

ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA  
Sede di Forlì

Corso di Laurea in  
INGEGNERIA MECCANICA  
Classe L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA  
in MECCANICA DEGLI AZIONAMENTI  
STUDIO DI FATTIBILITÀ DI BRACCIO ROBOTICO R-P

CANDIDATO  
Olivoni Enea

RELATORE  
Ing. Troncossi Marco

CORRELATORE  
Ing. Martini Alberto

Anno Accademico 2016/2017

# Sommario

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introduzione</b>                                   | <b>4</b>  |
| 1.1      | Cenni sullo sviluppo della robotica                   | 5         |
| 1.2      | Tipologie di robot                                    | 6         |
| 1.3      | Obiettivo della tesi                                  | 7         |
| 1.4      | Organizzazione della tesi                             | 7         |
| <b>2</b> | <b>Progettazione concettuale e studio preliminare</b> | <b>8</b>  |
| 2.1      | Modello cinematico e caratteristiche desiderate       | 8         |
| 2.2      | Caratteristiche generali del braccio                  | 9         |
| 2.2.1    | Gruppo rotante  | 11        |
| 2.2.2    | Gruppo traslante                                      | 14        |
| 2.2.3    | Organo terminale                                      | 17        |
| 2.2.4    | Sensori   | 18        |
| 2.2.5    | Montaggio   | 19        |
| <b>3</b> | <b>Scelta degli azionamenti</b>                       | <b>24</b> |
| 3.1      | Modello numerico                                      | 24        |
| 3.1.1    | Proprietà di massa                                    | 24        |
| 3.1.2    | Simulazione   | 28        |
| 3.1.3    | Risultati simulazione                                 | 28        |
| 3.2      | Calcolo azionamenti                                   | 31        |
| 3.2.1    | Motori elettrici                                      | 32        |
| 3.2.2    | Motori Maxon  | 41        |
| 3.2.3    | Riduzione di forze e inerzie                          | 44        |
| 3.2.4    | Dimensionamento motore della coppia rotoidale         | 46        |
| 3.2.5    | Dimesionamento motore della parte traslante           | 50        |
| 3.3      | Distinta base   | 53        |
| <b>4</b> | <b>Conclusioni</b>                                    | <b>55</b> |
| 4.1      | Caratteristiche richieste al braccio R-P              | 55        |

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 4.2 | Caratteristiche ottenute e riflessioni | 55 |
| 4.3 | Possibili applicazioni future          | 57 |
|     | <b>Appendice</b>                       | 59 |
|     | <b>Fonti bibliografiche</b>            | 70 |
|     | <b>Ringraziamenti</b>                  | 71 |

# 1 Introduzione

L'idea di robot ha origine più di cinque secoli fa, quando Leonardo da Vinci progettò un automa, *Il cavaliere*, intorno al 1495, un soldato rivestito da un'armatura, al cui interno era prevista una serie di meccanismi, che permettevano il movimento di braccia, gambe e mascella. Probabilmente fu ideato per intrattenere le serate nella corte sforzesca, anche se non ci sono prove sulla sua effettiva realizzazione. Il termine *robot* deriva dal ceco *robota*, con cui si indicava, nel periodo feudale, il lavoro della durata di qualche giorno, che i contadini erano obbligati a svolgere per conto dei padroni, ma senza riceverne alcun compenso. Con il passare del tempo, *robota* assunse generalmente il significato di lavoro obbligatorio, mentre i giovani lo utilizzavano per indicare un lavoro noioso o poco interessante. Fu lo scrittore ceco Karel Čapek, con il romanzo *I Robot Universali di Rossum* (R.U.R., 1920), a intendere il robot come organismo artificiale, in grado di ribellarsi all'uomo. Lui stesso ammise, però, che la paternità della parola era da attribuire a suo fratello Josef, scrittore e pittore cubista, che nel suo racconto *L'ubriacone* (Opilec, 1917) utilizzò per la prima volta la parola *automat*, "automa". Fu invece Isaac Asimov, con il racconto fantascientifico *Bugiarde!* (Liar!, 1941) a introdurre per primo la parola "robotica", inoltre Asimov, con il racconto *Circolo vizioso* (Runaround, 1942), pubblicò le tre leggi della robotica:

- I. Un robot non può recare danno a un essere umano, né può permettere che, a causa del suo mancato intervento, un essere umano riceva danno.
- II. Un robot deve obbedire agli ordini impartiti dagli esseri umani, purché tali ordini non contravvengano alla Prima Legge.
- III. Un robot deve proteggere la propria esistenza, purché questa autodifesa non contrasti con la Prima e la Seconda Legge.

La letteratura fantascientifica ha aiutato a diffondere l'idea di robot umanoide, creando, però nel frattempo, anche un conflitto sull'attribuzione del termine. Infatti, comunemente ci si dimostra reticenti nel chiamare robot un elettrodomestico come la lavatrice, anche se questa è effettivamente una macchina che svolge una mansione utile per l'uomo. Nel linguaggio comune, con tale termine si intende un'apparecchiatura artificiale, che compie determinate azioni in base ai comandi che gli vengono intimati, alle sue funzioni, supportato sia da una supervisione diretta dell'uomo, sia da linee guida generali autonome. Questi

compiti, tipicamente, dovrebbero essere eseguiti al fine di sostituire o coadiuvare l'uomo nelle operazioni più faticose e ripetitive. Forse è proprio perché il compito dei robot è quello di sostituire l'uomo in determinate circostanze che vengono attribuite loro caratteristiche antropomorfe.

## 1.1 Cenni sullo sviluppo della robotica

La robotica ha trovato vari campi di impiego, ma quello in cui si è maggiormente inserita è il settore della produzione industriale, con i bracci robotici. Per circoscrivere un significato più preciso al termine, la normativa ISO TR/8373-2.3 definisce il robot industriale come:

Un manipolatore con più gradi di libertà, governato automaticamente, riprogrammabile, multiscopo, che può essere fisso sul posto o mobile per utilizzo in applicazioni di automazioni industriali.

La necessità di facilitare il compito agli operai, di salvaguardare la loro salute e svolgere determinate operazioni in maniera più rapida e precisa ha fatto sì che i robot comparissero per la prima volta nelle industrie, *in primis* in quelle automobilistiche, attorno agli anni 70'. Questi robot erano composti da strutture in acciaio con motori idraulici lenti ed imprecisi, avevano limitate capacità di carico e il loro principale impiego era quello di saldare alcune parti delle scocche delle automobili. Uno dei primi utilizzi massicci dei manipolatori per la saldatura è avvenuto in FIAT (Gruppo FCA) con l'aiuto del COMAU (Consorzio Macchine Utensili), che ai tempi era ancora una piccola officina ausiliaria dell'industria torinese. Nel 1972, il COMAU progettò e costruì una linea di saldatura a punti multipli per la produzione dell'automobile Fiat 132 e 131. Nel 1978, la stessa azienda mise a punto il *Robogate*, un sistema di produzione, primo al mondo nel suo genere, che comprendeva l'uso simultaneo di robot per il posizionamento di parti, di robot di saldatura, di trasportatori, di robot per la fornitura di parti, il tutto per la produzione della Fiat Ritmo, la prima vettura al mondo con scocca interamente assemblata da robot. Questo sistema innovativo venne poi sfruttato in numerosissime altre case automobilistiche. Un'altra mansione svolta dai primi sistemi robotici fu quella di verniciatura. In seguito, con il crescente sviluppo della tecnologia, i bracci robotici sono diventati sempre più veloci e precisi, dotati di più gradi di libertà e capaci di svolgere lavorazioni accurate come foratura,

smerigliatura, fresature, verniciature, smaltature e tagli con il laser. Attualmente, nel settore produttivo i robot svolgono svariate attività, dalle industrie automobilistiche alle case farmaceutiche, essi hanno permesso di ottenere una maggior produzione a basso costo e di miglior qualità, per questo sono oggetto di studio in diverse università del mondo.

## 1.2 Tipologie di robot

Le principali configurazioni dei robot utilizzate nel contesto industriale si dividono in due categorie:

- Robot seriali
  - Robot antropomorfi
  - Robot SCARA
  - Robot cartesiani
- Robot paralleli
  - Robot DELTA
  - Robot doppio SCARA

Nel contesto della robotica generale, la maggior parte dei robot rientra nella categoria dei *bracci robotizzati* e possono essere classificati in tre livelli:

- Robot di primo livello: robot programmati per svolgere fedelmente operazioni ripetitive senza variazioni e con alto grado di precisione; queste azioni sono determinate dal software che specifica la direzione, l'accelerazione, la velocità e la distanza di una serie di movimenti coordinati.
- Robot di secondo livello: robot molto più flessibili, in grado di adattarsi autonomamente alle variazioni delle condizioni operative; per esempio robot dotati di sistemi di visione artificiale, in grado di identificare l'oggetto da manipolare e compiere semplici variazioni di traiettoria e/o di logica di gestione (sempre nell'ambito del programma pre-impostato).
- Robot di terzo livello: robot in grado di prendere decisioni in modo autonomo (non previste dal costruttore) avvalendosi di reti neurali. Attualmente tali genere di robot non sono utilizzati a livello industriale.

### 1.3 Obiettivo della tesi

L'obiettivo di questa tesi è quello di eseguire lo studio di fattibilità di un braccio robotico piano a due gradi di libertà, in particolare, una coppia rotoidale e una prismatica. Tale studio è diviso in diverse fasi, quali: l'esecuzione della bozza cartacea del progetto, la modellazione del prototipo in ambiente CAD con il software SOLIDWORKS, l'analisi dati della simulazione di movimento eseguita con il software ADAMS, la scelta dei motoriduttori per soddisfare le specifiche richieste. Ci sono state più iterazioni tra una fase e la successiva, necessarie in fase di sintesi, in modo da eseguire per ognuna di esse, modifiche volte a migliorare il progetto, fino ad arrivare agli obiettivi che ci si era prefissati. Questo braccio verrà utilizzato come "banco didattico" per gli studenti del Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica – Indirizzo Meccanica per l'Automazione. Nei corsi di Meccanica dei robot e delle Macchine automatiche, vengono trattati analiticamente gli aspetti di un manipolatore mentre si fa uno studio numerico di questo, nel corso di Costruzione di macchine automatiche e robot. Avere a disposizione un modello fisico del braccio robotico, con l'eventuale possibilità di programmarlo, permetterà allo studente di chiarire i concetti visti a lezione e fornirà un'esperienza di tipo pratico, sicuramente importante per il suo percorso formativo e in ottica lavorativa.

### 1.4 Organizzazione della tesi

Il lavoro di tesi è organizzato in 5 capitoli. Dopo la presente Introduzione verrà presentato nel Capitolo 2, *progettazione concettuale e studio preliminare* del braccio robotico, comprendente la scelta dei vari componenti di cui esso è composto, come questi debbano essere accoppiati per ottenere i vincoli sul movimento desiderati e l'esecuzione del montaggio. Nel Capitolo 3, vengono presentati i risultati ottenuti con la simulazione eseguita su ADAMS, con i quali è stato possibile realizzare i calcoli che hanno permesso la scelta dei motoriduttori. A tal proposito vengono inseriti alcuni cenni sui motori elettrici, in particolare sui motori asincroni, DC e *brushless*, questi ultimi sono stati utilizzati nel progetto. Il capitolo prosegue con il dimensionamento dei due motoriduttori che verranno impiegati e si conclude con la distinta base. Successivamente nel Capitolo 4 vengono discussi i risultati ottenuti e si analizzano i possibili sviluppi di questo lavoro. Dopo le conclusioni è riportata l'appendice, contenente le messe in tavola dei componenti non commerciali e i *datasheet* degli azionamenti e dei componenti selezionati.

## 2 Progettazione concettuale e studio preliminare

Procedendo per ordine occorre definire il modello cinematico che si vuole ottenere, scegliere i componenti e i materiali necessari alla sua realizzazione. Nota la geometria occorre determinare le caratteristiche inerziali del braccio per poter simulare su ADAMS il movimento e determinare forze e accelerazioni in gioco, note queste è possibile stabilire quale sia la potenza necessaria per l'applicazione. In base a questo dato si andrà poi a scegliere la taglia del motoriduttore. Il differente peso dei vari motoriduttori può rendere necessaria un'ulteriore simulazione e nel caso, può comportare una scelta differente per quanto riguarda il motoriduttore. L'obiettivo dello studio di fattibilità è ottenere un braccio robotico, con due gradi di libertà, come verrà tra poco illustrato, che abbia una ventosa all'estremità e che sia quindi in grado di spostare oggetti. Il progetto comprende la distinta base e le indicazioni di montaggio.

### 2.1 Modello cinematico e caratteristiche desiderate

Il meccanismo che si vuole progettare è composto da due coppie elementari<sup>1</sup>, una *rotoidale* (R) e una *prismatica* (P) ognuna delle quali concede un solo grado di libertà, rispettivamente una rotazione attorno ad un asse e una traslazione in una determinata direzione. Dalle coppie cinematiche che caratterizzano il cinematismo, questo prende il nome di braccio robotico R-P. Visualizziamo il modello in questione come un meccanismo formato da 3 membri, visibile in fig. 2.1, uno fisso rappresentato in bianco che chiamiamo *telaio*, un secondo di colore rosso vincolato al primo con coppia rotoidale e un terzo membro rappresentato in verde, vincolato al secondo con coppia prismatica. Dalla fig. 2.1 a),b), è possibile osservare il movimento consentito ai membri dalle coppie cinematiche. Il membro rosso è in grado di compiere una rotazione attorno all'asse della coppia rotoidale, mentre quello verde può traslare lungo l'asse della parte rotante. Il braccio robotico sarà quindi di tipo piano, nell'estremità del membro traslante verrà collegato un organo in grado di far presa su degli oggetti. Il fine del progetto è quindi l'ottenimento di un meccanismo piano in grado di muovere masse, secondo le traiettorie permesse dai vincoli, a determinate velocità e accelerazioni che dipenderanno dal tempo concesso al movimento della simulazione.

---

<sup>1</sup> Coppie cinematiche rigide e combacianti

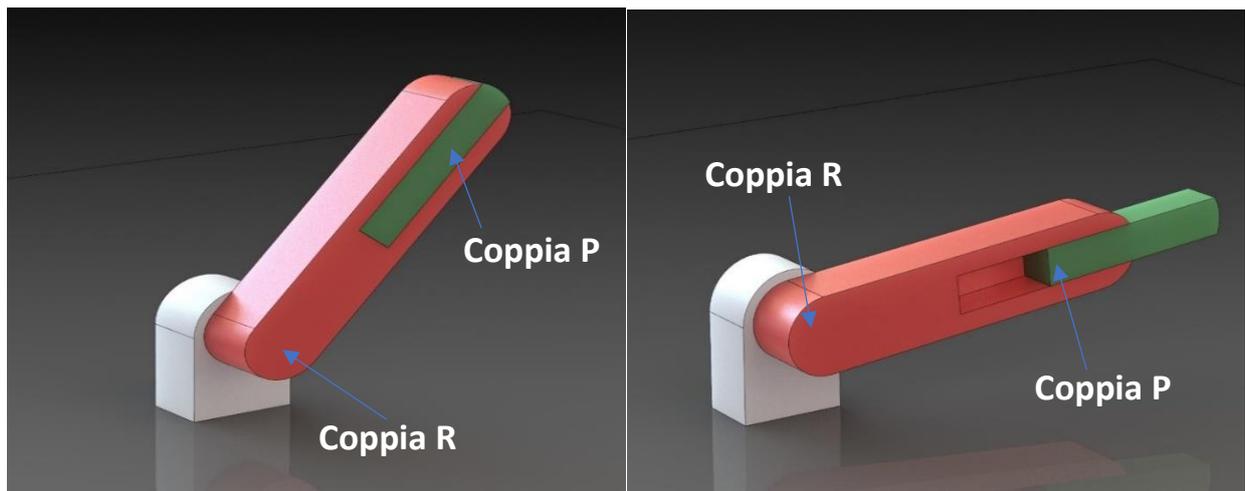


FIGURA 2.1 A), B) MODELLO CINEMATICO IN DIFFERENTI CONFIGURAZIONI.

È stato quindi necessario decidere cosa il robot dovesse riuscire a fare, nello specifico è stato deciso che debba avere la possibilità di estendere il membro terminale di almeno 10 cm; per simulare lo spostamento di un oggetto, si è pensato che la massa plausibile di quest'ultimo dovesse essere di 1kg. Quanto al movimento, verranno simulate due rotazione di 180° in entrambi i sensi, partendo dal braccio in orizzontale, nel tempo di 2 secondi con l'organo terminale caricato.

## 2.2 Caratteristiche generali del braccio

Per la scelta dei vari componenti si è cercato di adottare un criterio molto comune nelle aziende odierne, ovvero quello della *standardizzazione*. Questo consiste nell'utilizzare nei nuovi progetti il maggior numero possibile di parti commerciali, quindi facilmente reperibili sul mercato, con il vantaggio di avere una minor spesa per la produzione e un costo di manutenzione limitato rispetto alla sostituzione di componenti fabbricati per la singola applicazione. Tutte quelle parti non reperibili sul mercato, ma necessarie alla realizzazione del progetto possono essere ottenute con la macchina a controllo numerico del laboratorio di Forlì. Per i discorsi appena fatti si cerca di farne il minor utilizzo possibile, ma è comunque un importante mezzo di cui si è a disposizione. Gli azionamenti che permetteranno il movimento sono dei motoriduttori *brushless* un particolare tipologia di motori in corrente continua. Si visualizzi in figura 2.2 e 2.3 l'assieme complessivo del CAD, di cui vengono di seguito illustrate le parti che lo compongono.

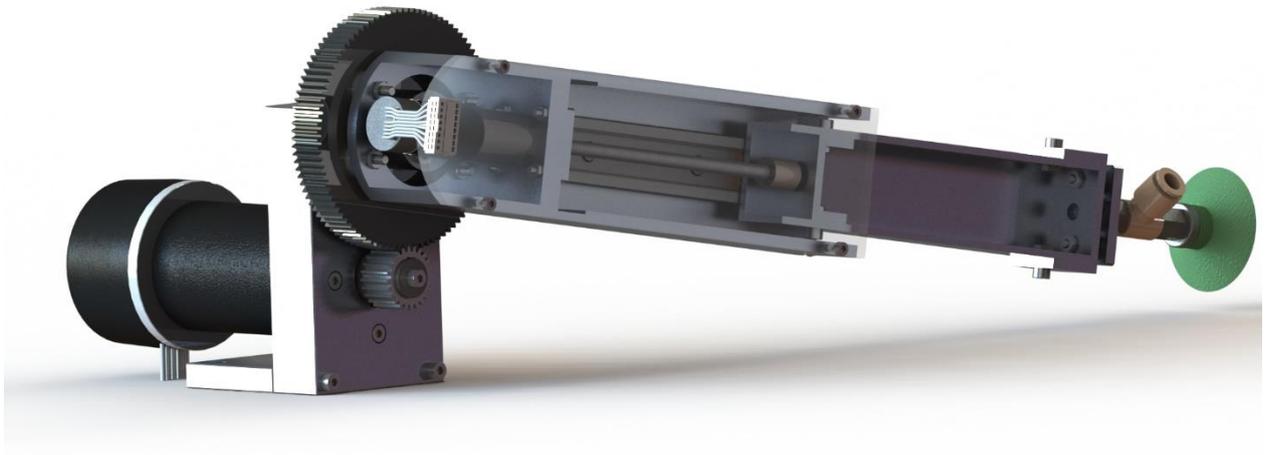


FIGURA 2.2, ASSIEME COMPLETO.



FIGURA 2.3.

### 2.2.1 Gruppo rotante

Per ottenere il movimento rotativo, si è pensato di utilizzare un motore in serie a un riduttore epicicloidale<sup>2</sup>. Il compito di questo elemento è, come suggerisce il nome, quello di ridurre la velocità angolare che il motore gli fornisce in ingresso, in modo da renderla idonea all'applicazione. La misura della riduzione è chiamata appunto *rapporto di riduzione* definito come:

$$\tau = \frac{\Omega_{out}}{\Omega_{in}}$$

Dove, con  $\Omega_{in,out}$  si intendono rispettivamente le velocità di ingresso e uscita nel riduttore. In fase di progetto sarà opportuno determinare il corretto azionamento tra quelli disponibili a catalogo, occorre precisare che se da un lato questo riduce la velocità angolare, dall'altro moltiplica, a meno del rendimento, la coppia che riceve in ingresso dal motore. Il gruppo motoriduttore viene fornito già assemblato e presenta una forma cilindrica compatta, come in figura 2.4.



FIGURA 2.4, MOTORIDUTTORE MAXON.

Si è pensato di fissare un azionamento simile a questo sul telaio del braccio tramite i fori filettati in testa al riduttore, nel cui albero verrà montata una ruota dentata, che ingranerà su di un'altra più grande. Così facendo il moto rotatorio viene ulteriormente ridotto e rinviato ad un altro asse di rotazione. È quindi necessario realizzare un mozzo sul telaio, per alloggiare l'albero su cui verrà montata la seconda ruota dentata. Dal momento che la ruota motrice deve ingranare con questa seconda ruota, supponendole a denti dritti e profilo normalizzato, occorre che l'interasse tra le due sia pari alla somma dei due raggi primitivi. Si è optato per

---

<sup>2</sup> Riduttore in cui almeno un asse di rotazione delle ruote dentate al suo interno è mobile.

un rapporto di riduzione pari a 4, con la ruota motrice a 24 denti e quella condotta a 95 denti e modulo delle ruote  $m=1$  mm. Per chiarire quanto appena detto si osservi la fig. 2.5 del solo telaio, su cui verranno alloggiati i componenti appena descritti e la fig. 2.6 in cui sono presenti il motoriduttore e l'ingranaggio.



FIGURA 2.5 TELAIO CAD.

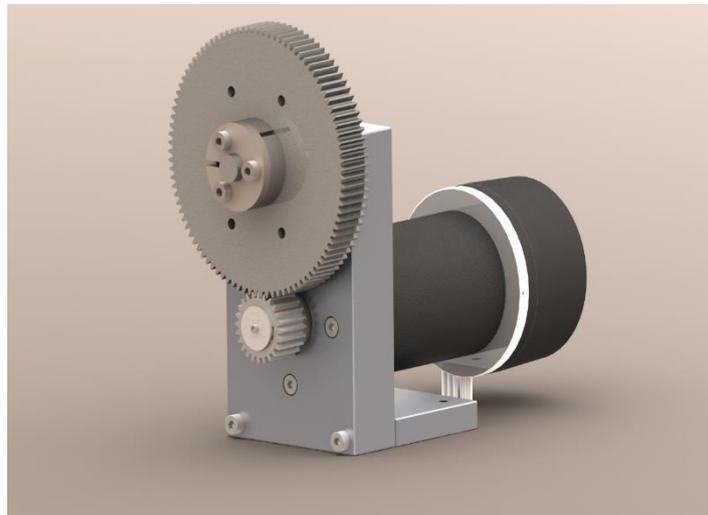


FIGURA 2.6 INGRANAGGIO CAD.

Nella ruota più grande vengono realizzati 4 fori passanti, in modo da poterla collegare tramite bulloni, al membro da mettere in rotazione. Per realizzare un vincolo simile ad una coppia rotoidale<sup>3</sup>, occorre collegare l'albero al telaio in modo da consentire una rotazione con minima presenza di attriti e bloccare il movimento in direzione assiale. Allo scopo di ridurre l'aderenza sono state impiegate una boccia flangiata e una ralla reggispinta; entrambe realizzate in PTFE composito

---

<sup>3</sup> Il concetto di coppia rotoidale è ideale e non prevede la presenza di giochi e attriti

della SKF<sup>4</sup>, adatte anche al funzionamento a secco. Per poter bloccare boccole, albero e ruota dentata si è utilizzata una tecnologia che si pone in alternativa alle classiche linguette, ovvero un *calettatore*, visibile in fig 2.7. Come suggerisce il nome, è un organo atto a bloccare insieme, mozzo e albero stringendo gradualmente le viti secondo un preciso ordine. Questo dispositivo consente di riferire con precisione, il mozzo della ruota all'albero, in direzione assiale. Una volta fissati questi due elementi si inserisce la boccia flangiata nel mozzo e successivamente l'albero, infine si blocca anche questa estremità con una vite e una rondella. Si può visualizzare la vista esplosa di quanto spiegato fino ad ora in fig 2.8.

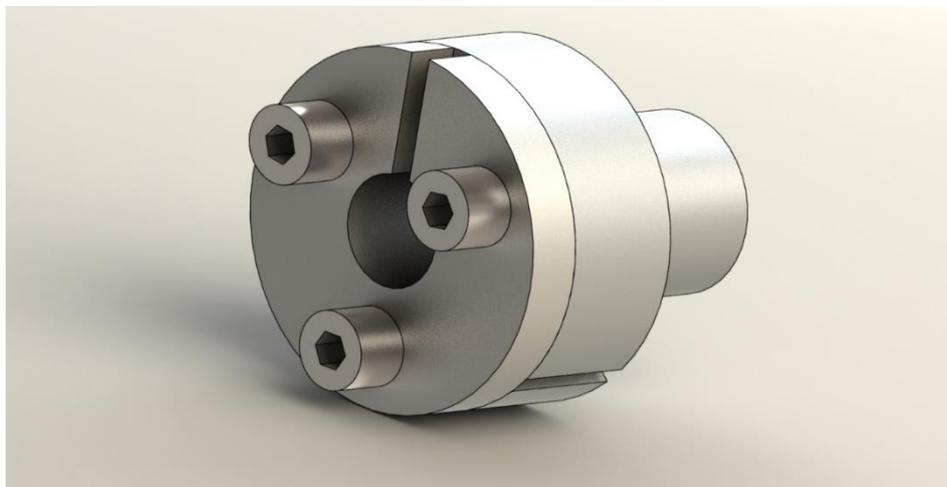


FIGURA 2.7, CALETTATORE CAD.

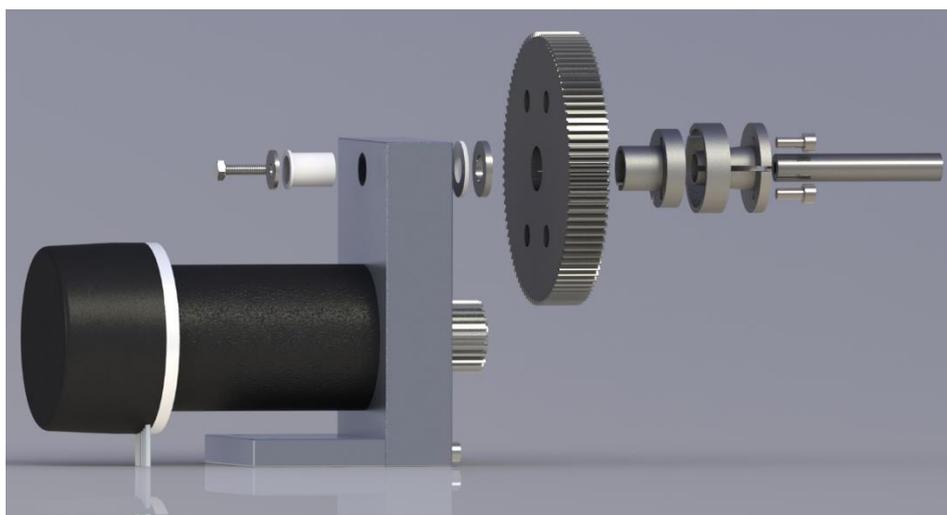


FIGURA 2.8 ESPLOSO CAD.

---

<sup>4</sup> Tutte le specifiche dei componenti vengono riportate nella distinta base, presente nel capitolo 3.

Azionando il motoriduttore, l'ingranaggio comincerà a ruotare e tutto ciò che viene reso solidale alla ruota grande, gira con essa.

## 2.2.2 Gruppo traslante

Come accennato prima, sono stati realizzati 4 fori sulla ruota dentata condotta, in modo da poterla collegare al resto del braccio. Ciò a cui si vuole arrivare, è una parte che contenga un meccanismo in grado di farle variare la propria lunghezza, cioè di allungarsi e che contenga all'estremità un elemento in grado di afferrare oggetti. È stata scelta una ventosa per svolgere questo compito. Con la funzione di telaio, da collegare alla ruota dentata tramite bulloni, si è scelto un profilo commerciale a C in alluminio. All'interno della C verrà alloggiato il meccanismo che consente l'allungamento. Per realizzare la coppia prismatica, verrà utilizzata una guida con un carrello a ricircolo di sfere che trasla al suo interno. Occorre quindi movimentare questo meccanismo, per farlo si collega il carrello alla chiocciola di una vite senza fine; il collegamento avviene con un membro lavorato alle macchine utensili. Facendo ruotare la vite, la chiocciola tenderebbe a rimanerle solidale, ma dal momento che non può ruotare poiché collegata al carrello, questa avanza trascinando quest'ultimo, che può scorrere nella direzione di sviluppo del braccio dove viene alloggiata la guida. Allo scopo di ottenere quanto detto, è stato utilizzato un motore collegato ad una vite con filetto metrico, questo tipo di meccanismo è denominato *spindle drive*. L'azionamento è composto da un cilindro cavo contenente un cuscinetto a sfere radiale e uno assiale, quindi la vite è in grado di resistere fino a un valore limite di forza applicata; sempre all'interno del cilindro cavo, si può alloggiare un riduttore collegato alla vite nel caso fosse necessario. Lo *spindle drive* viene fornito dalla ditta con una flangia per il montaggio ed è visibile in fig 2.9.

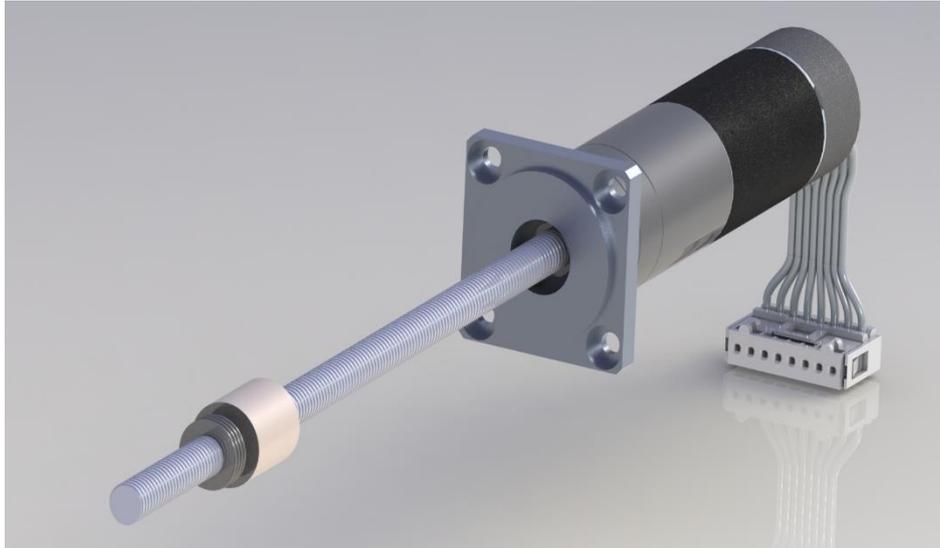


FIGURA 2.9 SPINDLE DRIVE CAD.

La relazione che lega la velocità di traslazione  $v_L$  della chiocciola rispetto alla velocità di rotazione  $n$  della vite è:

$$v_L = \frac{p n}{60}$$

Dove con  $p$ , si è indicato il passo in millimetri della vite,  $n$  è misurata in rpm e  $v_L$  in mm/s. In base a quanto velocemente il meccanismo si deve muovere, verrà scelto il motore e il passo della vite.

La guida è un profilo metallico fig.2.10, su cui scorre un carrello dotato di sfere, queste rotolando, minimizzano l'attrito. Affinché il tutto funzioni correttamente è necessario che l'asse della vite sia parallelo all'asse della guida; se così non fosse il carrello si usurerebbe precocemente per poi rompersi. Per garantire tale precisione occorre eseguire sul profilo a C delle spianature, una per alloggiare la guida e una per poter inserire un setto su cui montare la flangia che sorregge il motoriduttore. La spianatura per il setto serve per riferirlo correttamente all'interno del profilo. Si noti in fig. 2.11-2.12 che oltre alle spianature, sono presenti diversi fori, necessari per il collegamento delle varie altre parti che andiamo ora a illustrare.



FIGURA 2.10, GUIDA LINEARE CAD.

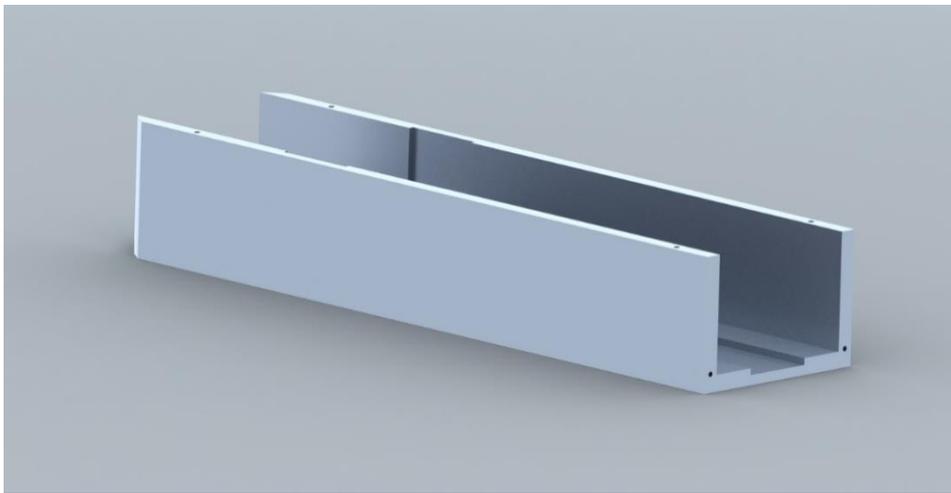


FIGURA 2.11, PROFILO A "C" CAD.

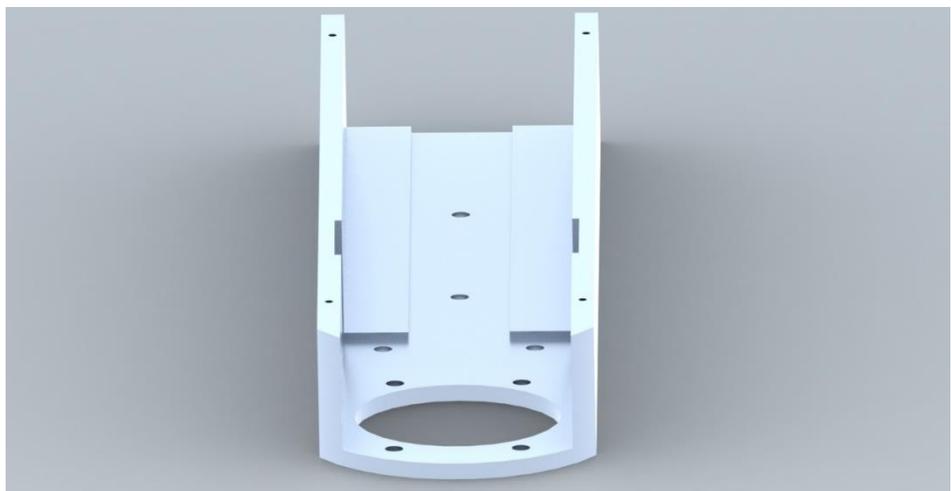


FIGURA 2.12 .

Sono state descritte le parti del meccanismo che permettono il movimento assiale, ma non si è ancora parlato della sua struttura completa. Essa è realizzata mediante un profilo a C, sempre in alluminio, ma di dimensioni ridotte rispetto al precedente. Questo secondo profilo è collegato alla base con il carrello, già dotato di fori, mediante due bulloni. Così facendo la parte traslante ha due estremità libere: una di queste si collega alla chiocciola, che come si vede dalle immagini precedenti, è filettata. Per realizzare il collegamento occorre lavorare alle macchine utensili una piastra in cui viene realizzata una madre vite, nella quale la chiocciola va a far presa. Per riassumere quanto detto fino ad ora si osservi la fig. 2.13.

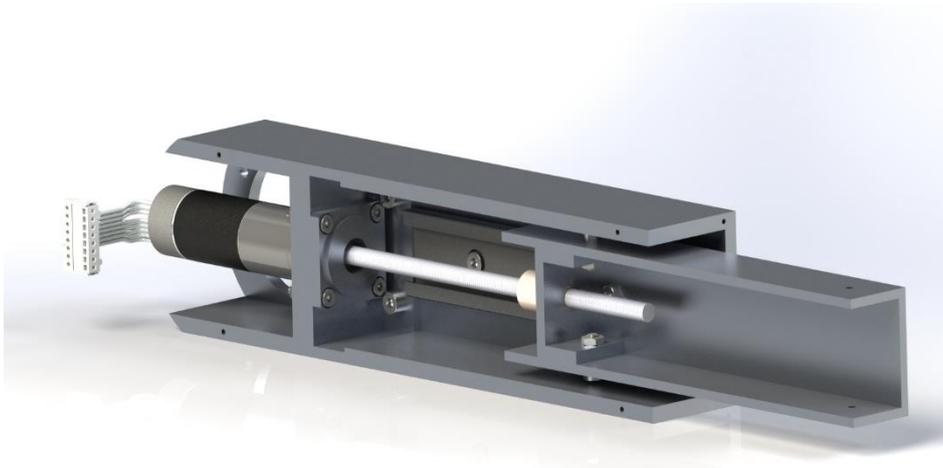


FIGURA 2.13 .

### 2.2.3 Organo terminale

Per realizzare la presa di oggetti nei bracci robotici si utilizzano spesso pinze robotiche, a loro volta attuate, oppure delle ventose collegate a compressori. Generando depressione tra la superficie della ventosa e l'oggetto, garantiscono la presa. Allo stato attuale, non essendo ancora noto cosa esattamente il robot dovrà fare, la selezione è ricaduta sull'oggetto più economico, ovvero la ventosa. Nulla vieta però in un futuro, di sostituirla con un meccanismo più complesso. La scelta di questo componente è stata fatta osservando i cataloghi della ditta S.M.C. che opera nel settore pneumatico. È stato selezionato il modello ZPR 50 G 06 B8, in silicone con diametro di 50 mm e attacco per il vuoto, laterale. La ditta fornisce la ventosa giuntata ad un filetto femmina M8, per poterla fissare.

## 2.2.4 Sensori

L'altra estremità del profilo scorrevole, viene collegata ad una seconda piastra, che presenta due fori filettati, questi servono per poter avvitare due *celle di carico*. Queste sono strumenti atti a misurare la forza che viene scambiata tra due elementi, ne esistono di diverse forme, nell'applicazione in questione, sono state utilizzate quelle di figura 2.14. Le celle sono montate in coppia per far sì che i momenti flettenti che si possono generare durante il movimento, non vadano ad influire sulla misura della forza. A loro volta gli altri due filetti delle celle sono collegati ad un'altra piastra, questa possiede una madrevite per far sì che la ventosa<sup>5</sup> possa essere fissata ad essa mediante un gambo filettato e un dado.



FIGURA 2.14, CELLA DI CARICO.

Per permettere al carrello di fermarsi prima di uscire dalla guida, occorre utilizzare degli switch, ovvero dei sistemi che fungono da interruttore. Realizzando degli ostacoli ai terminali della guida, quando la parte traslante arriva a contatto con questi, un segnale elettrico generato dalla presenza dell'impedimento, comunica all'unità di controllo di arrestarsi. A tale scopo è stata fissata nell'estremo del profilo a C più grande, una piastra di fine corsa; mentre nella parte opposta, è presente il setto porta flangia in rilievo rispetto alla guida. È stato poi collegato al medesimo profilo uno strato di plexiglass, con lo scopo di proteggere i meccanismi interni. Dalla fig. 2.15, si possono osservare tutti i componenti montati nel profilo.

---

<sup>5</sup> L'utilizzo delle ventose per il sollevamento è molto comune nelle applicazioni industriali per il sollevamento dei pannelli.

Collegandolo la parte ora descritta mediante i 4 bulloni, con la ruota dentata di cui si era parlato precedentemente, si ottiene l'assieme definitivo del braccio robotico riportato nelle figure 2.2, 2.3. Viene ora presentato per chiarezza la procedura di montaggio dell'intero assieme.

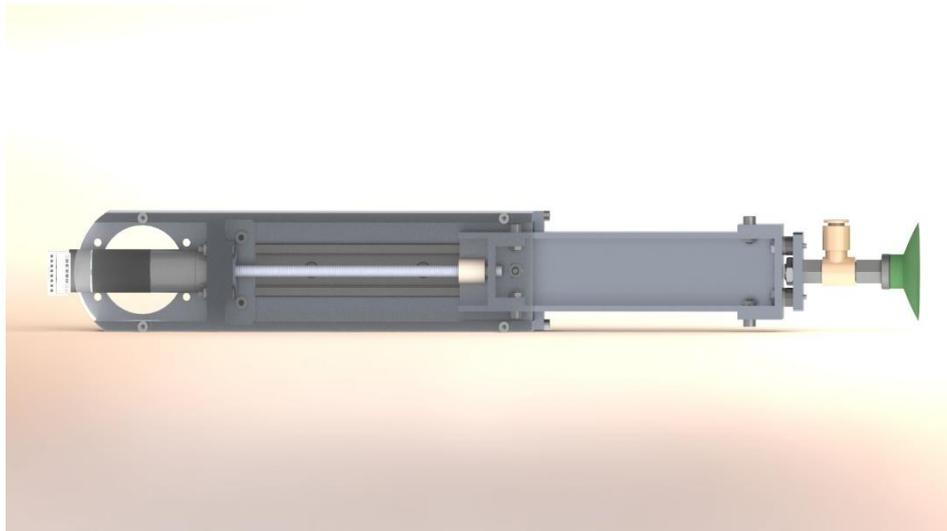


FIGURA 2.15, BRACCIO COMPLETO CAD.

## 2.2.5 Montaggio

Per ottenere l'assieme completo, è necessario seguire un preciso ordine di montaggio. Si dovranno montare separatamente il gruppo comprendente il telaio, l'attuatore e l'ingranaggio e il gruppo che comprende profilo a C e parte traslante. Questi per semplicità vengono indicati rispettivamente come gruppo rotante e gruppo traslante; anche se il secondo gruppo è tutto posto in rotazione dalla ruota condotta e solo alcuni componenti interni traslano.

- montaggio gruppo rotante:

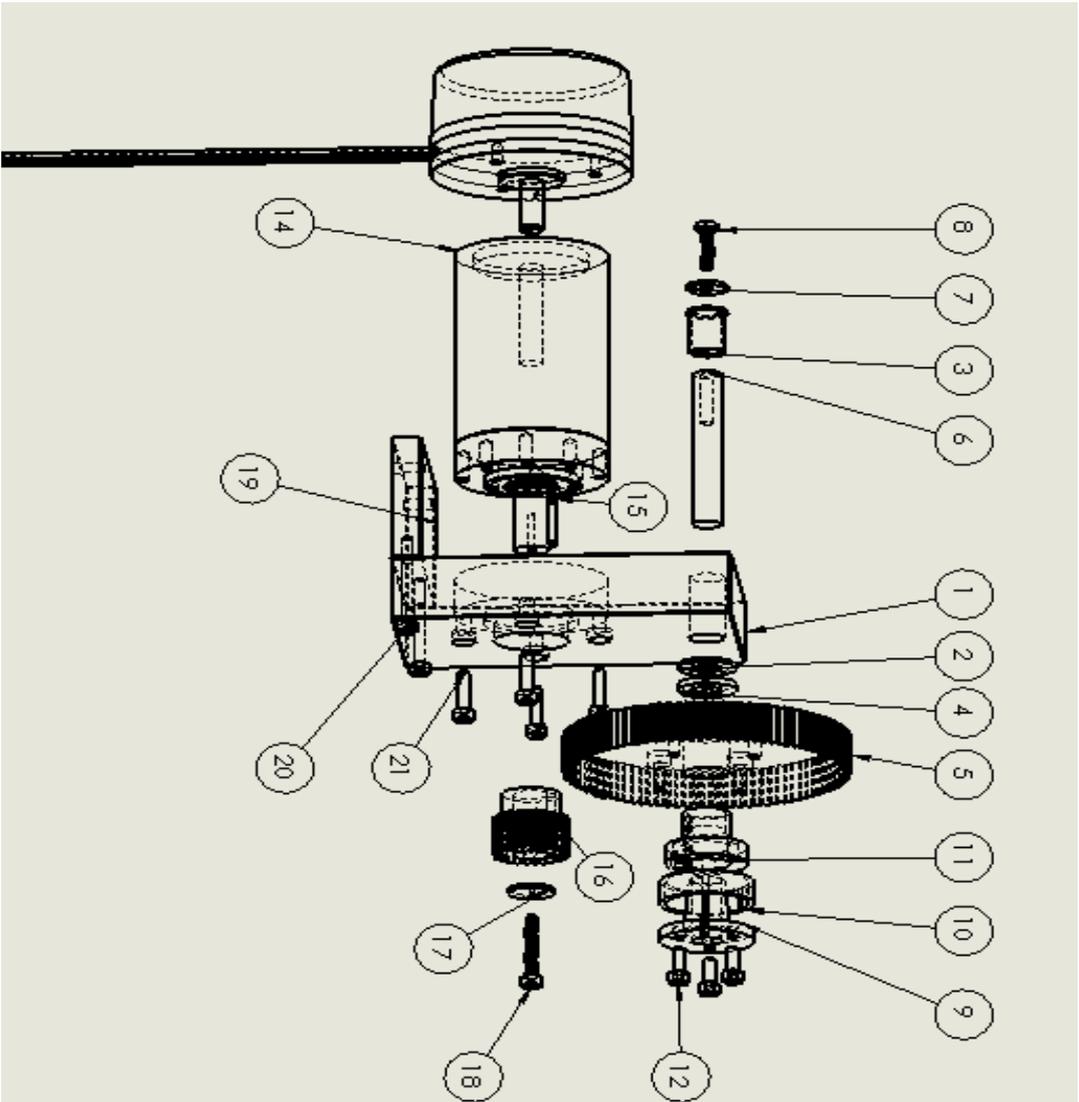
per chiarezza si faccia riferimento alla tavola 1 riportata in seguito. Si comincia montando la boccia flangiata (3) sull'albero (6), poi a forza si collega questo al mozzo del telaio; quindi si posiziona lo spessore (7) sopra la boccia e si serra la vite (8), che va a far presa sul foro filettato presente sull'estremità dell'albero. Successivamente viene fatta scorrere sul lato opposto dell'albero, la boccia reggispinta (2) finché non è a contatto con il telaio. Vengono poi inseriti dallo stesso lato: lo spessore (4), la ruota dentata (5) e il calettatore (9-10-11). Si mantengono questi in contatto con un certo carico, assieme alla boccia reggispinta; ora si

serrano nell'ordine prestabilito dalla casa costruttrice, le viti del calettatore (12). Si ottiene così il montaggio dell'albero con la ruota condotta, che può ruotare attorno all'asse del mozzo del telaio. Ora si posiziona il motoriduttore (14) nella sede ricavata nel telaio e lo si fissa con questo mediante viti (12); queste vanno a far presa sui fori filettati presenti nella testa del motore. Fissando la ruota dentata (16) con l'albero motore, si realizza il montaggio completo dell'assieme in figura 2.7.

- montaggio gruppo traslante:

con riferimento alla tavola 2, partendo dal profilo a C (1) in alluminio, precedentemente lavorato, si posiziona la guida Igus (2) all'interno della spianatura appositamente ricavata, poi si serrano i 2 bulloni (10). Il motoriduttore (3) con la vite metrica viene fornito dalla ditta con la flangia per il montaggio, si fa passare il corpo del motoriduttore all'interno del foro del setto (4), infilandolo all'interno di questo la parte posteriore del motore; una volta che la flangia e la faccia del setto sono in contatto, si possono fissare con i 4 bulloni (7). Ora è possibile accostare il setto e il profilo e collegare i due membri. È necessario procedere montando a parte il membro che effettivamente compie la traslazione e collegarlo successivamente alla chiocciola. Si prende quindi il profilo a C 40x25x3 (15) e mediante bulloni si collegano, il membro che dovrà essere collegato alla chiocciola (14) e il membro che verrà collegato alle celle di carico (18). Presa la ventosa (25) le si avvita il gambo filettato (24) nella madrevite e si rendono solidali ventosa e piastra (20) stringendo il dado (26). Si avvitano le celle di carico (19) sulla piastra che presenta due fori filettati. L'assieme composto da ventosa piastra e celle viene accostato al membro all'estremità del profilo, serrando con dei dadi (21) i gambi delle celle a tale membro si realizza il montaggio quasi completo della parte traslante. Per renderlo, occorre collegare nella base del profilo (15) il carrello (5) mediante le apposite viti (8). Si procede inserendo il carrello nella guida; avvitando la chiocciola (6) nella madrevite del membro, collegato al profilo solidale al carrello, si completa il montaggio dell'assieme in figura 2.15.

È sufficiente accostare i due assiemi montati, ponendo tra la ruota condotta e il profilo, 4 spessori e rendere solidale i due membri mediante i 4 bulloni.



| Num. articolo | Num. parte  | Quantità |
|---------------|---|----------|
| 1             | Telajo  | 1        |
| 2             | Boccola reggi-spinta  | 1        |
| 3             | Boccola flangiata   | 1        |
| 4             | Spessore boccola  | 1        |
| 5             | Ruota m1 295  | 1        |
| 6             | Albero  | 1        |
| 7             | Rondella  | 1        |
| 8             | ISO 4017 - M4 x 1.6-S                                       | 1        |
| 9             | Anello interno  | 1        |
| 10            | Anello distanziatore  | 1        |
| 11            | Anello esterno  | 1        |
| 12            | M4M4  | 3        |
| 13            | ec 60 flat 100w   | 1        |
| 14            | GPS2C   | 1        |
| 15            | albero con linguetta  | 1        |
| 16            | ISO - Spur gear 1M 24T<br>20PA 15FW ---<br>S24B20H25L12.0S1 | 1        |
| 17            | rondella blocco<br>linguetta                                | 1        |
| 18            | ISO 4762 M4 x 25 - 25S                                      | 1        |
| 19            | Telajo pt. 2  | 1        |
| 20            | ISO 4762 M4 x 35 - 20N                                      | 2        |
| 21            | ISO 4762 M4 x 16 - 16N                                      | 4        |

TAVOLA 1

| Num. articolo | Num. parte                           | Quantità |
|---------------|--------------------------------------|----------|
| 1             | Pro filo 60x40x5                     | 1        |
| 2             | Guida bus N27                        | 1        |
| 3             | Motoriduttore spirale                | 1        |
| 4             | Setto                                | 1        |
| 5             | Carrello bus N27                     | 1        |
| 6             | Chiocciola Maxon                     | 1        |
| 7             | ISO 4762 M8 x 1,6 - 1,65             | 4        |
| 8             | ISO 4762 M4 x 6 - 65                 | 2        |
| 9             | ISO 4762 M4 x 10 - 105               | 4        |
| 10            | ISO 4762 M4 x 8 - 85                 | 2        |
| 11            | ISO 4762 M4 x 12 - 125               | 2        |
| 12            | ISO 4762 M1,6 x 6 - 65               | 4        |
| 13            | ISO 4762 M1,6 x 8 - 85               | 2        |
| 14            | Rastrta collegam. chiocciola         | 1        |
| 15            | Pro filo 40x25x3                     | 1        |
| 16            | Rastrta fine corsa                   | 1        |
| 17            | Copertura plexiglass                 | 1        |
| 18            | Rastrta collegamento cella di carico | 1        |
| 19            | Cella di carico                      | 2        |
| 20            | Rastrta collegam. ventosa            | 1        |
| 21            | M2,5                                 | 2        |
| 22            | ISO - 4035 - M8 - N                  | 4        |
| 23            | ISO - 4035 - M4 - N                  | 10       |
| 24            | Gambo filettato M8                   | 1        |
| 25            | Ventosas c.m.                        | 1        |
| 26            | ISO - 8675 - M8 x 1,0 - N            | 1        |

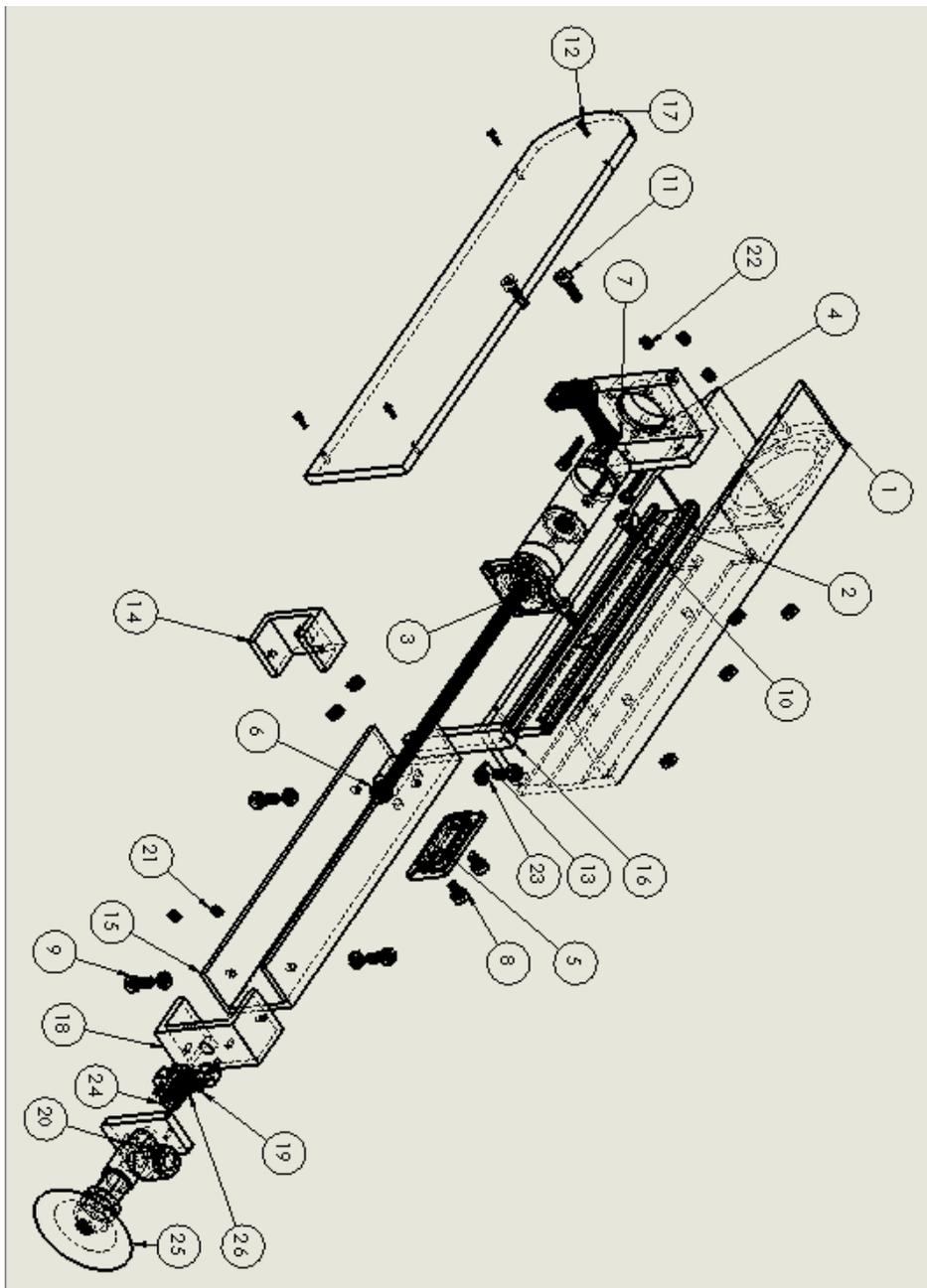


TAVOLA 2

Ora che la geometria è nota, si può passare alla fase successiva, in particolare, verrà fatta una simulazione con il software ADAMS, utilizzando un modello semplificato del modello presentato ora.

## 3 Scelta degli azionamenti

### 3.1 Modello numerico

#### 3.1.1 Proprietà di massa

Il tipo di azionamento che verrà scelto, dipende fortemente da quali funzioni il robot dovrà svolgere, per questo motivo è necessaria una simulazione; in questo caso viene fatta sul programma ADAMS, in cui vengono definiti i movimenti da eseguire e la velocità di questi. In base a ciò si stabiliscono coppia, velocità angolare e quindi potenza richiesta. Per poter effettuare la simulazione occorre conoscere le proprietà di massa del braccio robotico, in particolare peso, e matrici dei momenti di inerzia. Il modo più semplice per ottenere tali dati è utilizzare gli strumenti di SOLIDWORKS; esiste infatti una libreria dei materiali, di maggior utilizzo a livello ingegneristico. È sufficiente assegnare ad ogni componente il materiale di cui è composto selezionandolo dalla libreria e il programma calcolerà il suo peso. Quando invece il materiale non è noto si procede considerando il volume dell'oggetto e il peso che deve avere, si calcola la densità, per poi ricercare un elemento che ne presenti una simile e lo si assegna alla parte. Una volta completato questo processo, con la funzione proprietà di massa, il software fornisce i dati prima indicati. Ciò su cui verrà eseguita la simulazione è un assieme semplificato, più simile al meccanismo di figura 2.1 che di figura 2.2. Pertanto occorre definire le proprietà di massa per la parte rotante e per la parte traslante. La prima comprende tutto quello che viene messo in rotazione dalla ruota motrice, quindi ruota condotta e tutte le parti a valle di essa. Queste parti infatti, sono quelle che l'azionamento collegato al telaio deve riuscire a mettere in rotazione. La seconda comprende invece tutto ciò che è solidale alla chiocciola, il motore collegato allo *spindle drive* dovrà vincere la coppia di attrito che si genera a causa del carico e del peso di questi componenti e gli attriti tra carrello e guida. Tutti i dati forniti dal programma vengono riferiti al centro di massa e ad un centro di coordinate opportunamente scelto. L'out-put fornito da SOLIDWORKS per le due parti si può osservare nelle tabelle 1,2 e 3, in cui si può vedere il peso dei sotto assiami del braccio in questione. La parte traslante pesa circa 300g, mentre quella rotante, comprendente la prima, circa 1600g.

TABELLA 1.

| parte traslante ritratta   |                   |                   |
|--|-------------------|-------------------|
| Proprietà di massa di componenti selezionati   |                   |                   |
| Sistema di coordinate: Sistema di coordinate1  |                   |                   |
| Massa = 312.69 grammi  |                   |                   |
| Volume = 82445.86 millimetri cubici  |                   |                   |
| Area superficie = 56791.51 millimetri quadrati   |                   |                   |
| Centro di massa: ( millimetri )  |                   |                   |
| X = 188.61   |                   |                   |
| Y = 70.95  |                   |                   |
| Z = -0.45  |                   |                   |
| Asse principale di inerzia e momenti principali di inerzia: ( grammi * millimetri quadrati ) |                   |                   |
| Nel centro della massa.  |                   |                   |
| Ix = (-1.00, -0.03, 0.01)  | Px = 57957.01     |                   |
| Iy = ( 0.01, 0.00, 1.00)   | Py = 1377882.16   |                   |
| Iz = (-0.03, 1.00, 0.00)   | Pz = 1402913.08   |                   |
| Momenti di inerzia: ( grammi * millimetri quadrati )   |                   |                   |
| Presi nel centro di massa e allineati con il sistema di coordinate risultato.                |                   |                   |
| Lxx = 59116.80   | Lxy = 38477.53    | Lxz = -8749.12    |
| Lyx = 38477.53   | Lyy = 1401811.33  | Lyz = -263.50     |
| Lzx = -8749.12   | Lzy = -263.50     | Lzz = 1377824.11  |
| Momenti di inerzia: ( grammi * millimetri quadrati )   |                   |                   |
| Al sistema di coordinate di output.  |                   |                   |
| Ixx = 1633120.93   | Ixy = 4222797.34  | Ixz = -35132.86   |
| Iyx = 4222797.34   | Iyy = 12525877.99 | Iyz = -10187.80   |
| Izx = -35132.86  | Izy = -10187.80   | Izz = 14075769.74 |

TABELLA 2.

| Parte traslante estesa  |                        |                        |
|---|------------------------|------------------------|
| Proprietà di massa di componenti selezionati  |                        |                        |
| Sistema di coordinate: Sistema di coordinate1   |                        |                        |
| Massa = 312.69 grammi   |                        |                        |
| Volume = 82445.86 millimetri cubici   |                        |                        |
| Area superficie = 56791.51 millimetri quadrati  |                        |                        |
| Centro di massa: ( millimetri )   |                        |                        |
|   | X = 298.61             |                        |
|   | Y = 70.95              |                        |
|   | Z = -0.45              |                        |
| Asse principale di inerzia e momenti principali di inerzia:<br>( grammi * millimetri quadrati )   |                        |                        |
| Nel centro della massa.   |                        |                        |
| $I_x = (-1.00, -0.03, 0.01)$  |                        | $P_x = 57957.01$       |
| $I_y = ( 0.01, 0.00, 1.00)$   |                        | $P_y = 1377882.16$     |
| $I_z = (-0.03, 1.00, 0.00)$   |                        | $P_z = 1402913.08$     |
| Momenti di inerzia: ( grammi * millimetri quadrati ) presi<br>nel centro di massa e allineati con il sistema di coordinate<br>risultato |                        |                        |
| $L_{xx} = 59116.80$   | $L_{xy} = 38477.53$    | $L_{xz} = -8749.12$    |
| $L_{yx} = 38477.53$   | $L_{yy} = 1401811.33$  | $L_{yz} = -263.50$     |
| $L_{zx} = -8749.12$   | $L_{zy} = -263.50$     | $L_{zz} = 1377824.11$  |
| Momenti di inerzia: ( grammi * millimetri quadrati )<br>Al sistema di coordinate di output.   |                        |                        |
| $I_{xx} = 1633120.93$   | $I_{xy} = 6663116.46$  | $I_{xz} = -50520.01$   |
| $I_{yx} = 6663116.46$   | $I_{yy} = 29284637.99$ | $I_{yz} = -10187.80$   |
| $I_{zx} = -50520.01$  | $I_{zy} = -10187.80$   | $I_{zz} = 30834529.75$ |

TABELLA 3.

| parte rotante   |              |                   |  |
|---|--------------|-------------------|--|
| Proprietà di massa di componenti selezionati  |              |                   |  |
| Sistema di coordinate: Sistema di coordinate1   |              |                   |  |
|   |              |                   |  |
| Massa = 1641.98 grammi  |              |                   |  |
|   |              |                   |  |
| Volume = 390625.97 millimetri cubici  |              |                   |  |
|   |              |                   |  |
| Area superficie = 184908.33 millimetri quadrati   |              |                   |  |
|   |              |                   |  |
| Centro di massa: ( millimetri )   |              |                   |  |
|   |              | X = 31.98         |  |
|   |              | Y = 53.01         |  |
|   |              | Z = 0.00          |  |
| Asse principale di inerzia e momenti principali di inerzia:<br>( grammi * millimetri quadrati )                 |              |                   |  |
| Nel centro della massa.   |              |                   |  |
| Ix = (-1.00, -0.09, 0.00)   |              | Px = 1455113.23   |  |
| Iy = ( 0.00, 0.00, 1.00)  |              | Py = 7306765.27   |  |
| Iz = (-0.09, 1.00, 0.00)  |              | Pz = 7343526.15   |  |
|   |              |                   |  |
| Momenti di inerzia: ( grammi * millimetri quadrati ) presi<br>nel centro di massa e allineati con il sistema di |              |                   |  |
| Lxx = 1498498.51  | Lxy = 50357  | Lxz = 111.96      |  |
| Lyx = 503575.36   | Lyy = 73001  | Lyz = 33.84       |  |
| Lzx = 111.96  | Lzy = 33.84  | Lzz = 7306765.29  |  |
|   |              |                   |  |
| Momenti di inerzia: ( grammi * millimetri quadrati )<br>Al sistema di coordinate di output.                     |              |                   |  |
| Ixx = 6112973.60  | Ixy = 328749 | Ixz = -8.13       |  |
| Iyx = 3287492.62  | Iyy = 897966 | Iyz = -165.21     |  |
| Izx = -8.13   | Izy = -165.2 | Izz = 13600780.32 |  |

### 3.1.2 Simulazione

Ciò che si richiede di simulare è una rotazione di 180° verso l'alto e una verso il basso a partire dalla posizione orizzontale del profilo a C; la parte traslante durante la rotazione, partendo dalla configurazione completamente ritratta, dovrà stendersi e rientrare. Per la parte rotante il caso più drastico risulta quello verso l'alto, mentre per quella traslante quello verso il basso; vengono quindi scelti gli azionamenti in base ai risultati di queste due situazioni. Dal momento che il compito del banchetto, è quello di muovere oggetti, per rappresentare questa situazione, si applica alla ventosa un *payload* di 1Kg. Viene poi scelto il tempo entro il quale il movimento deve avvenire, in questo caso 2s, per riprodurre la situazione di uno spostamento rapido di un oggetto.

### 3.1.3 Risultati simulazione

Le proprietà di massa appena viste vengono assegnate all'assieme in ADAMS e vengono decisi i cicli di movimento che il robot deve effettuare. Occorre precisare che la coppia richiesta per poter effettuare la rotazione del profilo, non è costante. Infatti il carrello, venendo azionato dal motore, causa la fuoriuscita della parte traslante e questo comporta una variazione delle caratteristiche inerziali. Per questo motivo, sono riportati i dati relativi alla parte traslante, sia in posizione ritratta, sia in posizione estesa. L'out-put di ADAMS fornisce i valori dei parametri di interesse, in diversi istanti di tempo in cui l'intervallo del ciclo viene suddiviso; in questo caso 300 istanti. Utilizzando gli strumenti grafici di Excel, vengono rappresentate nelle figure 3.1, 3.2, 3.3 le grandezze che interessano la parte traslante, mentre nelle fig. 3.4, 3.5, quelle relative alla parte rotante.

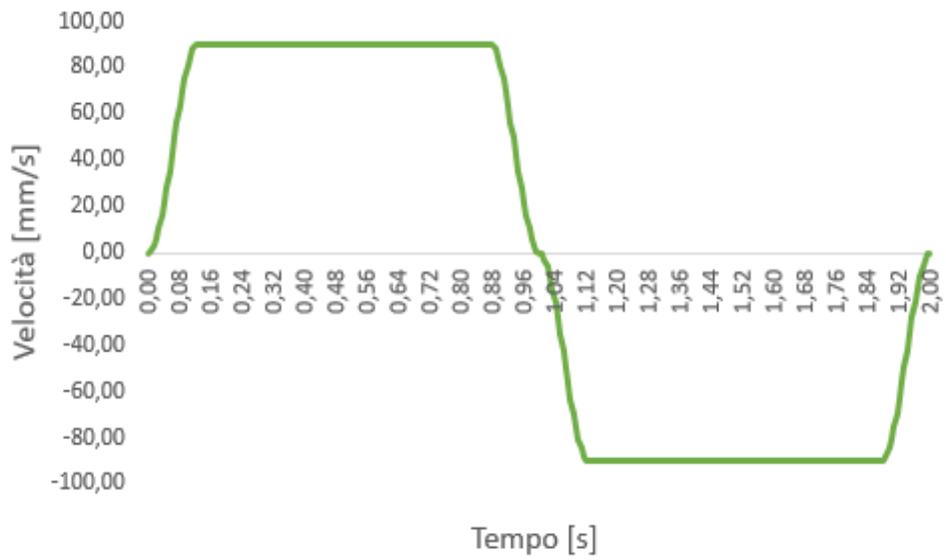


FIGURA 3.1.

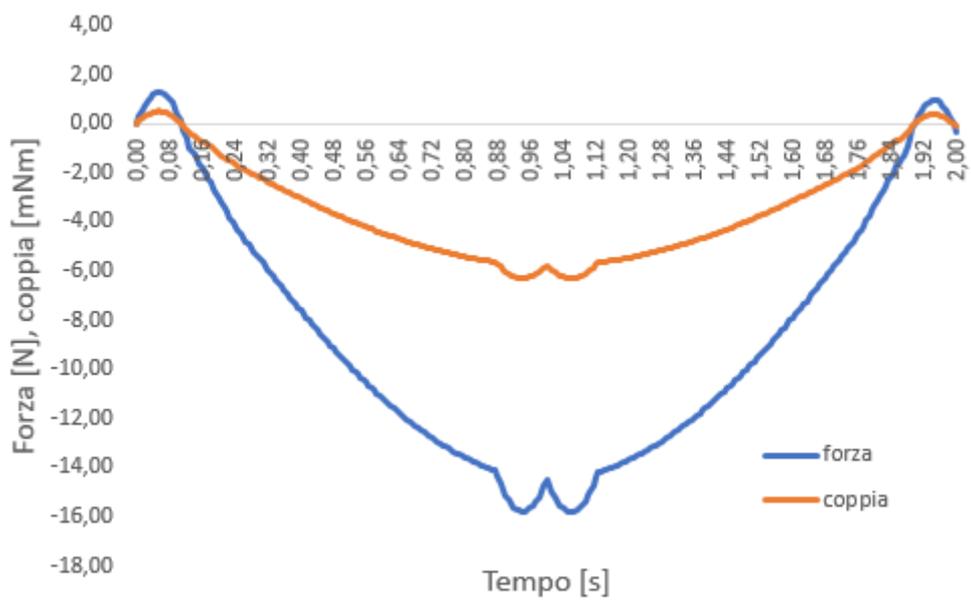


FIGURA 3.2.

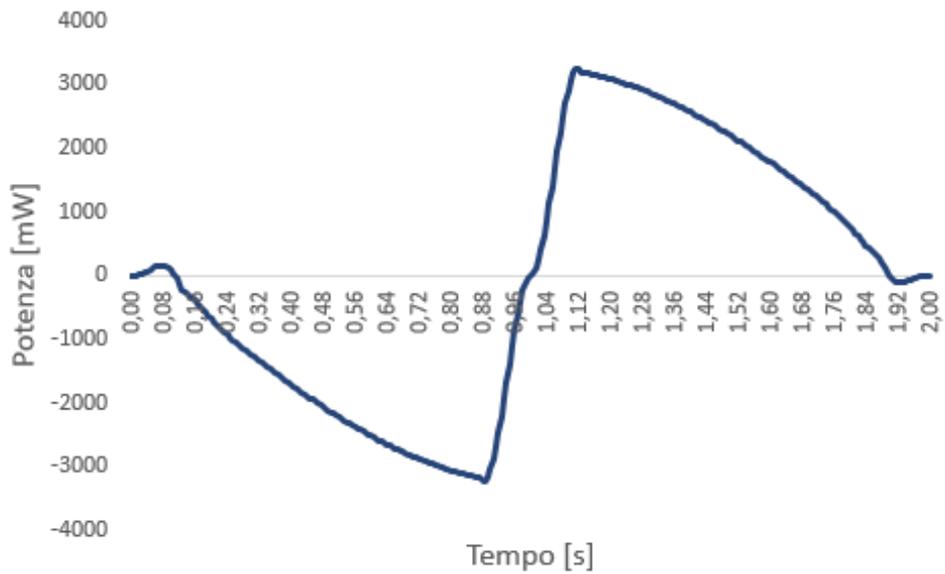


FIGURA 3.3.

Da questi grafici si possono osservare i valori che l'azionamento che si occupa della traslazione dovrà soddisfare, ovvero:

- Velocità massima del carrello  $v_{max} = 90 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$
- Forza massima applicata  $F = 15.8 \text{ N}$
- Potenza massima richiesta  $P = 3.2 \text{ W}$

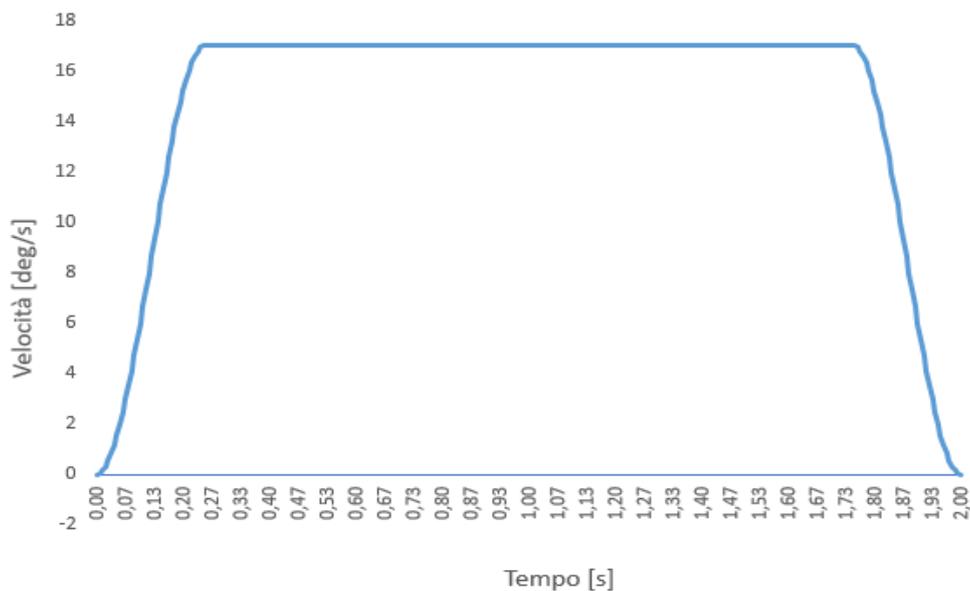


FIGURA 3.4.

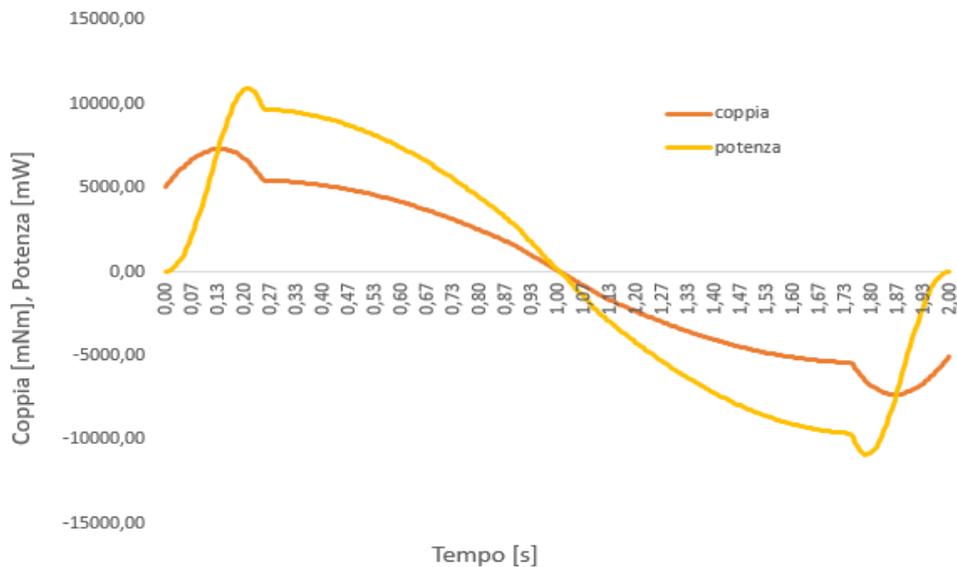


FIGURA 3.5.

I valori che deve soddisfare l'azionamento che permette la rotazione invece, risultano:

- Coppia massima,  $C_{\max} = 7.32 \text{ Nm}$
- Coppia RMS,  $C_{\text{rms}} = 4.5 \text{ Nm}$
- Velocità massima,  $\omega_{\max} = 17 \text{ rpm}$
- Velocità RMS,  $\omega_{\text{RMS}} = 15.3 \text{ rpm}$
- Potenza massima,  $P_{\max} = 10.9 \text{ W}$

Questi dati verranno utilizzati nel capitolo 3.4.

### 3.2 Calcolo azionamenti

In linea di massima si procede nel seguente modo, note coppia e velocità angolare, è possibile calcolare la potenza istantanea richiesta. Il motore dovrà essere scelto in modo che abbia una potenza nominale, maggiore di quella massima richiesta nel ciclo. Una volta scelta la taglia del motore è necessario selezionare un riduttore abbinabile con questo e verificare che velocità e coppia ridotte all'asse del motore possano essere da questo soddisfatte. Per far ciò, è possibile rappresentare a

blocchi il problema; una volta ridotte le grandezze all'albero motore, si fanno le verifiche appena dette. Prima di illustrare la scelta dei motoriduttori, occorre dare una panoramica delle varie tipologie di motori elettrici di maggior interesse industriale. Queste presentano diverse modalità di funzionamento e di conseguenza differenze costruttive. Nel caso in questione, si è deciso di utilizzare motori *brushless*, una tipologia di azionamenti piuttosto recente, ma ora molto impiegata, soprattutto nella robotica. Quindi vengono di seguito presentate alcune delle più comuni tipologie di motori elettrici, poi verrà introdotto il modello che ha permesso la scelta degli azionamenti usati nel banchetto didattico.

### 3.2.1 Motori elettrici

Un motore elettrico è una macchina che riceve potenza elettrica in ingresso e restituisce potenza meccanica in uscita. Il suo funzionamento si basa su forze di natura elettromagnetica che interagiscono tra un sistema di correnti e un campo magnetico. La prima classificazione che si può fare sui motori elettrici è differenziarli in motori in corrente continua (DC) e motori in corrente alternata (AC). Questi ultimi si possono suddividere in motori sincroni in cui la velocità di rotazione è un sottomultiplo della frequenza di alimentazione e asincroni in cui le due frequenze sono diverse. I motori sincroni, trovano minore impiego nell'industria, rispetto alle altre due tipologie a causa del costo elevato dovuto alla complessità costruttiva e dei limiti che si riscontrano quando si raggiungono elevate temperature. Viene ora mostrato il principio di funzionamento dei motori asincroni e dei DC.

- Motori asincroni, sono utilizzatissimi nell'industria grazie al loro basso costo, presentano due componenti principali, un rotore ed uno statore, visibili in figura 3.6.

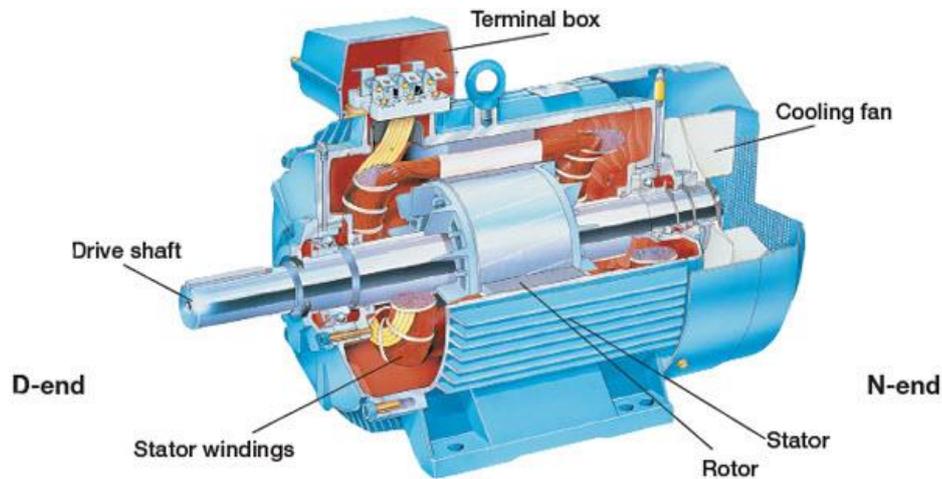


FIGURA 3.6, MOTORE ASINCRONO.

Lo statore è costituito da un pacco di lamierini a forma di corona circolare, con delle scanalature interne in cui vengono alloggiati gli avvolgimenti in rame, il tutto è collocato all'interno di un telaio in ghisa. Gli avvolgimenti sono alimentati da corrente trifase, quando un conduttore è attraversato da corrente, si genera un campo magnetico, ma essendo la corrente di tipo alternato, l'orientamento del campo varia nel tempo, si ottiene così un campo magnetico rotante. Per comprendere il funzionamento, si immagini di mettere un anello conduttore chiuso, all'interno degli avvolgimenti, poiché il campo magnetico ruota, per la *legge di Faraday*, una forza elettromotrice viene indotta sull'anello. Questa *f.e.m.* produce corrente all'interno dell'anello, si genera così un campo elettromagnetico nel rotore, che interagisce con quello dello statore generando forze che mettono l'anello in rotazione. Nella pratica al posto dell'anello magnetico a cui sopra si faceva riferimento, vengono utilizzati degli avvolgimenti chiusi in cortocircuito o delle strutture particolare, chiamate *a gabbia di scoiattolo*. La corrente viene indotta nelle barre e si genera la forza elettromotrice che pone in rotazione la gabbia. Ovviamente perché sia possibile il moto relativo tra i due elementi, occorre che questi non siano in contatto tra loro, il motore viene dimensionato in modo che ci sia un traferro d'aria di qualche decimo di millimetro. Per aiutare l'induzione elettromagnetica, all'interno della gabbia viene posto un pacco di lamine di acciaio forate al centro per ospitare l'albero del motore. Come prima accennato, la velocità di rotazione di un motore asincrono è inferiore alla velocità di rotazione del campo magnetico statorico. Detta  $f$  la frequenza di alimentazione,  $p$  il numero di coppie polari per fase, la velocità di rotazione del campo magnetico dello statore sarà:

$$n_s = \frac{60 f}{p}$$

questa è anche chiamata *velocità di sincronismo*. Chiamiamo  $n_r$  la velocità di rotazione del rotore, finché  $n_s - n_r > 0$  si ha la situazione sopra descritta, ma se il rotore raggiunge la velocità di sincronismo, non c'è più moto relativo tra il campo statorico e il rotore. In quest'ultimo caso non viene indotta alcuna f.e.m. nel rotore e quest'ultimo ha coppia nulla. Grazie all'effetto dello scorrimento, la velocità del rotore in condizioni nominali è sempre minore di un 3-6%; è il fenomeno dello scorrimento *slip* che consente la produzione della coppia. Dalla formula che definisce lo scorrimento è possibile esprimere la velocità di rotazione effettiva del rotore:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s}$$

Il valore dello scorrimento dipende dal carico presente sull'albero del motore, questo non è mai nullo a causa della resistenza con il rotore, quindi si può dire che la velocità del rotore non raggiunge mai quella di sincronismo, da qui il nome *motore asincrono*. Si possono osservare le curve caratteristiche di questi motori in figura 3.7. Questa tipologia di motore, deve la sua grandissima diffusione al basso costo di produzione, alla semplicità e robustezza costruttiva, alla quasi assente necessità di manutenzione e alla sua versatilità. Un difetto di questa tipologia di motori sta nell'inerzia del rotore, che essendo di notevole entità, rende difficile fasi di brusche accelerazioni.

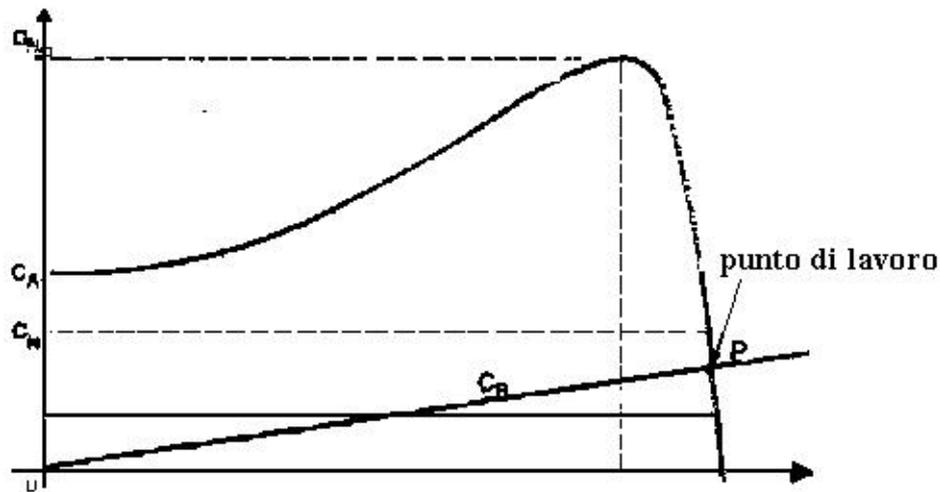


FIGURA 3.7.

- Motori DC, sono i primi motori elettrici ad essere stati inventati e trovano tutt'ora svariati campi di impiego, dai piccoli motorini presenti negli elettrodomestici con potenze di pochi W, fino ai motori ferroviari con svariati kW di potenza. Vengono ora citate due tipologie di questi motori, anche se ne esistono varie, in particolare i motori DC a spazzole e *brushless* che significa letteralmente, senza spazzole. Anche se entrambe le configurazioni funzionano in corrente continua, presentano caratteristiche costruttive differenti, vengono pertanto descritte separatamente.
  - Motori DC a spazzole:  
 sono composti da uno statore e un rotore, il primo ha il compito di generare un campo magnetico statico, il secondo è costituito da più avvolgimenti, ognuno dei quali è collegato ad un collettore a lamelle. Il collettore ha un certo numero di coppie di lamelle disposte in senso assiale, fra di loro elettricamente isolate, su cui strisciano le spazzole e a cui sono collegati gli avvolgimenti del rotore. Grazie a questo elemento si riesce a invertire due volte per ogni giro il verso della corrente elettrica in ogni avvolgimento. Essendo questi percorsi da corrente e situati in mezzo ad un campo magnetico, nascono delle forze elettrodinamiche che mettono in moto il rotore. Per comprendere meglio il funzionamento si veda la fig. 3.8 in cui si può osservare lo statore formato da nord e sud magnetico, che genera il campo magnetico rappresentato con le frecce gialle, il rotore è un anello di rame collegato al collettore, quest'ultimo striscia sulle spazzole, che

sono alimentate da corrente continua. Le spazzole danno continuità elettrica al circuito, permettono lo scorrimento di corrente (freccie blu) nell'avvolgimento che, trovandosi in mezzo al campo magnetico, viene sottoposto alla forza di Lorentz, (freccie rosse). Questa è ortogonale alla direzione delle cariche e del campo magnetico. Il contatto strisciante della spazzola con il collettore, permette di avere sempre lo stesso verso di percorrenza delle cariche, infatti in un giro completo del rotore, nel ramo di sinistra dell'avvolgimento, la carica scorre sempre in avanti, quindi il verso dei vettori rossi non cambia mai. Anche se il circuito è alimentato in tensione continua, il sistema spazzole-collettore a lamelle funziona come un inverter.

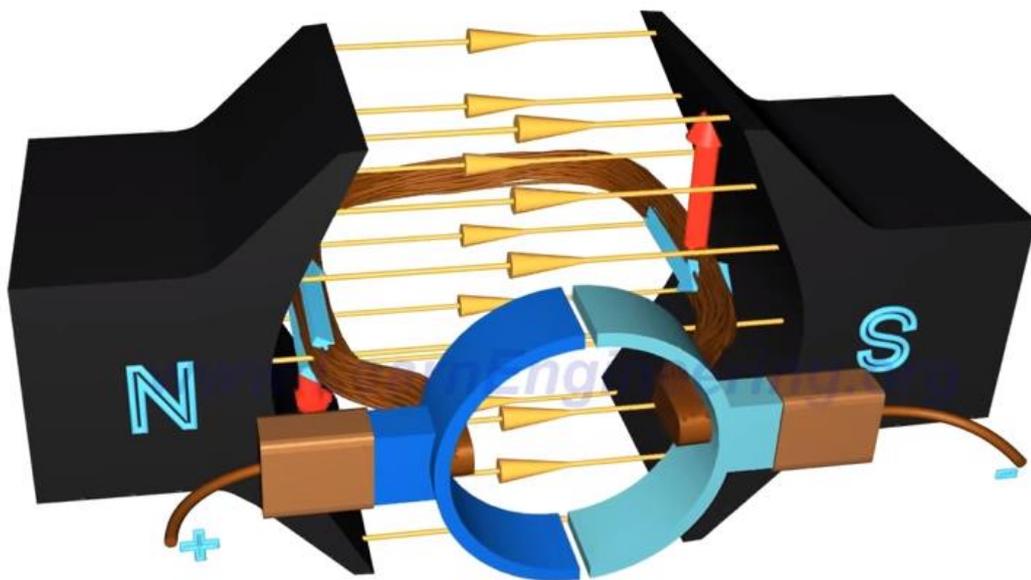


FIGURA 3.8.

La coppia che permette la rotazione è data dal prodotto tra la forza di Lorentz e la distanza dall'asse del rotore, quindi si deduce che quando l'avvolgimento è disposto verticalmente, il braccio è praticamente nullo e la coppia motrice tende a zero, quindi si ha un rallentamento del rotore. Per dare maggior continuità al movimento nella pratica, si utilizzano molti più avvolgimenti, inoltre per aumentare l'interazione magnetica, questi vengono inseriti all'interno di materiale ferromagnetico, si veda figura 3.9. Per i motori di piccola taglia si utilizzano nello statore dei magneti permanenti, mentre per motori più grandi si utilizzano avvolgimenti di rame per contenere il peso che risulterebbe altrimenti

eccessivo. Preso un filo conduttore di lunghezza  $l$ , percorso da una corrente  $I$  e immerso in un campo magnetico, la forza di Lorentz  $F$  si può calcolare come:

$$F = B I l$$

Tanto più l'intensità di corrente è elevata, tanto maggiore sarà la forza che si genera e quindi la coppia, pertanto si può dire che la coppia del motore è proporzionale alla corrente. La velocità di rotazione dipende invece da tensione, carico applicato e corrente assorbita dal rotore. Si può osservare la particolare caratteristica meccanica lineare di questi motori in figura 3.10. L'unico difetto di questa tipologia di motori, comunque utilizzatissimi in campo industriale, risiede nella presenza delle spazzole. Queste sono realizzate solitamente in grafite o in lega metallica bianca.

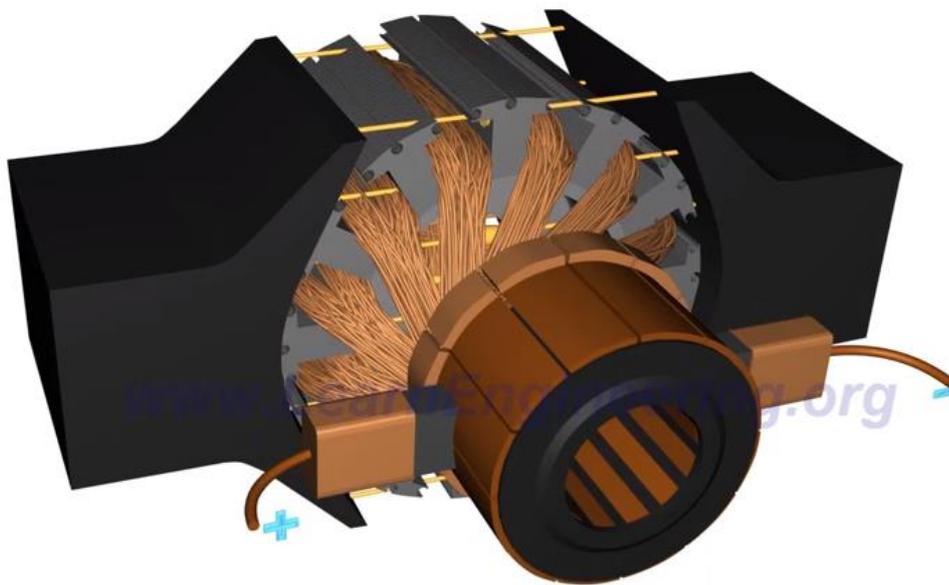


FIGURA 3.9.

Le spazzole come già spiegato realizzano un contatto strisciante e quindi nel tempo si usurano e devono essere sostituite. Una sostituzione periodica delle spazzole può comportare un'interruzione del ciclo produttivo e quindi una perdita economica. L'altro aspetto negativo risiede nel manifestarsi di scintille

durante il funzionamento, rendendo questi motori inadatti agli ambienti saturi di composti organici volatili, come i carburanti. Per sopperire a queste problematiche negli ultimi anni sono stati creati i motori *brushless*.

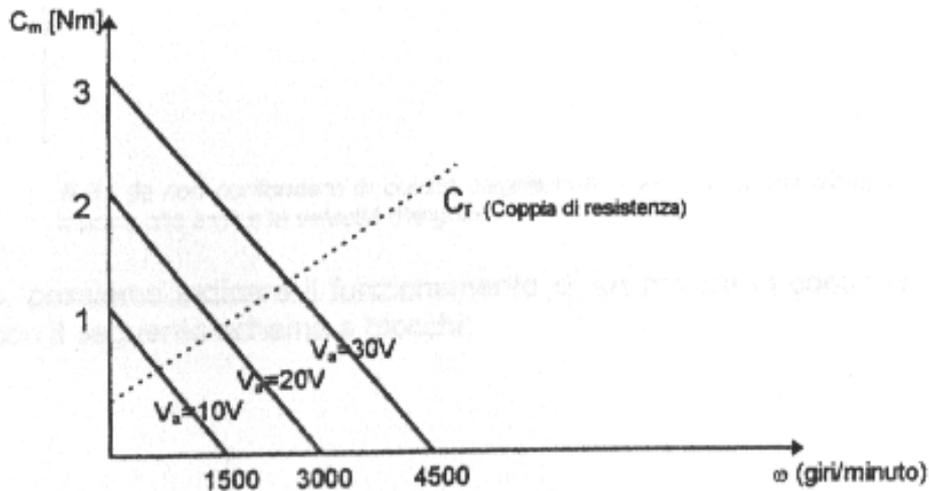


FIGURA 3.10.

- Motori brushless è un motore elettrico a corrente continua avente il rotore a magneti permanenti e lo statore a campo magnetico rotante. A differenza di un motore a spazzole non ha quindi bisogno di contatti elettrici striscianti sull'albero del rotore per funzionare. La commutazione della corrente circolante negli avvolgimenti dello statore e quindi la variazione dell'orientamento del campo magnetico da essi generato, avviene elettronicamente. Ciò comporta una minore resistenza meccanica, elimina la possibilità che si formino scintille al crescere della velocità di rotazione, e riduce notevolmente la necessità di manutenzione periodica. Viene mostrato il funzionamento di questi motori a partire dalle fig. 3.11a) e b), in cui sono rappresentati rispettivamente il rotore a magneti permanenti e lo statore con le bobine chiamate A, B, C (fig. 3.11c).

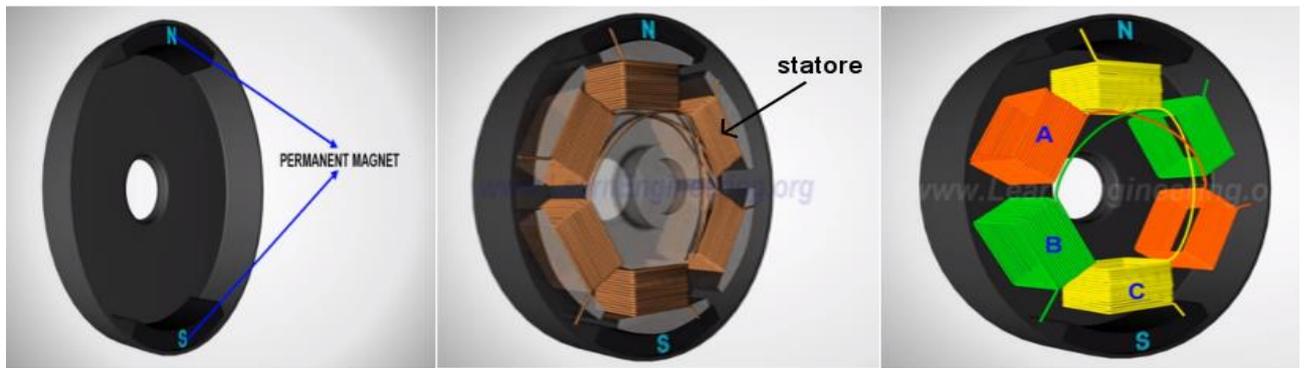


FIGURA 3.11A)

3.11B)

3.11C)

Alimentando una coppia di avvolgimenti dello statore si forma un campo elettromagnetico come in fig. 3.12, questo interagisce con il campo magnetico del rotore e si generano forze di attrazione magnetica, rappresentate in verde in fig. 3.13. Alimentando A, il rotore inizia a muoversi poiché attratto da questo. Quando si avvicina, viene interrotta la corrente in A e si alimenta la bobina B. Così facendo il rotore insegue sempre le bobine che lo attraggono e realizza la rotazione.

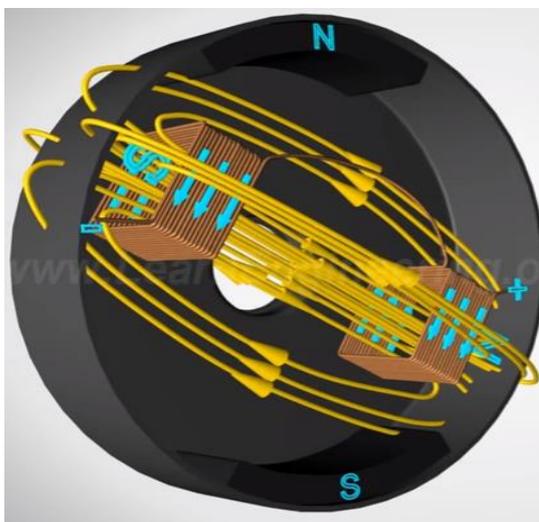


FIGURA 3.12.

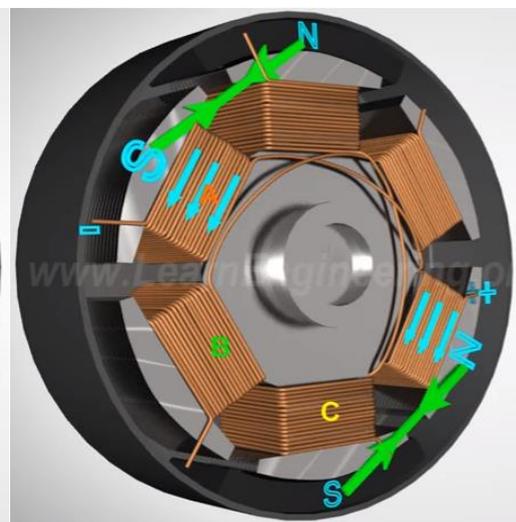


FIGURA 3.13.

Un funzionamento del genere però, non permette elevate prestazioni, per risolvere l'inconveniente, è sufficiente collegare le bobine a coppie. Il nuovo collegamento permette alla corrente di scorrere su due avvolgimenti alla volta, in fig. 3.14 è rappresentata la propagazione della corrente negli avvolgimenti,

ciò fa sì che oltre alla forza di attrazione in verde, contemporaneamente ci sia il contributo di repulsione, rappresentato in rosso.

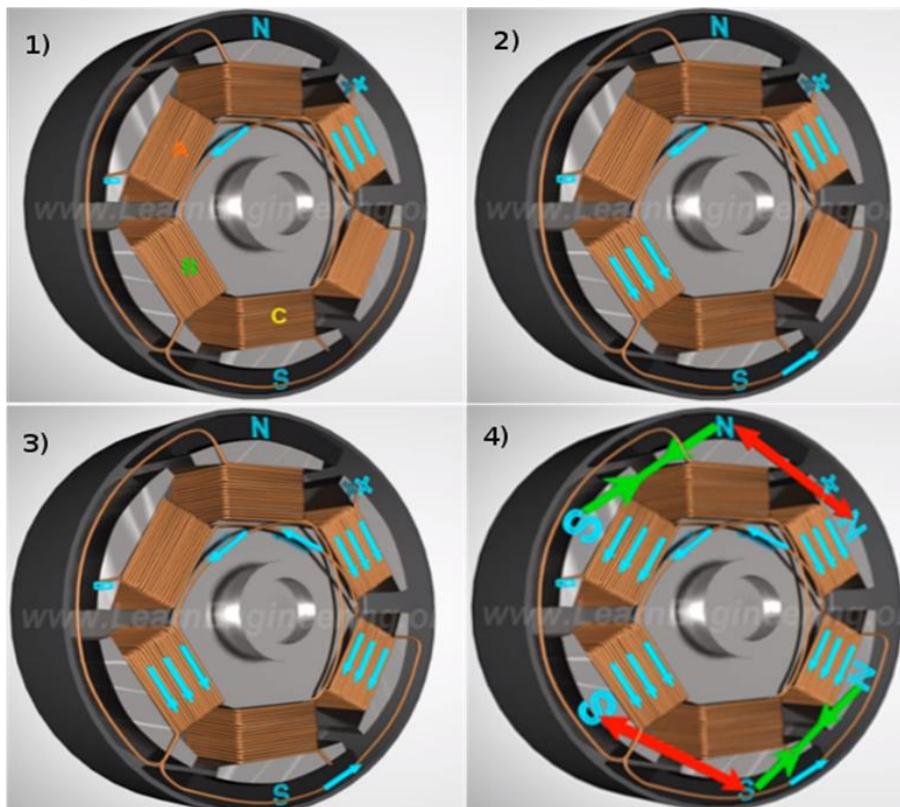


FIGURA 3.14.

Così facendo si ottiene un motore con ottime prestazioni in termini di coppia motrice e di efficienza, a tal proposito si veda fig. 3.15. In questi motori si utilizzano dei controllori elettronici e dei sensori, usualmente sensori di Hall, che comunicano la posizione del rotore e il controllore decide quali avvolgimenti alimentare. I motori brushless stanno avendo grande successo e trovano applicazione soprattutto nel ramo dell'automazione dove viene richiesta grande precisione di movimento e versatilità, offerta dalla possibilità di programmare il sistema di controllo. I vantaggi che possiedono rispetto ai motori DC, oltre all'assenza degli inconvenienti legati alle spazzole, risiedono nella capacità di funzionare a rendimenti molto elevati, alla bassa inerzia rotorica e alle elevate prestazioni. Il difetto risiedeva nel loro prezzo, poiché oltre al costo di produzione del motore occorre considerare quello del sistema di controllo, essenziale per il funzionamento. Grazie alla spinta commerciale che si è creata negli ultimi anni per la richiesta di macchine ad elevata efficienza, è stato possibile produrre i

controllori secondo economie di scala e ciò ha permesso di ridurre i prezzi di questa tipologia di azionamenti.

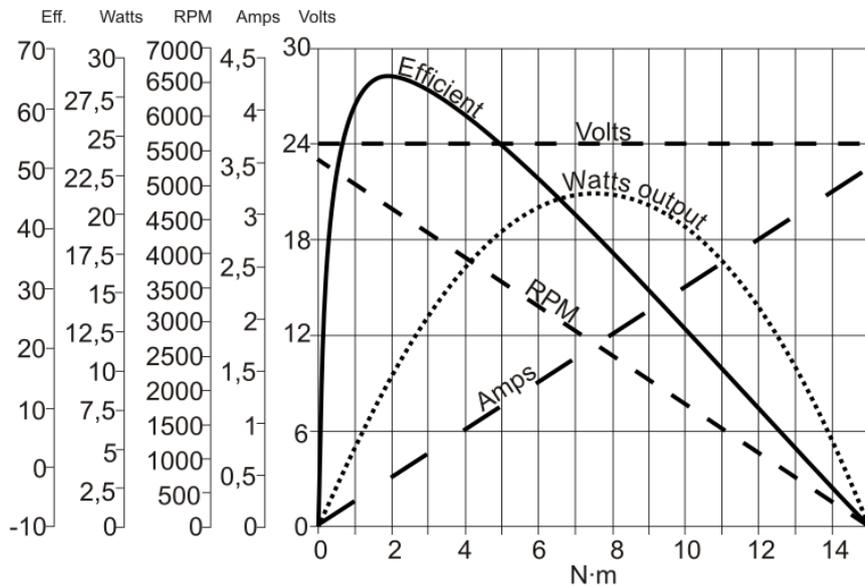


FIGURA 3.15.

Per questo lavoro di tesi, si è scelto di utilizzare i prodotti della Maxon Motor, un'azienda svizzera che opera nel settore dell'elettronica di potenza dal 1961. I prodotti che offre sono molti, quali motori, riduttori, sensori, controllori e azionamenti personalizzati. Visto il grande sviluppo dell'automazione nella produzione, l'azienda è a contatto con diverse realtà di mercato, come l'industria automobilistica, quella aerospaziale, quella medica e molte altre.

### 3.2.2 Motori Maxon

I motori prodotti da Maxon Motor sono tutti in corrente continua e vengono realizzati con o senza spazzole. La ditta a partire da queste due categorie, realizza motori con caratteristiche costruttive e quindi prestazioni differenti, in modo da soddisfare differenti esigenze nei vari settori. Si vogliono definire in questo paragrafo alcune parametri importanti, che occorre conoscere per poter effettuare la scelta di un azionamento e per poter mettere a confronto diverse tipologie di motori elettrici. Questi, come già detto sono macchine che trasformano energia elettrica in meccanica, due parametri coinvolti in questa trasformazione possono essere definiti all'interno delle seguenti relazioni:

$$n = k_n U_{ind}$$

$$M = k_m I$$

Dove  $k_n$  e  $k_m$  sono rispettivamente costanti di velocità e costanti di coppia e stanno ad indicare che per i motori Maxon, la tensione indotta sugli avvolgimenti  $U_{ind}$ , è proporzionale alla velocità di rotazione del motore, mentre la corrente  $I$ , è proporzionale alla coppia erogata dal motore. Per ogni motore è presente una curva caratteristica che sintetizza il modo di funzionare del motore e aiuta nella scelta dell'azionamento e nel confronto con altri motori. Nei vari diagrammi vengono rappresentate velocità angolare, tensione, corrente assorbita dal motore, tutto in funzione della coppia motrice in condizioni di tensione costante, si osservi fig 3.16.

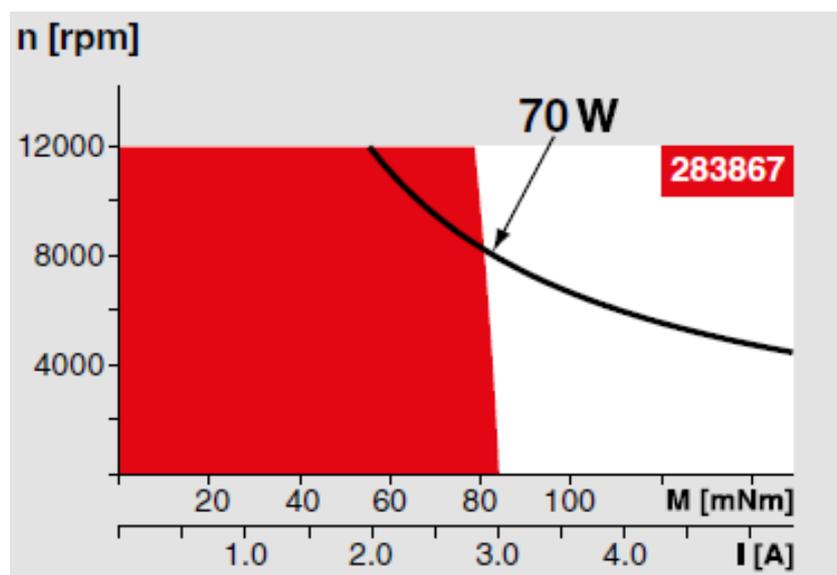


FIGURA 3.16.

Nella figura è anche riportata la curva di iso-potenza del motore, che rappresenta le massime prestazioni della macchina nelle diverse condizioni di funzionamento.

Un altro parametro fondamentale è il *gradiente di velocità* definito come  $\frac{\Delta n}{\Delta M}$ , visibile in figura 3.17. Tale grandezza descrive il comportamento del motore con tensione applicata costante  $U$ , come si può osservare dalla figura, al crescere della coppia applicata, la velocità si riduce in maniera lineare. Per tracciare la retta del gradiente di velocità occorre conoscere la *velocità a vuoto*  $n_0$ :

velocità a cui ruota il motore con tensione nominale applicata, senza carico

e la *coppia di stallo*  $M_H$ :

coppia prodotta dal motore con tensione nominale applicata, che provoca l'arresto del motore

entrambe presenti nel *datasheet* di ogni motore.

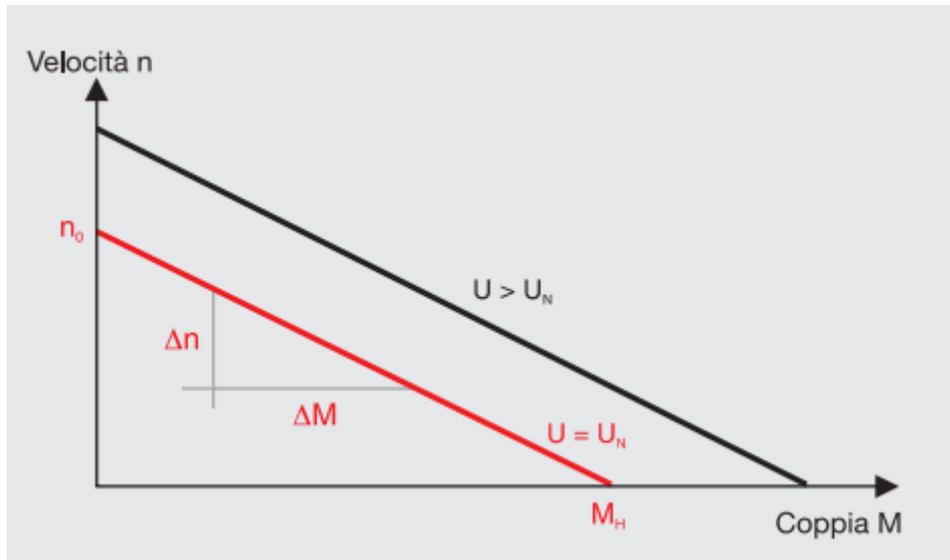


FIGURA 3.17.

L'inclinazione del gradiente è una delle grandezze più significative e consente il confronto diretto tra diversi motori. Quanto minore è l'inclinazione, tanto meno sensibile è la reazione della velocità alle variazioni della coppia (carico) e più potente è il motore. Risulta di grande importanza distinguere in che regime di funzionamento si trova la macchina, a tal proposito viene definito il *funzionamento nominale*. Questo corrisponde ad una condizione ideale di funzionamento del motore che risulta dalla tensione nominale  $U_n$ , alla corrente nominale  $I_n$ . Da questi due parametri si ottiene la coppia nominale  $M_n$ , per questo punto ideale di funzionamento. Utilizzando poi il gradiente di velocità, si ricava la velocità nominale  $n_n$ . La scelta della tensione nominale deriva da valutazioni di opportunità relative al valore della velocità a vuoto, mentre la corrente nominale risulta dal carico termico massimo continuativo consentito del motore. Le condizioni nominali, non sono le uniche condizioni di funzionamento definite; come si può vedere nella curva caratteristica precedentemente riportata, ci sono aree colorate in maniera differenziale, all'interno del range di funzionamento del motore. Nelle caratteristiche di ogni motore, sono presenti le voci *coppia continua consentita* e *velocità massima del motore*, esse rappresentano i limiti del *funzionamento continuo*, visibile in figura 3.18.

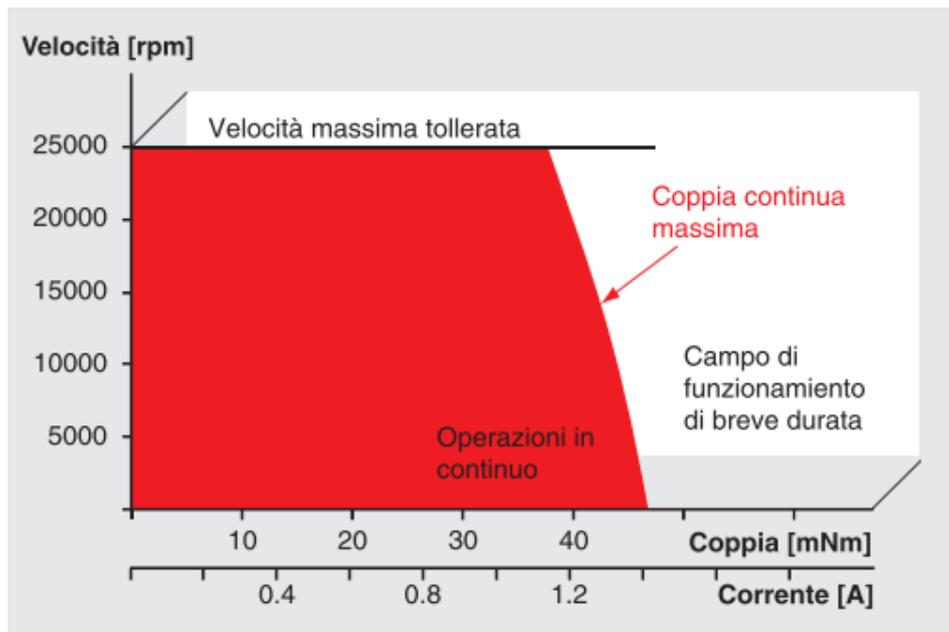


FIGURA 3.18.

Quando si opera all'interno di questa zona, (zona rossa) non si hanno problemi di surriscaldamento degli avvolgimenti; chiaramente a seconda delle varie tipologie di azionamenti, queste zone avranno estensioni differenti. Rispettando i valori di corrente a cui corrispondono le grandezze limite appena citate, si scongiurano problemi legati al surriscaldamento; per breve tempo tuttavia sono ammessi valori di corrente maggiori. Fin quando la temperatura dell'avvolgimento resta al di sotto di un certo valore critico, l'avvolgimento non subisce danni. Le fasi con correnti elevate devono essere però limitate nel tempo. La frequenza con cui il motore può funzionare nella condizione di *funzionamento di breve durata*, dipende dalle sue dimensioni, si passa da qualche secondo per motori piccoli, a qualche minuto per le taglie più grandi. Una volta chiariti alcuni dei principali parametri dei motori Maxon, si passa alla descrizione del modello utilizzato per schematizzare e che ha permesso di fare calcoli sul sistema da progettare.

### 3.2.3 Riduzione di forze e inerzie

Uno strumento spesso utilizzato per la scelta dei motoriduttori è quello dello schema a blocchi accompagnato dalle formule di riduzione di momenti e inerzie. Queste consentono, sfruttando equilibri energetici, di riferire le forze e le inerzie in gioco all'albero motore. Occorre quindi definire un modello per ognuno dei due motori in questione. Viene riportato in figura 3.19 il modello generale. Si consideri

un motore, sul cui albero A di uscita è montato un riduttore che a suo volta è collegato con l'albero B al carico resistente. Per accelerare il carico, occorrerà vincere la sua coppia resistente e la sua inerzia. Vengono definiti  $\omega_a$ ,  $\omega_b$  le velocità angolari degli alberi a monte e valle del riduttore,  $P_a$ ,  $P_b$  la potenza erogata dal motore e richiesta dal carico rispettivamente e  $M$  la coppia richiesta dall'utilizzatore. Inoltre viene indicata con  $E$  l'energia cinetica e con  $\dot{E}$  la sua derivata rispetto al tempo.

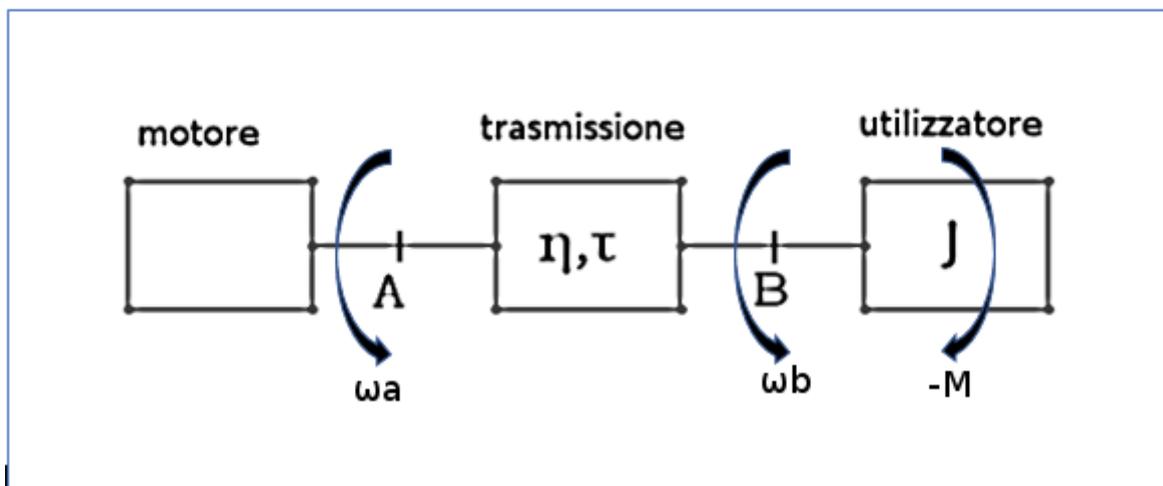


FIGURA 3.19.

- Bilancio energetico a valle della trasmissione:

$$P_b - M \omega_b = \dot{E}$$

essendo:  $\tau = \frac{\omega_b}{\omega_a}$

$$P_b = M\omega_b + \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} J \omega_b^2 \right) = M\tau\omega_a + \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} J \tau^2 \omega_a^2 \right)$$

- Bilancio energetico a monte della trasmissione

$$P_a = \frac{P_b}{\eta} = \frac{M\tau\omega_a}{\eta} + \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} \left( \frac{J\tau^2}{\eta} \right) \omega_a^2 \right)$$

Si consideri ora un sistema fittizio in cui masse e inerzie vengono ridotte all'albero motore A, pensando alla figura 3.19 è come se fosse presente solo il blocco rappresentante il motore e il suo albero di uscita. Tale sistema deve essere

equivalente al primo in termini energetici, le sue grandezze vengono distinte dall'apice \*. Facendo un bilancio energetico a valle del motore si ottiene:

$$P_a^* = M\omega_a + \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} J \omega_a^2 \right)$$

Ponendo l'uguaglianza energetica tra macchina reale e macchina ridotta,  $P_a = P_a^*$ :

$$\begin{cases} M^* = \frac{\tau}{\eta} M \\ J^* = \frac{\tau^2}{\eta} J \end{cases}$$

Le formule appena ottenute servono quindi per ridurre le grandezze verso l'origine del flusso di energia. Ora che è noto il modello da seguire si procede con i calcoli che porteranno alla scelta del motoriduttore scegliendo dal catalogo della Maxon Motor.

### 3.2.4 Dimensionamento motore della coppia rotoidale

Il sistema in questione è rappresentato in figura 3.20.

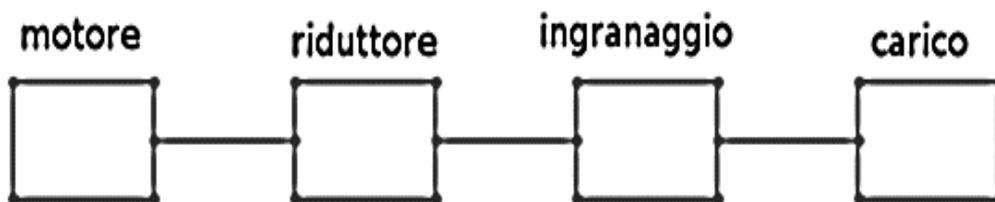


FIGURA 3.20.

Vengono riportati i dati ottenuti con la simulazione:

- $C_{\max} = 7320 \text{ mNm}$
- $C_{\text{rms}} = 4500 \text{ mNm}$
- $\omega_{\max} = 17 \text{ rpm}$

- $P_{\max} = 10900 \text{ mW}$

Queste sono le grandezze applicate al carico, che il motore deve soddisfare, si ricorda che oltre al riduttore c'è anche un ingranaggio con uno stadio di riduzione. Nel cap. 2 era stato definito il rapporto di trasmissione  $\tau$ , nella pratica però è più comodo utilizzare il *rapporto di ingranaggio*  $i$ , che è il suo inverso:  $i = \frac{1}{\tau}$ .

Questo per operare con numeri interi e non con delle frazioni. È buona norma prendere  $i \in [1 \div 8]$  per non avere carichi eccessivi sui denti delle ruote e per motivi di ingombro, per cui è stato scelto  $i = 4$ . Si è supposto inoltre che l'ingranaggio abbia un rendimento  $\eta_{ing} = 0.4$ .

- scelta del riduttore:

è importante sottolineare che ogni riduttore Maxon è disponibile in diverse configurazioni con differenti rapporti di riduzione. Come accennato in precedenza, i meccanismi in questione sono di tipo epicicloidale, questa tipologia di riduttori, permette di ottenere in spazi contenuti, grandi rapporti di ingranaggio (fino a  $i > 3000$ ). Per scegliere il riduttore adatto occorre per prima cosa ridurre i carichi al suo albero di uscita. Infatti nella scelta si deve prestare attenzione a due parametri, ovvero alla massima velocità ammissibile in ingresso e alle massime coppie, continue e intermittenti, trasmissibili sull'albero di uscita. Se si eccedono questi valori, la vita del meccanismo garantita dalla ditta, si accorcia drasticamente.

Valori di coppia ridotti all'albero di uscita del riduttore:

$$M^* = \frac{\tau}{\eta} M = \frac{M}{i \eta}$$

$$C_{RMS} = \frac{4500}{4 \cdot 0.4} \cong 2.8 \text{ Nm}$$

$$C_{max} \cong \frac{7320}{4 \cdot 0.4} \cong 4.6 \text{ Nm}$$

Si cerca quindi a catalogo, un modello di riduttore che garantisca questi parametri. Il GP 52 C presenta un valore massimo di coppia continuativa di 4Nm, mentre

quello di coppia intermittente è di 6Nm, pertanto è compatibile con l'applicazione. La sigla GP, sta per gear-planet che significa appunto riduttore epicicloidale; la C indica che i componenti di cui questo è composto, sono in materiale ceramico, che garantisce maggiori prestazioni in termini di velocità e coppia trasmissibile e una più lunga durata. Ora occorre scegliere il rapporto di riduzione desiderato tra i vari disponibili per questo modello, a tal proposito occorre precisare che tra i vari tipi di motori che Maxon offre, si vuole utilizzare la tipologia FLAT. Questi motori hanno la caratteristica di avere: basse velocità nominali, all'incirca 3000rpm, elevate coppie motrici, buono smaltimento del calore e uno sviluppo assiale ridotto. Quest'ultimo aspetto risulta interessante nel caso si consideri un up-grade del banchetto didattico, si rimanda la questione alle conclusioni. Tenendo conto della velocità nominale media di questi motori, si può calcolare il rapporto di ingranaggio desiderato, chiaramente occorre prima ridurre la velocità di rotazione all'albero a monte dell'ingranaggio:

$$\omega_{out,rid} = \omega_{max} i_{ing} = 17 \cdot 4 = 68 \text{ rpm}$$

$$i_{rid} = \frac{3000}{68} \cong 44$$

Viene scelta la configurazione del riduttore con il rapporto di ingranaggio più vicino al valore cercato, è disponibile per il GP 52 C la versione con  $i = 43$ , il cui datasheet è presente in appendice. Chiaramente ad ogni configurazione con diversi rapporti di riduzione, corrispondono rendimenti diversi del meccanismo, in quanto saranno presenti numeri diversi di stadi di riduzione. Quello scelto presenta  $\eta_{rid} = 0.75$ . Ora che il riduttore è noto, si possono ridurre i carichi all'asse del motore in modo da poterne effettuare la scelta:

$$C_{RMS} = \frac{2800}{43 \cdot 0.75} \cong 86 \text{ mNm}$$

$$C_{max} = \frac{4600}{43 \cdot 0.75} \cong 140 \text{ mNm}$$

È anche possibile stimare la potenza del motore osservando le efficienze dei riduttori:

$$\begin{cases} \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{max}}{P_{motore}} \\ \eta_{tot} = \eta_{rid} \eta_{ing} \end{cases}$$

$$P_{motore} = \frac{P_{max}}{\eta_{tot}} = \frac{10900}{0.4 \cdot 0.75} \cong 36W$$

•scelta del motore:

come accennato sopra, non si andranno a osservare tutti i tipi di motori brushless presenti a catalogo, ma solo la tipologia FLAT, per i motivi prima citati. Teoricamente ora basterebbe scegliere un motore con coppia nominale maggiore della coppia media di esercizio, verificare che  $P_{motore} > P_{max,carico}$  e che il funzionamento avvenga all'interno del range termico definito dalla ditta costruttrice per questa tipologia di azionamento. Occorre però fare una puntualizzazione: la simulazione fatta non tiene conto degli attriti, che se pur minimizzati, non contribuiscono positivamente alla rotazione; il ciclo di movimento di cui si sta tenendo conto è generico e quindi non perfettamente rappresentativo delle azioni che il robot dovrà svolgere. Non essendoci grandi limitazioni di masse ingombri, è stato scelto un motore con potenza maggiore, allo scopo di rendere il braccio versatile per diverse applicazioni. È stato quindi scelto il motore EC 60 FLAT con potenza  $P_{motore} = 100 W$ , le specifiche vengono riportate nell'appendice dopo le conclusioni. La coppia massima continuativa che il motore può reggere in esercizio è di  $C_{mn} = 227 \text{ mNm}$  molto superiore alle coppie calcolate. Viene riportata in figura 3.21 la curva caratteristica del motore scelto

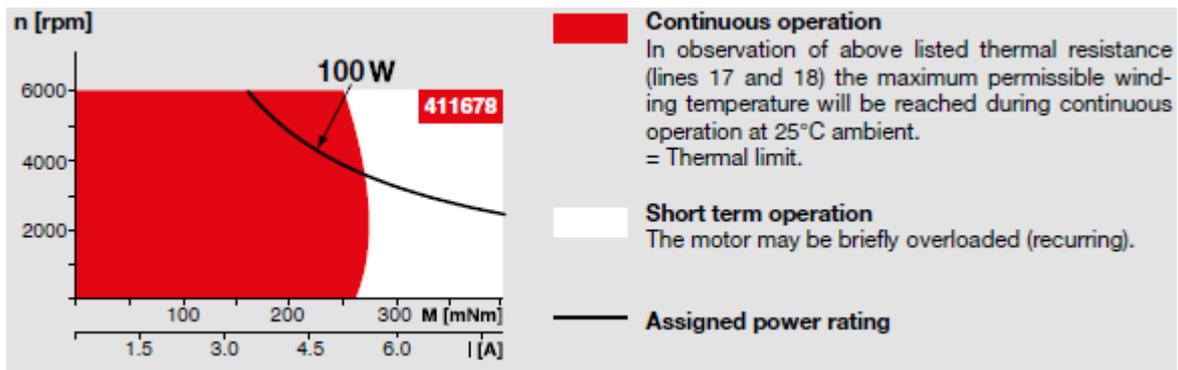


FIGURA 3.21.

### 3.2.5 Dimensionamento motore della parte traslante

Si schematizza il sistema in questione nella figura 3.22.

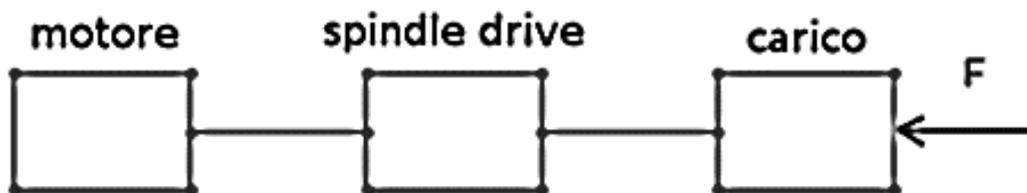


FIGURA 3.22.

Vengono riportati i dati della simulazione:

- Velocità massima del carrello  $v_{max} = 90 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$
- Forza massima applicata  $F = 15.8 \text{ N}$
- Potenza massima richiesta  $P = 3.2 \text{ W}$

Analogamente a quanto visto per il dimensionamento precedente, occorre scegliere un azionamento che soddisfi i requisiti sopra riportati. In questo caso è presente un motore in serie allo *spindle drive*, descritto nel cap. 2, che con la vite movimentata la chiocciola, solidale alla parte traslante. In figura è stato rappresentato il carico, che come si è osservato, varia durante il ciclo; la scelta dell'azionamento verrà fatta considerando il valore massimo che il carico raggiunge.

- scelta dello spindle drive:

Gli *spindle* presentano alcuni parametri che limitano la loro possibilità di utilizzo nelle varie applicazioni. Questi sono: la velocità massima in ingresso, la massima forza applicata continuativa e quella massima intermittente inoltre è consentita una massima velocità di traslazione. Dal catalogo si osserva che la prima è sempre attorno ai 10 000 rpm, mentre le forze consentite variano a seconda del diametro della vite, più il diametro cresce e maggiori sono i carichi sopportati. Questo perché maggiore è il diametro della vite, maggiori sono le dimensioni dei cuscinetti reggispinta che vengono montati, sono questi che devono rispondere alle sollecitazioni e che dettano i limiti di carico; in figura 3.23 viene riportato lo schema costruttivo. Dai risultati della simulazione si era ottenuto che il carico doveva poter traslare ad almeno 90mm/. La Maxon offre 3 tipologie diverse di vite: a filettatura metrica, trapezoidale o a ricircolo di sfere. Per il banchetto didattico si è scelta la vite a filettatura metrica in quanto risulta molto meno costosa di quella a ricircolo e perché la trapezoidale è disponibile solo per diametri di vite di grande dimensione. Osservando a catalogo grandezze crescenti di viti, il primo *spindle* a filettatura metrica che consente 90 mm/s di traslazione è il GP 22 S, con passo  $p=1$  mm, che ha velocità massima di traslazione  $v_L = 101$  mm/s. Consultando le caratteristiche tecniche si vede che la massima forza continuativa a cui può resistere è di 42N, molto superiore ai carichi previsti nel ciclo, quindi questo meccanismo è idoneo all'applicazione. Rimane soltanto da definire se utilizzare un riduttore in serie allo *spindle* o meno.

- scelta del motore:

non sono molti i motori *brushless* abbinabili all'azionamento scelto. Occorre ricavare il valore di coppia richiesta al motore; l'attrito che si ha tra vite e madrevite causa dissipazione di energia, più il carico applicato è grande, maggiore sarà la coppia da vincere per poter avere il moto. Tale coppia si determina come:

$$M = \frac{F p}{2 \pi \eta i} = \frac{15.8 \cdot 1}{2 \cdot \pi \cdot 0.42 \cdot 1} \cong 6 \text{ mNm}$$

Si suppone che il rapporto di riduzione sia unitario, se così non fosse la coppia richiesta al motore si ridurrebbe. Per gli stessi discorsi fatti sulla scelta del motore della coppia rotoidale, si sceglierà un motore sovradimensionato per il ciclo di simulazione, in modo da rendere il braccio idoneo alle diverse applicazioni future. È stato scelto l' EC 22 da 40W che ha  $C_{mn} = 21 \text{ mNm}$  e  $\omega_{mn} = 31000 \text{ rpm}$ . Lo *spindle drive* ha una velocità di *input* massima di 8000 rpm, per cui è necessario utilizzare un riduttore; è disponibile il GP 22 S con rapporto di riduzione  $i = 3.8$ . Si ricalcola la coppia necessaria al motore:

$$M = \frac{F p}{2 \pi \eta i} = \frac{15.8 \cdot 1}{2 \cdot \pi \cdot 0.35 \cdot 3.8} = 1.9 \text{ mNm}$$

La velocità di traslazione della chiocciola è data da:

$$v_L = \frac{p n}{60}$$

Da cui è possibile ottenere la velocità in uscita dal riduttore per far traslare la ventosa a 90mm/s:

$$n = \frac{60 v_L}{p} = \frac{60 \cdot 90}{1} = 5400 \text{ rpm}$$

Quindi il motore deve ruotare a  $5400 \cdot 3.8 = 20520 \text{ rpm}$ .

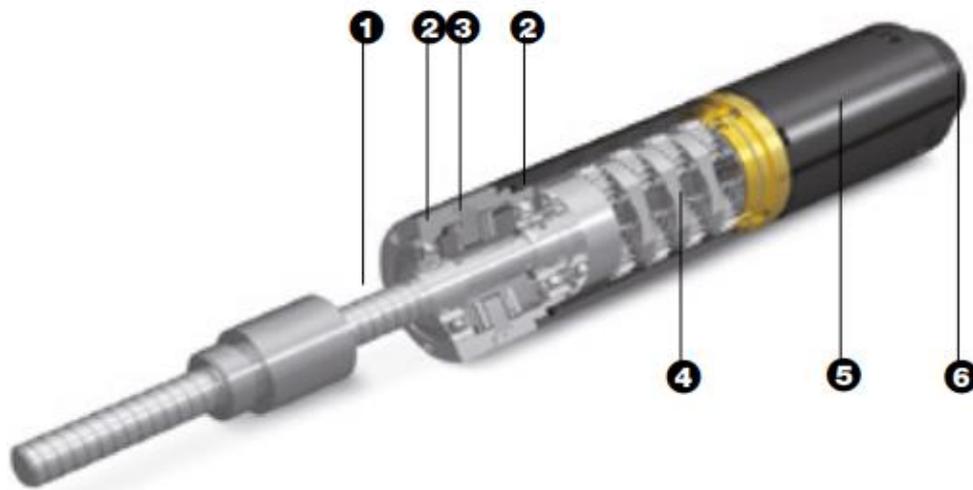


FIGURA 3.23.

1. Albero implementato direttamente nel riduttore
2. Cuscinetto radiale
3. Cuscinetto assiale
4. Riduttore
5. Motore
6. Encoder

Sono stati scelti gli azionamenti sopra citati, ora che tutti i componenti del braccio sono stati scelti, è possibile stilare la distinta base.

### 3.3 Distinta base

| Num. articolo | Num. parte                    | Quantità | Fornitore                            |
|---------------|-------------------------------|----------|--------------------------------------|
| 1             | Telaio                        | 1        | Lavorazione in laboratorio FO        |
| 2             | Boccola reggi-spinta          | 1        | SKF                                  |
| 3             | Boccola flangiata             | 1        | SKF                                  |
| 4             | Spessore ruota                | 4        |                                      |
| 5             | Spessore boccola              | 1        |                                      |
| 6             | Ruota m1 z95                  | 1        | B.E.A. Ingranaggi                    |
| 7             | Albero                        | 1        | Lavorazione in laboratorio FO        |
| 8             | Rondella                      | 1        |                                      |
| 9             | Vite ISO 4017 - M4 x 16-S     | 1        |                                      |
| 10            | Vite ISO 4762 M4 x 25 - 25S   | 4        |                                      |
| 11            | Calettatore                   | 1        | Poggi trasmissioni meccaniche s.p.a. |
| 11,1          | Anello interno                | 1        |                                      |
| 11,2          | Anello distanziatore          | 1        |                                      |
| 11,3          | Anello esterno                | 1        |                                      |
| 11,4          | Viti M4 (fornite dalla ditta) | 3        |                                      |
| 12            | Assieme braccio               | 1        |                                      |
| 12,1          | Profilo C alluminio 60x40x5   | 1        | OMAR s.r.l.                          |
| 12,2          | Guida N27                     | 1        | Igus                                 |
| 12,3          | Motoriduttore spindle         | 1        | Maxon Motor s.p.a.                   |
| 12,3.1        | Motore EC 22 Maxon            | 1        | Maxon Motor s.p.a.                   |
| 12,3.2        | Spindle drive GP 22 S         | 1        | Maxon Motor s.p.a.                   |
| 12,3.3        | Flangia Maxon                 | 1        | Maxon Motor s.p.a.                   |
| 12,4          | Setto                         | 1        | Lavorazione in laboratorio FO        |

| Num. articolo | Num. parte                        | Quantità | Fornitore                     |
|---------------|-----------------------------------|----------|-------------------------------|
| 12,5          | Carrello Igus N27                 | 1        | Igus                          |
| 12,6          | Chiocciola Maxon                  | 1        |                               |
| 12,7          | Vite ISO 4762 M3 x 16 - 16S       | 4        |                               |
| 12,8          | Piastra collegam. Chiocciola      | 1        | Lavorazione in laboratorio FO |
| 12,9          | Vite ISO 4762 M4 x 6 - 6S         | 2        |                               |
| 12,1          | Profilo C alluminio 40x25x3       | 1        | OMAR s.r.l.                   |
| 12,11         | Piastra fine corsa                | 1        | Lavorazione in laboratorio FO |
| 12,12         | Copertura plexiglass              | 1        |                               |
| 12,13         | Piastra collegam. cella di carico | 1        | Lavorazione in laboratorio FO |
| 12,14         | Cella di carico                   | 2        | Instrumentation devices       |
| 12,15         | Piastra collegam. ventosa         | 1        | Lavorazione in laboratorio FO |
| 12,16         | Vite ISO 4762 M4 x 10 - 10S       | 4        |                               |
| 12,17         | Dado 4035 - M2,5 - N              | 2        |                               |
| 12,18         | Dado ISO - 4035 - M3 - N          | 4        |                               |
| 12,19         | Vite ISO 4762 M4 x 8 - 8S         | 2        |                               |
| 12,2          | Vite ISO 4762 M4 x 12 - 12S       | 2        |                               |
| 12,21         | Dado ISO - 4035 - M4 - N          | 10       |                               |
| 12,22         | Gambo filettato M8                | 1        |                               |
| 12,23         | Ventosa ZPR 50 G 06 B8            | 1        | SMC Corporation               |
| 12,24         | Dado ISO - 8675 - M8 x 1.0 - N    | 1        |                               |
| 12,25         | Vite ISO 4762 M1.6 x 6 - 6S       | 4        |                               |
| 12,26         | Vite ISO 4762 M1.6 x 8 - 8S       | 2        |                               |
| 13            | Dado ISO - 4035 - M4 - N          | 4        |                               |
| 14            | Azionamento coppia R              | 1        | Maxon Motor s.p.a.            |
| 14,1          | EC 60 FLAT 100w                   | 1        | Maxon Motor s.p.a.            |
| 14,2          | GP 52 C                           | 1        | Maxon Motor s.p.a.            |
| 14,3          | Ruota dentata m1 z24              | 1        | B.E.A. Ingranaggi             |
| 14,4          | Rondella albero motore            | 1        |                               |
| 14,5          | Vite ISO 4762 M4 x 25 - 25S       | 1        |                               |
| 15            | Telaio pt. 2                      | 1        | Lavorazione in laboratorio FO |
| 16            | Vite ISO 4762 M4 x 35 - 20N       | 2        |                               |
| 17            | Vite ISO 4762 M4 x 16 - 16N       | 4        |                               |

## 4 Conclusioni

### 4.1 Caratteristiche richieste al braccio R-P

L'obiettivo del lavoro di tesi, era quello di progettare un banco didattico per gli studenti del Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica – Indirizzo Meccanica per l'Automazione del polo di Forlì; in particolare si trattava di un meccanismo piano a 2 gradi di libertà, con coppia rotoidale e prismatica, in grado di afferrare oggetti mediante ventosa pneumatica. Il braccio, una volta montato, verrà utilizzato in alcuni corsi dagli studenti, che potranno eseguire su di esso simulazioni e prove; esso rimane a disposizione dell'Università di Bologna e potrà essere utilizzato oltre che per fini didattici anche come strumento per test o prove, da parte dei ricercatori. I vincoli costruttivi, riguardavano solo il meccanismo atto alla traslazione, che doveva poter estendersi di almeno 100mm. A livello prestazionale era stato simulato su ADAMS un ciclo di movimento che prevedeva una rotazione di 180° del braccio nel tempo di 2s, entro il quale il meccanismo traslante doveva estendersi e ritrarsi, con un carico di 1kg applicato all'organo terminale.

### 4.2 Caratteristiche ottenute e riflessioni

Una volta definiti i componenti costruttivi dell'assieme, selezionati secondo il metodo di standardizzazione, è stato creato il modello CAD di ognuno di questi con il software SOLIDWORKS. Definite le masse e le proprietà inerziali del meccanismo si è eseguita la simulazione di movimento su ADAMS, che ha definito le prestazioni minime richieste agli attuatori. Successivamente è stato definito il modello che ha portato alla scelta dei motoriduttori. Ciò che si è ottenuto è un braccio robotico del peso di 3.7 kg, capace di compiere rotazioni complete attorno ad un asse e di allungare il membro che supporta l'organo per l'afferraggio. Quando il sistema di traslazione è in configurazione ritratta, presenta una lunghezza di 341.2mm, con possibilità di estendersi per 110mm; la richiesta della corsa minima è stata quindi soddisfatta. Il robot potrà operare all'interno di un'area utile a forma di corona circolare, avente diametro interno 682.4mm ed esterno 882.4mm. I parametri richiesti dai risultati della simulazione del capitolo 3.2 sono stati rispettati e i motori scelti risultano abbondantemente sovradimensionati; si potranno quindi prevedere cicli di movimento più critici di quello presentato. Grazie alla configurazione scelta, i sensori applicati consentiranno di eseguire misure di forza

durante il movimento del braccio, senza risentire dei momenti flettenti che si generano a causa della rotazione. L'assieme verrà fissato ad un banco mediante viti e con un compressore si alimenterà la ventosa, consentendo così la presa sugli oggetti. Viene riportato l'assieme del braccio progettato, in figura 4.1.

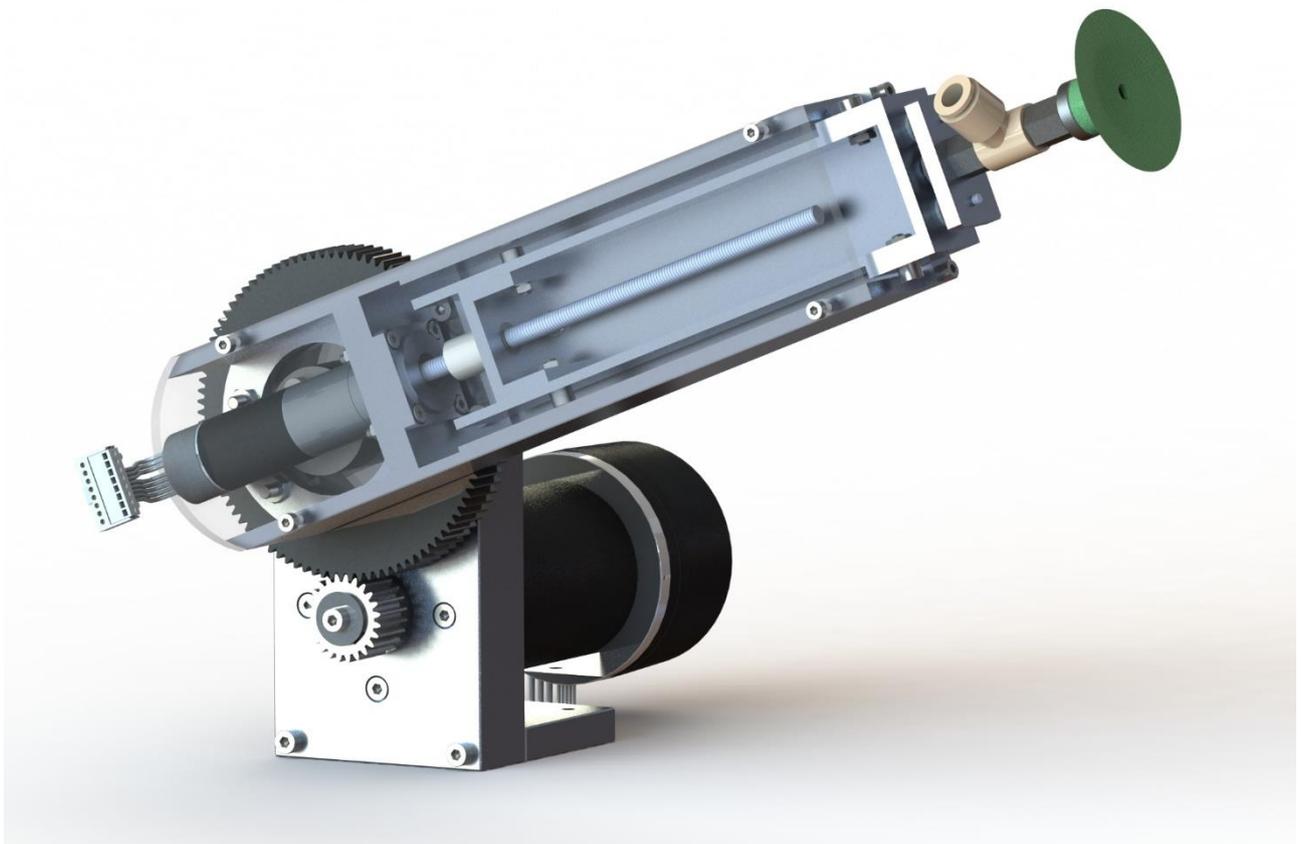


FIGURA 4.1.

Occorre specificare che dal momento che il braccio verrà usato per scopi didattici, le prestazioni richieste non sono particolarmente elevate; non essendoci grosse limitazioni in termini di masse e ingombri, entrambi i motori sono stati sovradimensionati rispetto alle prestazioni richieste dal ciclo. Questa scelta sembra ridurre l'importanza della simulazione rispetto alle altre fasi del progetto, in quanto solitamente si dimensiona al limite delle richieste iniziali. In realtà è stata comunque una fase fondamentale, poiché ha permesso di individuare valori di riferimento sotto cui non scendere ed ha aiutato a rendere più realistica la

progettazione, che costituisce appunto il lavoro di tesi. Il rispetto delle varie fasi di progetto e le iterazioni che ci sono state tra queste sono poi servite a comprendere l'importanza dell'ordine da seguire durante un lavoro di questo tipo; ad ogni modifica fatta a lavoro avanzato causata da dimenticanze o cambiamento di obiettivi, corrispondevano diverse modifiche che andavano ad appesantire il lavoro.

### 4.3 Possibili applicazioni future

Come tutti i progetti questo potrà subire nel tempo, delle migliorie atte a renderlo maggiormente versatile; una di queste, potrebbe essere l'aggiunta di un grado di libertà. Nello specifico un'ulteriore coppia rotoidale, posizionata alla base del telaio attuale, con l'asse in direzione ortogonale rispetto al piano di appoggio. Così facendo si otterrebbe un meccanismo di tipo spaziale R-R-P, avente configurazione chiamata *robot polare*, si veda un esempio in fig. 4.2. Per realizzare quanto detto, si dovrebbe provvedere al dimensionamento di un ulteriore motoriduttore che faccia ruotare l'attuale telaio, ottenendo così, uno spazio di lavoro tridimensionale.

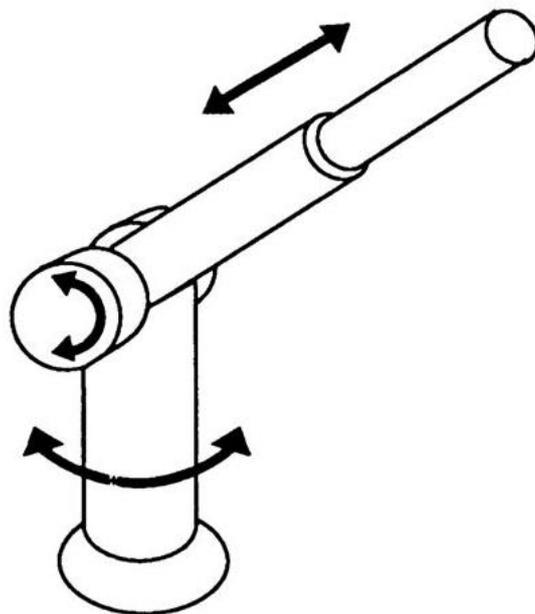


FIGURA 4.2.

Un ulteriore miglioramento potrebbe essere la sostituzione dell'organo terminale a ventosa, con una pinza meccanica. Questa tipologia di meccanismi, contiene al suo

interno degli attuatori che consentono alle *griffe* di muoversi; queste hanno la stessa funzione delle dita di una mano ed hanno il compito di realizzare la presa sugli oggetti, vedi fig. 4.3. Per un miglior controllo, spesso gli attuatori sono dotati di sensori di forza, in modo da garantire una presa più efficiente. L'utilizzo di una pinza rispetto ad una ventosa, consentirebbe di afferrare più tipologie di oggetti. Infatti l'attuale terminale permette di far presa su entità aventi facce piane o con forma sferica, ma di dimensioni compatibili con il diametro della gomma.



FIGURA 4.3.

# Appendice

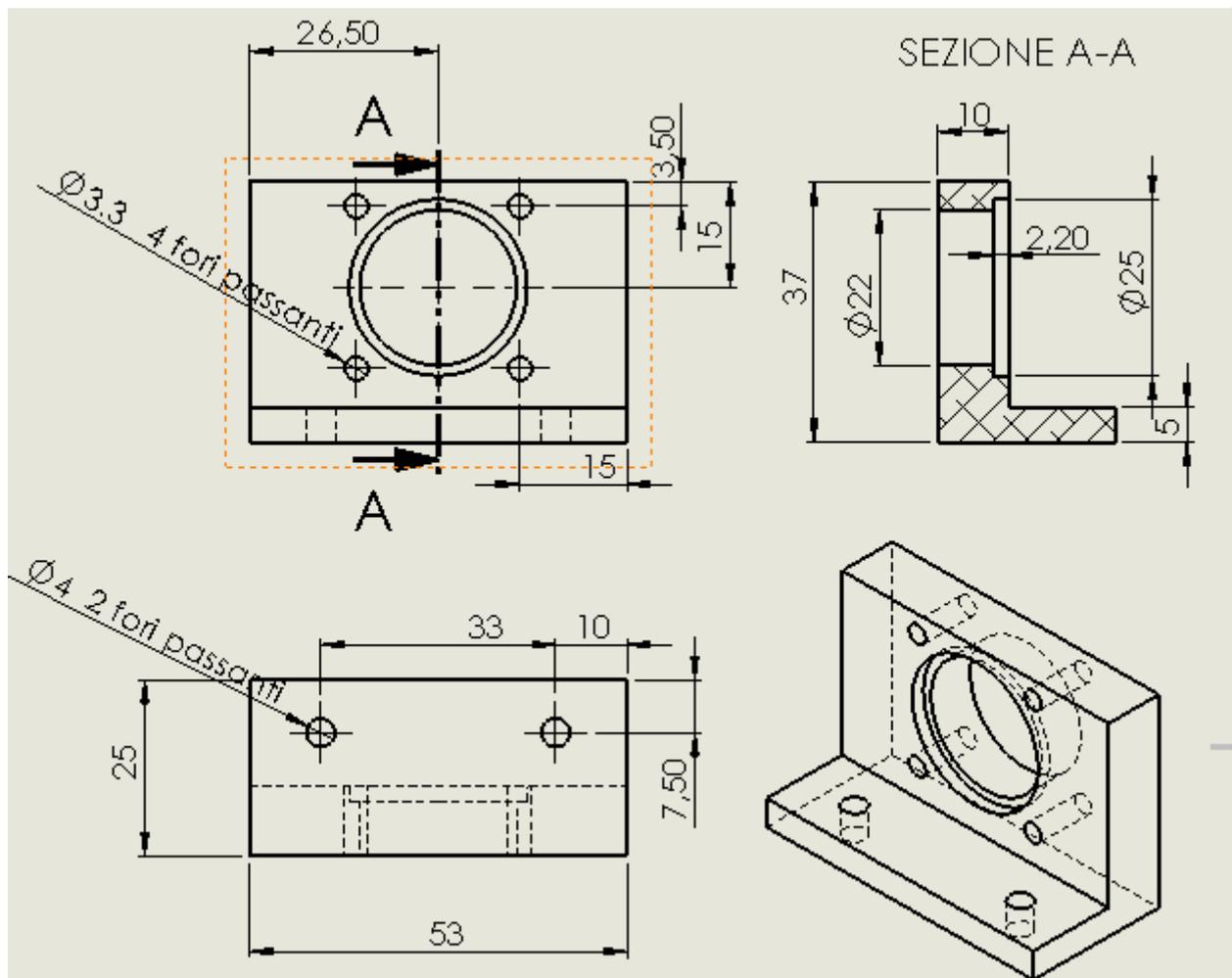


TAVOLA 1, SETTO.

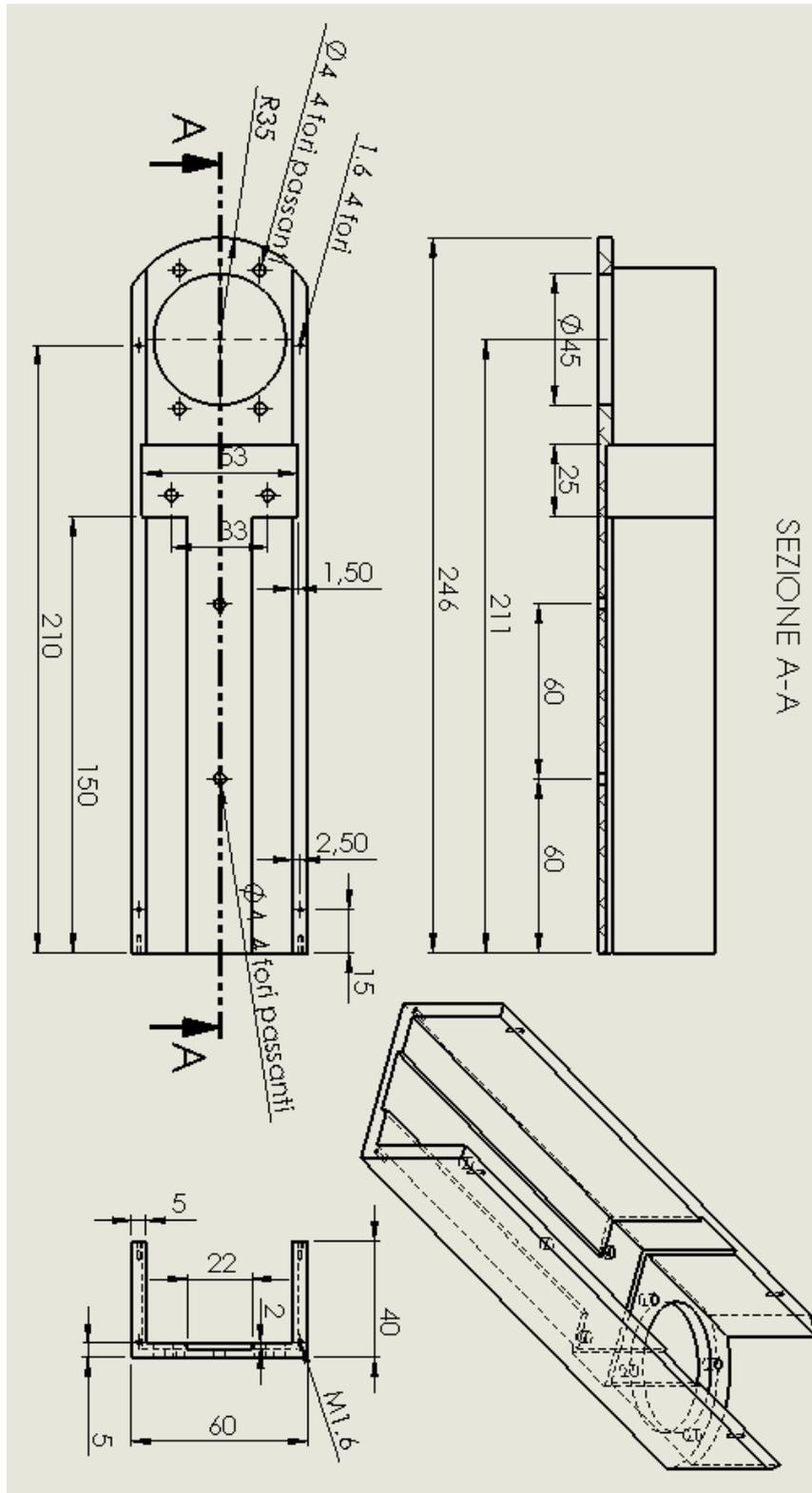


TAVOLA 2, PROFILO C.

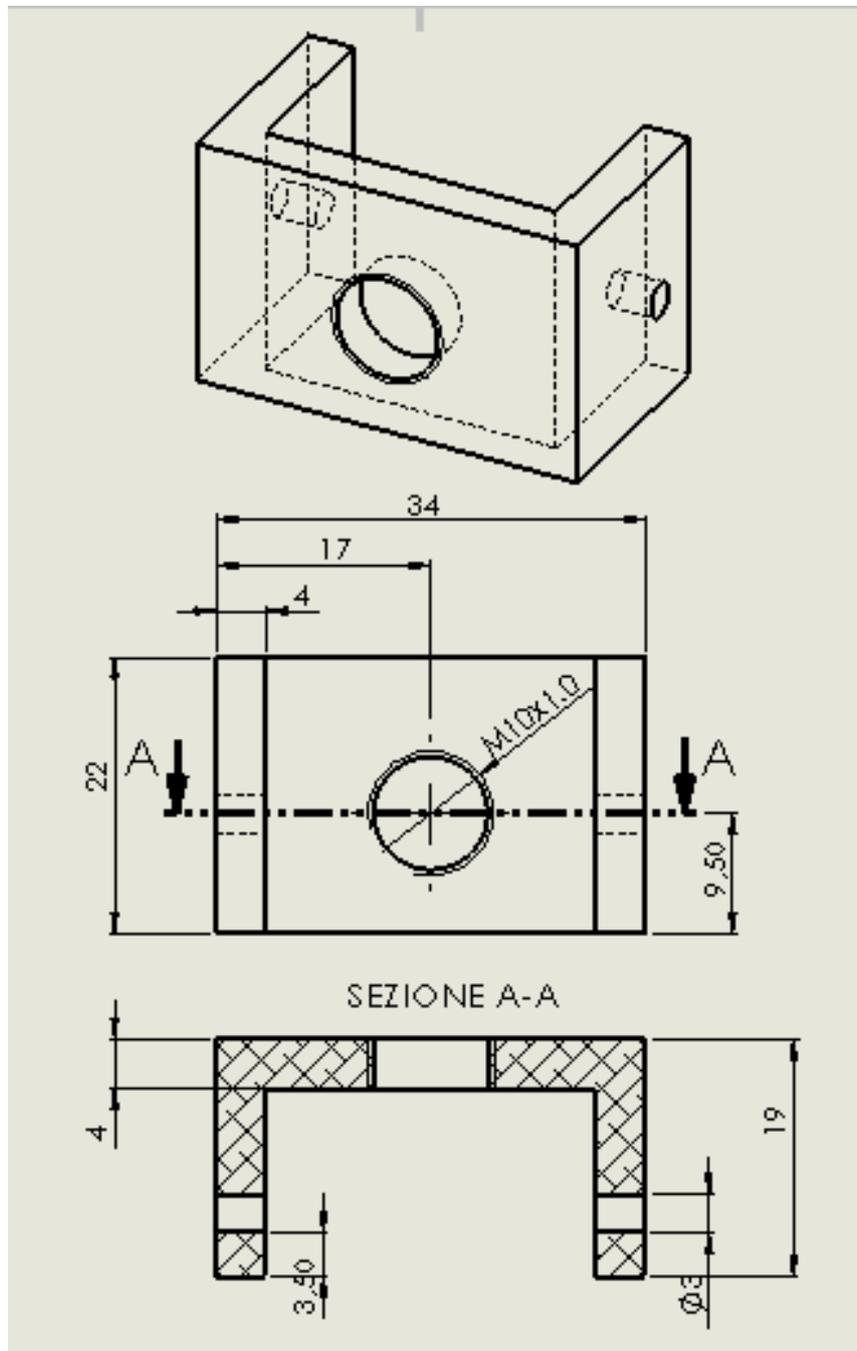


TAVOLA 3, PIASTRA COLLEGAMENTO CHIOCCIOLA.

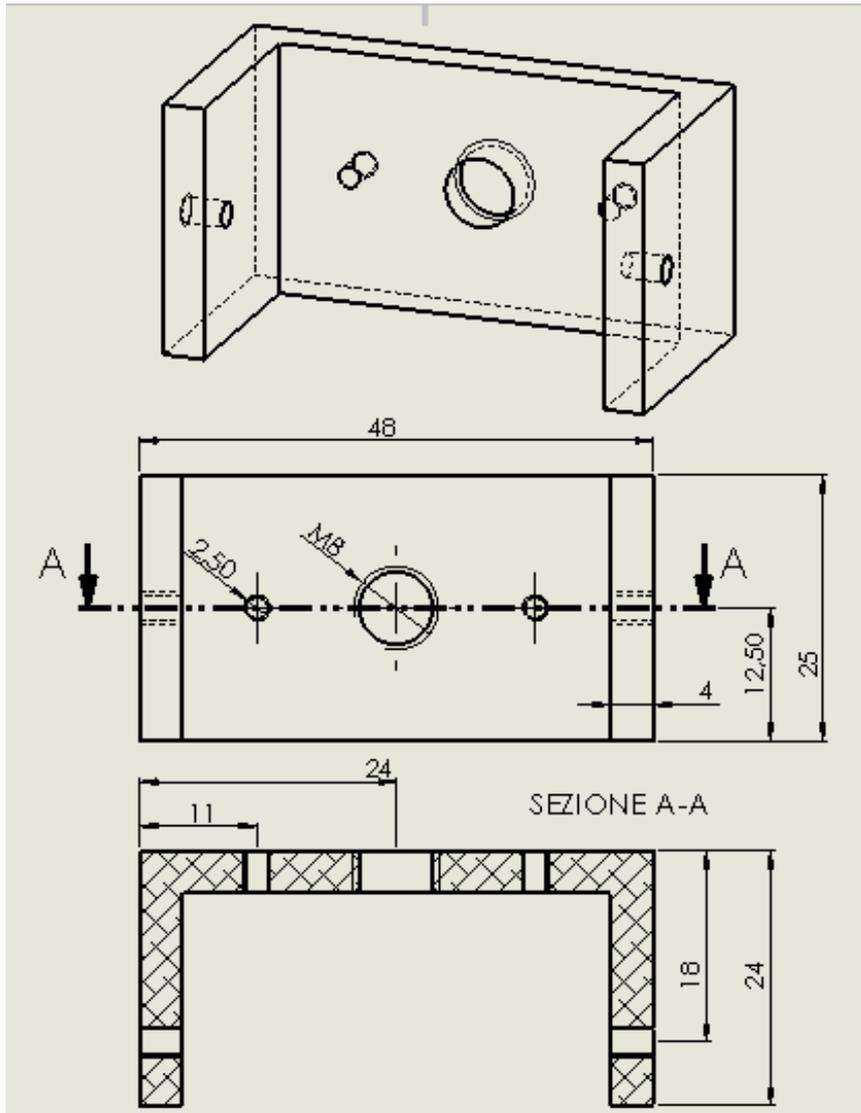


TAVOLA 4, PIASTRA COLLEGAMENTO CELLE DI CARICO.

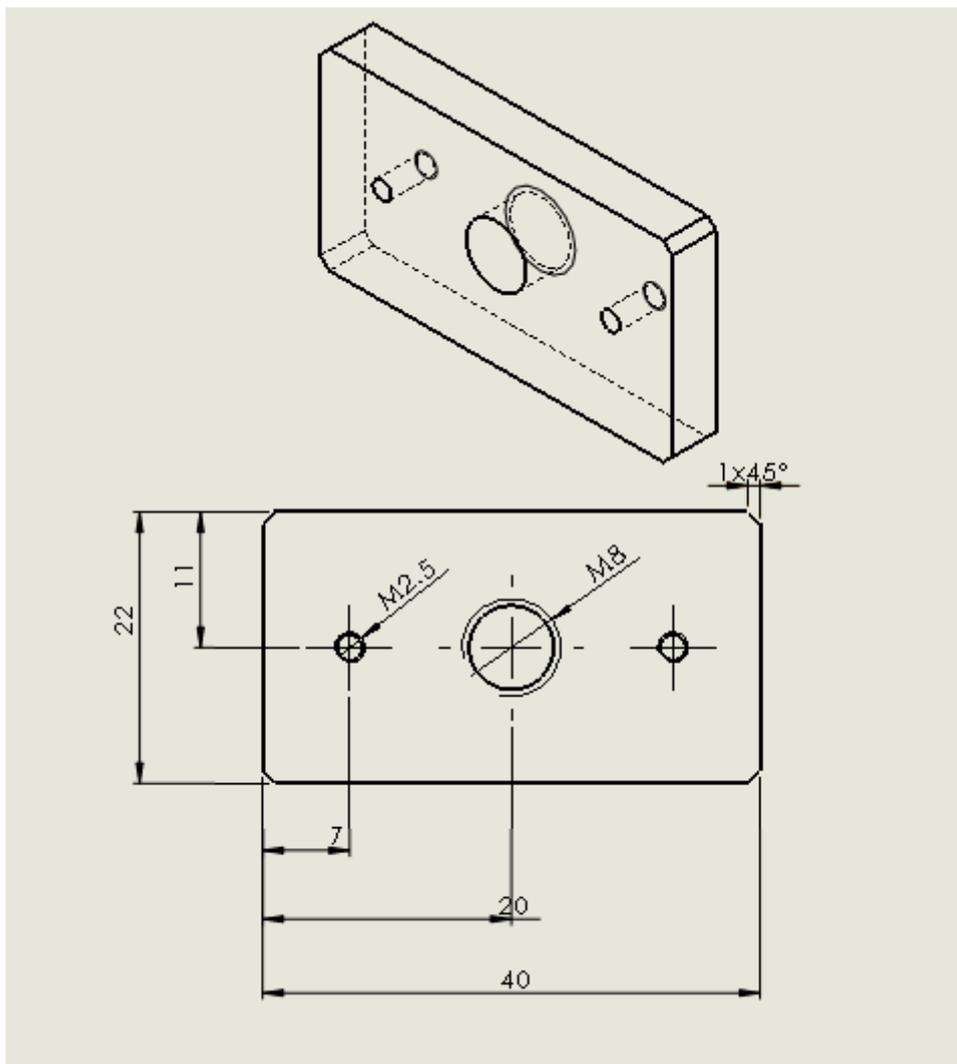
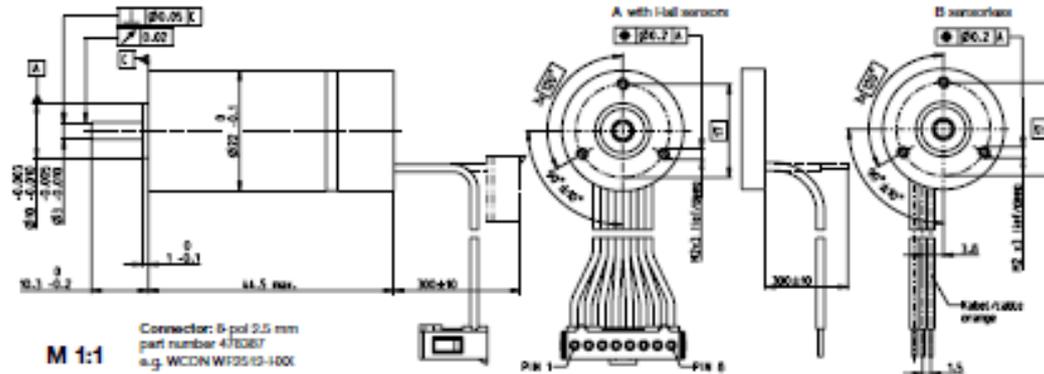


TAVOLA 5, PIASTRA COLLEGAMENTO VENTOSA.



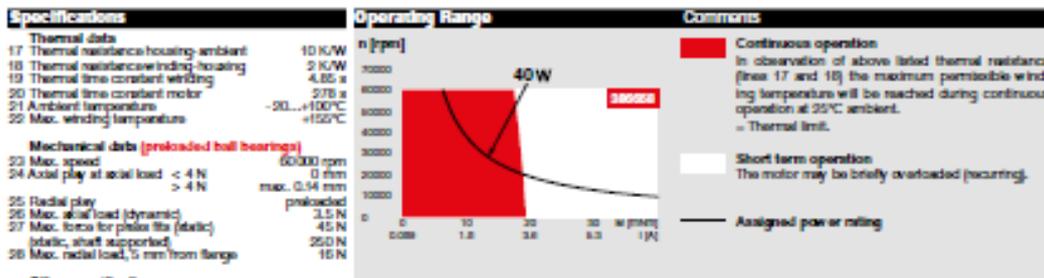
## EC 22 Ø22 mm, brushless, 40 Watt



M 1:1  
Connector: 6-pin 2.5 mm  
part number 470367  
e.g. WCON WF2512-100

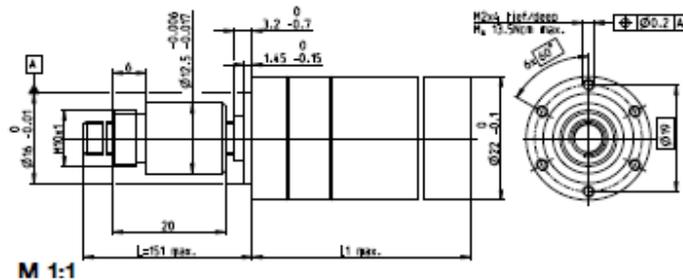
|                     | Part Numbers |        |        |        |
|---------------------|--------------|--------|--------|--------|
|                     | 386657       | 386658 | 386659 | 386660 |
| A with Hall sensors | 386661       | 386662 | 386663 | 386664 |
| B sensorless        |              |        |        |        |

| Motor Data                                  |                  |        |        |       |       |
|---|------------------|--------|--------|-------|-------|
| Values at nominal voltage                   |                  |        |        |       |       |
| 1 Nominal voltage                           | V                | 12     | 24     | 36    | 48    |
| 2 No load speed                             | rpm              | 30400  | 32200  | 31600 | 34000 |
| 3 No load current                           | mA               | 238    | 144    | 83.3  | 69.3  |
| 4 Nominal speed                             | rpm              | 26600  | 21800  | 20300 | 20800 |
| 5 Nominal torque (max. continuous torque)   | mNm              | 20.9   | 20.7   | 20.4  | 20.1  |
| 6 Nominal current (max. continuous current) | A                | 5.75   | 3.59   | 1.95  | 1.56  |
| 7 Stall torque                              | mNm              | 184    | 243    | 291   | 237   |
| 8 Stall current                             | A                | 48.1   | 37.4   | 20.4  | 17.7  |
| 9 Max. efficiency                           | %                | 87     | 86     | 86    | 86    |
| Characteristics                             |                  |        |        |       |       |
| 10 Terminal resistance phase to phase       | Ω                | 0.244  | 0.241  | 1.76  | 2.71  |
| 11 Terminal inductance phase to phase       | mH               | 0.0182 | 0.0246 | 0.132 | 0.221 |
| 12 Torque constant                          | mNm/A            | 3.75   | 6.49   | 10.8  | 13.3  |
| 13 Speed constant                           | rpm/V            | 2520   | 1470   | 882   | 716   |
| 14 Speed/torque gradient                    | rpm/mNm          | 156    | 145    | 144   | 145   |
| 15 Mechanical time constant                 | ms               | 4.16   | 3.64   | 3.6   | 3.64  |
| 16 Rotor inertia                            | gcm <sup>2</sup> | 2.29   | 2.29   | 2.29  | 2.29  |



| Other specifications                      | maxon Modular System | Overview on page 28-38 |
|---|----------------------|------------------------|
| 29 Number of pole pairs                   | 1 Planetary Gearhead |                        |
| 30 Number of phases                       | 3 Ø22 mm             |                        |
| 31 Weight of motor                        | 85 g                 |                        |
| Values listed in the table are nominal.   |                      |                        |
| <b>Connection A</b>                       |                      |                        |
| brown                                     | Motor winding 1      | Pin 1                  |
| red                                       | Motor winding 2      | Pin 2                  |
| orange                                    | Motor winding 3      | Pin 3                  |
| yellow                                    | V-Hall 3...24 VDC    | Pin 4                  |
| green                                     | GND                  | Pin 5                  |
| blue                                      | Hall sensor 1        | Pin 6                  |
| violet                                    | Hall sensor 2        | Pin 7                  |
| grey                                      | Hall sensor 3        | Pin 8                  |
| Wiring diagram for Hall sensors see p. 41 |                      |                        |
| <b>Connection B (Cable AWG 24)</b>        |                      |                        |
| brown                                     | Motor winding 1      |                        |
| red                                       | Motor winding 2      |                        |
| orange                                    | Motor winding 3      |                        |

## Spindle Drive GP 22 S Ø22 mm, Metric Lead Screw



### Technical Data

|  |                                    |
|--|------------------------------------|
| Screw                                    | M0 x 1, stainless steel            |
| Standard length                          | 151 mm                             |
| Special length (5 mm steps)              | max. 300 mm                        |
| Nut (standard)                           | thread nut                         |
| Material                                 | bronze                             |
| Axial play                               | < 0.008 mm                         |
| Planetary gearhead                       | straight tooth                     |
| Bearing                                  | ball bearing/thrust roller bearing |
| Radial play, 5 mm from flange            | < 0.05 mm                          |
| Axial play                               | preload                            |
| Max. continuous input speed <sup>2</sup> | 8000 rpm                           |
| Recommended temperature range            | -15...+80°C                        |
| Max. axial load (static) <sup>1</sup>    | 550 N                              |
| Number of stages                         | 1 2 3 4                            |
| Max. radial load, 15 mm from flange      | 80 N 130 N 180 N 180 N             |

maxon spindle drive

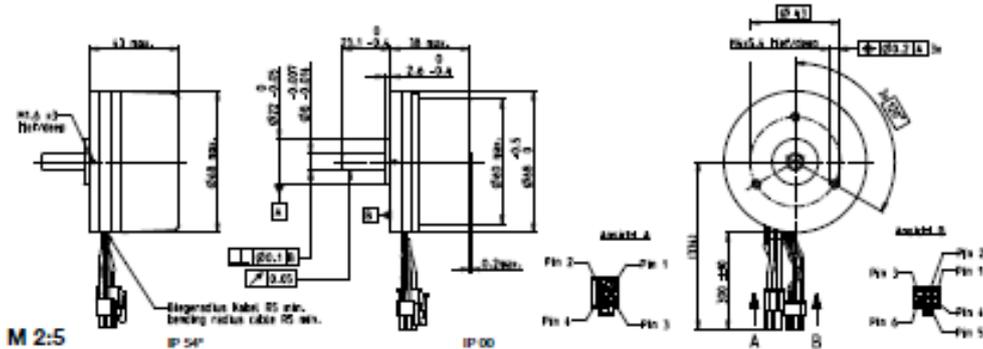
|   | Part Numbers     |         |          |        |        |        |        |        |        |       |
|---|------------------|---------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
|   | 363826           | 363827  | 363830   | 363834 | 363835 | 363840 | 363845 | 363850 | 363855 |       |
| <b>Spindle Drive Data</b>                         |                  |         |          |        |        |        |        |        |        |       |
| 1 Reduction                                       | 1:1              | 3.8:1   | 14:1     | 29:1   | 53:1   | 80:1   | 108:1  | 333:1  | 470:1  |       |
| 2 Absolute reduction                              | 1/1              | 1/4     | 1/14     | 1/29   | 1/53   | 1/80   | 1/108  | 1/333  | 1/470  |       |
| 20 Max. feed velocity <sup>1</sup>                | 101 mm/s         | 35      | 9.5      | 4.6    | 2.5    | 1.5    | 0.7    | 0.4    | 0.3    |       |
| 21 Max. feed force (continuous) <sup>1</sup>      | 42 N             | 60      | 92       | 118    | 144    | 171    | 223    | 266    | 300    |       |
| 22 Max. feed force (intermittent) <sup>1</sup>    | 118 N            | 167     | 250      | 330    | 350    | 350    | 350    | 350    | 350    |       |
| <b>Part Numbers</b>                               |                  | 363828  | 364040   |        | 363836 | 363841 | 363846 | 363851 | 363856 |       |
| 1 Reduction                                       |                  | 4.4:1   | 16:1     |        | 82:1   | 104:1  | 231:1  | 370:1  | 561:1  |       |
| 2 Absolute reduction                              |                  | 1/4.4   | 1/16     |        | 1/82   | 1/104  | 1/231  | 1/370  | 1/561  |       |
| 20 Max. feed velocity <sup>1</sup>                |                  | 30 mm/s | 8.3      |        | 2.2    | 1.3    | 0.6    | 0.4    | 0.2    |       |
| 21 Max. feed force (continuous) <sup>1</sup>      |                  | 63 N    | 97       |        | 152    | 180    | 235    | 275    | 316    |       |
| 22 Max. feed force (intermittent) <sup>1</sup>    |                  | 176 N   | 270      |        | 350    | 350    | 350    | 350    | 350    |       |
| <b>Part Numbers</b>                               |                  | 363829  | 363831   |        | 363837 | 363842 | 363847 | 363852 | 363857 |       |
| 1 Reduction                                       |                  | 5.4:1   | 19:1     |        | 72:1   | 109:1  | 270:1  | 389:1  | 590:1  |       |
| 2 Absolute reduction                              |                  | 1/5.4   | 1/19     |        | 1/72   | 1/109  | 1/270  | 1/389  | 1/590  |       |
| 20 Max. feed velocity <sup>1</sup>                |                  | 25 mm/s | 7.0      |        | 1.9    | 1.2    | 0.5    | 0.3    | 0.2    |       |
| 21 Max. feed force (continuous) <sup>1</sup>      |                  | 67 N    | 102      |        | 159    | 183    | 248    | 280    | 321    |       |
| 22 Max. feed force (intermittent) <sup>1</sup>    |                  | 188 N   | 286      |        | 350    | 350    | 350    | 350    | 350    |       |
| <b>Part Numbers</b>                               |                  |         | 363832   |        | 363838 | 363843 | 363848 | 363853 | 363858 |       |
| 1 Reduction                                       |                  |         | 20:1     |        | 70:1   | 128:1  | 285:1  | 410:1  | 690:1  |       |
| 2 Absolute reduction                              |                  |         | 1/20     |        | 1/70   | 1/128  | 1/285  | 1/410  | 1/690  |       |
| 20 Max. feed velocity <sup>1</sup>                |                  |         | 6.7 mm/s |        | 1.8    | 1.0    | 0.5    | 0.3    | 0.2    |       |
| 21 Max. feed force (continuous) <sup>1</sup>      |                  |         | 104 N    |        | 162    | 193    | 252    | 285    | 339    |       |
| 22 Max. feed force (intermittent) <sup>1</sup>    |                  |         | 291 N    |        | 350    | 350    | 350    | 350    | 350    |       |
| <b>Part Numbers</b>                               |                  |         | 363833   |        | 363839 | 363844 | 363849 | 363854 | 363859 |       |
| 1 Reduction                                       |                  |         | 24:1     |        | 84:1   | 157:1  | 316:1  | 455:1  | 850:1  |       |
| 2 Absolute reduction                              |                  |         | 1/24     |        | 1/84   | 1/157  | 1/316  | 1/455  | 1/850  |       |
| 20 Max. feed velocity <sup>1</sup>                |                  |         | 5.6 mm/s |        | 1.6    | 0.8    | 0.4    | 0.3    | 0.2    |       |
| 21 Max. feed force (continuous) <sup>1</sup>      |                  |         | 111 N    |        | 168    | 207    | 261    | 295    | 350    |       |
| 22 Max. feed force (intermittent) <sup>1</sup>    |                  |         | 310 N    |        | 350    | 350    | 350    | 350    | 350    |       |
| 4 Number of stages                                |                  | 0       | 1        | 2      | 2      | 3      | 3      | 4      | 4      |       |
| 7 Max. efficiency gearhead incl. screw            | %                | 42      | 35       | 29     | 29     | 25     | 25     | 20     | 20     | 20    |
| 8 Weight <sup>1</sup>                             | g                | 103     | 103      | 116    | 116    | 128    | 128    | 141    | 141    | 141   |
| 9 Average backlash no load                        | "                | 1.0     | 1.0      | 1.2    | 1.2    | 1.6    | 1.6    | 2.0    | 2.0    | 2.0   |
| 23 Mechanical positioning accuracy <sup>1</sup>   | mm               | 0.034   | 0.034    | 0.034  | 0.034  | 0.034  | 0.034  | 0.037  | 0.037  | 0.037 |
| 10 Mass inertia gearhead incl. screw <sup>1</sup> | gcm <sup>2</sup> | 10      | 1.0      | 0.4    | 0.4    | 0.3    | 0.3    | 0.3    | 0.3    | 0.3   |
| 11 Gearhead length L1                             | mm               | 38.0    | 38.0     | 44.8   | 44.8   | 51.6   | 51.6   | 58.4   | 58.4   | 58.4  |

<sup>1</sup>based on screw length 151 mm (standard length) <sup>2</sup> for reduction 1:1 = 6088 rpm



TAVOLA 8, DATASHEET GP 22 S.

## EC 60 flat $\varnothing 68$ mm, brushless, 100 Watt



M 2:5

■ Stock program  
 Standard program  
 Special program (on request)

### Part Numbers

| IP 54* (with cover)   | 412013 | 412023 | 412033 | 412043 | 412053 |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| IP 00 (without cover) |        |        | 412038 |        |        |

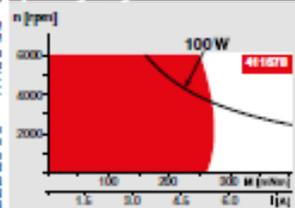
### Motor Data

| Values at nominal voltage                   |                  | 12     | 12     | 24    | 24    | 48    | 48    |
|---|------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 1 Nominal voltage                           | V                | 12     | 12     | 24    | 24    | 48    | 48    |
| 2 No load speed                             | rpm              | 3710   | 3710   | 4250  | 4250  | 3370  | 3370  |
| 3 No load current                           | mA               | 671    | 671    | 419   | 419   | 187   | 187   |
| 4 Nominal speed                             | rpm              | 3260   | 3170   | 3640  | 3740  | 3580  | 3430  |
| 5 Nominal torque (max. continuous torque)   | mNm              | 231    | 273    | 257   | 289   | 257   | 319   |
| 6 Nominal current (max. continuous current) | A                | 7.81   | 9.25   | 4.43  | 5.47  | 2.3   | 2.78  |
| 7 Stall torque                              | mNm              | 2650   | 2650   | 4180  | 4180  | 5010  | 5010  |
| 8 Stall current                             | A                | 33.5   | 33.5   | 78.3  | 78.3  | 43.8  | 43.8  |
| 9 Max. efficiency                           | %                | 84     | 84     | 86    | 86    | 88    | 88    |
| <b>Characteristics</b>                      |                  |        |        |       |       |       |       |
| 10 Terminal resistance phase to phase       | $\Omega$         | 0.126  | 0.126  | 0.307 | 0.307 | 1.1   | 1.1   |
| 11 Terminal inductance phase to phase       | mH               | 0.0615 | 0.0615 | 0.198 | 0.198 | 0.864 | 0.864 |
| 12 Torque constant                          | mNm/A            | 30.5   | 30.5   | 53.4  | 53.4  | 114   | 114   |
| 13 Speed constant                           | rpm/V            | 313    | 313    | 173   | 173   | 83.4  | 83.4  |
| 14 Speed/torque gradient                    | rpm/mNm          | 1.32   | 1.32   | 1.03  | 1.03  | 0.798 | 0.798 |
| 15 Mechanical time constant                 | ms               | 16.7   | 16.7   | 13    | 13    | 12.1  | 10.1  |
| 16 Rotor inertia                            | gmm <sup>2</sup> | 1210   | 1210   | 1210  | 1210  | 1210  | 1210  |

### Specifications

| Thermal data   |                |                   |
|--|----------------|-------------------|
| 17 Thermal resistance housing-ambient                          | 4.24 (2.5) K/W |                   |
| 18 Thermal resistance winding-housing                          | 2.5 K/W        |                   |
| 19 Thermal time constant winding                               | 40 s           |                   |
| 20 Thermal time constant motor                                 | 155 (86.9) s   |                   |
| 21 Ambient temperature   | -40...+100°C   |                   |
| 22 Max. winding temperature                                    | +125°C         |                   |
| Mechanical data (preloaded ball bearings)                      |                |                   |
| 23 Max. speed  | 5000 rpm       |                   |
| 24 Axial play at axial load < 10.0 N                           | 0 mm           |                   |
|  | > 10.0 N       | 0.54 mm preloaded |
| 25 Radial play   |                |                   |
| 26 Max. axial load (dynamic)                                   | 12 N           |                   |
| 27 Max. force for shaft fit (static) (static, shaft supported) | 170 N          |                   |
| 28 Max. radial load, 5 mm from flange                          | 8000 N         |                   |
| 29 Max. radial load, 5 mm from flange                          | 112 N          |                   |
| Other specifications   |                |                   |
| 29 Number of pole pairs  | 7              |                   |
| 30 Number of phases  | 3              |                   |
| 31 Weight of motor   | 470 g          |                   |

### Operating Range



### Comments

- Continuous operation  
In observation of above listed thermal resistance (lines 17 and 18) the maximum permissible winding temperature will be reached during continuous operation at 35°C ambient.  
= Thermal limit.
- Short term operation  
The motor may be briefly overloaded (overcuring).
- Assigned power rating

### Other specifications

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| 29 Number of pole pairs | 7     |
| 30 Number of phases     | 3     |
| 31 Weight of motor      | 470 g |

Values listed in the table are nominal.

| Connection motor (Cable AWG 18)   |                             |       |  |
|-----------------------------------|-----------------------------|-------|--|
| red                               | Motor winding 1             | Pin 1 |  |
| black                             | Motor winding 2             | Pin 2 |  |
| white                             | Motor winding 3             | Pin 3 |  |
| N.C.                              |                             | Pin 4 |  |
| Connector Part number             |                             |       |  |
| Motor                             | 25-01-5040                  |       |  |
| Connection sensors (Cable AWG 20) |                             |       |  |
| gray                              | Hall sensor 1               | Pin 1 |  |
| gray                              | Hall sensor 2               | Pin 2 |  |
| gray                              | Hall sensor 3               | Pin 3 |  |
| gray                              | GND                         | Pin 4 |  |
| Blue                              | V <sub>DD</sub> 4.5...18VDC | Pin 5 |  |
| N.C.                              |                             | Pin 6 |  |
| Connector Part number             |                             |       |  |
| Motor                             | 433-25-1000                 |       |  |

Wiring diagram for Hall sensors see p. 43

\* Protection class only when installed with flange side seal.

270 maxon EC motor

### maxon Modular System

Planetary Gearhead  
250 mm  
4 - 30 Nm  
Page 251



### Recommended Electronic

Notes Page 32

ESCON Mod. 50/4 EC-5 427

ESCON Mod. 50/5 427

ESCON 50/5 428

ESCON 70/10 428

DEC Module 50/5 430

EPOS2 24/5 435

EPOS2 50/5 435

EPOS2 70/10 435

EPOS2 P 24/5 438

EPOS4 Module C11 50/5 440

EPOS4 Module 50/5 443

EPOS4 Comp. 50/5 CAN 443

MAXPOS 50/5 447

### Overview on page 28-38

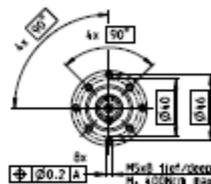
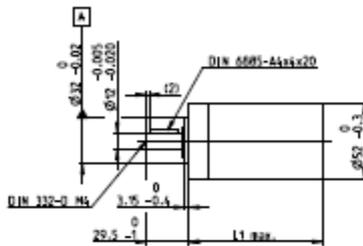
Encoder MELE  
512 - 4096 CPT,  
2 channels  
Page 389

May 2017 edition / subject to change

TAVOLA 9, DATASHEET EC 60 FLAT.

## Planetary Gearhead GP 52 C $\varnothing 52$ mm, 4–30 Nm

Ceramic Version



M 1:4

### Technical Data

|  |                                   |
|--|-----------------------------------|
| Planetary Gearhead                     | straight tooth                    |
| Output shaft                           | stainless steel                   |
| Bearing at output                      | preloaded ball bearings           |
| Radial play, 12 mm from flange         | max. 0.06 mm                      |
| Axial play at axial load               | < 5 N: 0 mm<br>> 5 N: max. 0.3 mm |
| Max. axial load (dynamic)              | 200 N                             |
| Max. force for press fits              | 500 N                             |
| Direction of rotation, drive to output | -                                 |
| Max. continuous input speed            | 6000 rpm                          |
| Recommended temperature range          | -15...+80°C                       |
| Extended range as option               | -40...+100°C                      |
| Number of stages                       | 1 2 3 4                           |
| Max. radial load, 12 mm from flange    | 420 N 630 N 900 N 900 N           |

- Stock program
- Standard program
- Special program (on request)

### Part Numbers

|   | 223080                 | 223083                  | 223086                           | 223094                   | 223097                           | 223104                                    | 223109 |
|---|------------------------|-------------------------|----------------------------------|--------------------------|----------------------------------|---|--------|
| <b>Gearhead Data</b>                      |                        |                         |                                  |                          |                                  |   |        |
| 1 Reduction                               | 3.5:1                  | 12:1                    | 43:1                             | 91:1                     | 150:1                            | 310:1                                     | 546:1  |
| 2 Absolute reduction                      | $\frac{7}{2}$          | $\frac{24}{2}$          | $\frac{24 \times 7}{2}$          | 91                       | $\frac{24 \times 7 \times 5}{2}$ | $\frac{24 \times 7 \times 5 \times 3}{2}$ | 546    |
| 10 Mass inertia                           | gcm <sup>2</sup> 20.7  | 17.6                    | 17.3                             | 16.7                     | 17.3                             | 16.8                                      | 16.4   |
| 3 Max. motor shaft diameter               | mm 10                  | 10                      | 10                               | 10                       | 10                               | 10  | 10     |
| <b>Part Numbers</b>                       |                        |                         |                                  |                          |                                  |   |        |
| 1 Reduction                               | 4.3:1                  | 15:1                    | 53:1                             | 113:1                    | 188:1                            | 353:1                                     | 670:1  |
| 2 Absolute reduction                      | $\frac{7 \times 3}{2}$ | $\frac{15 \times 3}{2}$ | $\frac{15 \times 7 \times 3}{2}$ | $\frac{113 \times 3}{2}$ | $\frac{188 \times 3}{2}$         | $\frac{188 \times 3 \times 3}{2}$         | 670    |
| 10 Mass inertia                           | gcm <sup>2</sup> 12    | 16.8                    | 17.2                             | 9.3                      | 17.3                             | 9.4                                       | 9.1    |
| 3 Max. motor shaft diameter               | mm 8                   | 10                      | 10                               | 8                        | 10                               | 8   | 8      |
| <b>Part Numbers</b>                       |                        |                         |                                  |                          |                                  |   |        |
| 1 Reduction                               |                        | 10:1                    | 66:1                             | 126:1                    | 230:1                            | 304:1                                     | 750:1  |
| 2 Absolute reduction                      |                        | $\frac{10 \times 3}{2}$ | $\frac{66 \times 3}{2}$          | 126                      | $\frac{230 \times 3}{2}$         | $\frac{304 \times 3}{2}$                  | 750    |
| 10 Mass inertia                           | gcm <sup>2</sup>       | 9.5                     | 16.7                             | 16.4                     | 16.8                             | 16.7                                      | 16.4   |
| 3 Max. motor shaft diameter               | mm                     | 8                       | 10                               | 10                       | 10                               | 10  | 10     |
| <b>Part Numbers</b>                       |                        |                         |                                  |                          |                                  |   |        |
| 1 Reduction                               |                        | 223086                  | 223092                           | 223098                   | 223102                           | 223107                                    | 223112 |
| 1 Reduction                               |                        | 21:1                    | 74:1                             | 156:1                    | 257:1                            | 441:1                                     | 686:1  |
| 2 Absolute reduction                      |                        | 21                      | $\frac{7 \times 3}{2}$           | 156                      | $\frac{156 \times 3}{2}$         | 441                                       | 686    |
| 10 Mass inertia                           | gcm <sup>2</sup>       | 16.5                    | 17.2                             | 9.1                      | 17.3                             | 16.5                                      | 9.1    |
| 3 Max. motor shaft diameter               | mm                     | 10                      | 10                               | 8                        | 10                               | 10  | 8      |
| <b>Part Numbers</b>                       |                        |                         |                                  |                          |                                  |   |        |
| 1 Reduction                               |                        | 223087                  | 223093                           |                          | 223103                           | 223108                                    |        |
| 1 Reduction                               |                        | 28:1                    | 81:1                             |                          | 285:1                            | 488:1                                     |        |
| 2 Absolute reduction                      |                        | 28                      | $\frac{21 \times 3 \times 7}{2}$ |                          | $\frac{15379 \times 3}{54}$      | $\frac{4304 \times 3}{6}$                 |        |
| 10 Mass inertia                           | gcm <sup>2</sup>       | 9.1                     | 9.4                              |                          | 16.7                             | 9.4                                       |        |
| 3 Max. motor shaft diameter               | mm                     | 8                       | 8                                |                          | 10                               | 8   |        |
| 4 Number of stages                        |                        | 1                       | 2                                | 3                        | 4                                | 4   | 4      |
| 5 Max. continuous torque                  | Nm                     | 4                       | 15                               | 30                       | 30                               | 30  | 30     |
| 6 Max. intermittent torque at gear output | Nm                     | 6                       | 22.5                             | 45                       | 45                               | 45  | 45     |
| 7 Max. efficiency                         | %                      | 91                      | 83                               | 75                       | 75                               | 68  | 68     |
| 8 Weight                                  | g                      | 460                     | 620                              | 770                      | 770                              | 920                                       | 920    |
| 9 Average backlash no load                |                        | 0.6                     | 0.8                              | 1.0                      | 1.0                              | 1.0                                       | 1.0    |
| 11 Gearhead length L1                     | mm                     | 49.0                    | 65.0                             | 78.5                     | 78.5                             | 92.0                                      | 92.0   |



TAVOLA 10, DATASHEET GP 52 C.

# Fonti bibliografiche

- E. Funaioli, A. Maggiore, U. Menghetti, *Lezioni di Meccanica Applicata alle Macchine*-prima parte: *Fondamenti di Meccanica delle Macchine*, Pàtron, Bologna, 2005.
- E. Funaioli, A. Maggiore, U. Menghetti, *Lezioni di Meccanica Applicata alle Macchine*-seconda parte: *Elementi di Meccanica degli Azionamenti*, Pàtron, Bologna, 2009.
- Catalogo Maxon Motor 2017-18.

## Ringraziamenti

Desidero ringraziare innanzitutto l'ing. Marco Troncossi e l'ing. Alberto Martini, per la grande disponibilità, ma soprattutto per la grande pazienza dimostrata durante questo lavoro di Tesi. Hanno ascoltato e discusso le mie idee nonostante la mia poca esperienza.

Uno speciale ringraziamento va ai miei genitori per avermi permesso di seguire questo corso di studi e per l'appoggio che non mi hanno mai fatto mancare.

Ringrazio poi tutti i miei familiari per avermi sempre spronato durante questi 3 anni, in particolare mia nonna, Deanna, Paola e Rosella.

Un grazie va a Vincenzo ed Edoardo che hanno condiviso con me questo percorso, mi hanno aiutato in diverse situazioni, ma soprattutto hanno reso più leggere le giornate in facoltà.

Infine voglio ringraziare tutti i miei amici per i momenti fuori dall'università, poiché penso che oltre a tanto impegno, lo svago sia fondamentale nell'affrontare un percorso di studi.