



Un sistem de transmisie mecanică cu contact continuu
pentru optimizarea aplicațiilor robotice cu un număr limitat de motoare

Diffy

Proiect realizat de:
Tănase Sebastian-Florin, Băbușanu Dragoș

Cuprins

Bibliografie	1
1 Proiectul nostru	2
1.1 Introducere	2
1.2 Scop	2
1.3 Obiectiv	2
1.4 Problema identificată spre rezolvare, stadiul actual în domeniu	3
1.5 Rolurile noastre în echipă	3
2 Etape parcurse	4
2.1 Definirea problemei	4
2.2 Cercetare	4
2.3 Proiectare detaliată	4
2.4 Construirea prototipului	4
2.5 Testare și evaluare	4
2.6 Îmbunătățire	4
3 Metode și sisteme utilizate	5
3.1 Etape de manufacturare	5
3.1.1 Proiectare	5
3.1.2 Prototipare	5
3.1.3 Prelucrarea	5
3.2 Curelele pentru transmisii	6
3.3 Schema tehnică și calculele cinematice	6
3.3.1 Tipuri de transmisii mecanice folosite	6
3.3.2 Schema tehnică mecanismului nostru	7
3.4 Schimbător de viteze	8
4 Testare și date experimentale	9
4.1 Testare prin software	9
4.2 Teste de eficiență	9
5 Aplicații ale diferențialului în industrie	10
5.1 Roboți industriali colaborativi (cobots)	10
5.2 Roverele spațiale (NASA Perseverance)	10
5.3 Mecanisme de urmărire solară	10
5.4 Roboți competitivi	10

Bibliografie

- Juvinall, R. C., amp; Marshek, K. M. – Fundamentals of Machine Component Design, Wiley, 2020. – proiectarea și analiza componentelor mecanice.
- Fusion 360 User Guide – Ghid oficial pentru modelare, simulare și asamblare CAD.
- STL și specificațiile materialelor pentru imprimare 3D – site-urile producătorilor (ex: Prusa, Bambu-lab, Polymaker) – Pentru caracteristicile PLA, PLA-CF și alte materiale utilizate la prototipare.
- Gere, J. M., amp; Goodno, B. J. – Mechanics of Materials, Cengage Learning, 2018.
- Shigley, J. E., amp; Mischke, C. R. – Mechanical Engineering Design, McGraw Hill, 2015. – proiecta-rea sistemelor mecanice, analiza solicitărilor și selecția materialelor. – analiza rezistenței materialelor (aluminiu, PLA, policarbonat) și optimizarea structurală.

Capitolul 1

Proiectul nostru

1.1 Introducere

Proiectul **DIFFY** propune un **mecanism diferențial** capabil să distribuie dinamic puterea a două motoare către două grade de libertate. Sistemul permite fie concentrarea puterii ambelor motoare pe o singură axă pentru a obține **forță** sau **viteză ridicată**, fie o alocare **echilibrată** între cele două axe. Această abordare optimizează eficiența energetică și performanța, fiind utilă în aplicații unde spațiul și resursele sunt limitate, cum ar fi roboții de explorare spațială.

Pentru realizarea proiectului, am urmat **pași specifici** oricărui proiect de inginerie: am analizat soluțiile existente, am proiectat mecanismul în **CAD** (Computer Aided Design), am realizat un prototip din **policarbonat**, apoi varianta finală din aluminiu la **CNC** (Computer Numerical Control) și **piese printate 3D**. Testele au validat comportamentul anticipat pe baza **calculului cinematic** și au ajutat la identificarea componentelor care necesitau întărire sau reglaje.

Mecanismul a demonstrat atât flexibilitate funcțională, cât și durabilitate în condiții de stres. Am folosit **transmisii prin curele** cu pas mic pentru un randament cât mai mare. Modificările aduse pe parcurs, precum înlocuirea materialelor și optimizarea programării, au dus la o versiune finală **performantă și compactă**. Proiectul demonstrează aplicarea **eficientă** a principiilor de proiectare mecanică și control al puterii într-un sistem **inovator, modular și adaptabil**.

1.2 Scop

Scopul acestui proiect este dezvoltarea unui **mecanism diferențial** capabil să utilizeze două motoare pentru acționarea a două grade de libertate, oferind o alocare **dinamică** a puterii. Sistemul permite fie concentrarea puterii ambelor motoare asupra unui singur grad de libertate, pentru a crește **forța** sau **viteza** de deplasare, fie distribuirea **echilibrată** a resurselor între cele **două axe** atunci când ambele trebuie acționate **simultan**. În comparație cu un sistem clasic, în care fiecare motor este **dedicat** unui singur **grad de libertate** și nu poate beneficia de contribuția celuilalt, mecanismul nostru **optimizează** utilizarea resurselor disponibile, crescând astfel eficiența energetică și performanța generală.

1.3 Obiectiv

1. Proiectarea unui **sistem diferențial** cu două motoare DC, **optimizat** pentru a fi compact, modular, eficient energetic și care să acționeze **două ieșiri** fiind în **contact continuu**.
2. Realizarea unui **prototip funcțional**, folosind materiale **accesibile** pentru **reducerea costurilor** (policarbonat inițial, apoi aluminiu și PLA-CF).
3. Testarea și validarea performanței sistemului, inclusiv în condiții de **stres** și **utilizare îndelungată**, pentru a asigura **fiabilitatea și durabilitatea mecanismului**.
4. Integrarea elementelor de **programare și automatizare** în procesul de testare pentru a crește precizia și eficiența experimentelor.
5. Reiterarea analizei și îmbunătățirea designului, pe baza datelor experimentale și a comportamentului observat în timpul testelor pentru a asigura utilitatea mecanismului în cât mai multe **aplicații tehnice**.

1.4 Problema identificată spre rezolvare, stadiul actual în domeniu

Problema identificată: Motoarele dedicate unui singur grad de libertate nu pot distribui dinamic puterea între axe, ceea ce poate duce la ineficiență energetică și performanță scăzută.

Stadiul actual în domeniu: Majoritatea sistemelor nu permit redistribuirea dinamică a puterii, fiind rigide și limitate în aplicabilitate. Soluțiile existente sunt costisitoare și nu oferă suficientă flexibilitate pentru a crește eficiența funcționării în diverse echipamente robotizate. Un exemplu de utilizare a acestui mecanism este în roboții pentru misiuni de explorare în spațiu. Într-un astfel de context, resursele sunt limitate, iar un **mechanism diferențial** ar ajuta la **distribuirea dinamică** a puterii între motoare.

1.5 Rolurile noastre în echipă

Tănase Sebastian-Florin, clasa a 12-a

Rol principal: Designer CAD, Testare funcțională, Calcule fizice și matematice;

Responsabilități:

- Proiectarea 3D a diferențialului în Fusion 360
- Realizarea Testelor de eficiență și funcționare
- Testare software

Băbușanu Dragoș, clasa a 11-a

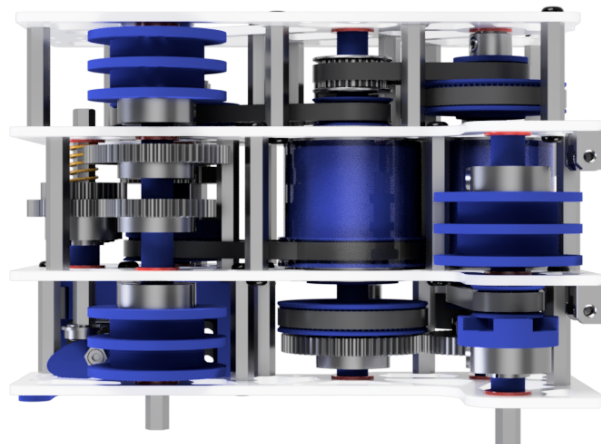
Rol principal: Designer CAD, Inginer prototipare, Responsabil asamblare mecanică;

Responsabilități:

- Operarea CNC-ului și prelucrarea pieselor;
- Asamblarea prototipurilor și identificarea punctelor slabe;
- Realizarea îmbunătățirilor mecanice;



(a)



(b)

Figura 1.1: Ansamblu mecanism diferențial

Capitolul 2

Etape parcurse

2.1 Definirea problemei

Unele mecanisme complexe precum roboții **industriali** sau roboții utilizați în **explorarea spațială** necesită motoare **DC** pentru a oferi atât **putere**, cât și **precizie**, rămânând compacte. **DIFFY** este proiectat să valorifice la maximum două motoare **DC** pentru a acționa două ieșiri, fără a fi nevoie de motoare suplimentare, oferind în același timp posibilitatea de a schimba **raportul de transmisie**.

2.2 Cercetare

Am **analizat** mai multe **configurații de transmisie**, inclusiv sisteme cu ambreiaj, roți dințate fixe și mecanisme planetare. Deși mecanismele diferențiale sunt **utilizate frecvent** în aplicații precum schimbătoarele de viteze auto, am decis să dezvoltăm o cutie de viteze diferențială cu două ieșiri, care permite **distribuirea eficientă** a puterii între acestea. După evaluarea **avantajelor** și **limitărilor** fiecărei opțiuni, putem spune că soluția noastră, aleasă pe baza mai multor **criterii** cum ar fi **eficiență**, **compactitate**, **modularitate** și **compatibilitate** cu alte sisteme, este ușor de **adaptat** nevoilor de **automatizare** a multor sisteme datorită **costului redus** și a **simplității**.

2.3 Proiectare detaliată

Ținta principală a fost un design cât mai **compact** și **rigid**, pentru a putea fi integrat pe diverse mecanisme. Sistemul dispune de **două grade de libertate**: unul cu o viteză maximă de **1200 RPM** rotații pe minut), iar celălalt cu posibilitatea de a trece de la **1200 RPM** la **300 RPM** — viteză care îi permite să tragă o **greutate** de aproximativ **37,5 kg**. Specificațiile le-am stabilit în acord cu **cerințele competiției** internaționale de robotică **First Tech Challenge** pentru că ne-am propus să **testăm funcționalitatea**, **eficiența** și **fiabilitatea** sistemului pe un **robot competitiv**.

2.4 Construirea prototipului

Prototipul a fost realizat din **policarbonat** tăiat cu un router **CNC** cu **laser**, destinat materialelor textile, deoarece acest material este mult mai **ieftin** și **accesibil** decât **alumiuniul** utilizat în versiunea finală a designului.

2.5 Testare și evaluare

Prototipul a fost testat în **condiții de stres**, inclusiv **utilizare îndelungată** sub sarcină, pentru a identifica eventuale **puncte slabe**. Nu au fost întâmpinate probleme care să compromită funcționarea sistemului. În plus, partea de **programare** a fost utilizată pentru **automatizarea testelor**, ceea ce a **simplificat procesul** și a asigurat **repetabilitatea** acestora.

2.6 Îmbunătățire

Pe parcursul testelor, am optat pentru utilizarea unui **arc** mai puternic, deoarece schimbarea treptelor de **viteză** nu era **suficient de consistentă**. De asemenea, am trecut de la piesele din **policarbonat** la piese din **aluminu**, deoarece acestea oferă o **rigiditate sporită** și o **rezistență considerabilă** la stres.

Capitolul 3

Metode și sisteme utilizate

3.1 Etape de manufacturare

Capitolul acesta oferă detalii despre cum au fost **prelucrate** și **proiectate** piesele necesare pentru construirea **diferențialului**.

3.1.1 Proiectare

Diferențialul a fost proiectat în **Autodesk Fusion 360**, o alegere care ne-a permis să **colaborăm eficient** și să realizăm modificări în timp real asupra modelului. Împreună cu colegul meu, am trecut prin mai multe **iterații** până când am ajuns la o **variantă optimă** în ceea ce privește **dimensiunile** și **modularitatea** sistemului. Am acordat o atenție deosebită modului de **asamblare**, pentru a ne asigura că diferențialul poate fi **modificat** sau **reparat** fără să ne complicăm.

3.1.2 Prototipare

Proiectul a trecut prin mai multe **iterații** de **prototipuri**, deoarece fiecare variantă ne-a oferit oportunitatea de a identifica și implementa **îmbunătățiri semnificative**. Prototipurile au fost realizate din **policarbonat**, un material **accesibil** și **ieftin**, ușor de prelucrat. Totuși, proprietățile sale **flexibile** reprezintă un **dezavantaj**, deoarece comportamentul ansamblului în această formă nu reflectă cu precizie **comportamentul** pe care îl va avea atunci când va fi realizat din **aluminiu** – un material considerabil mai rigid.

3.1.3 Prelucrarea

În procesul de trecere la **aluminiu**, am analizat mai multe opțiuni de **aliaje**. Inițial, am testat **Al 5005**, însă am constatat că este prea **moale** pentru aplicația noastră. Având în vedere că plăcile au o **grosime** de doar **3 mm**, sub solicitări ridicate, acestea tindeau să se **deformeze**. În cele din urmă, am optat pentru aliajul **Al 6082**, care are un **preț apropiat**, dar oferă o **rigiditate** mult mai bună. Acesta asigură o structură mai **rezistentă** a diferențialului, capabilă să suporte solicitări mecanice mai mari. Piesele au fost tăiate dintr-o **coală de aluminiu** folosind un **CNC** cu **laser**, apoi au fost șlefuite pentru a elimina muchiile ascuțite și a permite **manipularea în siguranță**.



(a) utilizarea CNC-ului cu laser



(b) curea GT2 cu dinți deteriorați

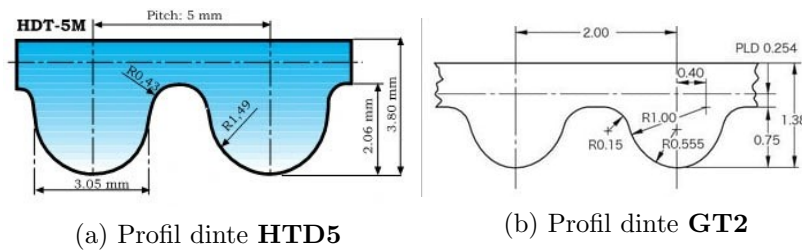
Figura 3.1

3.2 Curelele pentru transmisii

Diferențialul utilizează curele cu profil **HTD5** pentru transferul de putere între modulele diferențiale și axuri, iar curele cu profil **GT2** pentru transmiterea puterii de la motor. Am ales profilul **HTD5** datorită dinților de dimensiuni mari, care oferă o **aderență** excelentă și **reduc riscul** de patinare — un aspect **esențial** mai ales atunci când direcția de rotație a ieșirilor se schimbă brusc. În aceste condiții, **tensionarea corectă** a curelelor este **esențială**: dacă sunt prea slăbite, apare **patinarea**, iar dacă sunt prea tensionate, crește **frecarea** și, implicit, **uzura** sistemului.

Pe parcursul testelor, am întâmpinat ocazional **probleme** cu curelele **GT2**, întrucât profilul cu **dinți mici** este mai susceptibil la **uzură** atunci când ansamblul este supus la șocuri sau schimbări bruște de sarcină. Cu toate acestea, am decis să păstrăm acest profil, deoarece pasul mic îl face foarte **eficient** pentru **transmiterea puterii** de la motor.

Figura 3.2



3.3 Schema tehnică si calculele cinematice

Schema **tehnică** și calculele **cinematice** au rolul de a ajuta **inginerii proiectanți** să înțeleagă mai ușor **comportamentul** mecanismului și cum ar trebui să arate din punct de vedere al **transmisiilor** pentru a fi **proiectat**.

Am învățat **bazele** acestor două **concepte** pentru a reuși să le **aplicăm** în proiectul nostru cu succes. Astfel, am reușit să înțelegem de ce funcționează așa mecanismul și am calculat **formulele de mișcare** care fac relația între **INPUT**-uri și **OUTPUT**-uri.

INPUT - axul care primește mișcarea din exterior și o transmite mecanismului.

OUTPUT - mișcarea rezultată transmisă de mecanism către elementele finale

3.3.1 Tipuri de transmisii mecanice folosite

- Transmisie prin **roți dințate**

Roțile dințate într-un ansamblu **inversează** sensul de **rotație** față de cel de **intrare**. Raportul transmisiei și viteza unghiulară pot fi calculate ușor, doar trebuie avut grijă la sensul de rotație inversat.

$$R = \frac{R_1}{R_2} (\text{raportul transmisiei}) \quad W = -W_1 \cdot \frac{R_1}{R_2} (\text{viteza unghiulară})$$

- Transmisie prin **curele**

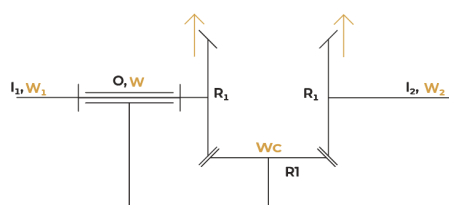
Curelele într-un ansamblu **păstrează** sensul de **rotație** față de cel de **intrare**. Calculele pentru aceasta sunt similare cu cele pentru roțile dințate, cu singura diferență că se păstrează sensul de rotație.

$$R = \frac{R_1}{R_2} \quad W = W_1 \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

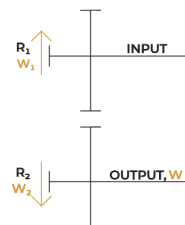
- **Modul diferențial**

Acesta este elementul cheie pentru mecanism. Este format din 3 roți dințate la 90 de grade, identice. Ne folosim de acestea pentru a schimba **OUTPUT**-urile care sunt acționate de **INPUT**-uri. În funcție de cum se rotesc **INPUT**-urile modulului, **OUTPUT**-ul este acționat sau nu. **OUTPUT**-ul este reprezentat de rotația întregului modul diferențial.

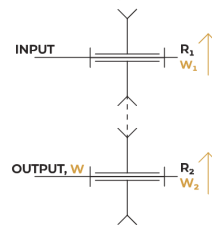
$$W = \frac{W_1 + W_2}{2} \quad W_c = W_1 - W_2$$



(a) Modul diferențial



(b) Transmisie cu roți dințate



(c) Transmisie cu curele

Figura 3.3

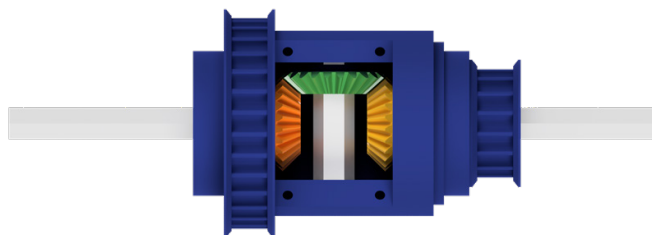


Figura 3.4: CAD modul diferențial

3.3.2 Schema tehnică mecanismului nostru

Diferențialul reprezintă o **combinație de transmisii** care ajung să aibă comportamentul căutat de noi. Folosind **modulele diferențiale** într-un mod inteligent, am reușit să atingem acest lucru.

Împreună cu formulele aferente fiecărei transmisii, am calculat **cinematica** mecanismului și am ajuns la **formulele finale** care stabilesc relația dintre **INPUT**-uri și **OUTPUT**-uri, fără a ține cont de forțe sau mase.

$$W_{O1} = \frac{W_{I1} + W_{I2}}{2} \quad W_{O2} = \frac{W_{I1} - W_{I2}}{2}$$

(Viteza unghiulară a OUTPUT-urilor față de intrări)

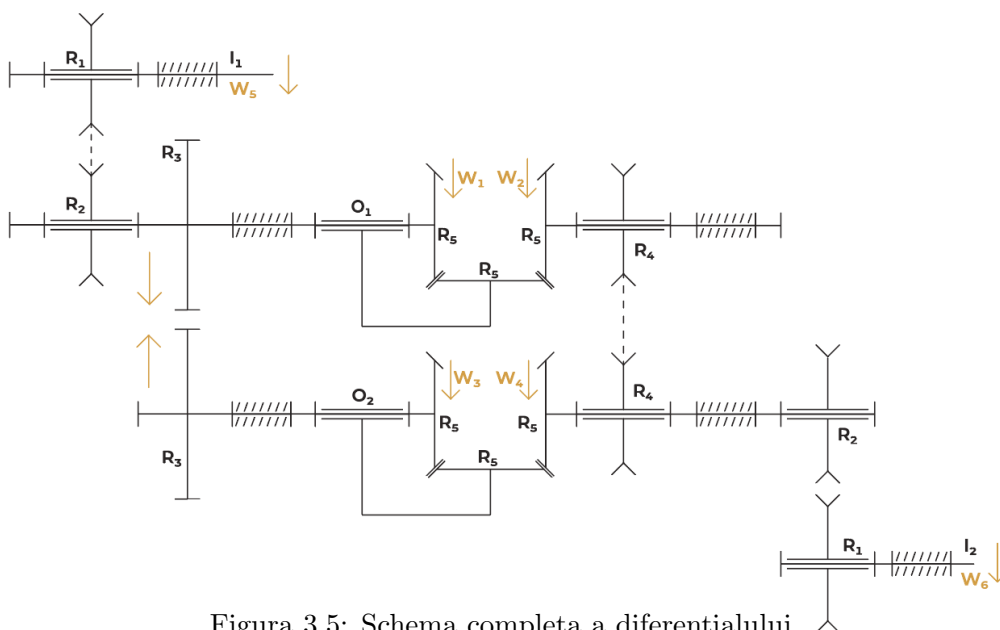


Figura 3.5: Schema completa a diferentialului

3.4 Schimbător de viteze

Diferențialul proiectat dispune de două ieșiri, permițând **acționarea simultană** a două **grade de libertate**. Una dintre ieșiri este setată pentru a funcționa constant la o **viteză maximă de 1200 rpm**, în timp ce cealaltă este conectată la un **sistem de transmisie cu schimbător de viteze**, care permite **comutarea instantanee** între **1200 RPM și 300 RPM**. Această trecere la o **viteză mai mică** are ca rezultat o **creștere semnificativă a cuplului**, ceea ce extinde **aplicabilitatea diferențialului** în mecanisme care necesită **forță crescută**.

Sistemul de schimbare a treptelor este acționat de un **servomotor** care deplasează un **ax mobil** pe care sunt montate **pinioanele**. La unul dintre capetele axului se află un **arc** care asigură **revenirea automată** în poziția inițială după acționare. În absența unui **ambreiaj**, **schimbarea treptei de viteză** trebuie realizată în timp ce pinioanele sunt **în mișcare**, pentru a evita **blocajele**.

Această capacitate de a **comuta rapid** între **turații ridicate** și un **cuplu crescut** conferă sistemului o **versatilitate ridicată**. La **turația redusă de 300 rpm**, **diferențialul** poate ridica o greutate de aproximativ **37,5 kg**, ceea ce îl face ideal pentru aplicații care implică sarcini mecanice ridicate. Astfel, sistemul poate fi **integrat cu succes** într-o varietate de mecanisme, de la **brațe robotice** și **sisteme de ridicare**, până la **roboți mobili** care necesită atât **viteză**, cât și **forță**, în funcție de **contextul operațional**.

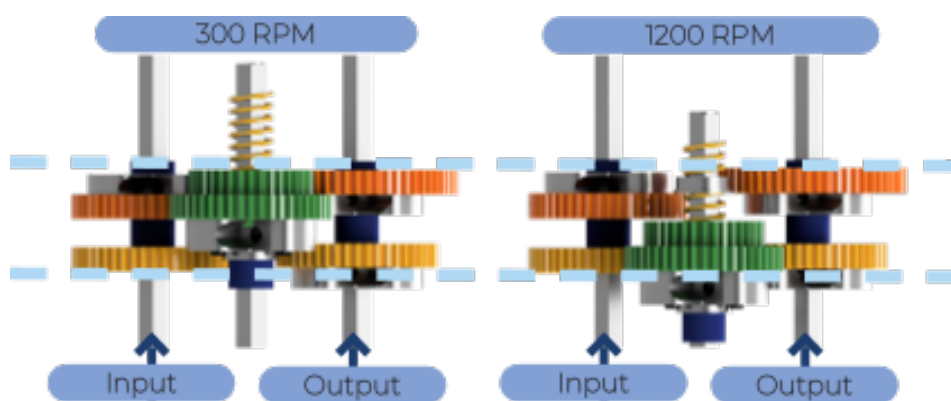


Figura 3.6: Schimbătorul de viteze

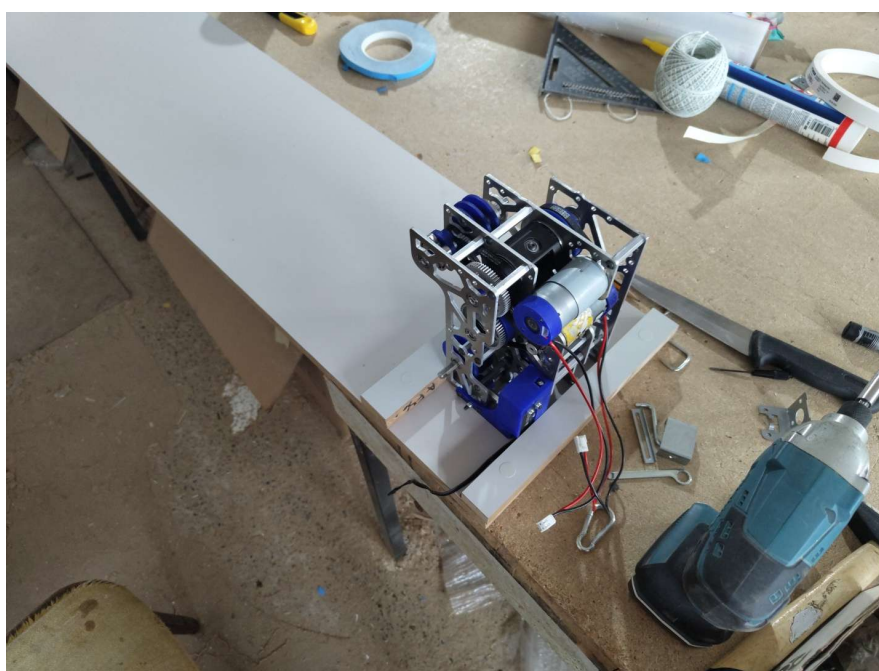


Figura 3.7: Ansamblu de testare

Capitolul 4

Testare și date experimentale

4.1 Testare prin software

Folosind **formulele de cinematică**, am calculat ce **putere** trebuie să primească **motoarele** în funcție de **puterea** pe care vrem să o primească **output-urile**. Motoarele primesc un **număr între (-1, 1)** care reprezintă **direcția** și **puterea** pe care o primesc. **{-1, 1}** fiind **maximul pentru ambele sensuri**, iar **0** fiind **oprit**. Astfel, am ajuns la aceste două **formule** pe care le folosim pentru **testare**.

$$I_1 = O_1 + O_2 \quad I_2 = O_1 - O_2$$

I - puterea de intrare O - puterea de ieșire

Pe lângă formule, am aplicat și o **normalizare** pentru a nu trece de **limitele -1,1** în software.

$$I_1 = \frac{O_1 + O_2}{\max(|O_1| + |O_2|, 1)} \quad I_2 = \frac{O_1 - O_2}{\max(|O_1| + |O_2|, 1)}$$

Folosind **formulele finale**, am reușit să **programăm mecanismul** și l-am **testat** sub diferite **situații de stres**, cu **obiecte grele** sau teste repetate de **durabilitate**. Pentru a reuși să facem aceste teste, am adăugat și **2 encodere externe** care au rolul de a citi **poziția OUTPUT-ului**.

4.2 Teste de eficiență

În viitor, ne dorim să rulăm o serie de **teste de eficiență** pentru a realiza **curba de putere a transmisiei** și să le comparăm cu cele ale unui **motor simplu**, pentru a calcula **pierderea de eficiență**. Pentru a reuși acest lucru, trebuie să comparăm **puterea de intrare** cu **puterea de ieșire**.

$$P_{in} = V \cdot I \quad P_{out} = F \cdot v$$

V - tensiunea bateriei I - curentul consumat F - forța aplicată v - viteza liniară
V și I pot fi obținute direct de la senzorii din Control Hub.

Calculul lui P_{out} nu mai este așa simplu. Formula pentru acesta provine din **mecanică**. **Viteza** poate fi obținută ușor din **encoder-ul de pe diferențial**. **Forța** este mai complicat de obținut. Pentru a reuși să o calculăm eficient, trebuie să facem o serie de **teste automatizate** în care **diferențialul ridică greutatea cunoscute la viteză constantă**. Pentru a obține **valori realiste** care pot fi folosite pentru a calcula **eficiența**.

Planul nostru este să construim un **sistem de scripeți** pentru a ridica niște greutatea de **masă cunoscută**. Astfel, putem obține direct forța, fiind greutatea $F = G = m \cdot g$. Prin automatizarea acestora, vom reuși să realizăm testele **complet automat**. Singurul lucru pe care trebuie să îl facem ulterior este să folosim datele colectate pentru a crea **tabelul curbei de eficiență** a mecanismului, comparată cu cea a motorului simplu.

$$P_{out} = G \cdot v = \frac{m \cdot g \cdot w \cdot r \cdot \pi}{30}$$

$$Eficiența = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{\frac{m \cdot g \cdot w \cdot r \cdot \pi}{30}}{V \cdot I} = \frac{m \cdot g \cdot w \cdot r \cdot \pi}{30 \cdot V \cdot I}$$

r - raza fuliei w - viteza unghiulară v - viteza m - masa V - tensiunea g - accelerația gravitațională

Capitolul 5

Aplicații ale diferențialului în industrie

Diferențialul nostru poate fi integrat într-o gamă variată de sisteme mecatronice și robotice. Designul său îl face atractiv pentru aplicații în care economia de spațiu, greutatea redusă și întreținerea ușoară sunt esențiale.

5.1 Roboți industriali colaborativi (cobots)

Cobots utilizați în **linii de producție** automatizate pot beneficia de un astfel de diferențial în articulațiile brațelor lor. De exemplu, o singură unitate poate transmite **cuplul** simultan către **două grade de libertate**. Modularitatea diferențialului permite ajustarea ușoară a raportului de transmisie în funcție de sarcina aplicată, fără reproiectare completă.

5.2 Roverele spațiale (NASA Perseverance)

Roverele planetare folosesc adesea **diferențiale** și **sisteme de transmisie** sofisticate pentru a sincroniza roțile în condiții extreme. Sistemul nostru ar putea fi folosit pentru:

- Distribuirea cuplului între roți opuse, în mod controlat
- Actuarea simultană a roților și a unui mecanism de suspensie adaptivă

5.3 Mecanisme de urmărire solară

În domeniul energiei regenerabile, sistemul ar putea fi utilizat pentru a acționa simultan două axe de mișcare ale unui panou solar, fără a adăuga motoare suplimentare. Acest lucru este deosebit de valoros în aplicații izolate sau spațiale, unde alimentarea electrică este limitată.

5.4 Roboți competitivi

În cadrul competiției **FTC**, unde spațiul și numărul de motoare folosite sunt limitate, fiecare motor contează. **Diferențialul** nostru a fost folosit pentru a ne putea încadra în limita de motoare. La etapa națională am prezentat diferențialul ca fiind o soluție ideală, deoarece ne permitea să fim mai rapizi decât majoritatea celorlalți roboți, fiind cu un motor sub limită.

Sistemul este ideal pentru **prototipare rapidă** și adaptare în timpul sezonului competițional, deoarece permite testarea mai multor configurații fără reconstrucție completă.

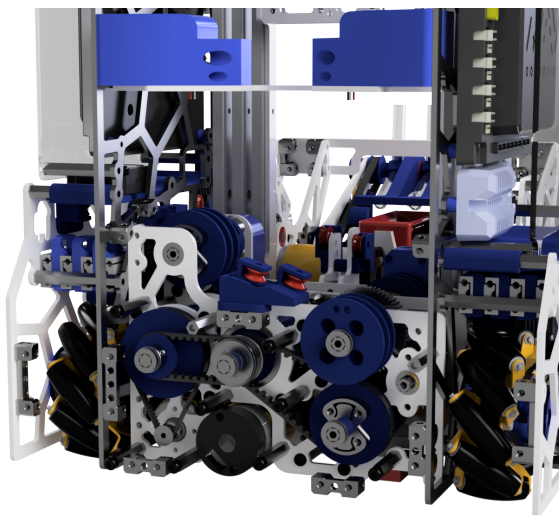


Figura 5.1