto è più rilevante nella costruzione del supporto del magnete, questo studio verrà mostrato nella sezione successiva.

5) Supporto Magnete

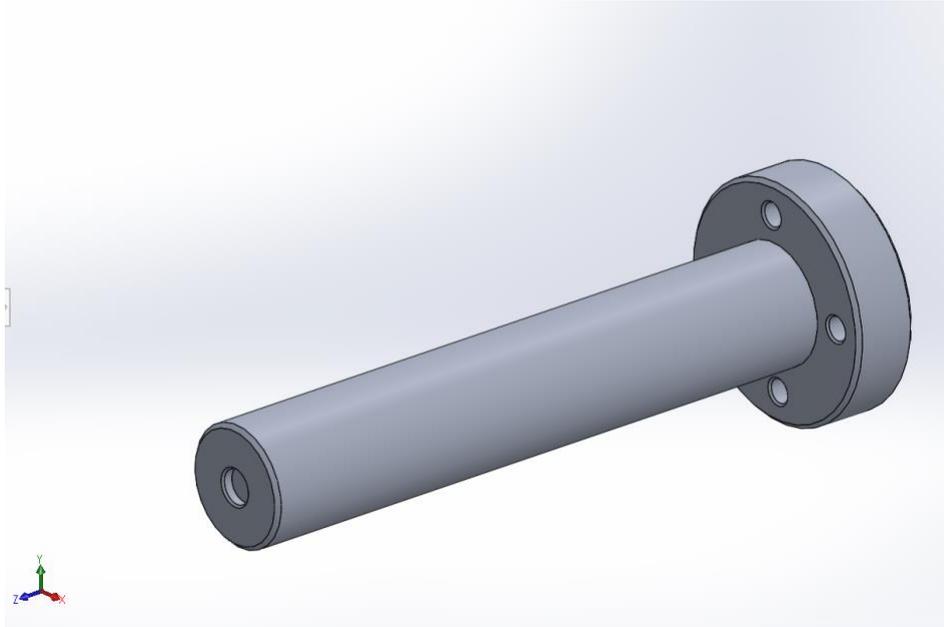


Figura 2.15

L'albero mostrato in figura è presente in due configurazioni all'interno del banco, essendo una delle componenti variabili nel caso venisse montato il motore da 20 mm o quello da 10.

Vengono fissati sul volano in modo da simulare il caso reale, nel quale il magnete, montato direttamente sull'albero del motore fornisca le informazioni di posizione. Per ricreare questa situazione si è fissato un albero alla parte rotorica tramite quattro viti mordenti sul volano.

Il supporto presenta anche una sede $\Phi 15$ sulla testa per ospitare una vite M8 utile durante il montaggio. Per evitare una cattiva lettura del sensore si è fornita a questo componente una guida di dimensioni importanti (20 mm), ricavandola sul volano per portare al minimo le vibrazioni e uno sfarfallamento del magnete durante la rotazione. Si può infatti notare dal disegno che sono state date delle tolleranze dimensionali precise ($-0,05$ mm/ $-0,1$ mm) alla testa cilindrica, in modo tale che sia guidata in maniera precisa.

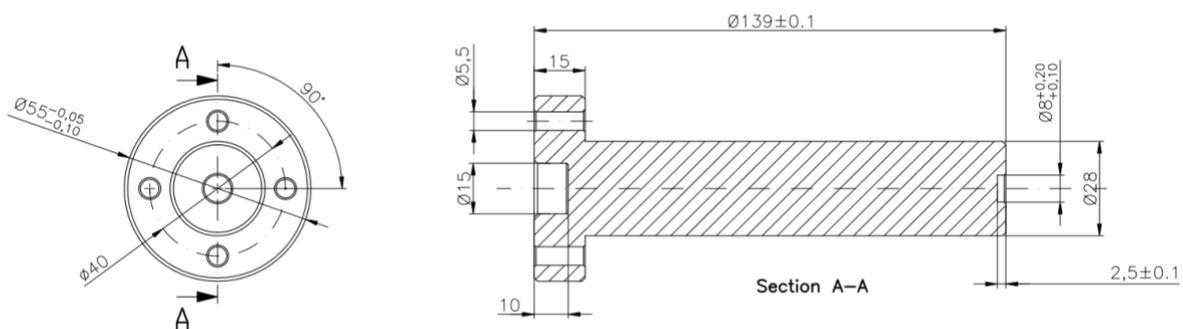


Figura 2.16

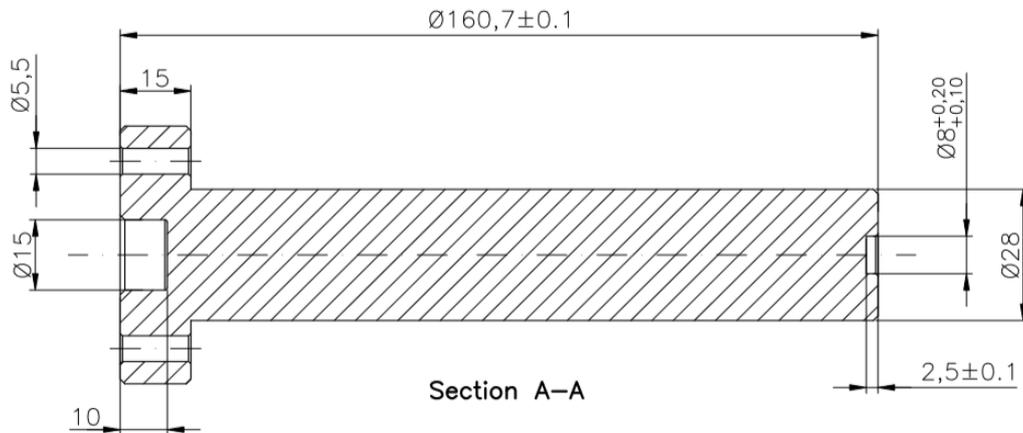


Figura 2.17

Di primaria importanza è stata considerata la lunghezza dei due supporti del magnete, in quanto dopo uno studio compiuto in azienda, è stata evidenziata una tolleranza di distanza dal magnete utile di 7,8 mm perpendicolare e di 6,5 mm se il sensore non è correttamente orientato, ma obliquo. È possibile visionare il documento di Test MOD-MAV-178-A2 fornito nella bibliografia. La lunghezza del corpo cilindrico è 160,7 mm per la slitta adattata al sostegno del blocco motore più inverter da 2 kW e da 139 mm per il blocco da 1 kW. Per posizionare il magnete si è ricavata una cava in testa al perno profonda 2,5 mm in grado di contenerlo completamente. Le tolleranze sono state considerate per entrambe le lunghezze da $\pm 0,1$ mm, in modo che non andassero a influenzare sulla distanza magnete-sensore scelta in questa applicazione.

Da tenere presente che il sensore dell'encoder situato sull'inverter è protetto dagli agenti esterni tramite una sorta di tappo polimerico, dunque è da valutare anche una distanza minima data dal tappo di 1,92 mm. Per determinare le lunghezze dei perni, si è considerata una distanza di 3,5 mm per avere una corretta lettura dell'encoder.

La parte rotorica del motore, come già spiegato in precedenza, è modulare e presenta 10 fori di fissaggio M4 mordenti sulla struttura del volano. Questo componente essendo oggetto dei test, è richiesto sia smontato soventemente. Per questo motivo si è pensato a due tipi di test:

- Il primo, in cui vengono testate tutte e tre le parti del motore: rotore, statore e inverter, cambiando i componenti ad ogni ciclo di test.
- Un secondo, in cui la componente rotorica viene mantenuta e testata a parte, in quanto richiede un tempo di montaggio più lungo.

Si è optato, in seguito a varie valutazioni, in quanto, pur essendo più onerosa a livello temporale, è anche la più precisa e il banco è in grado di simulare il funzionamento completo del giroscopio. Si fornirebbe al cliente una macchina già testata in tutto il suo range di funzionamento e quindi decisamente meno soggetta ad errori.

Per il corretto posizionamento del rotore è previsto un centraggio esterno sul volano di $\Phi 190$ mm in modo da facilitarne il montaggio. Si è riscontrata un'ulteriore difficoltà durante il montaggio del rotore in funzione del taglio laser dei componenti modulari del rotore. Infatti, se non viene controllato il punto di inizio del taglio laser, le bave di tranciatura, che vengono fatte all'esterno del rotore, devono essere limate a mano prima dei montaggi aumentando il volume di lavoro e il tempo di montaggio. Si è quindi suggerito al disegnatore meccanico di evidenziare un'area all'interno del taglio in modo da avere le bave in quella posizione così da non dare problemi successivamente. Un discorso analogo è stato fatto per lo statore, in quanto le bave potevano dare problemi nel funzionamento perché non avrebbero potuto essere all'esterno dal momento che il traferro del motore ha uno spessore di 1 mm. Essendo gli spazi di piccole dimensioni, anche una piccola bava avrebbe potuto dare problemi di funzionamento, quindi anche in questo caso è stato suggerito di fornire un'area di inizio di taglio.

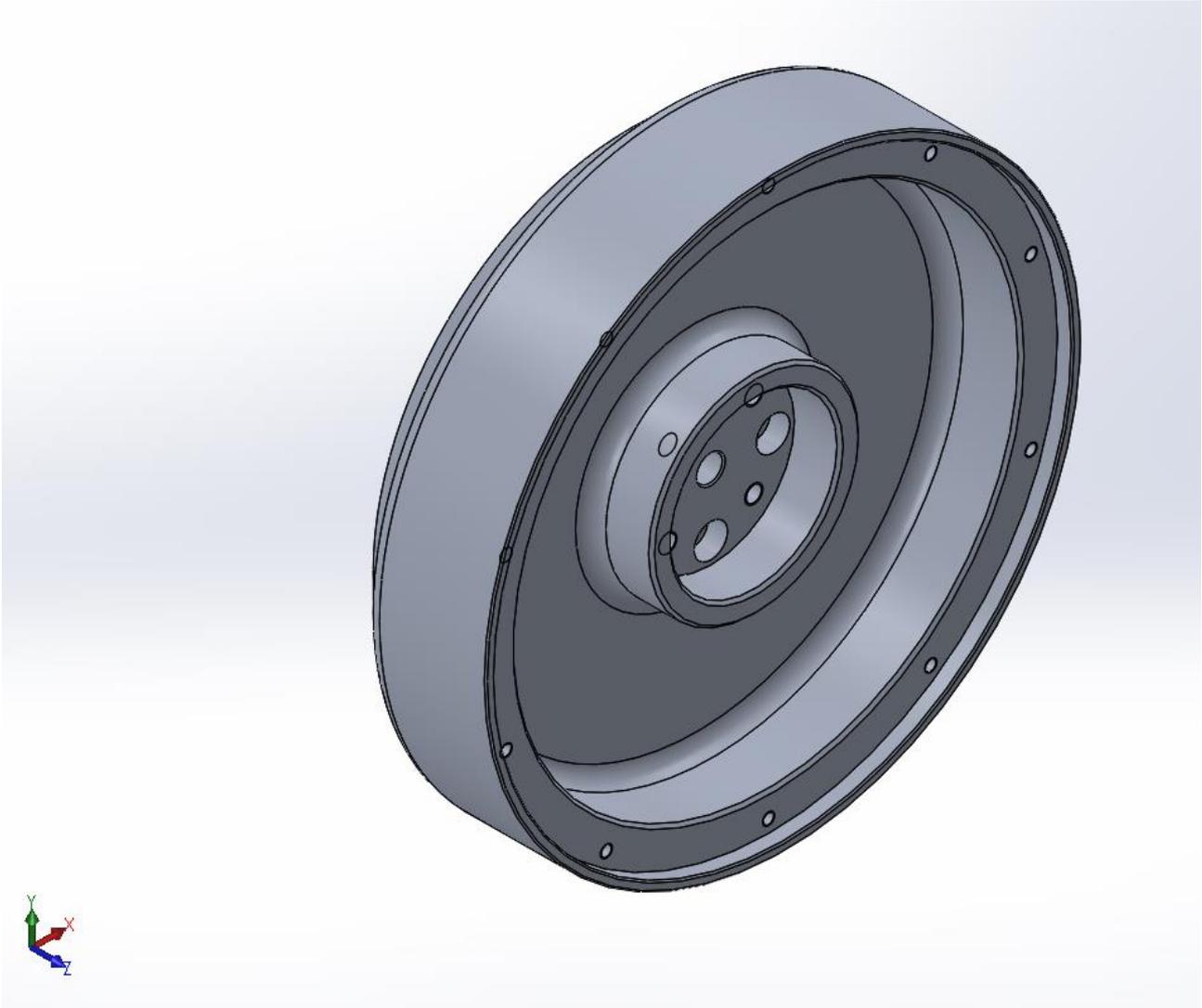


Figura 2.18

Il volano è il supporto della componente rotorica e funge da sostituto della massa della macchina, pur non essendo così massivo e pesante ed evitando così inutili perdite e sollecitazioni sui cuscinetti. Inoltre la sua funzione è quella di elemento di raccordo tra rotore e albero di trasmissione. Il montaggio, che verrà esplicito alla fine di questa sezione, è stato oggetto di studio e ha messo in evidenza molte criticità, (che verrà esplicito alla fine di questa sezione), ma dopo molte riflessioni si è arrivati a questa versione definitiva. Inoltre si è prestata attenzione al fatto che i due volani fossero uguali, in modo da facilitare gli ordini e il montaggio, diminuendo anche il più possibile la complessità dei pezzi.

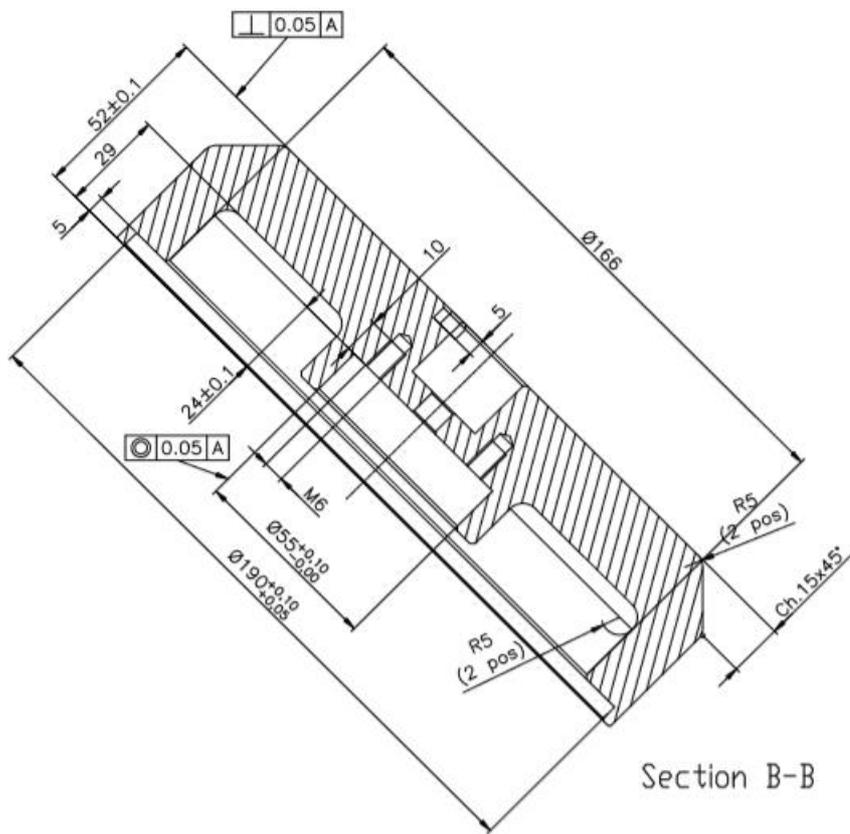
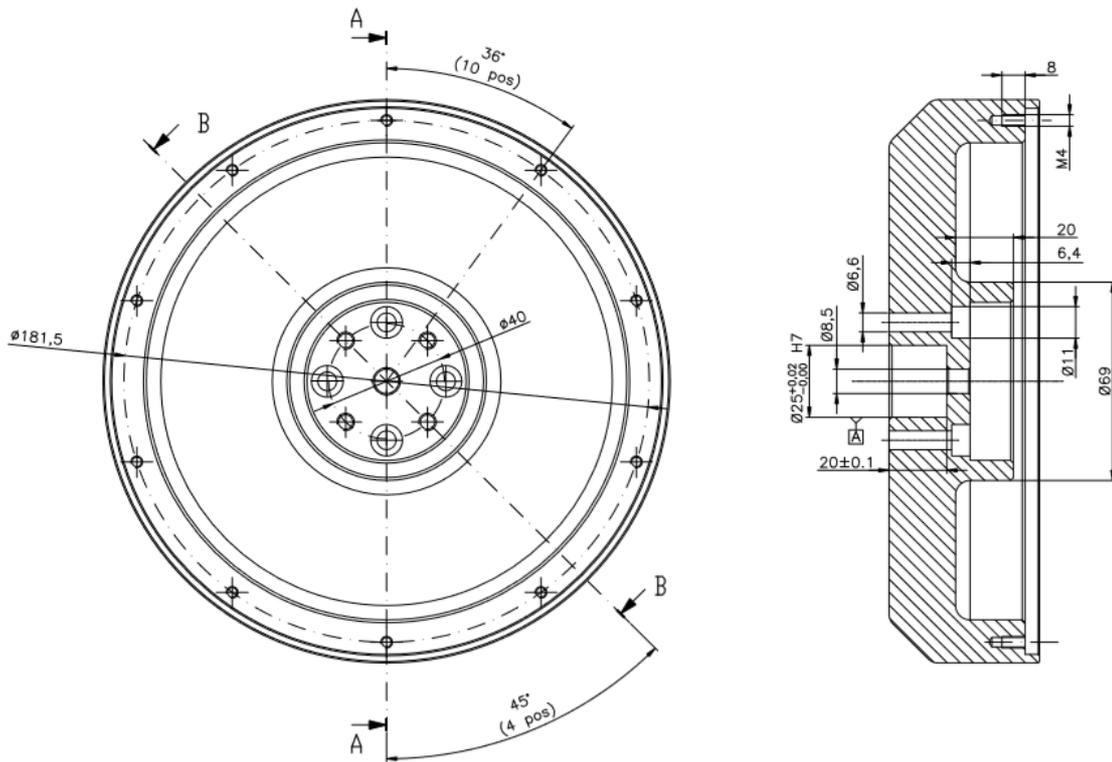


Figura 2.19

Il volano si presenta come un disco scavato all'interno con ampi raccordi R5, in modo che sia possibile fare passate grandi e impiegando meno tempo.

All'interno, è stata realizzata una guida circolare di altezza 15 mm, che, come spiegato in precedenza, ha funzione di sede per il supporto del magnete. Dunque, è stato reso necessario fornire al pezzo una tolleranza di +0,1 ma non negativa, in modo da non avere alcuna interferenza e rendesse impossibile il montaggio del supporto. Inoltre è stata data una tolleranza geometrica di circolarità, così che sia sempre precisa pur essendo molto profonda.

All'interno della tazza formata dalla guida sono alternati lungo una circonferenza $\Phi 41$ dei 4 fori filettati M6 e su una circonferenza $\Phi 40$ dei fori passanti lamati da $\Phi 6,6$ distanziati di $22,5^\circ$, in modo tale da permettere la scomparsa della vite a testa cilindrica e consentire il montaggio del supporto del magnete. Queste viti sono mordenti sulla flangia legata all'albero e trasmettono la coppia e il moto.

Gli altri fori M6, ciechi, profondi 10 mm consentono il fissaggio del supporto del magnete al volano.

Il foro centrale M8 è stato realizzato per il bloccaggio della struttura durante il montaggio e viene utilizzato solamente sul volano, sul quale è presente l'inserto chiavettato, e non su quello collegato direttamente alla flangia fissa dell'albero. Infatti, in questo caso, le viti della flangia dell'albero trasmettono sia il moto rotazionale, sia permettono al volano di stare a pacchetto con l'albero. Nel caso dell'inserto chiavettato invece le viti chiudono solamente l'inserto che tramite una chiavetta 10x8 trasmette la coppia, ma l'albero sarebbe libero di scorrere lungo la direzione assiale. Per ovviare a questo problema si è deciso di prevedere un foro filettato sulla testa dell'albero con una vite che stringesse il cinematismo e impedisse lo scorrimento assiale.

All'esterno è stata posizionata una guida di 5 mm per il centraggio del rotore. Inoltre sono presenti 10 fori filettati ciechi M4 profondi 8 mm per il bloccaggio.

Andando a considerare il dorso del volano si nota la presenza di uno scasso cilindrico di $\Phi 25$ profondo $20 \pm 0,1$ mm previsto come guida per il centraggio corretto dei volani sull'albero e l'allineamento corretto del cinematismo. La dimensione della guida ha un accoppiamento con l'albero di H7 e da ciò si ricavano tolleranze molto precise $+0,02/- 0,00$ in quanto è un accoppiamento importantissimo e se non allineato in maniera precisa porta in evidenza moltissime criticità quali vibrazioni, perdite per attriti, fatica sui singoli componenti e un invecchiamento precoce dei cuscinetti. Oltretutto non deve neanche dare interferenza poiché il montaggio va fatto a freddo e il moto non è trasmesso tramite calettamento.

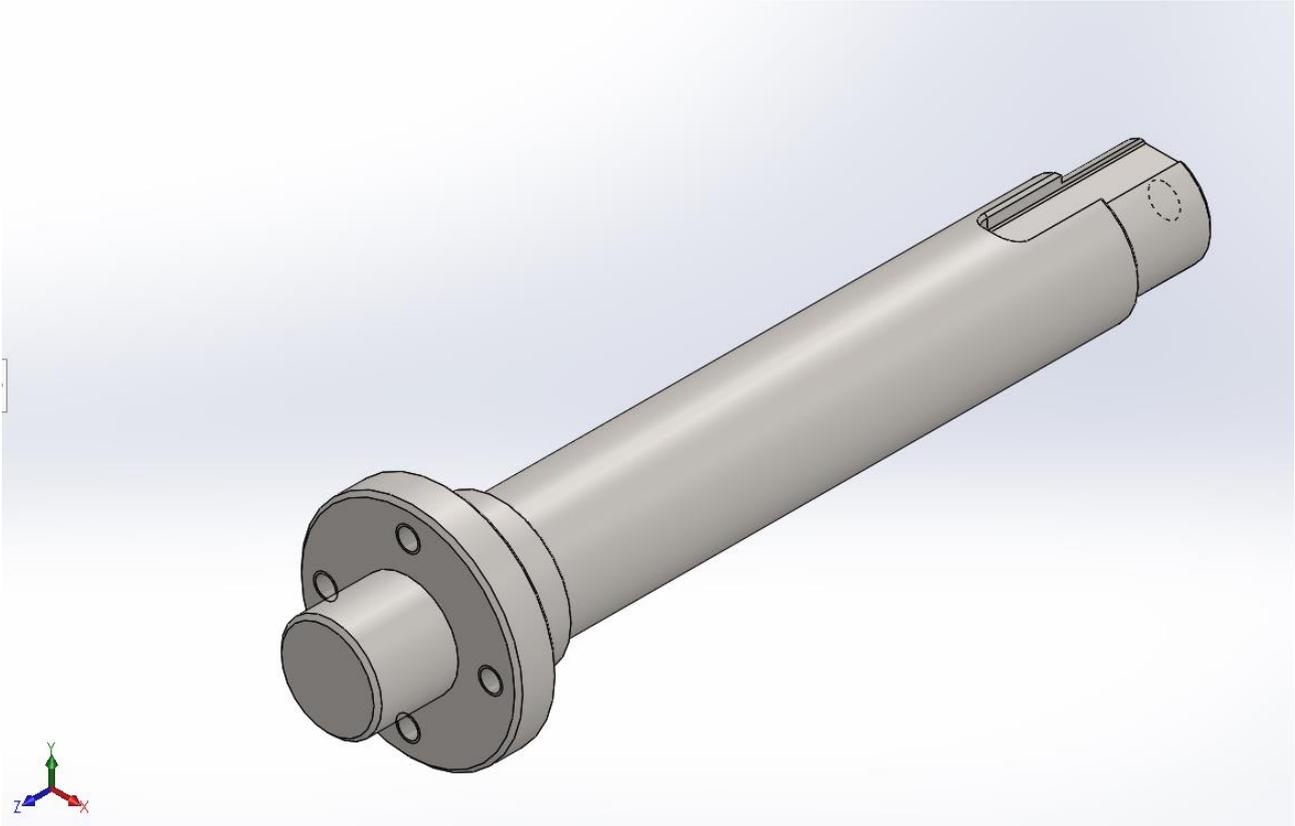


Figura 2.20

L'albero è uno dei pochi componenti previsto in acciaio INOX in quanto uno dei componenti più sollecitati. Non presenta sollecitazioni assiali, ha un momento flettente dato dal suo peso proprio e dalla struttura rotorica, la quale è retta solo da esso. Decisamente più rilevante è il momento torcente che considerando i casi più estremi avrebbe una coppia motrice/resistente massima di 8,5 Nm nel caso il motore richieda 600 A di corrente. Dal momento che il momento flettente dato dal peso proprio è trascurabile e sovrastimiamo del 10% il momento torcente per tener conto delle parti rotoriche a sbalzo, dal momento che sono in alluminio, si può notare come il diametro di mm sia largamente sovrastimato per questi campi di sforzi.

Considerando il precarico della molla sui cuscinetti si è scelto che fosse 0,1 del carico sui cuscinetti, dunque considerando la rigidità della molla a onde si è considerato un Δx di ...

Per la dilatazione termica, è stato considerato un ΔT di temperatura di 20°C. Tramite la formula:

$$\Delta L = \alpha * L_0 * \Delta T$$

Con $\alpha = 12 * 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ che è la dilatazione termica dell'acciaio, si ottiene una dilatazione di 0,05 mm.

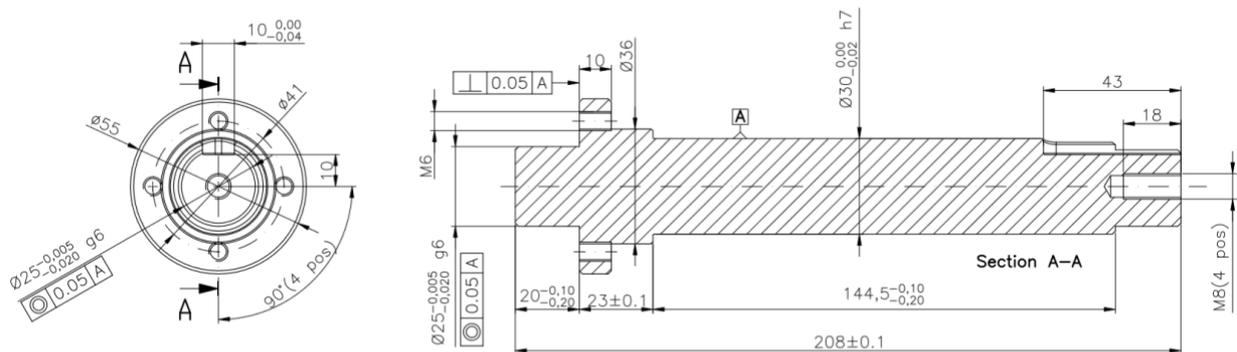


Figura 2.21

A livello costruttivo, si nota una flangia fissa con 4 fori M6 disposti a 90° su una circonferenza di $\Phi 41$, a cui è richiesto il compito di trasmettere il moto tra volano e albero. Dal lato della flangia è previsto un cilindro estruso che andrà ad accoppiarsi con la guida sul dorso del volano, in modo da rendere l'allineamento del cinematismo molto preciso. Infatti questo cilindro lungo 20 mm ha un accoppiamento g6 all'interno di un foro H7 (della guida) con tolleranze dimensionali molto precise ($-0,005/-0,02$) e una tolleranza geometrica di concentricità rispetto all'involuppo longitudinale dell'albero individuato da A di 0,05. Anche alla flangia è stata data una tolleranza geometrica di perpendicolarità di 0,05 rispetto ad A in modo che l'accoppiamento con la guida fosse molto preciso.

Oltre alla flangia l'albero possiede uno spessore maggiore di $\Phi 36$ necessario per la chiusura del cuscinetto sulla componente calettata all'albero. Per l'accoppiamento dei cuscinetti è stata prevista una tolleranza di accoppiamento h7 ($+0,00/-0,02$) in modo tale da non avere interferenza per non rendere il montaggio impossibile.

La lunghezza del cilindro che costituisce il corpo centrale è di 144,5 mm ma le sue tolleranze ($-0,1/-0,2$) sono in negativo essendo preciso il posizionamento finale in quanto la guida per il centraggio sul lato opposto alla flangia dell'albero è dipendente da queste lunghezze.

Su questo lato è presente una sede lunga 43 mm disposta per una chiavetta 10x8. La larghezza ha delle tolleranze precise ($0,00/-0,04$) in modo tale che la chiavetta non sia libera di muoversi.

Infine, come sull'altro capo dell'albero, è presente un cilindro che ha funzione di guida per l'allineamento del cinematismo di 21 mm. I due accoppiamenti sui volani sono identici, tranne per il fatto che sulla parte in cui è presente la chiavetta è previsto un foro M8 profondo 18 mm con la funzione di blocco del secondo volano.

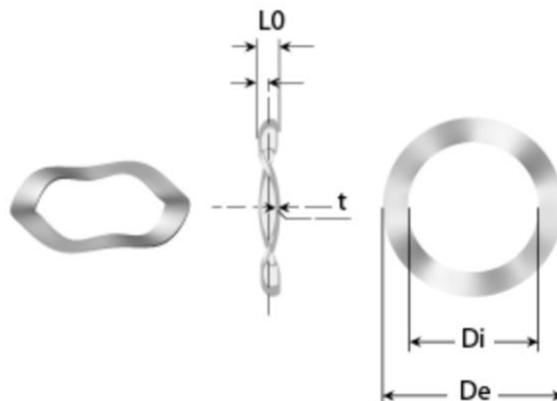
9) Cuscinetto 6206-2z

Questi cuscinetti cilindrici a sfere con diametro interno da 30 mm, esterno da 62 mm e spessore 16 mm sono stati scelti uguali a quelli del vecchio banco in quanto le sedi del montante recuperato potessero venire utilizzate senza ulteriori lavorazioni meccaniche.

Il peso del sistema che poggia sui cuscinetti è di 9,2 kg, cioè circa 50 N su ogni cuscinetto. Da questo si può subito notare come questi cuscinetti hanno un carico limite di fatica P_u di 0,475 kN dunque si è decisamente al di sotto e il cuscinetto risulta sovradimensionato. Dal momento che il prezzo è molto basso rispetto a quello totale del banco si è deciso comunque di comprare questi cuscinetti, in quanto ogni tipo di modifica sul montante che sorregge l'albero sarebbe stata decisamente più costosa.

La chiusura dei cuscinetti è ad O, la parte interna è tenuta dall'esterno dall'albero e dalla flangia smontabile, mentre la parte esterna è bloccata da due spallamenti all'interno del montante di sostegno. È prevista una molla a onde per il precarico e per consentire la dilatazione sulla parte con la trasmissione tramite chiavetta per poter regolare il carico statico della molla.

10) Molla a onde



De - Diametro esterno (mm)	61,47
Di - Diametro interno (mm)	47,55
t - Spessore (mm)	0,64
L0 - Lunghezza senza carico (mm)	4,27
L1 - Altezza con carico (mm)	2,08
F - Forza media - L1 (N)	200,5
Onde - (Pz.)	3,00

Figura 2.22

11) Flangia di interfaccia con il volano

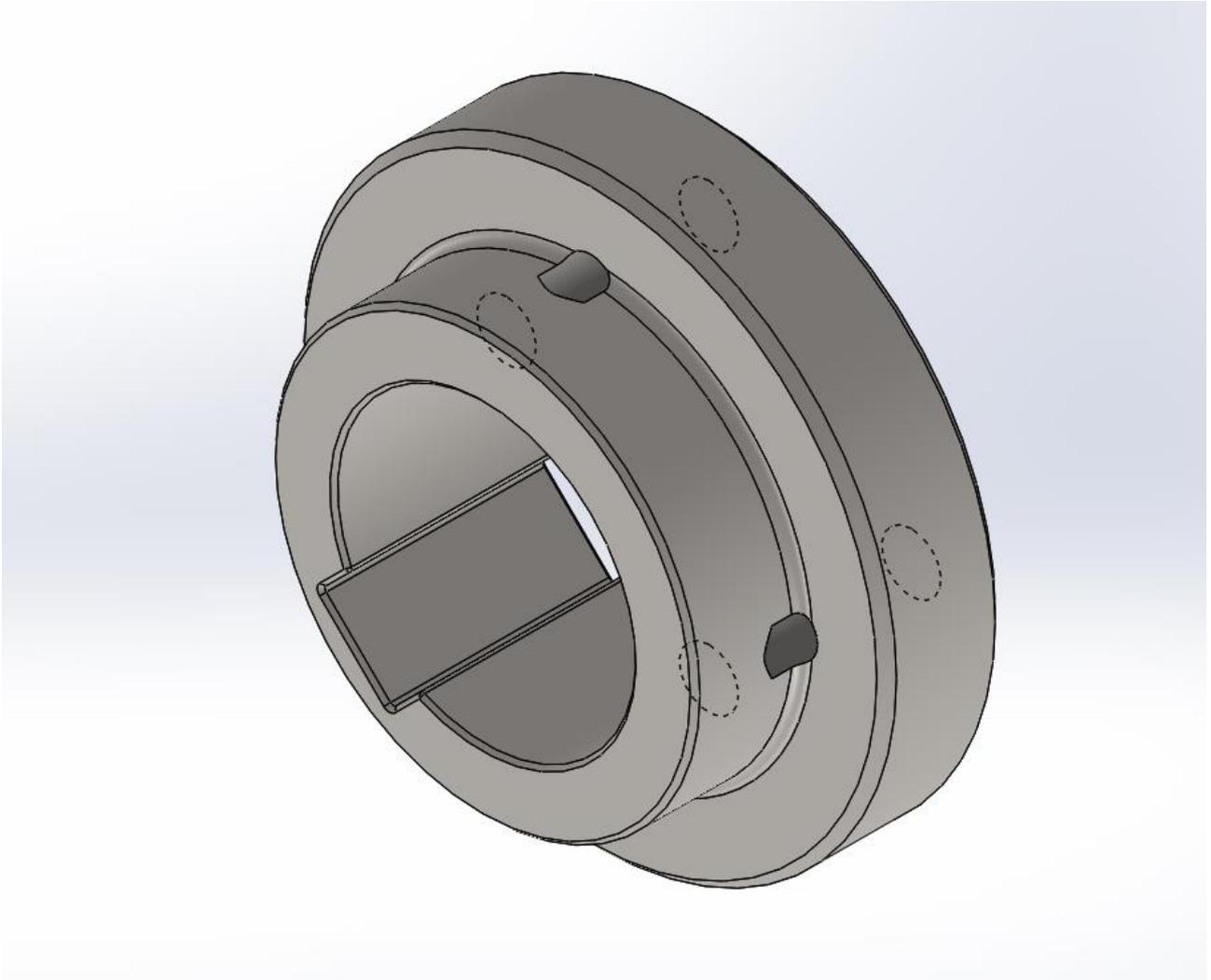


Figura 2.23

La flangia ha la funzione di trasmettere il moto del volano all'albero tramite chiavetta. È stata prevista in quanto il montaggio risultava impraticabile se si fosse pensato l'albero simmetrico. Dunque la presenza di questo componente è figlia solamente delle difficoltà riscontrate durante la progettazione del montaggio del banco.

Le slitte.

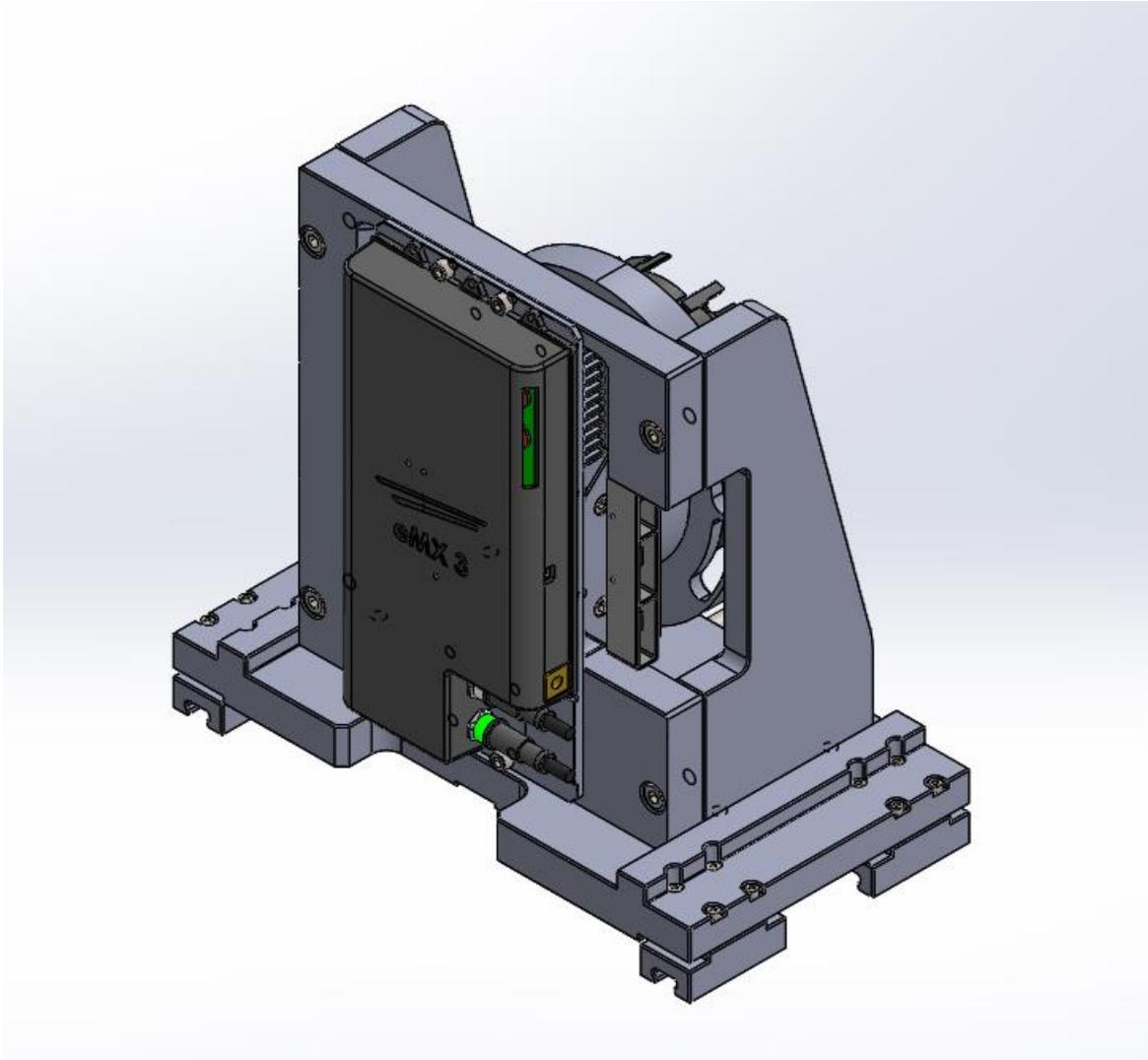


Figura 2.25

Le due slitte presenti sul banco sostengono e accoppiano l'inverter con la parte statorica del motore. Grazie ad esse è possibile disaccoppiare il rotore dallo statore e, come richiesto nel nostro caso, smontare i componenti appena testati e rimontare i successivi, nell'ottica di una linea di produzione continua. Le slitte sono appoggiate su dei pattini che si muovono sulle guide montate sulla piastra principale del banco.

Queste due sono uguali e funzionano allo stesso modo, una delle due però, sarà preposta a sostenere il motore utilizzato come freno rigenerativo e dunque non sarà poi più movimentata durante i test. Per semplicità, verrà utilizzato come freno il motore da 2 kW in modo che possa gestire tutte le tipologie di motore da testare senza essere cambiato.

È importante notare che durante la progettazione del banco si è tenuto presente il fatto che le tipologie e le taglie dei motori testabili fossero due, quindi sono stati previsti dei componenti in modo tale che le slitte risultassero adattabili.

Come si vede subito dal disegno le slitte risultano compatte e bilanciate verso il centro dal momento che dovendo muoversi numerose volte, non avessero criticità o sbilanciamenti.

Come precedentemente fatto con la parte rotoria, verranno analizzati tutti i componenti evidenziandone le criticità e esponendo le soluzioni ingegnerizzate adottate.

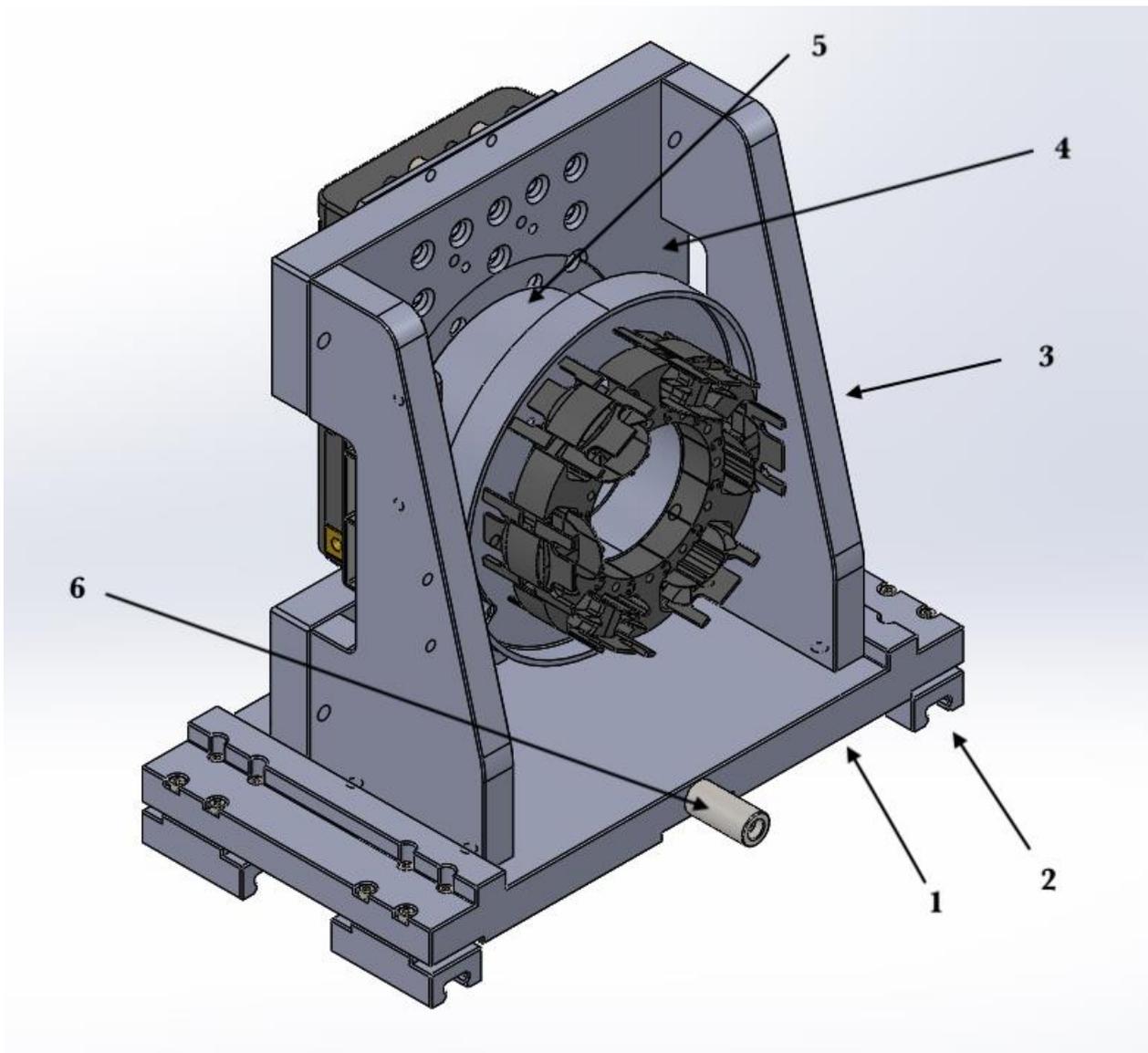


Figura 2.26

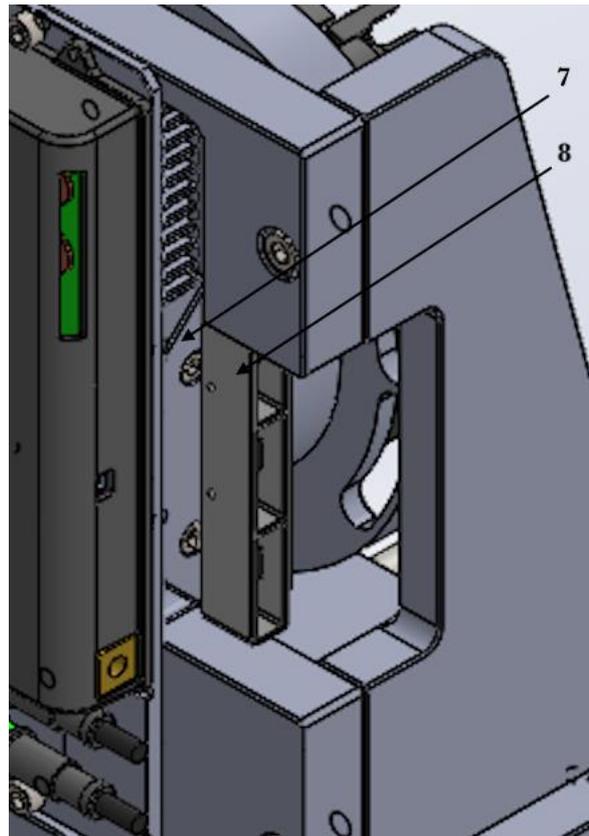


Figura 2.27

Le slitte comprendono i seguenti componenti:

1. Piastra di base
2. Pattini NBS SNC 15 P0 N
3. Piastra verticale
4. Triangoli
5. Distanziale inverter
6. Finecorsa
7. Inserto reggiplastiche
8. Plastiche portacavi

1. Piastra di base

La piastra di base della slitta è un componente fondamentale per il corretto funzionamento del banco e per questo motivo uno dei più complicati. Si interfaccia con un gran numero di parti in quanto deve sostenere sia la struttura portante dello statore e dell'inverter, sia è connessa con il sistema di movimentazione (slitte più guide), sia il sistema di controllo della posizione (madrevite e chiocciola) è montato su di essa.

Essa risulta larga 350 mm, ovvero quanto la piastra del banco. Questa lunghezza è rilevante in quanto l'allineamento delle guide viene eseguito sul bordo di quest'ultima e dunque ne deriva che tutto il sistema deve poi svilupparsi in quel punto.

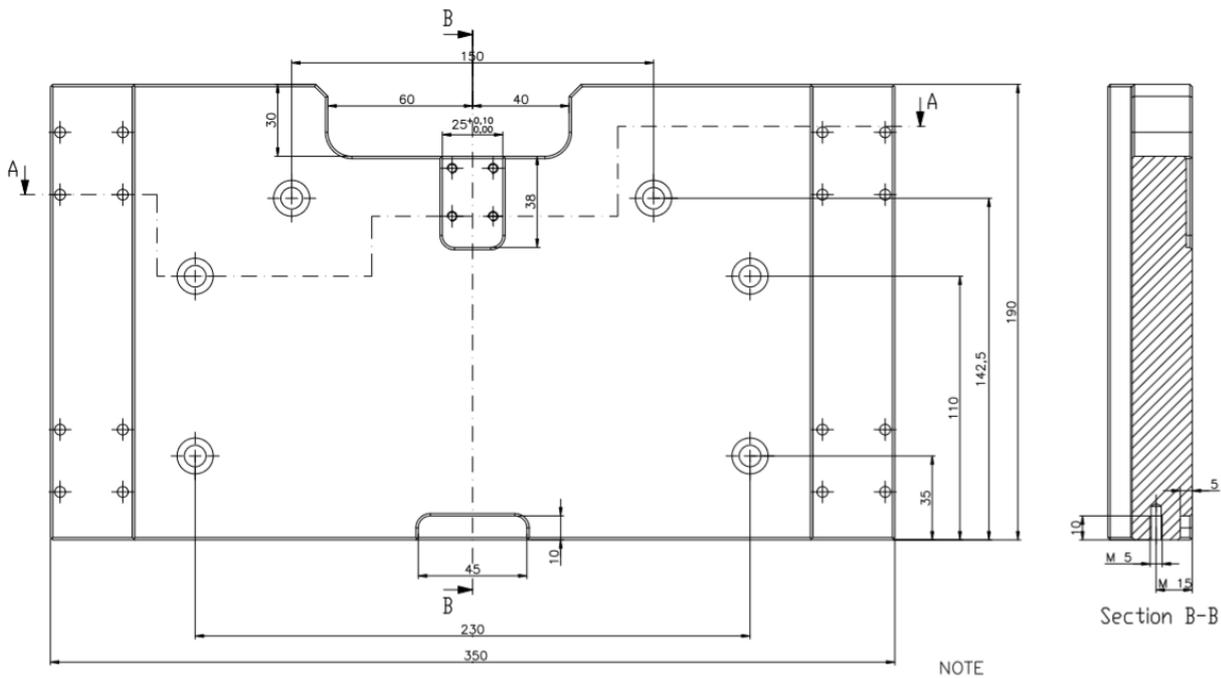


Figura 2.28

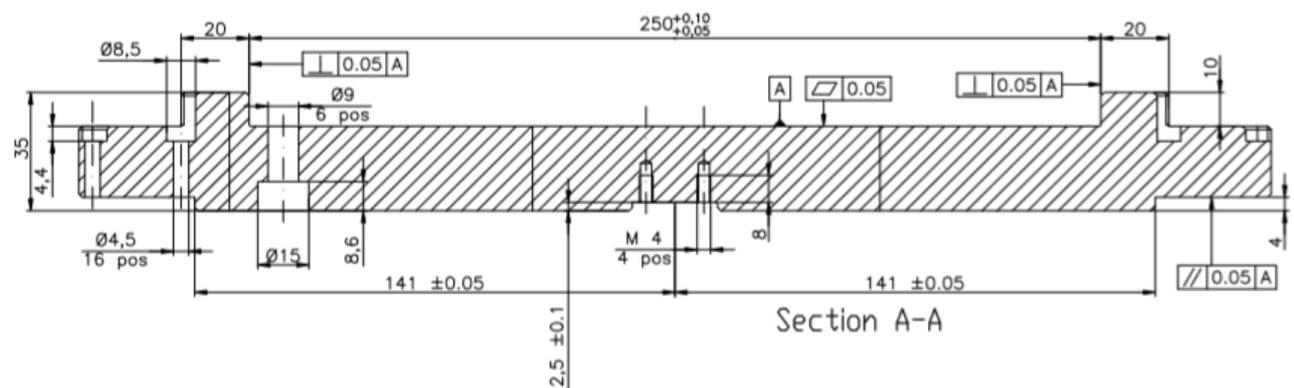


Figura 2.29

Oltre a questo da disegno si possono notare degli scassi. Quello riferito alla superficie orizzontale orientata verso il basso è utile al corretto allineamento dei carrelli, che vengono bloccati con 4 viti M4 mordenti sui carrelli, che possiedono dei bordi per facilitarne l'orientamento e il montaggio, perciò anche essi prima di essere fissati saranno allineati grazie agli spallamenti larghi 141. Questa distanza, essendo legata all'allineamento della struttura presenta una tolleranza di $\pm 0,05$ mm, in maniera tale che lo scorrimento dei carrelli sulle guide non abbia sbilanciamenti e non porti al danneggiamento e all'usura del treno di rotolamento.

Nella parte centrale si notano 6 fori da $\Phi 9$ che, montati dalla parte opposta e lamati, consentiranno il fissaggio della piastra verticale e dei due triangoli.

La piastra va inserita tra i due spallamenti larghi 20 mm e distanti l'uno dall'altro 250 mm. Questi ultimi avendo sia una tolleranza dimensionale sulla distanza reciproca di $+0,05/+0,1$ e una geometrica di perpendicolarità da 0,05, oltre a permettere il posizionamento della spalla, fungono da allineatore per la spalla della slitta. Inoltre la superficie piana localizzata tra questi due bordi ha una tolleranza di planarità da 0,05 mm. In questo modo si riesce ad ottenere un allineamento preciso del componente, che essendo un sostegno fondamentale influisce sul corretto funzionamento della struttura. Infatti anche piccoli errori sulle tolleranze e i montaggi possono influire in maniera pesante sul test dei motori. Perdite per attrito importanti, consumo dei cuscinetti e sforzi tangenziali e assiali sulle parti più sensibili, in quanto non considerate al momento del progetto potrebbero portare dei danneggiamenti al banco ma anche degli errori di misura per le prestazioni e il corretto funzionamento del blocco motore dei giroscopi.

Dai disegni si possono ancora notare degli scassi sulla superficie inferiore uno dei quali presenta 4 fori M4 e una tolleranza dimensionale sulla sua larghezza di $0,00/+0,1$. Queste zone sono necessarie in quanto ospitano una parte del sistema di movimentazione e permettono all'intera struttura di andare a pacchetto con la parte rotoria.

2. Pattini NBS SNC 15 PO N

SNC

Sistemi di guida lineari a ricircolo di sfere - Linear rail system

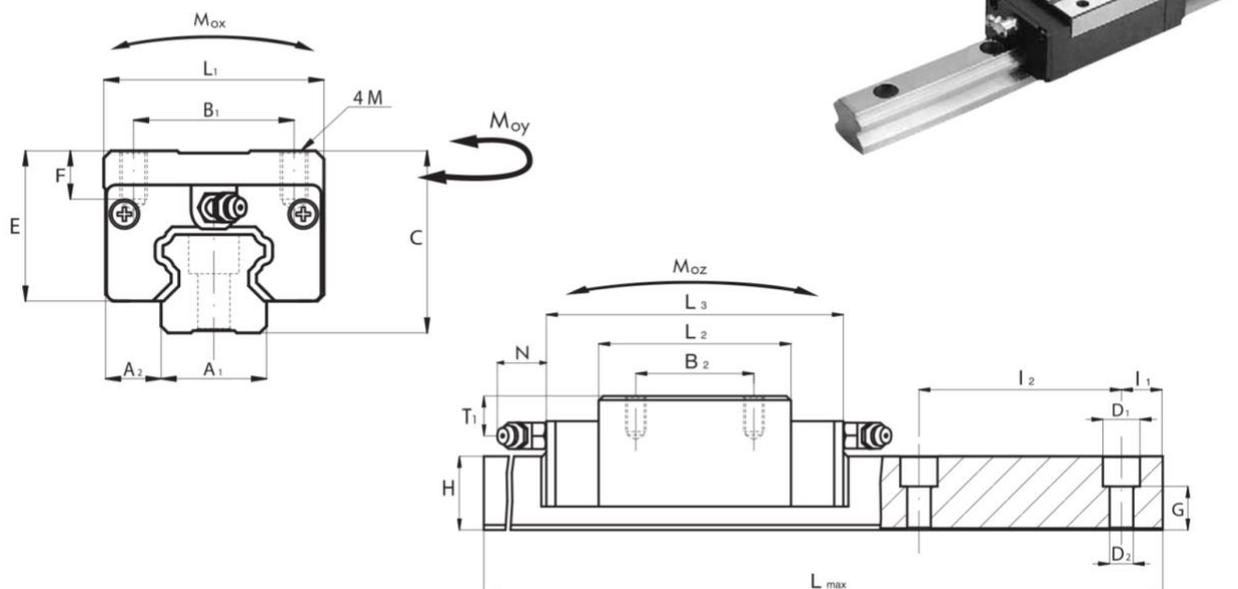


Figura 2.30

I pattini scelti sono pattini a ricircolo di sfere per guide lineari a precisioni elevate. La scelta è ricaduta sul modello SNC 15.

Carrello Block	Dimensioni / Dimensions															
	Guida Rail	Tappo fori guida Rail holes cup	A ₁ [mm]	A ₂ [mm]	B ₁ [mm]	B ₂ [mm]	M [mm]	C [mm]	E [mm]	F [mm]	H [mm]	I ₁ ⁽¹⁾ [mm]	I ₂ [mm]	L ₁ [mm]	L ₂ [mm]	L ₃ [mm]
SNC 15	R15	C15	15	9.5	26	26	M4x6.4	28	23.4	6.4	14	20	60	34	40	66
Carrello Block	Dimensioni / Dimensions									Caratteristiche meccaniche Mechanical characteristics					Peso Weight	
	Guida Rail	Tappo fori guida Rail holes cup	Foro lub. Oil hole. [mm]	T ₁ [mm]	N [mm]	D ₁ [mm]	D ₂ [mm]	G [mm]	L _{max} [mm]	C ₀ [kN]	C [kN]	M _{0x} [Nxm]	M _{0y} [Nxm]	M _{0z} [Nxm]	Pattino Block [kg]	Rotaia Rail [kg/m]
SNC 15	R15	C15	ø3	8.3	5.3	7.5	4.5	8.7	4000	12.7	6.85	70	50	50	0.21	1.4

Figura 2.31

Sono presenti 4 pattini per slitta, dunque il sistema è sovradimensionato, ma sono necessari per ottenere un allineamento preciso e dei movimenti del banco fluidi. Si può notare come, durante il montaggio, sono facilmente allineabili grazie a 4 contatti angolari. Inoltre il fornitore garantisce elevate rigidzze che sommate al numero dei pattini e al peso contenuto delle slitte permettono di evitare sfarfallamenti e sbilanciamenti di sforzi.

3. Piastra verticale o spalla

La piastra verticale funge da montante, sostiene e si comporta da raccordo tra lo statore e l'inverter. Essa è stata progettata per il montaggio e il funzionamento di tutte e due le taglie dei motori presi in considerazione tramite alcuni semplici accorgimenti. Un altro accorgimento per il funzionamento e la progettazione di questa parte è che dovesse ricreare in maniera più vicina alla realtà non solo il funzionamento e l'accoppiamento del motore e dell'inverter, ma anche il loro posizionamento (differente nei due differenti motori).

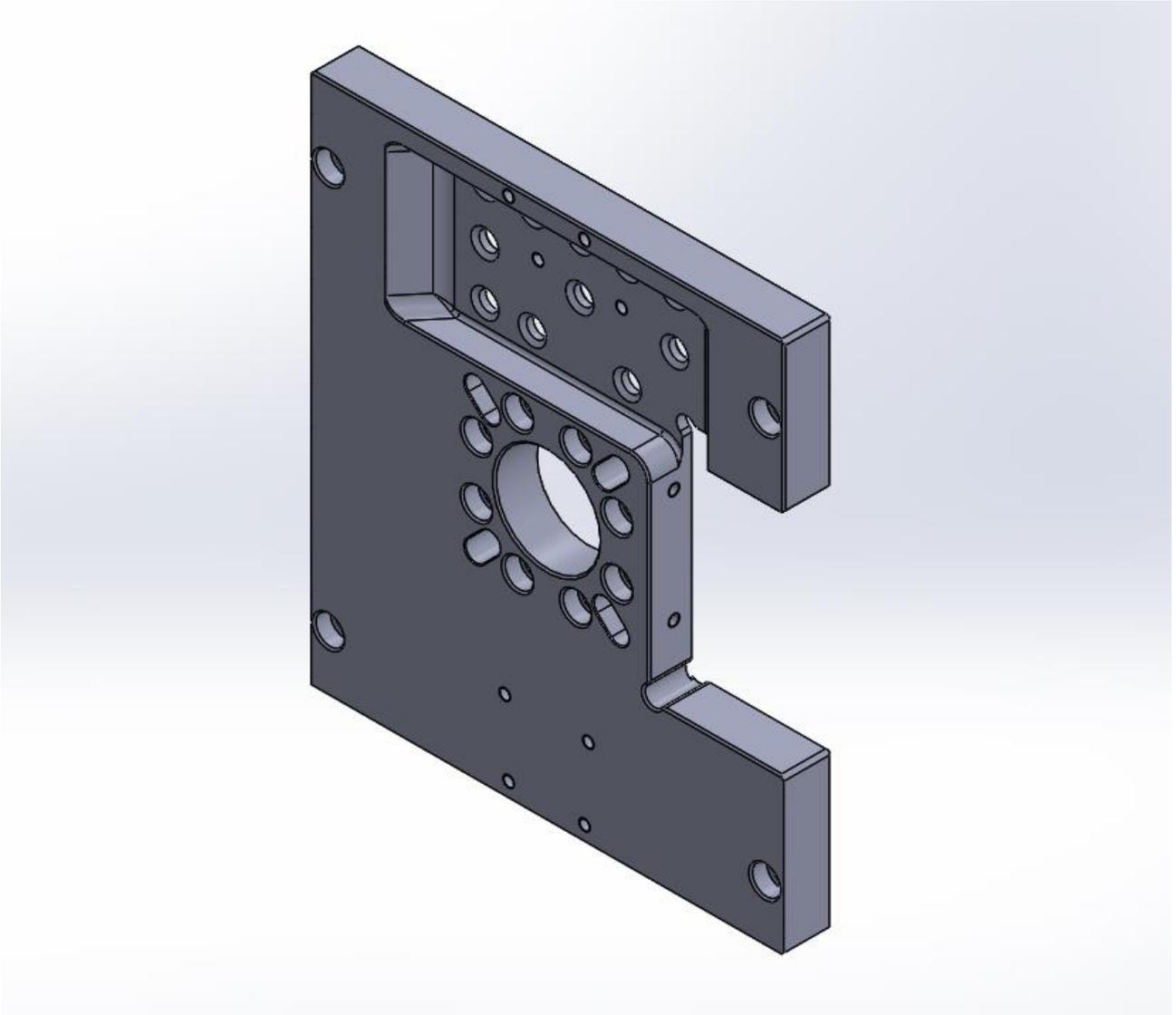


Figura 2.32

Si possono subito notare gli otto fori paralleli per il fissaggio del dissipatore metallico dell'inverte e lo scasso centrale pensato come sede delle alette. Dal momento che le taglie degli inverter sono differenti, per il montaggio di quello da 1 kW è richiesto l'utilizzo di due distanziali sui fori della parte alta per poter dare al dissipatore una battuta corretta. Inoltre il foro centrale, utilizzato sia per poter connettere l'encoder presente sull'inverter al magnete del rotore, in modo da leggere l'angolo meccanico, sia come guida per le flange è stato adattato per tutti e due i motori in maniera uguale. Un'altra parte necessaria al montaggio di entrambi gli inverter sono i fori asolati da R 5,5 mm e lunghi 10 mm a 45° rispetto alla verticale, previsti dal momento che le due flange dei rotori avevano interassi differenti. Infatti, come

verrà spiegato in seguito durante il montaggio fungeranno da sede per le teste viti che dovranno fissare lo statore alla slitta e verrà fatto dalla parte dove verrà posizionato l'inverter.

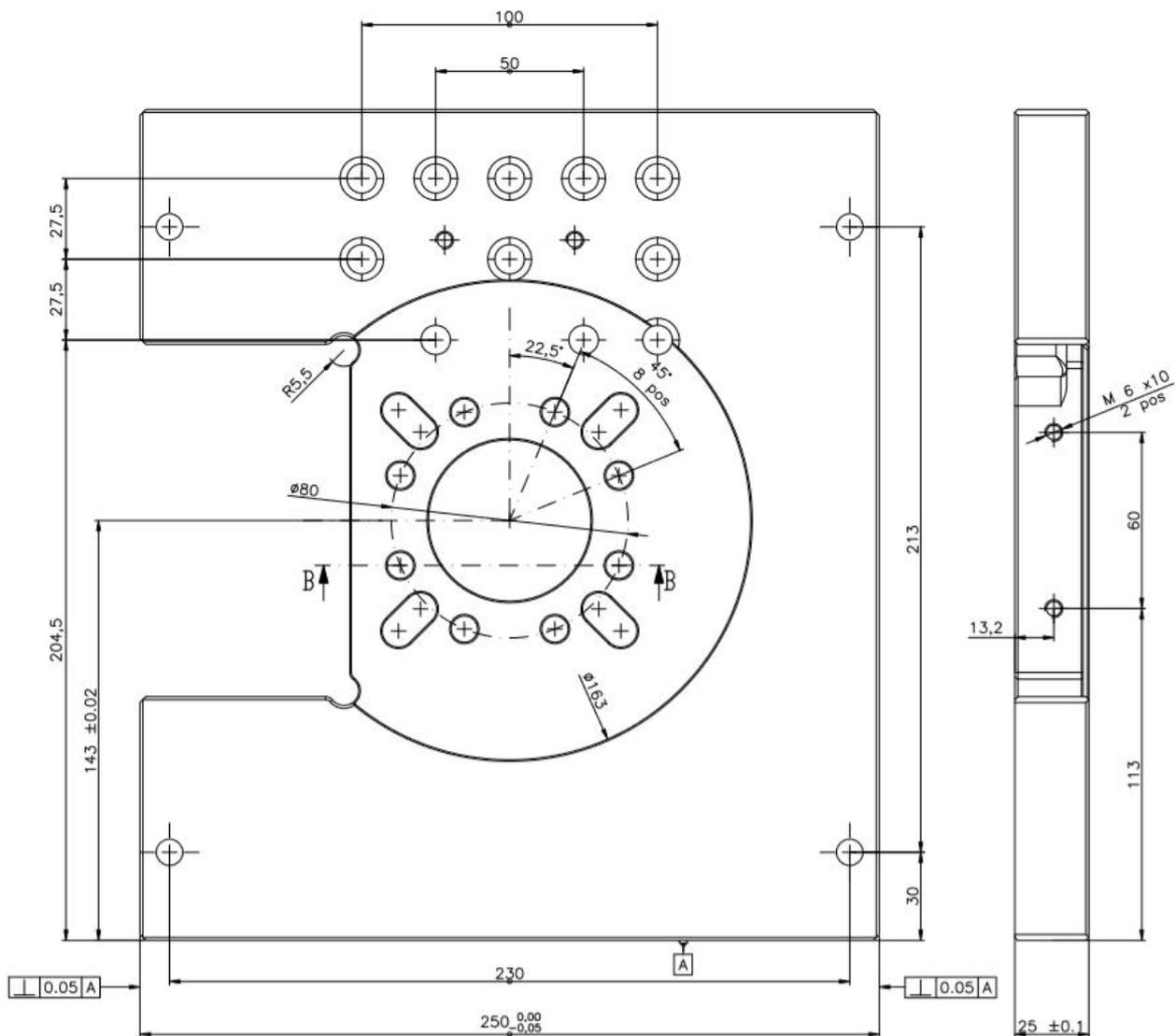


Figura 2.33

Dalla tavola precedente si vede la vista che verrà utilizzata come interfaccia per la flangia e poi per lo statore. Partendo dal basso si nota subito come la forma e le dimensioni del rettangolo di involuppo del componente sia molto preciso. La larghezza ha uno scostamento di $0,00/-0,05$ mm su 250 mm e le pareti verticali sono controllate tramite una tolleranza geometrica di perpendicolarità di 0,05 mm rispetto al riferimento A, posizionato sul piano di interfaccia con la base della slitta. Questo è necessario in quanto l'allineamento trasversale è dato dall'accoppiamento della spalla sulla piastra orizzontale della slitta.

Risalendo si vede uno scasso sulla sinistra della piastra da 120 mm. Questa zona è la zona in cui alloggiavano i raccordi delle linee elettriche di potenza del motore. Si notano infatti i due fori che saranno necessari per il montaggio delle plastiche di collegamento. La posizione dello scasso è ad un'altezza di 83 mm, ma non è necessario sia precisa, quindi saranno sufficienti le tolleranze minime da disegno,

ma la posizione dei fori M6 da 10 mm è importante sia 13,2 mm dal momento che la distanza del sostegno per i cavi dipende da quei fori.

La circonferenza centrale e uno scasso circolare di 2 mm che ha funzione di guida per la flangia su cui si innesta il rotore. Anche questa è una zona importante per l'accoppiamento in quanto la sua faccia verticale va a coincidere con quella della flangia, per questo motivo si è deciso di dargli una tolleranza geometrica di perpendicolarità di 0,05 mm rispetto al riferimento A.

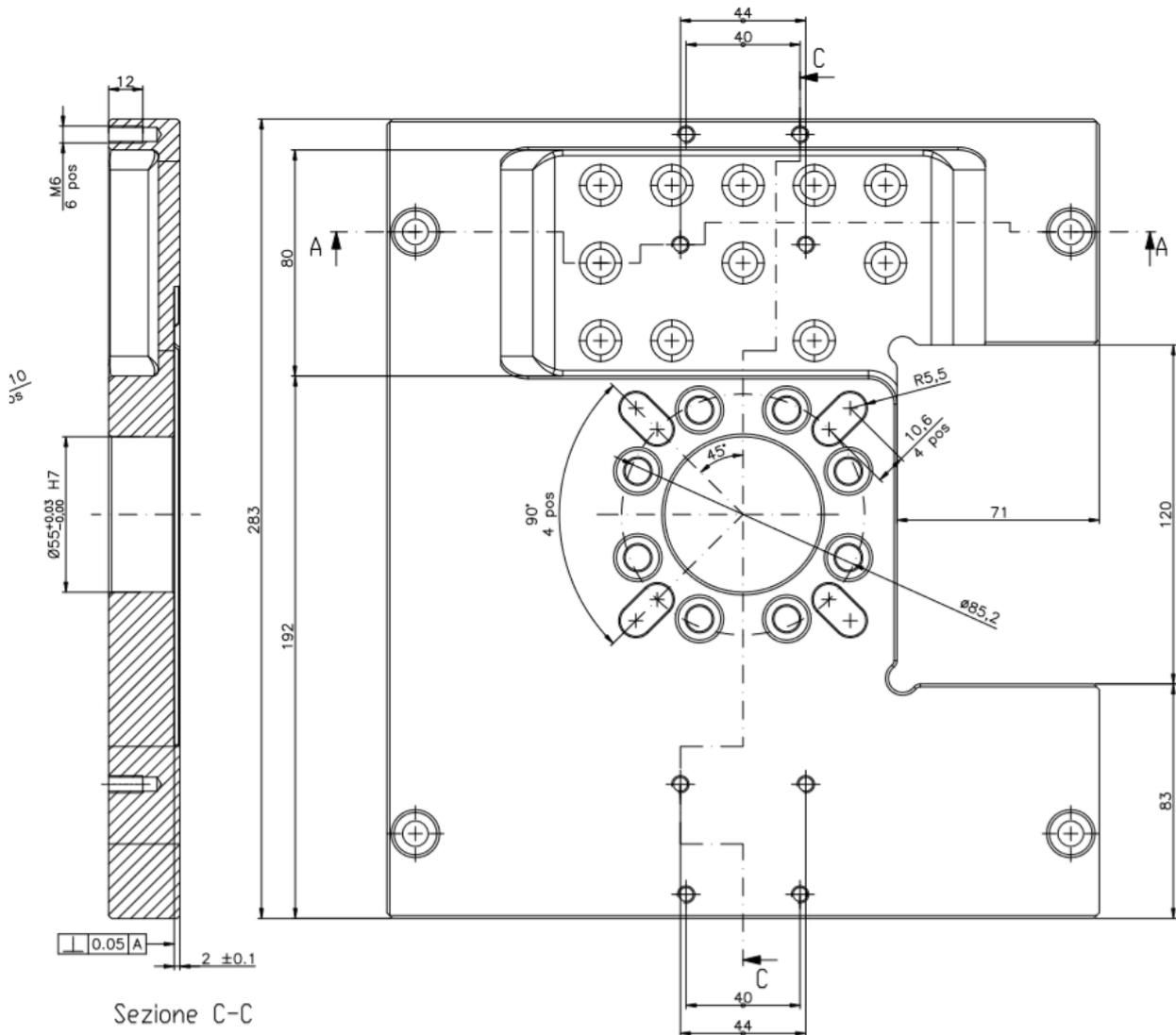


Figura 2.34

Il centro della circonferenza è lo stesso sia per lo scasso circolare sia per il foro passante da $\Phi 55$, ed essendo anch'esso un riferimento geometrico per la centratura sull'asse dell'albero e dei rotori si può notare da disegno che gli è stata data una tolleranza dimensionale molto precisa considerando un intervallo di $\pm 0,02$ mm sulla distanza di 143 mm rispetto al piano A.

All'interno della guida circolare profonda 2 mm sono posizionati 8 fori lamati sulla superficie opposta da $\Phi 5,5$ su una circonferenza da $\Phi 80$ posizionati a 45° l'uno dall'altro e a $22,5^\circ$ dalla perpendicolare. La loro funzione è quella di sorreggere i distanziali su cui verranno montati gli statori dei giroscopi. Sono stati pensati lamati in quanto dovranno essere a scomparsa, dal momento che il dissipatore dell'inverter andrà a battuta contro la superficie della piastra.

A 192 mm rispetto al riferimento ha è presente uno scasso rispetto alla superficie piana profondo? mm con 11 fori da $\Phi 5,5$ mm inoltre le pareti perpendicolari al riferimento A sono svasate. Questa zona è stata pensata per ospitare il dissipatore dell'inverter e di creare dei vortici d'aria in modo tale che sia dissipato più calore possibile. Le pareti laterali sono svasate per aiutare il ricircolo dell'aria attraverso le alette, parallele al riferimento A.

Lateralmente i fori fissano i triangoli di sostegno, in maniera tale che la piastra non sia completamente a sbalzo, ma che gli sforzi vengano scaricati lungo i triangoli e si distribuiscano in maniera più uniforme sulla base della slitta e non solamente sui 6 fori di fissaggio della spalla.

Infine, è necessario sottolineare con attenzione la realizzazione del foro centrale da $\Phi 55$, poiché ha una funzione fondamentale nel centraggio degli statori con i rotori e dunque i volani. Il foro funge da guida per una estrusione cilindrica presente sui distanziali degli statori. Il foro ha una tolleranza di H7 (0,00/+0,03), dunque molto preciso in modo tale che venga realizzato un centraggio preciso, ma che non ci sia interferenza in quanto le flange distanziali devono essere facilmente e rapidamente smontate.

4. Triangoli

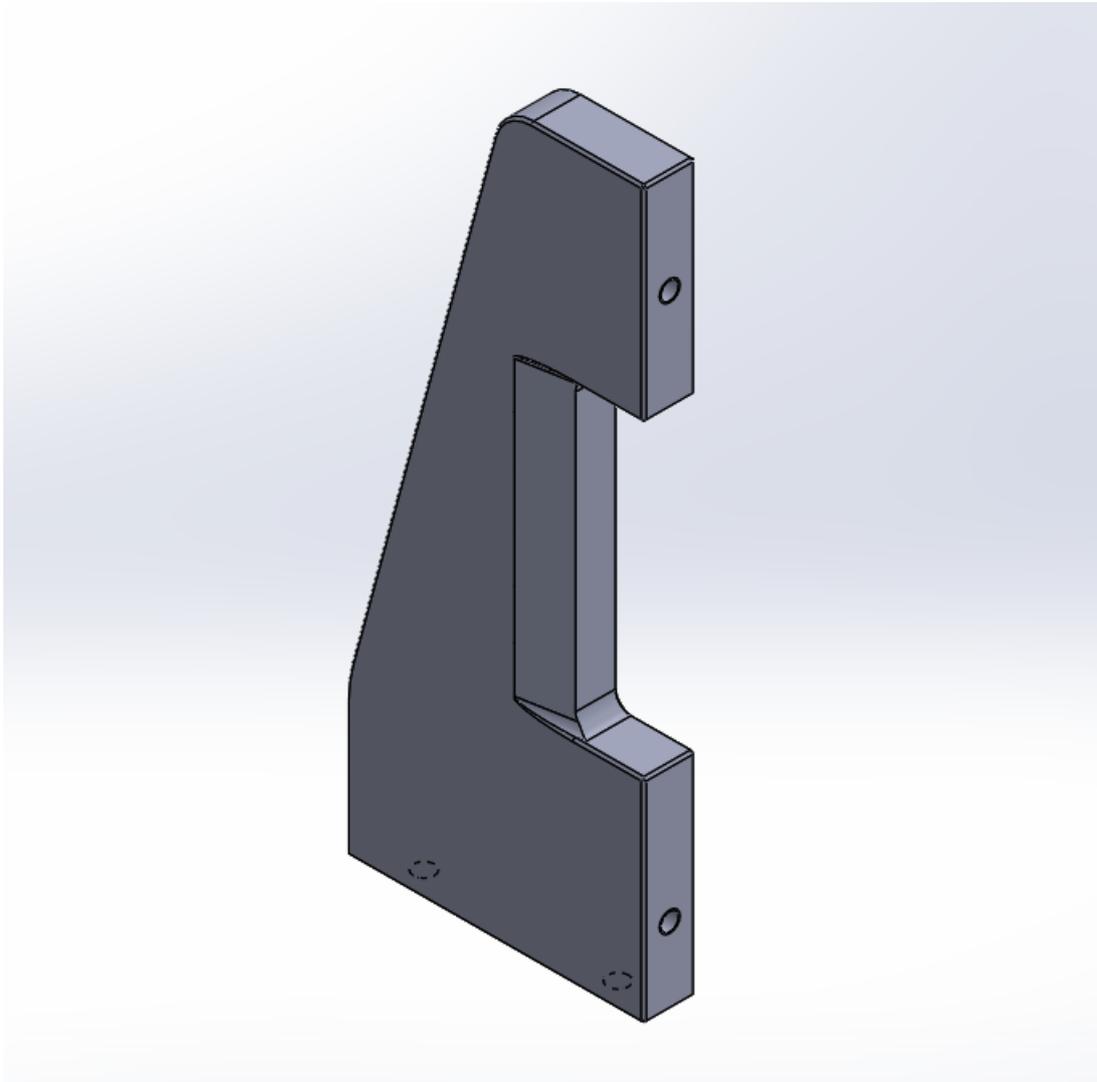


Figura 2.35

I 2 triangoli presenti su ogni slitta hanno funzione di supportare e equilibrare la struttura della slitta. Durante la fase di progettazione si è molto dibattuto sul fatto che la loro presenza fosse o no utile, ma dal momento che si è scelto di non fare la piastra verticale particolarmente spessa, ma di rimanere su uno spessore di 25 mm è stata scelta questa via. I vantaggi sono stati notevoli, in quanto la piastra verticale avrebbe richiesto uno spessore decisamente maggiore e dunque un peso e un costo decisamente più rilevante. Inoltre la distribuzione del peso anche sui due triangoli rende la struttura più robusta e compatta. Oltretutto la presenza di una piastra a sbalzo sostenente un peso rilevante sarebbe anche andata a incidere e squilibrare gli allineamenti.

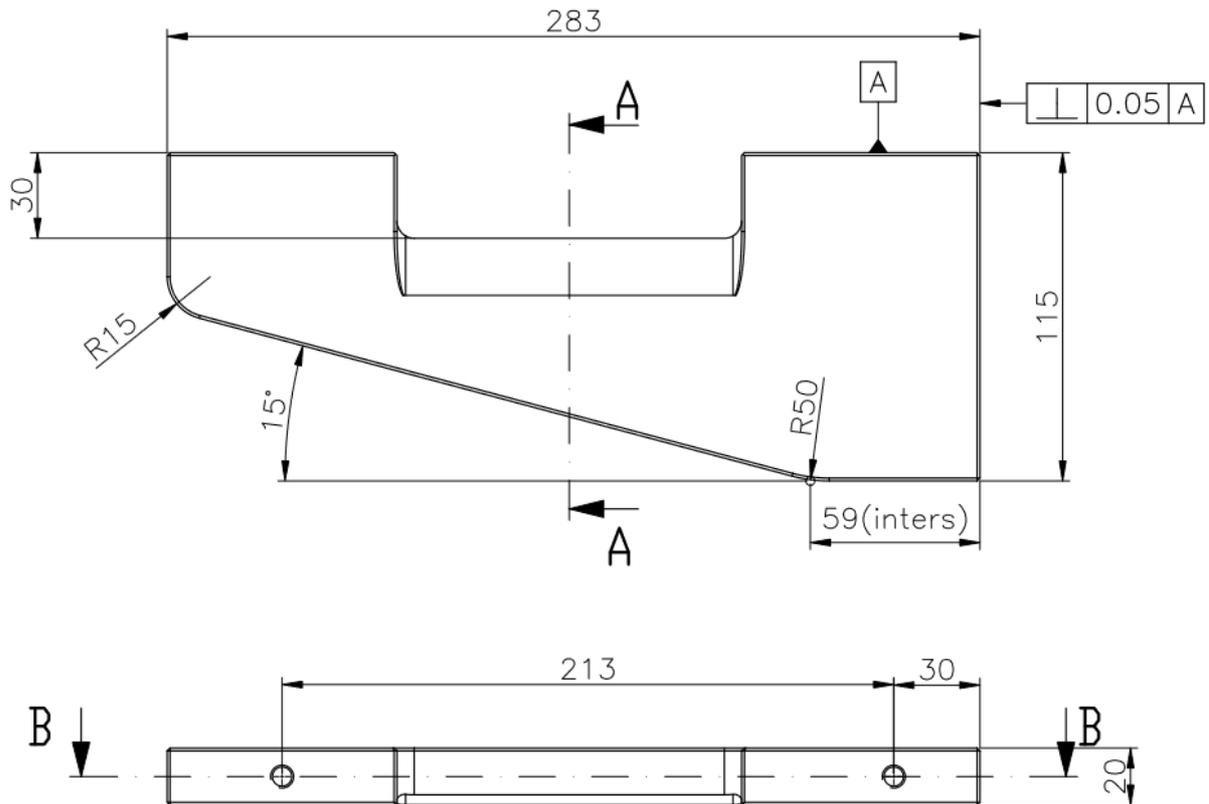


Figura 2.36

I triangoli sono alti 283 mm, come la piastra verticale e hanno uno spessore di 20 mm. Essi presentano uno scasso laterale svasato che è stato pensato per creare, assieme allo scasso sulla piastra un volume libero in cui fosse possibile collegare e stringere gli allacciamenti tra motore e inverter montandoli sulle plastiche previste.

Inoltre l'unica parte interessata per un collegamento preciso è la base in quanto deve rendere il componente perpendicolare rispetto alla piastra della slitta e dunque è stata data una tolleranza geometrica di perpendicolarità di 0,05 mm rispetto al riferimento A.

5. Distanziale inverter

Per poter utilizzare la stessa struttura della slitta per tutti e due le tipologie dei motori è stata progettata una flangia di connessione tra l'inverter e lo statore diversa per ognuno. Dunque saranno presenti sia il distanziale inverter grande che il distanziale inverter piccolo in modo tale da simulare le distanze e i montaggi diversi nei due motori.

- Distanziale inverter piccolo

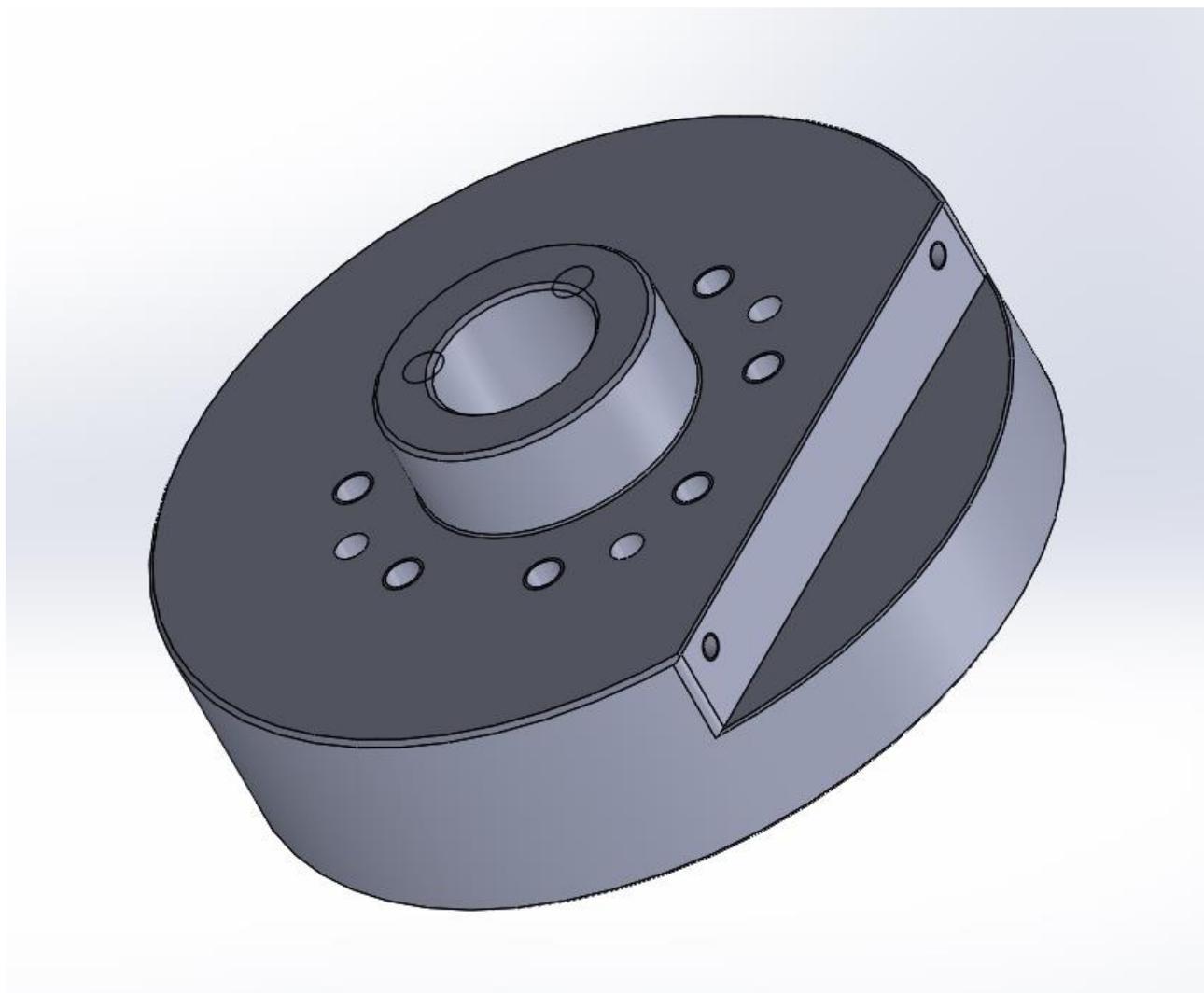


Figura 2.37

Il distanziale inverter piccolo è, come spiegato precedentemente una flangia di interfaccia tra il rotore e la piastra verticale su cui viene montato l'inverter. Durante la sua progettazione sono state tenute in considerazione 3 criticità fondamentali nella costruzione del banco. Infatti, deve consentire un corretto centraggio tra il rotore e l'albero, in secondo luogo deve permettere la corretta distanza, come nella macchina montata, tra il motore e l'inverter, in quanto i cavi di raccordo hanno una lunghezza ben precisa e infine deve consentire il montaggio delle plastiche per il cablaggio e il collegamento tra motore e inverter. Tenendo a mente questi requisiti è stato disegnato il pezzo in questa maniera.

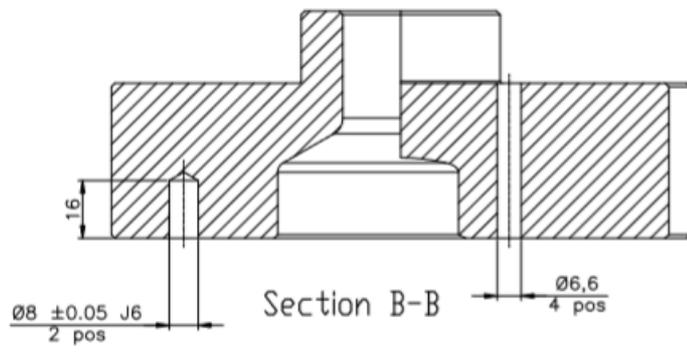
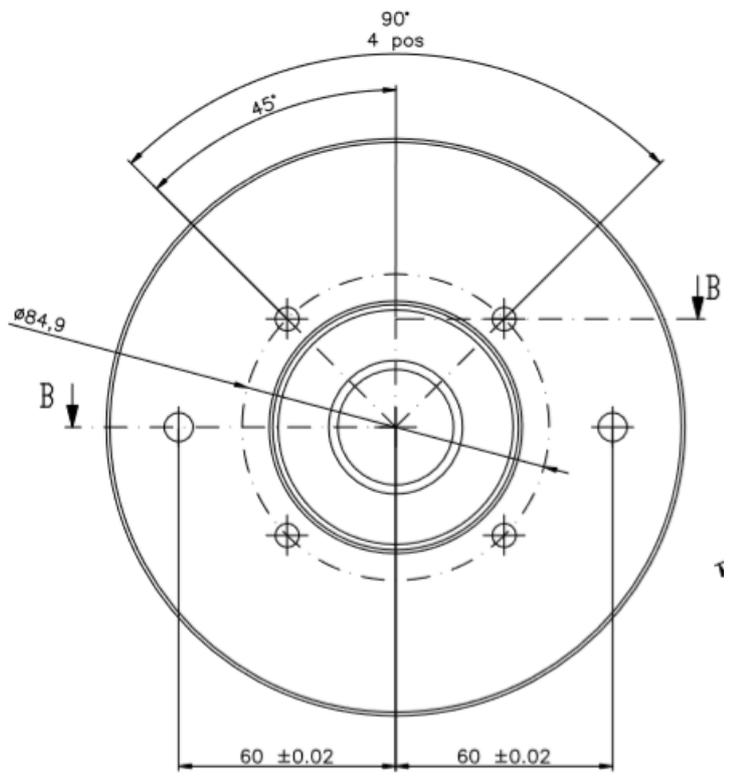


Figura 2.38

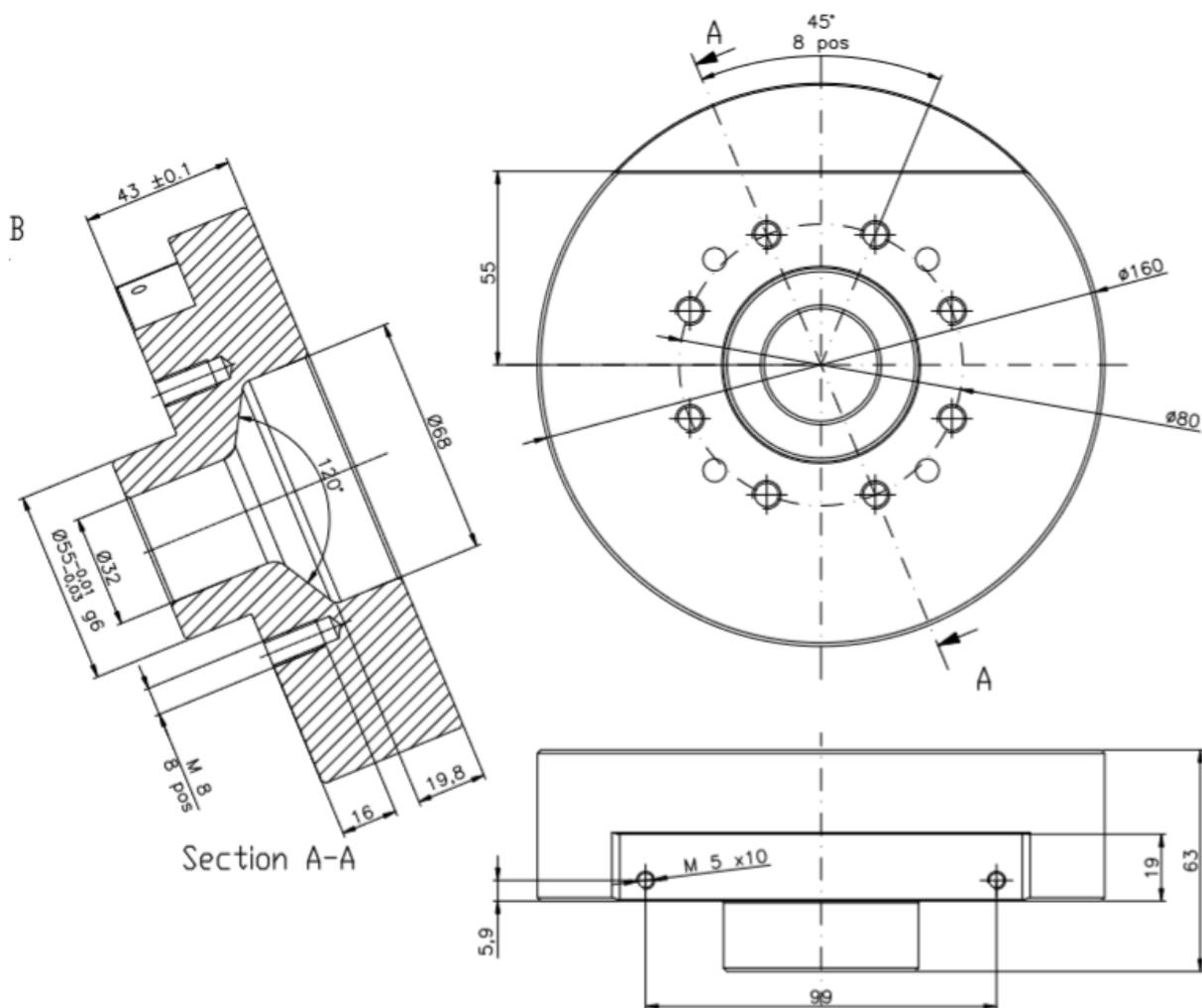


Figura 2.39

La flangia ha uno spessore totale di 63 mm e la parte cilindrica più ampia ha un diametro di $\Phi 160$ e uno spessore di 43 mm. Da essa viene estruso un cilindro di 20 mm di altezza e diametro da $\Phi 55$. Questa parte del pezzo è la parte di collegamento con la piastra verticale della slitta e si inserisce nel foro centrale di quest'ultima fungendo da guida per il montaggio della flangia e il suo allineamento che avverrà grazie ad un accoppiamento H7-g6 su un diametro di da $\Phi 55$ e una lunghezza di 20 mm. Una volta inserita, la flangia viene bloccata tramite 8 fori filettati M8 da 16 mm posizionati su una circonferenza di $\Phi 80$ a 45° l'uno dall'altro partendo da $22,5^\circ$ rispetto alla verticale. Sempre nella figura si può notare uno scasso piano da 19 mm con due fori M5 da 10 mm con un interasse di 99. Questa zona è resa necessaria per il montaggio delle plastiche per il collegamento, che verranno montate grazie a questi fori.

Inoltre all'interno la flangia risulta essere forata con un diametro da $\Phi 68$ mm che dopo 19,8 mm si stringe con un angolo di 120° in un foro da $\Phi 32$ mm. Questo foro consente il passaggio del supporto del magnete dell'encoder, montato su un albero da $\Phi 28$ mm, e, con la sua forma, ne facilita il montaggio.

Sulla superficie opposta, come mostrato in figura, si trovano su una circonferenza da $\Phi 84,9$ 4 fori passanti da $\Phi 6,6$ che corrispondono ai fori filettati M6 della flangia che sostiene lo statore. Le viti verranno inserite dalla piastra verticale e stringeranno a pacchetto i tre componenti. Per il posizionamento corretto, la flangia dello statore presenta due spine, che verranno utilizzate anche per

centrarla rispetto al banco. Dunque nel componente, sulla stessa superficie dei fori M6 saranno presenti dei fori per spine da $\Phi 8 \pm 0,05$ con un accoppiamento J6. Sono posizionati ad altezza del centro ad una distanza da esso di $60 \pm 0,02$ in maniera tale che siano precise ed entrino senza difficoltà.

- Distanziale inverter grande

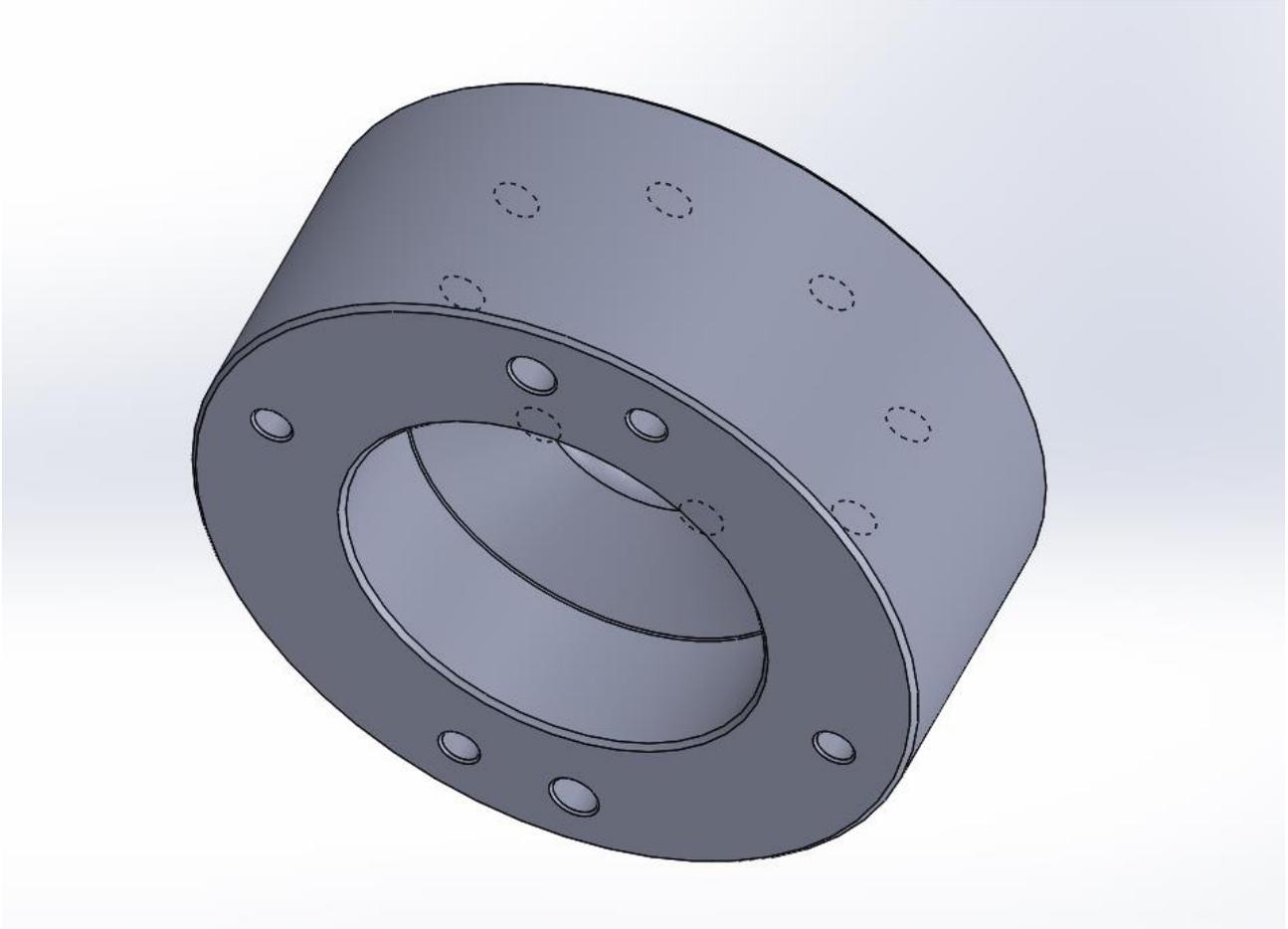


Figura 2.40

Stesse considerazioni sono state fatte per le due flange degli statori, ma in questo caso, essendo il motore più potente e avendo una sezione utile differente (20 mm) le distanze saranno diverse. Infatti i montanti atti a sorreggere l'albero nella macchina reale saranno decisamente più spessi, 76 mm contro 54 mm. Inoltre i fori e le spine delle flange su cui vengono fissati i rotori sono in una posizione diversa rispetto a quella del motore piccolo.

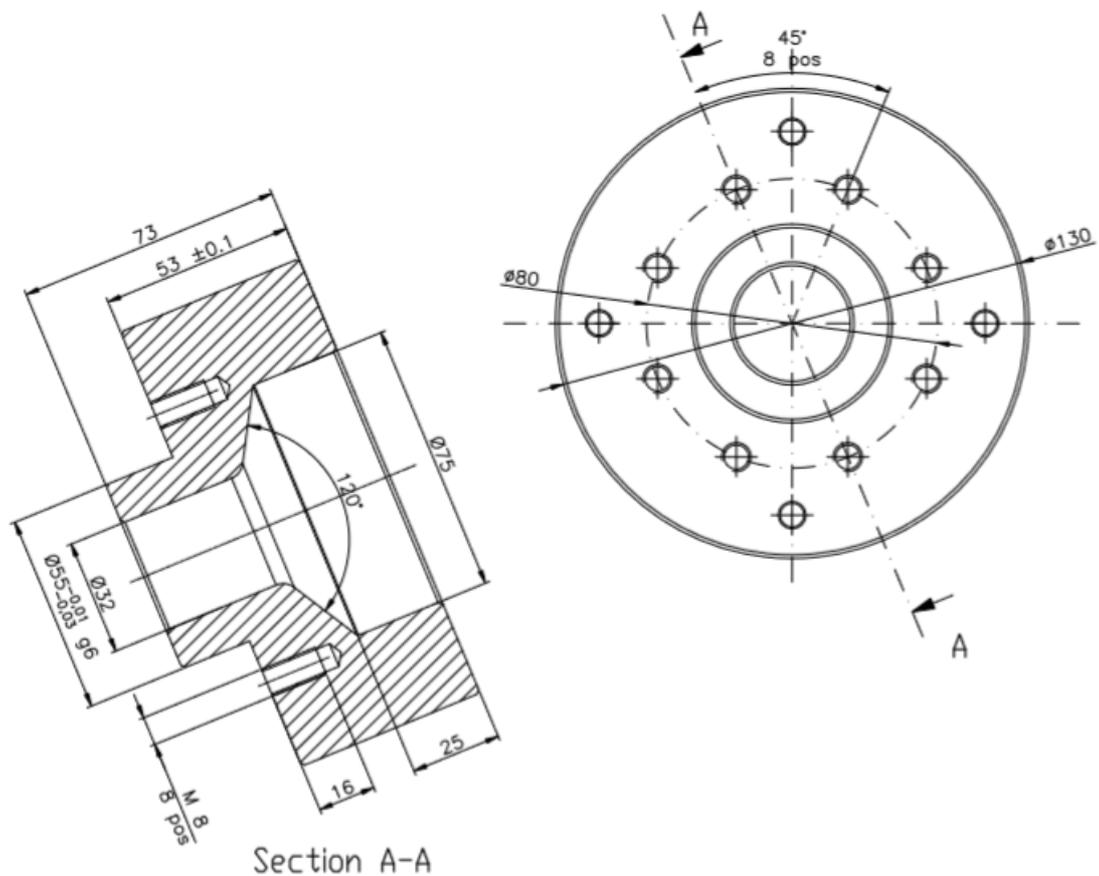


Figura 2.41

Il pezzo ha uno spessore complessivo di 73 mm e la parte cilindrica più larga ha un diametro di 130 mm e un'altezza di $53 \pm 0,1$. Anche in questo caso, queste dimensioni sono utili a simulare le dimensioni delle spalle della macchina e le posizioni dei cavi e dei fori. La parte cilindrica di $\Phi 55$ mm, come nella flangia precedente, è lunga 20 mm e ha un accoppiamento H7-g6 con il foro centrale della piastra verticale e serve per l'allineamento.

Sulla superficie che viene accoppiata alla piastra sono presenti 8 fori M8 da 16 mm posizionati lungo una circonferenza di $\Phi 80$ a 45° gradi l'uno dall'altro e a $22,5^\circ$ dalla verticale. Questi fori sosterranno la flangia e eviteranno movimenti o sbilanciamenti.

Sul pezzo è stata richiesta una foratura all'interno da $\Phi 75$ mm profonda 25 mm che degrada in una da $\Phi 32$ passante con un angolo di 120° .

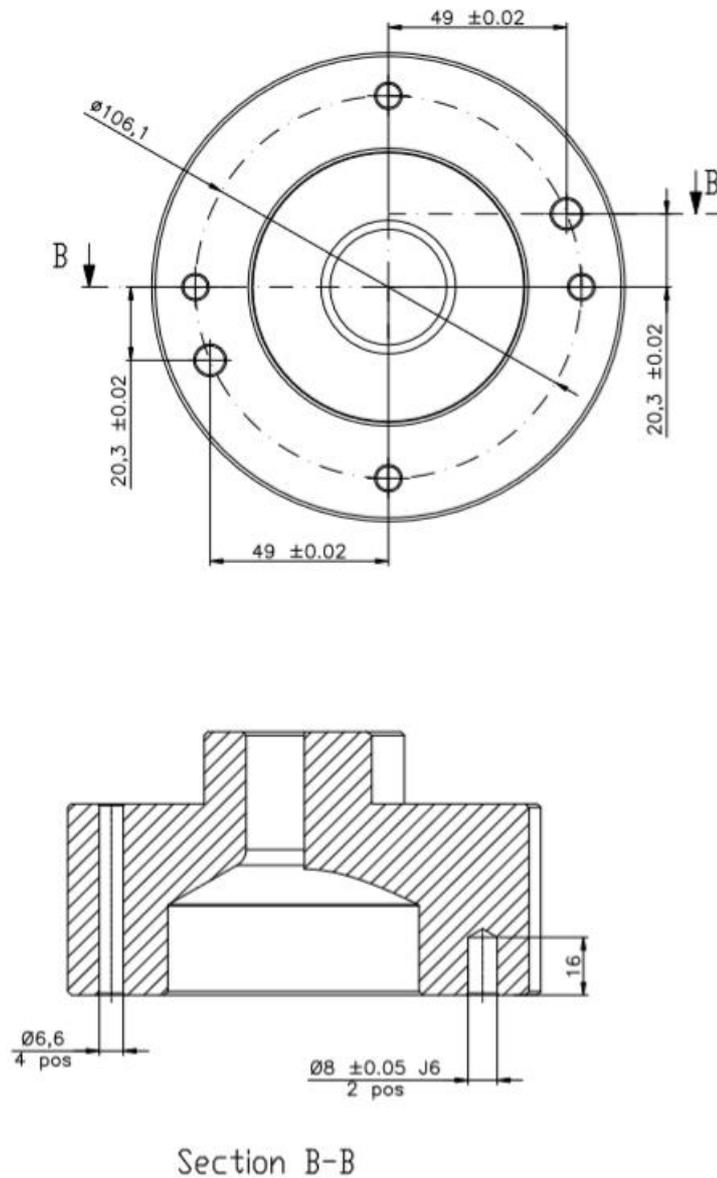


Figura 2.42

Sull'altra superficie, quella di interfaccia con la flangia dello statore, sono presenti 4 fori centrati $\Phi 6,6$ mm passanti posizionati su una circonferenza da $\Phi 106,1$ mm che servono a bloccare la flangia del rotore e tengono a pacchetto i tre componenti. Oltre a questi fori la flangia presenta due spine a una distanza di $49 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$ dall'asse verticale e $20,3 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$ dall'asse orizzontale. I due fori da $\Phi 8$ da 16 mm si presentano opposti e speculari rispetto al centro. La loro tolleranza di accoppiamento è J6 con tolleranza dimensionale $\pm 0,05$.

6. Finecorsa

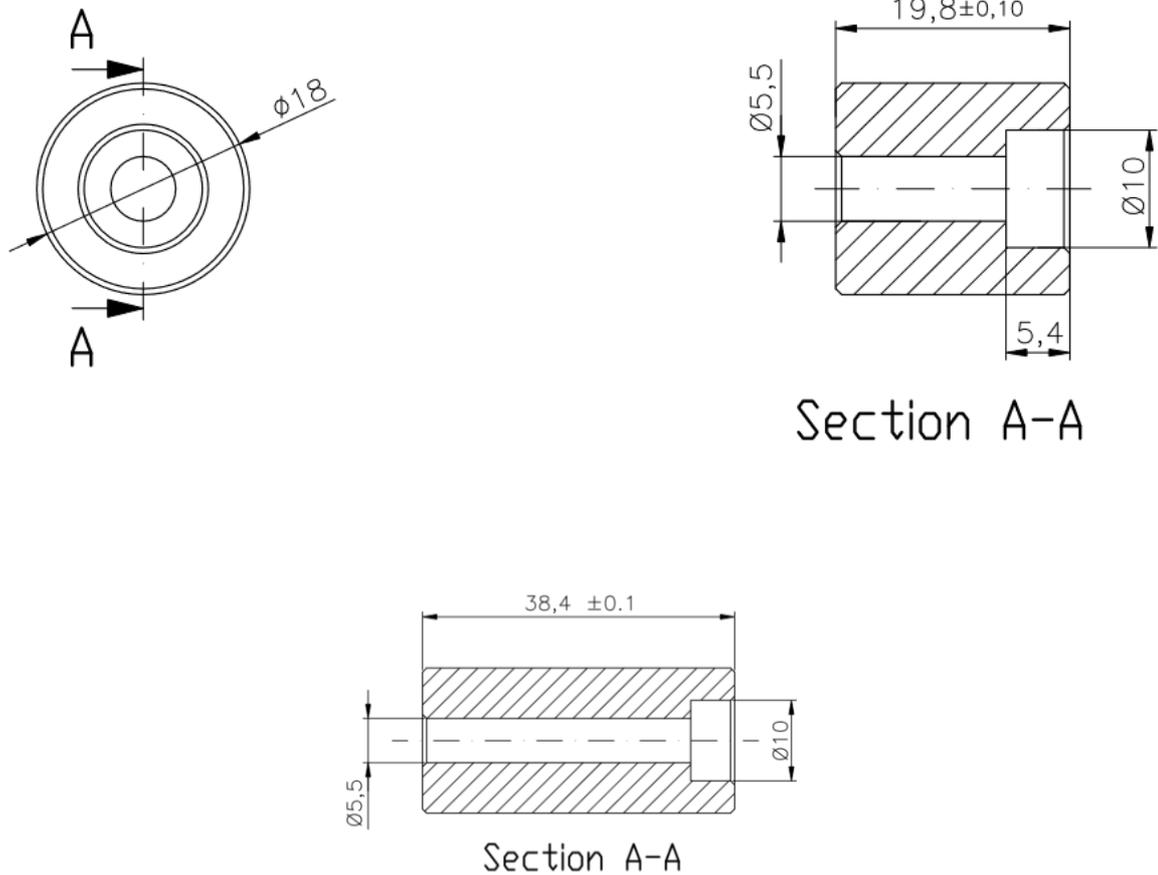


Figura 2.43

Questo componente presente in 2 dimensioni, da 34,4 mm e da 19,8 mm viene montato in testa alla slitta e non permette allo statore di andare verso il volano una volta raggiunta la posizione di funzionamento. È stata decisa una tolleranza dimensionale di $\pm 0,1$. Come verrà poi spiegato in seguito, un altro blocchetto fermerà la slitta durante la prova quindi si avrà un bloccaggio in tutte e due le direzioni.

7. Inserto reggiplastiche

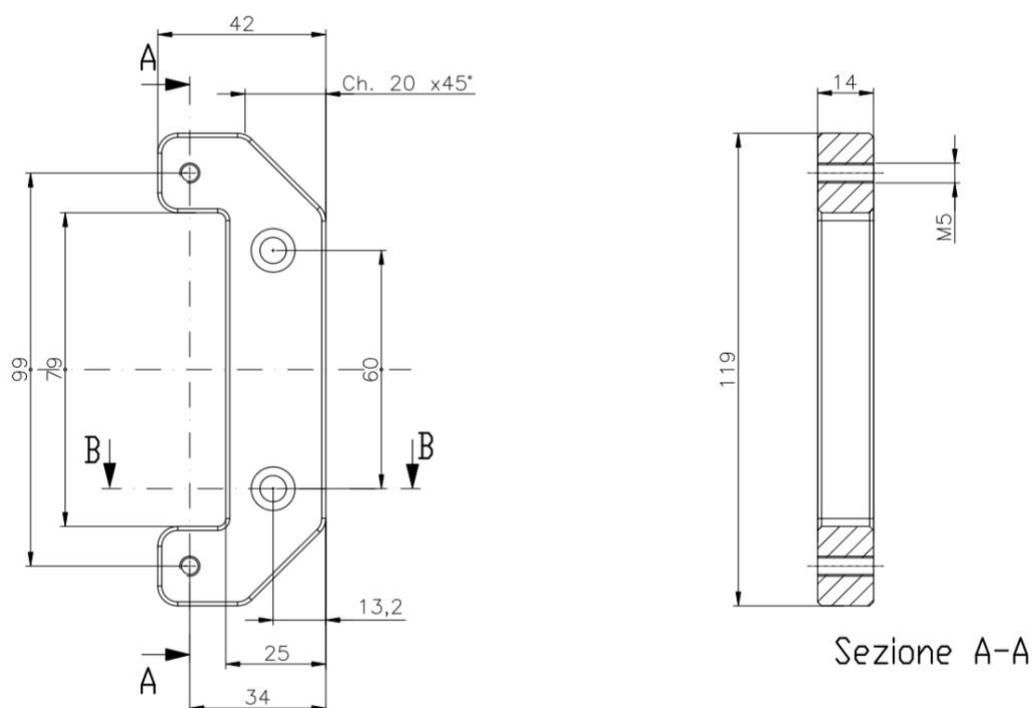


Figura 2.44

Nel montaggio della slitta con la configurazione atta a ospitare l'inverter da 2 kW, la posizione della plastica di raccordo non cade sul lato della piastra come nell'inverter da 1 kW, quindi è stato inserito un inserto a C che viene stretto da 2 viti M5 da mm con interasse 99 mm. Questo inserto presenta 2 fori filettati alle estremità dei bracci che garantiscono lo stesso posizionamento, a 42 mm, che si ha sulla macchina anche sul banco.

8. Plastiche portacavi

Questo inserto in plastica viene avvitato tramite 2 viti M5 sulla spalla della macchina e, nel caso del banco, nelle relative posizioni prima indicate. La plastica contiene 3 cave che ospitano ognuna un blocchetto di ottone con due fori M5 su cui vengono avvitati i due cavi di ognuna delle 3 fasi di avvolgimento dello statore. Dalla scheda di potenza dell'inverter partono 3 cavi, uno per ogni fase che si avvitano sui blocchetti di ottone creando un raccordo tra le parti della macchina.

Il sistema di movimentazione.

Per movimentare le slitte durante il funzionamento, è stato progettato un sistema di controllo della posizione piuttosto semplice ma efficace. Le problematiche di partenza sono che il rotore, in quanto motore riluttante, ha al suo interno dei magneti. L'avvicinamento e l'allontanamento dello statore alla sezione rotorica genera delle forze di attrazione rendendo difficile il disaccoppiamento della slitta e pericoloso l'accoppiamento. Infatti, durante l'avvicinamento dello statore al rotore, la slitta viene tirata e si allinea con forza e in maniera controllata, rischiando di avere una extracorsa verso l'interno del volano e oltre a un pericolo per l'operatore, si rischia di rovinare le componenti e in casi estremi di danneggiare irrimediabilmente l'inverter. Il magnete sorretto dall'albero che dalla parte rotorica si va a posizionare all'interno della piastra verticale della slitta e occupa lo spazio circolare preposto si trova a massimo 3 mm dall'inverter, dunque anche lo slittamento in avanti di 5 mm andrebbe a distruggere il sensore dell'encoder. È stato dunque necessario trovare un sistema per il controllo della posizione e del movimento delle slitte che non fosse solo il movimento dei pattini sulle slitte che non può dare un controllo sia di velocità che di forze.

Si è scelto una vite/madrevite trapezia, sostenuta da due blocchi fermati sulla piastra di base di sostegno alla barra filettata e una chiocciola allacciata alla slitta.

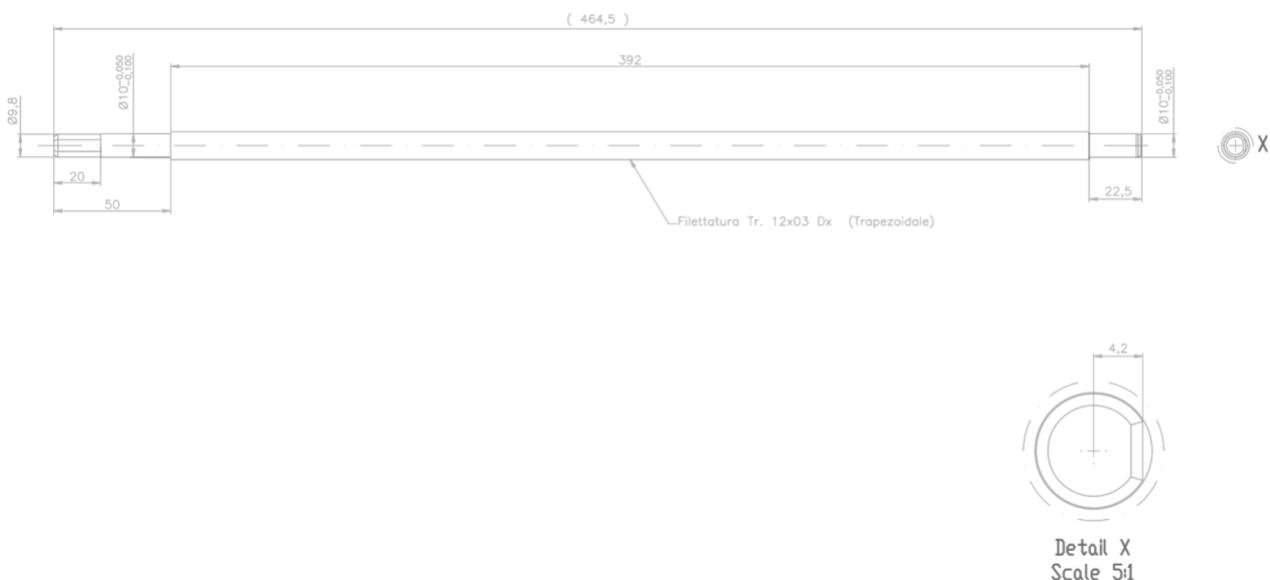


Figura 2.45

Come si vede da disegno sono state richieste delle lavorazioni alla barra che viene venduta ad una lunghezza standard di 1 m. Si è quindi previsto il taglio a 464,5 mm e la lavorazione delle due metà della vite. Inizialmente è stata richiesta una tornitura delle parti di testa e di coda in modo da avere un $\Phi 10$ per 22,5 mm con una tolleranza dimensionale da $-0,05/-0,1$ mm tale che potesse essere inserito nei blocchetti di sostegno. Sulla testa, la tornitura è prevista per una lunghezza maggiore di 20 mm in modo tale che fuoriesca dal blocco di sostegno.

Inoltre è richiesto uno scasso, in modo da avere uno scasso piano a 4,2 mm da centro per tutta la lunghezza di 20 mm misurati dalla testa. Questo scasso è necessario in quanto ospiterà un grano che fermerà la manopola di movimentazione.

Capitolo 3

Il montaggio.

Il montaggio presenta alcune difficoltà, in quanto le componenti non sono tutte fisse, ma si ha una parte mobile, non solo in rotazione rispetto al proprio asse, ma anche trasversalmente. Dunque si procederà seguendo un ordine ben preciso e studiato precedentemente. Gli strumenti utilizzati per ottenere una precisa e completa realizzazione sono stati il piano di marmo, calibro, tornio e il comparatore.

Per cominciare bisogna considerare il fatto che è necessario seguire tre procedimenti differenti per ottenere il montaggio completo del banco. I primi due sono molto simili, in quanto corrispondono alle due slitte, una attrezzata per ospitare il motore da 1 kW e una per quello da 2 kW. A quel punto è necessario assemblare la sezione rotorica utilizzando anche le slitte come allineamento, per ottenere un montaggio preciso. Dal momento che è stato realizzato a mano dal sottoscritto sono state allegate le foto degli step più importanti, in modo tale da documentare in maniera più precisa il procedimento.

Le slitte.

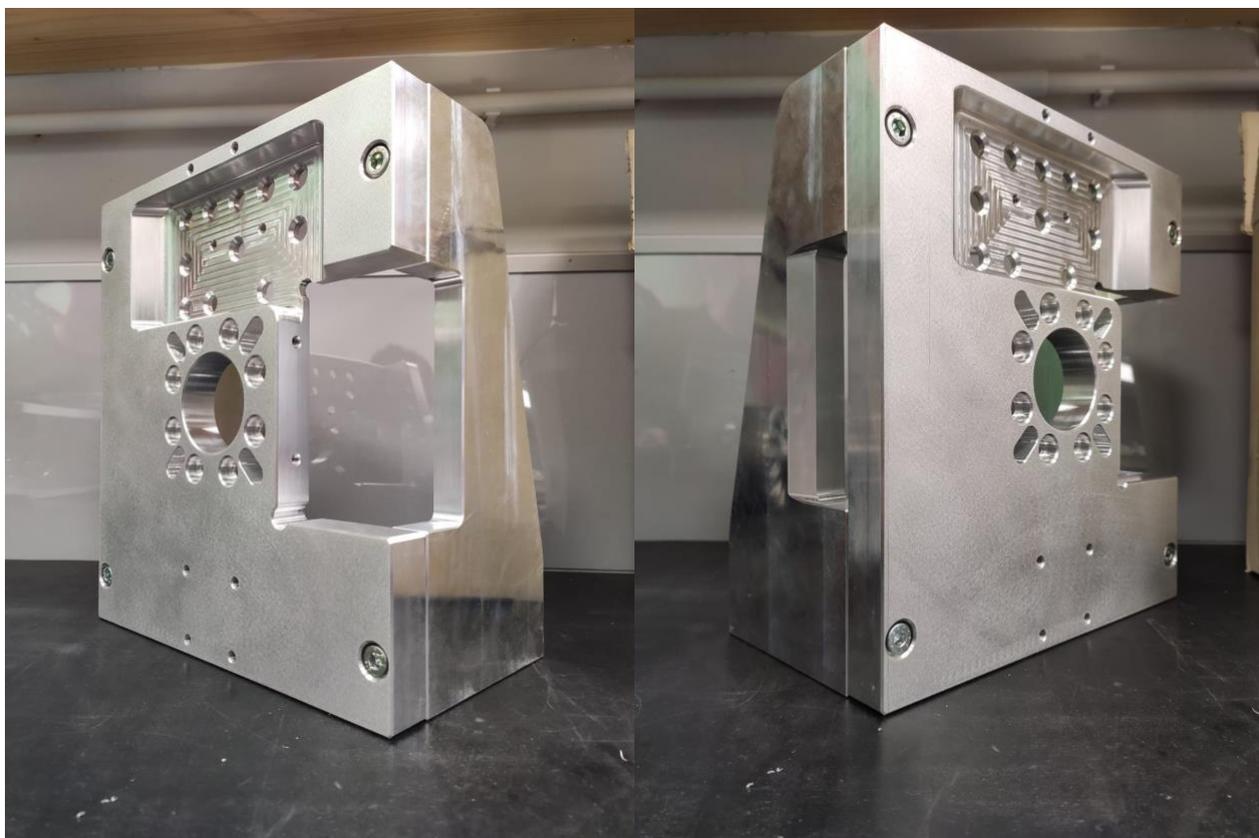


Figura 3.1

Per prima cosa è stato montata la piastra verticale con i due triangoli di sostegno con 2 viti M8 da 25 mm. La piastra è stata posizionata verticalmente sul piano di marmo e tramite l'allineatore del banco si è ottenuta un blocco su tre piani. A quel punto tenendo ferme con dei tiranti la piastra e il triangolo si sono strette le due viti. Lo stesso procedimento è stato fatto specularmente per il secondo triangolo e per l'altra slitta.

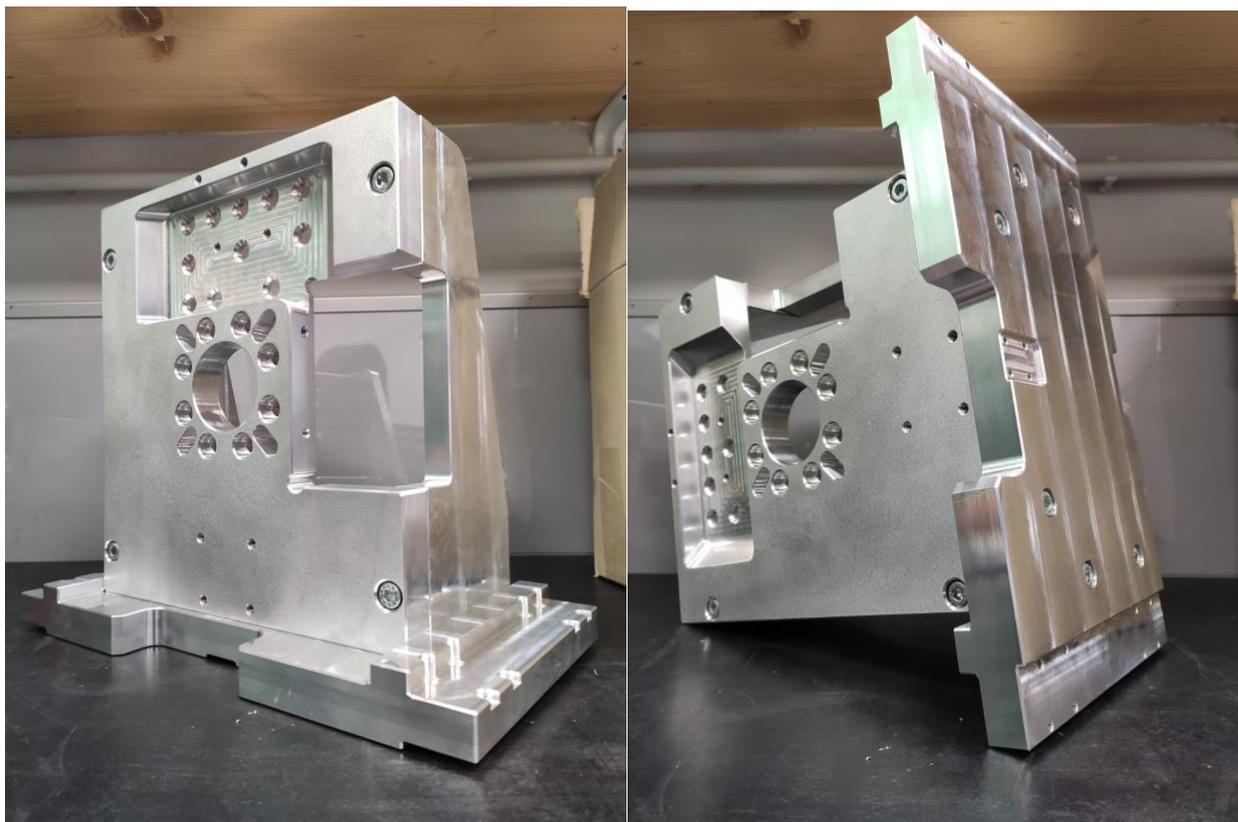


Figura 3.2

A questo punto si è posizionato il castello sulla slitta e si è fermata sulla piastra. Ruotandola di 90° e allineando i fori filettati della piastra verticale con quelli lamati della slitta si sono strette alternando le posizioni le 6 viti M8 da 35 mm. È importante considerare che mentre nell'allineamento trasversale è molto importante, nell'ordine dei centesimi di millimetro longitudinalmente non è necessario avere una tolleranza dell'ordine del decimo.

Ottenuti così i due castelli vengono montate le flange che fungono da distanziali.

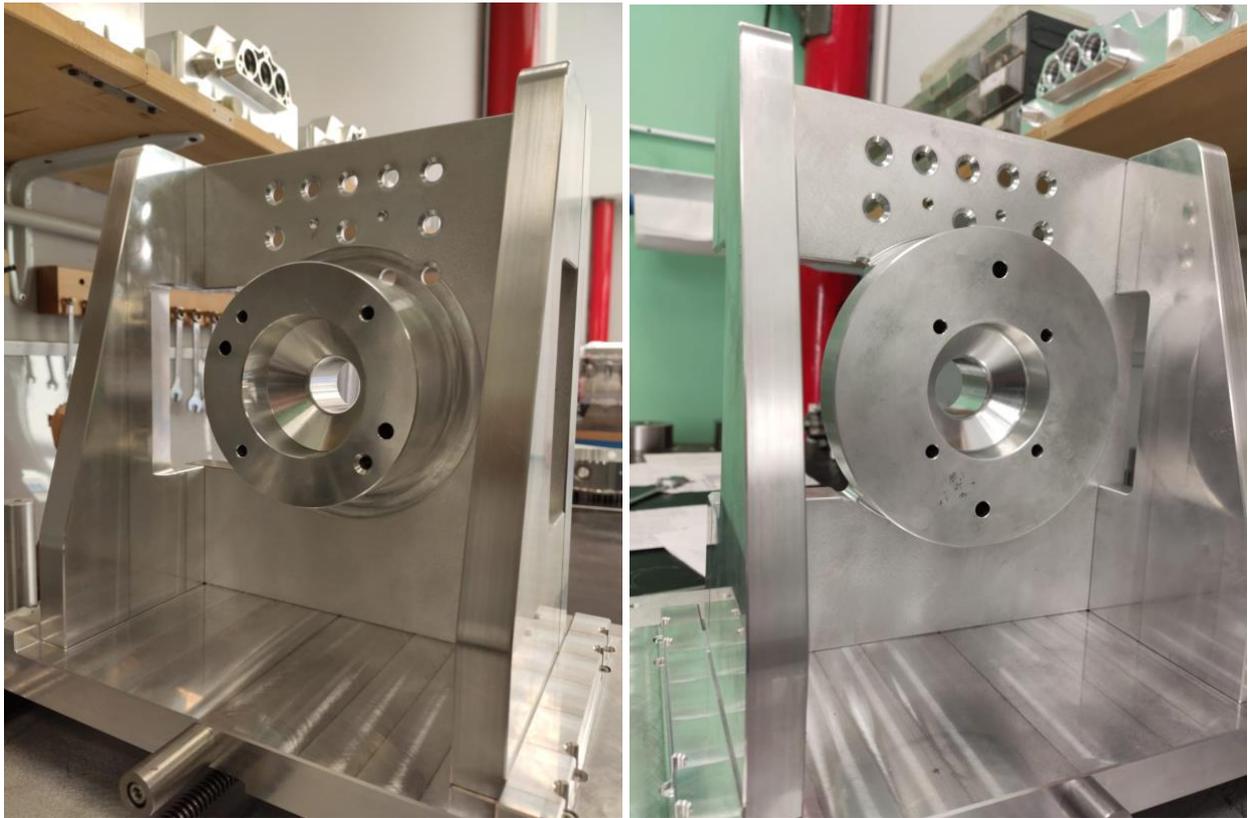


Figura 3.3

Le due flange, per il motore da 1 kW e per quello da 2 kW, vengono inserite nel foro centrale della spalla, accoppiandole e a quel punto il castello viene girato e bloccato con 8 viti M8 da 35 mm.



Figura 3.4

Infine, nella slitta che ospiterà l'inverter da 2 kW è stata aggiunta la staffa che regge le plastiche e le posiziona nel punto corretto.

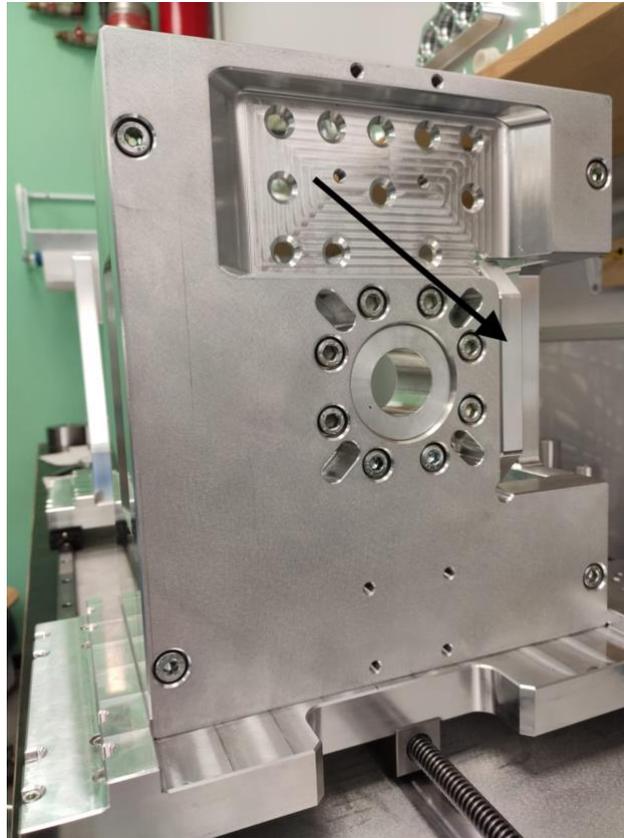


Figura 3.5

A questo punto, una volta che le componenti strutturali sono state assemblate e allineate nella maniera corretta, sono state completate le due slitte montando le parti del sistema di movimentazione, che comprende, nel caso delle slitte, dei quattro pattini, della chiocciola madrevite e del tondino finecorsa. Per il tondino finecorsa e la chiocciola madrevite non sussistono problemi che richiedono un montaggio particolarmente preciso, perciò sono stati subito montati e bloccati con le relative 4 viti M4 da 30 mm e il finecorsa con la M5 da 40 mm.

Le slitte sono state chiuse ma non strette tramite 4 viti M4 da 25 mm. Uno dei bordi dei carrelli è lavorato con una tolleranza di 0,05 mm per aiutare l'accoppiamento. Lasciando un po' di gioco vengono inseriti i carrelli nelle guide, già allineate in precedenza e a quel punto bloccati stringendo le viti.

La struttura rotoria.

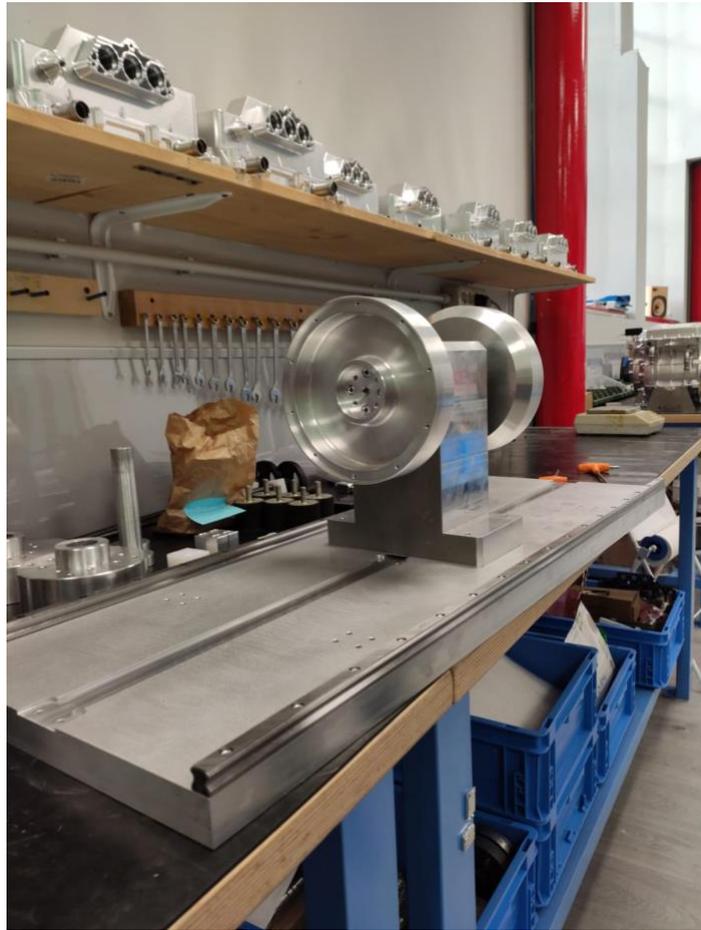


Figura 3.6

Dopo avere preso la piastra di base, la si è posizionata sul banco di marmo e si è portato a battuta con uno dei due lati lunghi l'allineatore del banco. Allora è stata presa la prima guida e la si è posizionata lungo il lato lungo e a quel punto stretta con le 17 viti M5 da 25 mm. Posizionata la prima, è stato ripetuto lo stesso procedimento con la seconda, allineandola con il bordo della piastra allo stesso modo.

Inserendo le slitte sulle guide si procede con l'allineamento del montante, che verrà realizzato utilizzando l'asse dell'albero che coincide con l'asse dei fori delle piastre delle slitte.

Inizialmente si procede con il montaggio del blocco montante, posizionandolo prima sulla piastra in modo da doverlo solo spostare di pochi millimetri e posizionando le 4 viti M8 da 30 mm, senza stringerle, dal momento che il suo peso si aggira intorno ai 30 kg. A questo punto per prima cosa viene inserita la molla a onde seguita dal cuscinetto 6206-2z. Dopo questa operazione si inserisce l'altro cuscinetto 6206-2z sull'albero, fino a che non vada a battuta sullo spallamento a ridosso della flangia.



Figura 3.7

A questo punto mantenendo a pacchetto il cuscinetto inserito nella sede della spalla insieme alla molla, si inserisce l'albero all'interno della spalla, finché anche il secondo cuscinetto non va a battuta con lo spallamento nella sua sede.



Figura 3.8

Dopo aver inserito l'albero si procede posizionando il volano e accoppiandolo con la flangia dell'albero, andando a incastrarsi nella sede predisposta e stringendolo con 4 viti M8 da 30 mm. Sull'altro volano invece va posizionata e bloccata la flangia chiavettata con altre 4 viti M4 da 30 mm sul secondo volano, come mostrato in figura.

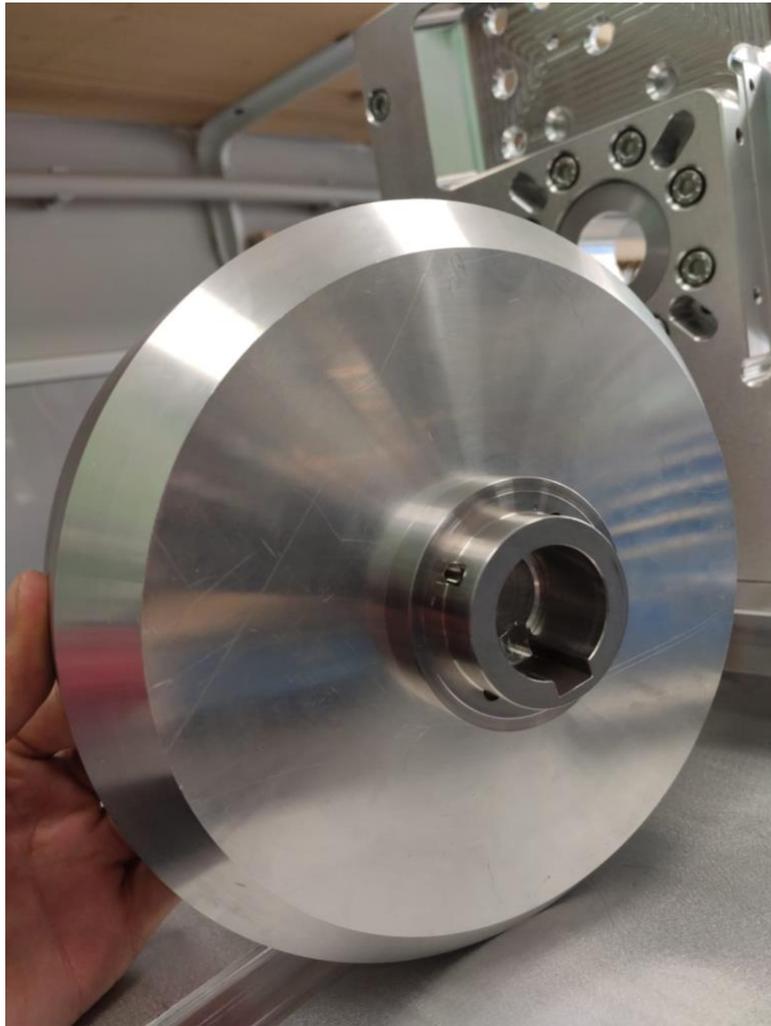


Figura 3.9

Dopodiché si posiziona la chiavetta 10x8. Il volano è però ancora libero di scorrere assialmente insieme alla flangia chiavettata. Dunque per andare a stringere il cuscinetto, dare il precarico alla molla e mandare il cinematismo a pacchetto è necessario stringere la vite M8 x 25mm. A questo punto, come mostrato in figura sono state montati gli alberi portamagnete, inserendoli nella relativa guida e chiudendoli con 4 M5 da 25 mm.

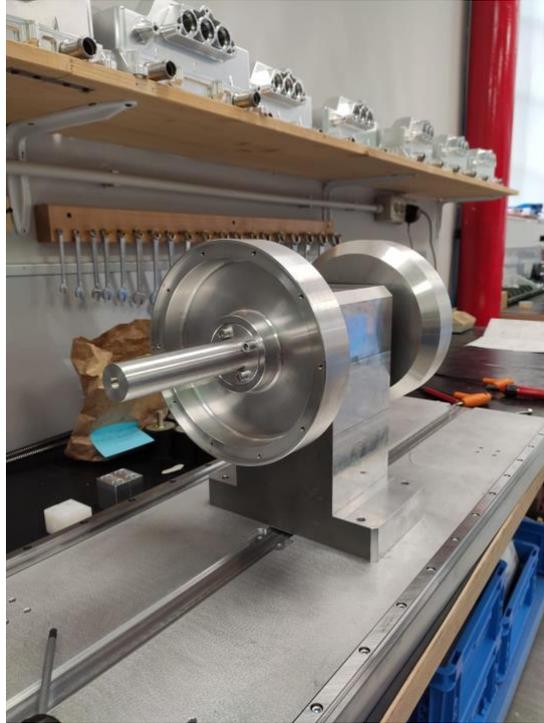


Figura 3.10

Sono state inserite le slitte nelle guide e sugli alberi sono stati piantati due inserti di plastica cilindrici cavi, rifiniti al tornio in maniera tale che si accoppiassero con precisione verso l'interno con l'albero portamagnete e verso l'esterno con il foro della piastra verticale delle slitte. Poi, queste ultime sono state fatte scorrere verso la struttura rotoria in modo che i fori e gli alberi andassero a combaciare in maniera precisa. A questo punto sono state strette le viti della base, che sostiene l'albero, allineandola definitivamente. Fatto questo sono stati smontate le slitte, in modo tale da controllare l'allineamento preciso dei volani. Per questo motivo si è utilizzato il comparatore, come mostrato in figura e facendo ruotare i volani si è cercato uno scostamento massimo di 0,05 mm, ottenendo in uno dei due casi addirittura uno scostamento di 0,015 mm.

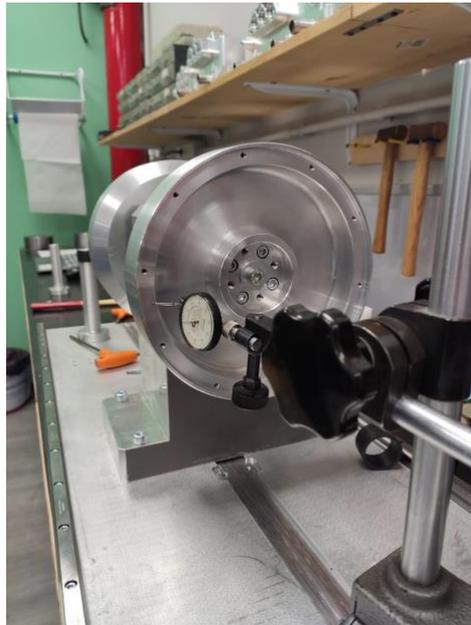


Figura 3.11

Prima di riposizionare le slitte, sono stati avvitati tramite 2 viti M6 da 30 mm ciascuno i due blocchi di plastica forati progettati a sostenere la coda della vite del sistema di movimentazione, poi viene inserita la madrevite nella chiocciola fissata sulla superficie inferiore della slitta. Poi il castello è stato accoppiato alle guide e la madrevite è andata a ricoprire la sede predisposta. Subito dopo è stato posizionato il secondo blocchetto, come si vede dall'immagine, e la manopola, bloccata tramite l'inserimento di una vite M6 da 8 mm sul lato.

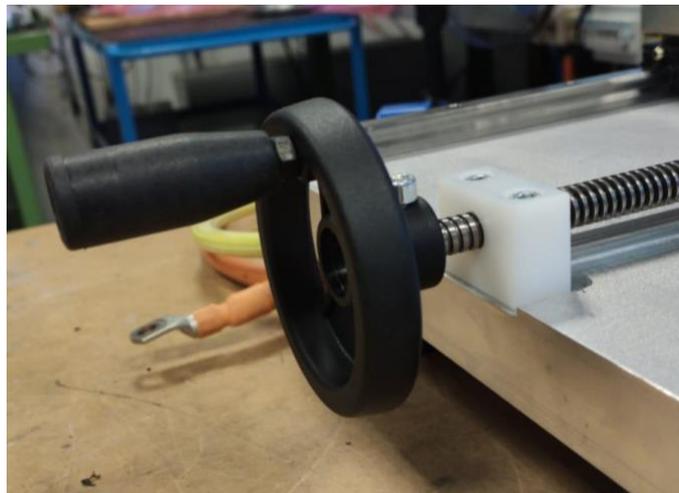


Figura 3.12

A questo punto, posizionate anche le slitte sul sistema di movimentazione, il banco risulta essere pronto a venire posizionato sul tavolo preposto per lui e raccordato alla piastra di quest'ultimo che sostiene e incorpora il sistema elettrico di alimentazione.

Capitolo 4

I test di prova.

Nell'ultima fase del progetto si è utilizzato il banco per testare il funzionamento dei primi motori prodotti e definire un ciclo motore che fosse utilizzabile in produzione.

Per prima cosa, il test è stato definito per il motore che per primo vede la luce, che è quello da 2 kW, ovvero con 20 mm di superficie attiva. Con questo fine si è proceduto con alcuni esperimenti. Dopo aver montato il motore direttamente su un macchinario, dopo aver affrontato alcune difficoltà a livello di montaggio, dal momento che il peso della massa è 450 kg. Grazie a un carroponte da 2 tonnellate, sito nell'azienda Quick s.p.a a Ravenna, si è proceduto con il montaggio e sono state fatte alcune prove. Monitorando i parametri dalla seguente interfaccia, si è monitorato il corretto funzionamento del motore.

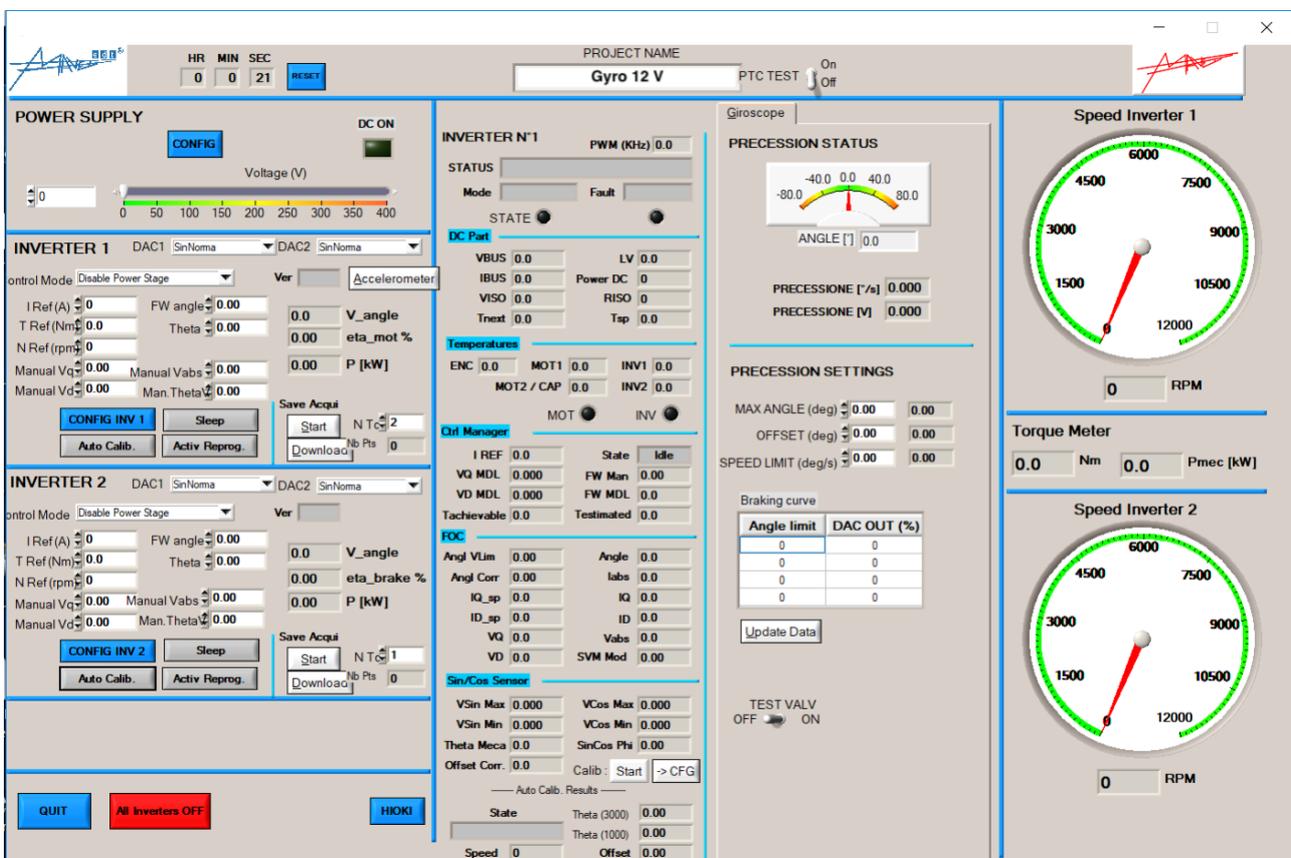


Figura 4.1

Dopo aver collegato l'inverter a un pacco batterie da 800 Wh (4 batterie da 200 Wh collegate in parallelo) lo si è pilotato a 20 ampère in modo tale da mettere in moto la massa, anche di molto poco. Dopo aver verificato che la massa entrasse in movimento e girasse nel verso giusto. A questo punto è stata inizializzata la procedura di autocalibrazione già presente nel firmware e definita in precedenza. Il motore raggiunge i 1950 rpm e stacca l'alimentazione e legge le tensioni concatenate a 1900 e a 1000 rpm in maniera da definire l'offset ottimale dell'angolo dell'encoder.

Una volta definito l'angolo di offset è stato pilotato l'inverter cercando di simulare una rampa per raggiungere la velocità richiesta, cioè 4800 rpm. Pilotando l'inverter in velocità fino alla velocità di riferimento e avendo un limite software da 300 ampère letti sulla fase è stato ottenuta la seguente prova.

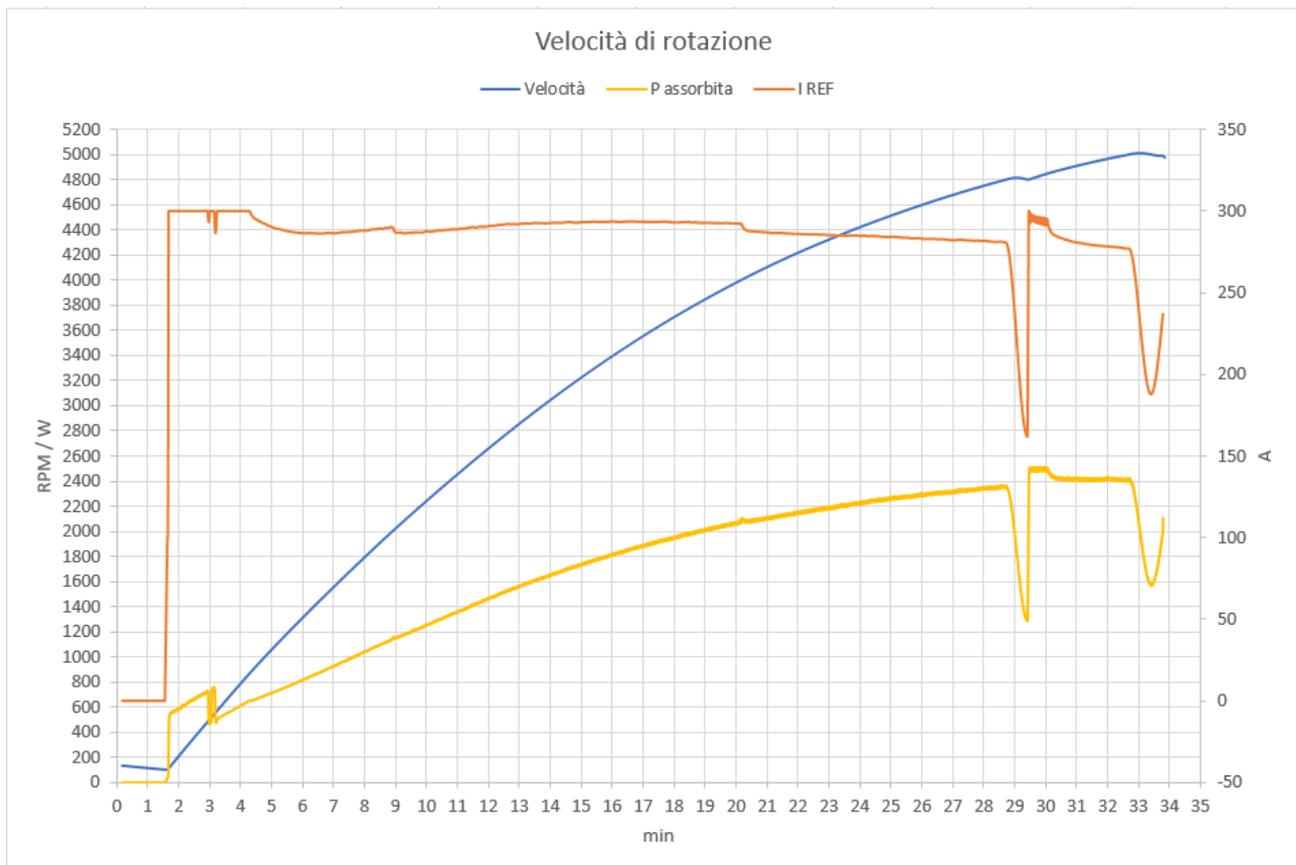


Figura 4.2

Si nota subito come la corrente sale a 300 ampère e si stabilizza mentre la massa accelera. Dal momento che la tensione è praticamente costante la potenza segue l'andamento della corrente. Quest'ultima però, nella prima parte del grafico, fino a 4800 rpm, ha un andamento quasi costante a circa 270 ampère. Questo fatto accade perché il sensore di temperatura dell'inverter segnala che le componenti elettroniche raggiungono una temperatura superiore a 100 °C e inizializza una procedura di derating che seziona la corrente in maniera lineare fino a scendere sotto la temperatura di riferimento. Dal grafico delle temperature si vede subito come queste diminuzioni di corrente sono in corrispondenza dei picchi.

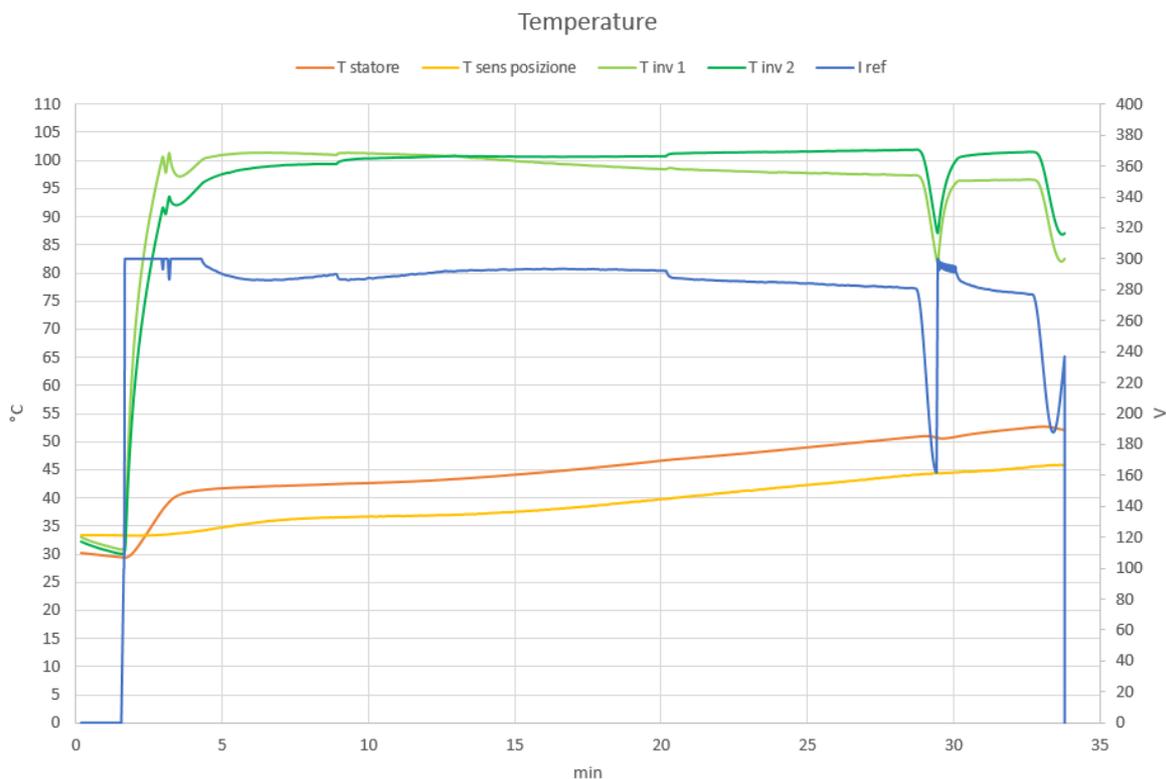


Figura 4.3

La parte destra del grafico non è da tenere in considerazione in quanto a 4800 rpm è stata abbassata la corrente, questo spiega la gola e infine la massa è stata accelerata fino a 5000 rpm per poter mostrare al cliente le potenzialità del motore.

Infine, è stata simulata anche una prova di endurance di almeno 1 ora per poter monitorare gli andamenti dei vari parametri di pilotaggio. In seguito sono mostrati i grafici di questa prova. Oltre a notare gli andamenti della corrente nella parte iniziale di accelerazione, influenzati dalla temperatura attraverso il derating. Dopo aver raggiunto la velocità di riferimento la corrente e la velocità hanno un andamento sinusoidale, dal momento che il motore tenta di mantenere la velocità costante, ma avendo la massa un'inerzia piuttosto grande il motore ha bisogno di tempo per accelerarla o frenarla.

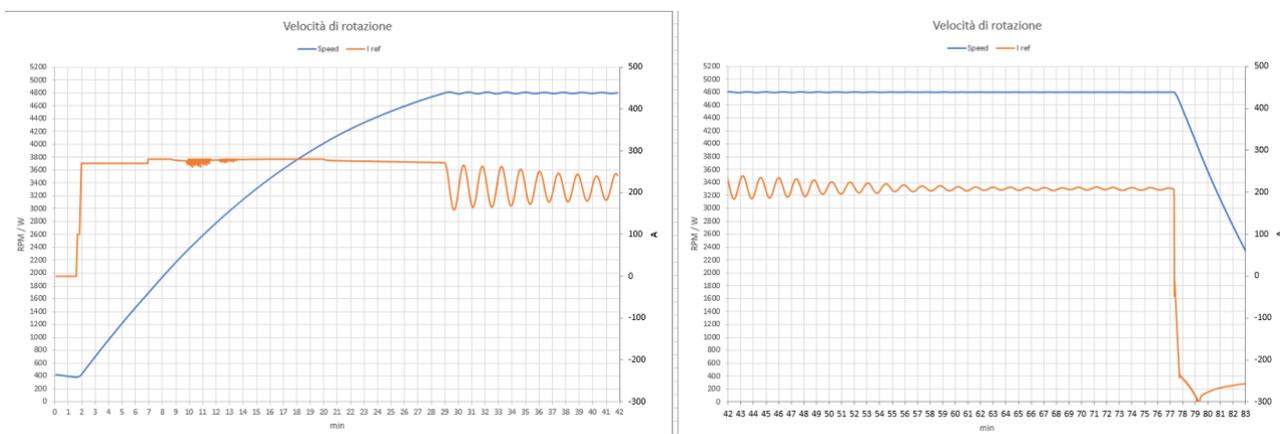


Figura 4.4

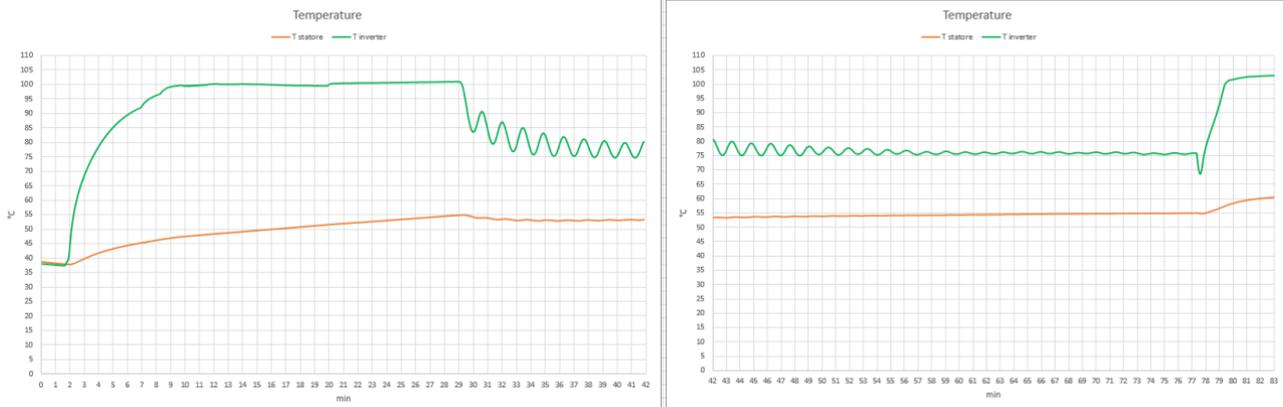


Figura 4.5

Alla fine della prova la massa è stata frenata utilizzando il motore come freno rigenerativo per ricaricare le batterie e fermare la massa in breve tempo, dal momento che se lasciata libera impiega più di 60 minuti per frenarsi del tutto.

Preso atto di questi test, sono state stabilite delle procedure per il test dei motori in produzione.

- Pilotaggio in corrente per mettere in movimento il motore e avvicinarsi all'angolo di offset
- Inizializzazione della procedura di Autocalibrazione senza pilotare il freno, dunque lasciando il motore girare fino a 1950 rpm senza essere frenato
- A questo punto si procede con la procedura di test vera e propria: si pilota il freno a secondo una particolare funzione chiamata "Torque vs Speed" in cui il motore fornisce una coppia proporzionale a una costante k secondo la formula:

$$T = k * RPM^2$$

- Fatto ciò, si impone come velocità del motore 4800 RPM e il motore percorrerà tutta la curva di salita simulando l'inerzia della massa attraverso una coppia resistente funzione della velocità di rotazione.

Bibliografia

R.C. Juvinall, K.M. Marshek, Fondamenti della progettazione dei componenti delle macchine, Edizioni ETS Pisa

J. E. Shigley, Mechanical engineering design, Mc Graw-Hill International Student ed. III ed.

Fasana, Marchesiello, Meccanica delle vibrazioni, CLUT

G. Manfè, R. Pozza, G. Scarato, Disegno meccanico, vol. II e III, ed. Principato

E. Chirone, S. Tornincasa, Disegno Tecnico Industriale, vol. II, ed. Il Capitello.

G. Manfè, R. Pozza, G. Scarato, Disegno meccanico, vol. II e III, ed. Principato

E. Chirone, S. Tornincasa, Disegno Tecnico Industriale, vol. II, ed. Il Capitello.

C.A. Desoer, E.S. Kuh, Fondamenti di teoria dei circuiti, Franco Angeli editore, Milano

Ringraziamenti

Concluso questo lungo e impegnativo percorso vorrei ringraziare le persone che mi sono state vicine e han permesso che tutto questo si tramutasse da un mio sogno alla realtà.

A mio padre Luca e a mia madre Carla che con impegno, sacrifici e disponibilità mi hanno insegnato tutto quello che so e rimarranno sempre un esempio di come devo essere e vivere. Spero che questo traguardo li soddisfi e spero sia il primo di molti motivi di orgoglio. Non posso far altro che citare un testo che mio padre mi ha scritto a 18 anni e che a distanza di molto tempo continua a essere vivo nella mia memoria e guida nel mio percorso.

Se riesci a non perdere la testa, quando tutti intorno
La perdono, e se la prendono con te;
Se riesci a non dubitare di te stesso, quando tutti ne dubitano,
Ma anche a cogliere in modo costruttivo i loro dubbi;
Se sai attendere, e non ti stanchi di attendere;
Se sai non ricambiare menzogna con menzogna,
Odio con odio, e tuttavia riesci a non sembrare troppo buono,
E a evitare di far discorsi troppo saggi;

Se sai sognare - ma dai sogni sai non farti dominare;
Se sai pensare - ma dai pensieri sai non fare il fine;
Se sai trattare nello stesso modo i due impostori
- Trionfo e Disastro - quando ti capitano innanzi;
Se sai resistere a udire la verità che hai detto
Dai farabutti travisata per ingannar gli sciocchi;
Se sai piegarti a ricostruire, con gli utensili ormai tutti consunti,
Le cose a cui hai dato la vita, ormai infrante;

Se di tutto ciò che hai vinto sai fare un solo mucchio
E te lo giochi, all'azzardo, un'altra volta,
E se perdi, sai ricominciare
Senza dire una parola di sconfitta;
Se sai forzare cuore, nervi e tendini
Dritti allo scopo, ben oltre la stanchezza,
A tener duro, quando in te nient'altro
Esiste, tranne il comando della Volontà;

Se sai parlare alle folle senza sentirti re,
O intrattenere i re parlando francamente,
Se né amici né nemici riescono a ferirti,
Pur tutti contando per te, ma troppo mai nessuno;
Se riesci a occupare il tempo inesorabile
Dando valore a ogni istante della vita,
Il mondo è tuo, con tutto ciò che ha dentro,
E, ancor di più, ragazzo mio, sei Uomo!

Ai miei fratelli Anna Pia, Paolo, Vittoria, Sara e Marco per la loro presenza sempre al mio fianco in ogni momento, facile, difficile e anche quando non li volevo.

Ai miei nonni, Anna, Pier Carlo e Clelia per la loro disponibilità e gentilezza, per aver badato a me in ogni momento e per essersi presi cura di me.

A Eugenia, per la tua bellezza e simpatia, la tua disponibilità e gentilezza, la tua dolcezza e il tuo amore. Grazie perché mi rendi felice e fai di me una persona migliore, mi auguro che il tempo che decideremo di condividere sia ancora molto lungo. Vorrei scriverti molte più cose, ma poi verrebbero lette da tutti e non sono affari loro.

Ai miei amici di sempre Lalla, RIKI, Pozza e Sposi per condividere con me ogni passione e ogni birra. Spero che quello che c'è tra noi possa non avere mai una fine.

A Sanna che sei la voce della mia coscienza. Rimani tale che ne ho tremendamente bisogno.

A Gabbo che ogni volta che ho bisogno di divertirmi e staccare è sempre in prima linea.

Ai miei primi compagni di corso e ora amici, Simone e Vincenzo, spero che la nostra amicizia e collaborazione possa continuare per sempre. Non credo sarei riuscito a studiare tutte queste cose da solo. E anche a fare i progetti così male.

A tutti i miei colleghi della Mavel, in particolare a Marco Francesetti e Alessandro Chiavenuto, e al mio relatore Carlo Rosso che mi hanno aiutato e permesso di realizzare questo lavoro di tesi.

Al B63 che fai la birra più buona del mondo, spero tu non possa mai chiudere.

Grazie.

Pietro.

