



TREBALL FI DE GRAU
GRAU EN ENGINYERIA MECÀNICA

**MODELATGE I SIMULACIÓ
DINÀMICA D'UN ROBOT
PARAL·LEL AMB ESTRUCTURA DE
PLATAFORMA STEWART**

AUTOR: ADRIÁN LLANES CORBATÓN
TUTOR: JOSEP LLUÍS SUÑER MARTÍNEZ

ÍNDEX

1. INTRODUCCIÓ	3
1.1 HISTÒRIA	4
1.2 DEFINICIONS	5
1.3 EXPLICACIÓ I ESQUEMA D'UN BRAÇ ROBOT	5
1.4 CLASSIFICACIONS	6
2 ROBOTS PARAL·LELS	11
2.1 HISTÒRIA	12
2.2 CLASSIFICACIÓ DELS ROBOTS PARAL·LELS	13
2.3 ESPAI DE TREBALL	15
2.3.1 AVANTATGES E INCONVENIENTS	17
2.3.2 CLASSIFICACIONS DINTRE DE L'ESPAI DE TREBALL	17
2.4 ACTUADORS	17
2.4.1 ACCIONADORS NEUMÀTICS	18
2.4.2 ACCIONADORS HIDRÀULICS	19
2.4.3 MOTORS ELÈCTRICS	19
3. CINEMÀTICA I DINÀMICA	21
3.1 CINEMÀTICA INVERSA	22
3.2 CINEMÀTICA DIRECTA	23
3.3 DINÀMICA	23
4. STEWART	25
4.1 CARACTERÍSTIQUES DE LA PLATAFORMA STEWART	26
4.2 CONFIGURACIONS DE LA PLATAFORMA STEWART	26
5. DISSENY DE LA PLATAFORMA STEWART	29
5.1 MODELATGE	30
5.1.1 STEWART_1	30
5.1.2 STEWART_2	36
5.1.3 STEWART_3	37
5.2 PARELLS D'UNIÓ	37
5.3 MOVIMENTS I FORCES	39
6. SIMULACIONS	43
6.1 COMPROVACIONS	44
6.1.1 CINEMÀTICA INVERSA	44

6.1.2 CINEMÀTICA DIRECTA	49
6.1.3 DINÀMICA DIRECTA.....	54
6.2 CÀLCUL DE LES FORCES	56
6.3 ANÀLISI DELS RESULTATS	61
6.3.1 CINEMÀTICA INDIRECTA.....	62
6.3.2 CINEMÀTICA DIRECTA	66
6.3.3 DINÀMICA DIRECTA.....	70
7. CONCLUSIÓ I ELECCIÓ DE LA PLATAFORMA.....	73
8. PLEC DE CONDICIONS.....	75
9. PRESSUPOST	77
10. ÍNDEX DE FIGURES.....	79
11. BIBLIOGRAFIA.....	89

1. INTRODUCCIÓ

En aquesta part s'explica breument en que consisteix el projecte i els passos que es realitzen posteriorment.

L'objectiu principal d'aquest treball és el de dissenyar i analitzar tres plataformes Stewart diferents. Una vegada es tinguen els dissenys, es procedirà a simular i a analitzar les diferents característiques que té cadascuna i es valoraran els avantatges e inconvenients que presenten. Una vegada fet açò, es podrà buscar quina seria la més adequada per a fer la funció d'un simulador de vol i quina presenta menys inconvenients.

1.1 HISTÒRIA

En aquest apartat es realitzarà un petit viatge a través del segle XX per a introduir la robòtica, per a veure de on ve i per a entendre el paper tan important que ha adquirit i que ha anat realitzant durant el l'últim segle.

- En 1920 l'escriptor txec Karel Capek, va publicar la seua novel·la *RUR (Rossum's Universal Robots)*, en la que apareix per primera vegada la paraula *Robot*. Aquesta paraula deriva del pronom "robota", que en txec significa "treball". Els robots que apareixen en la obra són humans artificials, es per aquest motiu per el qual la paraula robot s'utilitza per a parlar de humans mecànics o per a màquines que desenvolupen tasques humanes.
- En 1946 va aparèixer la primera computadora electrònica, anomenada "ENIAC".
- En 1948, Grey Walter construeix els primers robots mòbils, que van ser dits *les tortugues de Bristol*.
- En 1950, Isaac Asimov publicà el llibre *Yo Robot* amb les tres lleis de la robòtica, les quals s'enumeren a continuació:
 1. Un robot no pot fer mal a un ésser humà o romandre inactiu davant un mal que se li puga fer.
 2. El robot ha d'obeir al ser humà excepte si contradiu la llei 1.
 3. El robot ha de protegir la seua existència excepte si entra en conflicte amb les lleis anteriors.
- En 1954, George Devol va patentar el primer robot programable.
- En 1956 George Devol junt a Josef Engelberger, van crear la primera empresa dedicada a la robòtica: *Unimation* (Universal Automation).
- En la dècada de 1960's, la Universitat d'Stanford desenvolupa el robot "Shakey".
- Unimation desenvolupa el robot *Puma* (Programmable Universal Machine for Assembly) en 1978, amb el suport de General Motors.
- En 1985, Rodney Brooks del MIT implementa la primera arquitectura reactiva (Subsumption).
- En 1986, Ronald Arkin implementa la primera arquitectura híbrida (AuRA).

1.2 DEFINICIONS

Actualment, existeixen diverses definicions de les paraules robòtica i robot, per aquest motiu, a continuació es mostraran unes definicions d'aquestes paraules, per a aclarir el significat de elles avanç de entrar en matèria. A més, també definirem altres termes, els quals son citats posteriorment.

Robot: manipulador automàtic servocontrolat, reprogramable, polivalent, capaç de posicionar i orientar peces, útils o dispositius especials, seguint trajectòries variables reprogramables, per a l'execució de tasques variades. Normalment té la forma d'un o més braços acabats en un canell. La seua unitat de control inclou un dispositiu de memòria i ocasionalment de percepció de l'entorn. Normalment el seu ús es basa en realitzar una tasca de manera cíclica, podent-se adaptar a una altra sense canvis permanents en el seu material.

Robòtica Industrial: disciplina relacionada amb el disseny dels robots, el seu control i les seues aplicacions a la indústria.

Robòtica Avançada: ciència que estudia els robots amb característiques especials d'autonomia, les aplicacions dels quals estan concebudes per a resoldre problemes en entorns hostils o realitzar servicis.

Graus de Mobilitat: quantitat d'elements que es poden moure de forma independent. Aquest terme sol associar-se amb el número de motors de accionament.

Graus de Llibertat: quantitat de variables de posició independents en relació a un sistema de coordenades fixe.

Espai de treball: l'espai de treball d'un robot està definit com el grup de punts que poden ser assolits pel seu efector final.

1.3 EXPLICACIÓ I ESQUEMA D'UN BRAÇ ROBOT

En aquesta part s'expliquen els principals elements que ha de tenir un robot industrial. A més, es nombraran i analitzaran les seues parts en un esquema.

Les principals funcions que caracteritzen a un robot i el defineixen com a tal són:

- Multifuncional
- Reprogramable
- Moviments programats i variables

Com es pot veure en la imatge, cada part d'un robot rep un nom diferent. Si s'analitzen el nom de tots els elements s'aprecia que aquests estan basats en l'anatomia humana.

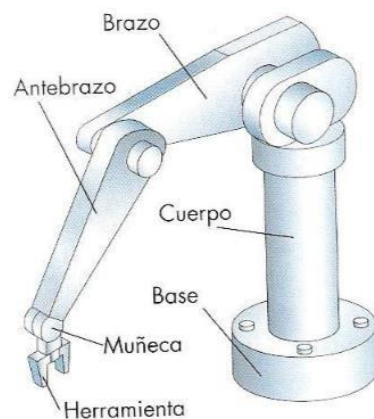


Fig.1. Esquema d'un braç robot

En la imatge anterior es mostra un braç robot, el qual és solament un exemple d'una de les possibilitats de robots industrials que existeixen. A continuació es nombraran els diversos tipus de robots industrial:

- **Robot Articulat (Antropomòrfic):** es un robot en el qual tots el seus pars són de revolució. Aquest grup representa entorn a un 75% dels braços robots.
- **Robot Esfèric:** no es massa utilitzat en industria degut a que no presenta cap avantatge espacial. Es utilitzat en alguns casos especials.
- **Robot Cilíndric:** es caracteritza per una mala construcció a causa de la mala distribució de pes que presenta.
- **Robot Scara:** és un robot de quatre graus de llibertat amb posicionament horitzontal. Es conegut pels seus ràpids cicles de treball, excel·lent repetibilitat, gran capacitat de càrrega i el seu ampli camp d'aplicació.
- **Robot Cartesià:** tots els parells són de tipus prismàtic i es mouen de forma paral·lela als eixos.
- **Robot Paral·lel:** dins d'aquest grup es troben una gran quantitat de robots, entre ells està la plataforma Stewart, en la qual es basa aquest treball, per això no profunditzarem més en aquest grup, ja que es parlarà d'ell posteriorment.

Un robot industrial pot presentar una gran quantitat de articulacions, pel que és molt important saber les parts bàsiques d'una articulació:

- Motor o actuator
- Sensor
- Transmissió mecànica

Les dos primeres parts es poden trobar al 100% de les articulacions, mentre que l'últim element es molt comú, però no es imprescindible i en alguns casos es pot prescindir d'ell. És important afegir la importància d'un controlador i una unitat de potència per a cada articulació, sent així els dos últims elements nomenats imprescindibles en tots el robots.

1.4 CLASSIFICACIONS

En aquest apartat es realitzen diferents classificacions dels tipus de robots que existeixen utilitzant diversos criteris per a poder dur a terme les següents diferenciacions.

Aquesta primera diferenciació separa el robots en diferents generacions basant-se en la funció principal del robot i en la capacitat d'aquest per a adquirir e interpretar la informació del seu entorn. També depèn de si el robot es capaç de planificar el seus moviments en funció d'aquesta informació.

- **Primera Generació:** són els robots que repeteixen la seua tasca programada seqüencialment sense tindre en compte les alteracions del seu entorn.

- **Segona Generació:** adquireixen informació limitada del seu entorn i actuen en conseqüència. Poden localitzar, classificar i detectar esforços i adaptar els seus moviments. Les seues principals característiques són el processament i la planificació del camí que té que realitzar.
Dintre d'aquesta generació podem distingir dos grups diferents, que es caracteritzen per la recollida de la informació:
 1. Sensorització Exteroceptiva: recull la informació de l'exterior.
 2. Sensorització Propioceptiva: recull la informació de l'interior del robot.
- **Tercera Generació:** la seua programació es realitza mitjançant l'ús d'un llenguatge natural. Posseeix la capacitat per a la planificació automàtica de les tasques. El llenguatge natural que presenta el robot pot variar en funció de qui l'utilitza o el programa (anglès, castellà, valencià, alemany...), però sempre ha d'estar coordinat amb el idioma del intèrpret de llenguatge, que és una part essencial d'aquesta generació, juntament amb la planificació mencionada anteriorment. Alguns robots d'aquesta generació, al poder planificar les seues tasques i al ser capaços de recollir informació del exterior i processar-la, poden treballar de forma conjunta amb els humans, ja que estan capacitats per a saber si hi ha algun objecte o persona, el que fa que si detecten el mínim contacte no previst paren immediatament la seua tasca, el que evita accidents laborals i proporciona una major seguretat. Aquest tipus de robots s'anomenen col·laboratius.

Un altra classificació que es pot realitzar és separant els robots en funció del tipus de cadena de llaç que presenten, és a dir, fixant-nos en l'estructura cinemàtica que presenten.

- **Robots Serials:** un robot es pot considerar serial si l'estructura cinemàtica que presenta es una cadena de llaç obert.
- **Robots Paral·lels:** un robot paral·lel és el que té una estructura cinemàtica en una o varies cadenes de llaç tancat.
- **Robots Híbrid:** es parla d'un robot híbrid quan aquest presenta una estructura cinemàtica amb almenys una cadena de llaç obert i una cadena de llaç tancat.

Quan es parla de les posicions a les que pot arribar un robot, es pot veure com dependent de les seues característiques (graus de llibertat, graus de mobilitat...) la quantitat de solucions varia, açò ens permet realitzar un altra separació en tres grans grups.

- **No té solució o no pot aconseguir-la:** En aquest cas el robot no pot arribar a la posició indicada, açò pot ser degut a diferents limitacions dintre del disseny mecànic. Una limitació pot ser per les dimensions del robot, les quals són massa menudes per a poder aconseguir arribar a la posició i presentar una solució. Una altra possibilitat és que alguna articulació del robot tinga el seu moviment dintre d'un rang d'angles (graus), el que impossibilita el poder aconseguir la posició desitjada. També existeix l'opció de que no pot aconseguir una solució a causa de que el robot tinga un límit de graus de mobilitat inferior al que es necessari per a arribar a la posició indicada, en el cas tridimensional si el robot presenta

menys de 6 graus de mobilitat. En aquest últim cas, el robot presentaria problemes de mobilitat.

- **Infinites solucions:** el mecanisme pot aconseguir arribar a la posició indicada de infinites formes diferents. Açò es possible sempre que el robot tinga 7 o més graus de mobilitat (en el cas tridimensional) o si presenta 6 graus de mobilitat i existeixen singularitats (també en el cas tridimensional).
- **Un número finit de solucions:** El robot és capaç d'obtenir una posició, però amb un número finit de solucions. Aquest cas apareix quan el robot té la mateixa quantitat de graus de mobilitat com graus de llibertat presenta l'espai de treball, en el cas tridimensional serien 6 graus de mobilitat del robot per 6 graus de llibertat que presenta l'espai. Òbviament, el número de solucions finites ha de ser un número enter i positiu.

Dintre de l'estructura de un robot podem fer-hi diferents classificacions:

- El primer tipus de diferenciació que es pot fer és basant-se en l'ordre dels moviments i en la longitud dels elements, ja que estan relacionades (excepte en alguns casos en el quals s'utilitzen ferramentes especials). Dintre d'aquest subgrup podem diferenciar entre eixos primaris i eixos secundaris:
 1. Eixos Primaris: són els que realitzen els primers moviments des de la base, normalment són llargs.
 2. Eixos secundaris: són els que realitzen els últims moviments i normalment són elements curts situats en el canell.
- El segon tipus de diferenciació que es pot apreciar és la dels diferents parells que formen part de les articulacions del nostre robot. Els dos tipus de parells bàsics que s'utilitzen són: els parells R (o de rotació) i els parells P (o prismàtics).
 1. Parell de Revolució: formen part dels eixos primaris i dels secundaris. El seu funcionament es basa en la variació que experimenta l'angle que es forma entre dues barres. Poden ajustar l'orientació del robot.



Fig.2. Esquema d'un braç robot amb parells R



Fig.3. Robot amb parells R

2. Parell Prismàtic: solament forma part dels eixos primaris. El seu moviment es basa en el desplaçament d'una barra (lliscadora) sobre un altra (guia). Aquest tipus de parell no pot ajustar l'orientació del robot.

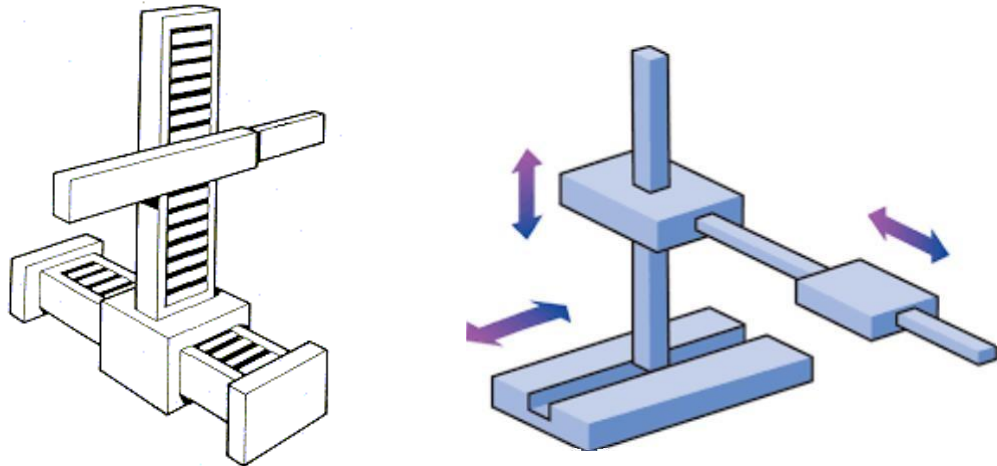


Fig.4 i 5. Robots amb parells prismàtics

A pesar de que els dos parells anteriors són els més utilitzats en aquest camp d'estudi, també podem trobar altres tipus d'unions entre un o més elements, encara que a l'hora d'analitzar-los en un problema cinemàtic, la major part d'ells es poden simplificar i calcular com la unió d'un conjunt de parells de revolució i parells prismàtics. A continuació es mostra una imatge amb els sis tipus principals de parells d'unió amb els seus corresponents graus de llibertat.

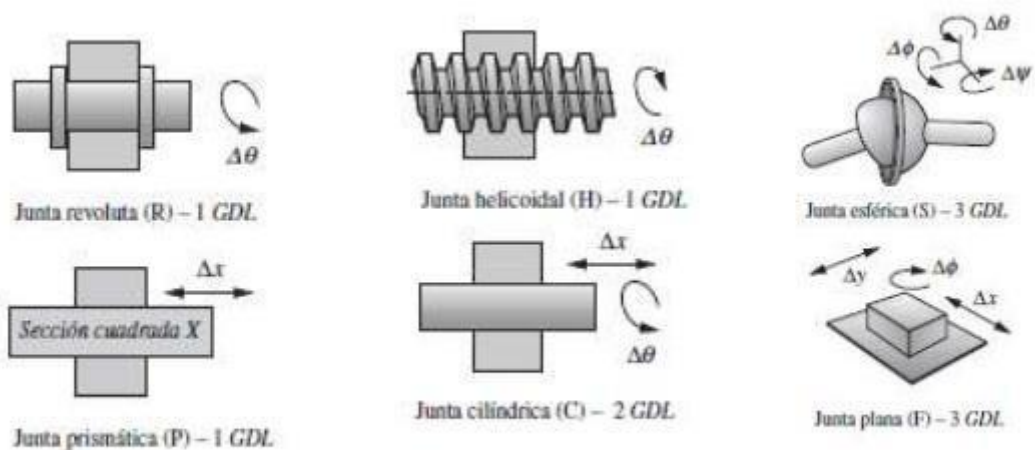


Fig.6. Esquema amb diferents tipus d'unions

- L'última diferenciació que es va a fer dintre de l'estructura, és la de si una barra o una part del robot porta un motor o no.

1. Actiu: es nomenen actius els elements que duen un motor.
2. Passiu: són els elements que no duen un motor.

Després de totes aquestes diferenciacions es pot definir, explicar i classificar qualsevol robot perfectament tenint en compte les característiques i les variables desitjades en cada cas.

2 ROBOTS PARAL·LELS

2.1 HISTÒRIA

Els primers treballs teòrics relacionats amb els robots paral·lels van aparèixer fa alguns segles, quan un grup de geòmetres anglesos i francesos realitzaven càlculs i treballs relacionats amb els poliedres i amb les seues aplicacions.

Amb el començament del segle XX, al igual que tot el camp de la robòtica, els robots paral·lels van guanyar importància i van despertar l'interès d'alguns científics de l'època, degut a aquests esdeveniments, en 1931 va ser patentat el primer mecanisme paral·lel, el qual va ser una plataforma dissenyada per James E. Gwinnett, que estava dirigida cap a la indústria de l'entreteniment.

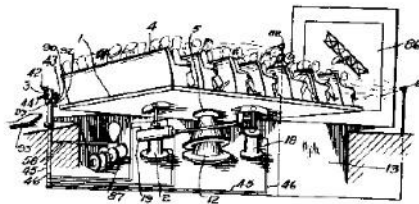


Fig.7. Dibuix d'una plataforma dissenyada per a l'entreteniment

En l'any 1938 els americans Willard Polard i Harold Roselund van fabricar el primer robot paral·lel per a pintar amb esprai. La màquina tenia 5 graus de llibertat i estava composta per tres braços amb dos elements en cada braç, els quals eren comandats per tres actuadors situats a la base. Amb el control dels actuadors es podia controlar la posició de la ferrament.

Com es pot veure en la imatge de la dreta, la màquina compleix la descripció feta anteriorment. En aquest cas la màquina s'utilitzava per a pintar amb esprai, però canviant la ferrament de l'extrem podria utilitzar-se per a fer qualsevol tasca diferent.

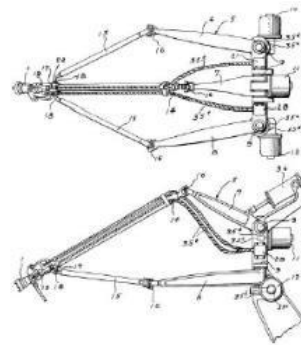


Fig.8. Robot paral·lel amb 5gdl

En 1965 Mr. Stewart va presentar una plataforma amb 6 graus de llibertat, la qual estava destinada a fer la funció d'un simulador de vol, per a poder ajudar als pilots a practicar les seues habilitats sense córrer ningun tipus de perill. El disseny inicial de la plataforma Stewart ha anat evolucionant, pel que actualment, moltes empreses i molts de científics el continuen utilitzant e investigant per a seguir millorant-lo. Per exemple, l'empresa Lufthansa utilitza una evolució d'aquesta plataforma per a preparar i examinar als seus

pilots. En les imatges posteriors es pot apreciar un esquema i un exemple de plataforma Stewart.



Fig.9 i 10. Esquema i foto d'una plataforma Stewart

Pel que podem observar, els robots paral·lels tenen la seua pròpia història dintre de la robòtica i encara no s'ha escrit la seua última pàgina, ja que hui en dia la robòtica (més concretament els robots paral·lels) és un dels camps més estudiats, degut al la gran importància que està tenint i que tindrà en el futur.

2.2 CLASSIFICACIÓ DELS ROBOTS PARAL·LELS

Dintre dels robots paral·lels hi es poden distingir diferents grups. Per a poder classificar-los i analitzar-los es poden avaluar diferents característiques. Una d'aquestes característiques és la mobilitat que presenten, d'acord amb açò poden ser planars o espacials.

Robots Paral·lels Planars

Com el seu propi nom indica, els robots paral·lels planars són els robots paral·lels que solament treballen en un pla del espai. El robot més simple d'aquesta família es el mecanisme de cinc barres, el qual està format per quatre esclavons que formen un únic braç de llaç tancat. Els esclavons s'interconnecten entre ells i amb la plataforma mitjançant l'ús de cinc articulacions rotacionals. Aquest tipus de robot només presenta dos graus de llibertat, el que corrobora que treballa en un pla del espai. En aquesta imatge es pot apreciar un esquema d'aquest robot.

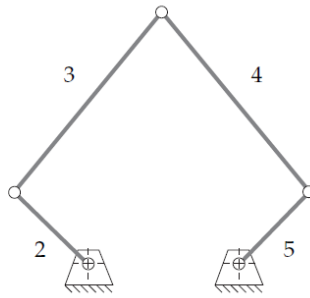


Fig.11. Robot planar

Un altre tipus de robot paral·lel planar es el 3RRR, que es pot veure en la figura 13. Aquest robot està format per tres braços amb tres articulacions rotacionals. Aquest robot conta amb tres graus de llibertat, dos de translació i un de rotació.

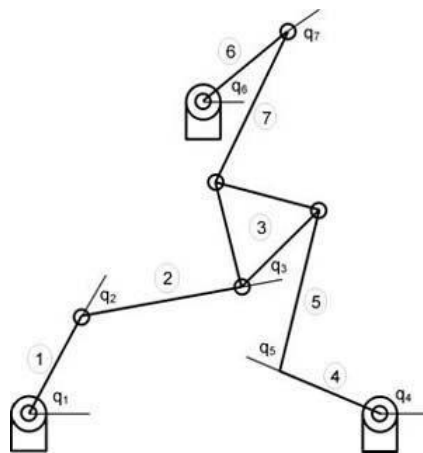


Fig.12. Robot planar 3RRR

Robots Paral·lels Espacials

Dintre d'aquest grup de robots es poden trobar la "Plataforma Stewart" que és el robot que s'analitza en aquest projecte. En un principi la "Plataforma Stewart" va ser dissenyada per a realitzar simulacions de vol, encara que en l'actualitat se li dona una gran quantitat de funcions, en aquest projecte es dissenyarà per a complir la funció per a la qual es va crear.

Existeixen diferents tipus de configuració per a construir aquesta plataforma, les quals seran construïdes i comparades posteriorment per a poder elegir la millor opció per a aquest cas. El espai de treball dependrà del tipus de la configuració, dels actuadors, del sistema de control, de les dimensions...

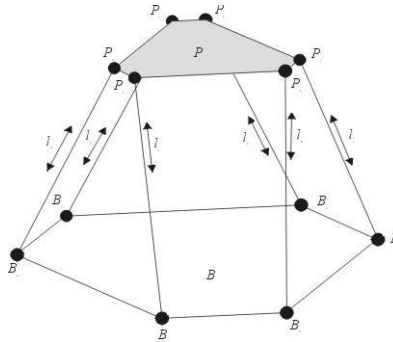


Fig.13. Robot espacial

Un altre tipus de robot paral·lel és el robot translacional DELTA, aquest robot es mot similar a la Plataforma Stewart i utilitza parells esfèrics com la major part de les plataformes Stewart. A pesar de que el robot DELTA és un robot més recent que la Plataforma Stewart, té una variant optimitzada anomenada "Orthoglide", aquesta variant el que fa es presentar una distribució diferent dels braços i dels actuadors per a optimitzar l'espai de treball.

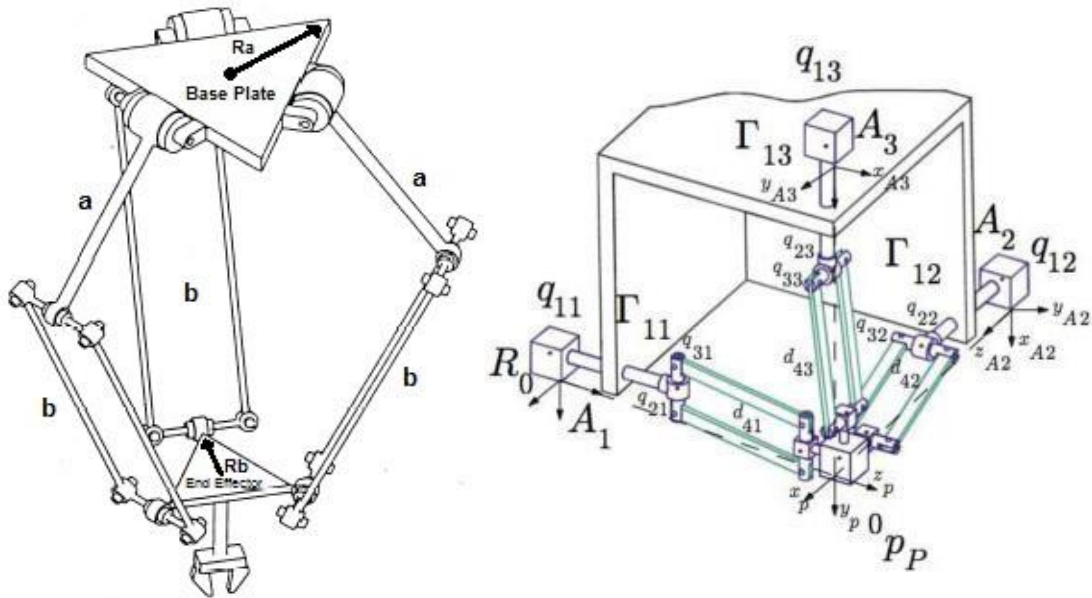


Fig.14 i 15. Robot DELTA i robot Orthoglide

2.3 ESPAI DE TREBALL

L'espai de treball és el volum espacial al que pot arribar el extrem del robot o ferramenta, en aquest cas seria la plataforma mòbil. Aquest volum està definit per les dimensions, forma i tipus de les articulacions que formen el robot, així com les limitacions imposades per les restriccions dels parells i del sistema de control que s'utilitza.

Dintre de l'espai de treball també es pot modificar l'orientació de la plataforma, però açò no es pot fer sempre, ja que hi han alguns punts (els més allunyats i els més pròxims) als qual només es pot arribar amb una o dues orientacions determinades.

Quan ens referim a l'espai de treball el més important és la seua forma i el volum (dimensions i estructura). Ambdós aspectes tenen una importància significativa degut al impacte que estos exerceixen tant en el disseny del robot com en la seua manipulabilitat.

Si es pretén utilitzar un robot en concret, el conèixer les dimensions, la forma i l'estructura de l'espai de treball d'aquest, és imprescindible ja que:

- La forma és important per a la definició del entorn on el robot treballarà.
- Les dimensions de les diferents parts del conjunt són essencials per a saber l'abast de l'efector final.
- L'estructura de l'espai de treball és important per a calcular les característiques cinemàtiques del robot, les quals estan relacionades amb la interacció entre el robot i l'entorn.

A més, la forma, les dimensions i l'estructura de l'espai de treball depenen de les propietats del robot:

- Les dimensions dels eslavons del robot i les limitacions mecàniques de les articulacions tenen una gran influència en les dimensions de l'espai de treball.
- La forma depèn de l'estructura geomètrica del robot i també de les propietats dels graus de llibertat (quantitat, tipus i límits de les articulacions).
- L'estructura de l'espai de treball ve definida per l'estructura del robot i per les dimensions dels seus eslavons.

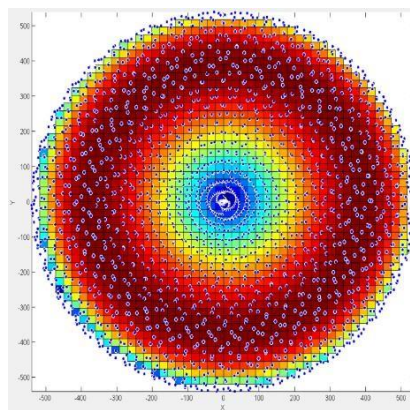


Fig.16. Espai de treball en els eixos X i Z d'una plataforma Stewart

2.3.1 AVANTATGES E INCONVENIENTS

Ara es procedirà a analitzar els avantatges e inconvenients de la visualització de l'espai de treball d'un robot:

Avantatges	Inconvenients
La visualització tridimensional de l'àrea de treball, la visió de la forma i la dimensió total d'aquesta	Es necessita processar una gran quantitat de punts per a obtenir un anàlisi exacte
Permet fer-se una idea a l'usuari de com és l'espai de treball	Es deu tindre en compte diferents criteris d'anàlisi estructural de l'espai de treball respecte a la manipulabilitat.
Ofereix la possibilitat d'optimitzar certes característiques del robot	Posat que els robots amb diferents estructures tenen diferents espais de treball, es necessari analitzar-los per separat

2.3.2 CLASSIFICACIONS DINTRE DE L'ESPAI DE TREBALL

A pesar d'haver definit i utilitzat l'espai de treball, es possible estudiar aquest concepte des d'altres punts de vista:

- **Espai de Treball Màxim (ETM):** és el lloc geomètric al qual pot arribar l'efector d'un robot amb almenys una orientació possible.
- **Espai de Treball d'Orientació Inclusiva (ETOM):** es defineix com tots els possible punts que pot accedir l'efector final amb almenys una orientació dintre d'un rang d'orientacions.
- **Espai de Treball d'Orientació Costant (ETOC):** és el lloc geomètric que pot ser assolit per l'efector final amb una orientació fixa.
- **Espai de Treball d'Orientació Total (ETOT):** és el lloc geomètric que pot assolir l'efector final d'un robot amb qualsevol orientació.
- **Espai de Treball de Destresa (ETD):** està definit com el lloc geomètric que pot assolir l'efector final d'un robot amb qualsevol orientació i sense singularitats. Aquest espai de treball té en compte l'estudi de les singularitats utilitzant la matriu Jacobiana de manera que s'eviten les pèrdues de control.

2.4 ACTUADORS

Els sistemes d'accionament d'un robot són el conjunt d'elements que fan possible el moviment de cada eix de cada robot. Cada articulació porta associat uns determinats elements:

- **Actuadors o accionaments:** són uns dispositius capaços de transformar l'energia hidràulica, nemàtic o elèctrica en mecànica. Bàsicament són dispositius motors que generen el moviment seguint les ordres que reben del sistema de control. Es solen col·locar el més pròxim a la base del robot, ja que els parells estàtics que

deuen vèncer els actuadors són directament dependents de la distància que hi ha entre la massa i l'actuador.

- **Sistema de transmissió i reducció:** són els elements capaços de traslladar i variar el moviment que provoca el accionador fins a l'articulació. El sistema de transmissió és el encarregat de transmetre el moviment de l'actuador fins als altres elements. Mentrestant, el sistema de reducció s'ocupa de regular el parell i la velocitat de l'actuador als valors requerits. Aquests sistemes deuen complir unes característiques molt restrictives, ja que quan estan en funcionament suporten unes altes exigències.
- **Sensors de posició i velocitat:** són dispositius, els quals tenen la tasca de recollir informació sobre la posició i velocitat dels eixos. Una vegada obtenen la informació pertinent, la transmeten fins al sistema de control per a que aquest pugui controlar el moviment.

Els actuadors que s'utilitzen en robòtica es solen classificar en funció de l'energia que utilitzen per a poder moure's: neumàtica, hidràulica i elèctrica. A l'hora de dissenyar un robot, l'elecció dels actuadors depèn de diverses variables com la potència, la precisió o el preu. El tipus d'energia que alimenta als accionadors no només condiciona el tipus de control, sinó que a més també condicionarà la instal·lació, ja que si s'utilitza un fluid en moviment per a alimentar als accionadors, es necessitarà una bomba o un compressor, equip de refrigeració, acumuladors... mentre que si la font d'alimentació és elèctrica tota aquesta instal·lació no seria necessària, sinó que tindria uns altres elements.



Fig.17. Actuador hidràulic

2.4.1 ACCIONADORS NEUMÀTICS

Utilitzen l'energia de l'aire a pressió per a produir treball mecànic. Degut a que l'aire es un fluid altament compressible, és difícil controlar la posició i la velocitat, per el que és complicat poder tenir un control precís. Per un altra part, aquesta mateixa característica presenta l'avantatge d'evitar danys deguts a una sobrecarrega. Bàsicament depenen de la càrrega que suporta l'eix, ja que quant major siga la càrrega menor serà la precisió.

En robòtica pràcticament només s'utilitzen dos tipus d'accionaments neumàtics: els cilindres neumàtics i els motors neumàtics. Normalment amb els cilindres neumàtics es busca el posicionament d'ells en els extrems, controlant la distribució de l'aire a pressió mitjançant l'ús de servovàlvules. A causa del seu preu reduït i de la seua major simplicitat, els cilindres neumàtics són més utilitzats que els motors neumàtics.

Els accionadors neumàtics es solen utilitzar per a d'ur a terme tasques en les quals apareixen robots de moviments ràpids i de baixa precisió i repetibilitat. Això és, en

manipuladors simples amb posicionament per topes mecànics, l'articulació 3 d'alguns robots d'acoblament tipu SCARA i per a l'ús de garres.

2.4.2 ACCIONADORS HIDRÀULICS

Els accionadors d'aquest tipus son pràcticament iguals que els neumàtic, l'únic que canvia és el fluid utilitzat, ja que en aquest cas s'utilitzen olis minerals a una pressió compresa entre 50 i 100 bars.

L'oli al ser un fluid en estat líquid presenta un menor grau de compressibilitat i una major viscositat, pel que els actuadors hidràulics són més adequats per a realitzar moviments lents i de major precisió i per a suportar grans càrregues.

El control de posició d'un actuator hidràulic és simple i directe, degut a que aquests actuadors permeten una gran capacitat de càrrega i tenen una bona relació entre la potència i el pes del robot.

Els actuadors hidràulics, al igual que els neumàtics, també poden trobar-se com a cilindre o com a motor.

2.4.3 MOTORS ELÈCTRICS

Els motors elèctrics són els motors més utilitzats en els robots industrials actuals, ja que presenten un gran precisió, simplicitat, control i fiabilitat. La pitjor característica que presenten és la seua reduïda potència, pel que necessiten reductors de velocitat, amb la corresponent pèrdua de precisió. Dintre d'aquest grup d'actuadors es poden trobar tres classes diferents: motors de corrent continu, motors de corrent alterna (síncronos) i motors de pas a pas.

- **Motors de corrent continu**

Aquest tipus de motors són els més utilitzats en l'actualitat, degut a la facilitat que presenten de cara al control. Els motors d'aquest tipus estan constituïts per dos debanats interns (inductor e induït) que s'alimenten de corrent continua.

El inductor es troba en l'estator, el qual crea un camp magnètic de direcció fixa, denominat d'excitació.

El Induït, el qual es troba en el rotor, fa girar al mateix a causa de la força de Lorentz que apareix com a combinació del corrent que circula per ell i del camp magnètic d'excitació creat per l'inductor.

Per a poder transformar l'energia elèctrica en mecànica de forma continua, es necessari que els camps magnètics del estator i del rotor estiguin estàtics entre ells. Aquesta transformació és màxima quan ambdós camps es troben en quadratura.

Al augmentar la tensió del induït, també augmenta la velocitat de la màquina. Si el motor està alimentat a tensió constant, es pot augmentar la velocitat disminuint el flux d'excitació. Però quant més dèbil siga el flux, menor serà el parell motor que es pot desenvolupar per a una intensitat d'inducció constant.

- **Motors de corrent alterna**

Fins a fa pocs anys, aquest tipus de motors no havien sigut utilitzats en el món de la robòtica, degut bàsicament a la dificultat del seu control. A pesar de aquest clar inconvenient, han aconseguit ocupar un lloc en el camp de la robòtica al introduir millores en les màquines síncrones. Aquestes millores es poden resumir en tres punts:

1. La construcció de rotors sense escombretes.
2. L'ús de convertidors estàtics que permeten variar la freqüència amb facilitat i precisió.
3. La implementació de la microelectrònica que permet una gran capacitat de control.

- **Motors de pas a pas**

Els motors pas a pas generalment no han sigut considerats dintre dels accionaments industrials, ja que per als parells per als que es trobaven disponibles eren molt menuts i els passos entre posicions consecutives eren grans. Açò limitava la seua aplicació a controls de posicions simples. En els últims anys les seues característiques han sigut millorades, el que ha fet que es puguen fabricar motors pas a pas capaços de desenvolupar parells suficients en petits passos per al seu ús com a accionadors industrials.

Després de que s'hagen estudiat i analitzat els principals tipus d'accionadors que existeixen en el camp de la robòtica ja es pot elegir el més adequat per a la situació definida al principi d'aquest treball. Després d'haver analitzat cadascun dels possibles actuadors, la millor opció seria utilitzar accionadors hidràulics, ja que presenten una gran precisió, el que ens permetria controlar a la perfecció tots els moviments, suporten una gran quantitat de pes, pel que amb les dimensions de la plataforma açò és imprescindible. En concret utilitzaríem pistons hidràulics i no motors hidràulics, aquesta decisió es pot justificar mirant el disseny, ja que solament s'utilitzen pistons.

3. CINEMÀTICA I DINÀMICA

La cinemàtica és l'estudi del moviment respecte un sistema de referència, sense tenir en compte les forces que actuen sobre el sistema, sinó únicament la geometria d'aquest. En la robòtica la cinemàtica fa referència a l'estudi del moviment dels robots i de les seues diferents parts, però dintre de la cinemàtica podem trobar dos tipus diferents: la cinemàtica inversa i la cinemàtica directa.

3.1 CINEMÀTICA INVERSA

En el camp de la robòtica, la cinemàtica inversa és el sistema mitjançant el qual es pot obtenir els moviments dels actuadors d'un robot per a que aquest es situï en una posició predeterminada per l'usuari, és a dir, el seu principal objectiu és trobar les coordenades articulars del robot, per a que el seu extrem es posicione i s'oriente en una determinada posició.

Aquesta tècnica és molt útil, sobretot quan es parla de robots amb varies articulacions i actuadors, ja que permet programar un robot solament tenint en compte la ferramenta o actuator final que interessa, sense tindre que pensar en la posició de la resta d'actuadors i articulacions. Però, no tot és positiu en aquesta tècnica, ja que poden aparèixer problemes com són les singularitats. Aquest tipus de problema apareix en aquesta tècnica, tant en robots simples com en robots paral·lels.

Les singularitats són punts de l'espai on el robot no té una sola solució possible, és a dir, que per a que l'actuator o l'extrem del robot indicat aconseguixi la posició desitjada, la resta del robot pot tenir diferents posicions, el que dona lloc a diferents combinacions d'actuadors i de moviments per a que el robot tinga una mateixa posició.

Dintre de les singularitats es poden donar tres tipus diferents de quantitats de solucions: ninguna, un número finit o infinites solucions:

- Pot ser que una posició indicada per a un robot no tinga ninguna solució, açò vol dir que està fora de la seua àrea de treball, ja siga perquè està fora del seu abast per les dimensions del robot o perquè la posició es troba molt pròxim al seu eix i xocaria amb ell mateix.
- Un altra opció que podem trobar, és que una posició tinga més d'una combinació de tots els actuadors, però sempre serà un número finit diferent d'1, ja que sinó no hi hauria singularitat. Aquest problema apareix sobretot a l'hora de treballar amb braços robots
- L'última opció en quant a possibles solucions dintre d'una singularitat es un número infinit de combinacions dels actuadors. Aquest cas sol aparèixer quan el robot amb el que treballem, té més graus de llibertat dels necessaris per a desenvolupar la tasca que li ha sigut encomanada.

Cal explicar que les singularitats no apareixen només si fem que el robot es desplaci a una punt on hi han diferents combinacions dels actuadors, sinó que també apareix quan programem trajectòries. En alguns programes de robòtica es pot elegir el tipus de trajectòria que té que fer el robot per a desplaçar-se d'un punt a un altre. Això es un

gran avantatge, ja que ens permet esquivar singularitats, com per exemple fer moviment curvilini per a evitar passar prop de l'eix del robot.

3.2 CINEMÀTICA DIRECTA

La cinemàtica directa s'utilitza per a determinar quina és la posició i orientació de l'extrem del robot, en el nostre cas de la plataforma mòbil, respecte a un sistema de coordenades que s'utilitza com a referència, coneixent les coordenades articulars del robot, és a dir, que a partir de conèixer i programar la posició i orientació de cada actuator podem conèixer la posició i orientació final de la nostra plataforma.

Aquest sistema evita els problemes de singularitat en els robots de llaç obert (simples), ja que només permet obtindre una solució, però a l'hora de parlar dels robots paral·lels la cosa canvia, ja que al no haver ningun extrem la combinació dels diferents actuadors pot donar lloc a singularitats.

Normalment, quan es programa o es treballa amb robots tan complexos com la plataforma Stewart, es sol utilitzar la cinemàtica inversa, ja que és molt més còmode programar el moviment del extrem del robot fins a les posicions desitjades, però a l'hora de moure el robot en la realitat el que nosaltres podem controlar són els actuadors. Per a saber com es tenen que moure els actuadors per a que el extrem del robot arribi a la posició i orientació definides, es necessita passar del sistema cinemàtic invers al sistema cinemàtic directe. Per a realitzar aquesta operació existeixen diversos mètodes, a continuació explicarem breument els principals:

- **Mètodes geomètrics:** Sol utilitzar-se per a robots amb pocs graus de llibertat, ja que només es consideren els primers graus de llibertat per a la seua resolució. El procediment es basa en trobar el número suficient de relacions geomètriques. Per a fer açò utilitza relacions geomètriques i trigonomètriques (resolució de triangles).
- **Resolució a partir de matrius homogènies:** Es treballa per a resoldre les "n" variables en funció del vector de posició de les articulacions del robot.
- **Desacoblament cinemàtic:** Consisteix en la separació i posicionament de cada part del robot. Es sol utilitzar aquest mètode quan es treballa amb robots amb 6 graus de llibertat.

3.3 DINÀMICA

La dinàmica del robot és el sistema pel qual es relacionen els moviments del robot amb les forces implicades. El model dinàmic estableix relacions matemàtiques entre les coordenades articulars, les seues derivades, les forces i parells aplicats en les articulacions i els paràmetres del robot.

Per a poder obtenir el model dinàmic es poden utilitzar diferents sistemes matemàtics, alguns d'aquests són les formulacions clàssiques de Lagrange-Euler, les equacions

generalitzades de D'Alembert o l'algoritme recursiu de Newton-Euler. En l'actualitat també existeix l'opció d'utilitzar un algoritme computacional.

Per a robots d'un o dos graus de llibertat l'obtenció del model dinàmic no és molt complex, però a mesura que s'augmenten els graus de llibertat, el plantejament i l'obtenció es complica. Per aquest motiu no sempre es possible obtenir un model expressat d'una forma tancada i completa. En aquests casos el model dinàmic té que ser resolt de manera iterativa, mitjançant l'ús d'un procediment numèric, com els que s'han mencionat avanç.

4. STEWART

La plataforma Stewart és una proposta per a generar moviments en l'espai (sis graus de llibertat) com una estructura paral·lela, sent la millor alternativa per a la construcció de simuladors de vol. Aquesta estructura presenta una bona relació entre el propi pes i la càrrega admissible, ja que aquesta última es divideix entre els sis actuadors de l'estructura. A més, els esforços que sofreixen els actuadors són a tracció i compressió, el que ofereix una gran rigidesa al conjunt.

En un principi la plataforma Stewart consistia en una plataforma triangular unida mitjançant parells esfèrics a tres actuadors lineals capaços d'ajustar la seua longitud, i que al mateix temps es connectaven en la seua part inferior a una base fixa en l'espai amb articulacions universals.

La plataforma Stewart és una estructura dissenyada per a controlar la posició i l'orientació. A partir d'aquest disseny inicial, han anat apareixent variacions d'aquest, les quals han format part de la indústria (aeroespacial, marina, automobilística...) degut a la seua gran versatilitat i àrea de treball.

4.1 CARACTERÍSTIQUES DE LA PLATAFORMA STEWART

La plataforma Stewart presenta una gran mobilitat i precisió en els seus moviments. La arquitectura que presenta es bàsicament una plataforma inferior fixa en l'espai, una plataforma superior que es mou, sis actuadors lineals capaços de modificar la seua longitud (pistons), tres parells esfèrics, com a mínim, entre els actuadors i la plataforma superior, i tres parells esfèrics o universals, com a mínim, entre la plataforma inferior i els actuadors. Depenent de la distribució i de la quantitat de parells que tinga cada plataforma, existeixen diferents tipus de plataformes: de 6 i 6 punts, de 6 i 3 punts o de 3 i 3 punts. Aquestes distribucions seran examinades amb més profunditat posteriorment.

Per la seua geometria, la plataforma Stewart permet a la plataforma mòbil (plataforma superior) traslladar-se i rotar en els tres eixos de l'espai (X, Y i Z), pel que es mou com si no tingues ningun tipus de restricció, sempre i quan no surti de l'àrea de treball.

La plataforma Stewart sol utilitzar com a actuadors pistons hidràulics, ja que presenten una gran precisió a l'hora de programar moviments, a més de l'elevada força que poden exercir. Aquest paràmetre es analitzat i justificat amb més profunditat en l'apartat d'actuadors que es troba en el punt 2.4.

4.2 CONFIGURACIONS DE LA PLATAFORMA STEWART

En un principi les plataformes Stewart només es dividien en dos configuracions, una que presentava una distribució triangular de la unió dels efectors amb la plataforma inferior i la superior (3 – 3) i un altra amb una distribució triangular en la plataforma superior i una hexagonal (6 punts) en la inferior (6 – 6) . La unió dels efectors amb la plataforma superior sempre es feia mitjançant l'ús de parells esfèrics, mentre que la unió dels

efectors amb la plataforma inferior es podia fer amb parells esfèrics o universals. Prompte s'adonaren que al unir dos efectors en un mateix punt restringia molt el àrea de treball del robot, pel que al poc temps va aparèixer una distribució de sis punts en la plataforma inferior (hexàgon regular) i sis punts en la plataforma superior (hexàgon irregular), la qual va ser anomenada 6 – 6.

També es pot fer una petita classificació depenent del tipus de parell que s'utilitza per a unir els efectors amb la plataforma inferior, ja que si s'utilitzen parells esfèrics la configuració va finalitzada de *sps (spherical – prismatic – spherical)*, mentre que si s'utilitzen parells universals la terminació és *ups (universal – prismatic – spherical)*. En aquest cas es dissenyen i simulen tres plataformes diferents, cada una seguint una de les tres configuracions anomenades anteriorment i tots els parells són esfèrics (terminació *sps*), excepte en la plataforma que segueix la configuració 6 – 6.

5. DISSENY DE LA PLATAFORMA STEWART

5.1 MODELATGE

El procés de modelatge consisteix en dissenyar i construir una plataforma Stewart amb el programa Adams View. En aquest cas, es comença per definir les parts que formaran el robot en qüestió.

5.1.1 STEWART_1

Aquesta primera plataforma té una configuració 6 – 6, és a dir, sis punts d'unió (parells universals) entre les camises dels pistons i la plataforma inferior, i sis punts d'unió entre els pistons i la plataforma mòbil. En aquesta plataforma en concret, la distribució dels enganxaments de les dues plataformes segueixen com a patró un hexàgon regular.

Es comença generant la base del robot, la qual estarà fixada al sòl. En aquesta plataforma la base és un cilindre i es crea utilitzant la ferramenta: *Bodies, Solids, Geometry, Cylinder*. La part recent creada té una altura de 180mm i un diàmetre de 4000mm, tal i com es pot apreciar en les imatges que es troben a continuació.

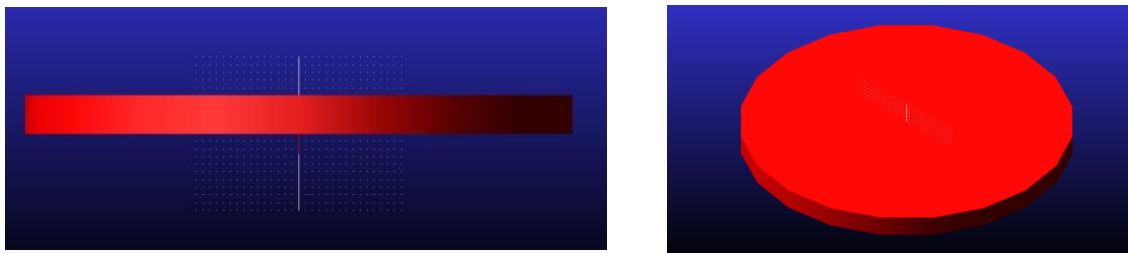


Fig.18 i 19. Plataforma inferior

Al cilindre resultant se li anomena "Plat_Inf", fent referència a la plataforma inferior.

A continuació es creen els espais per a ficar els parells que ueixen la plataforma inferior (base) amb les camises del sis pistons. El primer que es fa és generar una esfera de radi 120mm i es situarà a 1800mm del centre de la plataforma inferior. Després, s'enfonsa l'esfera 140mm en la plataforma que forma la base, fins a que el centre de l'esfera quede 20mm per davall de la cara superior, tal i com es veu en la figura 20.

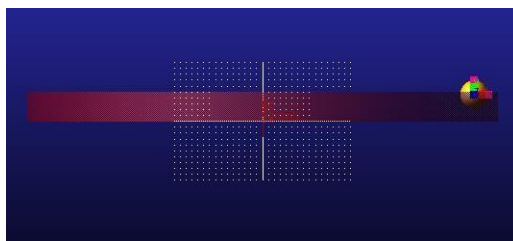


Fig.20. Plataforma inferior amb esfera

Una vegada fet açò, es copia cinc vegades l'esfera i es desplacen les seues copies seguint un patró hexagonal regular (60°), deixant-les totes a 1800mm del centre de la plataforma (figura 21).

- Cilindre 1 → 0°
- Cilindre 2 → 60°
- Cilindre 3 → 120°
- Cilindre 4 → 180°
- Cilindre 5 → 240°
- Cilindre 6 → 300°

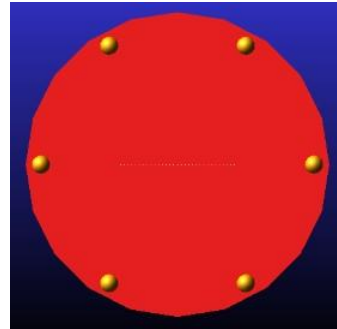


Fig.21. Plataforma inferior amb esferes distribuïdes en forma hexagonal regular

Finalment es resten les esferes a la plataforma per a crear els espais per als futurs enganxaments (figura 22). Açò es fa amb la ferramenta: *Boolean, Cut out a sòlid with another*.

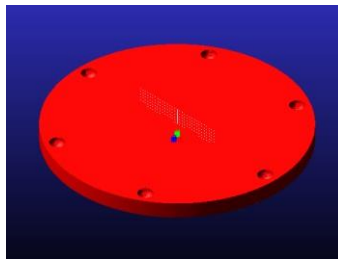


Fig.22. Plataforma inferior completa

El següent pas és dissenyar les camises dels pistons. Al ser peces amb una geometria que no es pot crear directament amb una ferramenta de Adams View, s'utilitzen diferents tipus de ferramentes per a sumar i restar cossos i volums fins a obtenir la geometria desitjada. Primer es fan els enganxaments. En aquest cas s'utilitzen enganxaments esfèrics, a pesar de que es van a utilitzar parells universals per a unir les camises dels pistons amb la plataforma inferior. Açò es fa perquè després amb un senzill canvi en una casella, el parell universal es pot convertir en un parell esfèric. Ara es crea una esfera de radi 120mm, igual que la feta anteriorment (esfera de color blau cel en la figura 23) .

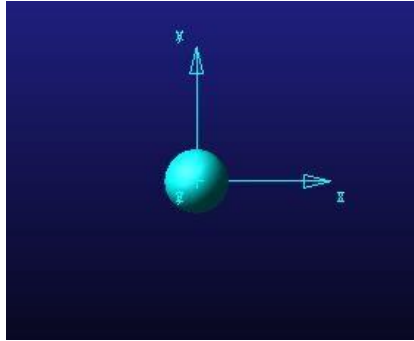


Fig.23. Esfera

Després es genera la pròpia camisa. Per a aquesta peça es crea un cilindre de 1500mm de longitud i 180mm de radi, el qual servirà de base per a crear la camisa. Després es defineix un cilindre de 1450mm de longitud per 150mm de radi (el cilindre de color rosa). El cilindre més petit es desplaçat fins a que els centres de les parts superiors d'ambdós cilindres coincideixen. Una vegada estiguin en la posició descrita anteriorment, es resta el petit al gran, tal i com es mostra en les següents imatges.

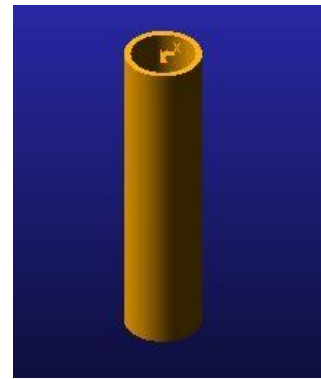
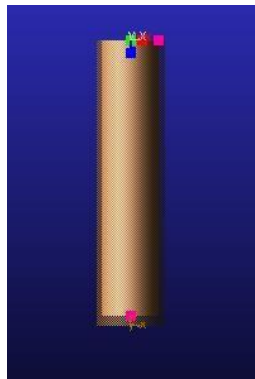
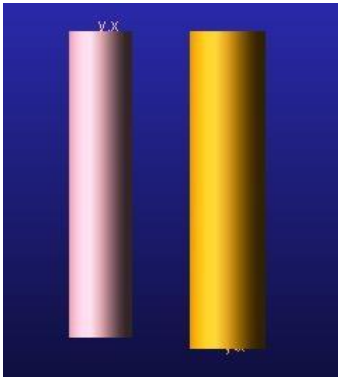


Fig.24, 25 i 26. Procés de disseny d'una camisa

A continuació, s'elabora la tapa de la camisa, part que fa la funció de límit superior per al recorregut del pistó, ja que evita que aquest pugui eixir-se'n de la camisa.

El primer que es fa és crear dos cilindres. Un que és la futura tapa, amb una longitud de 50mm i un radi de 180mm, i l'altre que té 80mm de longitud per 120mm de radi. Aquest últim cilindre (en les imatges el de color blau cel) es resta a la tapa per a crear un espai per on pugui passar el pistó, però pel qual no pugui passar el cap del pistó.

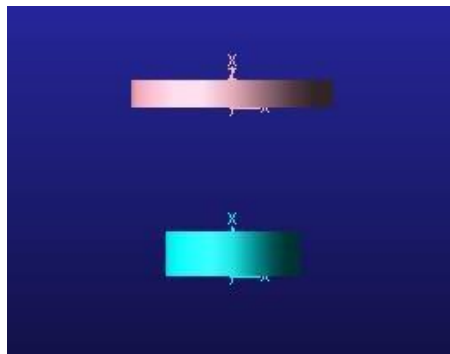


Fig.27. Procés de disseny de la tapa d'una camisa

Per a poder crear la tapa, es desplaça el cilindre blau cel fins a que els centres de masses d'ambdós coincidisquen. Quan estiguin en dita posició el cilindre blau cel és restat al rosa, deixant el resultat que es pot apreciar en la figura 28.



Fig.28 i 29. Tapa superior d'una camisa

A continuació, es trasllada la tapa fins a la seua posició, és a dir, en la part superior de la camisa del pistó. Per a moure aquesta peça s'utilitza la ferramenta: *Position: Move – Translate object(s) from an initial reference location to another*. Per a fer aquesta acció es desplaça el Marker_55 fins al Marker_54. Una vegada els dos punts es troben en l'espai s'uneixen la tapa a la camisa per a que forme part d'ella, tal i com es veu en les imatges inferiors.

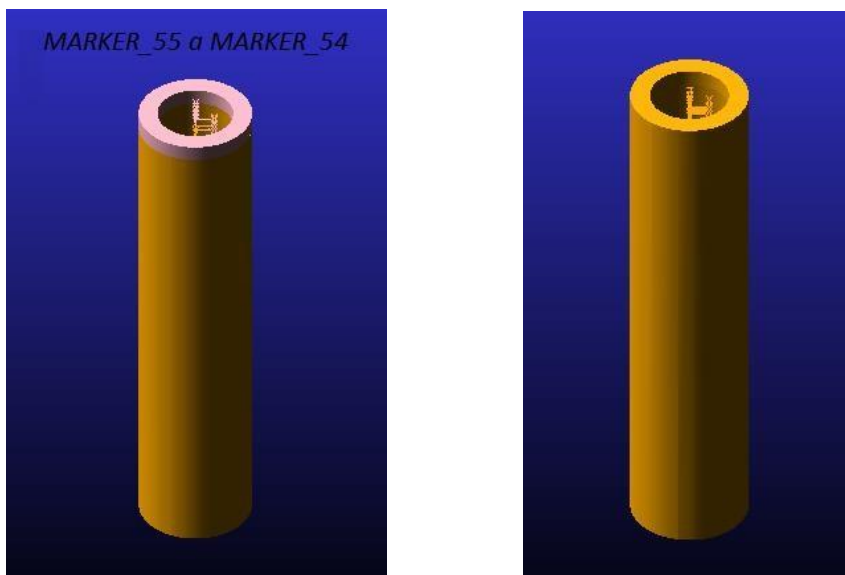


Fig.30 i 31. Procés d'unió d'una camisa i una tapa

Per a poder unir la camisa amb l'esfera que fa la funció d'enganxament, s'utilitza un petit cilindre. Aquesta nova peça té una altura de 300mm i un radi de 70mm. Per a poder concloure la camisa ajuntarem totes les parts, obtenint com a resultat la figura 32.

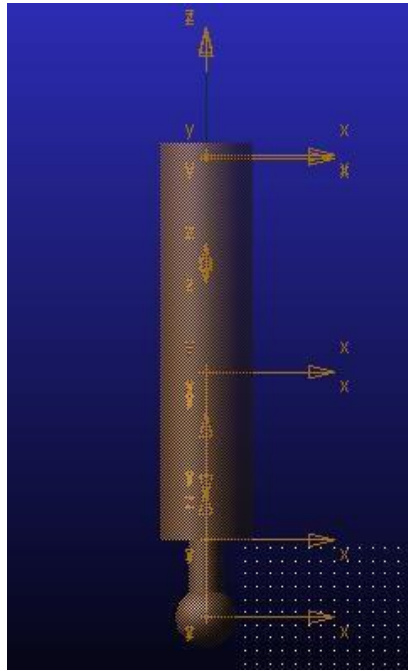


Fig.32. Camisa finalitzada

El següent pas és concebre el pistó. Primer es genera un cilindre de 2000mm de longitud per 120mm de radi, al qual se li anomena "Pisto". Després es crea un altre cilindre que és el cap del pistó i el que limita a aquest dintre de la camisa, per aquest motiu tindrà un radi superior, tal i com es mostra en la figura 34. Les dimensions del cap del pistó són 100mm per un radi de 150mm. Per a acabar, es trasllada el cap del pistó a la seua posició (davall del cilindre de color rosa en les imatges posteriors) i s'uneixen amb la ferramenta utilitzada avanç: *Boolean unit two sòlids*. El que dona com a resultat la figura de la figura 36.

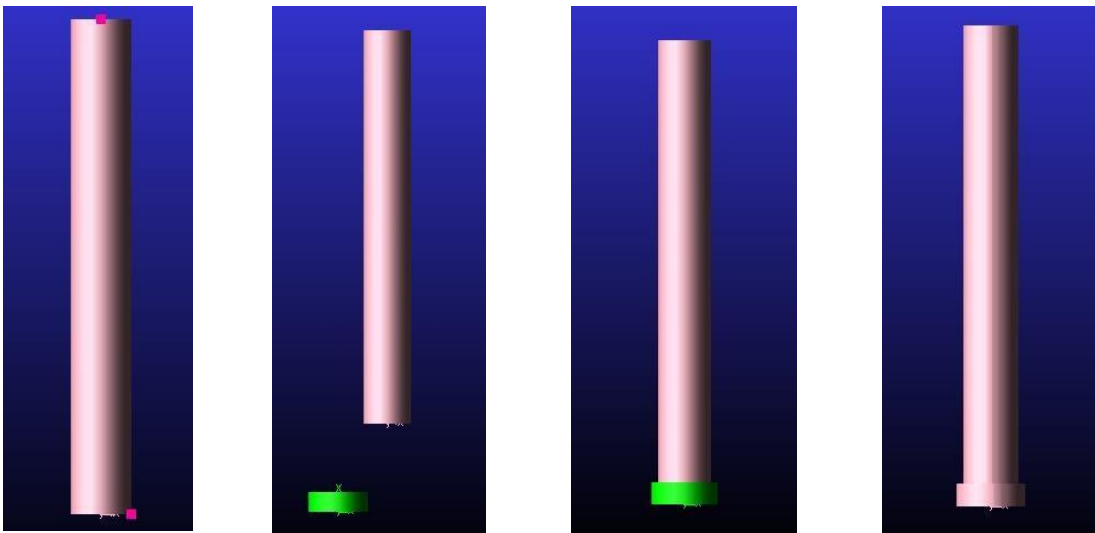


Fig.33, 34, 35 i 36. Procés de muntatge d'un pistó

Per a acabar el pistó i poder unir-lo a la plataforma superior (plataforma mòbil) es crea un enganxament, en aquest cas l'enganxament es fa exactament igual que el de la camisa, ja que s'utilitza el mateix tipus de geometria per a generar els parells (connectors esfèrics).

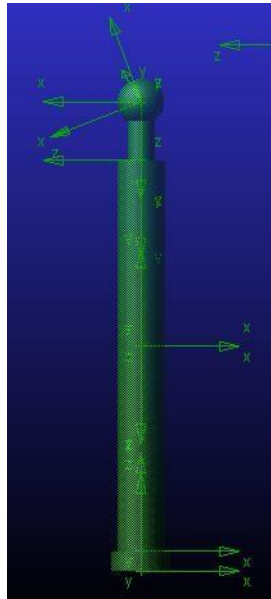


Fig.37. Pistó finalitzat

Per a acabar amb la part de modelatge del disseny de la primera plataforma Stewart falta la plataforma superior, sobre la qual es col·loca la cabina del simulador de vol.

El primer pas es crear un cilindre de 1200mm de radi per 180mm de longitud. A continuació es genera una esfera de radi 120mm, tal i com s'ha fet avanç en la plataforma inferior, i es situa en la posició desitjada (a 1000mm del centre de la plataforma superior respecte l'eix X global). Una vegada fet l'anterior pas, es fa que l'esfera s'enfonsi en la plataforma superior 140mm respecte l'eix Y global, és a dir, fins a que el centre de l'esfera estigui 20mm dintre de la plataforma mòbil. Aleshores, es copia cinc vegades aquesta esfera i es desplacen les seues còpies tal i com s'indica a continuació:

- Cilindre 1 → 0°
- Cilindre 2 → 60°
- Cilindre 3 → 120°
- Cilindre 4 → 180°
- Cilindre 5 → 240°
- Cilindre 6 → 300°

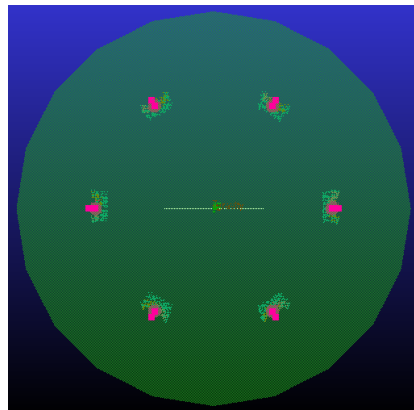


Fig.38. Plataforma superior amb esferes

Després es resten les sis esferes a la plataforma superior (Plat_Sup) per a crear els espais on els pistons poden unir-se mitjançant parells esfèrics, tal i com s'ha fet en la plataforma inferior per a les camises.

Per a facilitar l'acoblament i evitar problemes, es desplacen les camises fins als seus punts d'unió respectius amb la plataforma inferior, i el mateix es fa amb els pistons i la plataforma superior, fent coincidir el centre geomètric de les esferes dels enganxaments amb el centre de l'espai creat per a elles. Per a que es puga realitzar el lliscament de forma correcta entre els pistons i les camises es necessari que cada pistó estiga alineat amb la seua corresponent camisa. Açò s'ha aconseguit mitjançant càlculs trigonomètrics, en els quals es s'ha calculat l'angle que devia rotar cada pistó i cada camisa per a que quedessin alineats perfectament.

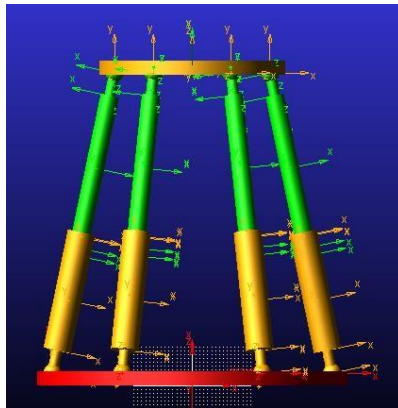


Fig.39. Plataforma 1

5.1.2 STEWART_2

El procés de modelatge de la plataforma Stewart_2 es exactament idèntic al anterior, l'únic diferent és la configuració, ja que aquesta nova plataforma té una configuració 6 – 3, el que fa que els pistons s'uneixen a la plataforma mòbil en tres punts, canviant totalment el angle que formen els pistons respecte l'horitzontal existent en ambdues configuracions. També cal remarcar que aquesta plataforma usa parells esfèrics per a unir les camises dels pistons amb la plataforma inferior.

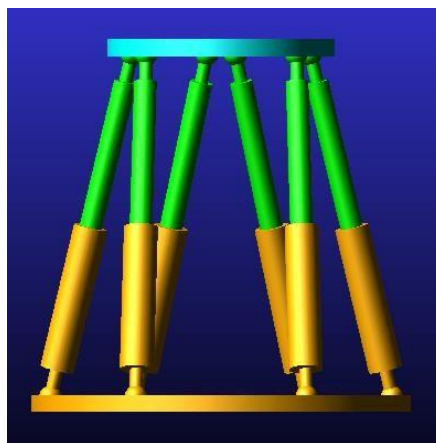


Fig.40. Plataforma 2

5.1.3 STEWART_3

La tercera plataforma, com l'anterior, segueix el mateix procediment de modelatge, i com en el cas anterior, la principal diferència és la configuració, que en aquest cas és 3-3, és a dir, que les camises s'uneixen a la plataforma inferior en tres punts i els pistons igual, però amb la plataforma superior. També cal destacar que la plataforma inferior, al tindre tres punts d'unió, s'ha decidit canviar la seua forma per la d'un triangle. A més en aquest cas a l'existir una major inclinació dels pistons no es necessari que el enganxament entre els pistons i la plataforma mòbil siga tant prop del centre de la plataforma, el que ajuda a evitar l'aparició de singularitats per paral·lelisme.

Tornar a remarca que els parells d'unió entre la plataforma inferior i les camises dels pistons són parells esfèrics.

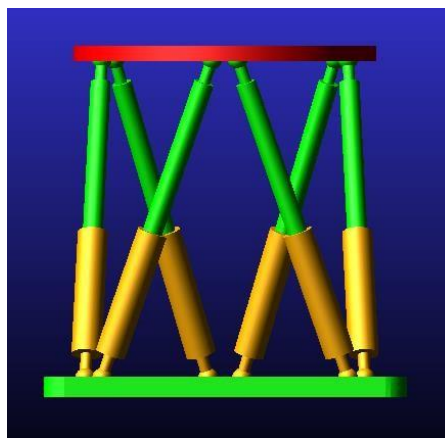


Fig.41. Plataforma 3

5.2 PARELLS D'UNIÓ

En aquest apartat del projecte s'explica com es generen els parells d'unió entre les diferents parts de la plataforma Stewart. Cal destacar que tots els parells que es creen són anomenats de manera que posteriorment es puguin identificar ràpidament, a més, la grandària dels símbols dels parells es modificada per a poder treballar millor i per a que aquests puguin ser visibles sense utilitzar ninguna mena de zoom.

El primer lloc s'uneix la plataforma inferior al sòl mitjançant l'ús d'un parell fixe que restringeix qualsevol tipus de moviment, ja sigui de translació com de rotació, en tots els eixos. Per a poder fer açò s'utilitza la ferramenta: *Connectors – Joints – Create a Fixed Joint*. Després d'unir la plataforma inferior al sòl en el centre de masses de la pròpia plataforma, apareix el dibuix d'un cadenat tancat, tal i com es pot apreciar en la figura 42.

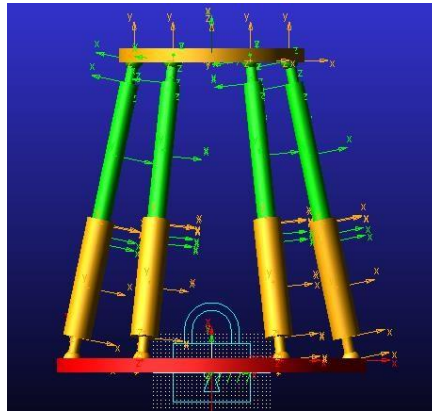


Fig.42. Plataforma 1 amb unió al sòl

Ara es creen els parells entre les camises dels pistons i la base. En la primera plataforma Stewart s'utilitzen parells esfèrics per unir aquestes parts. A més, en la primera plataforma Stewart (configuració 6 – 6) també es provaran els parells universals com s'ha mencionat avanç, ja que redueixen els graus de llibertat i al ser la plataforma amb menys inclinació en els pistons, és la que més possibilitats té de donar problemes per paral·lisme.

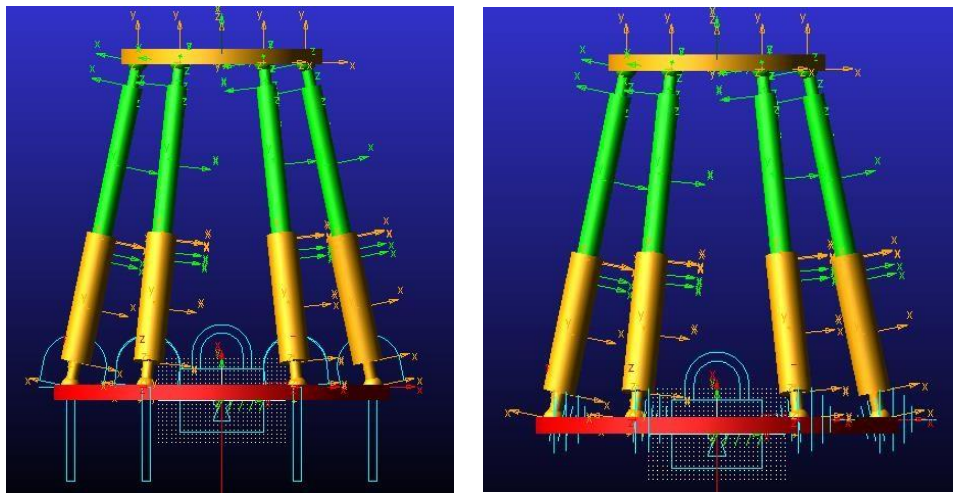


Fig.43 i 44. Parells universals i parells esfèrics

A continuació es generen els parells d'unió entre els pistons i la plataforma mòbil. En aquest cas solament s'utilitzen parells esfèrics, ja que com hem vist avanç els parells universals només s'utilitzen en certes situacions i sempre en les union amb la base, mai entre els pistons i la plataforma mòbil. Aquests parells es fan de la mateixa manera que els de la plataforma inferior.

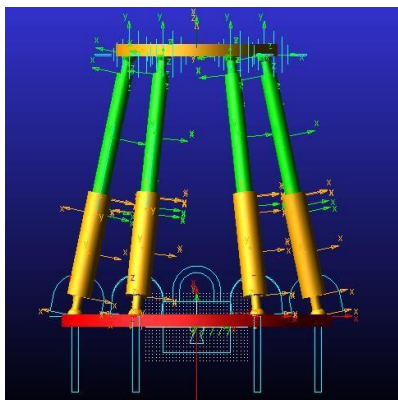


Fig.45. Parells esfèrics superiors

El últim grup de parells que queda per originar són els de translació que es troben entre les camises i els pistons. Aquest tipus de parell solament permet el moviment en una direcció i restringeix qualsevol tipus de rotació, pel que el pistó només pot desplaçar-se en la direcció en la que es trobe la camisa. Aquest vector de moviment anirà canviant amb el temps, ja que depen del tipus de moviment que estiga realitzant l'estructura. Açò es deu als parells creats en els extrems de les camises i dels pistons, que són els encarregats de canviar l'orientació sempre que siga necessari. Per a poder medir el desplaçament de cadscun dels pitons, es col·loca unmesurados de sistància respectel'eix Z local en aquest últim tipus de parell cinemàtic.

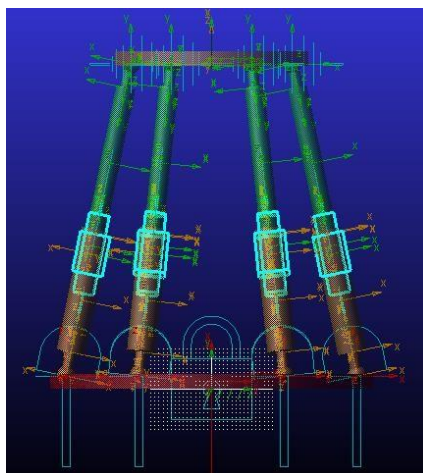


Fig.46. Parells prismàtics

Aclarir que les altres plataformes segueixen el mateix procediment per a generar el parells d'unió entre les seues peces.

5.3 MOVIMENTS I FORCES

Per a moure la plataforma superior es poden utilitzar diversos sistemes, com programar desplaçaments, velocitats, acceleracions... en aquest cas s'ha optat per utilitzar programació basada en desplaçaments. Per a començar, es genera un punt en la plataforma mòbil per a definir els moviments, en aquest cas el centre de masses. Açò es fa amb la ferramenta: *Motion – General Point Motion*. Després, es programen els

moviments desitjats en cada eix, ja que la ferramenta usada permet programar desplaçaments i rotacions en els tres eixos independentment. Es busca definir combinacions de moviments, amb els sis graus de llibertat que ofereix aquesta estructura, que s'assemblin als moviments reals que pot realitzar un avió en ple vol, ja que és l'objectiu funcional de la plataforma Stewart. Per a complir aquest requisit es programen els moviments amb la funció "Step5", perquè ens permet definir dos punts (inici i final) ja siga desplaçament o rotació dintre de una franja de temps definida per l'usuari. El més interessant d'aquesta combinació de ferramenta amb la funció nomenada avanç, es que ofereix una gran varietat d'opcions que possibiliten generar moviments molt similars als de la realitat. Una vegada es decideixen els moviments que es volen reproduir i aquests son programats amb combinacions de la funció "Step5", ja es pot realitzar la simulació.

Al finalitzar la simulació, s'entra en el post processador per a analitzar les gràfiques que representen el moviment de tots els objectes. Hi ha que fixar-se en els resultats que ens indiquen els mesuradors dels parells de translació definits anteriorment i mencionats en la part de parells d'unió, els quals representen com ha variat la posició del cap del pistó respecte el centre de masses de la camisa, pel que només mostra el desplaçament en l'eix Z local, és a dir, el moviment dintre del parell. Lògicament, cada pistó es mou de forma diferent als altres, pel que cadascun té el seu mesurador de distància.

A continuació, s'utilitza la ferramenta: *Curve Edit Toolbar – Create a spline data element from a curve*, per a transformar la gràfica desitjada en una tabla de dades. Aquesta tabla transcriu la posició en l'eix Y de la gràfica en dades, és a dir, que anota en cada instant de temps la posició del cap del pistó respecte el punt de referència (centre de masses de la camisa del pistó corresponent). Les tables creades es poden trobar en "Elements – Data elements".

El següent pas es definir el moviment dels pistons. L'objectiu és que la combinació del moviment dels sis pistons mogue la plataforma mòbil exactament igual que com o feia amb el moviment programat directament sobre ella amb les funcions "Step5". Amb la ferramenta: *Motion – Translational Joint Motion*, es genera una moviment dintre d'un parell de translació. Aquest últim tipus de moviment reproduceix el desplaçament d'un pistó en la vida real, pel que és perfecte per a aquest cas. A l'hora de programar el moviment de cada pistó s'utilitza la funció "Cubic Fitting Method" que apareix abreviat com "CUBSPL". Aquesta funció el que fa es llegir una tabla de dades a partir del temps que se li indica.

Es va elegir aquesta funció perquè al analitzar el moviment dels pistons les funcions matemàtiques per a definir les corbes de les gràfiques eren molt complexes, pel que no es podien programar amb ninguna funció. Aleshores, es necessitava una funció que fora capaç de traduir les gràfiques en tables de dades i que tingues la qualitat de poder llegir les tables pertinents. Per tot açò va ser obligatori l'ús de funcions tipus "Spline". Dintre del propi "Spline" es poden trobar diverses funcions, les quals es van a examinar i explicar per a justificar l'ús de "CUBSPL".

- **Cubic Fitting Spline (CUBSPL):** és una funció que ofereix molt bon resultat en les derivades de les dades mesurades, el que permet poder realitzar diferents anàlisis sense dur a terme més simulacions ni càlculs. Al ser un ajust global dona igual la distribució dels punts, però si es canvia un afecta a tots, pel que es té que repetir la simulació amb els nous punts. És un sistema molt lent.
- **Akima Fitting Methode (AKISPL):** Es basa en un ajust local, pel que si es canvia un punt no afecta als altres, és a dir, només hi ha que analitzar o simular els punts modificats. És un sistema més ràpid que el “CUBSPL”, però per a que proporcione resultats fiables es necessita que els punts d’anàlisi segueixin una distribució regular. A més, si es necessita realitzar càlculs o simulacions basats en les derivades, aquesta funció falla bastant.
- **B-spline Fitting Methode (CURVE):** Aquesta funció no es bona per a les simulacions basades en desplaçaments, sol usar-se per a analitzar geometries i geometries 3D.

Per els motius explicats, hem escollit la funció “CUBSPL”, ja que permet treballar amb les derivades dels desplaçaments, que en aquest cas són molt interessants, i facilita el poder col·locar els punts de anàlisi al gust de l’usuari.

Després d’haver utilitzat la funció spline per a programar els moviments dels pistons, es simula una altra vegada el moviment de la plataforma Stewart i amb uns altres mesuradors ja programats, s’obtenen les forces dels pistons, les qual seran incluídes dintre d’una força amb la mateixa ferramenta spline. Aquesta força es fa amb una direcció definida, la qual coincideix amb la direcció i sentit dels moviments dels pistons.

6. SIMULACIONES

6.1 COMPROVACIONS

Després d'haver programat els moviments i les forces toca realitzar les simulacions , analitzar i comparar el resultats que s'obtenen d'aquestes.

6.1.1 CINEMÀTICA INVERSA

Per a estar segurs de que els pistons, les camises , els mesuradors i la resta d'elements estan en la posició correcta i amb els paràmetres adequats, el primer moviment que es programa en les tres plataformes és un moviment vertical descendent. Aquest moviment està programat amb la funció "Step5" (la qual ja ha sigut explicada avanç) i consisteix en desplaçar-se en 3 segons 600mm en l'eix Y però en sentit negatiu. Aquestes simulacions es duen a terme segons el sistema de cinemàtica inversa, és a dir, que el moviment està programat directament sobre la plataforma mòbil (efector del robot).

- **Plataforma Stewart_1**

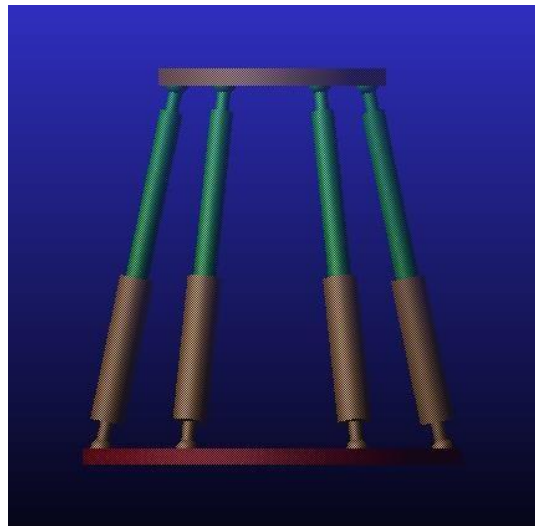


Fig.47. Plataforma 1 acoblada

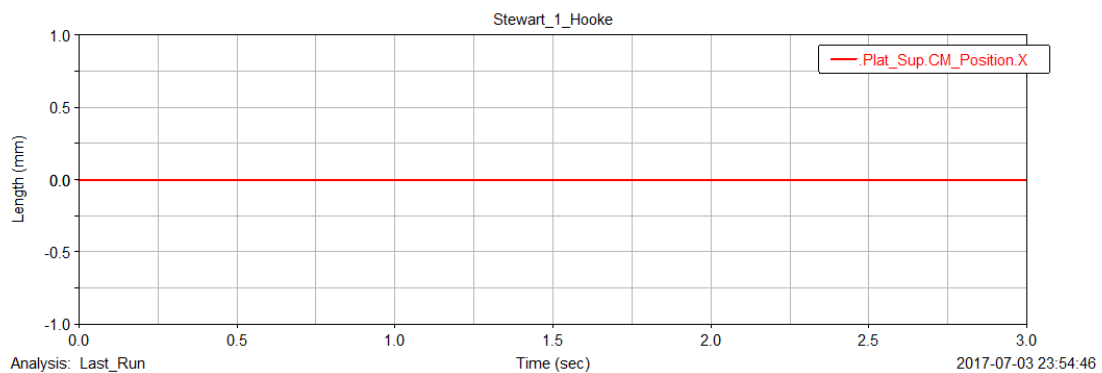


Fig.48. Desplaçament plataforma superior en l'eix X

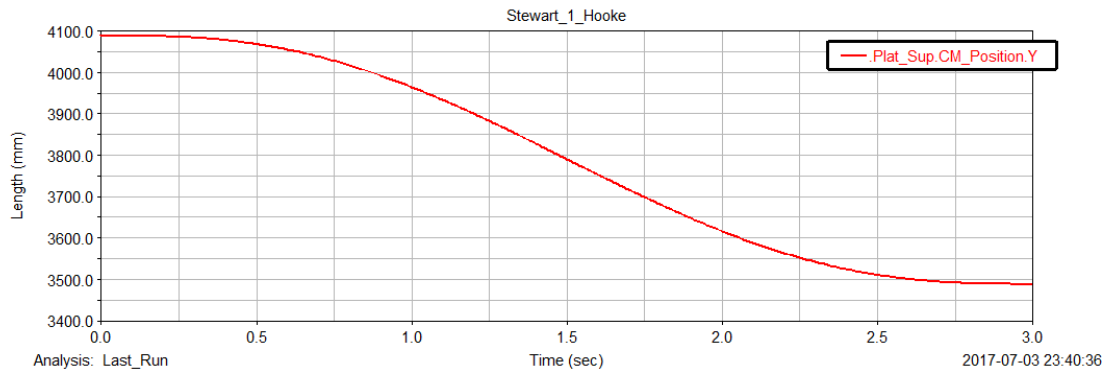


Fig.49. Desplaçament plataforma superior en l'eix Y

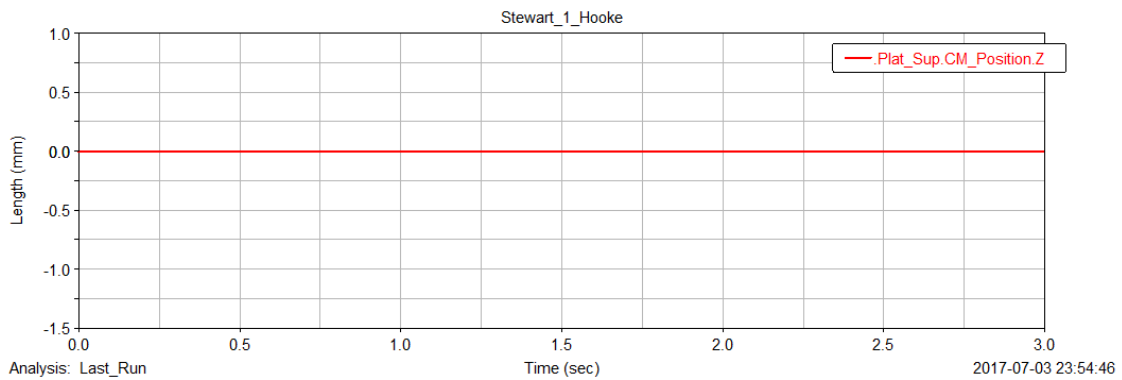


Fig.50. Desplaçament plataforma superior en l'eix Z

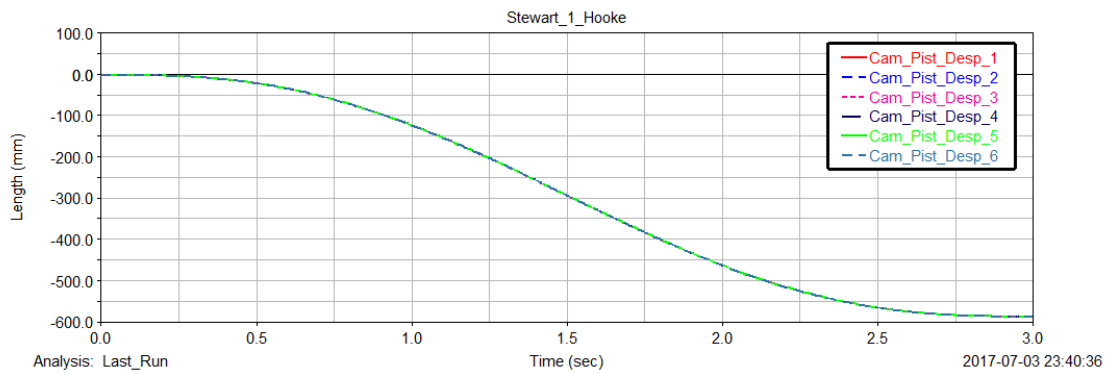


Fig.51. Desplaçament dels pistons en l'eix Z local

- **Plataforma Stewart_2**

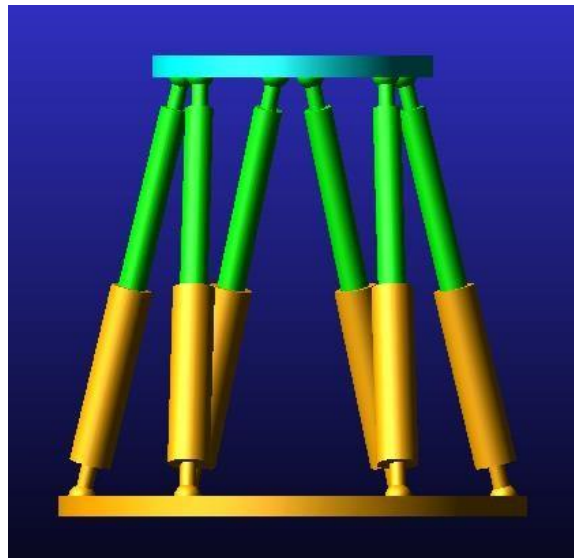


Fig.52. Plataforma 2 acoblada

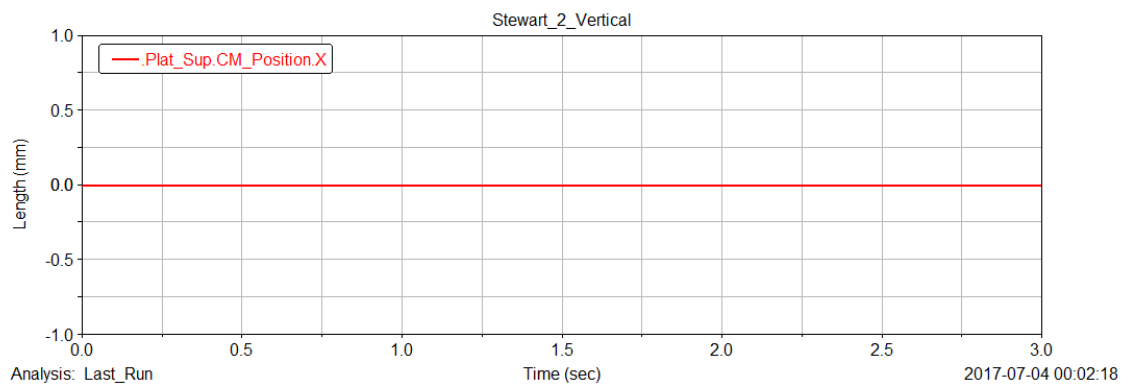


Fig.53. Desplaçament plataforma superior en l'eix X

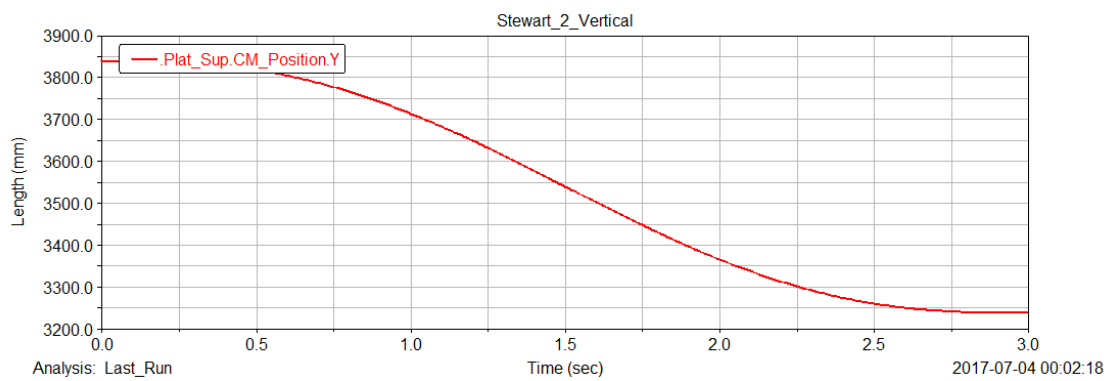


Fig.54. Desplaçament plataforma superior en l'eix Y

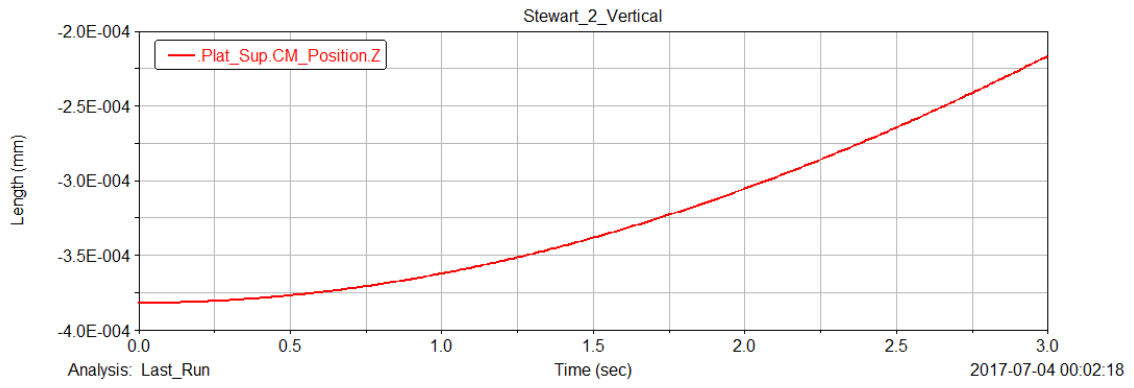


Fig.55. Desplaçament plataforma superior en l'eix Z

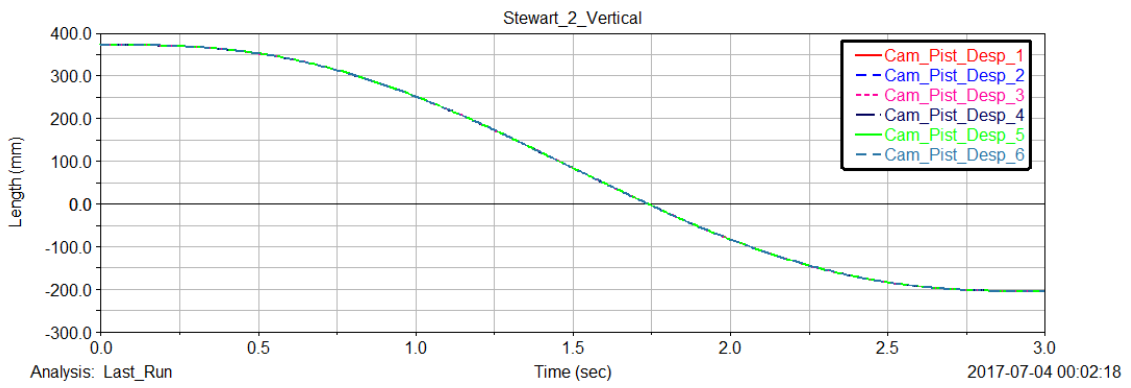


Fig.56. Desplaçament dels pistons en l'eix Z local

- **Plataforma Stewart_3**

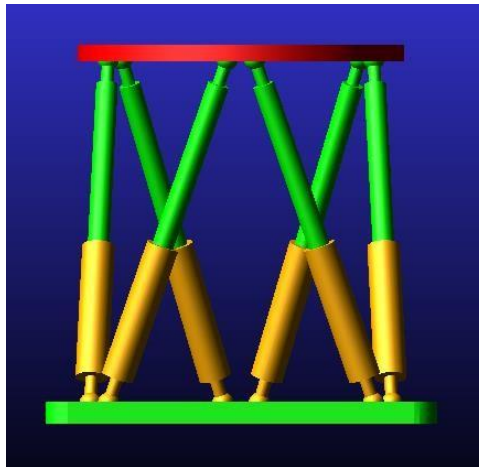


Fig.57. Plataforma 3 acoblada

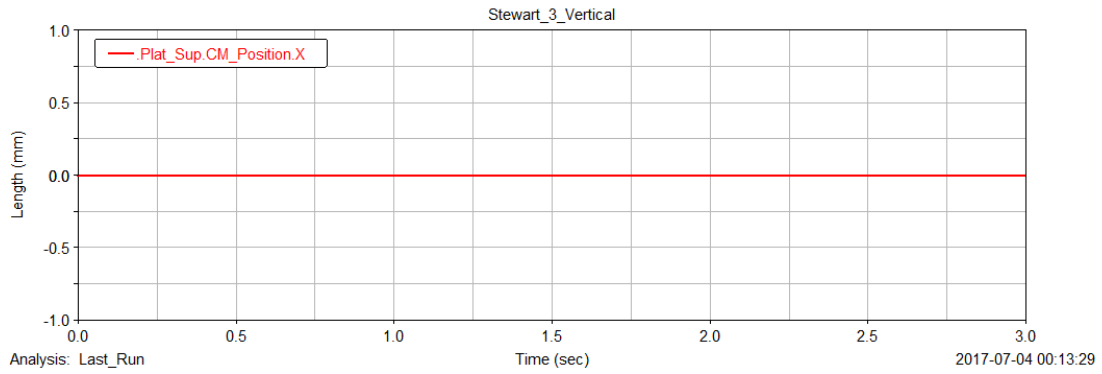


Fig.58. Desplaçament de la plataforma superior en l'eix X

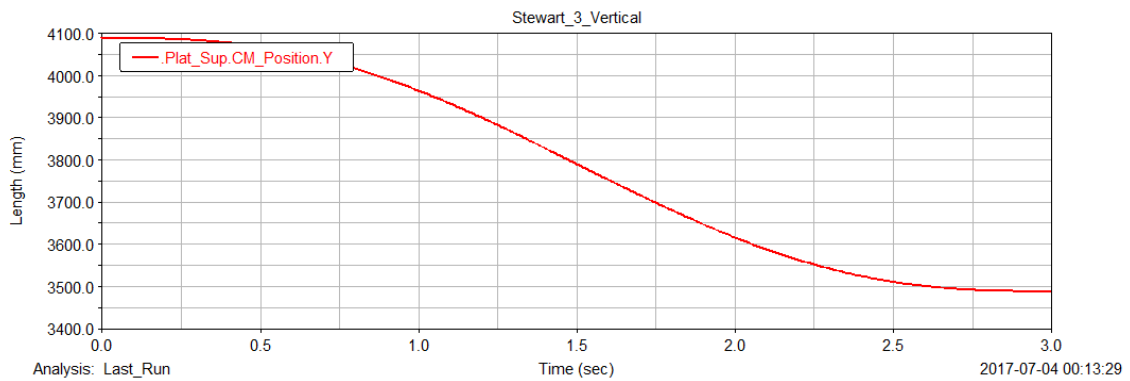


Fig.59. Desplaçament de la plataforma superior en l'eix Y

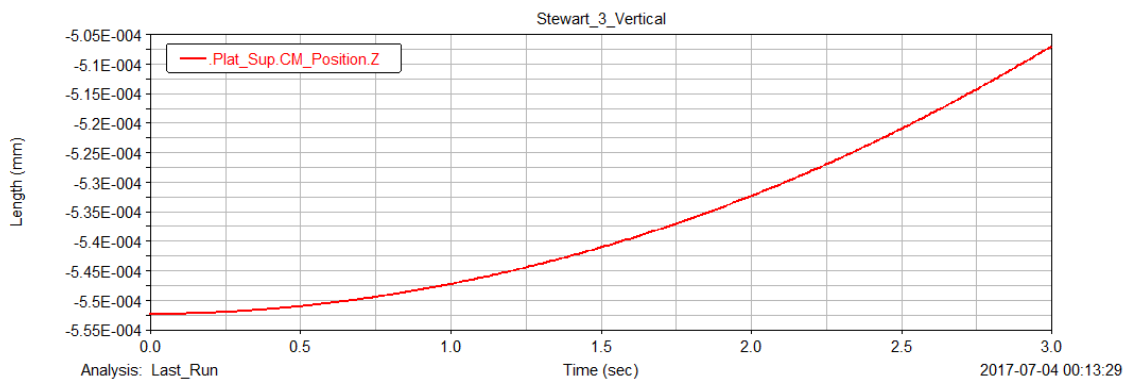


Fig.60. Desplaçament de la plataforma superior en l'eix Z

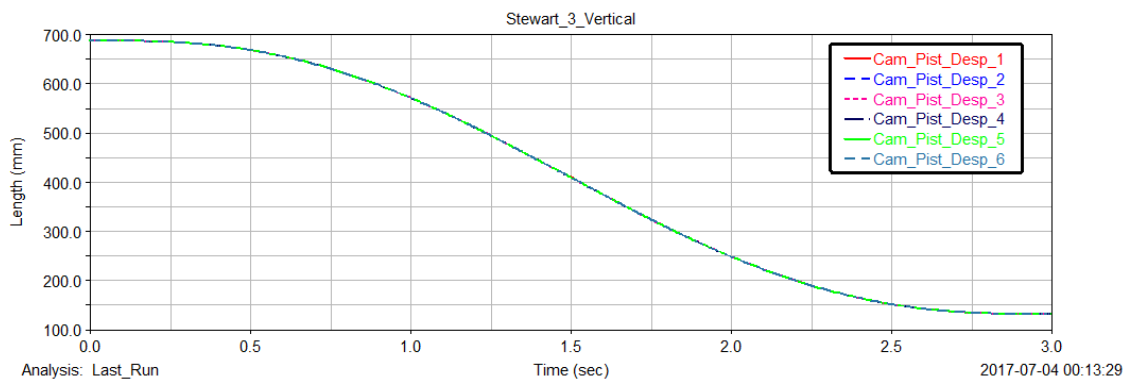


Fig.61. Desplaçament dels pistons en l'eix Z local

A l'analitzar els mesuradors encarregats de mostrar el desplaçament de cadascun dels pistons respecte el seu eix Z (eix Z local) es pot apreciar com el desplaçaments en tots els pistons és el mateix. La raó per la qual es produeix aquest fet, és perquè al tenir tots els pistons la mateixa inclinació respecte el plànol horitzontal (perpendicular a l'eix Y) i al estar totes les unions a la mateixa distància del centre, el desplaçament que tenen que fer (en aquest cas) és el mateix per a tots tal i com es pot apreciar en les gràfiques de les tres plataformes anteriors.

A més, també es poden veure les gràfiques de desplaçament de la plataforma superior en els eixos X, Y i Z globals de cada plataforma, per a demostrar que el desplaçament que aquesta realitza concorda amb el programat.

En alguns casos, com en el de l'última plataforma, es pot apreciar com la gràfica del desplaçament en l'eix Z no és 0 durant tota la simulació, tal i com està programat, però si s'observa l'escala i els valors que aquesta marca, es pot veure que els números que apareixen són molt pròxims a 0 i més si es té en compte que s'està parlant d'un desplaçament de 600mm, per la qual cosa es pot afirmar que el desplaçament en l'eix Z és nul.

Si s'observen amb deteniment les escales de les gràfiques dels desplaçament dels pistons es pot veure com a pesar de que la forma de les gràfiques d'una plataforma a un altra són pràcticament iguals, el valor de l'escala varia, açò es deu a que cada plataforma utilitza el seu sistema de referència, per això en alguns casos apareixen valors negatius, mentre que en uns altres no estan ni prop.

6.1.2 CINEMÀTICA DIRECTA

Una vegada fetes les simulacions pel sistema de la cinemàtica inversa, es procedeix a realitzar les simulacions per cinemàtica directa. Per a dur a terme aquest procés, s'utilitzen les gràfiques obtingudes per els mesuradors de cada pistó en cada plataforma. Per a poder utilitzar aquestes gràfiques com a moviment per als pistons es necessita una ferramenta "spline" que transforma les gràfiques en tables de dades i després que siga capaç de llegir aquestes tables i faci que els pistons es moguen com deuen. Aquesta ferramenta és "*Cubic Fitting Spline (CUBSPL)*", la qual ja ha sigut nomenada, analitzada i explicada en l'aparta 5.3 (Moviments i Forces).

El resultat que s'esperen traure d'aquestes simulacions són les forces dels pistons i s'obtidran gracies a l'ajuda d'uns mesuradors relacionats amb els moviments dels pistons (cinemàtica directa).

- **Plataforma Stewart_1**

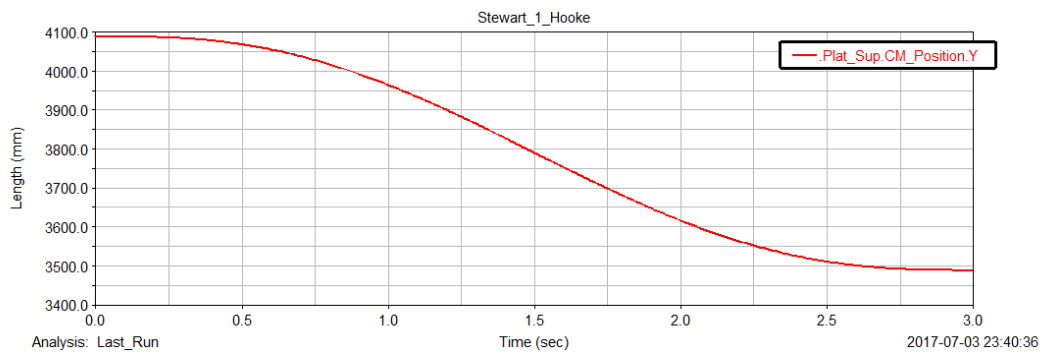


Fig.62. Desplaçament de la plataforma superior amb cinemàtica indirecta

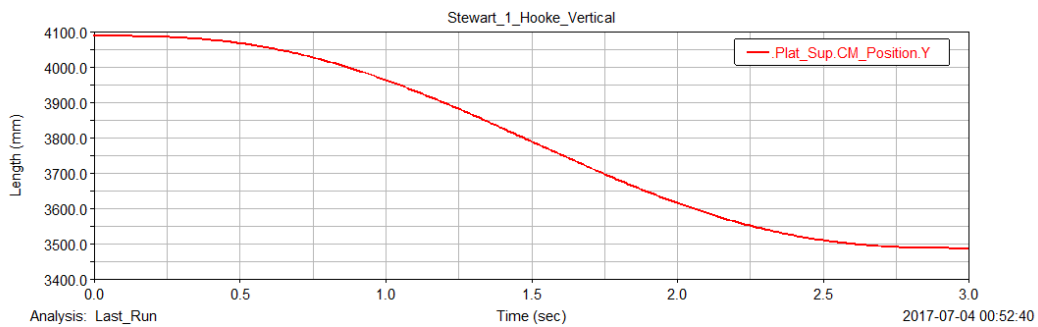


Fig.63. Desplaçament de la plataforma superior amb cinemàtica directa

- **Plataforma Stewart_2**

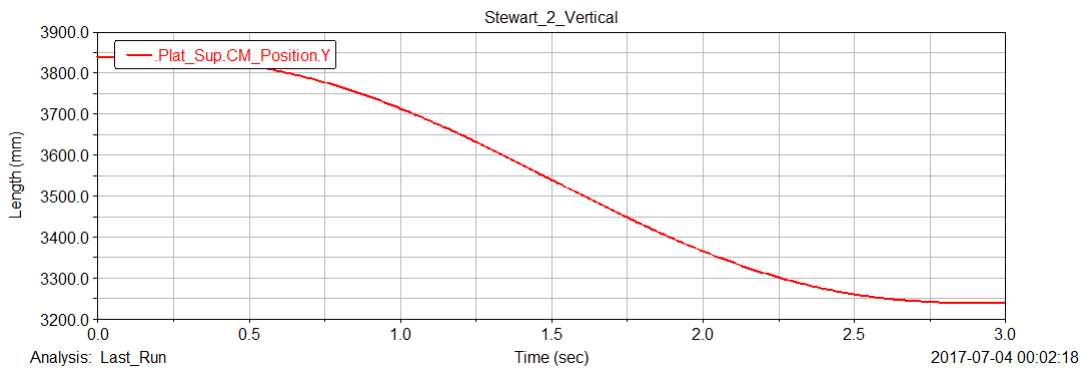


Fig.64. Desplaçament de la plataforma superior amb cinemàtica indirecta

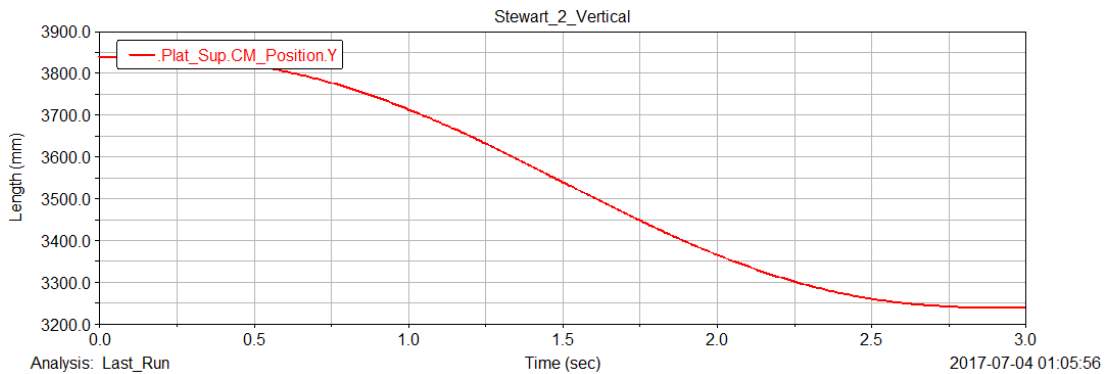


Fig.65. Desplaçament de la plataforma superior amb cinemàtica directa

- **Plataforma Stewart_3**

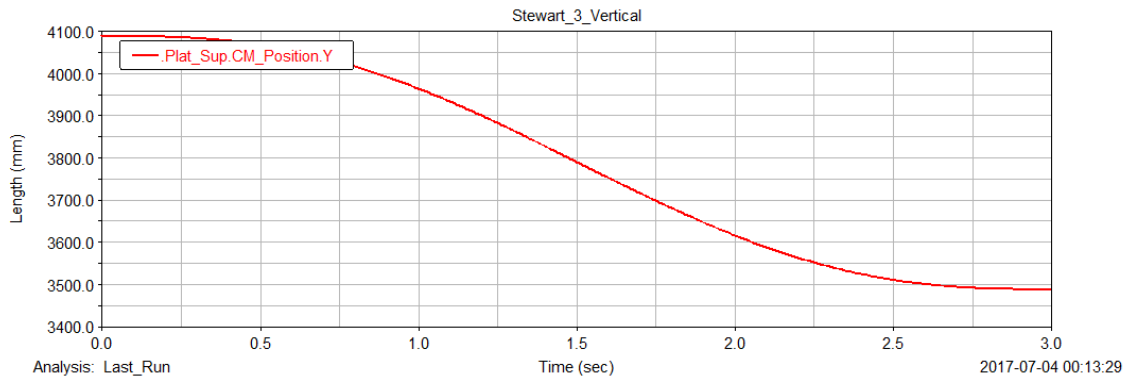


Fig.66. Desplaçament de la plataforma superior amb cinemàtica indirecta

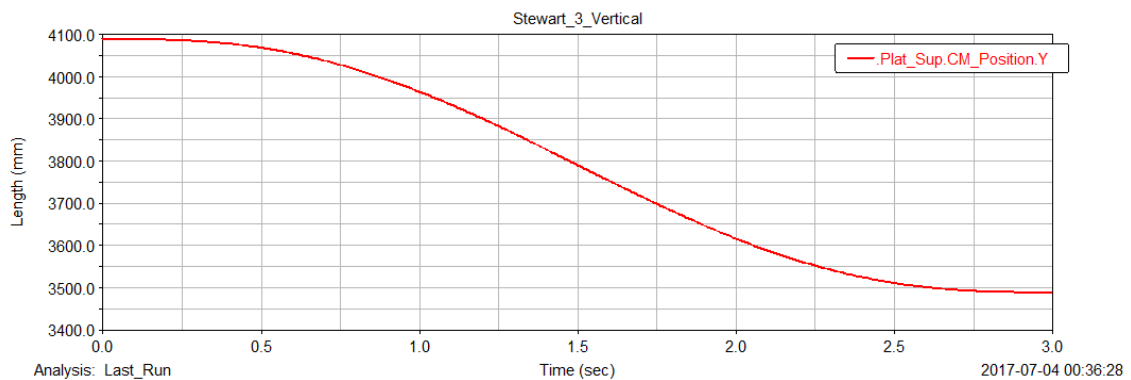


Fig.67. Desplaçament de la plataforma superior amb cinemàtica directa

El primer que s'analitza és que el moviment de la plataforma superior siga idèntic al realitzat amb la cinemàtica indirecta, tal i com es pot observar en les gràfiques anteriors. Les diferències entre els resultats de la cinemàtica indirecta i la cinemàtica directa són inexistents. Açò indica que el procés de passar d'una al altra ha sigut realitzat amb èxit, ja que l'objectiu és que els moviments del efector no estiguin afectats pels canvis de sistema.

A continuació, es trauen i analitzen les gràfiques de les forces que s'obtenen en els pistons per a poder passar de la cinemàtica directa a la dinàmica directa, que és l'últim pas per a acabar les comprovacions de que el muntatge està correcte.

- **Plataforma Stewart_1**

En aquesta ocasió no s'han adjuntat les gràfiques, ja que els resultats que mostraven no eren coherents, pel que es pot deduir que aquesta plataforma amb aquesta configuració pot donar problemes quan es facin les altres simulacions amb altres tipus de moviments.

- **Plataforma Stewart_2**

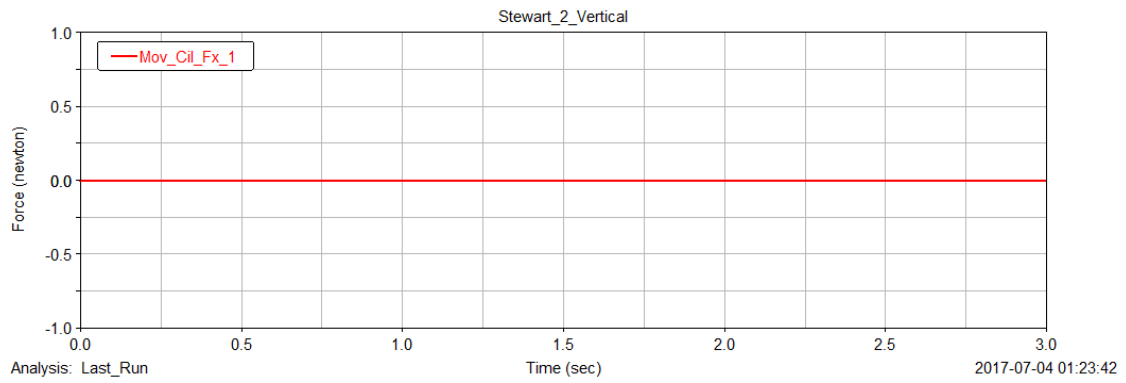


Fig.68. Força X local del pistó 1

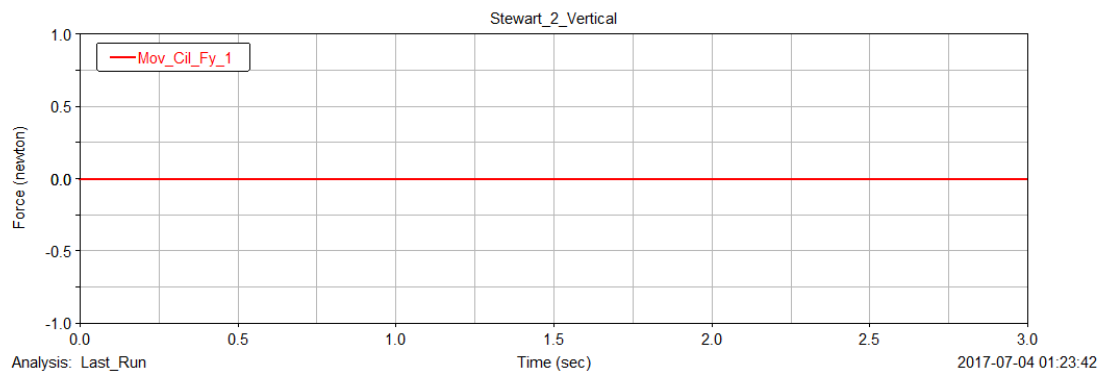


Fig.69. Força Y local del pistó 1

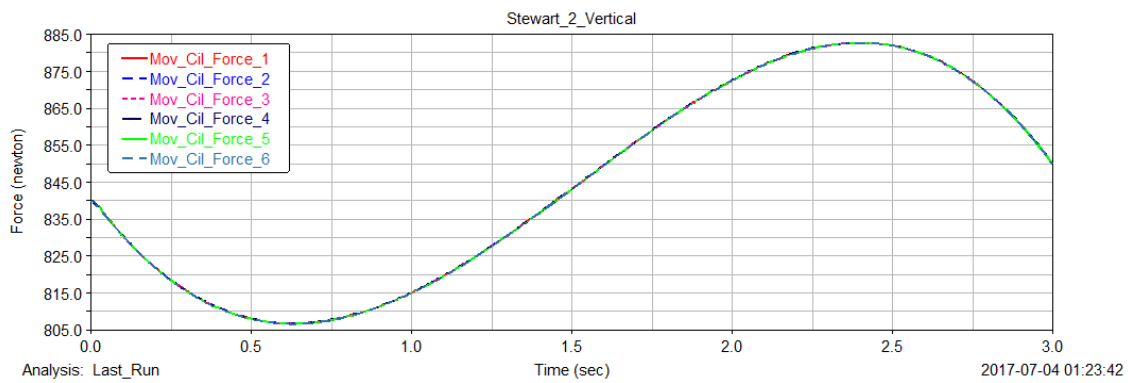


Fig.70. Forces Z locals dels pistons

- **Plataforma Stewart_3**

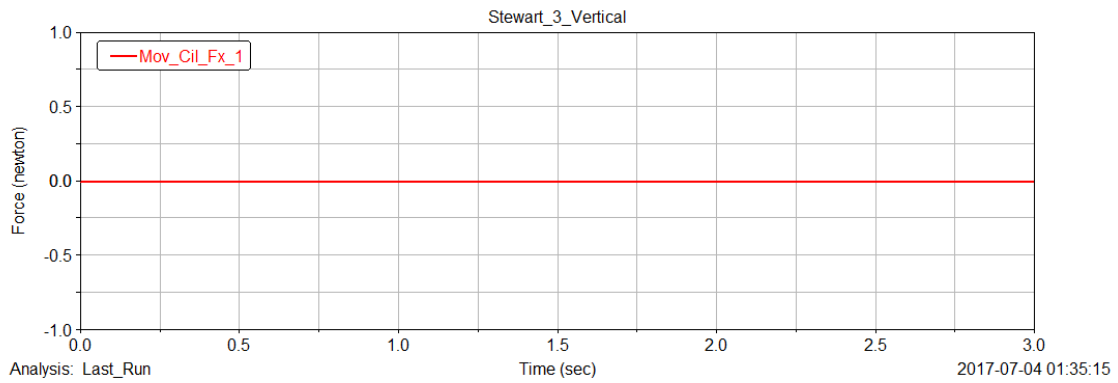


Fig.71. Força X del pistó 1

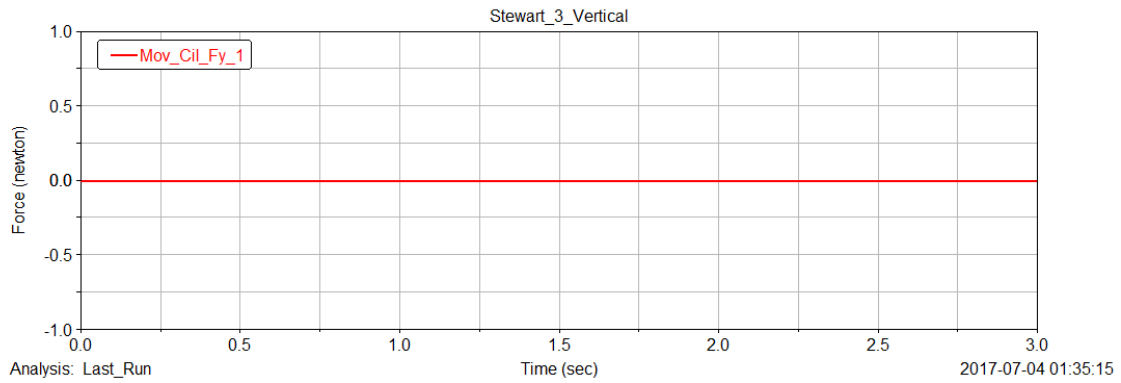


Fig.72. Força Y del pistó 1

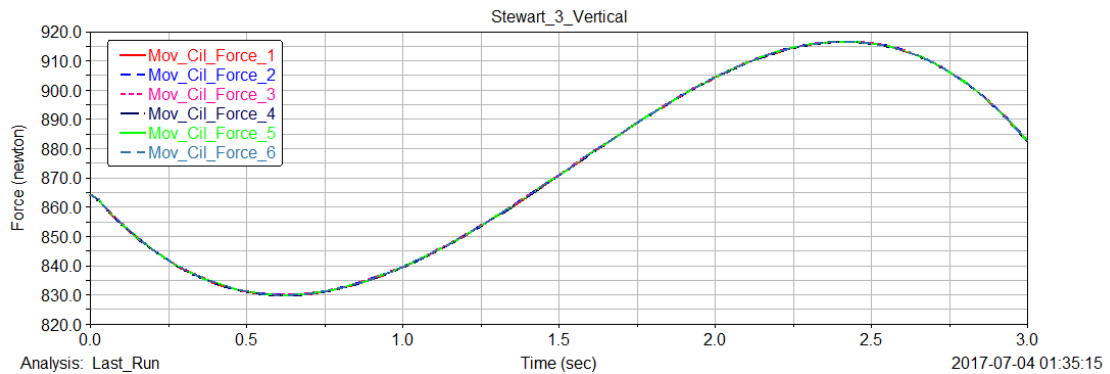


Fig.73. Forces Z locals dels pistons

Com es pot apreciar en les gràfiques, la força que realitza cadascun dels pistons d'una mateixa plataforma és igual a la de la resta de pistons (en aquest moviment). Tal i com s'observa, la força dels pistons es realitza en l'eix Z local de cadascun, mentre que en els eixos X i Y locals la força és 0. Açò és lògic, ja que els tipus de moviment que pot realitzar un pistó és de translació, és a dir, un parell prismàtic. Aquest tipus de parell només permet la translació en una sola direcció (eix Z local), el que quadra amb el que es mostra en les gràfiques.

Una altra cosa interessant d'analitzar és el valor de les forces que es mostren en les gràfiques dels eixos Z locals. En cada plataforma el valor de la força que fan els pistons és diferent, açò es deu al angle d'inclinació que té cada pistó amb el plànol horitzontal, ja que a pesar de que els pistons d'una mateixa plataforma tenen el mateix angle respecte l'horitzontal, aquesta mida no es manté entre els pistons de dues plataformes diferents, degut a les dimensions i a la configuració.

6.1.3 DINÀMICA DIRECTA

Seguidament, després de traure les gràfiques de les forces dels pistons, es procedeix a produir el moviment amb elles. El primer que hi ha que explicar és que s'utilitza la mateixa funció "spline" que per als moviments, ja que s'utilitza el mateix sistema que avanç.

- **Plataforma Stewart_1**

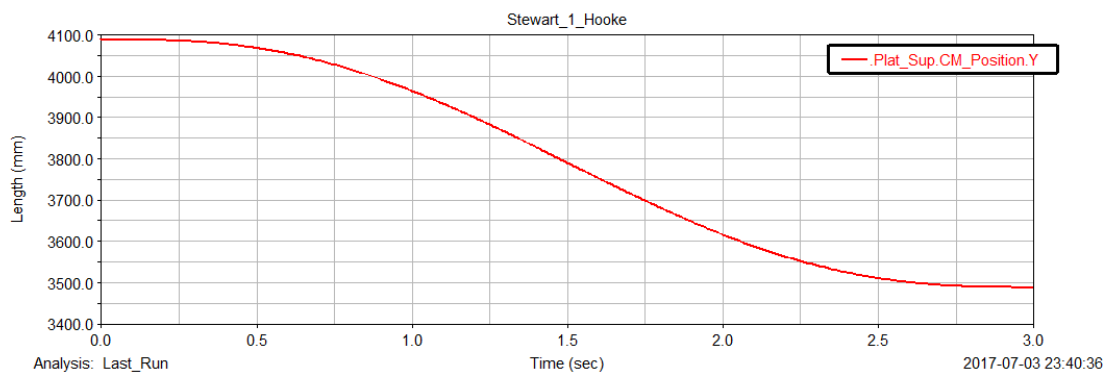


Fig.74. Desplaçament de la plataforma superior amb cinemàtica indirecta

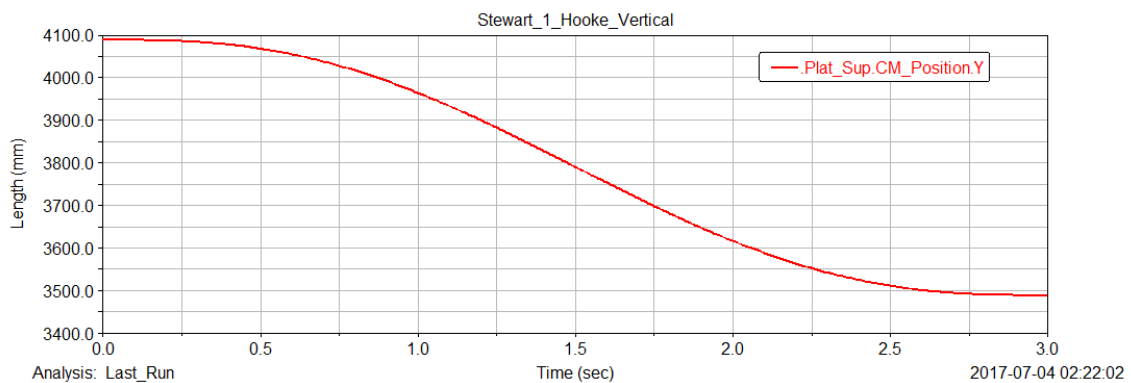


Fig.75. Desplaçament de la plataforma superior amb dinàmica directa

- **Plataforma Stewart_2**

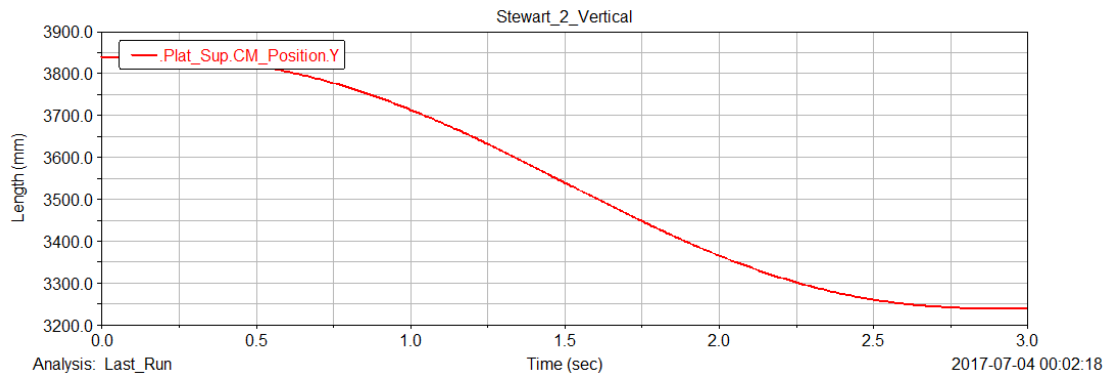


Fig.76. Desplaçament de la plataforma superior amb cinemàtica indirecta

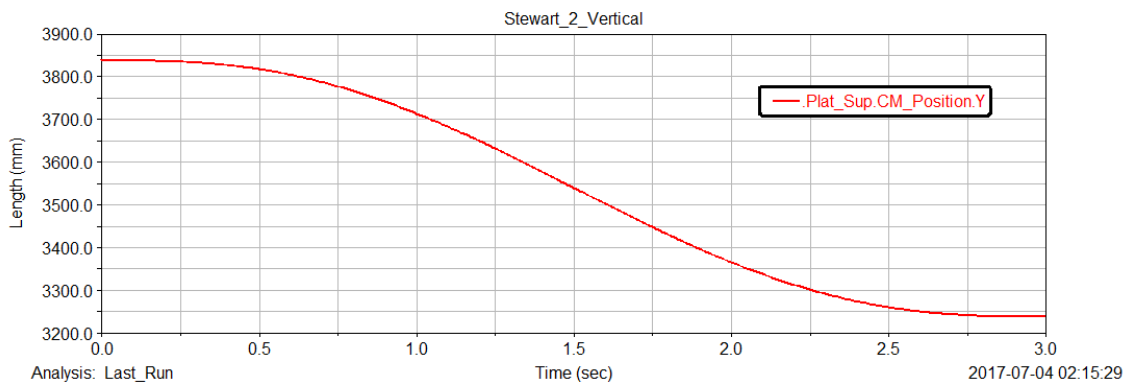


Fig.77. Desplaçament de la plataforma superior amb dinàmica directa

- **Plataforma Stewart_3**

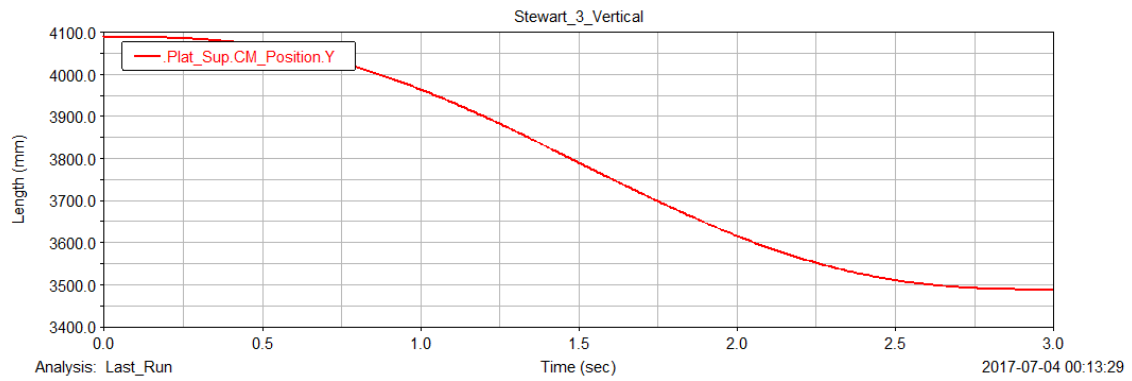


Fig.78. Desplaçament de la plataforma superior amb cinemàtica indirecta

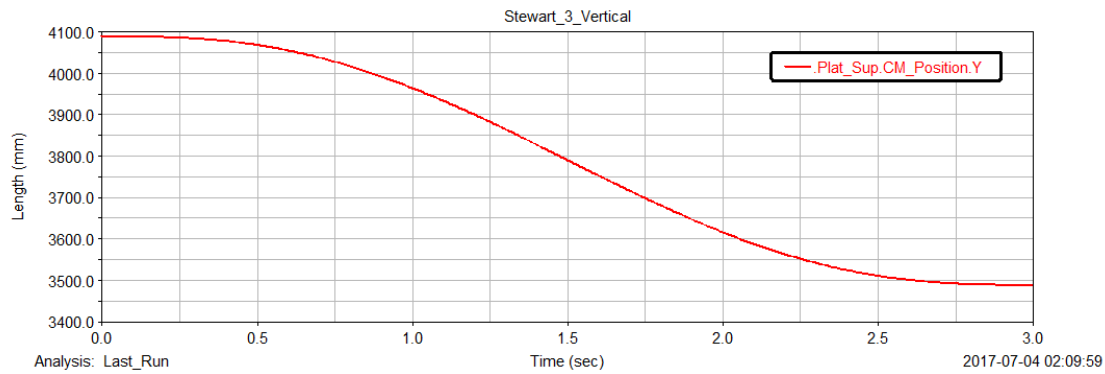


Fig.79. Desplaçament de la plataforma superior amb dinàmica directa

Com es pot apreciar en les gràfiques de les 3 plataformes, el desplaçament de la plataforma mòbil és exactament idèntic que al que s’obtenia amb la programació sobre el desplaçament del efector (cinemàtica indirecta). Amb aquesta comprovació es demostra que totes les unions, peces i distàncies de les plataformes estan correctes, i a més, que es pot passar de cinemàtica indirecta a dinàmica directa i un possible sistema per a fer-ho amb Adams View.

6.2 CÀLCUL DE LES FORCES

Un altra comprovació que hi ha que fer és sobre la magnitud de les forces que es mostren en les gràfiques. En aquest apartat es corrobora que les forces que s’han mostrat en les gràfiques anteriors són lògiques.

Per a dur a terme aquesta comprovació, es programa un moviment en el qual la plataforma mòbil estiga estàtica durant 3 segons, per a poder veure la força que fan els actuadors (pistons hidràulics) per a aguantar el pes d’aquesta.

- **Plataforma Stewart_1**

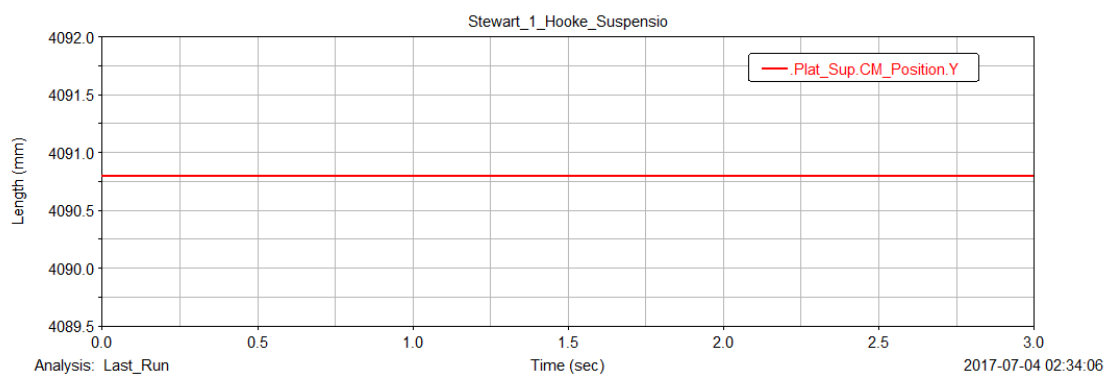


Fig.80. Desplaçament plataforma superior en l’eix Y

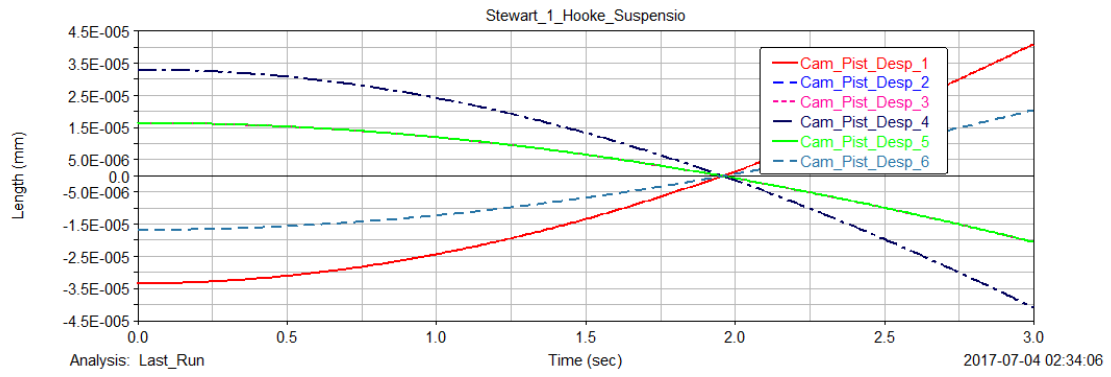


Fig.81. Desplaçaments dels pistons

● **Plataforma Stewart_2**

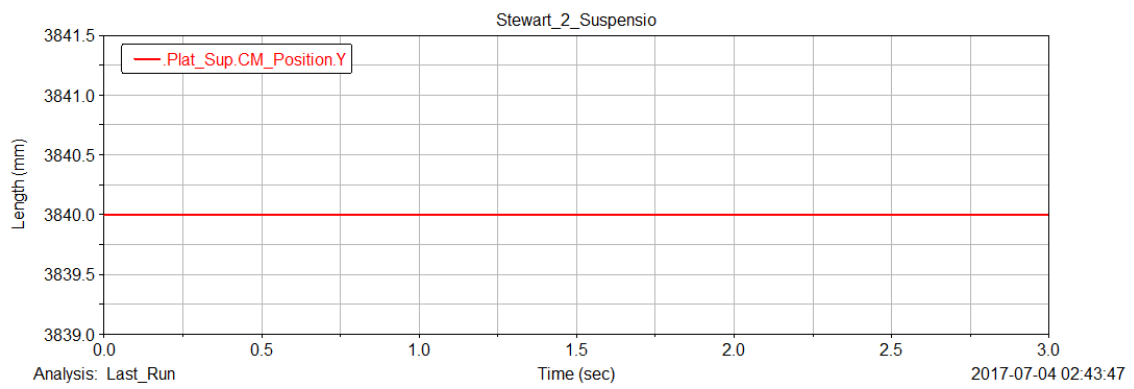


Fig.82. Desplaçament plataforma superior en l'eix Y

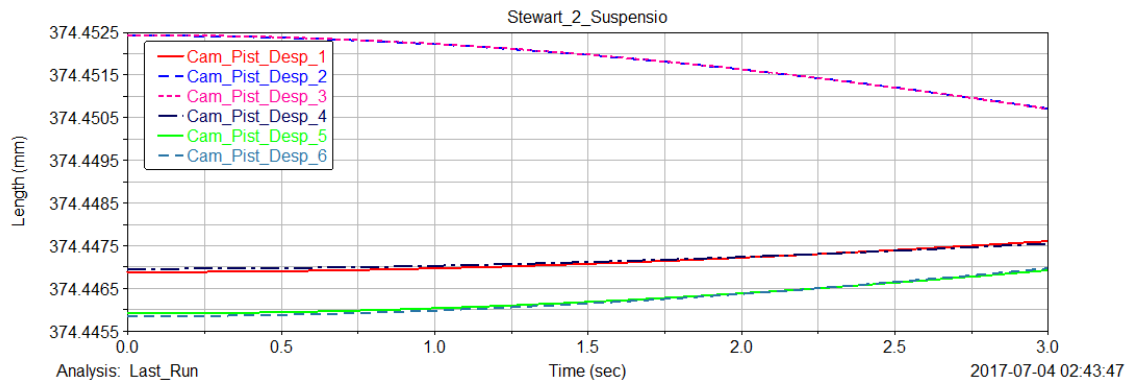


Fig.83. Desplaçaments dels pistons

- **Plataforma Stewart_3**

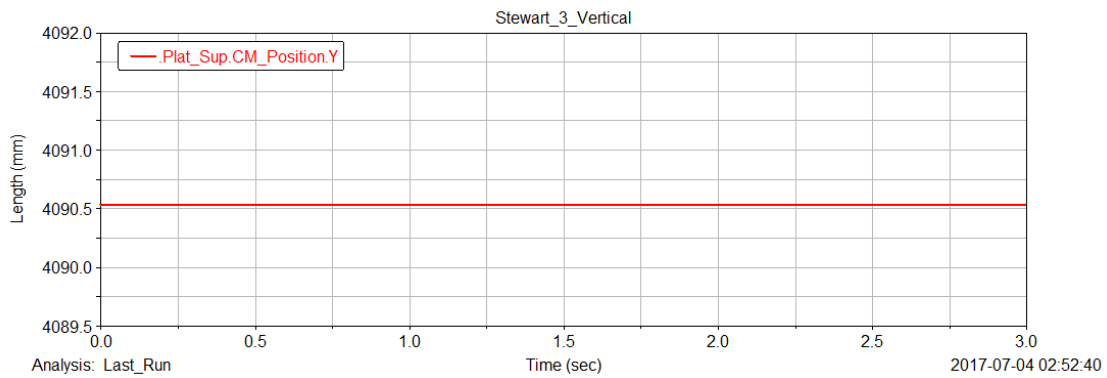


Fig.84. Desplaçament plataforma superior en l'eix Y

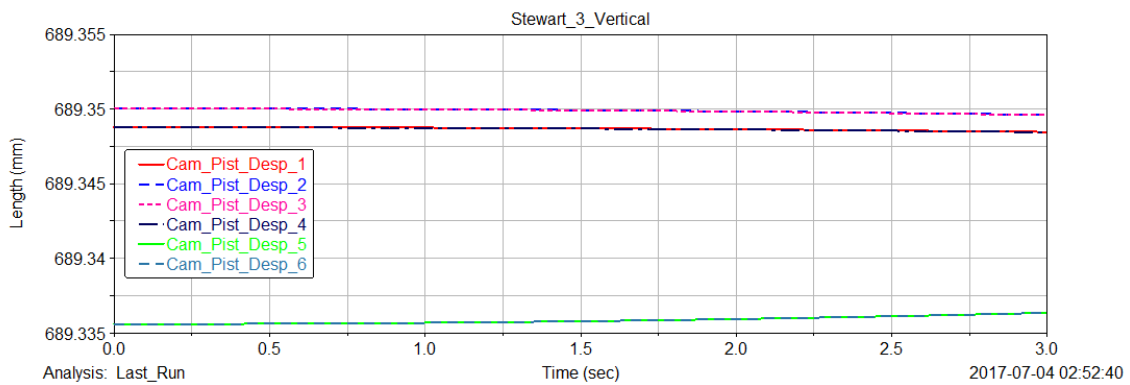


Fig.85. Desplaçaments dels pistons

Observant les gràfiques es veu com la plataforma superior es manté en la mateixa altura durant tota la simulació (en els tres cassos). Però si s'observen els pistons es pot veure com aquests varien. Si es presta atenció a les escales de les gràfiques dels pistons, es pot apreciar que la diferència entre elles és molt menuda comparada amb el desplaçament i amb les dimensions de la plataforma, per aquest motiu els desplaçaments dels pistons es poden considerar inapreciables.

A continuació s'utilitzen les gràfiques de les forces dels pistons, però en els eixos X, Y i Z globals. Açò es fa per a comprovar que la força total que apliquen els actuadors, en aquest cas pistons hidràulics, siga coherent i equilibrada.

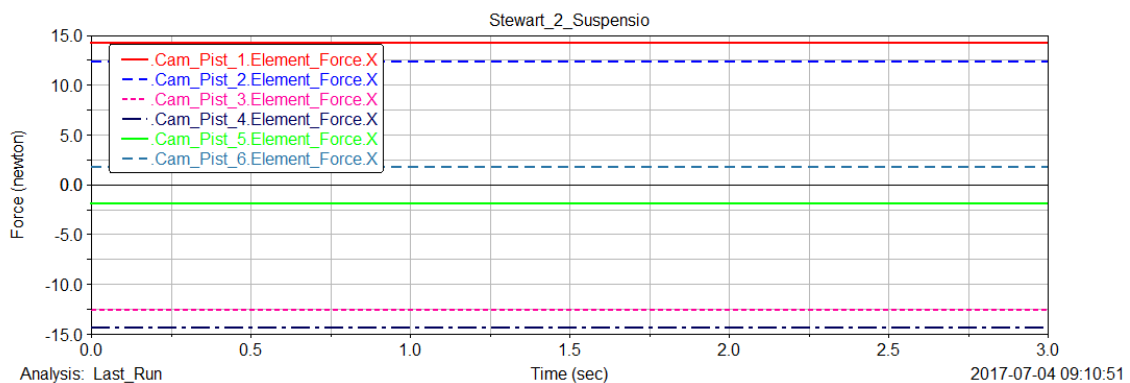


Fig.86. Forces dels pistons en l'eix X

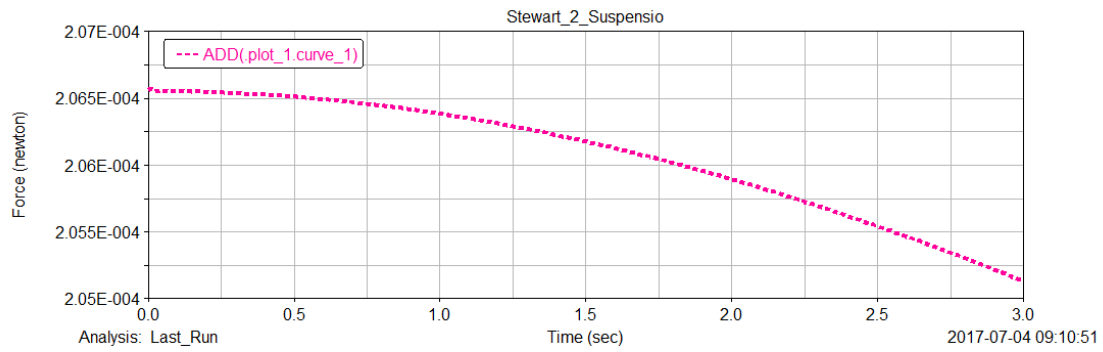


Fig.87. Forces en X sumades

Si s'observa detingudament, es pot veure com en la primera gràfica d'aquesta part es mostren les forces que genera cada pistó en l'eix X global. Sabent que el moviment en aquest eix és inexistent, es pot dir que el sumatori de forces deuria ser 0. Si s'analiza la segona gràfica es pot apreciar com la suma de les forces en l'eix X dels sis pistons és pràcticament 0.

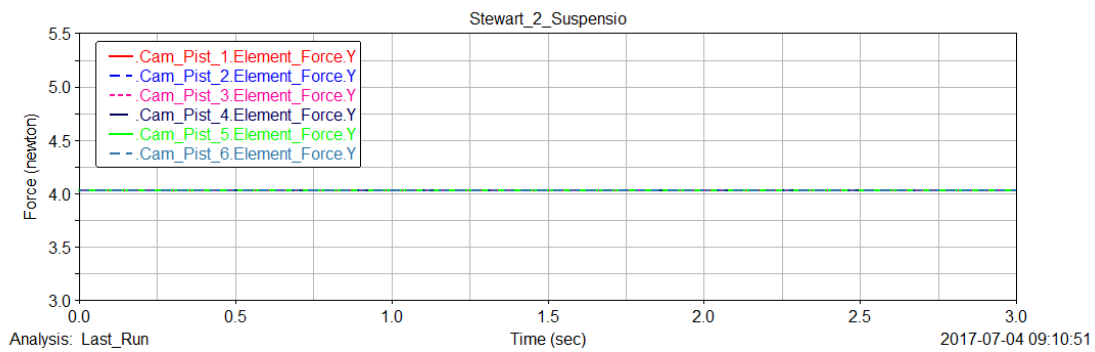


Fig.88. Forces dels pistons en l'eix Y

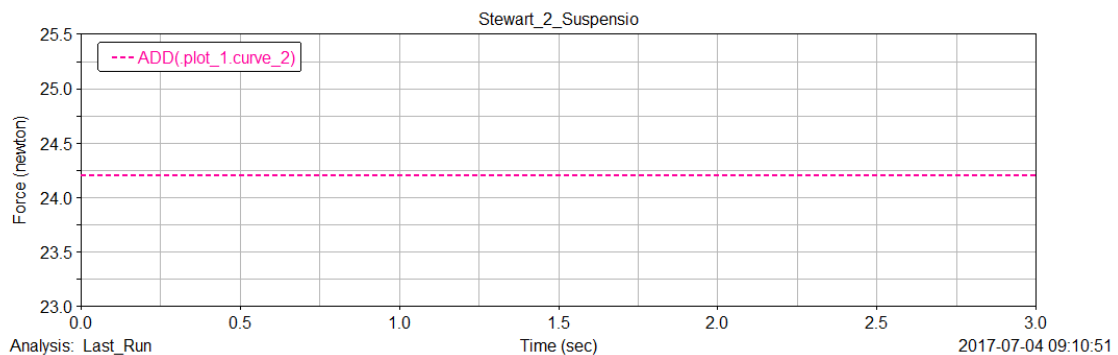


Fig.89. Forces en Y sumades

En aquest eix (eix Y global) tots els pistons realitzen la mateixa força cap amunt, açò passa perquè la distribució dels pistons és exactament igual per a tots i perquè el moviment definit obliga a que tots facin la mateixa força en aquesta direcció, sinó estaria malament.

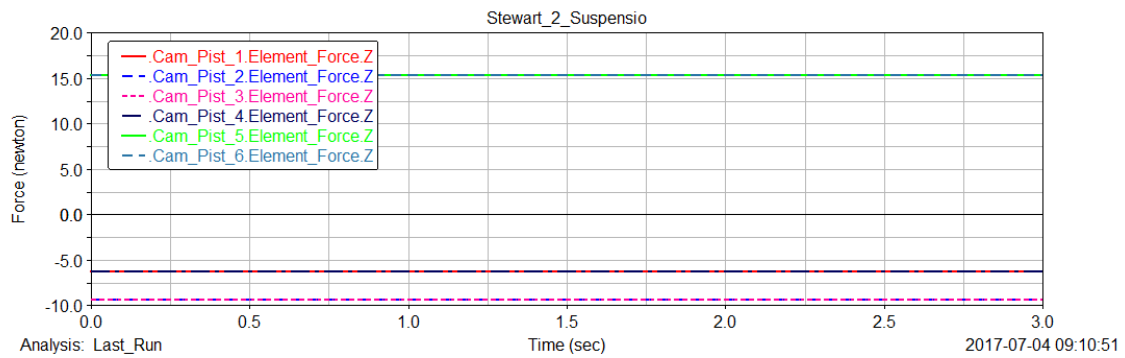


Fig.90. Forces dels pistons en l'eix Z

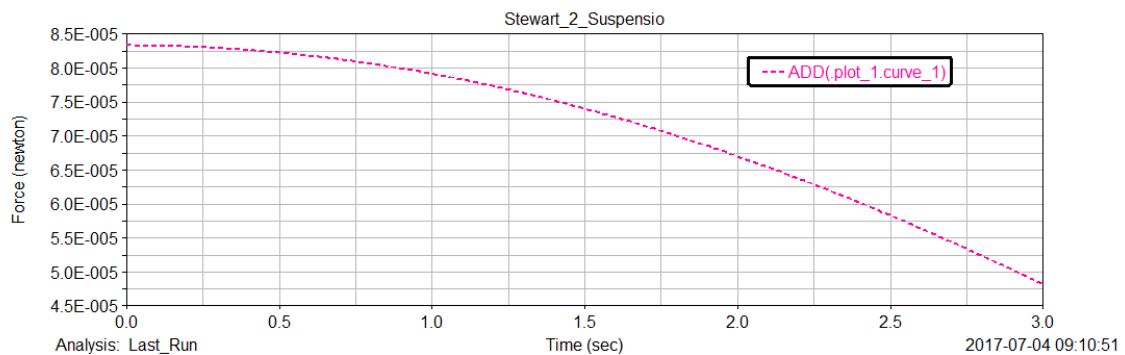


Fig.91. Forces en Z sumades

Ací torna a apareixer el mateix que en el cas de l'eix X. Es poden veure en una gràfica com les forces dels pistons en aquest eix són diferents, mentre que en l'altra gràfica es pot observar com la suma de totes elles al llarg del temps és pràcticament nul·la.

Per a acabar la comprovació de les forces es necessari verificar que els valor són coherents, és a dir, que si els valors que mostren les gràfiques són realment similars als que s'obtindrien mitjançant càlculs. Aquests càlculs consisteixen en sumar el pes de totes les peces de la plataforma Stewart i comprovar que és el mateix valor o molt similar al que apareix en l'eix Y global, ja que la gravetat actua en aquesta direcció.

Massa plataforma superior = 200.0 Kg

*Massa pistó = 50.0 Kg → Massa pistons = Massa pistó * 6 = 300.0 Kg*

Massa total = Massa plataforma + Massa pistons = 500.0 Kg

*Pes total = Massa total * g = 500.0 * 9.8 = 4900N (Newton)*

Després d'haver calculat aproximadament la força necessària per a sostenir la plataforma, es pot veure si la força aplicada pels actuadors és igual.

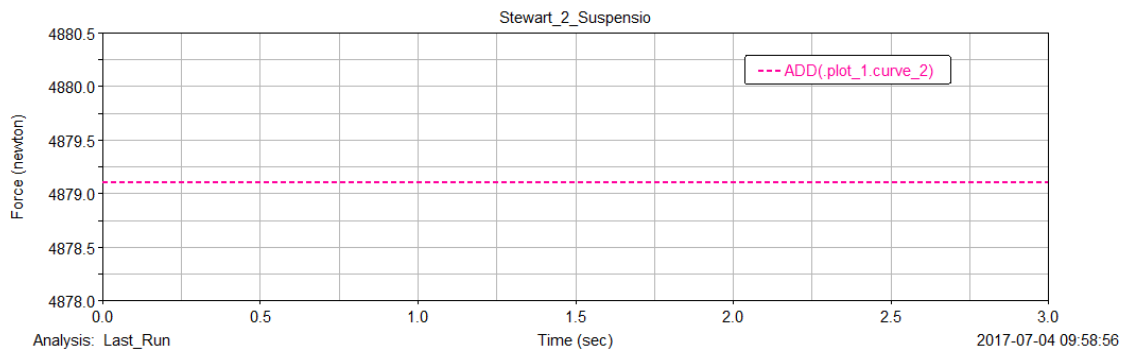


Fig.92. Forces dels actuadors en Y sumades

Com es pot apreciar, el valor que es mostra en la gràfica és molt similar, però no és exactament el mateix que el que s'ha calculat avanç. Aquest error es pot deure a les dimensions de les forces, ja que si s'analitza la distància que hi ha entre els valors d'un i altre sistema, veiem que la diferència és tan sols d'uns 20N, tenint en compte que s'està treballant en magnituds superiors als 4800N, es pot dir que l'error de càlcul és menor al 0,5 % del valor total, pel que es pot considerar pràcticament inapreciable. L'error també es pot deure a que els càlculs realitzats a mà han sigut operacions molt senzilles, en les quals s'ha aproximat el valor de la gravetat.

Aquesta comprovació s'ha realitzat amb les simulacions i les dades de la plataforma Stewart_2, ja que el sistema és exactament igual per a les altres plataformes. A més, totes les plataformes Stewart tenen els mateixos valors en quant a la massa dels elements, pel que el resultat seria el mateix. Destacar que aquest moviment de sosteniment que s'ha produït per a calcular les forces, és molt similar al fet en les comprovacions anteriors (alineació dels pistons, equidistància al centre dels parells...) i com ja s'ha mencionat anteriorment, els resultats obtinguts eren coherents.


6.3 ANÀLISI DELS RESULTATS

En realitat una plataforma Stewart no es mou només en el eix Y global, sinó que permet els moviments en tot l'espai, ja siga translació com rotació. Per aquest motiu s'han programat una sèrie de moviments, en els quals es comprova si les plataformes estan dissenyades correctament i si poden realitzar la seua funció principal.

Per a analitzar-les en igualtat, s'han programat els mateixos moviments en les tres plataformes Stewart. La programació dels moviments es mostra en la següent imatge.

6.3.1 CINEMÀTICA INDIRECTA

Name	Principal				
Moving Point	MARKER_266				
Reference Point	MARKER_267				
DoF	Type	f(time)		Disp. IC	Velo. IC
Tra X	disp(time) =	STEP5(time ,	...		
Tra Y	disp(time) =	STEP5(time ,	...		
Tra Z	disp(time) =	STEP5(time ,	...		
Rot X	disp(time) =	STEP5(time ,	...		
Rot Y	disp(time) =	STEP5(time ,	...		
Rot Z	disp(time) =	STEP5(time ,	...		



OK Apply Cancel

Fig.93. Pantalla per a programar moviments

Com es pot veure en la imatge superior, s'han programat moviments en tots els graus de llibertat de l'espai, a més es pot apreciar que la funció utilitzada per a definir els moviments és la ja mencionada "Step5". El problema es que no es pot veure el que fica en cada grau de llibertat, per això, es mostra a continuació:

- **Tra X:** $STEP5(time , 3 , 0 , 5 , 400) + STEP5(time , 5 , 0 , 7 , -400)$
- **Tra Y:** $STEP5(time , 0 , 0 , 3 , -600)$
- **Tra Z:** $STEP5(time , 5 , 0 , 7 , -400) + STEP5(time , 7 , 0 , 9 , 400)$
- **Rot X':** $STEP5(time , 3 , 0d , 3.5 , -15d) + STEP5(time , 3.5 , 0d , 4.5 , 30d) + STEP5(time , 4.5 , 0d , 5 , -15d)$
- **Rot Y':** $STEP5(time , 3 , 0d , 3.5 , -15d) + STEP5(time , 3.5 , 0d , 4.5 , 30d) + STEP5(time , 4.5 , 0d , 5 , -15d)$
- **Rot Z':** $STEP5(time , 3 , 0d , 3.5 , -15d) + STEP5(time , 3.5 , 0d , 4.5 , 30d) + STEP5(time , 4.5 , 0d , 5 , -15d)$

Ara es realitzen les simulacions amb els moviments definits. El procés és exactament igual que en el cas anterior en el qual s'ha programat un moviment descendent respecte l'eix Y global per a comprovar que totes les parts i parells estigueren en el seu lloc i definits correctament. Primer es simula amb el sistema de la cinemàtica indirecta. Després, es trauen les gràfiques pertinents per a programar el moviment de cadascun dels pistons (cinemàtica directa). Finalment, s'obtenen les gràfiques de les forces dels pistons i es programa el moviment amb aquestes forces (dinàmica directa).

- **Plataforma Stewart_1**

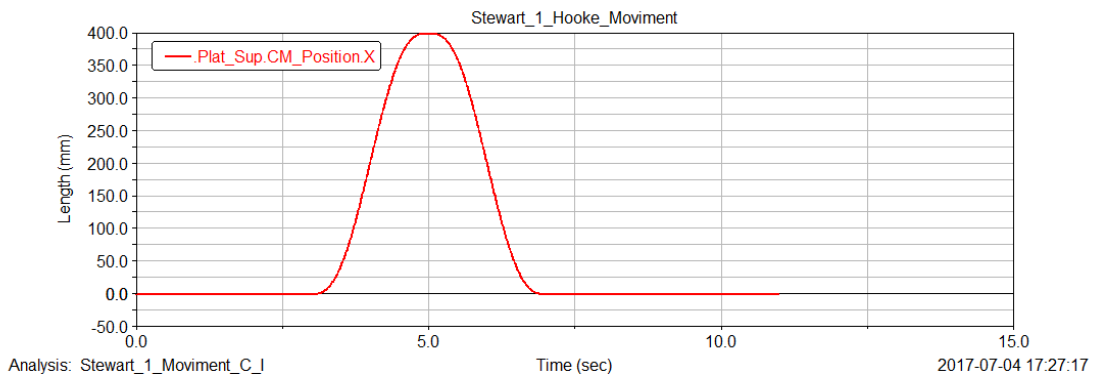


Fig.94. Desplaçament plataforma superior X

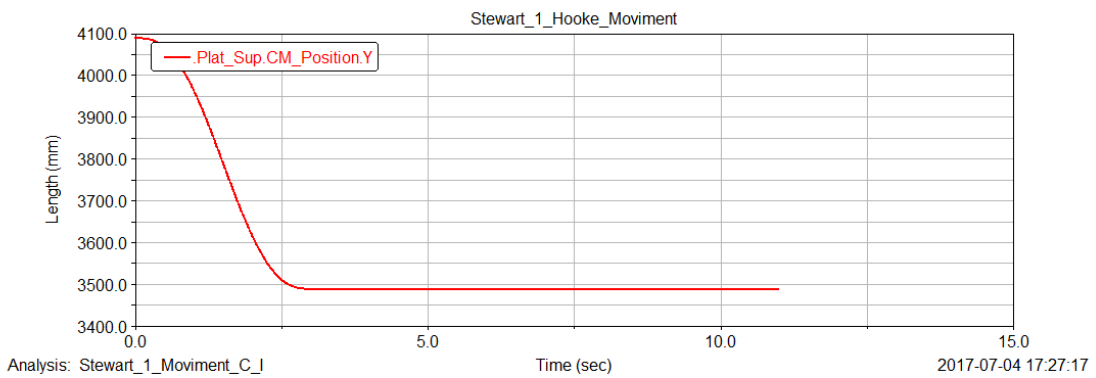


Fig.95. Desplaçament plataforma superior Y

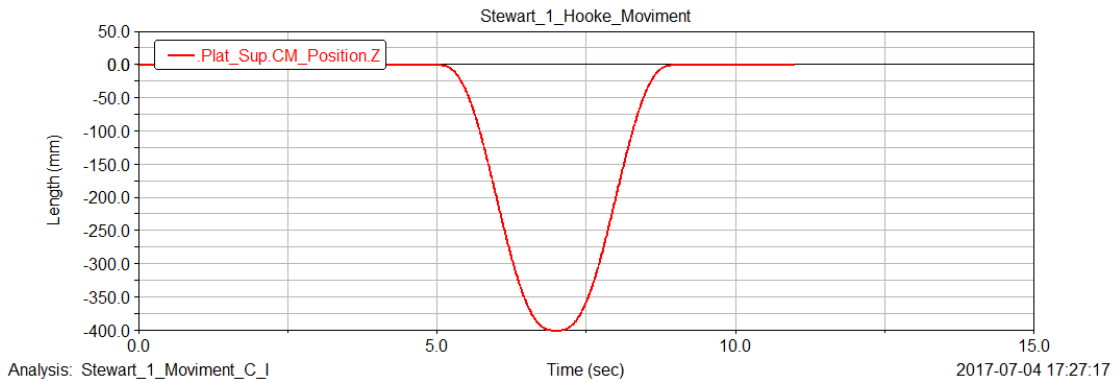


Fig.96. Desplaçament plataforma superior Z

Si observem els moviments programats i després mirem les gràfiques es pot apreciar que la plataforma mòbil, s'ha mogut a la perfecció.

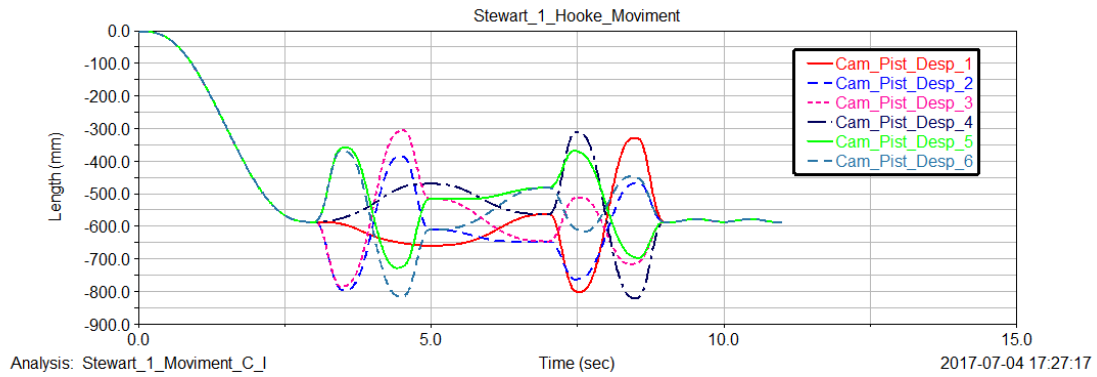


Fig.97. Desplaçaments dels pistons

En aquesta gràfica es mostren els desplaçaments dels pistons els qual són utilitzats per a moure els seus respectius pistons amb un spline. Es pot apreciar com fins al segon 3 de la simulació, el desplaçament de tots els pistons és idèntic, degut a que fins eixe instant la plataforma Stewart està realitzant el mateix moviment vertical d'avanç. A partir d'aquest moment, cadascun dels pistons es mou de forma totalment independent a la resta.

- **Plataforma Stewart_2**

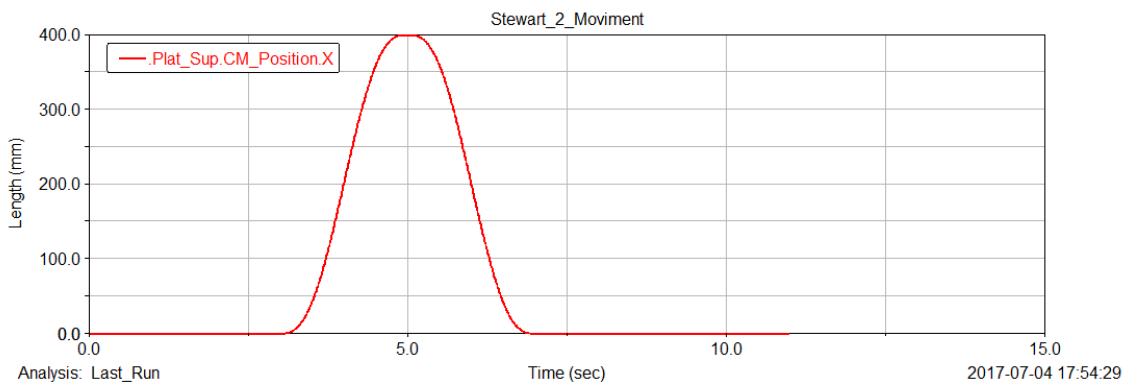


Fig.98. Desplaçament plataforma superior X

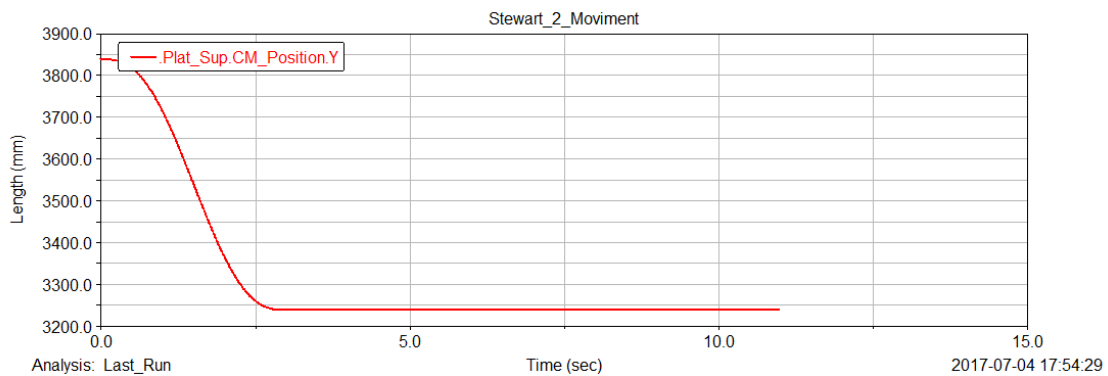


Fig.99. Desplaçament plataforma superior Y

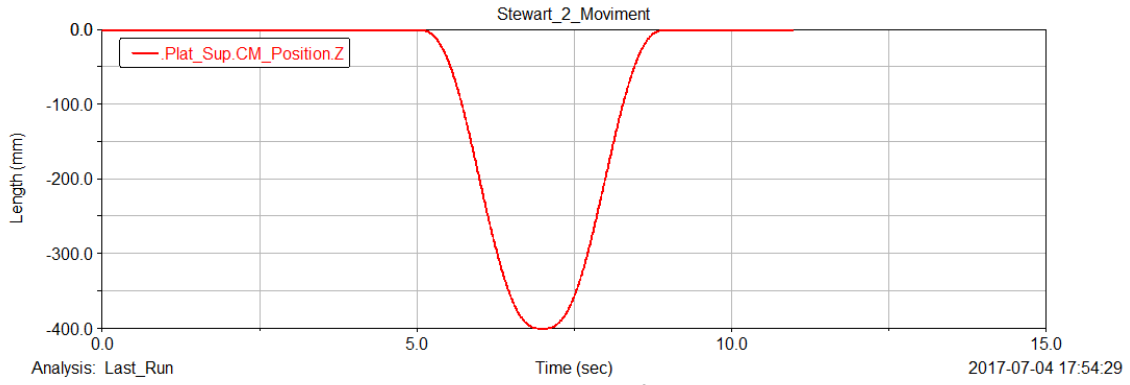


Fig.100. Desplaçament plataforma superior Z

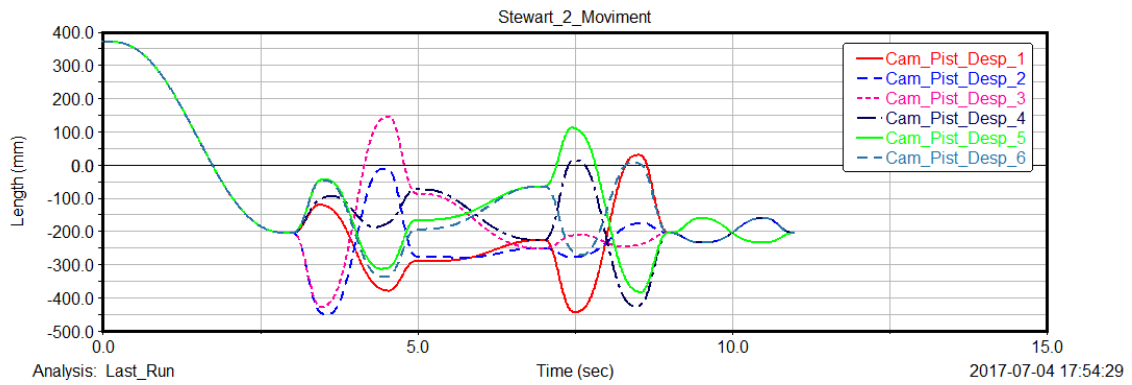


Fig.101. Desplaçaments dels pistons

- **Plataforma Stewart_3**

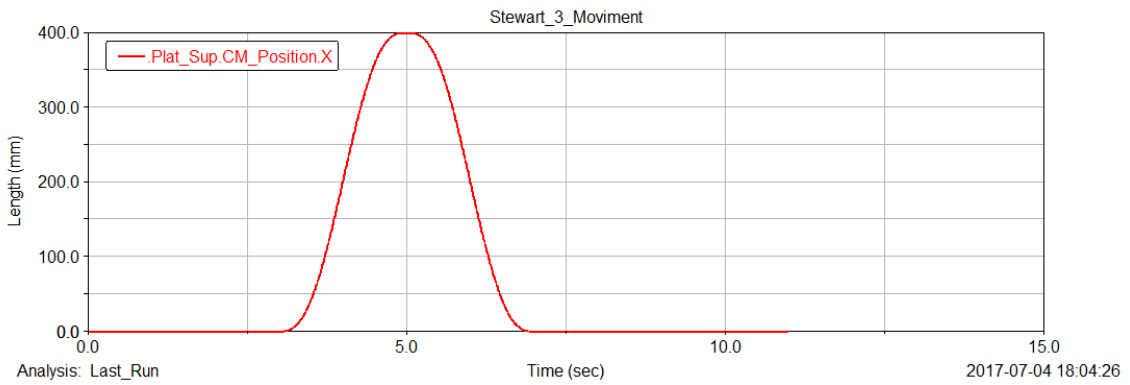


Fig.102. Desplaçament plataforma superior X

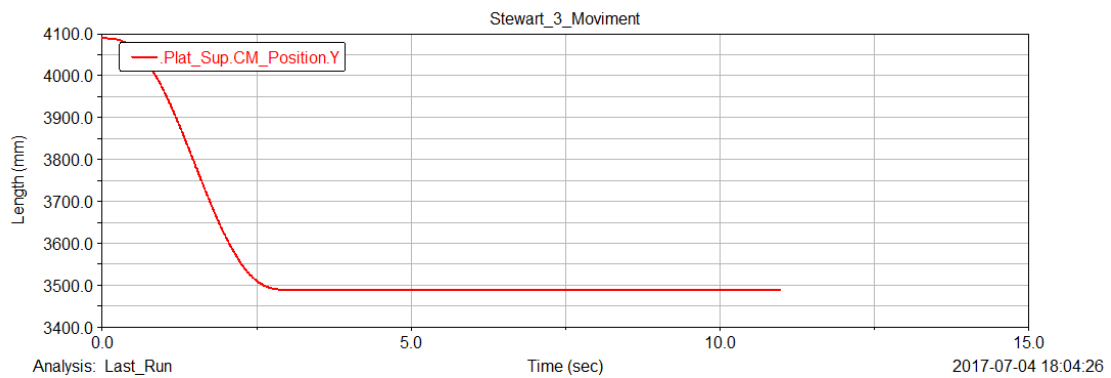


Fig.103. Desplaçament plataforma superior Y

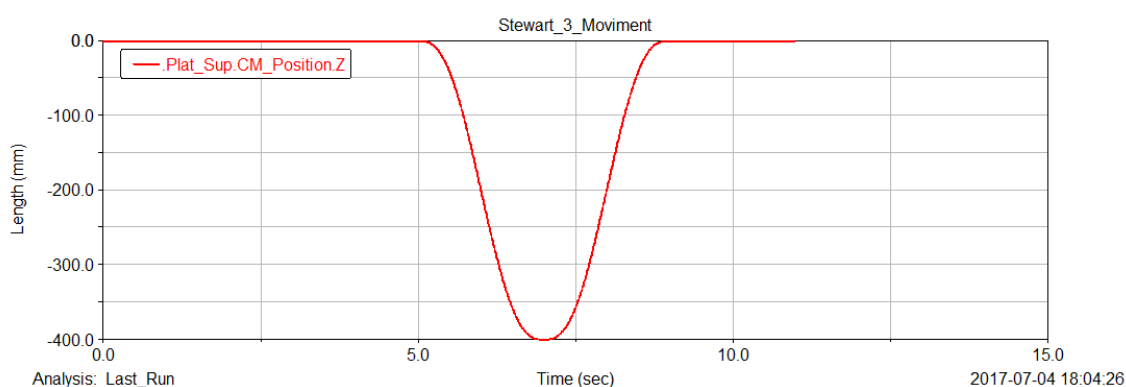


Fig.104. Desplaçament plataforma superior Z

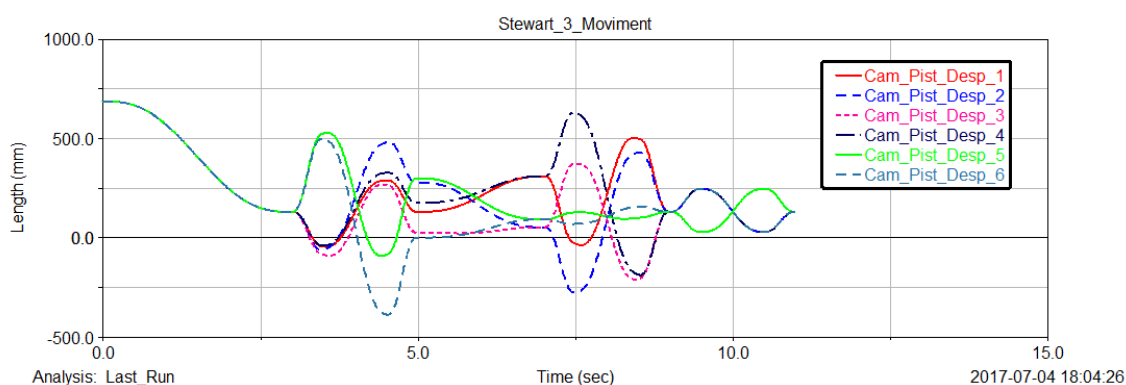


Fig.105. Desplaçaments dels pistons

Com es pot veure, el desplaçament de l'efector és igual en totes les plataformes Stewart, això vol dir que les tres plataformes realitzen a la perfecció el moviment que se'ls ha programat. A pesar de que l'escala de les gràfiques dels desplaçaments de la plataforma superior canvia entre les diferents plataformes Stewart, açò no vol dir que el moviment siga diferent, sinó que cadascuna utilitza un sistema de referència diferent.

Si s'observa detingudament l'última gràfica de cada plataforma Stewart (desplaçaments dels pistons) es pot veure com els pistons de les diferents plataformes es mouen diferent als altres, de fet no hi ha ningun pistó que es mogue igual que un altre. Aquest fet demostra que depenent de la configuració que s'utilitza, els resultats poden ser molt diferents, inclús per a un mateix moviment.

6.3.2 CINEMÀTICA DIRECTA

Una vegada acabades les simulacions de la cinemàtica indirecta, toca començar les simulacions de la cinemàtica directa amb les gràfiques dels desplaçaments dels pistons que s'han obtingut. Si els moviments dels pistons i les gràfiques són correctes, les gràfiques sobre els desplaçaments del efector (plataforma mòbil) seran idèntiques a les d'avanç.

- **Plataforma Stewart_1**

A l'intentar fer les simulacions de la cinemàtica directa d'aquesta plataforma han sorgit alguns problemes. El primer moviment, que és un moviment descendent en l'eix Y si que pot fer-lo, però en el moment que intenta dur a terme un moviment de translació en l'eix X la plataforma falla. El programa, quan passa açò, intenta donar un llistat amb possibles errors. Un d'aquests errors és una singularitat, és a dir, que l'efector del robot assoleix alguna posició per a la qual existeix més d'una combinació dels actuadors, en aquest cas dels pistons hidràulics. Aquest fet pot ser degut a la poca inclinació que presenten els pistons en aquesta configuració, ja que en alguns punts del moviment alguns pistons es troben en vertical completament, el que fa que es troben en una posició d'equilibri inestable, de la qual ixen amb l'ajuda dels altres pistons, ja que mouen la plataforma superior, la qual arrastra la punta del pistó per a que aquest es col·loqui en la seua nova posició. El principal problema és que al tindre els pistons tan poca inclinació, la major part de la força que realitzen es paral·lela a l'eix Y global, pel que la força que els queda per a moure la plataforma respecte el eix X o Z global és molt menuda e insuficient per a traure a altres pistons de posicions d'equilibri inestable.

- **Plataforma Stewart_2**

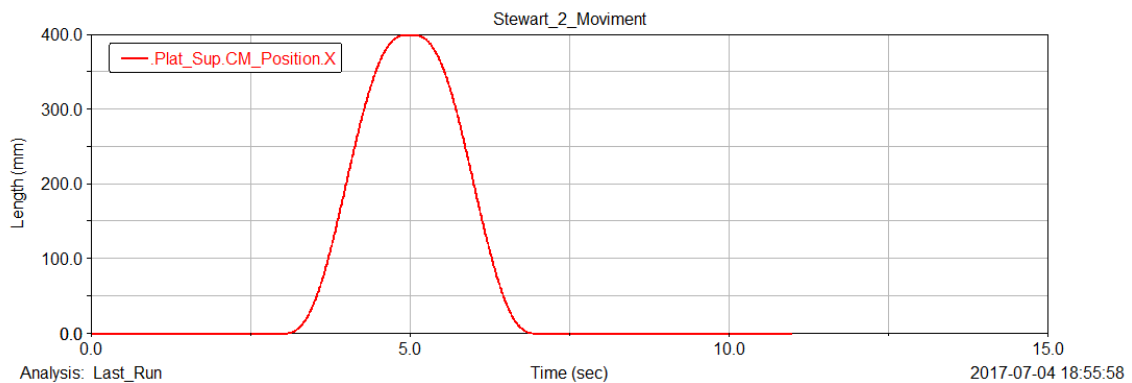


Fig.106. Desplaçament plataforma superior X

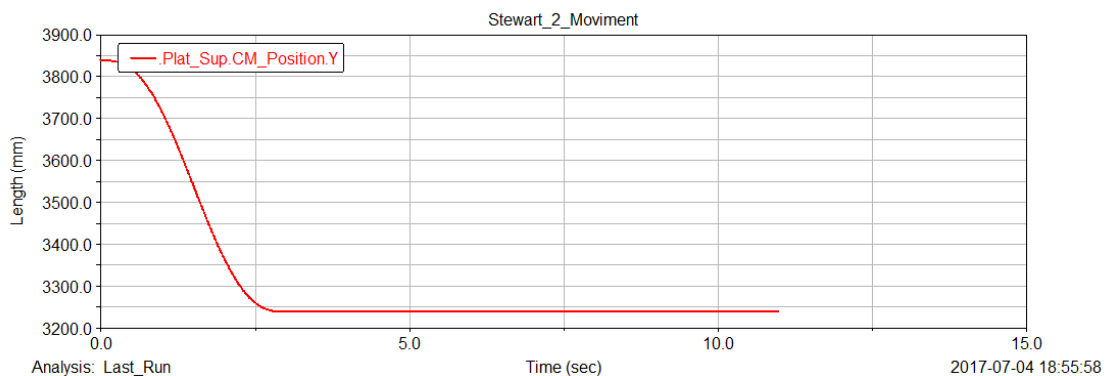


Fig.107. Desplaçament plataforma superior Y

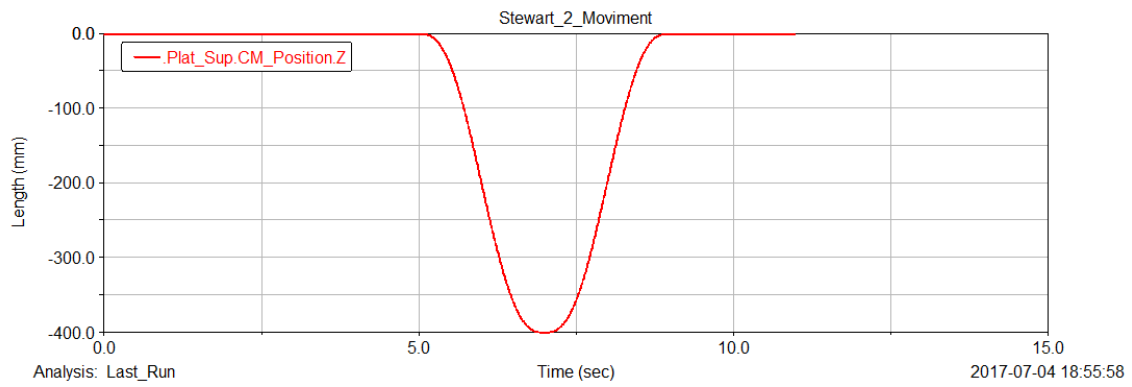


Fig.108. Desplaçament plataforma superior Z

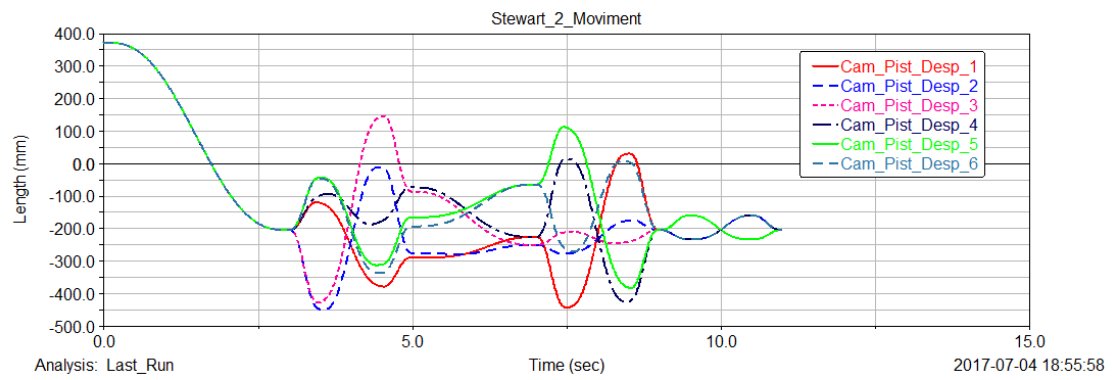


Fig.109. Desplaçaments dels pistons

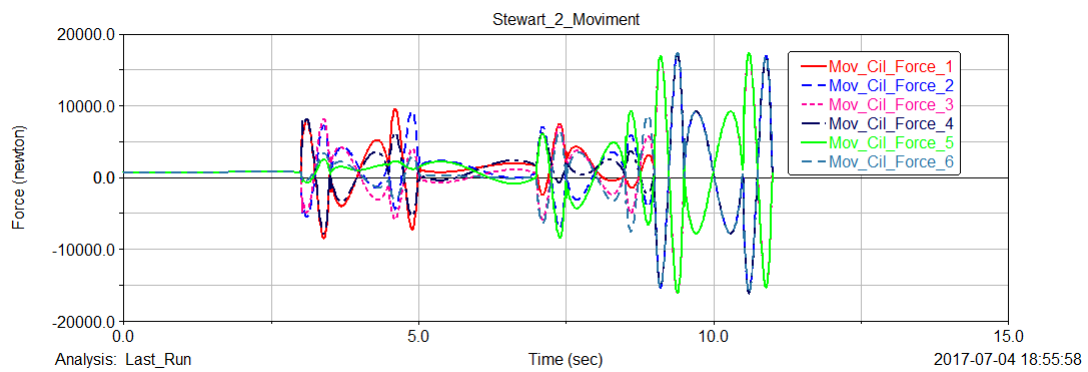


Fig.110. Forces dels pistons

- **Plataforma Stewart_3**

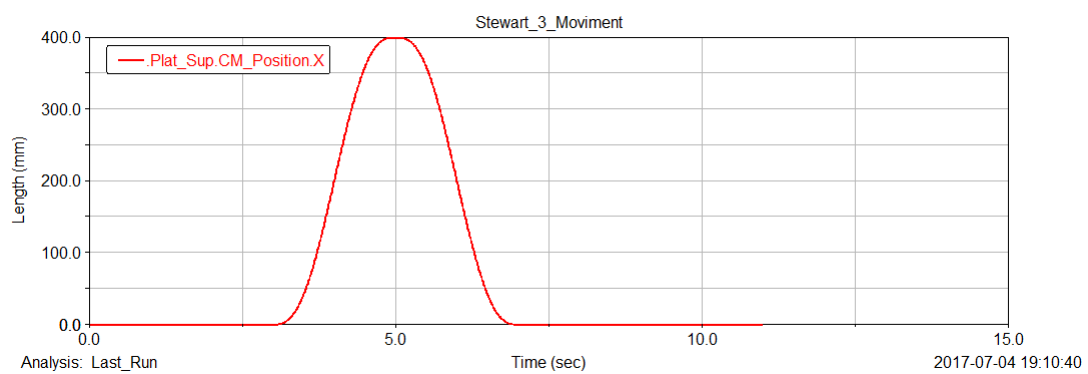


Fig.111. Desplaçament plataforma superior X

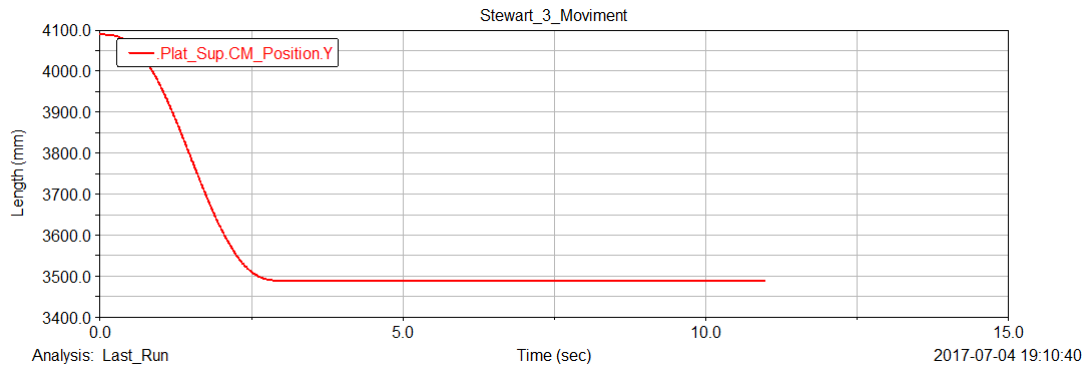


Fig.112. Desplaçament plataforma superior Y

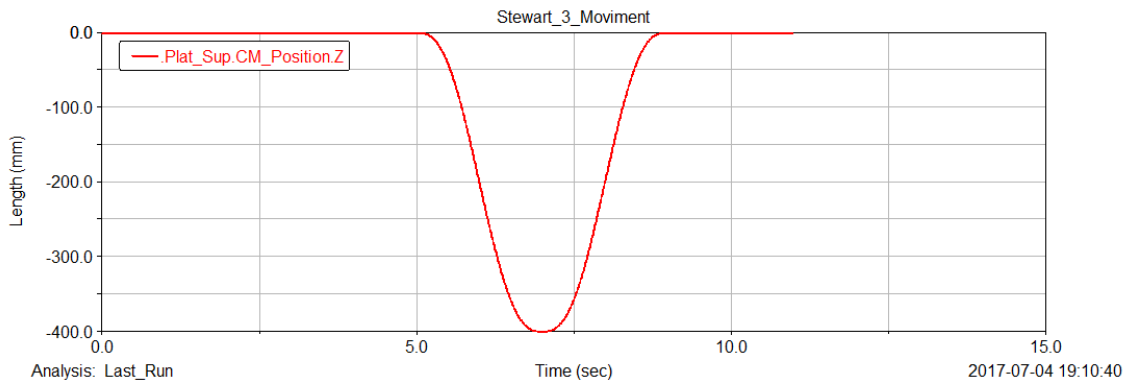


Fig.113. Desplaçament plataforma superior Z

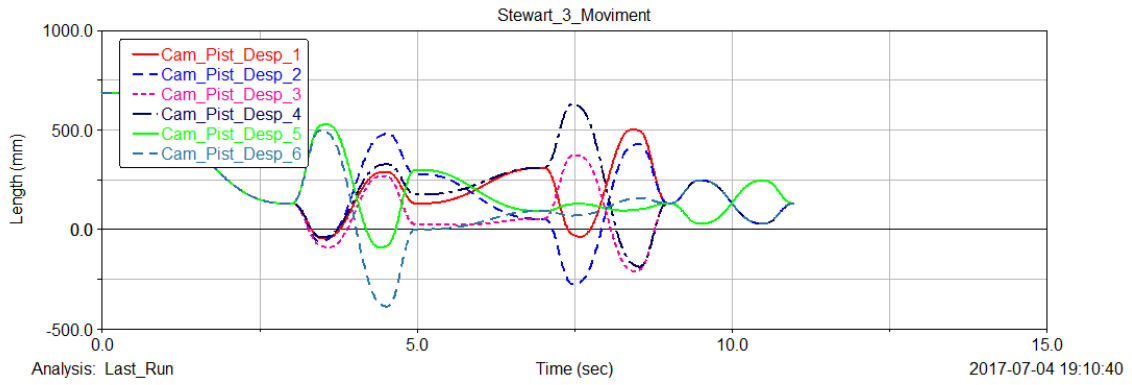


Fig.114. Desplaçaments dels pistons

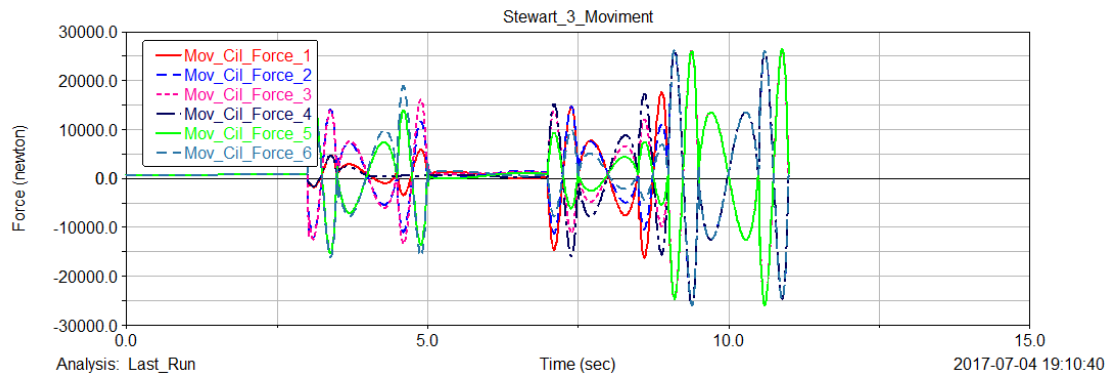


Fig.115. Forces dels pistons

En les gràfiques de les plataformes 2 i 3 es pot veure com el desplaçament de l'efector és igual al de la cinemàtica indirecta, el que indica que els desplaçaments dels pistons són els correctes. També es pot corroborar que els desplaçaments dels pistons són idèntics als anteriors, pel que es pot dir que la funció spline ha llegit les dades de les gràfiques a la perfecció.

Destacar que s'han afegit les gràfiques de les forces que fan els pistons, tant les d'una plataforma com les de l'altra, per a poder apreciar com varien en el temps i que cadascuna de les forces és diferent a les altres. Analitzant les gràfiques de les forces dels pistons (plataformes 2 i 3) es pot remarcar que la força es manté estable durant els 3 primers segons, fet ja comentat i explicat avanç. A més, les primeres parts d'ambdues gràfiques coincideixen amb les gràfiques de les forces dels pistons del moviment vertical descendent de comprovacions amb simulacions.

6.3.3 DINÀMICA DIRECTA

Per a acabar les simulacions i l'anàlisi dels resultats es procedeix a repetir les simulacions dels moviments, però aquesta vegada es programa amb les forces que exerceixen els pistons.

Com la plataforma 1 ha donat problemes, no s'ha pogut acabar la simulació de la cinemàtica directa, pel que no ha sigut possible obtenir les gràfiques de les forces dels pistons. Per aquest motiu aquesta plataforma no apareixerà en aquesta part i no serà analitzada.

- **Plataforma Stewart_2**

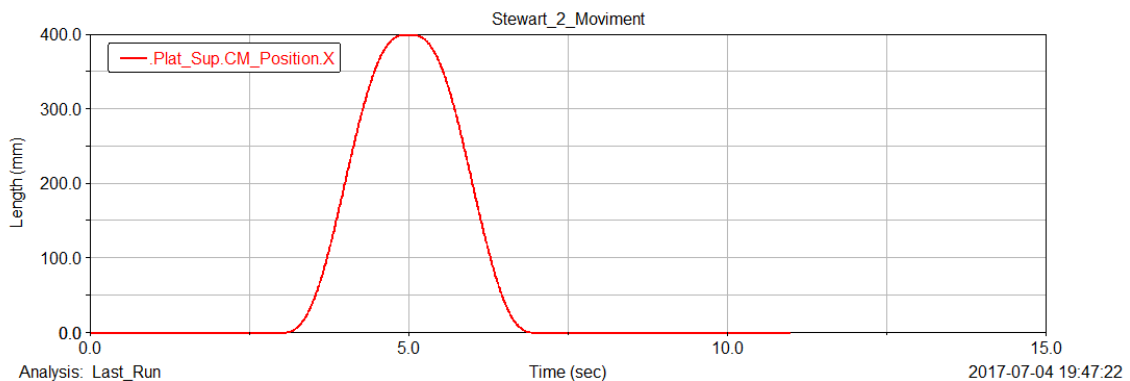


Fig.116. Desplaçament plataforma superior X

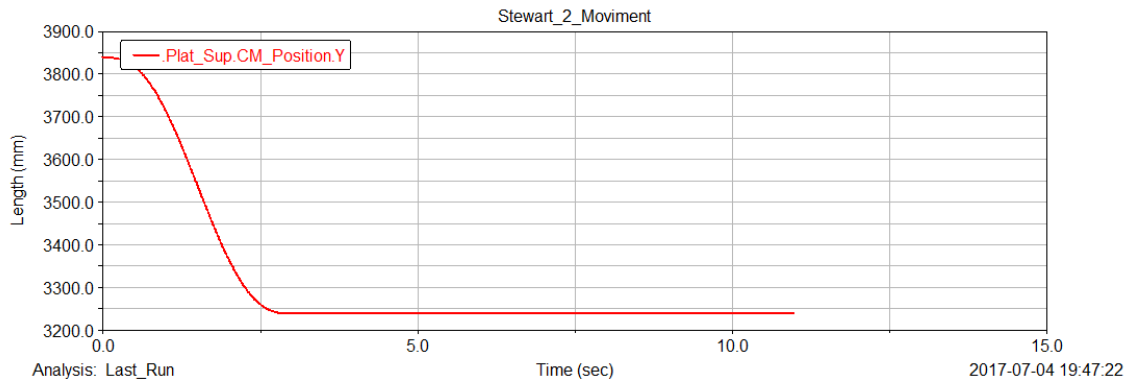


Fig.117. Desplaçament plataforma superior Y

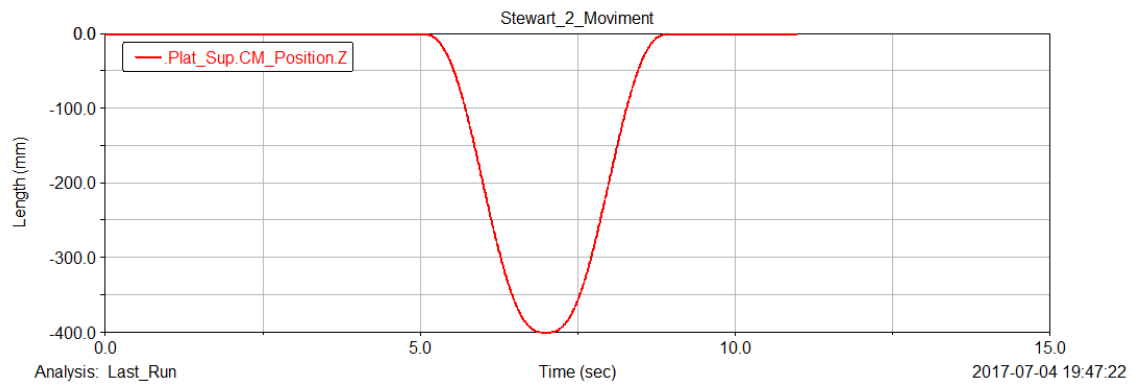


Fig.118. Desplaçament plataforma superior Z

- **Plataforma Stewart_3**

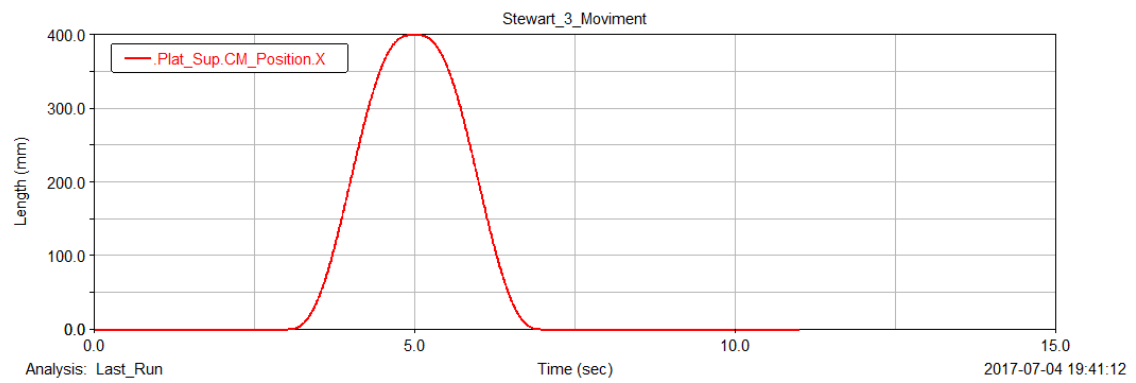


Fig.119. Desplaçament plataforma superior X

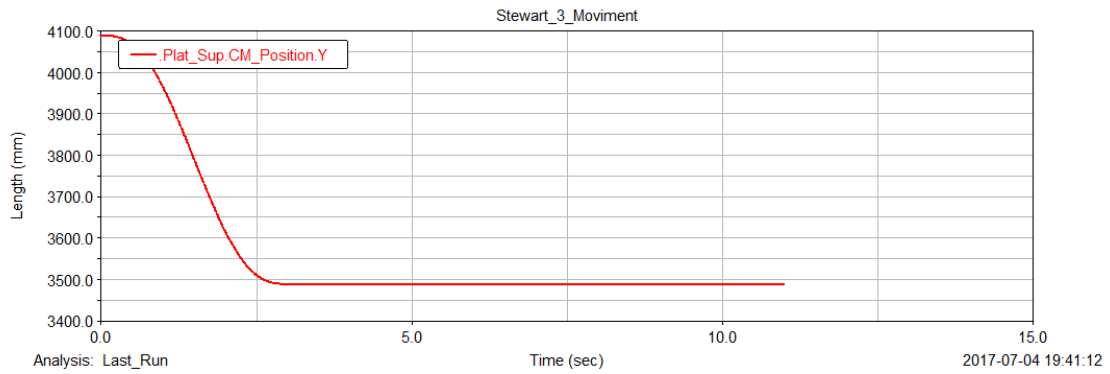


Fig.120. Desplaçament plataforma superior Y

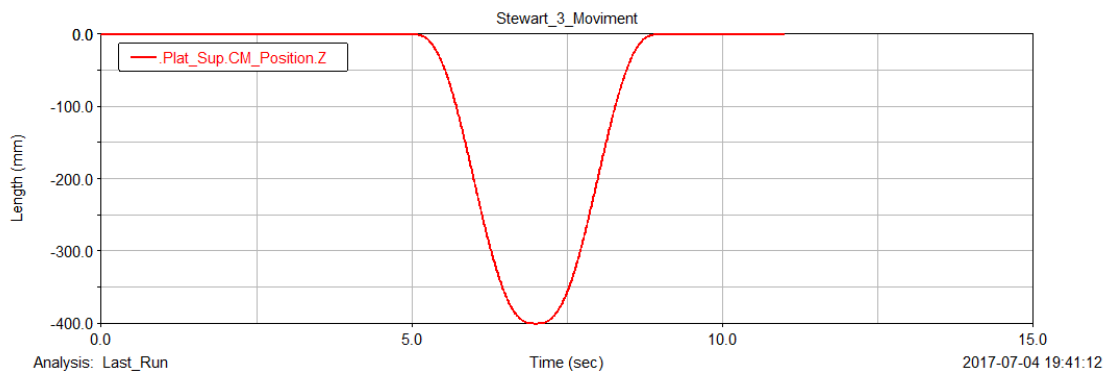


Fig.121. Desplaçament plataforma superior Z

Al comprovar les gràfiques dels desplaçaments de l'efector de les dos plataformes, es pot assegurar que els desplaçaments són exactament iguals en tots els sistemes i en les dos plataformes. Així s'assegura que amb aquest procediment es pot passar des de la programació de l'efector d'un robot paral·lel fins a les forces dels seus actuadors.

7. CONCLUSIÓ I ELECCIÓ DE LA PLATAFORMA

Després d'haver modelat, programat, simulat per diferents mètodes i analitzat els resultats pertinents es pot dir que la configuració de la plataforma és molt important, ja que, en el cas de la plataforma 1 , la seua configuració i la inclinació dels seus pistons respecte el pla horitzontal, han limitat el seu ús i l'han impossibilitat per a dur a terme la tasca programada.

Pel que fa a les altres dos plataformes, ambdues han realitzat perfectament els moviments programats i han mantingut els desplaçaments de l'efector a la perfecció, per això ambdues serien bones opcions de configuracions.

Destacar que amb aquest treball ha sigut possible demostrar que es pot relacionar la programació de moviments d'un efector amb els desplaçament o les forces que tenen que fer el seus actuadors per a repetir aquests moviments, sense l'ús de ninguna mena de mètode de càlcul com Denavit-Hartenberg, solament amb el programa Adams View.

8. PLEC DE CONDICIONS

El plec de condicions és un document que inclou instruccions, normes i especificacions que deuen complir els diferents participants e instruments que realitzen o s'utilitzen en un projecte.

En aquest projecte, al tractar-se d'un treball d'anàlisi, no hi ha especificacions dels materials ni instruccions de muntatge o manipulació de peces o productes especials. Tampoc hi ha que seguir ninguna norma o llei al respecte , ja que al tractar-se de simulacions i anàlisis dels resultats no existeix ningun perill per al treballadors ni per al medi ambient.

Les condicions que s'apliquen en aquest projecte estan basades en les característiques dels moviments i de les forces que es volen aconseguir, ja que els models dissenyat i programats deuen complir aquestes especificacions.

Per a dur a terme tot el projecte es treballa amb el programa informàtic "*Adams View*". Aquest programa és un software de simulació i anàlisi cinemàtic i dinàmic. Per a poder utilitzar-lo correctament es necessiten una sèrie de característiques en l'ordinador que s'utilitza per a dissenyar, programar, simular i analitzar.

Característiques necessàries per al programa:

- Tenir una versió de software i hardware compatibles
- Requisits de memòria i d'espai en el disc dur
- Tindre un certificat de la contrasenya

Característiques de l'equip informàtic (ordinador) utilitzat:

- Intel CORE i7
- Targeta gràfica RADEON AMD
- Disc dur intern de 500GB

9. PRESSUPOST

Hores del personal

Concepte	Quantitat d'hores	Preu	Parcial
Enginyer mecànic	427	12,00€	5124,00€
Director del projecte	40	20,00€	800,00€
		Total	5924,00€

Software informàtic

Concepte	Quantitat d'hores	Preu llicència
Adams View	312	1900,00€
Microsoft Office Professional 2016	83	540,00€
	Total	2440,00€

Equipament informàtic

Concepte	Preu
Ordinador Toshiba	650,00€
Calculadora Casio	25,00€
Disc dur WD Elements	45,00€
Total	720,00€

Preu total del projecte = 9084,00€

Preu total el projecte amb IVA = 10991.64€

10. ÍNDEX DE FIGURES

Fig.1. → Esquema d'un braç robot

https://www.google.es/search?q=brazo+robot+industrial&sa=G&tbm=isch&tbo=u&source=univ&ved=0ahUKEwi6nfamt5_SAhUB7RQKHZAxAEEQsAQIKQ&biw=1366&bih=662#imgrc=MqK-WyzEMM6R8M:

Fig.2. → Esquema d'un braç robot amb parells R

https://www.google.es/search?q=par+de+revoluci%C3%B3n&client=firefox-b-ab&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjb796r06HSAhWiIMAKHQFRBf4Q_AUICCGB&biw=1366&bih=657#tbn=isch&q=brazo+robotico+industrial&imgrc=i8ox7kD9-gwB1M:

Fig.3. → Robot amb parells R

https://www.google.es/search?q=par+de+revoluci%C3%B3n&client=firefox-b-ab&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjb796r06HSAhWiIMAKHQFRBf4Q_AUICCGB&biw=1366&bih=657#tbn=isch&q=brazo+robotico+industrial&imgrc=

Fig.4. → Robot amb parell prismàtic (1)

https://www.google.es/search?q=par+prism%C3%A1tico&client=firefox-b&source=Inms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwJpZq2g16HSAhXJKMAKHQBEDYMQ_AUICCGB&biw=1366&bih=657#q=par+prismatico+ejemplos&tbn=isch&tbs=rimg:CQaS6mr4aW9qIjg-KqBpEvig0kQq1yj83z4YSCjs7bFTbQvLoSRN6ms3Dpj8YcsfqZoi9xueoCzoFVSODzhB4RvoSoSCT4qoGkS-KDSEVa3-VqV5WepKhIJRCrXKPzfPhgRIP60XAVucjUqEgIKOztsVNtCxGTyNd7XK5LlCoSCcuhJE3qazcOEeTduyENDpbWKhIJmPxhyx-pmilR7N54UuEJ2cAqEgmL3G56gLogVRH4qzDWCYJJCoSCVI4POEHhG-hEY_1qI9Gg9M5I&imgrc=BpLqavhpb2p6-M:

Fig.5. → Robot amb parells prismàtic (2)

https://www.google.es/search?q=par+prism%C3%A1tico&client=firefox-b&source=Inms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwJpZq2g16HSAhXJKMAKHQBEDYMQ_AUICCGB&biw=1366&bih=657#q=par+prismatico+ejemplos&tbn=isch&tbs=rimg:CQaS6mr4aW9qIjg-KqBpEvig0kQq1yj83z4YSCjs7bFTbQvLoSRN6ms3Dpj8YcsfqZoi9xueoCzoFVSODzhB4RvoSoSCT4qoGkS-KDSEVa3-VqV5WepKhIJRCrXKPzfPhgRIP60XAVucjUqEgIKOztsVNtCxGTyNd7XK5LlCoSCcuhJE3qazcOEeTduyENDpbWKhIJmPxhyx-pmilR7N54UuEJ2cAqEgmL3G56gLogVRH4qzDWCYJJCoSCVI4POEHhG-hEY_1qI9Gg9M5I&imgdii=5TfDTczB0UY6_M:&imgrc=dALI5k8g82wBqM:

Fig.6. → Esquema amb diferents tipus d'unions

https://www.google.es/search?q=par+prism%C3%A1tico&client=firefox-b&source=Inms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwJpZq2g16HSAhXJKMAKHQBEDYMQ_AUICCGB&biw=1366&bih=657#tbn=isch&q=par+prismatico+ejemplos&imgrc=j8LLaeAQmVM86M:

Fig.7. → Dibuix d'una plataforma dissenyada per a l'entreteniment

Font: (RAFAEL ARACIL, 2006)

Fig.8. → Robot paral·lel amb 5gdl

https://www.google.com/search?client=firefox-b&tbm=isch&q=Willard+Pollard+maquina+de+1940&spell=1&sa=X&ved=0ahUKEwj7xK_jmaLSAhWE0RQKHad2ALUQBQgZKAA#imgrc=

Fig.9. → Esquema d'una plataforma Stewart

https://www.google.es/search?q=plataforma+stewart&client=firefox-b-ab&biw=1366&bih=657&source=lnms&tbm=isch&sa=X&sqi=2&ved=0ahUKEwig7PKfn6LSAhWeHsAKHVaxCjEQ_AUIBigB#imgdii=THdl-iqq1HLWVM:&imgrc=465wygDqABSSmM:

Fig.10. → Foto d'una plataforma Stewart

https://www.google.es/search?q=plataforma+stewart&client=firefox-b-ab&biw=1366&bih=657&source=lnms&tbm=isch&sa=X&sqi=2&ved=0ahUKEwig7PKfn6LSAhWeHsAKHVaxCjEQ_AUIBigB#imgdii=THdl-iqq1HLWVM:&imgrc=465wygDqABSSmM:

Fig.11 → Robot planar

<http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1921/14/UPS-CT002354.pdf>

Fig.12. → Robot planar 3RRR

<http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1921/14/UPS-CT002354.pdf>

Fig.13. → Robot espacial

<http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1921/14/UPS-CT002354.pdf>

Fig.14. → Robot DELTA

<http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1921/14/UPS-CT002354.pdf>

Fig.15. → Robot Orthoglide

<http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1921/14/UPS-CT002354.pdf>

Fig.16. → Espai de treball en els eixos X i Z d'una plataforma Stewart

https://www.google.es/search?q=area+de+trabajo+de+un+robot&client=firefox-b-ab&source=lnms&tbm=isch&sa=X&sqi=2&ved=0ahUKEwjUnd6xiPLUAhUhl8AKHVOiBL YQ_AUIBigB&biw=1525&bih=736#imgrc=

Fig.17. → Actuador hidràulic

https://www.google.es/search?q=area+de+trabajo+de+un+robot&client=firefox-b-ab&source=lnms&tbm=isch&sa=X&sqi=2&ved=0ahUKEwjUnd6xiPLUAhUhl8AKHVOiBL YQ_AUIBigB&biw=1525&bih=736#imgrc=U4SIRXNoEyOXiM:

Fig.18. → Plataforma Inferior (1)

Captura de pantalla d'Adams View

Fig.19. → Plataforma inferior (2)
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.20. → Plataforma inferior amb esfera
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.21. → Plataforma inferior amb esferes distribuïdes en forma hexagonal regular
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.22. → Plataforma inferior completa
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.23. → Esfera
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.24. → Procés del disseny d'una camisa (1)
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.25. → Procés del disseny d'una camisa (2)
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.26. → Procés del disseny d'una camisa (3)
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.27. → Procés de disseny de la tapa d'una camisa
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.28. → Tapa superior d'una camisa (1)
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.29. → Tapa superior d'una camisa (2)
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.30. → Procés d'unió d'una camisa i una tapa (1)
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.31. → Procés d'unió d'una camisa i una tapa (2)
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.32. → Camisa finalitzada
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.33. → Procés de muntatge d'un pistó (1)
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.34. → Procés de muntatge d'un pistó (2)
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.35. → Procés de muntatge d'un pistó (3)
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.36. → Procés de muntatge d'un pistó (4)

Captura de pantalla d'Adams View

Fig.37. → Pistó finalitzat

Captura de pantalla d'Adams View

Fig.38. → Plataforma superior amb esferes

Captura de pantalla d'Adams View

Fig.39. → Plataforma 1

Captura de pantalla d'Adams View

Fig.40. → Plataforma 2

Captura de pantalla d'Adams View

Fig.41. → Plataforma 3

Captura de pantalla d'Adams View

Fig.42. → Plataforma 1 amb unió al sòl

Captura de pantalla d'Adams View

Fig.43. → Parells universals

Captura de pantalla d'Adams View

Fig.44. → Parells esfèrics

Captura de pantalla d'Adams View

Fig.45. → Parells esfèrics superiors

Captura de pantalla d'Adams View

Fig.46. → Parells prismàtics

Captura de pantalla d'Adams View

Fig.47. → Plataforma 1 acoblada

Captura de pantalla d'Adams View

Fig.48. → Desplaçament plataforma superior en l'eix X

Captura de pantalla d'Adams View

Fig.49. → Desplaçament plataforma superior en l'eix Y

Captura de pantalla d'Adams View

Fig.50. → Desplaçament plataforma superior en l'eix Z

Captura de pantalla d'Adams View

Fig.51. → Desplaçament dels pistons en l'eix Z local

Captura de pantalla d'Adams View

Fig.52. → Plataforma 2 acoblada

Captura de pantalla d'Adams View

*Fig.53. → Desplaçament plataforma superior en l'eix X
Captura de pantalla d'Adams View*

*Fig.54. → Desplaçament plataforma superior en l'eix Y
Captura de pantalla d'Adams View*

*Fig.55. → Desplaçament plataforma superior en l'eix Z
Captura de pantalla d'Adams View*

*Fig.56. → Desplaçament dels pistons en l'eix Z local
Captura de pantalla d'Adams View*

*Fig.57. → Plataforma 3 acoblada
Captura de pantalla d'Adams View*

*Fig.58. → Desplaçament de la plataforma superior en l'eix X
Captura de pantalla d'Adams View*

*Fig.59. → Desplaçament de la plataforma superior en l'eix Y
Captura de pantalla d'Adams View*

*Fig.60. → Desplaçament de la plataforma superior en l'eix Z
Captura de pantalla d'Adams View*

*Fig.61. → Desplaçament dels pistons en l'eix Z local
Captura de pantalla d'Adams View*

*Fig.62. → Desplaçament de la plataforma superior amb cinemàtica indirecta
Captura de pantalla d'Adams View*

*Fig.63. → Desplaçament de la plataforma superior amb cinemàtica directa
Captura de pantalla d'Adams View*

*Fig.64. → Desplaçament de la plataforma superior amb cinemàtica indirecta
Captura de pantalla d'Adams View*

*Fig.65. → Desplaçament de la plataforma superior amb cinemàtica directa
Captura de pantalla d'Adams View*

*Fig.66. → Desplaçament de la plataforma superior amb cinemàtica indirecta
Captura de pantalla d'Adams View*

*Fig.67. → Desplaçament de la plataforma superior amb cinemàtica directa
Captura de pantalla d'Adams View*

*Fig.68. → Força X local del pistó 1
Captura de pantalla d'Adams View*

*Fig.69. → Força Y local del pistó 1
Captura de pantalla d'Adams View*

Fig.70. → Forces Z locals dels pistons
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.71. → Força X del pistó 1
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.72. → Força Y del pistó 1
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.73. → Forces Z locals dels pistons
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.74. → Desplaçament de la plataforma superior amb cinemàtica indirecta
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.75. → Desplaçament de la plataforma superior amb dinàmica directa
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.76. → Desplaçament de la plataforma superior amb cinemàtica indirecta
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.77. → Desplaçament de la plataforma superior amb dinàmica directa
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.78. → Desplaçament de la plataforma superior amb cinemàtica indirecta
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.79. → Desplaçament de la plataforma superior amb dinàmica directa
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.80. → Desplaçament plataforma superior en l'eix Y
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.81. → Desplaçaments dels pistons
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.82. → Desplaçament plataforma superior en l'eix Y
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.83. → Desplaçaments dels pistons
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.84. → Desplaçament plataforma superior en l'eix Y
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.85. → Desplaçaments dels pistons
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.86. → Forces dels pistons en l'eix X
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.87. → Forces en X sumades
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.88. → Forces dels pistons en l'eix Y
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.89. → Forces en Y sumades
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.90. → Forces dels pistons en l'eix Z
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.91. → Forces en Z sumades
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.92. → Forces dels actuadors en Y sumades
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.93. → Pantalla per a programar moviments
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.94. → Desplaçament plataforma superior X
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.95. → Desplaçament plataforma superior Y
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.96. → Desplaçament plataforma superior Z
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.97. → Desplaçaments dels pistons
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.98. → Desplaçament plataforma superior X
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.99. → Desplaçament plataforma superior Y
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.100. → Desplaçament plataforma superior Z
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.101. → Desplaçaments dels pistons
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.102. → Desplaçament plataforma superior X
Captura de pantalla d'Adams View

Fig.103. → Desplaçament plataforma superior Y
Captura de pantalla d'Adams View

*Fig.104. → Desplaçament plataforma superior Z
Captura de pantalla d'Adams View*

*Fig.105. → Desplaçaments dels pistons
Captura de pantalla d'Adams View*

*Fig.106. → Desplaçament plataforma superior X
Captura de pantalla d'Adams View*

*Fig.107. → Desplaçament plataforma superior Y
Captura de pantalla d'Adams View*

*Fig.108. → Desplaçament plataforma superior Z
Captura de pantalla d'Adams View*

*Fig.109. → Desplaçaments dels pistons
Captura de pantalla d'Adams View*

*Fig.110. → Forces dels pistons
Captura de pantalla d'Adams View*

*Fig.111. → Desplaçament plataforma superior X
Captura de pantalla d'Adams View*

*Fig.112. → Desplaçament plataforma superior Y
Captura de pantalla d'Adams View*

*Fig.113. → Desplaçament plataforma superior Z
Captura de pantalla d'Adams View*

*Fig.114. → Desplaçaments dels pistons
Captura de pantalla d'Adams View*

*Fig.115. → Forces dels pistons
Captura de pantalla d'Adams View*

*Fig.116. → Desplaçament plataforma superior X
Captura de pantalla d'Adams View*

*Fig.117. → Desplaçament plataforma superior Y
Captura de pantalla d'Adams View*

*Fig.118. → Desplaçament plataforma superior Z
Captura de pantalla d'Adams View*

*Fig.119. → Desplaçament plataforma superior X
Captura de pantalla d'Adams View*

*Fig.120. → Desplaçament plataforma superior Y
Captura de pantalla d'Adams View*

Fig.121. → Desplaçament plataforma superior Z
Captura de pantalla d'Adams View

11. BIBLIOGRAFIA

- Parallel Robots (Second Edition); J. P. Merlet; Springer, 2006
- Parallel Kinematics Type, Kinematics, and Optimal Design; Liu, X., Wang, J. ; Springer, 2014
- Parallel Robotic Machine Tools; Zhang, D.; Springer, 2010
- Unitat 1: Introducció a la robòtica (UPV)
- <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1921/14/UPS-CT002354.pdf>
- https://es.wikipedia.org/wiki/Robot_SCARA
- http://www.ehu.eus/compmech/welcome/doc/dissertation_Salgado.pdf
- http://www.ehu.eus/compmech/welcome/doc/dissertation_Salgado.pdf
- <http://sfproyectoiprobotica.blogspot.com.es/2013/01/robots-paralelos.html>
- http://cybertesis.urp.edu.pe/urp/2008/gonzales_go/pdf/gonzales_go-TH.2.pdf
- https://en.wikipedia.org/wiki/Stewart_platform
- <http://arvc.umh.es/documentos/articulos/RIAI%202006.pdf>
- <http://www.kramirez.net/Robotica/Material/Presentaciones/DinamicaRobot.pdf>
- <https://jauelingeniero.wordpress.com/2013/07/07/bases-sobre-espacios-de-trabajo-en-robotica-parte-1/>
- <https://jauelingeniero.wordpress.com/2013/07/15/el-espacio-de-trabajo-en-robotica-parte-2/>
- <https://es.slideshare.net/htrmoreno/robots-paralelos>
- <http://www.directindustry.es/fabricante-industrial/robot-paralelo-85295.html>
- https://www.researchgate.net/publication/240618328_APLICACIONES_ACTUALES_DE_LOS_ROBOTS_PARALELOS