

POLITECNICO DI TORINO

---

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea

# Dimensionamento di un braccio robotico a 6 assi

Progetto rover Trinity - Team DIANA



**Relatore**  
prof. Stefano Pastorelli

**Laureando**  
Luigi DI RADO  
matricola: 204427

ANNO ACCADEMICO 2019 – 2020

# Ringraziamenti

# Indice

<b>1 Rover Esplorativi e di Assistenza: Scenari di missione</b>	5
1.1 Dall'esplorazione robotica all'assistenza di equipaggi . . . . .	6
1.2 Rover Challenge Series: regolamento e requisiti nelle competizioni tra Rover	6
1.3 Scenari affrontati nelle competizioni e ruolo di un manipolatore robotico .	7
1.3.1 Manutenzione . . . . .	7
1.3.2 Raccolta di campioni scientifici . . . . .	8
1.3.3 Scenario Fetch and Collect . . . . .	8
<b>2 Design di un manipolatore a 6 gradi di libertà</b>	9
2.1 Analisi preliminare dei requisiti . . . . .	9
2.2 Gradi di libertà necessari . . . . .	10
2.3 Task di manipolazione e destrezza: Worst case . . . . .	11
2.4 Workspace necessario . . . . .	11
2.5 Struttura del robot . . . . .	13
2.6 Descrizione del modello di Robot . . . . .	13
2.7 Modello multibody . . . . .	14
<b>3 Attuatori per un progetto di robotica low-cost</b>	17
3.1 Motoriduttori Passo-Passo, trasmissione del Moto e componenti utilizzati .	17
3.1.1 Joint 1 . . . . .	18
3.1.2 Joint 2 . . . . .	21
3.1.3 Cenni di controllo ad anello aperto . . . . .	21
3.2 Attuatori Lineari, Cinematismo Joint 3 . . . . .	21
3.3 Servomotori digitali: Dynamixel MX160 . . . . .	21
3.3.1 Scelta ed integrazione, i vantaggi di un attuatore specifico per im- piego robotico . . . . .	21
<b>4 Polso sferico, design e scelte progettuali</b>	23
4.1 Descrizione . . . . .	23
4.2 Ingombri ed integrazione . . . . .	23
4.3 Scelta dei Cuscinetti . . . . .	23
4.4 Metodo di Lewis . . . . .	23
4.5 Riduzione del numero minimo di denti: ingranamento elicoidale . . . . .	23
4.6 Dimensionamento di un rotismo stampato in 3D, compromessi e assunzioni	23
4.7 Risultati ottenuti dal dimensionamento . . . . .	23

4.8 Compromesso tra dimensionamento e ingombri . . . . .	23
<b>5 Costruzione mediante manifattura additiva e assemblaggio</b>	<b>25</b>
5.1 Studio del materiale da stampa ABSPlus P430 . . . . .	25
5.2 Produzione dei componenti . . . . .	25
5.3 Assemblaggio . . . . .	25
<b>6 Risultati attesi ed ottenuti dal Robot realizzato</b>	<b>27</b>
6.1 Test e collaudo del Robot assemblato . . . . .	27
6.2 Carichi massimi applicati e precisione ottenuta . . . . .	27
6.3 Risultati nelle Competizioni studentesche . . . . .	27
<b>Disegni ed elaborati tecnici</b>	<b>29</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>30</b>

# Capitolo 1

## Rover Esplorativi e di Assistenza: Scenari di missione

Il team DIANA, acronimo di *Ducti Ingenio Accipimus Naturam Astrorum*, lavora nella ricerca e nello sviluppo della robotica per applicazioni spaziali. Il Team è stato fondato nel 2008 in occasione del progetto nazionale AMALIA e ha prodotto tre prototipi di rover: **Amalia**, un rover lunare esplorativo, **T0-R0**, un rover marziano di assistenza che ha partecipato a European Rover Challenge 2018 e **TRINITY**, il nuovo rover marziano che ha partecipato all'European Rover Challenge 2019.

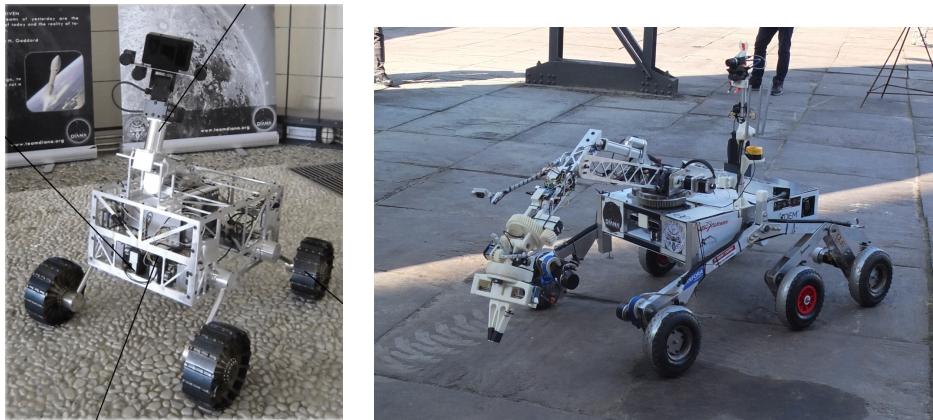


Figura 1.1. Rover AMALIA E T0-R0

Il team DIANA ha un’esperienza decennale nella progettazione e nello sviluppo di modelli di rover per l’esplorazione e l’assistenza e dispone di un set completo di abilità ingegneristiche, ottima conoscenza del software ed eccezionali capacità organizzative, gestionali e di lavoro di squadra, tutte cruciali nella produzione di un progetto complesso. Il team intende porre le basi per un nuovo approccio all’ingegneria aerospaziale, contribuendo a portare la robotica spaziale a un livello più accessibile grazie alla sua tecnica di lavoro innovativa. TRINITY è il prodotto del patrimonio e della competenza di dieci anni di duro

lavoro e ricerca approfondita, condotta con una visione chiara e un approccio specifico. Il team sta affrontando una crescita dal 2018 e la partecipazione all’European Rover Challenge ha avuto un ruolo chiave nel suo sviluppo poiché rappresenta un’opportunità senza precedenti per testare le soluzioni del team e capire dove e come migliorare il suo progetto.



Figura 1.2. Il Team DIANA con TRINITY ad ERC 2019

Nell’ambito del team DIANA che sta diventando un forte gruppo di giovani ingegneri che lavorano nella ricerca e nello sviluppo della robotica spaziale, testare il lavoro svolto in laboratorio è un passo cruciale nello sviluppo. Inoltre, il Team DIANA ha vissuto l’European Rover Challenge come un evento eccezionale, in grado di riunire ingegneri appassionati e qualificati in un ambiente internazionale.

Pertanto, per essere una fonte di competenza, un campo per i test e un’opportunità senza precedenti di crescita e raccolta, la partecipazione all’European Rover Challenge 2019 è senza dubbio un’esperienza necessaria e profondamente desiderata per il Team DIANA.

## 1.1 Dall’esplorazione robotica all’assistenza di equipaggi

I Rover di assistenza progettati dal Team DIANA rappresentano dei modelli di future missioni dove i Rover vengono impiegati nell’assistenza ad un equipaggio umano. Viene a cadere il presupposto per cui le sonde esplorative operano in scenari unmanned e il ruolo dell’operatore diventa centrale nella progettazione del Robot. Esso dovrà avere quanto più possibile un funzionamento autonomo per non sottrarre risorse all’utilizzatore, considerare la presenza di esseri umani nel suo workspace e portare a termine mansioni in ambienti rischiosi per l’essere umano.

## 1.2 Rover Challenge Series: regolamento e requisiti nelle competizioni tra Rover

Le Rover Challenge Series Competitions a cui il Team DIANA rivolge il suo interesse sono competizioni dedicate a studenti dell’area di Ingegneria che mirano a testare i progetti di

Rover in uno scenario che simula le mansioni di un Rover di Assistenza. Si stimola la costituzione di team multidisciplinari che vanno a realizzare un prototipo per competere, corredata da una completa reportistica ispirata alla metodologie attuate nelle principali agenzie spaziali e della documentazione video. Viene inoltre richiesta la gestione del team attraverso strumenti di project management e la gestione finanziaria di stampo aziendale.



Figura 1.3. Terreno marziano a European Rover Challenge 2019

## 1.3 Scenari affrontati nelle competizioni e ruolo di un manipolatore robotico

Le competizioni si svolgono su un terreno accidentato, realizzato da esperti di terrameccanica che vanno a simulare il più possibile uno scenario marziano. Le task vengono svolte in un tempo limitato con il Robot teleoperato e gli operatori sono isolati dalla vista diretta all'interno di una control room.

L'unica task che non coinvolge l'uso del manipolatore robotico è quella di **Navigazione autonoma** che non tratteremo. Pertanto segue l'analisi degli scenari di utilizzo.

### 1.3.1 Manutenzione

La maintenance task come definita dal regolamento *ERC 2019 Student Rules* [1]

*The maintenance task is intended to demonstrate rovers and teams ability and performance in operating electrical panel on which several switches and other electrical components are mounted. The Team has to use rover's manipulating device to set switches to correct positions, measure electrical parameters, set other panel controls and observe device feedback.*

**Successione di operazioni da svolgere :**

1. MAIN switch set to ON position as first;

2. Group 1 and Group 2 switches set up to requested positions;
3. knob set up to requested position
4. voltage measurement reported to the judge
5. High-power plug inserted into the sock
6. No panel damage events occurred (control elements, connectors, covers, foils)
7. task automation efforts and results presented to the judge.

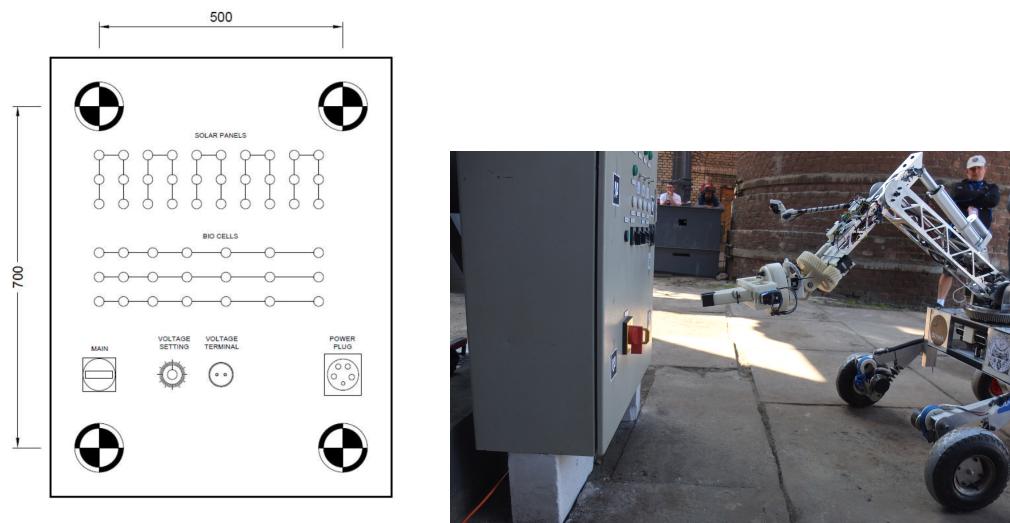


Figura 1.4. Pannello Elettrico e Rover durante la Task

### 1.3.2 Raccolta di campioni scientifici

### 1.3.3 Scenario Fetch and Collect

## Capitolo 2

# Design di un manipolatore a 6 gradi di libertà

### 2.1 Analisi preliminare dei requisiti

Ogni progetto di applicazione aerospaziale, come quello svolto per il Rover Trinity, parte dall'analisi dei requisiti di progetto e dalla formalizzazione dei requisiti in maniera codificata. La tracciabilità dei requisiti, analizzati a partire da uno scenario di missione e dalla vigente normativa è fondamentale all'interno di un progetto aerospaziale perché consente di semplificare gli sviluppi futuri. La costituzione di un database di requisiti, lezioni apprese e errori commessi nel caso in cui i requisiti vengano disattesi consente di abbattere i costi e le tempistiche di sviluppo di progetti futuri evitando la ripetizione di esperimenti ed errori commessi in passato.

ORIG.	REQUISITO	SOLUZIONE TECNICA	VALIDAZIONE
ERC	Il sottosistema braccio deve essere in grado di raggiungere il terreno, raggiungere tutta la superficie dello chassis del rover, raggiungere 1.5 metri di altezza, manipolare elementi nello spazio tridimensionale	Manipolatore robotico antromorfo a 6 assi: dalla letteratura è la soluzione con la maggior destrezza	Modellazione CAD assieme allo chassis del Rover, Script di calcolo del workspace, modello multibody

ERC	Il Sottosistema braccio deve essere in grado di sollevare almeno un payload di 5kg	Robot attuato da motoriduttori passo-passo, attuatori lineari e servomotori ad elevata coppia Trasmissione mediante riduttore a ruote dentate	CAD design del braccio, Matlab script del workspace, modello multibody, modello FEM, teoria di Lewis
MISSION	Il braccio deve avere elevata velocità operativa senza sacrificare l'accuratezza (target of tool center point of $1cm^2$ )	Controllo in microstep dei motori passo passo, encoder relativo per attuatore lineare controllo in posizione dei servomotori	Modello Simulink e cinematica inversa
MISSION	Il braccio deve essere in grado di raggiungere il pannello manutenzione posizionato a 0.5m di distanza con il tool center point perpendicolare	Polso Sferico	CAD design, Matlab script, multibody model

Tabella 2.1: Tabella dei requisiti derivati dal progetto e dal regolamento

## 2.2 Gradi di libertà necessari

Il robot antropomorfo debutta in campo industriale all'inizio degli anni Settanta con l'obiettivo di sostituire l'uomo in alcuni passaggi della catena di montaggio che prevedono lo svolgimento di attività usuranti e pericolose. La struttura meccanica dei robot è costituita da una sequenza di elementi meccanici connessi tra loro da giunti che ne consentono il moto relativo. I singoli elementi possono essere connessi tra loro in serie od in parallelo. La struttura è seriale quando i singoli elementi sono collegati l'uno all'altro come gli anelli di una catena; è parallela quando tutti gli elementi sono collegati sia a terra sia all'estremità della struttura tramite dei giunti rotoidali. L'approccio seriale garantisce una più ampia possibilità di movimento, mentre quello parallelo permette di ottenere una maggiore rigidità.

Un arbitrario spostamento di un corpo rigido può essere ottenuto componendo dei singoli spostamenti fondamentali; ognuno di essi rappresenta un grado di libertà per l'oggetto. I robot industriali, a cui si ispira il progetto, hanno fondamentalmente lo scopo di manipolare degli oggetti, cioè di muoverli nello spazio controllandone posizione ed orientamento. Gli oggetti che i robot si trovano a dover manipolare sono, nella quasi totalità dei casi, riconducibili a corpi solidi. Si tratterà quindi di studiarne i possibili movimenti nello spazio

per poi definire quelle caratteristiche che la struttura deve possedere per poterli realizzare. Infatti l'oggetto, una volta afferrato, è solidale con l'estremità della struttura e quindi ne riproduce fedelmente gli spostamenti.

Un corpo rigido ha, nello spazio, sei gradi di libertà corrispondenti ad altrettante possibilità di spostamento. Ciò significa che la sua posizione e il suo orientamento rispetto ad un sistema di riferimento sono descritte da sei parametri. Per rendere più intuitiva questa affermazione si immagini di rendere solidale con l'oggetto rigido la terna cartesiana xyz in figura 2.1. I sei parametri prima citati risultano ora di facile interpretazione: tre definiscono la posizione dell'origine della terna xyz mentre le rimanenti ne individuano l'orientazione. Gli spostamenti corrispondenti sono tre traslazioni (parallelamente agli assi coordinati) e tre rotazioni (attorno agli stessi assi). Questo permette di affermare che la struttura di un robot, per poter muovere ed orientare arbitrariamente un corpo nello spazio, ha bisogno di un minimo di sei gradi di libertà. Con analoghe considerazioni è facile arrivare a concludere che un corpo rigido, se vincolato a muoversi in un piano, ha tre gradi di libertà.

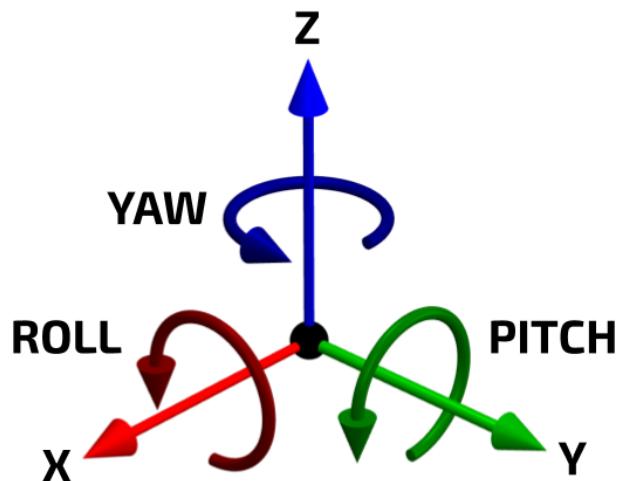


Figura 2.1. 6 gradi di libertà di un corpo rigido nello spazio

## 2.3 Task di manipolazione e destrezza: Worst case

## 2.4 Workspace necessario

Questi robot come quello in figura 2.2 sono detti antropomorfi in quanto riproducono abbastanza fedelmente le possibilità di movimento di un braccio umano o a giunti rotoidali verticali (in quanto il secondo e il terzo grado di libertà, detti rispettivamente spalla e gomito, muovono il braccio del robot all'interno di un piano verticale).

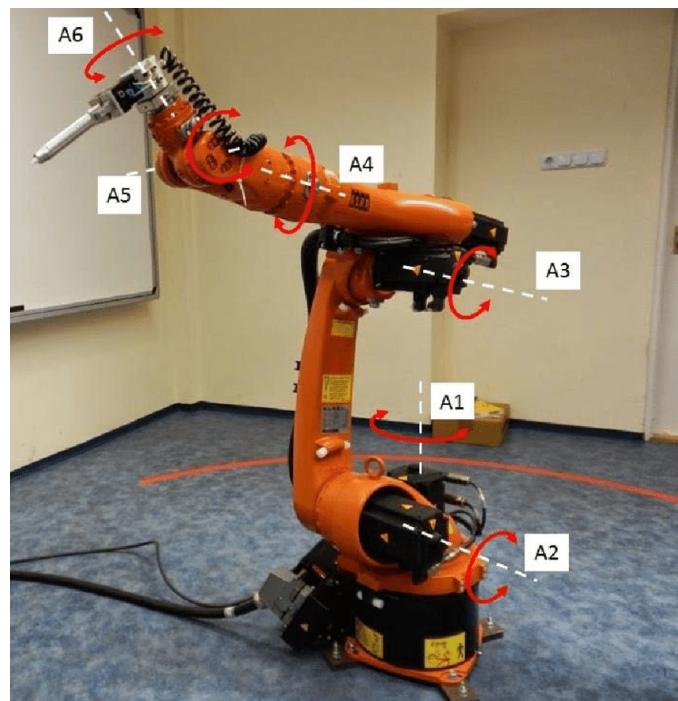


Figura 2.2. Un robot industriale antropomorfo a 6 assi

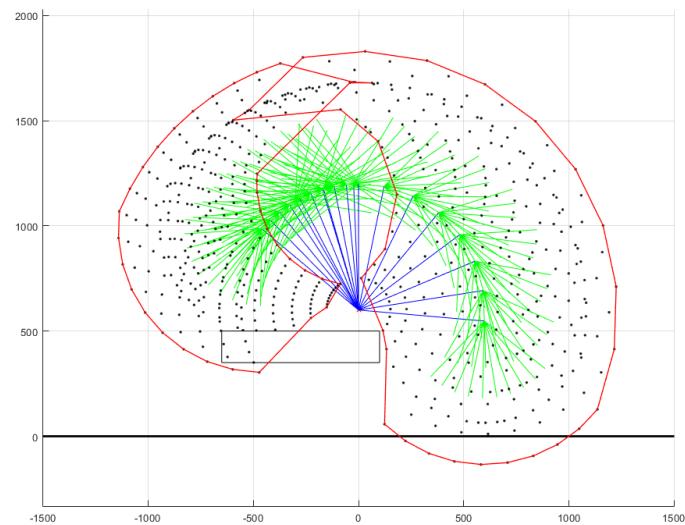


Figura 2.3. Workspace in vista laterale, è rappresentato il piano dello chassis e i punti raggiunti dal TCP

Il volume di lavoro può essere considerato, in prima approssimazione, come una porzione di sfera. Il workspace richiesto per il manipolatore deriva dalle richieste del regolamento e dallo scenario operativo. Si può riassumere nella necessità di raggiungere un'altezza di 1,5 metri e quella del suolo e operare sullo chassis del rover per depositare oggetti e campioni. Il workspace è stato valutato attraverso un semplice calcolo iterativo di cinematica diretta dove la struttura era parametrizzata attraverso le lunghezze dei link. L'obiettivo è quello di realizzare uno spazio di lavoro sufficiente piazzando la posizione dell'Tool Center Point per ogni iterazione in una vista laterale.

Una volta decise delle lunghezze dei link principali è stato possibile iniziare la costruzione dei primi modelli cad della struttura del robot per poterne costruire un modello dinamico e non solo più cinematico.

L'abilità di raggiungere facilmente delle posizioni comunque collocate rispetto al basamento mostra come il robot possa scendere al di sotto della quota della base, estendersi verso l'alto e infine prelevare dei pezzi alle sue spalle con una semplice rotazione attorno al primo grado di libertà. Molte applicazioni pratiche non richiedono necessariamente tutte queste possibilità ma, in generale, si può dire che tutto quello che gli altri robot possono fare, può essere fatto più facilmente da un robot antropomorfo.

## 2.5 Struttura del robot

L'estremità della struttura di un robot possiede in genere sei diverse possibilità di movimento: tre di traslazione per spostamenti nello spazio e tre di rotazione per l'orientazione. Questa divisione dei gradi di libertà in due gruppi con finalità distinte si riflette generalmente nella struttura con una specializzazione dei giunti. I gradi di libertà principali si occupano di posizionare nello spazio gli oggetti manipolati dal robot, quelli secondari di orientarli. Quelli principali formano il braccio del robot mentre quelli secondari il polso. Braccio e polso, in conseguenza della loro funzione, presentano caratteristiche diverse. In primo luogo nella realizzazione del braccio si può scegliere se utilizzare giunti rotoidali o prismatici mentre la realizzazione del polso può avvenire solo con i giunti del primo tipo. Inoltre gli elementi meccanici che compongono il braccio hanno una certa lunghezza mentre quelli del polso sono in genere privi di dimensione, nel senso che gli assi di rotazione dei tre giunti si incontrano in un punto.

## 2.6 Descrizione del modello di Robot

La configurazione scelta è quella di un manipolatore antropomorfo a 6 assi. La struttura per i primi tre assi è realizzata tramite link in profilati di alluminio estrusi e parti lavorate sempre in alluminio mentre le cerniere sono realizzate da alberi in acciaio supportati da boccole a basso coefficiente di attrito. I rimanenti tre assi sono collocati nel Polso Sferico all'estremità, un componente in manifattura additiva che verrà trattato più ampiamente in seguito.

Il polso è costituito da un insieme di non più di tre giunti rotoidali realizzati alla scopo di permettere l'orientazione dell'utensile di manipolazione del robot. Sarebbe molto interessante che i tre assi, attorno a cui avvengono le rotazioni, si incontrino in un ben determinato punto del pezzo manipolato, così che l'operazione di orientamento non vada

a modificare la sua posizione nello spazio di lavoro. Si pensi, come esempio, ad un robot utilizzato in un'applicazione di avvitatura, il cui polso sia realizzato in modo tale che i tre assi di rotazione si incontrino esattamente sopra il giravite. Ciò significa che la vite può essere comunque orientata, ad esempio per mantenerla perpendicolare alla superficie del pezzo che ospita il foro filettato, senza che questo vari la sua posizione nello spazio che risulterebbe governata soltanto dai giunti principali. Poichè è molto difficile realizzare in pratica un polso di questo tipo, quelli dei robot industriali e quello realizzato per manipolatore del rover TRINITY hanno il punto di incontro degli assi di rotazione contenuto all'interno del polso stesso.



Figura 2.4. Render del modello CAD preliminare del robot

Il robot è schematizzato nel disegno 2.5 e nel capitolo 4 verrà analizzato il dimensionamento degli attuatori *Stepper* e dell'*Attuatore Lineare* mentre al **Polso Sferico** sarà dedicato il capitolo 5.

## 2.7 Modello multibody

La costruzione di un modello multibody del robot è fondamentale per avere uno strumento di analisi delle prestazioni richieste agli attuatori e poter selezionare dei componenti adatti sul mercato. Per l'analisi della dinamica del robot è stato costruito un modello multibody attraverso il software *MSC Adams*.

Un sistema dinamico multibody consiste di corpi solidi connessi tra loro tramite giunti che ne limitano o impongono il relativo movimento. Lo studio della dinamica multibody è l'analisi di come questi sistemi si muovono sotto l'influenza di specifiche forze, detta anche dinamica diretta. Lo studio del problema opposto, cioè di quali forze sono necessarie a far muovere il sistema meccanico in un modo specifico è detta dinamica inversa.

La possibilità di studio della dinamica inversa ha permesso di studiare le prestazioni richieste agli attuatori del robot e dimensionare di conseguenza i componenti meccanici della

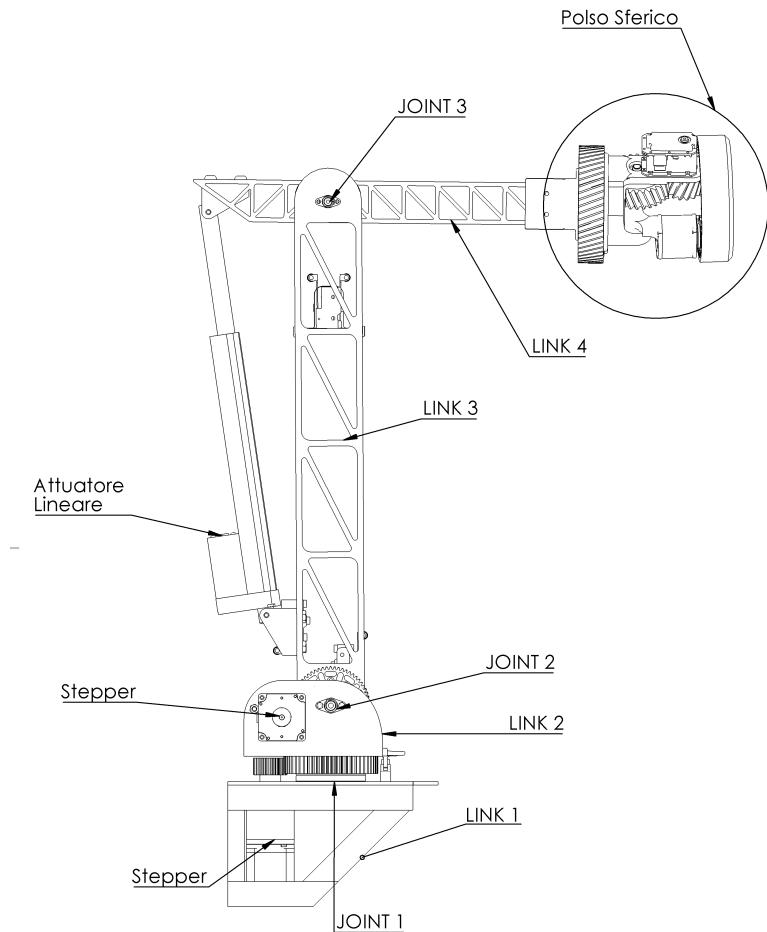


Figura 2.5. Schema delle componenti

trasmissione. Eseguita la simulazione è possibile raccogliere le misure richieste e processare i dati raccolti nello strumento di raccolta dati *Adams/PostProcessor*.

Il modello del robot 2.6 è stato costruito a partire dal modello CAD preliminare 2.4 modellato in ambiente *SolidWorks* importato nello spazio di lavoro di *Adams/View*. I singoli componenti sono stati dotati delle relative matrici di inerzia riferite a un sistema di riferimento favorevole al calcolo dall'output di proprietà di massa del CAD e riferite ad un analogo *Marker* del modello di simulazione. Così facendo la simulazione permetterà di calcolare le forze necessarie affinchè si rispettino le leggi di moto imposte ai giunti. Inoltre il modulo *Adams/Machinery* consente di modellare trasmissioni mediante accoppiamento di ruote dentate e di simularne il comportamento con vari livelli di approssimazione. Nella fattispecie si è scelto l'approccio semplificato che studia il problema di contatto mediante metodo analitico monodimensionale, in modo da fornire un confronto e una verifica del dimensionamento realizzato.

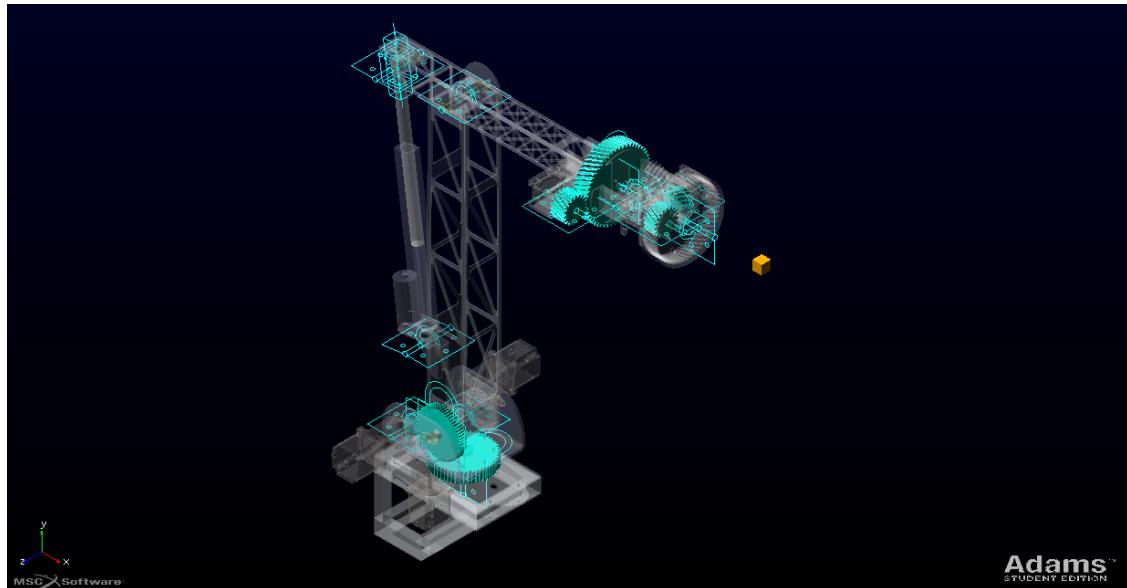


Figura 2.6. Modello del Robot in ambiente Adams, in ciano le icone dei giunti e le trasmissioni mediante ruote dentate

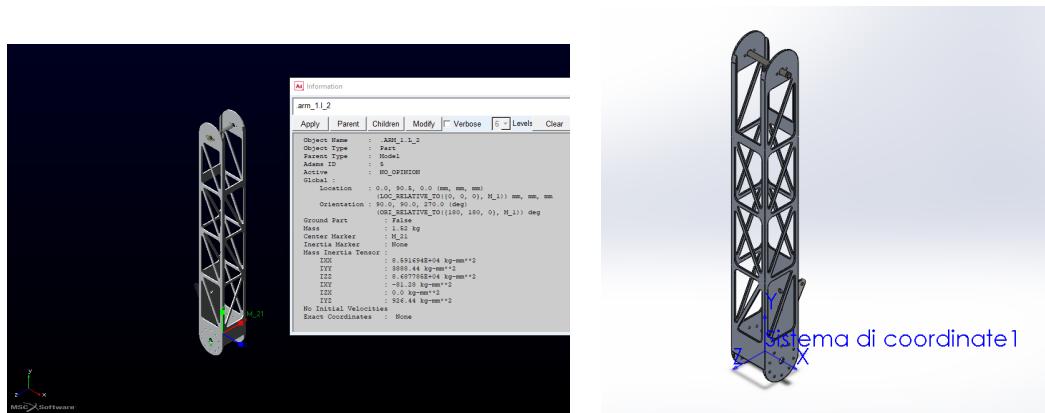


Figura 2.7. Proprietà inerziali del componente e sistema di coordinate nel CAD

# Capitolo 3

## Attuatori per un progetto di robotica low-cost

Il progetto dei Rover che partecipano alle Rover Challenge Series competitions è caratterizzato da un vincolo di costo molto importante. Difatti nella gara progettuale è posto un limite di costo per l'intero progetto che varia da competizione a competizione e dove non ci fosse un limite esplicito è sicuramente premiata l'economia e l'utilizzo di componenti standard già disponibili sul mercato. Questo vincolo si rivela molto importante nella scelta degli attuatori e relativa elettronica di controllo essendo i componenti più costosi di un progetto di questo tipo. Per i giunti di posizionamento sono stati utilizzati motoriduttori passo-passo e un attuatore lineare mentre per i giunti del polso dei servomotori digitali per applicazioni robotiche.

### 3.1 Motoriduttori Passo-Passo, trasmissione del Motore e componenti utilizzati

I motoriduttori passo-passo scelti sono commercializzati dalla Phidgets dal mercato orientale ed offrono un potente e robusto attuatore a basso costo. Hanno risoluzione angolare di  $0.023^\circ$  e una coppia massima di 23 Nm e sono dotati di flangiatura standard NEMA-23 ed albero di uscita di diametro 12 con sede linguetta e anello elastico per accoppiare una ruota dentata. Il secondo alberino di uscita permette di ospitare un encoder ottico per realizzare un controllo in posizione ad anello chiuso.

Il controllo dei motori passo-passo è molto semplice perchè possibile ad anello aperto, attraverso un controllore specifico per la commutazione delle fasi ad onda quadra.

Il controllore scelto è L6208 della STMicroelectronics, è un driver completamente integrato per motore passo-passo con protezione da sovraccorrente. Il dispositivo include tutti i circuiti necessari per pilotare un motore passo-passo bipolare bifase: un doppio ponte DMOS completo, il controller di corrente PWM a tempo di spegnimento costante che esegue la regolazione del taglio e la fase ed un generatore di sequenza, che genera il passo.

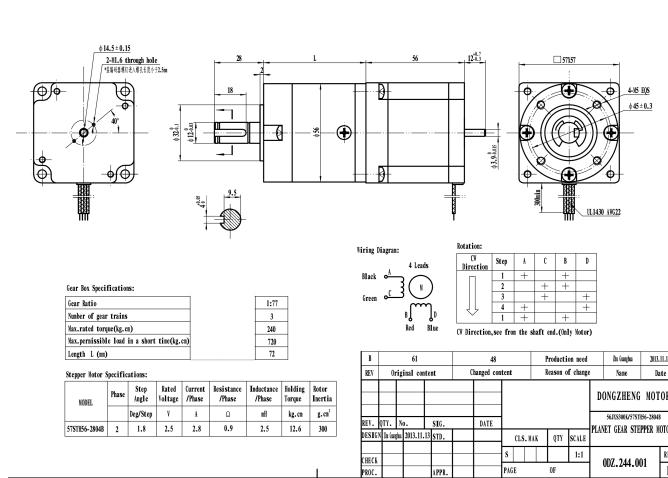


Figura 3.1. Scheda tecnica dell'attuatore 57STH56 NEMA-23

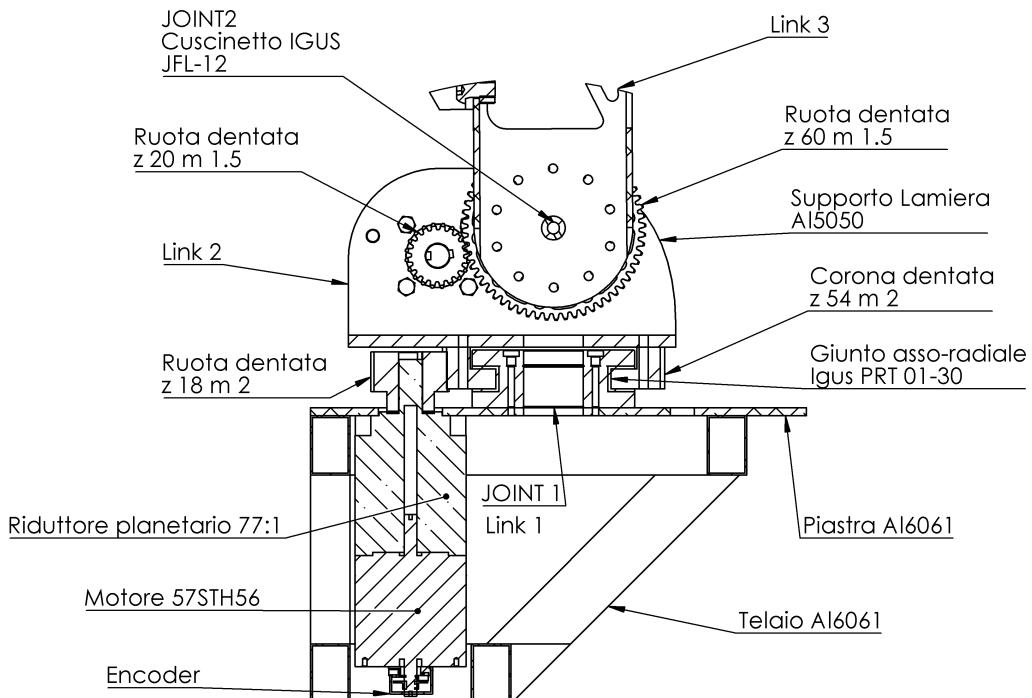


Figura 3.2. Schema della disposizione degli organi di trasmissione per i motori passo-passo

### 3.1.1 Joint 1

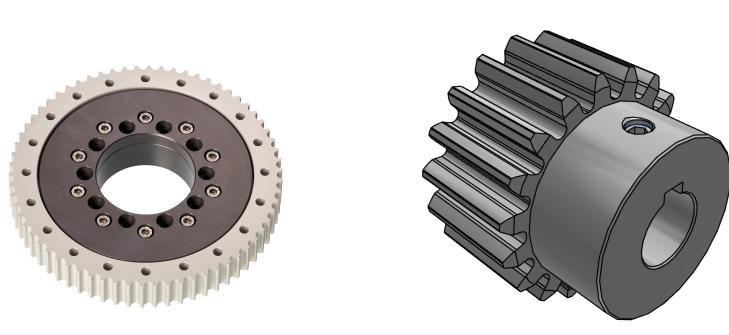


Figura 3.3. Ralla IGUS PRT 01-30 e pignone MISUMI GEAKS2.0-18-20-B-12N

Per il Joint 1, su cui ruota tutta la struttura del robot nel piano orizzontale è necessario realizzare una base rigida su cui gravano il peso dell'intero robot e un importante momento quando il braccio è completamente steso e a sbalzo. Perciò è stato impiegato un apposito giunto asso-radiale prodotto dalla IGUS, il *PRT-01-30* in figura 3.3. La ralla IGUS è dotata di una corona esterna dentata di modulo unificato 2 e 54 denti perciò è stato possibile applicare un pignone prodotto da MISUMI codice GEAKS2.0-18-20-B-12N al motoriduttore da 18 denti per realizzare un rapporto di riduzione pari a 3. L'angolo di pressione è standard da  $20^\circ$  e la dentatura è a denti dritti. Si è assunto che la dentatura di modulo 2 in acciaio fosse in grado di trasmettere la potenza prodotta dal motoriduttore con un ampio margine di sicurezza, pertanto non è stata dimensionata ma sono state solo verificate le forze scambiate dal modello multibody in figura 3.5.

Dal modello multibody sono state misurati due set di dati: quelli relativi alla ralla e quelli relativi all'attuazione. In figura possiamo valutare la coppia richiesta all'attuatore dalla trasmissione con rapporto di riduzione 3 per realizzare una rotazione della base con il braccio in posizione distesa e ritratta, evidenziando l'impatto della posizione degli altri giunti di posizionamento sulla prestazione del motore. Il modello tiene conto dell'attrito opposto dalla cerniera avendo inserito nel modello di simulazione il corretto valore di coefficiente di attrito dinamico fornito dalla produttrice IGUS pari a 0.2.

Dai dati raccolti si evince che nella condizione più sfavorevole in figura 3.4 ci si avvicina al valore di coppia massima prevista per l'attuatore con un valore di 20Nm senza comunque superarla mentre nella condizione favorevole si è ben al di sotto con massimo di 12 Nm. Pertanto si prevede che l'attuatore sarà in grado di movimentare il carico senza che perda passi e quindi si crei uno shift tra la posizione attesa e quella effettivamente raggiunta. Questa condizione può essere comunque recuperata dalla presenza di un encoder che misuri la posizione effettivamente raggiunta.

L'analisi è continuata verificando che il componente scelto per la cerniera possa sopportare i carichi imposti dal meccanismo quando si trova nella condizione più sfavorevole. Dai dati raccolti in figura 3.6 il carico assiale massimo è inferiore ai 7000 Newton previsti dalla scheda tecnica e il momento massimo è inferiore ai 200 Newton per metro previsti. Pertanto il componente è sicuramente in grado di sopportare i carichi imposti dal robot garantendo di non generare giochi nella trasmissione.

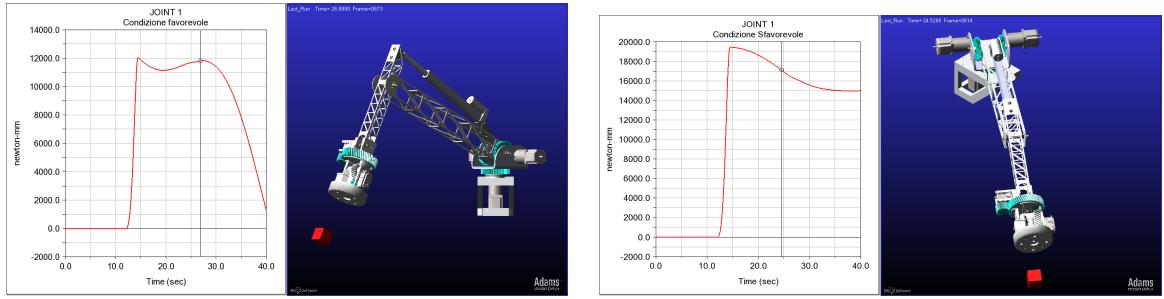


Figura 3.4. Coppia richiesta al motore per attuare la rotazione della base con braccio disteso e ritratto

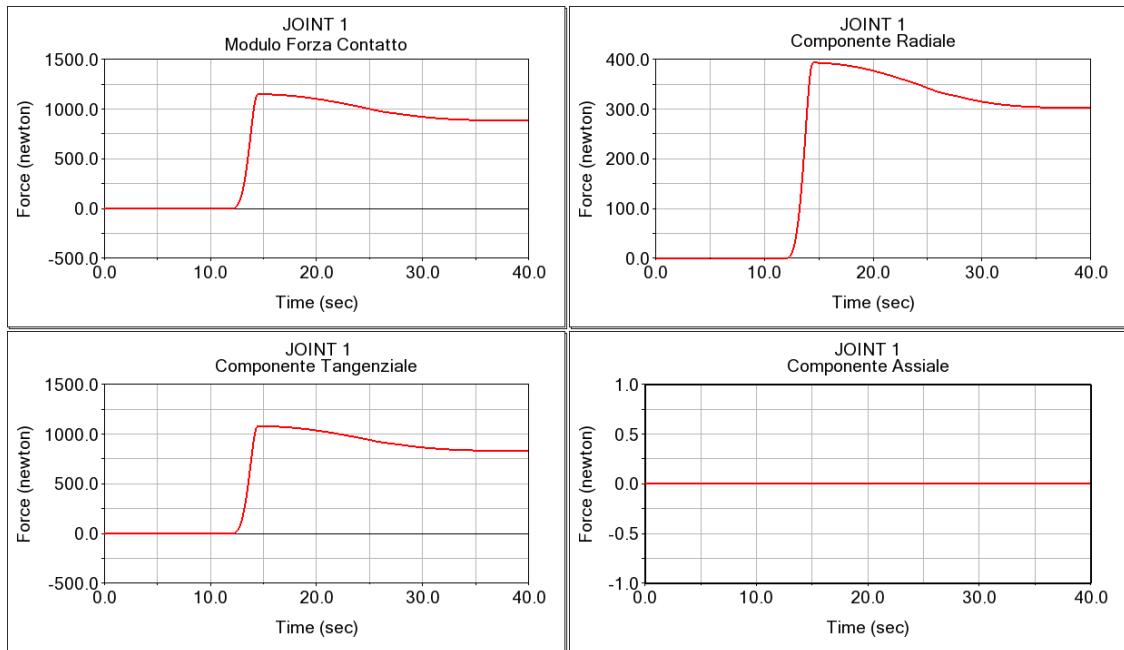


Figura 3.5. Forze scambiate nell’ingranamento

### 3.1.2 Joint 2

### 3.1.3 Cenni di controllo ad anello aperto

## 3.2 Attuatori Lineari, Cinematismo Joint 3

## 3.3 Servomotori digitali: Dynamixel MX160

### 3.3.1 Scelta ed integrazione, i vantaggi di un attuatore specifico per impiego robotico

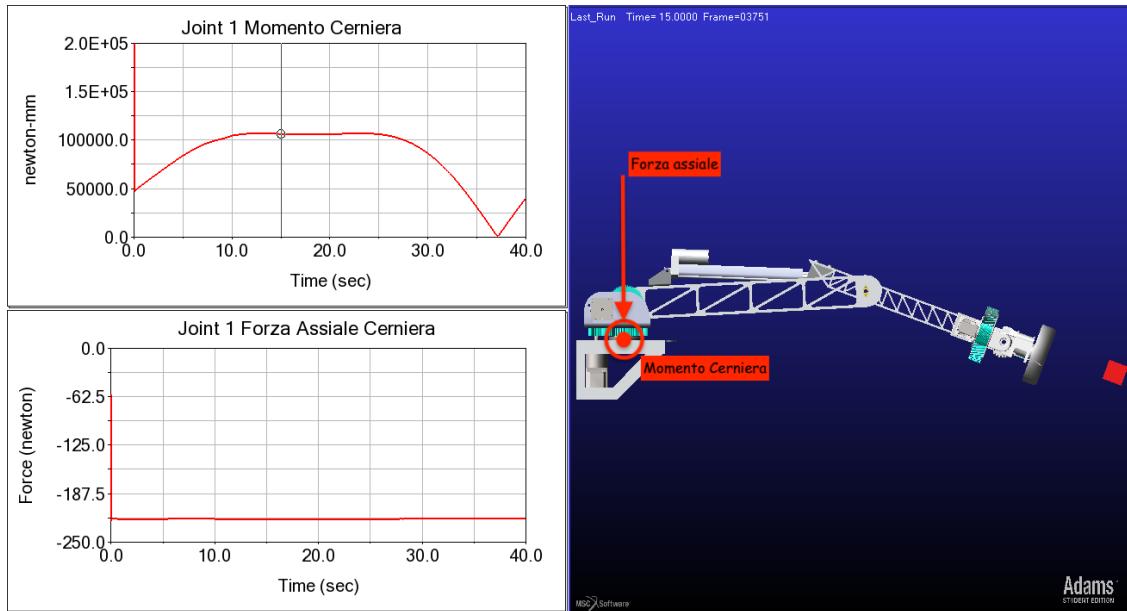


Figura 3.6. Momento di ribaltamento sul giunto e forza assiale nella configurazione più sfavorevole

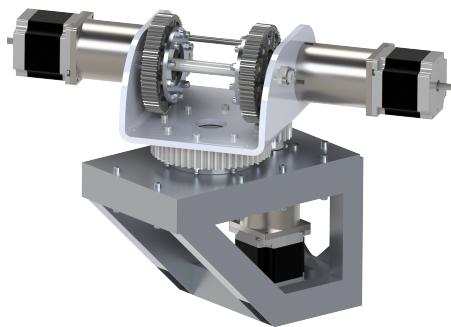


Figura 3.7. Disposizione dei motori passo-passo in un render del modello CAD



## **Capitolo 4**

# **Polso sferico, design e scelte progettuali**

- 4.1 Descrizione**
- 4.2 Ingombri ed integrazione**
- 4.3 Scelta dei Cuscinetti**
- 4.4 Metodo di Lewis**
- 4.5 Riduzione del numero minimo di denti: ingrana-  
mento elicoidale**
- 4.6 Dimensionamento di un rotismo stampato in 3D,  
compromessi e assunzioni**
- 4.7 Risultati ottenuti dal dimensionamento**
- 4.8 Compromesso tra dimensionamento e ingombri**



## **Capitolo 5**

# **Costruzione mediante manifattura additiva e assemblaggio**

- 5.1 Studio del materiale da stampa ABSPlus P430**
- 5.2 Produzione dei componenti**
- 5.3 Assemblaggio**



## **Capitolo 6**

# **Risultati attesi ed ottenuti dal Robot realizzato**

- 6.1 Test e collaudo del Robot assemblato**
- 6.2 Carichi massimi applicati e precisione ottenuta**
- 6.3 Risultati nelle Competizioni studentesche**



# **Disegni ed elaborati tecnici**

# Bibliografia

- [1] European Rover Challenge, *Student Rules*, ERC, gennaio 2019
- [2] E. Torricelli, in “La pressione barometrica”, *Strumenti Moderni*, Il Porcellino, Firenze, 1606.
- [3] E. Torricelli e A. Vasari, in “Delle misure”, *Atti Nuovo Cimento*, vol. III, n. 2 (feb. 1607), p. 27–31.
- [4] Duane J.T., *Learning Curve Approach To Reliability Monitoring*, IEEE Transactions on Aerospace, Vol. 2, pp. 563-566, 1964