



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño



# Disseny, implementació i control d'una plataforma auto-estable

TREBALL DE FI DE MÀSTER

**Autora:** Cristina Balló Álvarez

**Tutor:** Vicente Casanova Calvo

**Titulació:** Màster Universitari en Enginyeria Mecatrònica

València, setembre de 2019

# Resum

Aquest projecte recull la informació necessària per a la construcció d'un prototip d'una plataforma auto-estabilitzadora controlada amb un regulador PID. Les peces principals que conformen el mecanisme han estat fabricades amb impressió 3D a partir d'un disseny CAD amb *Solidworks*, l'angle d'inclinació de la plataforma en els dos eixos de rotació es llegeix amb un acceleròmetre i es corregeix la posició amb dos servomotors independents. El regulador ha estat dissenyat per a mantenir la plataforma sempre en posició horitzontal fent front a les pertorbacions aplicades i la seva implementació es duu a terme mitjançant una placa *Arduino*. Per a determinar els paràmetres del regulador, primer s'ha simulat el control amb *Simulink* per a aplicar-lo després al prototip. El codi final compara l'angle llegit per l'acceleròmetre amb l'angle de referència establert i rectifica la posició del servomotor per a mantenir l'estabilitat de la plataforma. Els resultats obtinguts descriuen el comportament dinàmic de la plataforma segons les diferents pertorbacions d'entrada i el tipus de control, demostrant que el mecanisme funciona correctament.

## Paraules clau

Controlador PID, acceleròmetre, servomotor, Arduino, eix longitudinal, eix transversal.

# Abstract

This project collects the necessary information for the construction of a self-stabilizing platform prototype controlled with a PID controller. The main parts of the mechanism have been built using 3D printing from a CAD model designed with *Solidworks*, the tilt in the two axes of rotation is measured with an accelerometer and the position of the platform is rectified with two independent servomotors. The controller has been designed to keep the platform always in a horizontal position facing the perturbations applied and it is implemented with an *Arduino* board. To determine the parameters of the regulator, the control loop was first simulated with *Simulink* for the later implementation to the real prototype. The final code compares the tilt read by the accelerometer with the reference point and rectifies the position of the servomotor to maintain the stability of the platform. The results describe the dynamic behaviour of the platform according to the different input and the variables of control, showing that the mechanism works correctly.

## Key words

PID controller, accelerometer, servomotor, Arduino, pitch and roll.

# Índex

<b>1. Introducció.....</b>	<b>8</b>
Antecedents i treballs previs.....	8
Aplicacions reals.....	10
Objectius.....	11
Metodologia.....	12
Àmbit del projecte.....	13
Viabilitat del projecte.....	13
<b>2. Fonaments teòrics.....</b>	<b>14</b>
Modelat del motor de corrent contínua.....	14
Esquema de control.....	15
Regulador PID.....	17
<b>3. Disseny del mecanisme.....</b>	<b>23</b>
Descripció de la plataforma auto-estable.....	24
Model 3D.....	26
Descripció dels components electrònics.....	27
<b>4. Simulació.....</b>	<b>30</b>
Exportació del model 3D.....	31
Esquema i paràmetres de simulació.....	32
Resultats de simulació.....	38
<b>5. Implementació.....</b>	<b>63</b>
Muntatge del mecanisme.....	64
Esquema de connexions.....	66
Prototip d'implementació.....	68
Codi de control amb <i>Arduino</i> .....	69
Comunicació sèrie.....	71
Resultats de la implementació.....	74
<b>6. Conclusions i recomanacions.....</b>	<b>80</b>
<b>7. Bibliografia.....</b>	<b>83</b>

# Índex de figures

Figura 1: Exemples de projectes de plataformes auto-estabilitzadores [2][3][4][5][6] .....	9
Figura 2: Mecanismes auto-estabilitzadors per a càmeres [8] .....	10
Figura 3: Mecanisme estabilitzador per un llit en un creuer [9] .....	10
Figura 4: Mecanismes estabilitzadors de mobiliari [9] .....	10
Figura 5: Diagrama de flux de la metodologia .....	12
Figura 6: Esquema teòric de funcionament .....	14
Figura 7: Components del servomotor .....	14
Figura 8: Esquema de control general amb pertorbació .....	15
Figura 9: Esquema de control de la plataforma auto-estable .....	16
Figura 10: Pertorbació teòrica del sistema .....	19
Figura 11: Senyal de la correcció teòrica del motor .....	20
Figura 12: Senyal de la posició teòrica de la plataforma .....	20
Figura 13: Components de la plataforma auto-estabilitzadora .....	25
Figura 14: Model 3D de la plataforma auto-estabilitzadora .....	26
Figura 15: Moviments simulats amb Solidworks .....	26
Figura 16: Acceleròmetre ADXL345 .....	27
Figura 17: Servomotor Micro SG90 .....	28
Figura 18: Placa Arduino DUE .....	29
Figura 19: Model CAD exportat des de Solidworks a l'entorn de Simulink .....	31
Figura 20: Esquema bàsic de simulació .....	32
Figura 21: Bloc de configuració de la simulació .....	33
Figura 22: Blocs de sensors de la simulació .....	34
Figura 23: Configuració servomotor de la simulació .....	35
Figura 24: Esquema de control de cancel·lació de pertorbació .....	36
Figura 25: Esquema de control de la simulació .....	36
Figura 26: Blocs de visualització de variables de la simulació .....	37
Figura 27: Seqüència d'escalons a l'entrada .....	39
Figura 28: Posició angular eix transversal. Assaig 1. $K_i=1$ .....	40
Figura 29: Posició angular eix longitudinal. Assaig 1. $K_i=1$ .....	40
Figura 30: Posició angular eix transversal. Assaig 1. $K_i=4$ .....	41
Figura 31: Posició angular eix longitudinal. Assaig 1. $K_i=3.5$ .....	41
Figura 32: Posició angular eix transversal. Assaig 1. $K_i=4$ , $K_p=0.5$ .....	42
Figura 33: Posició angular eix longitudinal. Assaig 1. $K_i=3.5$ , $K_p=0.5$ .....	42
Figura 34: Corbes de Lissajous de la simulació .....	43
Figura 35: Esquema de simulació amb l'esfera .....	44
Figura 36: Esquema de simulació de l'esfera .....	45
Figura 37: Model CAD amb l'esfera .....	45
Figura 38: Corbes de Lissajous d'entrada .....	46
Figura 39: Corba Lissajous 3:2 a l'entrada del sistema .....	47

Figura 40: Posició angular a l'entrada amb relació 3:2 .....	47
Figura 41: Sortida servomotor. Relació 3:2. Ki: 6-4 .....	48
Figura 42: Sortida servomotor longitudinal. Relació 3:2. Ki=4 .....	48
Figura 43: Sortida servomotor transversal. Relació 3:2. Ki=6 .....	49
Figura 44: Trajectòria de l'esfera. Relació 3:2. Ki: 6-4 .....	49
Figura 45: Acceleròmetre. Relació 3:2. Ki: 6-4 .....	50
Figura 46: Sortida servomotor. Relació 3:2. Ki: 31.5-21 .....	50
Figura 47: Sortida servomotor longitudinal. Relació 3:2. Ki=21 .....	51
Figura 48: Sortida servomotor transversal. Relació 3:2. Ki=31.5 .....	51
Figura 49: Trajectòria de l'esfera. Relació 3:2. Ki: 31.5-21 .....	52
Figura 50: Acceleròmetre. Relació 3:2. Ki: 31.5-21 .....	52
Figura 51: Sortida servomotor longitudinal. Relació 3:2. Ki=40 .....	53
Figura 52: Sortida servomotor transversal. Relació 3:2. Ki=60 .....	53
Figura 53: Acceleròmetre. Relació 3:2. Ki: 40-60 .....	54
Figura 54: Trajectòria de l'esfera. Relació 3:2. Ki: 60-40 .....	54
Figura 55: Corba de Lissajous 5:4 .....	55
Figura 56: Posició angular a l'entrada, relació 5:4 .....	55
Figura 57: Sortida servomotor. Relació 5:4. Ki: 5-4 .....	56
Figura 58: Sortida servomotor longitudinal. Relació 5:4. Ki=4 .....	56
Figura 59: Sortida servomotor transversal. Relació 5:4. Ki=5 .....	57
Figura 60: Trajectòria de l'esfera. Relació 5:4. Ki: 5-4 .....	57
Figura 61: Acceleròmetre. Relació 5:4. Ki: 5-4 .....	58
Figura 62: Servomotor. Relació 5:4. Ki: 16-12.8 .....	58
Figura 63: Sortida servomotor longitudinal. Relació 5:4. Ki=12.8 .....	59
Figura 64: Sortida servomotor transversal. Relació 5:4. Ki=16 .....	59
Figura 65: Trajectòria de l'esfera. Relació 5:4. Ki: 16-12.8 .....	60
Figura 66: Acceleròmetre. Relació 5:4. Ki: 16-12.8 .....	60
Figura 67: Sortida servomotor longitudinal. Relació 5:4. Ki: 50-40 .....	61
Figura 68: Sortida servomotor transversal. Relació 5:4. Ki: 50-40 .....	61
Figura 69: Acceleròmetre. Relació 5:4. Ki: 50-40 .....	62
Figura 70: Trajectòria de l'esfera. Relació 5:4. Ki: 50-40 .....	62
Figura 71: Instruccions de muntatge .....	65
Figura 72: Esquema de connexions de la implementació .....	66
Figura 73: Prototip implementació .....	68
Figura 74: Connexions implementació .....	68
Figura 75: Diagrama de flux del codi d'implementació .....	70
Figura 76: Esquema comunicació sèrie Arduino .....	71
Figura 77: Esquema comunicació sèrie Simulink .....	72
Figura 78: Servomotor per a l'entrada en l'eix longitudinal (esquerra) i en l'eix transversal (dreta) .....	74
Figura 79: Senyal d'entrada de la implementació .....	75
Figura 80: Resultats implementació eix longitudinal. Ki=1 .....	76

Figura 81: Resultats implementació eix longitudinal. $K_i=3.5$ .....	76
Figura 82: Resultats implementació eix longitudinal. $K_i=5$ .....	77
Figura 83: Resultats implementació eix transversal. $K_i=1$ .....	78
Figura 84: Resultats implementació eix transversal. $K_i=5$ .....	78
Figura 85: Resultats implementació eix transversal. $K_i=7$ .....	79
Figura 86: Implementació amb $K_i$ corresponent .....	79

# 1. Introducció

Els mecanismes auto-estables són sistemes mecatrònics que s'ajusten automàticament, respecte a un angle de referència, per compensar les inclinacions provocades per pertorbacions externes, sense necessitat de la intervenció de l'usuari. Això permet usar el mateix dispositiu en diferents entorns amb pertorbacions molt diverses sense perdre funcionalitat.

En aquest capítol es presenten els antecedents i treballs previs dels mecanisme auto-estables i les seves aplicacions actuals, així com els objectius, l'àmbit i viabilitat d'aquest projecte.

## Antecedents i treballs previs

El concepte de mecanismes d'estabilització sorgeix amb la necessitat de mantenir estable el moviment dels vehicles de transport de persones per tal de reduir o eliminar les pertorbacions i sorolls a les que són sotmesos durant el seu funcionament normal tals com turbulències, agitacions i inclinacions, amb la intenció d'evitar marejos i vertígens provocats per aquests moviments no desitjats.

Inicialment, l'objectiu principal d'aquests dispositius era proporcionar un aparell d'estabilització autònoma que oferís una solució senzilla a la problemàtica dels vehicles, compensant les pertorbacions externes derivades de terrenys irregulars o fluxos turbulents per a mantenir les cabines dels vehicles en estat horitzontal. [1]

Per exemple, en vaixells i creuers s'utilitzen per a amortitzar el moviment de les onades que provoquen vertígens i marejos als navegants. En aviació, a més, s'utilitza com a principi bàsic del pilot automàtic que manté l'avió en una posició estable durant el vol.

Avui en dia, però, els mecanismes auto-estabilitzadors són un projecte relativament popular i d'àmbit general que poden ser utilitzats a escala reduïda per a dispositius quotidians.

Gairebé tots els objectes i aparells que s'utilitzen en la vida quotidiana són dissenyats per a l'ús en superfícies planes i horitzontals, per exemple, cadires de rodes, taules, escales de mà, càmeres de fotografia, etc. No obstant, molts d'aquests dispositius també s'utilitzen a l'aire lliure en terrenys irregulars o superfícies que sovint es troben inclinades.



L'ús d'aquests dispositius en superfícies no planes pot resultar en situacions molestes, per exemple, la dificultat de captura d'imatges nítides en la presa de fotografies amb la càmera en moviment o la incomoditat de fer un àpat en una terrassa de restaurant on els utensilis rellisquen de la taula constantment. En altres situacions, això pot conduir a problemes més greus, per exemple, quan es tracta d'una cadira de rodes que trontolla al desplaçar-se a causa de les irregularitats del terreny i pot induir a la caiguda o danys de l'usuari. [2]

Així doncs, per a donar una solució a totes aquestes problemàtiques exposades, cal dissenyar dispositius adaptats a cada situació que compensin els moviments no desitjats per a millorar l'experiència del consumidor. Els mecanismes d'estabilització poden estar constituïts de moltes formes, mides, materials i components diferents, segons l'ús final que se'n vulgui donar.

En les imatges següents es presenten diversos mecanismes que poden compensar petites desviacions angulars:

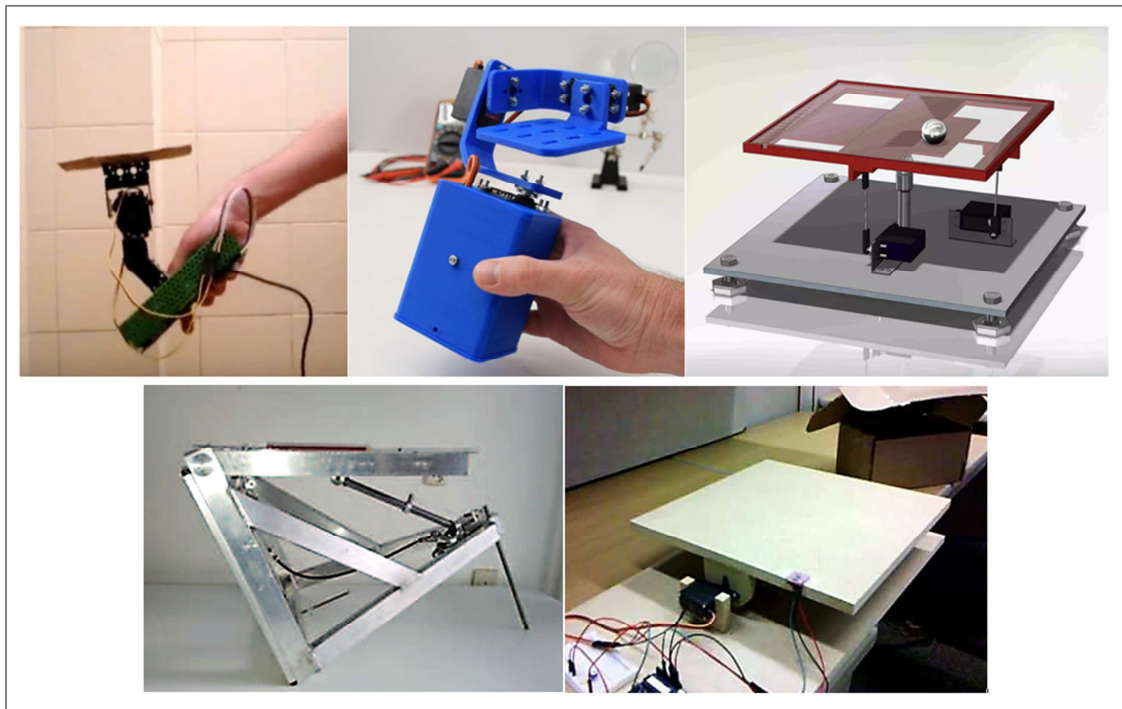


Figura 1: Exemples de projectes de plataformes auto-estabilitzadores [2][3][4][5][6]

La majoria d'aquests sistemes utilitzen servomotors o motors de corrent contínua com a actuadors, ja que aquests presenten grans avantatges en quant al control automàtic. Actualment, gràcies a la facilitat d'accés als components i softwares necessaris, es poden construir prototips a escala que simulen el funcionament d'aquests mecanismes. [7]

## Aplicacions reals

Com s'ha explicat anteriorment, avui en dia, les plataformes auto-estabilitzadores es poden trobar en aplicacions molt diverses, des dels usos més comuns fins a usos molt específics en certs camps determinats, com per exemple:

- Estabilització de càmeres de fotografies i vídeo
- Estabilització de vehicles aeris
- Estabilització de seients i mobiliari d'embarcacions marines
- Estabilització d'edificis i mobiliari en cas de terratrèmol
- Estabilització de safates de cambres i mobiliari per a hostaleria
- Estabilització de plataformes quirúrgiques



Figura 2: Mecanismes auto-estabilitzadors per a càmeres [8]

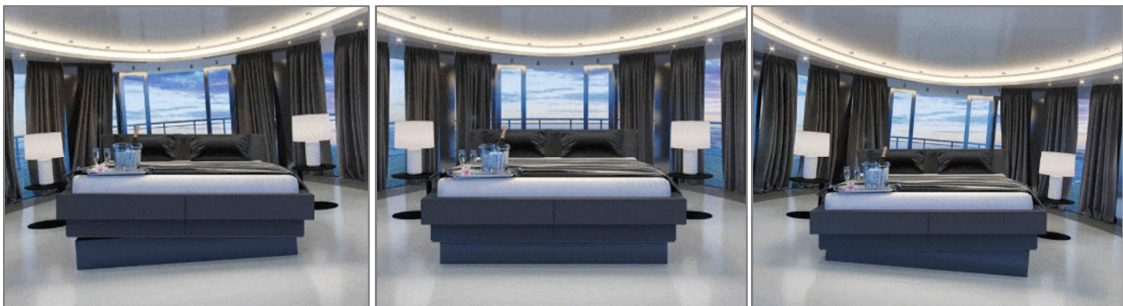


Figura 3: Mecanisme estabilitzador per un llit en un creuer [9]



Figura 4: Mecanismes estabilitzadors de mobiliari [9]

## Objectius

L'objectiu principal d'aquest projecte és el disseny, control i implementació d'una plataforma auto-estable capaç de compensar les inclinacions aplicades al mecanisme per tal de mantenir-se en la posició inicial establerta.

Més concretament, el projecte se centra en l'obtenció d'un sistema de control adequat per la compensació ràpida i precisa de les desviacions angulars de la plataforma respecte del pla horitzontal, tenint en compte les limitacions dels components i materials de construcció.

L'objectiu final d'aquest treball és extreure els resultats necessaris per a analitzar el comportament del mecanisme segons el tipus de control aplicat i el moviment extern al que sigui sotmès.

Per a aconseguir aquest propòsit es fa ús de varies branques de l'enginyeria mecatrònica durant l'execució del projecte, entre d'altres, la **dinàmica de sistemes electromecànics** per a la obtenció del model matemàtic i el disseny del mecanisme; el coneixement de **sistemes de mesura i actuació** per a escollir els sensors i actuadors adequats i el **control aplicat a sistemes mecatrònics** per al correcte disseny del regulador i l'aplicació del microcontrolador. El desenvolupament d'aquest projecte permet posar en pràctica les competències i coneixements adquirits durant el màster i identificar experimentalment la diferència entre el model teòric i el prototip real, validant la realització del treball com a etapa final del màster.

### Descripció del problema

Sigui un mecanisme auto-estabilitzador compost per les peces, els materials i els components electrònics necessaris i regulat mitjançant un microcontrolador, que compleixi les següents condicions:

- Ha de ser un mecanisme lleuger, compacte i transportable, compost com a mínim per una plataforma a controlar i un element on aplicar les inclinacions.
- Ha de ser capaç d'establir la posició inicial de la plataforma, corresponent a l'estat paral·lel al pla horitzontal.
- Ha de ser capaç de llegir correctament les inclinacions amb rapidesa i precisió.
- Ha de ser capaç de mantenir la plataforma en la posició inicial establerta, corregint les desviacions angulars amb rapidesa i precisió.

## Metodologia

La metodologia seguida per a assolir els objectius descrits anteriorment s'explica a continuació mitjançant el següent diagrama de flux:

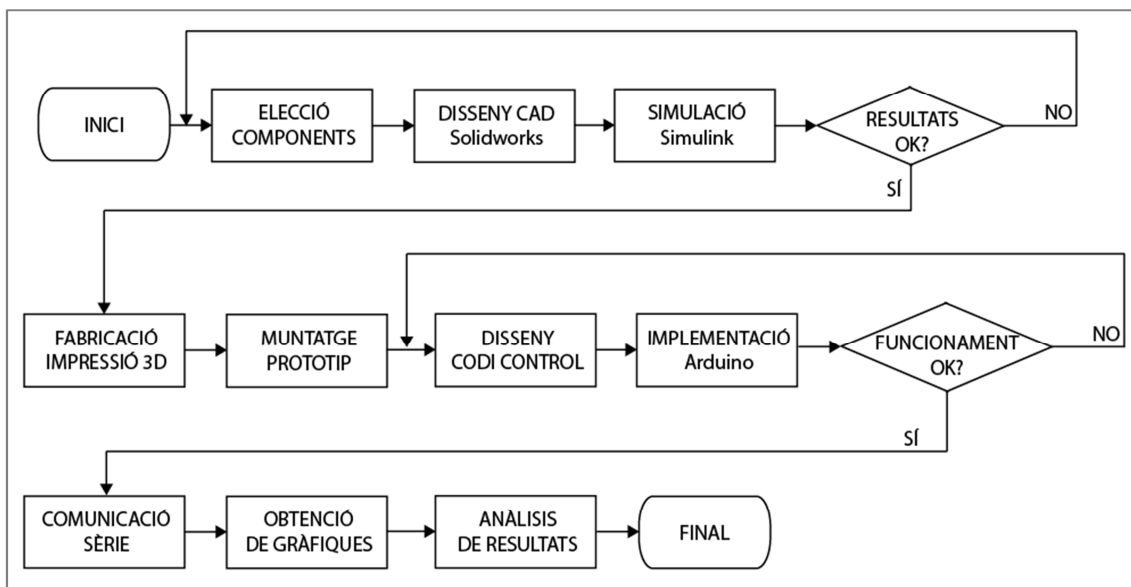


Figura 5: Diagrama de flux de la metodologia

En primer lloc, cal escollir els components mecànics i electrònics adequats per a la lectura dels angles d'inclinació i la correcció de la posició.

A partir dels components escollits, es dissenya el model 3D amb *Solidworks*, detallant el màxim possible les mides i el material de les peces i tenint en compte el procés de fabricació.

Posteriorment, es realitza una simulació del control amb *Simulink* per a obtenir els paràmetres de regulació que s'aplicaran al mecanisme i retocar qualsevol falla de disseny abans de la fabricació i el muntatge de les peces.

Un cop muntat el prototip, es dissenya el codi del control final que s'aplica al mecanisme mitjançant una placa *Arduino*, variant els paràmetres de regulació fins a obtenir els resultats desitjats.

Els resultats es processen mitjançant una comunicació sèrie entre *Arduino* i *Simulink* per al posterior anàlisi de les gràfiques obtingudes.

## **Àmbit del projecte**

L'àmbit d'aquest projecte abasta l'elecció del disseny, els materials i dispositius electrònics adients per a la fabricació del prototip de la plataforma auto-estable, així com el disseny del codi de regulació necessari per al correcte funcionament del dispositiu i l'anàlisi dels resultats obtinguts a partir de la simulació i implementació del control, segons les diferents pertorbacions d'entrada i les variables de regulació.

## **Viabilitat del projecte**

La viabilitat del correcte funcionament d'aquest mecanisme depèn directament de la fiabilitat i la precisió dels components electrònics. Caldrà tenir en compte la precisió del sensor per a llegir la inclinació, així com la velocitat de reacció i la precisió dels actuadors per a la correcció de la posició, que han de ser suficientment ràpids per a compensar les desviacions angulars del mecanisme però suficientment precisos per evitar oscil·lacions no desitjades.

## 2. Fonaments teòrics

Per tal que el mecanisme sigui capaç de mantenir la plataforma en una posició constant i estable, paral·lela al pla horitzontal, és necessari usar un sensor per a mesurar les desviacions angulars -derivades de les pertorbacions a les que se sotmet el sistema- i aplicar un control de posició, mitjançant un regulador, per tal que l'actuador corregeixi correctament la posició de la plataforma amb rapidesa i precisió.

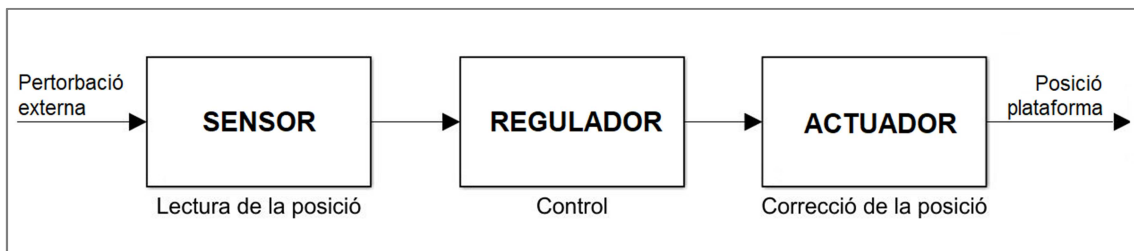


Figura 6: Esquema teòric de funcionament

### Modelat del servomotor

Un servomotor és un sistema compost per components mecànics i electrònics que té la capacitat de mantenir-se estable en qualsevol posició dins del seu rang d'operació gràcies al controlador intern que duu incorporat.

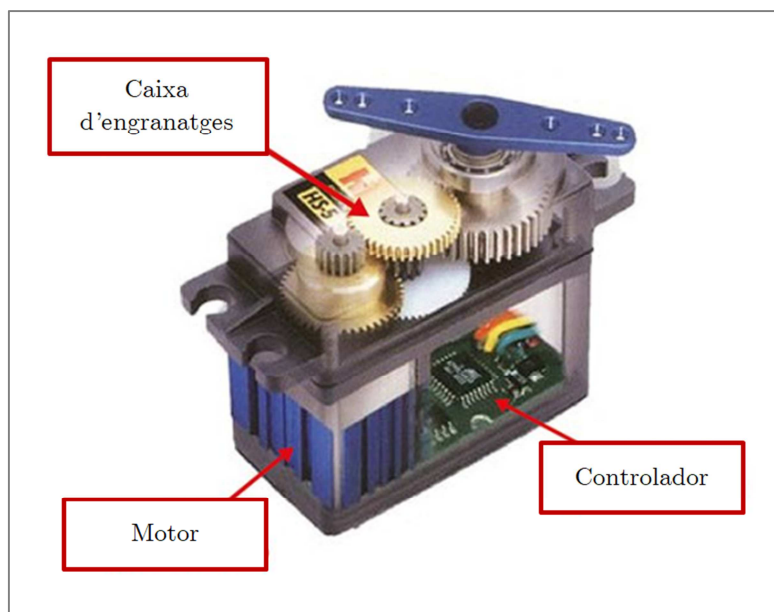


Figura 7: Components del servomotor

La funció de transferència  $G(s)$  que representa el comportament dinàmic a la sortida del servomotor es pot aproximar a un sistema de primer ordre del tipus,

$$G(s) = \frac{1}{\tau \cdot s + 1}$$

on  $\tau$  és la velocitat de resposta del servomotor, paràmetre que es pot extreure de la fitxa de característiques del fabricant.

## Esquema de control

Per a modelar l'esquema de control, cal tenir en compte l'efecte de les pertorbacions a les que està sotmès el mecanisme, de tal manera que, **la senyal de l'actuador ha de contrarestar l'efecte de les pertorbacions** per tal que la senyal de la posició de la plataforma romangui estable.

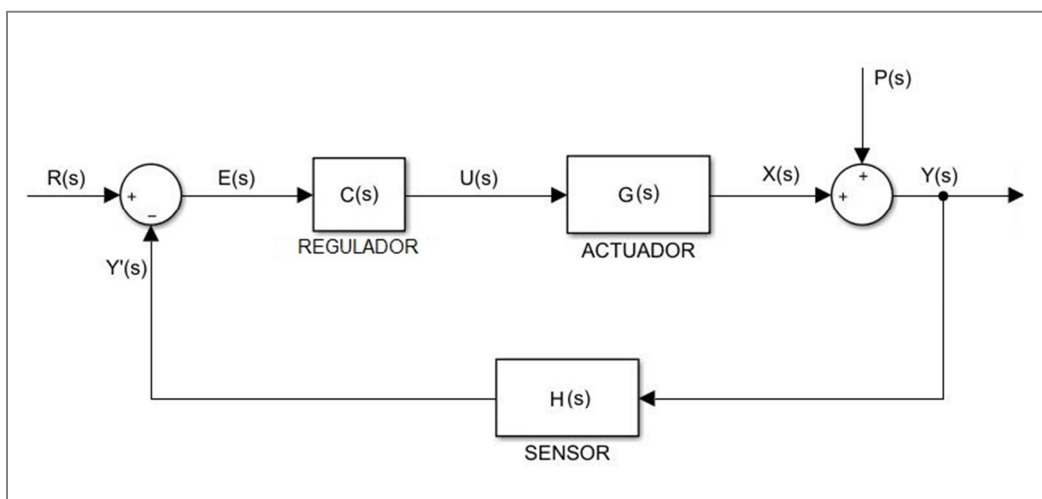


Figura 8: Esquema de control general amb pertorbació

### Senyals:

- $R(s)$ : senyal de referència
- $E(s)$ : senyal d'error
- $U(s)$ : senyal de l'acció de control
- $X(s)$ : senyal de sortida de l'actuador
- $P(s)$ : senyal de la pertorbació que afecta al sistema
- $Y(s)$ : senyal de la posició de la plataforma
- $Y'(s)$ : senyal de lectura del sensor

### Funcions de transferència:

- $C(s)$ : funció de transferència del regulador
- $G(s)$ : funció de transferència de l'actuador
- $H(s)$ : funció de transferència del sensor

En aquest cas concret, la senyal de referència  $R(s)$  sempre pren valor nul perquè es pretén mantenir la plataforma en la posició 0 en els dos eixos de rotació, per tant, l'error pren sempre el valor de la lectura del sensor canviada de signe:

$$E(s) = R(s) - Y'(s)$$

$$E(s) = 0$$

$$E(s) = -Y'(s)$$

D'aquesta manera, l'esquema de control per a la plataforma auto-estable queda es pot simplificar com es mostra a continuació:

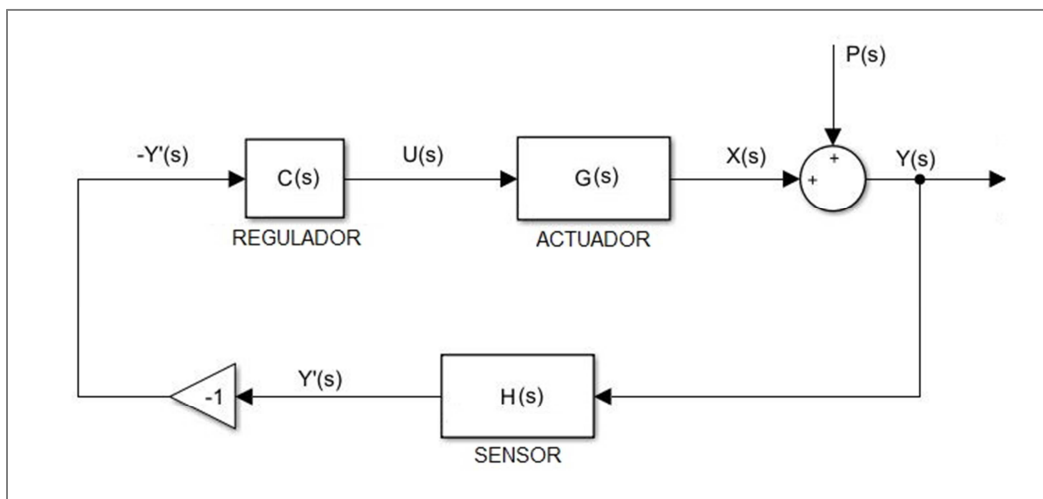


Figura 9: Esquema de control de la plataforma auto-estable

Per a controlar les senyals d'interès  $Y(s)$  i  $X(s)$ , cal trobar les respectives funcions de transferència que relacionin aquestes dues variables amb la senyal d'entrada  $P(s)$ , mitjançant les següents equacions:

$$Y(s) = P(s) + X(s)$$

$$X(s) = G(s) \cdot U(s)$$

$$U(s) = -C(s) \cdot Y'(s)$$

$$Y'(s) = H(s) \cdot Y(s)$$



**La posició de la plataforma** respecte de la pertorbació introduïda al sistema es representa amb la següent funció de transferència:

$$Y(s) = P(s) - G(s) \cdot C(s) \cdot H(s) \cdot Y(s)$$

$$Y(s) \cdot [1 + G(s) \cdot C(s) \cdot H(s)] = P(s)$$

$$\frac{Y(s)}{P(s)} = \frac{1}{1 + G(s) \cdot C(s) \cdot H(s)}$$

**La correcció del motor** respecte de la pertorbació introduïda al sistema es representa amb la següent funció de transferència:

$$X(s) = -G(s) \cdot C(s) \cdot H(s) \cdot [P(s) + X(s)]$$

$$X(s) = -G(s) \cdot C(s) \cdot H(s) \cdot P(s) - G(s) \cdot C(s) \cdot H(s) \cdot X(s)$$

$$X(s) \cdot [1 + G(s) \cdot C(s) \cdot H(s)] = -G(s) \cdot C(s) \cdot H(s) \cdot P(s)$$

$$\frac{X(s)}{P(s)} = -\frac{G(s) \cdot C(s) \cdot H(s)}{1 + G(s) \cdot C(s) \cdot H(s)}$$

## Regulador PID

El tipus de regulador que s'usa per a controlar la posició de la plataforma és un PID, un sistema de control Proporcional-Integral-Derivatiu, l'algoritme de càlcul del qual es basa en tres paràmetres diferents: l'acció proporcional, l'integral i la derivada.

La suma d'aquestes tres accions és usada per controlar la resposta del procés. El disseny del regulador és duu a terme ajustant les constants  $Kp$ ,  $Ki$  i  $Kd$  en l'algoritme de control per a determinar el valor de les tres accions, tal com es descriu a continuació.

Definint  $U(t)$  com la sortida del controlador, l'algoritme del PID és:

$$U(t) = Kp \cdot E(t) + Ki \cdot \int_0^t E(\tau) d\tau + Kd \cdot \frac{d}{dt} E(t)$$

- El valor de l'acció proporcional es relatiu a l'efecte de l'error actual i apropa la resposta del procés a la senyal de referència, però mantenint encara un error de posició en règim permanent.

$$P = Kp \cdot E(t)$$

- L'acció integral genera una correcció relativa a l'acumulació dels errors anteriors, calculada a partir de l'integral de l'error actual, que elimina per complet l'error de posició en règim permanent i combat l'efecte de les pertorbacions que afecten al sistema però, per contra, pot crear oscil·lacions.

$$I = Ki \cdot \int_0^t E(\tau) d\tau$$

- L'acció derivada es determina fent una estimació de l'error futur, és a dir que genera una correcció relativa a la derivada de l'error actual, eliminant les oscil·lacions però, per contra, és molt sensible al soroll.

$$D = Kd \cdot \frac{d}{dt} E(t)$$

Per a controlar la posició de la plataforma, serà necessari que el regulador consti com a mínim d'una **acció integral, per a combatre l'efecte de les pertorbacions en règim permanent:**

Aplicant la transformada de Laplace:

$$U(s) = Ki \cdot \frac{1}{s} \cdot E(s)$$

Dividint la sortida del regulador  $U(s)$  entre la senyal d'error d'entrada  $E(s)$ , s'obté la funció de transferència del regulador:

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = Ki \cdot \frac{1}{s}$$

$$C(s) = \frac{Ki}{s}$$

A partir de l'esquema de control, coneixent les funcions de transferència del motor i del regulador i considerant un sensor ideal,  $H(s)=1$ , el valor de la senyal de posició de la plataforma i la senyal de correcció del motor respecte la pertorbació es poden determinar amb:

**La correcció del motor**

$$X(s) = -\frac{G(s) \cdot C(s)}{1 + G(s) \cdot C(s)} \cdot P(s)$$

**Posició de la plataforma**

$$Y(s) = X(s) + P(s)$$

## Senyals d'entrada i sortida

Un cop sintonitzat el regulador correctament, si s'introdueix al sistema una pertorbació descrita per una senyal d'escaló d'amplitud  $A$ , s'obtenen els següents resultats:

**Entrada**

$$P(t) = A \quad \rightarrow \quad P(s) = A \cdot \frac{1}{s}$$

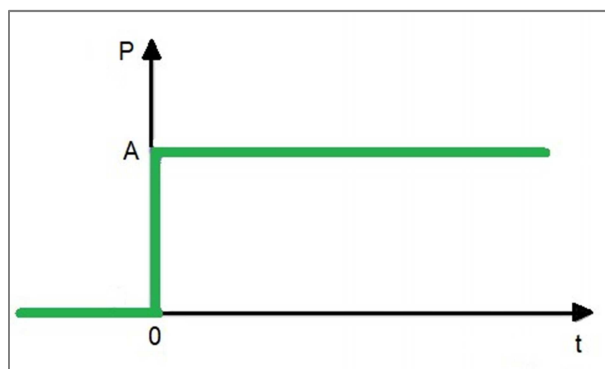


Figura 10: Pertorbació teòrica del sistema

## Sortides

En la figura 11 s'observa que la senyal de correcció del motor pren el valor de la senyal d'entrada en sentit contrari -tenint en compte el retard  $\tau$  que comporta la dinàmica del motor-, mentre que en la figura 12 s'observa que la senyal de la posició de la plataforma és la suma de les dues senyals anteriors, establint-se a la posició inicial de 0 graus.

## Servomotor

$$X(s) = -\frac{G(s) \cdot C(s)}{1 + G(s) \cdot C(s)} \cdot P(s)$$

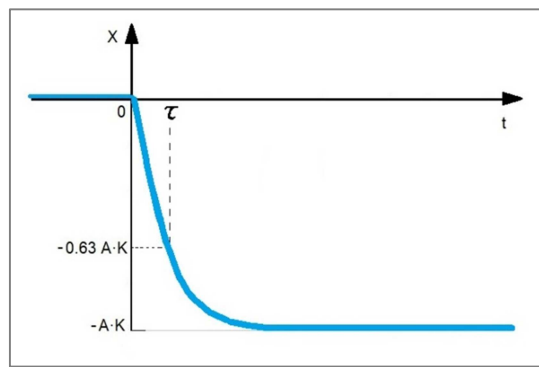


Figura 11: Senyal de la correcció teòrica del motor

## Posició de la plataforma

$$Y(s) = X(s) + P(s)$$

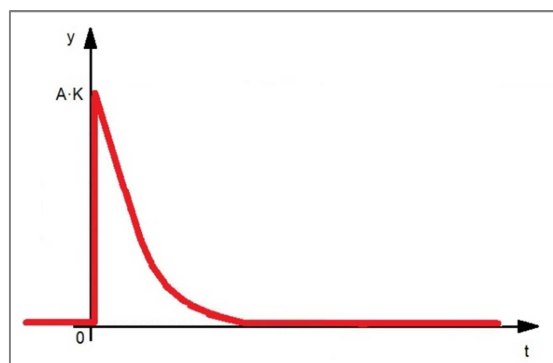


Figura 12: Senyal de la posició teòrica de la plataforma

### 3. Disseny del mecanisme

El mecanisme que es proposa en aquest projecte és una plataforma auto-estabilitzadora controlada en dos eixos de rotació, longitudinal i transversal, mitjançant *Arduino* per a la programació i execució del control.

El disseny de les peces que conformaran el mecanisme s'ha realitzat amb *Solidworks*, que permet modelar peces i conjunts de sistemes mecànics i simular-ne els moviments.

*Solidworks* proporciona un entorn de disseny CAD, on es poden crear fàcilment models 3D de peces i muntatges de mecanismes i extreure'n la informació necessària per a la seva producció, tals com plànols 2D o simulacions de diversos comportaments mecànics de les peces.

Les peces dissenyades amb *Solidworks* es fabriquen amb el mètode d'impressió 3D utilitzant el material Z-Hips, un filament molt lleuger, durador, resistent i de fàcil post processament, indicat per a prototips funcionals. Els plànols de fabricació de les peces d'impressió 3D es troben als annexos d'aquesta memòria.

El control de la plataforma es realitza amb el software de programació *Arduino IDE* i s'executa mitjançant un microcontrolador integrat en una placa *Arduino DUE*.

Per a la lectura de la inclinació de la plataforma s'utilitza un acceleròmetre, que permet conèixer la posició angular de la superfície a partir de les mesures de l'acceleració.

Els actuadors escollits són dos servomotors, un per a cada eix de rotació, que permeten la correcció ràpida i precisa de la posició angular de la plataforma. Els servomotors són adients per aquest projecte per les seves característiques tècniques així com per el seu baix pes i dimensions reduïdes i la seva facilitat de control.

El disseny del mecanisme es realitza considerant tota la informació anterior, és a dir, que cal tenir en compte no només els moviments i accions que ha d'efectuar el sistema, sinó també el procés i material de fabricació de les peces i els components electrònics que s'usaran per al seu funcionament.

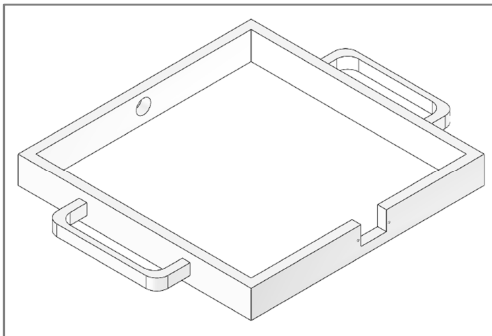
## Descripció de la plataforma auto-estable

La plataforma auto-estabilitzadora dissenyada en aquest projecte es tracta d'un mecanisme que s'anivella automàticament amb el pla horitzontal. Per a mantenir aquesta situació d'estabilitat, s'aplica a la plataforma un control de posició de llaç tancat mitjançant una placa *Arduino*, obtenint la mesura dels angles de rotació amb un acceleròmetre i corregint les desviacions angulars amb dos servomotors independents, un per a cada eix de rotació: l'eix longitudinal i l'eix transversal.

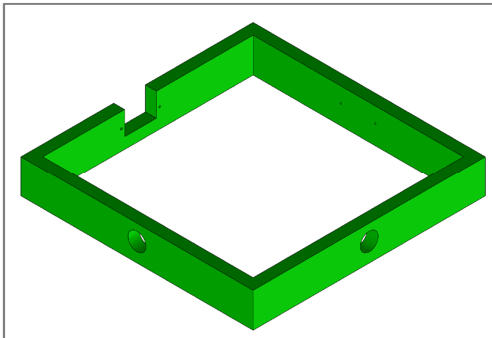
El model CAD de la plataforma auto-estable creat amb *Solidworks* està compost per peces de disseny propi, fabricades amb impressió 3D, peces de compra normalitzades i els dispositius electrònics necessaris per al control.

### Peces de fabricació 3D

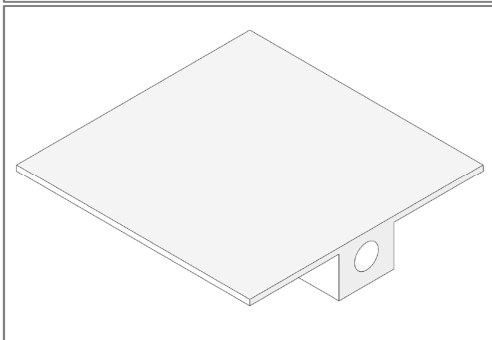
---



**Marc exterior:** quadre exterior amb nanses per a la subjecció i simulació manual de les pertorbacions externes, amb una cavitat on s'ubica el servomotor que accionarà la rotació en l'eix transversal.



**Marc interior:** quadre interior que permet el moviment de la plataforma en l'eix transversal, amb una cavitat on s'ubica el servomotor que accionarà la rotació en l'eix longitudinal.



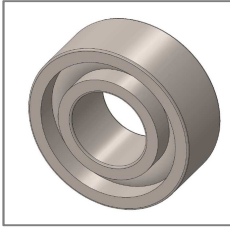
**Plataforma:** superfície quadrada plana a mantenir paral·lela al pla horitzontal que permet el moviment en l'eix longitudinal.



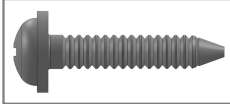
**Eixos:** elements d'unió entre les peces principals.

## Peces normalitzades

---



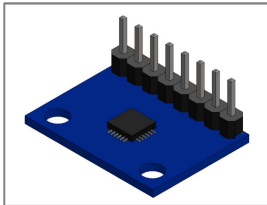
**Rodaments a boles:** elements mecànics que redueixen la fricció entre la peça i l'eix d'unió. Norma: DIN 628



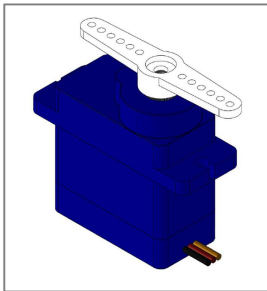
**Cargols:** element per la unió dels dispositius electrònics a les peces corresponents. Norma: DIN 7981

## Dispositius electrònics

---



**Acceleròmetre:** dispositiu per a la lectura de la posició angular de la plataforma a partir de la mesura de l'acceleració. Model: ADXL345



**Servomotors:** dispositiu per a l'accionament del moviment de correcció de la posició angular de la plataforma. Model: Micro SG90

Figura 13: Components de la plataforma auto-estabilitzadora

En la implementació del prototip real, els dispositius electrònics del muntatge anterior –acceleròmetre i servomotors– es connecten a la placa *Arduino DUE* (com s'explica més endavant en el capítol d'implementació), la qual té carregat el programa corresponent amb el control per a fer funcionar el mecanisme.

Amb *Solidworks*, s'uneixen les peces anteriors en un sol conjunt amb el que es poden simular els moviments que haurà de fer el prototip real –gir en l'eix transversal i gir en l'eix longitudinal– i assegurar que tots els components encaixen perfectament i el sistema es pot moure correctament abans de la implementació.

## Model 3D

El conjunt del model 3D muntat en *Solidworks* és el que es mostra en la imatge següent. Els plànols de muntatge i de les peces de fabricació amb impressió 3D es troben als annexos d'aquesta memòria.

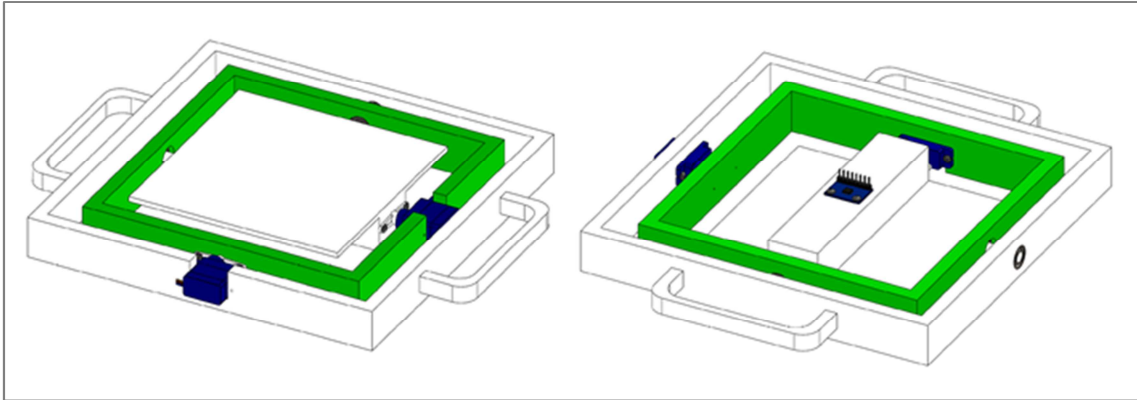


Figura 14: Model 3D de la plataforma auto-estabilitzadora

En la implementació, les pertorbacions externes a les que se sotmet el sistema, s'apliquen manualment agafant el marc exterior per les nanses i fent girar el mecanisme sobre els seus eixos de rotació.

En la imatge de sota es mostren els moviments simulats amb *Solidworks*, on s'observa que el mecanisme es pot moure correctament, per ordre:

- Gir en l'eix transversal
- Gir en l'eix longitudinal
- Gir en els dos eixos

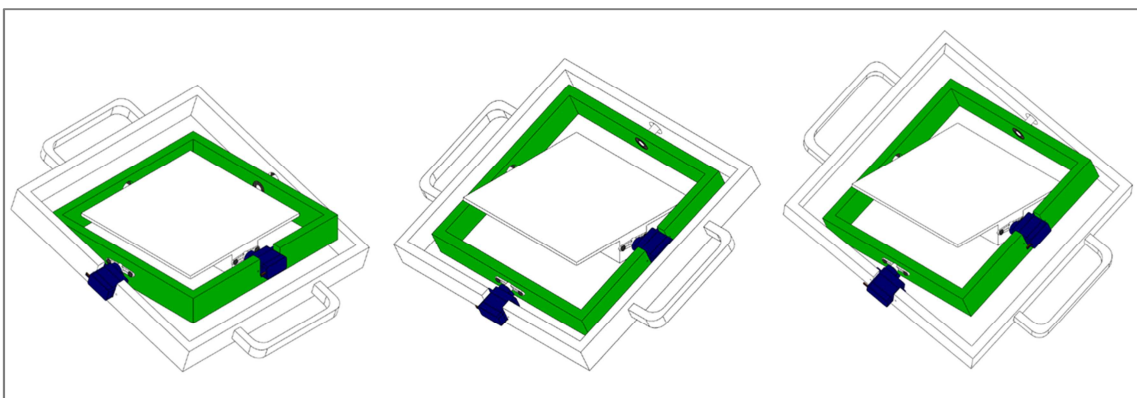


Figura 15: Moviments simulats amb Solidworks



## Descripció dels components electrònics

En aquest apartat, es descriuen els models dels dispositius electrònics escollits que s'usaran en la implementació del prototip real, sent aquests:

- Acceleròmetre ADXL345
- Servomotor Micro SG90
- Placa Arduino DUE

### Acceleròmetre ADXL345

---

Un acceleròmetre és un sensor capacitiu capaç de determinar l'acceleració angular d'un cos que permet mesurar la inclinació d'una superfície. En aquest cas, per a calcular la posició angular de la plataforma, caldrà integrar dues vegades el valor de l'acceleració llegida per l'acceleròmetre.

El model AXDL345 és un acceleròmetre de 3 eixos, de dimensions reduïdes i que opera a molt baixa potència amb una alta resolució que permet mesurar variacions angulars menors d'1<sup>o</sup>. Aquest dispositiu mesura l'acceleració dinàmica que resulta del moviment així com l'acceleració estàtica de la gravetat, cosa que permet utilitzar el dispositiu com a sensor d'inclinació. Normalment, es troben integrats en mòduls que incorporen l'electrònica necessària per a connectar-lo fàcilment a una placa *Arduino* i es pot accedir a les dades de sortida digitals a través de comunicacions SPI o I2C. [10]

#### Característiques principals:

- **Alimentació:** 3,3V o 5V (inclouen un regulador de voltatge)
- **Rang de mesura ajustable:**  $\pm 2g$ ,  $\pm 4g$ ,  $\pm 8g$  i  $\pm 16g$
- **Resolució:** 13 bits
- **Sensibilitat:** 40mg/LSB

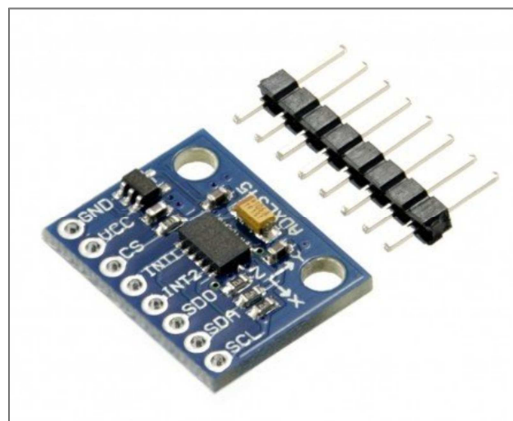


Figura 16: Acceleròmetre ADXL345

## Servomotor Micro SG90

---

Un servomotor és un accionament mecànic que té la capacitat de situar-se en qualsevol posició, dins del seu rang d'operació, i mantenir-se estable en aquesta posició.

El model Micro SG90 és un servomotor lleuger i de dimensions reduïdes que pot girar fins a 180 graus a gran velocitat, establint-se en qualsevol posició entre 0 a 180°, ideal per a projectes que requereixin un parell motor baix per a aplicacions amb poc pes a moure.

Aquest tipus de servomotor incorpora l'electrònica necessària per a connectar-lo a una placa *Arduino* i es pot programar fàcilment amb la llibreria Servo. [11]

### Característiques principals:

- **Pes:** 9 grams
- **Dimensions:** 22.2 x 11.8 x 31 mm
- **Parell motor:** 1.8 kg/cm
- **Velocitat:** 0.1 s/60 graus
- **Alimentació:** 5V
- **Zona morta:** 10 µs
- **Rang de temperatura:** 0°C - 55°C



Figura 17: Servomotor Micro SG90

## Placa Arduino DUE

---

La placa *Arduino DUE* és un microcontrolador que es pot programar amb el software *Arduino IDE* i que disposa de dos ports de connexió USB sèrie, necessaris per aquest projecte.

Aquesta placa té pins de connexió a 3,3V que s'usen per a connectar l'acceleròmetre i pins de connexió a 5V on es connecten els servomotors. Consta també d'un connector de corrent contínua on es pot connectar una font d'alimentació d'entre 7V i 12V.

El port de programació permet carregar a la placa el codi programat en el software i la lectura de dades per pantalla mitjançant el *Monitor* sèrie (caràcters) i el *Plotter* sèrie (gràfiques).

El port USB Natiu permet la comunicació sèrie que s'utilitzarà en aquest projecte per a la transmissió de dades entre *Arduino* i *Simulink*. [12]

### Característiques principals:

- **Microcontrolador:** 32-bit ARM
- **Voltatge d'operació:** 3,3V
- **Alimentació DC:** 7V – 12V
- **Pins digitals:** 54 (12 sortides PWM)
- **Pins analògics d'entrada:** 12
- **Pins analògics de sortida:** 2 (DAC)

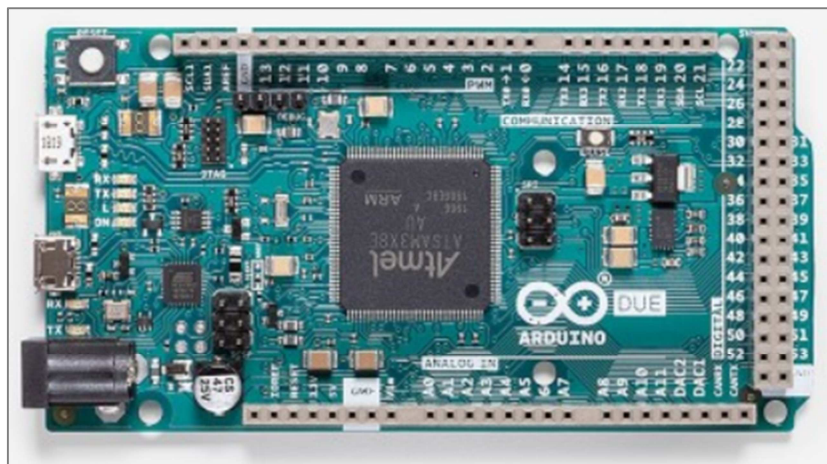


Figura 18: Placa Arduino DUE

## 4. Simulació

La simulació del moviment del mecanisme i la generació de les conseqüents gràfiques de resultats es duen a terme mitjançant el complement *Simscape Multibody* de *Simulink* que permet modelar i simular un sistema mecànic compost per múltiples cossos.

*Simscape Multibody* proporciona un espai de simulació que permet integrar cossos i conjunts 3D, en aquest cas importats des de *Solidworks*, i simular el seu funcionament dins l'entorn de *Simulink* i *Matlab*, cosa que permet dissenyar els diferents sistemes de control directament sobre el model CAD.

Els mecanismes es representen en aquest entorn amb blocs que simbolitzen els cossos rígids. Els diferents cossos que conformen el conjunt, s'uneixen entre ells mitjançant blocs de juntes i/o restriccions. Les variables d'interès i els moviments del mecanisme deguts a agents externs s'especifiquen amb blocs d'elements de força i sensors.

*Simscape Multibody* formula i resol les equacions de moviment per al sistema mecànic complet. Per a això, es poden parametritzar els diversos components incloent les masses, densitats dels materials i inèrcies de les diferents peces del model. Al reproduir la simulació, es genera automàticament l'anàlisi cinètic del model i es pot visualitzar la dinàmica del sistema amb una animació 3D generada automàticament.

Mitjançant la llibreria *Contact Forces* de *Simscape Multibody* es poden simular les forces que es generen amb el contacte entre dos cossos rígids. En aquest cas, es pot usar per a simular el contacte entre la plataforma i qualsevol objecte col·locat sobre la seva superfície.

L'avantatge d'usar *Simscape Multibody* és que permet treballar en temps real, és a dir que es pot visualitzar l'animació i els resultats al mateix temps que es canvia el valor de les variables durant la simulació.

## Exportació del model 3D

Com s'ha explicat anteriorment, *Simscape Multibody* permet l'exportació directa de les peces modelades en *Solidworks* per a incorporar el model 3D en l'entorn de *Simulink*.

Així doncs, s'han exportat i enllaçat en un sol conjunt totes les peces necessàries per a la correcta simulació dels moviments del mecanisme, tals com els marcs exterior i interior, la plataforma, els corresponents eixos i rodaments i els dos servomotors.

En aquest cas, no és necessari exportar els cargols d'unió, ja que les peces s'acoblen entre elles mitjançant els marc de referència definits a cada un dels blocs dels cossos exportats. Tampoc és necessària l'exportació de l'acceleròmetre perquè es llegeix la posició angular de la plataforma mitjançant els blocs de sensors que ofereix el software.

Les diferents peces s'exporten a *Simscape Multibody* usant els blocs de cos rígid, on s'especifiquen els següents paràmetres:

- Arxiu de CAD que es desitja exportar en format *.step*
- Massa (o densitat) del cos per al càlcul d'inèrcies
- Color de visualització durant la simulació
- Marcs de referència assignats a la peça per a enllaçar-la amb altres blocs

Finalment, conjunt exportat amb les peces acoblades entre elles es visualitza de la següent manera durant les animacions:

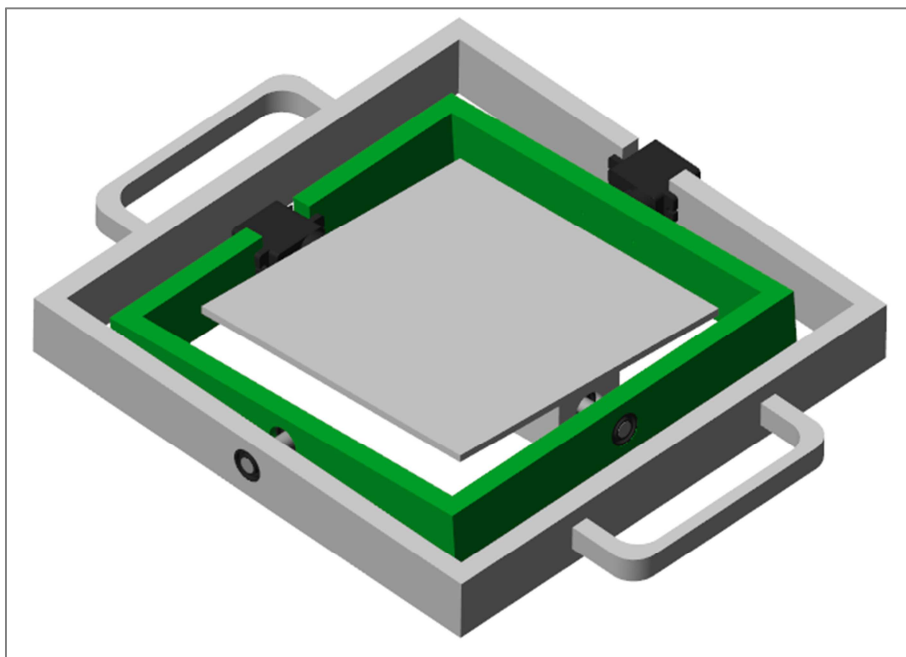


Figura 19: Model CAD exportat des de Solidworks a l'entorn de Simulink

## Esquema i paràmetres de simulació

En la imatge següent es mostra l'esquema-resum que engloba les diferents unitats necessàries per a la simulació dels moviments del mecanisme, com ara els paràmetres de configuració de la simulació, les senyals d'entrada, les peces del model 3D implicades en el control, els laços de control corresponents a cada eix, l'acceleròmetre i els diversos blocs de visualització de senyals.

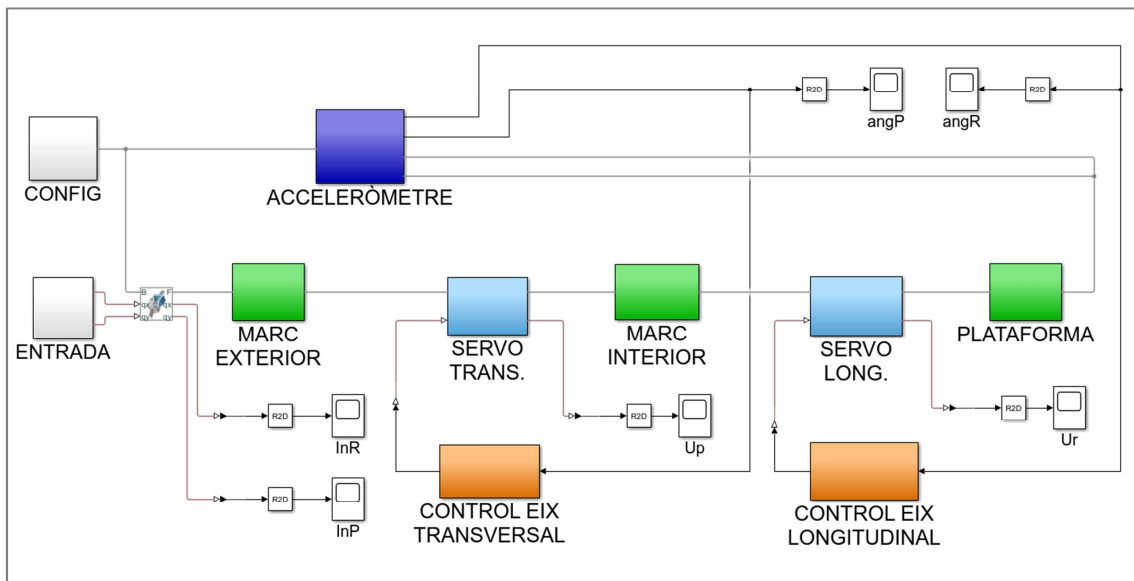


Figura 20: Esquema bàsic de simulació

Per a aconseguir una simulació el més realista possible caldrà adequar alguns dels paràmetres de la configuració de *Simulink*. A continuació s'exposen més detalladament les diferents unitats de l'esquema i la seva configuració.

El primer que cal fer, però, és ajustar el mètode de resolució de *Simulink*. A la secció dels paràmetres de configuració s'han canviat els següents ajustaments:

- **Mètode de resolució (*step solver*):** pas fixe
- **Temps de resolució (*step size*):** 0.001 segons

## Configuració

---

La unitat de configuració està composta per els blocs següents, descrits en el mateix ordre que apareixen en la figura:

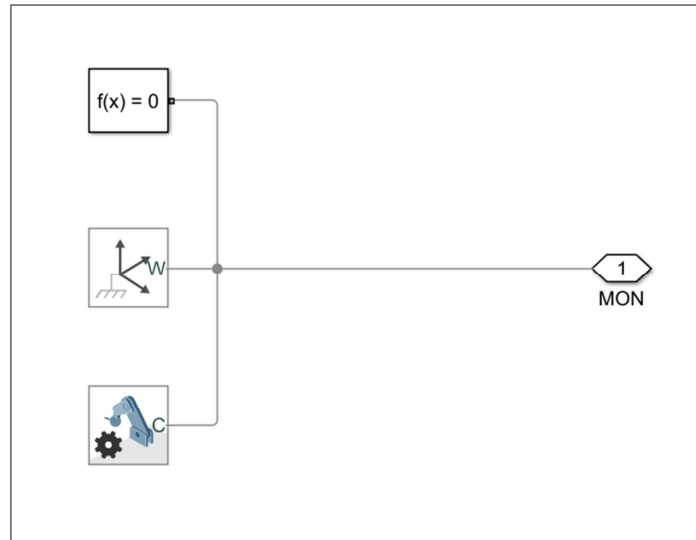


Figura 21: Bloc de configuració de la simulació

- **Configuració del mètode de resolució**

En aquest bloc es pot parametritzar el mètode de resolució del model. En aquest cas, la configuració escollida és per defecte.

- **Coordenades de referència globals (món)**

**Marc de referència per defecte**, únic i global del model, els eixos dels quals són inercials i romanen sempre immòbils. Es tracta d'un sistema de coordenades ortogonal que es regeix per la regla de la mà dreta. Directament o indirectament, la resta de marcs de referència de tot el conjunt es defineixen respecte al marc del món. Aquest bloc serà molt útil per al control del mecanisme.

- **Configuració del mecanisme**

Assigna els paràmetres mecànics i de simulació que s'aplicaran al tot al conjunt. En aquest cas, **s'especifica un valor de la gravetat de  $-9.81 \text{ m/s}^2$  en l'eix Z**, uniforme per a tot el mecanisme.

## Acceleròmetre

---

Aquesta unitat de blocs de sensors simula el funcionament de l'acceleròmetre que s'utilitza en el prototip real. Per al control del mecanisme en la simulació s'usen dos sensors, un per a mesurar la posició angular en l'eix longitudinal (sensor *roll*) i l'altre per a l'eix transversal (sensor *pitch*), mentre que en el control del prototip s'usa un sol acceleròmetre que pot mesurar la posició angular en els dos eixos simultàniament.

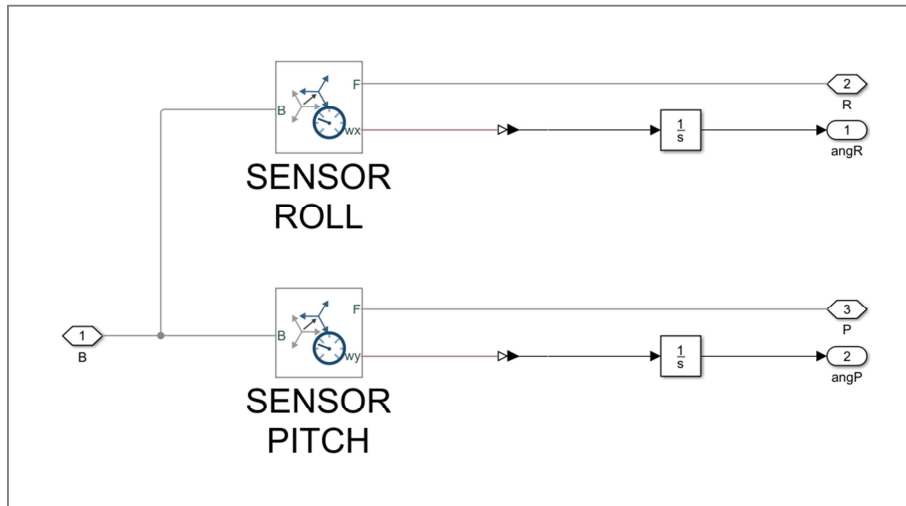


Figura 22: Blocs de sensors de la simulació

El bloc del sensor mesura qualsevol variable dependent del temps entre dos marcs de referència. En aquest cas, la variable que interessa és la posició angular i els marcs de referència seran els de la plataforma (referència mòbil) i el món (referència immòbil).

Com que no és possible des d'aquest bloc de sensors obtenir la lectura de la posició angular directament, s'obté el valor de la velocitat angular en l'eix corresponent i s'integra per obtenir la posició.

## Servomotors

---

En la simulació, els servomotors estan compostos de dues peces importades:

- **El cos** del servomotor, fixat rígidament al marc corresponent.
- **L'espiga** del servomotor, fixada rígidament al marc interior (rotació en l'eix transversal) o a la plataforma (rotació en l'eix longitudinal).



La unió d'aquestes dues peces, es realitza mitjançant un bloc de **junta de revolució**.

Com el seu nom indica, aquest bloc representa una junta de revolució entre dos marcs de referència. En aquest cas un dels marcs se situa al cos del servomotor i l'altre a l'espiga.

Aquest tipus de junta té un sol grau de llibertat de rotació en l'eix Z, fent coincidir els orígens i els eixos Z dels dos marcs en qüestió. Els eixos X-Y dels dos cossos poden rotar lliurement al voltant del tercer eix. És important doncs, orientar correctament l'eix Z dels marcs de les dues peces per a aconseguir la alineació desitjada en la unió.

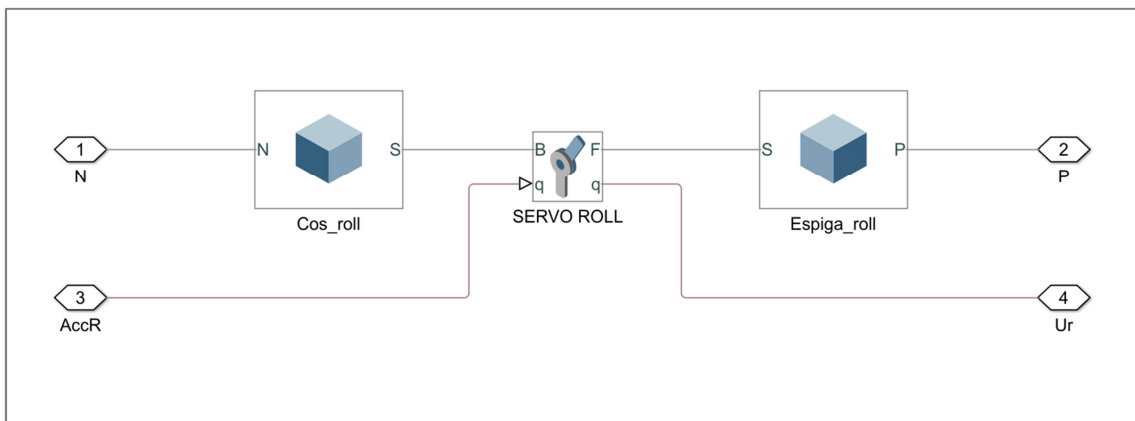


Figura 23: Configuració servomotor de la simulació

L'acció de control s'aplica directament a la junta, connectada al port  $q$  corresponent com es mostra en la figura anterior.

Es pot especificar el mètode d'actuació i la variable d'interès a la sortida en la configuració del bloc:

#### Mètode d'actuació (*actuation*)

- **Parell motor:** calculat automàticament
- **Moviment:** proporcionat per l'entrada (és a dir, la posició del servomotor dependrà de l'acció de control)

#### Variable de sortida (*sensing*)

- **Posició**

## Esquemes de control

Tal com s'explica en la teoria, el control que s'aplica al sistema és un llaç tancat que segueix el següent esquema:

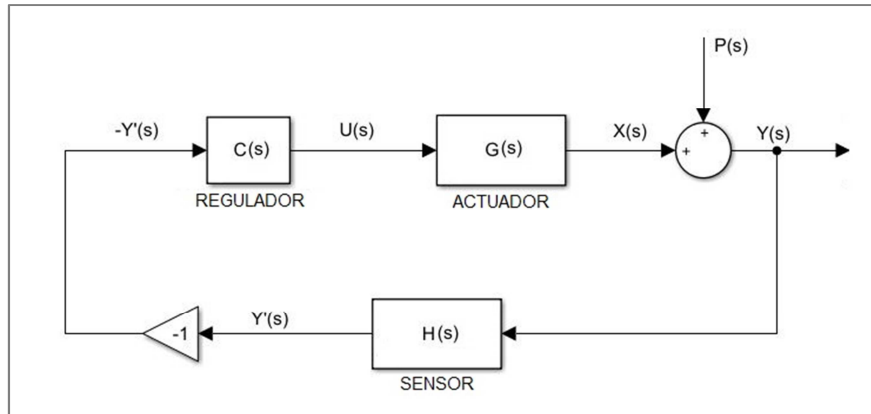


Figura 24: Esquema de control de cancel·lació de pertorbació

S'aplica, doncs, el mateix esquema de control per als dos eixos. La sortida del regulador està connectada a l'entrada de la junta de revolució que uneix les dues peces del servomotor. A la figura s'observen els diferents blocs que conformen el llaç de control que s'usa en la simulació:

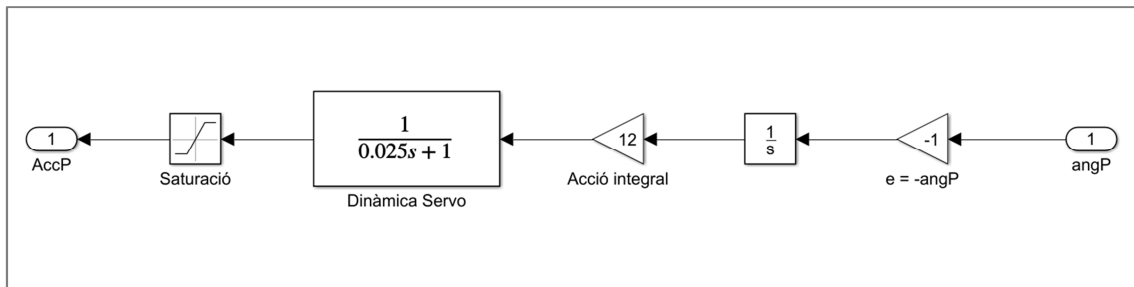


Figura 25: Esquema de control de la simulació

- L'entrada al llaç de control es la posició angular obtinguda de la lectura de l'acceleròmetre.
- Es calcula l'error, canviant el signe al valor anterior.
- S'aplica l'acció integral, composta per un bloc integrador i un guany  $K_i$ .
- La funció de transferència representa el comportament dinàmic del servomotor, calculada a partir de les especificacions del fabricant.
- S'usa un bloc de saturació per assegurar que la senyal de control està dins dels límits desitjats, ja que el moviment màxim del servomotor real són 180 graus (90 graus en cada sentit).
- La sortida del llaç és l'acció de control que s'aplica al servomotor corresponent.

## Blocs de visualització

---

Les variables d'interès per a la obtenció dels resultats de la simulació són les que es descriuen a continuació. Per a poder visualitzar els resultats d'una manera més entenedora, cal passar el valor de les variables de radians a graus amb el bloc R2D.

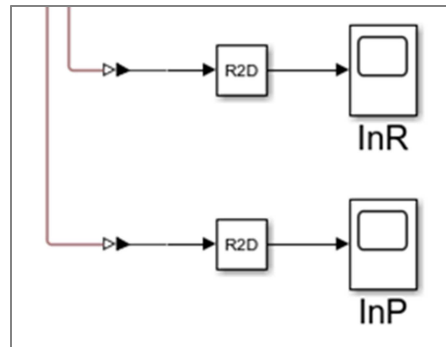


Figura 26: Blocs de visualització de variables de la simulació

### Entrada

- **InR:** senyal d'entrada introduïda en l'eix longitudinal
- **InP:** senyal d'entrada introduïda en l'eix transversal

### Acceleròmetre

- **angR:** posició angular en l'eix longitudinal
- **angP:** posició angular en l'eix transversal

### Servomotor

- **Ur:** acció de control aplicada al servomotor de l'eix longitudinal
- **Up:** acció de control aplicada al servomotor de l'eix transversal

En aquest cas, és molt útil guardar les variables a l'espai de treball de *Matlab* per al posterior tractament de les dades a l'hora de realitzar les gràfiques de resultats. Per això, cal configurar a la secció de *Logging* dels blocs de visualització el nom de la variable i escollir el format *structure with time*.

# Resultats de simulació

En aquest apartat, s'analitzen els resultats de les diverses simulacions que s'han realitzat. En aquest cas, es duen a terme dos assajos diferents:

1. **En el primer assaig, es determina el valor de  $K_i$  ideal per al correcte funcionament de la plataforma quan el mecanisme se sotmet a variacions angulars brusques.** Les gràfiques obtingudes són les següents:
  - L'evolució temporal de la senyal d'entrada, la lectura de l'acceleròmetre i la correcció del servomotor per a l'eix longitudinal i l'eix transversal.
2. **En el segon assaig, se simula i es controla la trajectòria d'una esfera que es desplaça sobre la plataforma quan el mecanisme se sotmet a variacions angulars suaus.** Les gràfiques obtingudes són les següents:
  - La relació de freqüències en la senyal d'entrada en pla XY i la seva evolució temporal
  - La correcció de la posició angular del servomotor en front a l'entrada
  - La lectura de la posició angular de l'acceleròmetre
  - La trajectòria de l'esfera sobre la plataforma

Els objectius d'ambdós assajos es determinar els paràmetres del regulador que fan estable el sistema per a cada un dels anàlisis proposats.

## Assaig 1: Seqüència d'escalons. Determinació de $K_i$

---

En aquest assaig, s'introdueix al sistema una seqüència d'escalons que representen les variacions angulars que s'aplicaran al fer l'experiment amb el prototip real, amb l'objectiu de **determinar els valors aproximats de  $K_i$  que permetin regular correctament la posició de la plataforma** i que s'utilitzaran posteriorment per a la implementació del control amb *Arduino*.

Els resultats obtinguts es podran usar més endavant per a comparar les lectures de l'acceleròmetre i les accions del servomotor entre el model simulat i el mecanisme real.

L'entrada consta d'una **seqüència simètrica d'escalons de  $\pm 20$  graus durant 3 segons**, passant pels 0 graus durant 3 segons més abans de canviar de sentit. Aquesta senyal s'aplica tant en l'eix longitudinal com en l'eix transversal, cosa que permet calcular un valor de  $K_i$  per a cada eix de rotació.

## Senyal d'entrada

La següent figura mostra la senyal d'entrada introduïda al sistema en el model de *Simulink*, formada en cada eix de rotació per dues senyals quadrades que representen la seqüència d'escalons ens els dos sentits de gir. Tenint en compte que l'assaig del mecanisme real es duu a terme de manera manual, s'afegeix a l'entrada una funció de transferència que representa el retard que es produeix al moure manualment el prototip per a aplicar girs corresponents en els dos eixos.

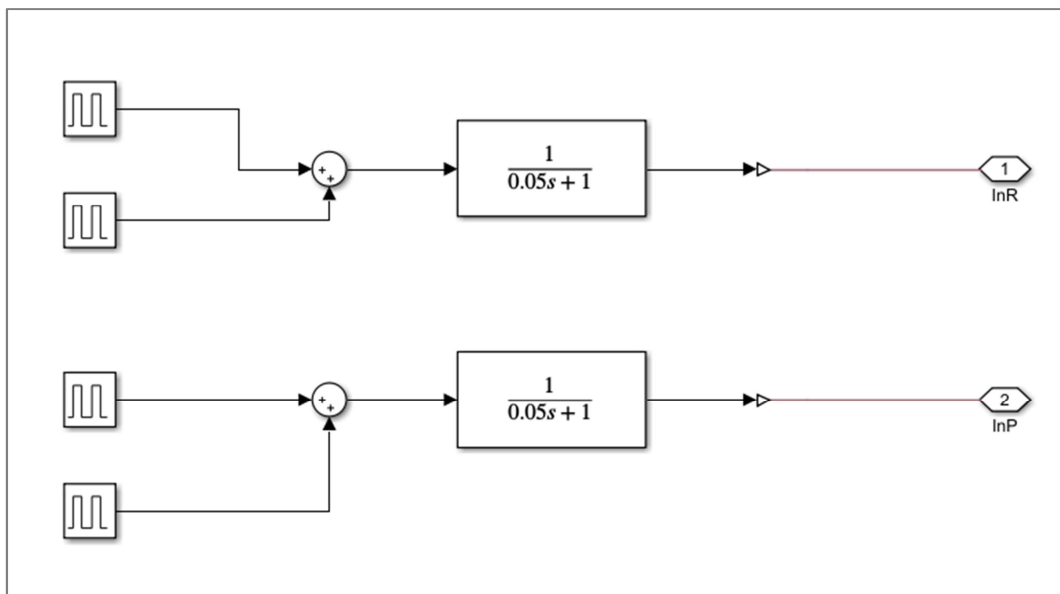


Figura 27: Seqüència d'escalons a l'entrada

Es considera que el sistema corregeix correctament la posició quan la plataforma ha retornat completament a la seva posició inicial de manera precisa, en el menor temps possible i sense sobre-oscil·lacions, ja que aquestes últimes podrien provocar un gir no desitjat de la plataforma en sentit contrari. Per tant, cal que es compleixin les següents condicions:

- **Error de posició:**  $e_p = 0$ , amb el criteri del 98%
  - **Posició del servomotor:**  $20^\circ \pm 0.4$
  - **Posició de la plataforma:**  $0^\circ \pm 0.4$
- **Sobre-oscil·lacions:**  $\delta = 0$

A continuació es mostren els resultats obtinguts en aquest assaig. En total s'exposen tres dels anàlisis que s'han realitzat fins a determinar el valor desitjat de  $K_i$ , en els quals es pot observar el progrés i les conclusions extretes de cada un.

## Anàlisi 1: $K_i=1$ en els dos eixos

Per a començar, s'executa la primera simulació amb valor unitari per  $K_i$  en els dos eixos per a observar el comportament del servomotor vers a la senyal d'entrada.

Els resultats mostren que aquest valor és massa baix ja que **la senyal del servomotor no arriba a establir-se en la posició desitjada.**

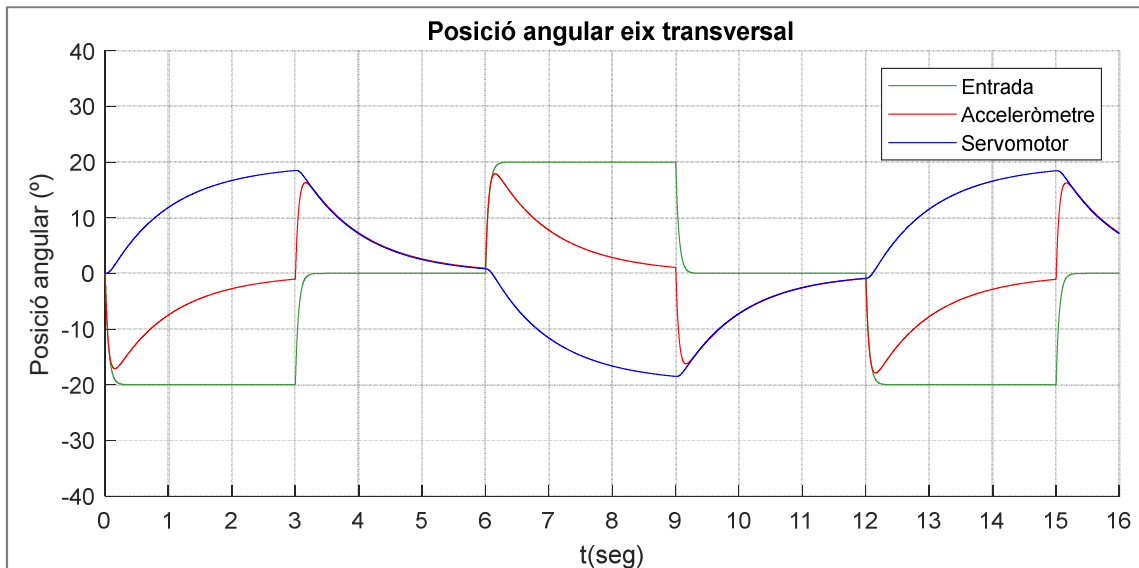


Figura 28: Posició angular eix transversal. Assaig 1.  $K_i=1$

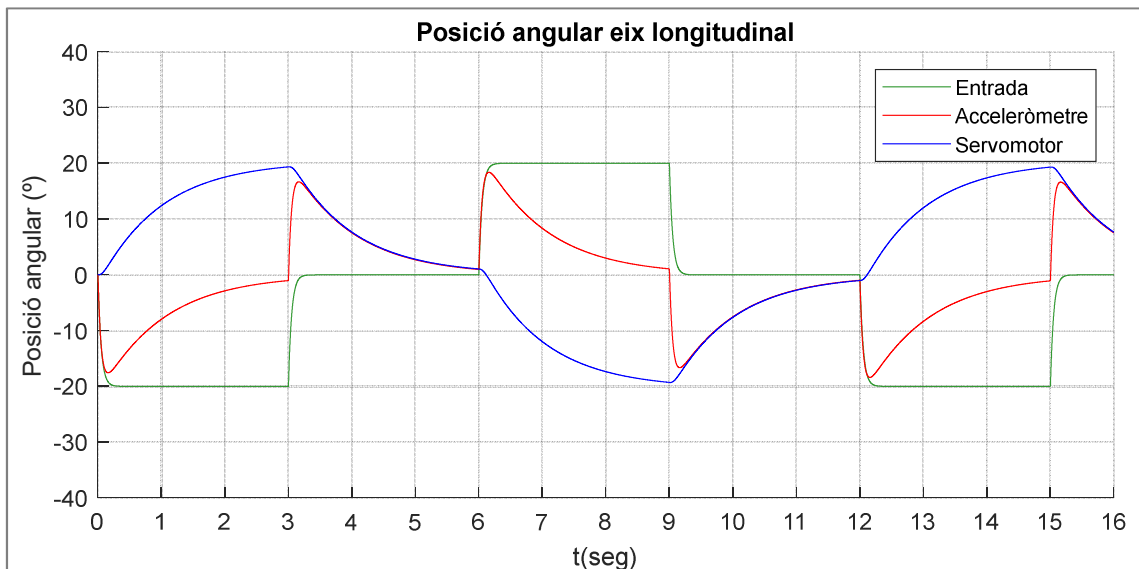


Figura 29: Posició angular eix longitudinal. Assaig 1.  $K_i=1$

## Anàlisi 2: eix longitudinal $Ki=3.5$ , eix transversal $Ki=4$

En les gràfiques següents es determinen els valors de  $Ki$  adients per a cada eix, observant que **la senyal del servomotor s'estableix correctament al valor desitjat** sense sobre-oscil·lacions.

Amb aquests valors de  $Ki$ , el comportament del mecanisme es molt similar en els dos eixos, tant la senyal de la posició de la plataforma com la senyal del servomotor triga aproximadament 1 segon a arribar al règim permanent, sent el valor més alt llegit per l'acceleròmetre d'uns 15 graus.

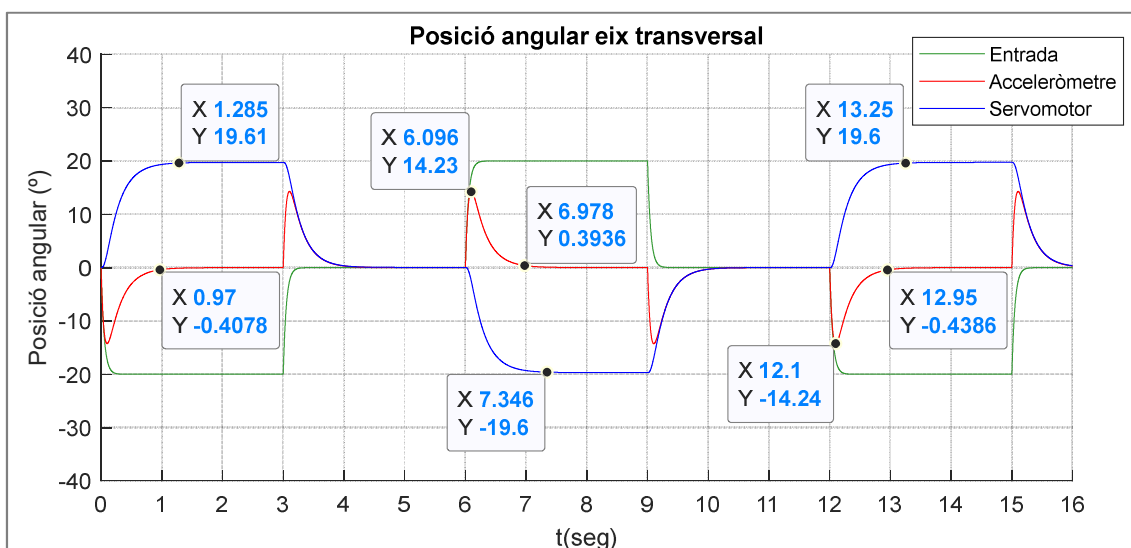


Figura 30: Posició angular eix transversal. Assaig 1.  $Ki=4$

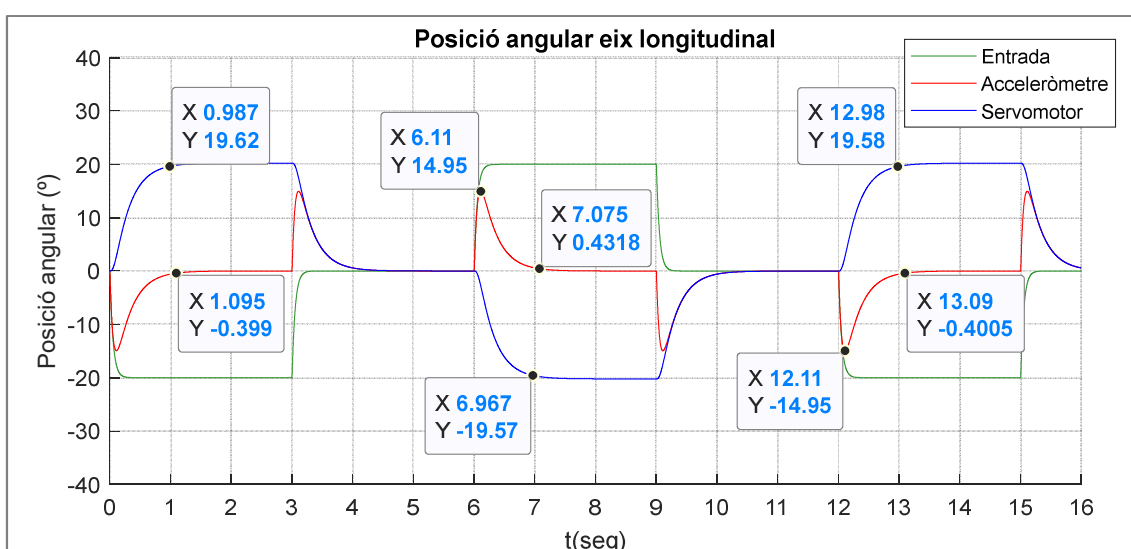


Figura 31: Posició angular eix longitudinal. Assaig 1.  $Ki=3.5$

### Anàlisi 3: aportació de l'acció proporcional, $K_p=0.5$

Per últim, en el darrer anàlisi es determina l'aportació de l'acció proporcional en el controlador durant el règim transitori, aplicant una  $K_p$  de 0.5.

En les gràfiques següents s'observa com la senyal de la posició de la plataforma pren un valor màxim notablement menor que en el cas anterior (és a dir que la plataforma s'inclina uns 5 graus menys abans de retornar a la seva posició inicial), mentre que per contra el temps d'establiment augmenta fins 1,5 segons.

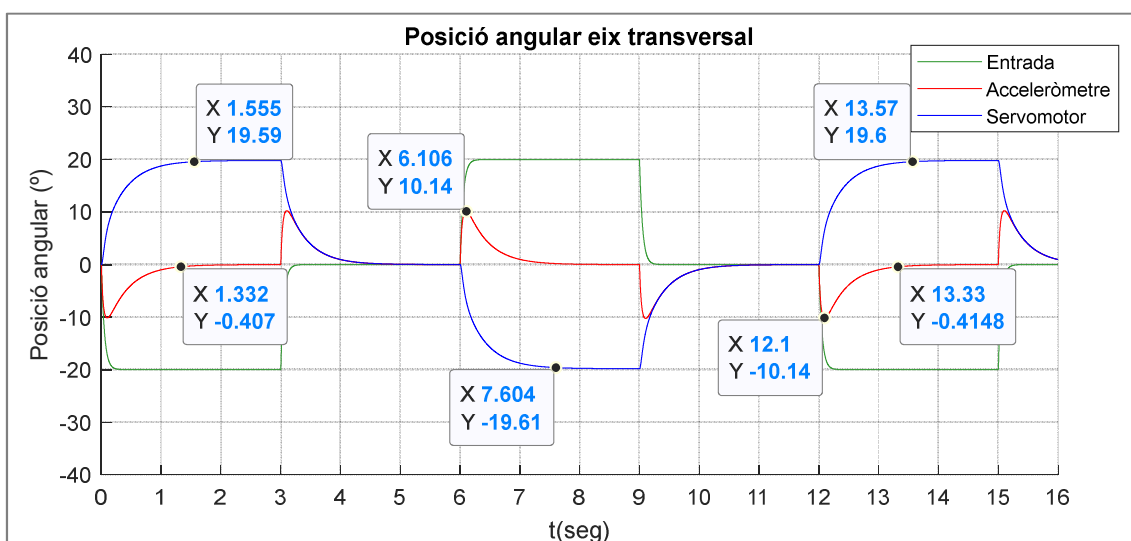


Figura 32: Posició angular eix transversal. Assaig 1.  $K_i=4$ ,  $K_p=0.5$

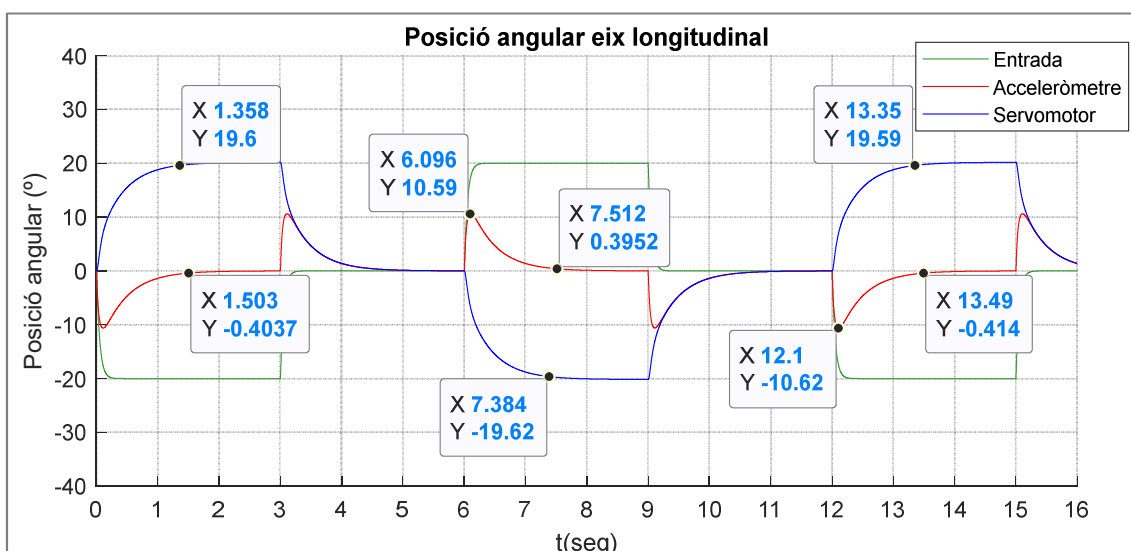


Figura 33: Posició angular eix longitudinal. Assaig 1.  $K_i=3.5$ ,  $K_p=0.5$



## Assaig 2: Corbes de Lissajous. Moviment en el pla XY

---

En aquest assaig se simula i es controla la trajectòria d'una esfera que es desplaça sobre la plataforma quan aquesta última està en moviment. **L'objectiu de l'assaig és aconseguir que l'esfera romangui en tot moment sobre la superfície de la plataforma** mentre s'apliquen diferents pertorbacions al sistema.

En aquest cas, s'introdueix al sistema una senyal que reproduïx una corba de Lissajous en el pla XY del sistema de referència per a simular un moviment suau i continu en els dos eixos. Els resultats obtinguts determinaran l'estabilitat del sistema en front a les pertorbacions aplicades.

La **corba de Lissajous** es representa en la simulació amb dues senyals sinodals de la mateixa amplitud però amb una relació de freqüències concreta que descriu el moviment harmònic compost desitjat, identificat per les següents equacions,

$$x = A \cdot \sin(a \cdot t + \delta)$$

$$y = B \cdot \sin(b \cdot t)$$

on  $A$  i  $B$  són el valor de l'amplitud,  $a$  i  $b$  són les freqüències i  $\delta$  és la fase inicial. **Variant el valor de la relació  $a/b$  obtenim diferents corbes.**

A continuació es mostren les corbes usades en aquest assaig:

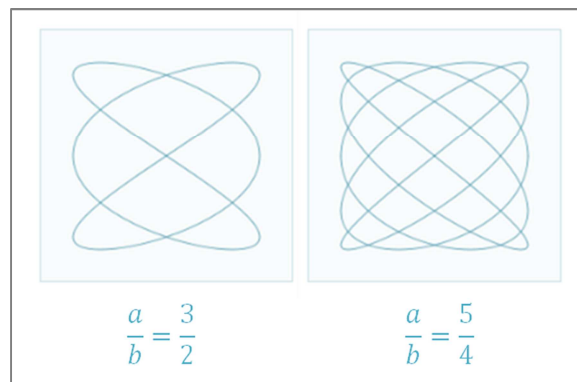


Figura 34: Corbes de Lissajous de la simulació

Per a realitzar aquest assaig és necessari fer alguns canvis en l'esquema de simulació. Així doncs, s'afegeix una nova unitat que engloba el bloc de l'esfera i els sensors de lectura corresponents, representat en l'esquema de color vermell.

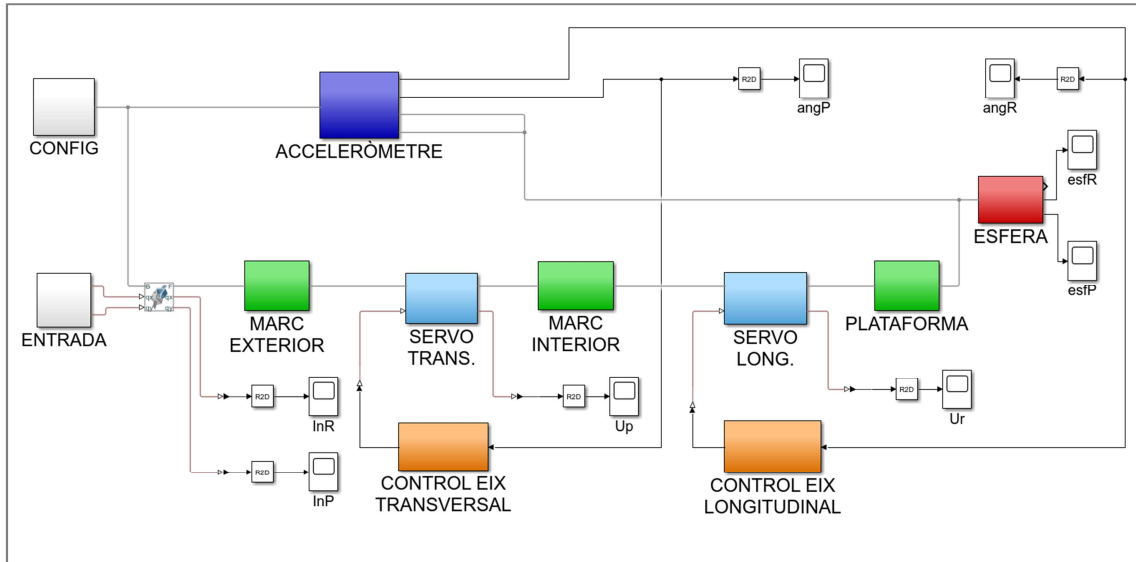


Figura 35: Esquema de simulació amb l'esfera

En primer lloc, cal **crear un nou cos rígid que simbolitzi una esfera de 5 mm de radi**. L'esfera es connecta amb la plataforma amb una junta de 6 graus de llibertat i un bloc de **desplaçament lineal de 5mm de distància en l'eix Z**, des d'on caurà l'esfera sobre la plataforma com a primer contacte.

Amb l'ajuda de la llibreria *Contact Forces* de *Simscape Multibody* es poden simular les forces que es generen amb el contacte entre dos cossos rígids. En aquest cas, s'utilitza un **bloc de contacte d'esfera contra pla** per a simular el contacte entre l'esfera i la superfície de la plataforma.

Al bloc de contacte esfera contra pla, cal **configurar les variables físiques** següents per a aconseguir una simulació el màxim de realista possible. Tenint en compte que els materials escollits per a la simulació són plàstic lleuger per a la plataforma i acer per a l'esfera, la configuració és la següent:

- **Rigidesa de contacte** (*contact stiffness*):  $1 \cdot 10^4$  N/m
- **Amortització del contacte** (*contact damping*): 10 N/(m/s)
- **Coefficient de fricció estàtic** (*kinetic friction*): 0.3
- **Coefficient de fricció cinètic** (*static friction*): 0.4
- **Lindar de velocitat** (*velocity threshold*): 1 m/s

Per últim, es col·loca també un **sensor per a la lectura de la posició de l'esfera respecte de la plataforma**. Aquest sensor és similar al usat per a l'acceleròmetre però, en aquest cas, **llegeix desplaçament lineal** en els eixos X (longitudinal) i Y (transversal).

Un cop configurats tots els paràmetres necessaris, l'esquema de la unitat de l'esfera queda de la següent manera, on es mostren tots els blocs explicats a la pàgina anterior.

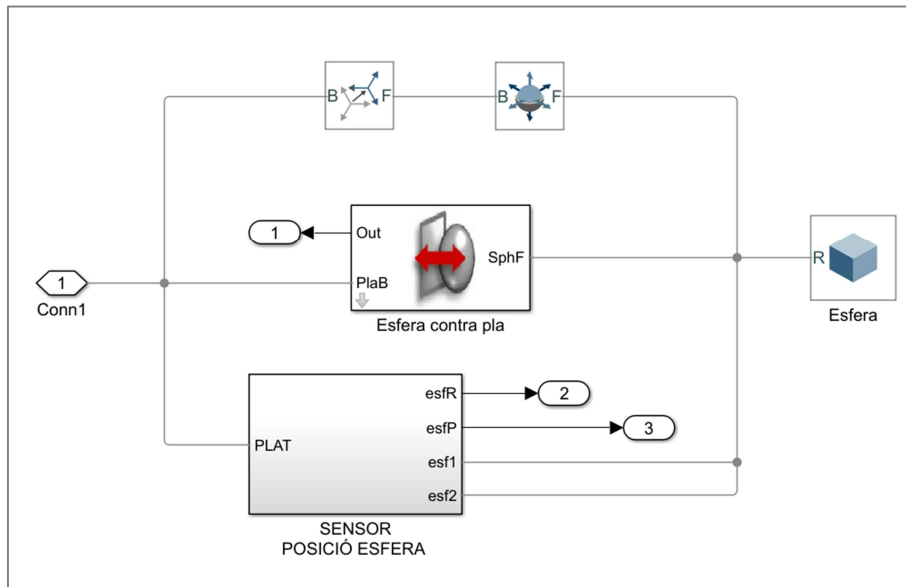


Figura 36: Esquema de simulació de l'esfera

Finalment, el model CAD obtingut amb l'esfera, es visualitza de la següent manera durant les animacions:

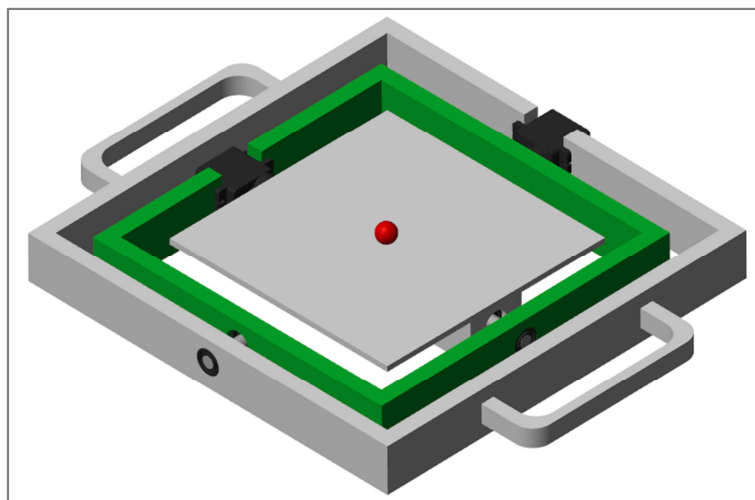


Figura 37: Model CAD amb l'esfera

## Senyal d'entrada

Com en l'assaig anterior, l'entrada que s'introdueix en el model de *Simulink* està formada, en cada eix de rotació, per la senyal sinodal corresponent i la funció de transferència que representa el retard que es produeix al moure manualment el prototip per a aplicar girs corresponents en els dos eixos.

L'amplitud de la senyal sinodal és de 5 graus, tant en l'eix longitudinal com l'eix transversal, i les relacions de freqüències dels anàlisis són les indicades anteriorment.

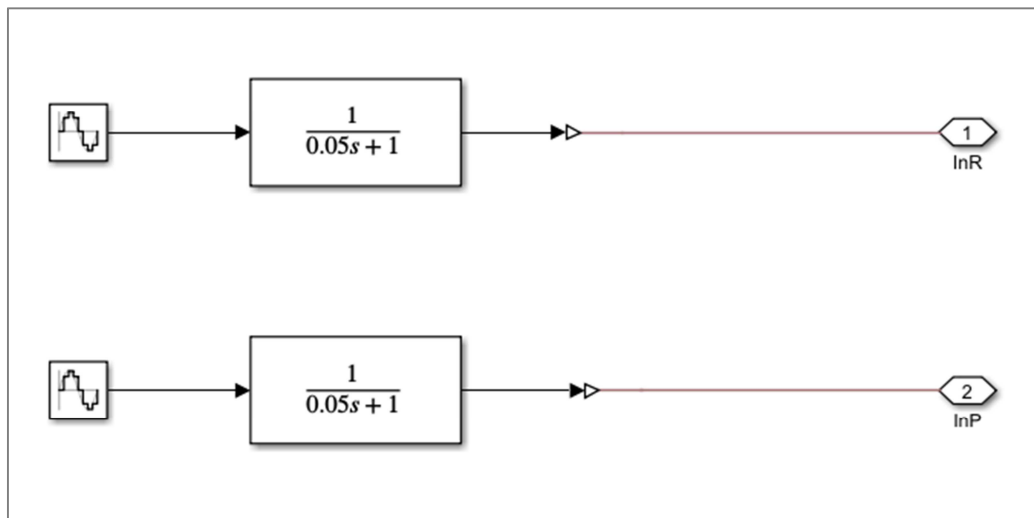


Figura 38: Corbes de Lissajous d'entrada

Per a assolir l'objectiu de l'assaig, es varia el valor de  $K_i$  dels respectius controls fins a aconseguir el comportament desitjat. Els valors inicials del guany integral seran similars als determinats en l'assaig anterior.

Es considera que el sistema es estable quan l'esfera roman sobre la plataforma durant tota la simulació de la corba de Lissajous amb el menor desplaçament possible.

Per això, a banda de tenir en compte la correcció del servomotor, **cal comprovar que la lectura de l'acceleròmetre pren en tot moment valors propers als 0 graus**, cosa que indica que la plataforma es manté sempre horitzontal.

Amb els resultats dels diferents anàlisis que es duen a terme en aquest assaig, s'obté la següent informació:

- La forma de la corba de Lissajous introduïda en l'entrada
- La lectura de l'acceleròmetre
- La correcció de la senyal del servomotor
- La trajectòria de l'esfera sobre la plataforma, delimitant les mides de la plataforma (127,2 x 127,2 mm)

### Entrada

La senyal d'entrada amb la **relació de freqüències 3:2** pren la forma que es mostra en les gràfiques següents, on es descriu el moviment que s'introdueix al sistema per a simular les pertorbacions externes.

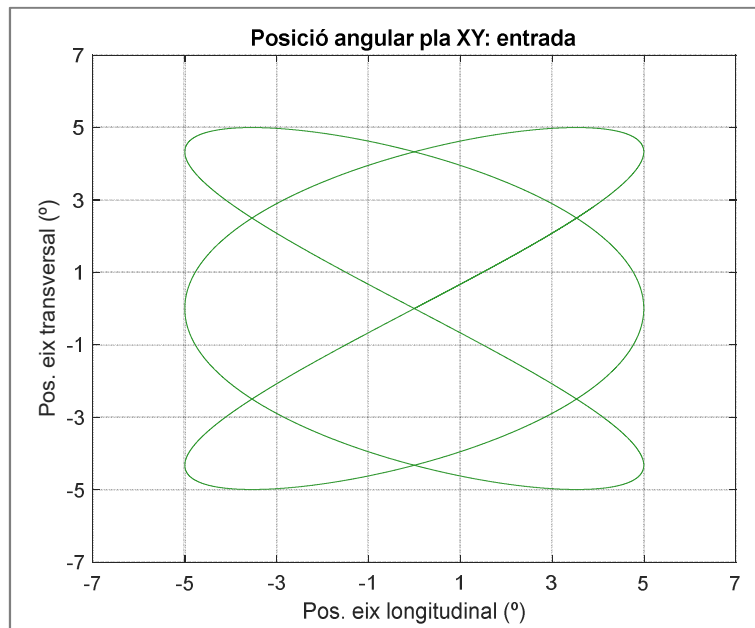


Figura 39: Corba Lissajous 3:2 a l'entrada del sistema

En la imatge anterior s'indica la posició angular que adopta el marc exterior en els dos eixos de rotació, mentre que en la gràfica següent es pot observar l'evolució de la senyal d'entrada durant el temps de simulació, on es comprova la relació de freqüències.

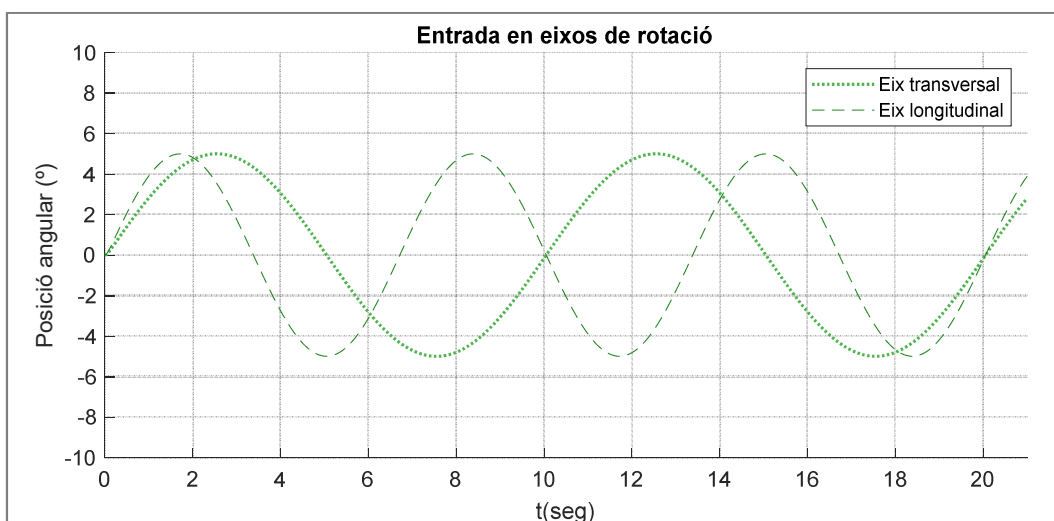


Figura 40: Posició angular a l'entrada amb relació 3:2

## Resultats amb Ki: 6-4

Tenint en compte que la relació de freqüències és de 3:2, s'assignen uns valors de  $Ki$  similars als determinats en el primer assaig, però que compleixin la relació esmentada:  $Ki=6$  (eix longitudinal),  $Ki=4$  (eix transversal).

En les gràfiques següents es compara la **senyal de sortida del servomotor** (canviada de signe) amb la senyal d'entrada. S'observa que el servomotor corregeix la posició però la resposta **presenta un retard respecte de la senyal d'entrada**.

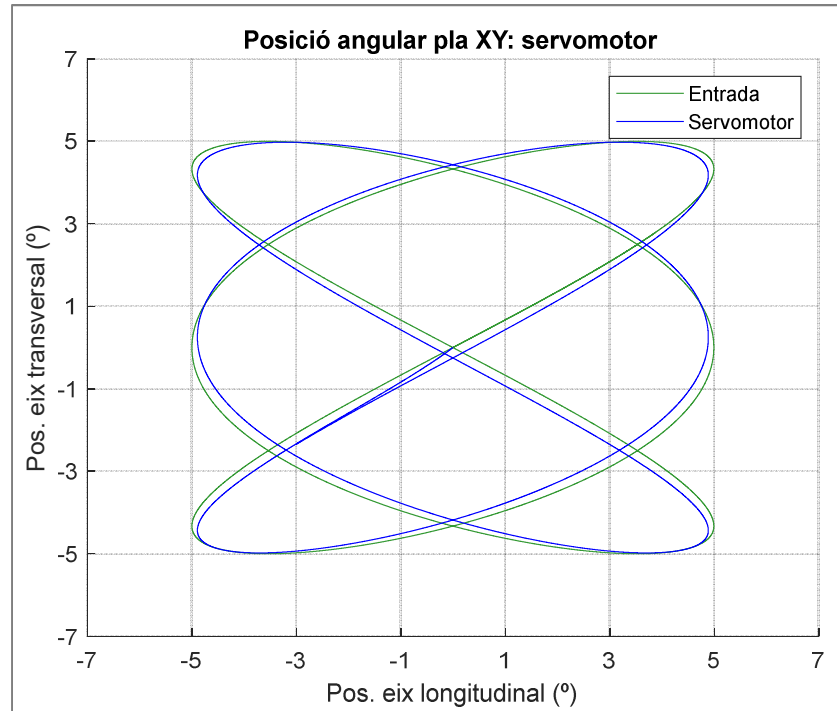


Figura 41: Sortida servomotor. Relació 3:2. Ki: 6-4

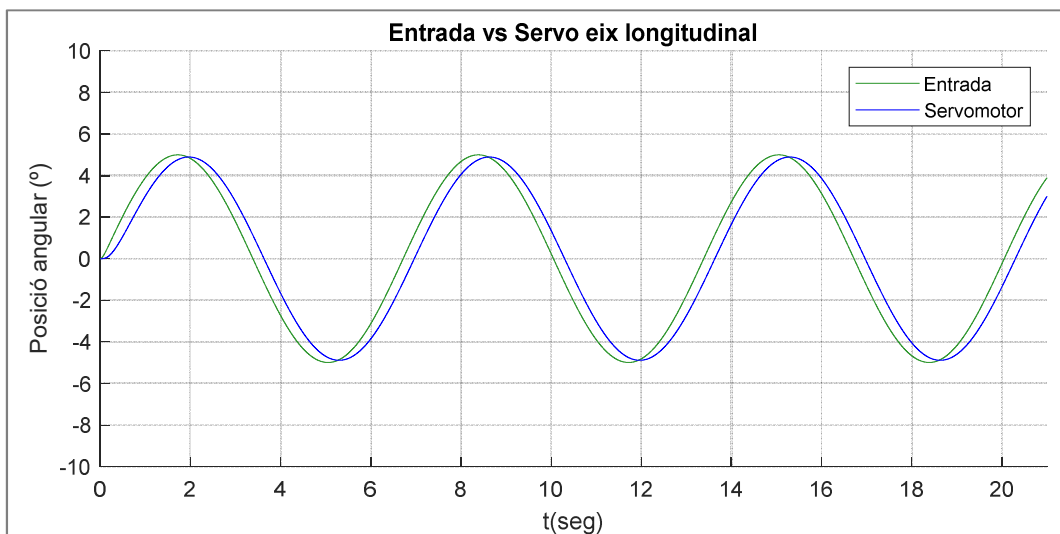


Figura 42: Sortida servomotor longitudinal. Relació 3:2. Ki=4

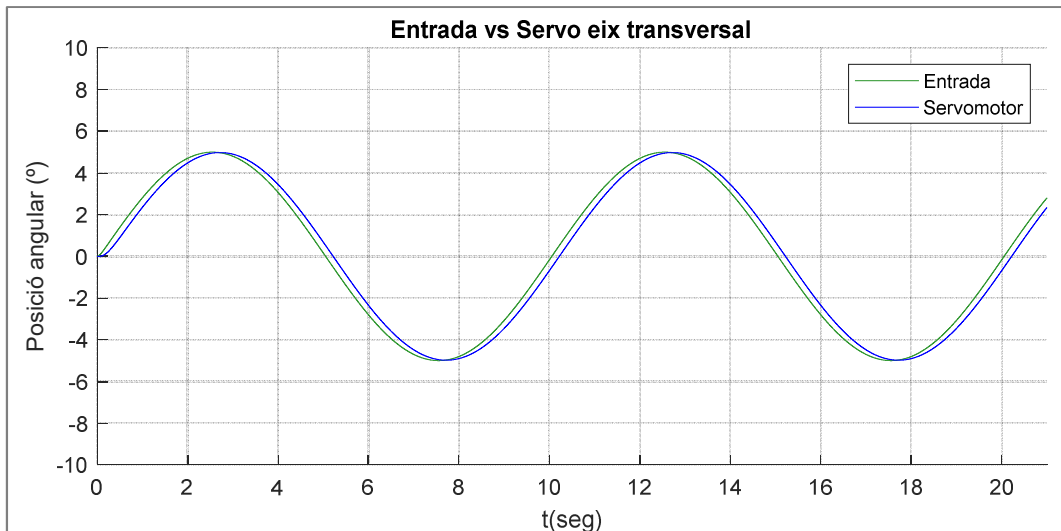


Figura 43: Sortida servomotor transversal. Relació 3:2.  $K_i=6$

En la figura següent, que representa **la trajectòria de l'esfera** sobre la plataforma, s'aprecia com la correcció del servomotor no és suficientment ràpida i precisa, ja que **l'esfera cau ràpidament** al posar-se en moviment el mecanisme, superant els límits de la plataforma delimitats pel rectangle.

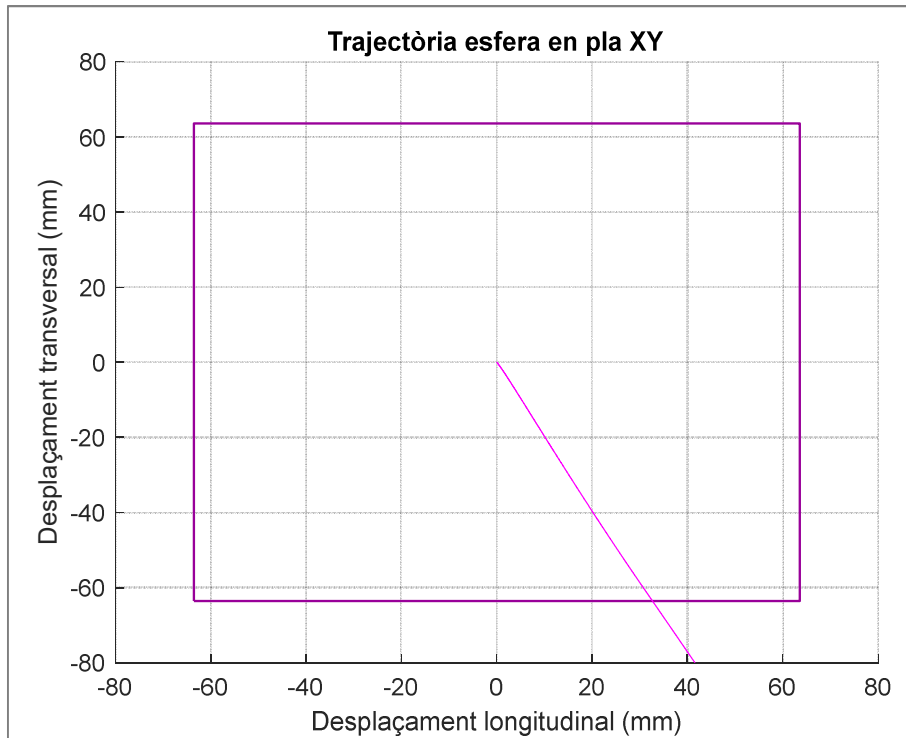


Figura 44: Trajectòria de l'esfera. Relació 3:2.  $K_i: 6-4$

Pel que fa a la **lectura de l'acceleròmetre**, s'observa que la plataforma s'inclina aproximadament  $\pm 0.5$  graus en l'eix transversal i  $\pm 1.25$  graus en l'eix longitudinal.

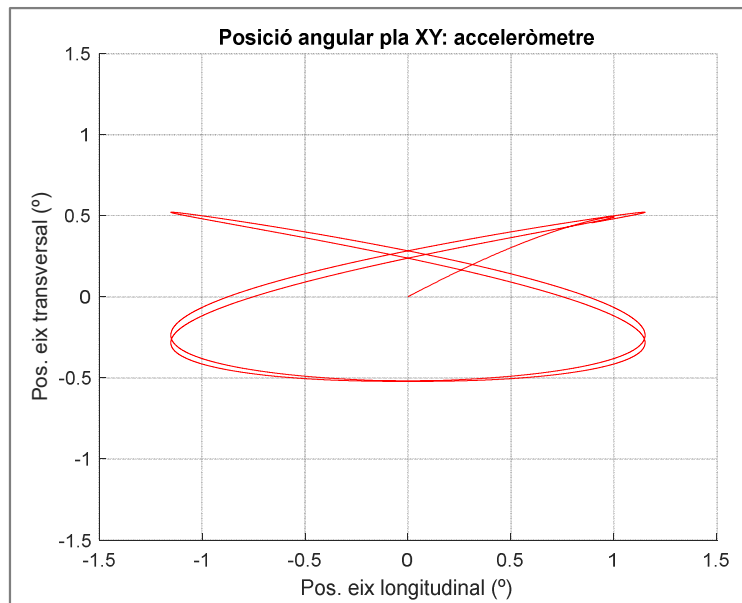


Figura 45: Acceleròmetre. Relació 3:2. Ki: 6-4

### Resultats amb Ki: 31.5-21

En aquest cas, s'ha augmentat el valor de  $K_i$  en els dos eixos, mantenint la relació 3:2, a  $K_i=21$  (eix longitudinal) i  $K_i=31.5$  (eix transversal). Les imatges següents mostren la sortida del servomotor comparat amb la senyal d'entrada.

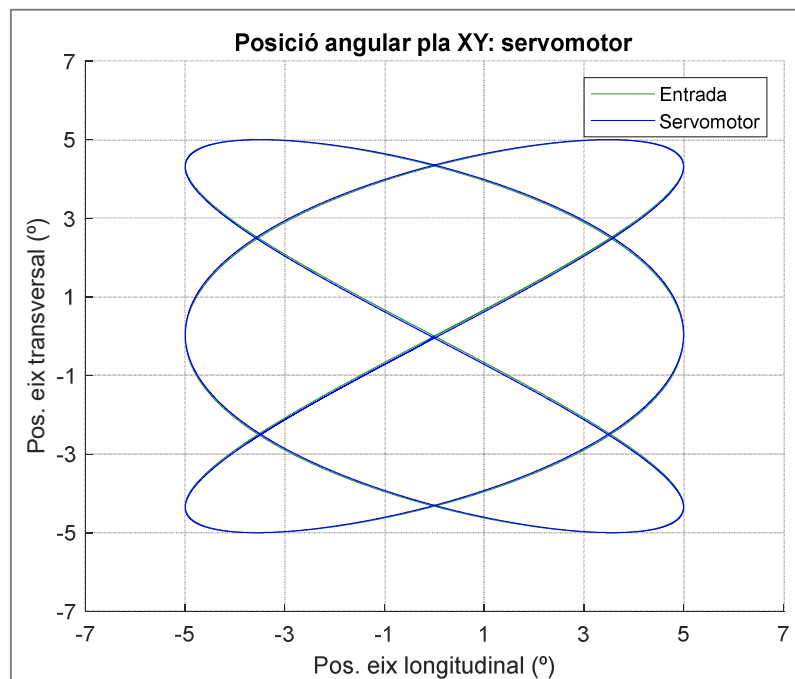


Figura 46: Sortida servomotor. Relació 3:2. Ki: 31.5-21



Les imatges de sota mostren la comparació de la senyal de sortida del servomotor (canviada de signe per a la comparació) amb la senyal d'entrada.

S'observa que **el retard de la senyal del servomotor és mínim**, quasi imperceptible en les imatges, i el sistema és capaç de mantenir l'esfera sobre la plataforma en tot moment.

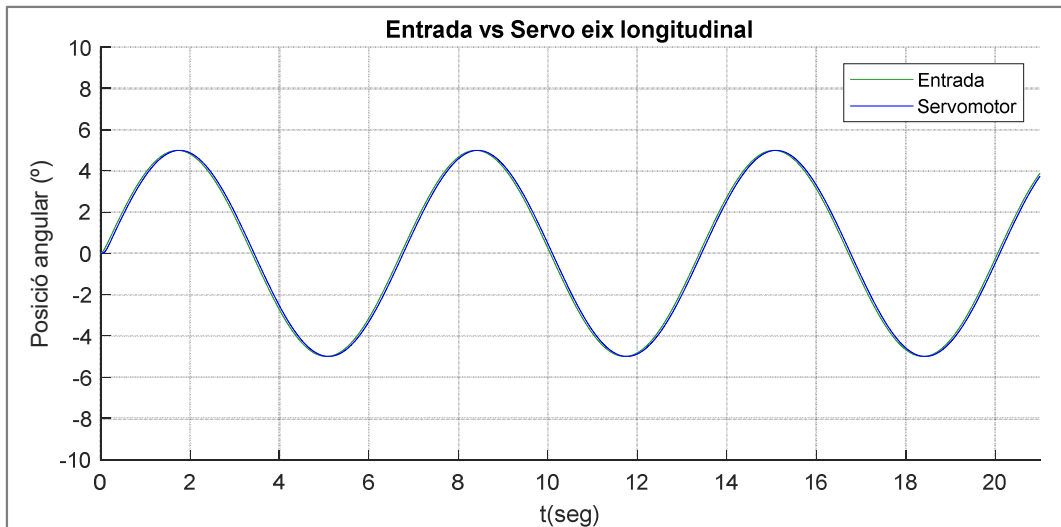


Figura 47: Sortida servomotor longitudinal. Relació 3:2.  $K_i=21$

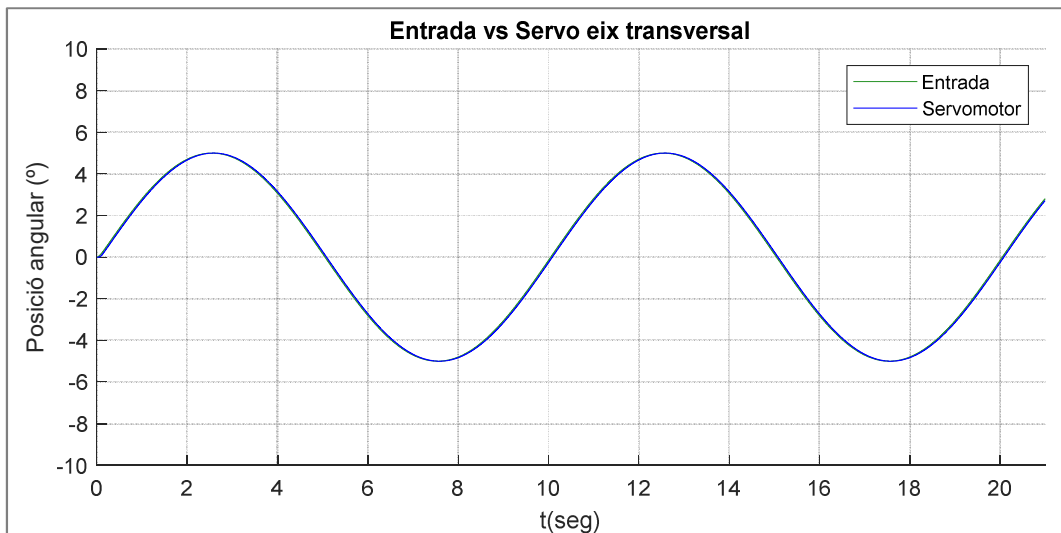


Figura 48: Sortida servomotor transversal. Relació 3:2.  $K_i=31.5$

En la gràfica següent s'observa com **la trajectòria de l'esfera** arriba als límits de la plataforma sense sobrepassar-la.

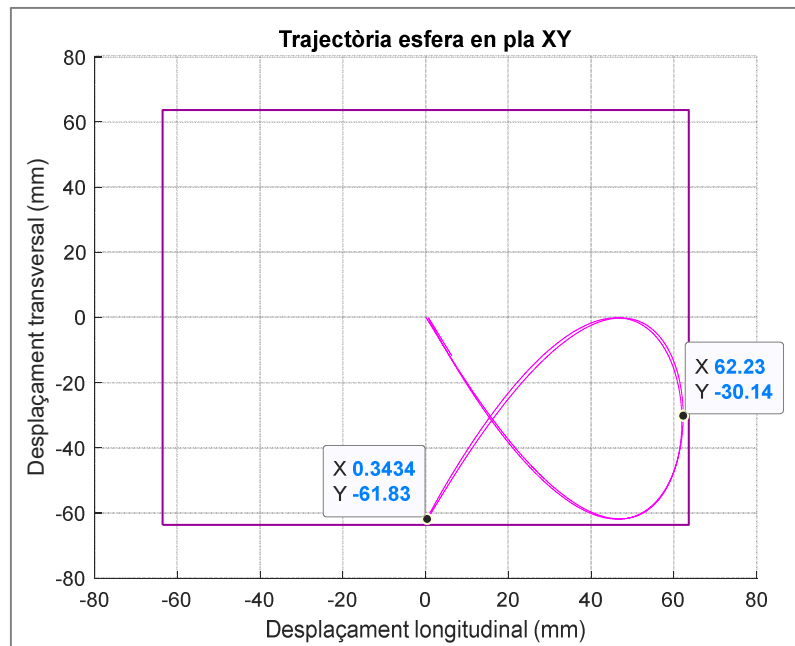


Figura 49: Trajectòria de l'esfera. Relació 3:2. Ki: 31.5-21

A la **lectura de l'acceleròmetre** s'observa que les inclinacions màximes de la plataforma es redueixen notablement, comparat amb la configuració anterior, ja que el servomotor corregeix més ràpidament les pertorbacions d'entrada.

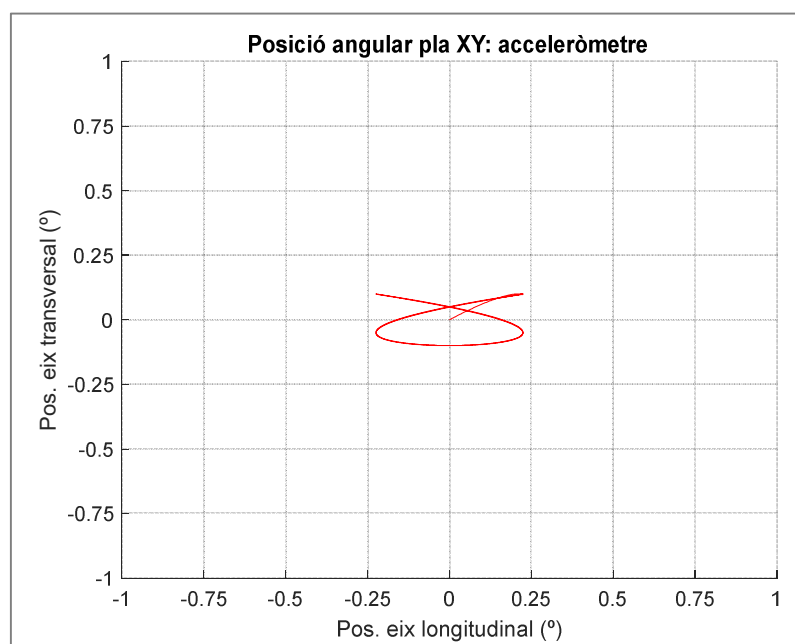


Figura 50: Acceleròmetre. Relació 3:2. Ki: 31.5-21

## Resultats amb Ki: 60-40

Finalment, s'escullen uns valors de  $Ki$  adients per a mantenir l'esfera allunyada dels límits de la plataforma:  $Ki=40$  (longitudinal),  $Ki=60$  (transversal).

En les gràfiques següents es pot comprovar que la **correcció del servomotor és quasi immediata** i molt precisa, ja que no s'aprecia cap retard de la senyal de sortida del servomotor.

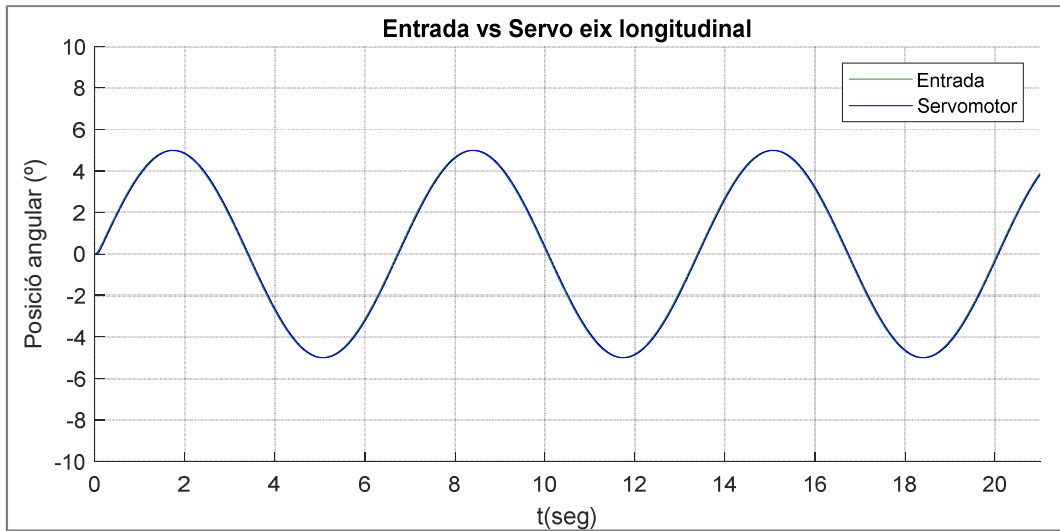


Figura 51: Sortida servomotor longitudinal. Relació 3:2.  $Ki=40$

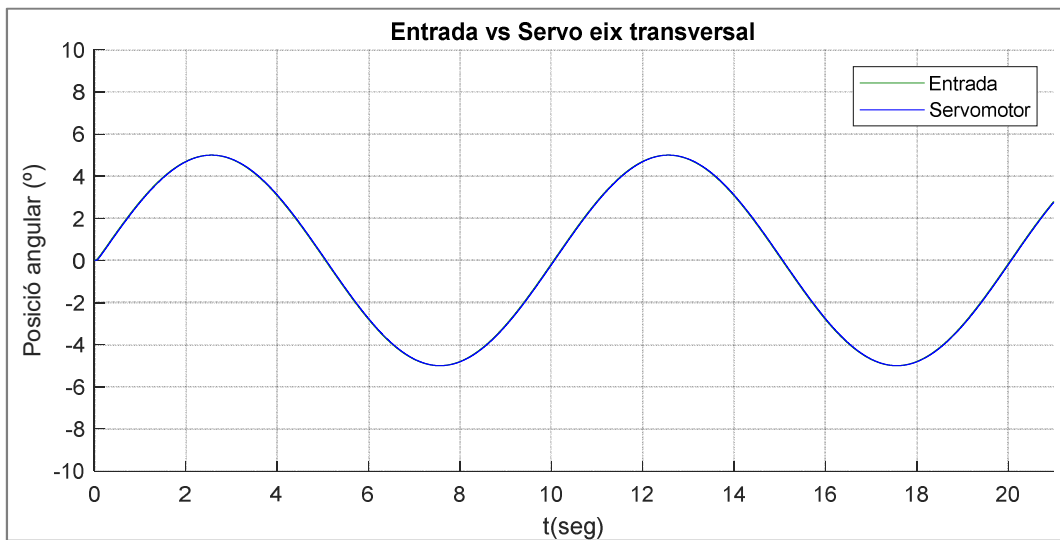


Figura 52: Sortida servomotor transversal. Relació 3:2.  $Ki=60$

En la imatge següent s'aprecia que **la inclinació de la plataforma** és mínima, ja que el servomotor corregeix les pertorbacions quasi immediatament.

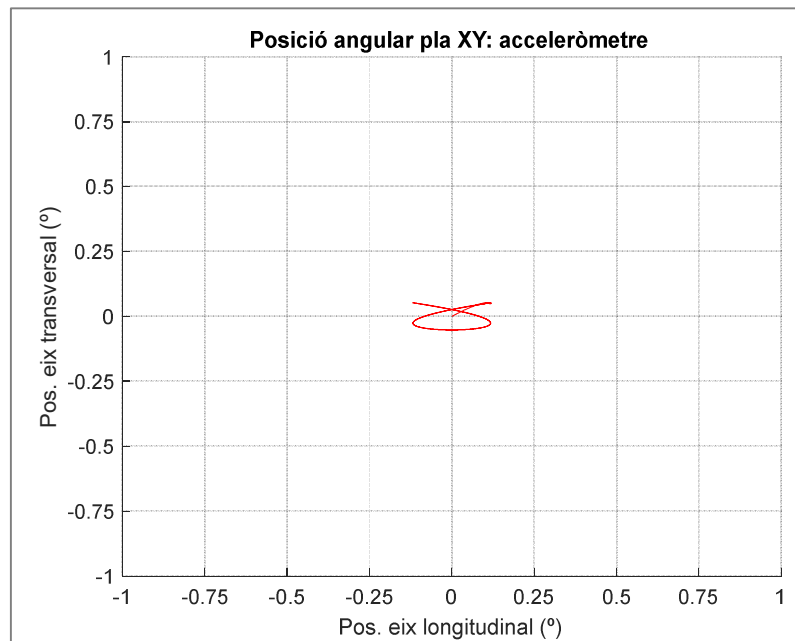


Figura 53: Acceleròmetre. Relació 3:2. Ki: 40-60

Per últim, en aquesta figura, s'aprecia clarament que **la trajectòria de l'esfera roman quasi centrada en la plataforma**, sense perill de caure.

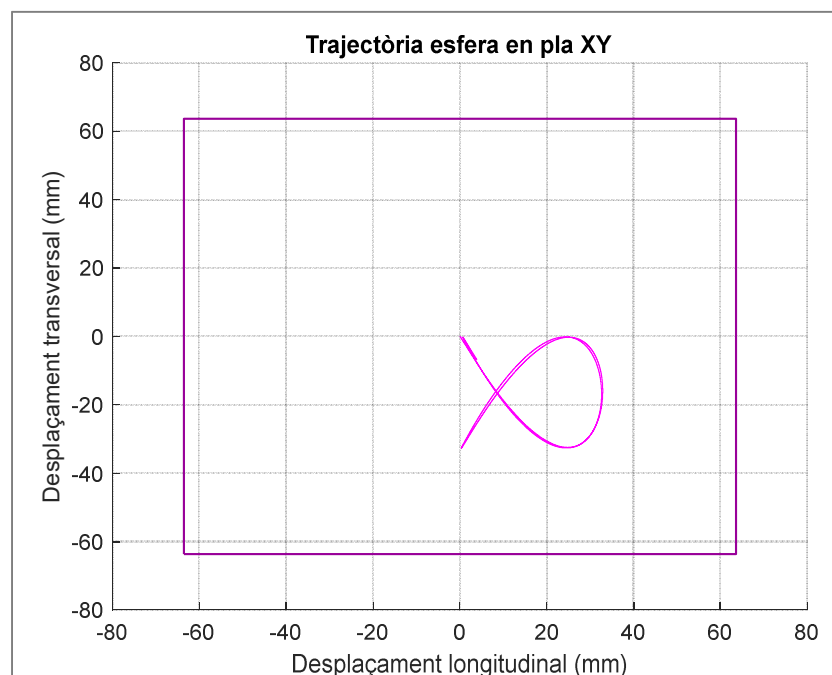


Figura 54: Trajectòria de l'esfera. Relació 3:2. Ki: 60-40

## Anàlisi 2. Relació 5:4

### Entrada

L'entrada del sistema, que s'introdueix al sistema per a simular les pertorbacions externes, pren la forma següent amb **la relació de freqüències 5:4**.

En les gràfiques següents es mostra, respectivament, la posició angular que adopta el marc exterior en els dos eixos de rotació i l'evolució de la senyal d'entrada durant el temps de simulació, on es comprova la relació de freqüències.

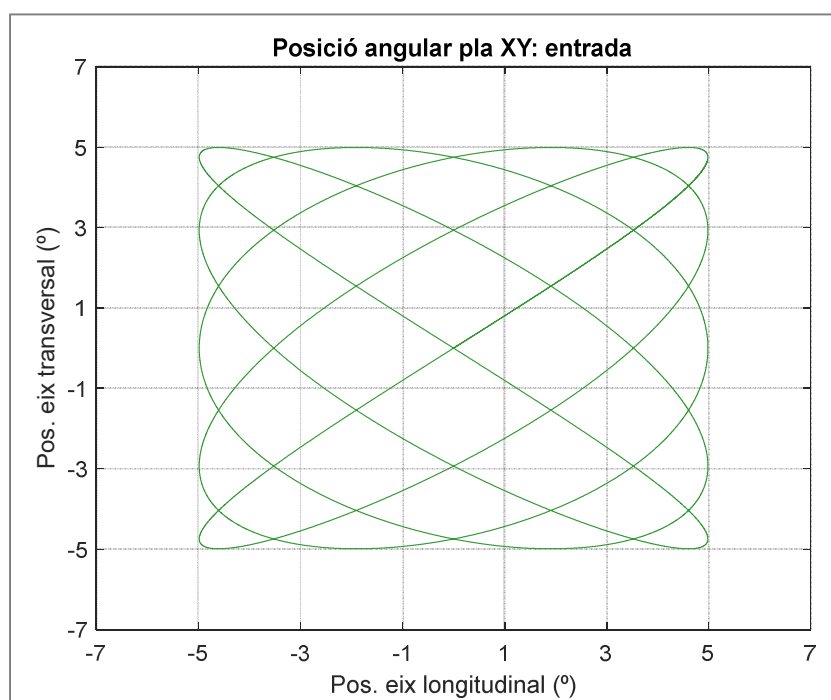


Figura 55: Corba de Lissajous 5:4

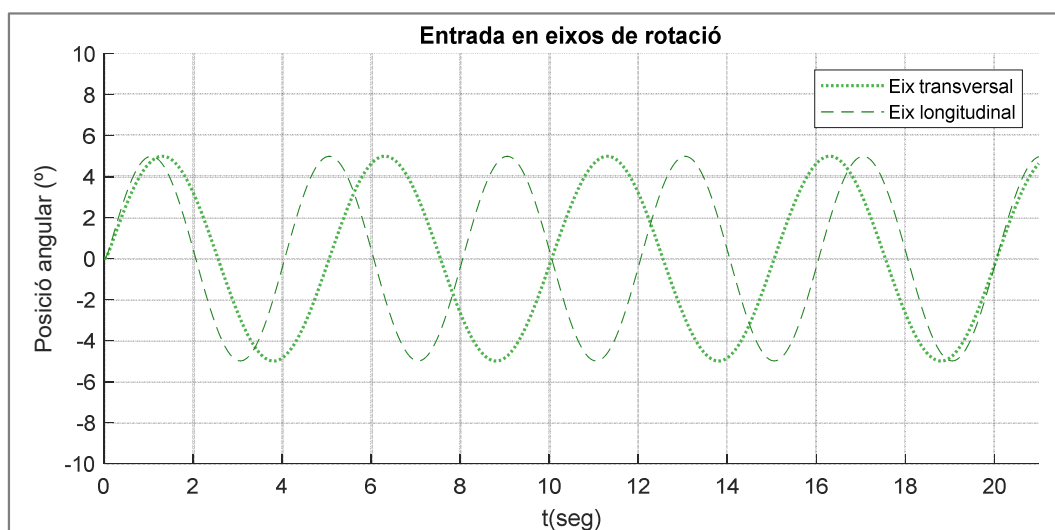


Figura 56: Posició angular a l'entrada, relació 5:4

## Resultats amb Ki: 5-4

Primerament, s'estableixen uns valors de  $K_i$  similars als obtinguts en l'assaig dels escalons però amb una relació de 5:4,  $K_i=5$  (eix longitudinal) i  $K_i=4$  (transversal).

En les gràfiques següents es compara la senyal de sortida del servomotor (canviada de signe) amb la senyal d'entrada. S'observa que el servomotor corregeix la posició però la resposta **presenta un retard respecte de la senyal d'entrada**.

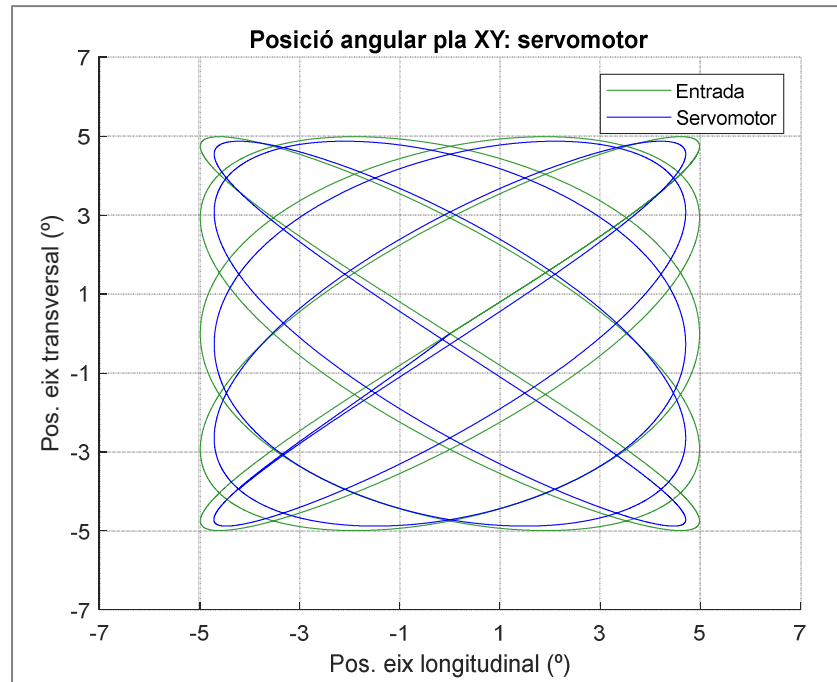


Figura 57: Sortida servomotor. Relació 5:4.  $K_i$ : 5-4

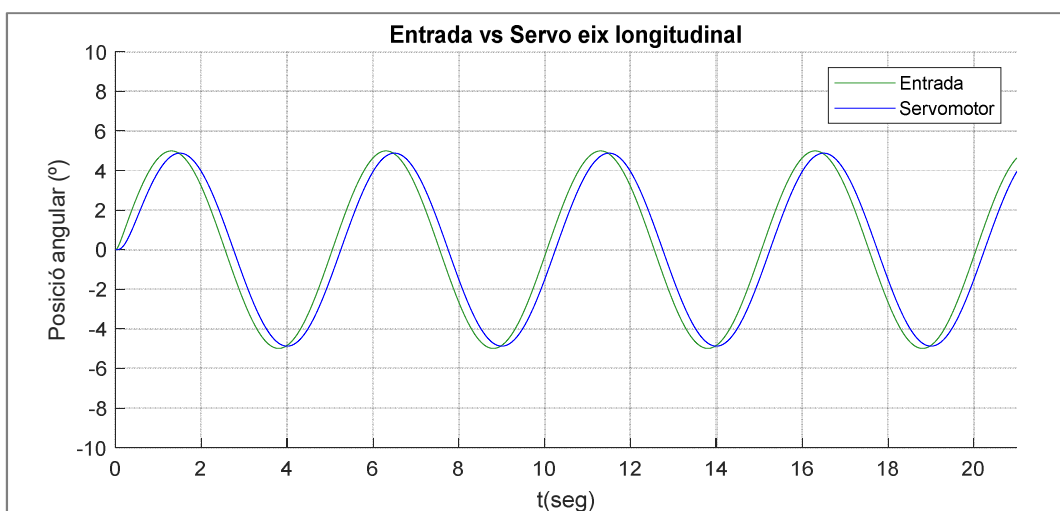


Figura 58: Sortida servomotor longitudinal. Relació 5:4.  $K_i=4$

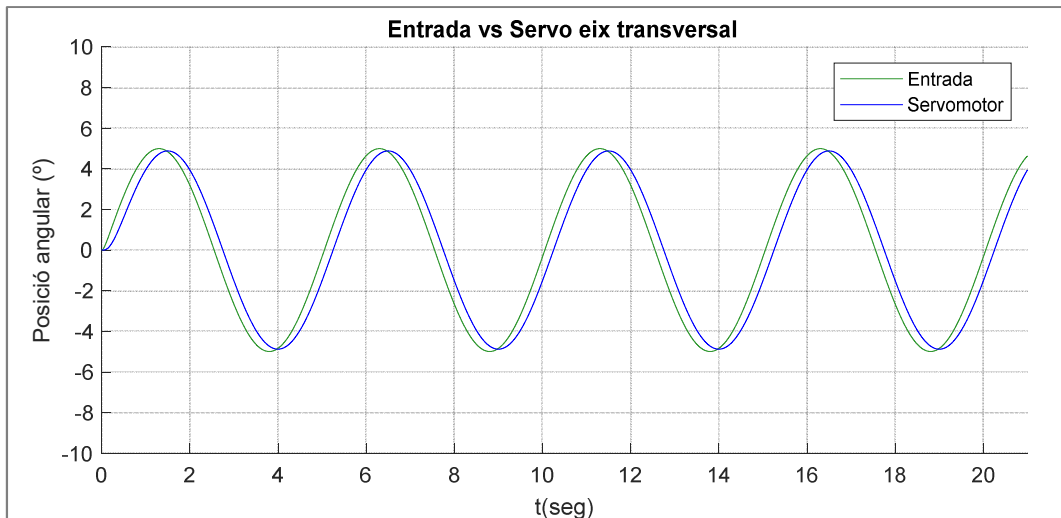


Figura 59: Sortida servomotor transversal. Relació 5:4.  $K_i=5$

En la figura següent, s'aprecia com **l'esfera cau ràpidament al posar-se en moviment el mecanisme**, ja que la seva trajectòria supera els límits de la plataforma delimitats pel rectangle.

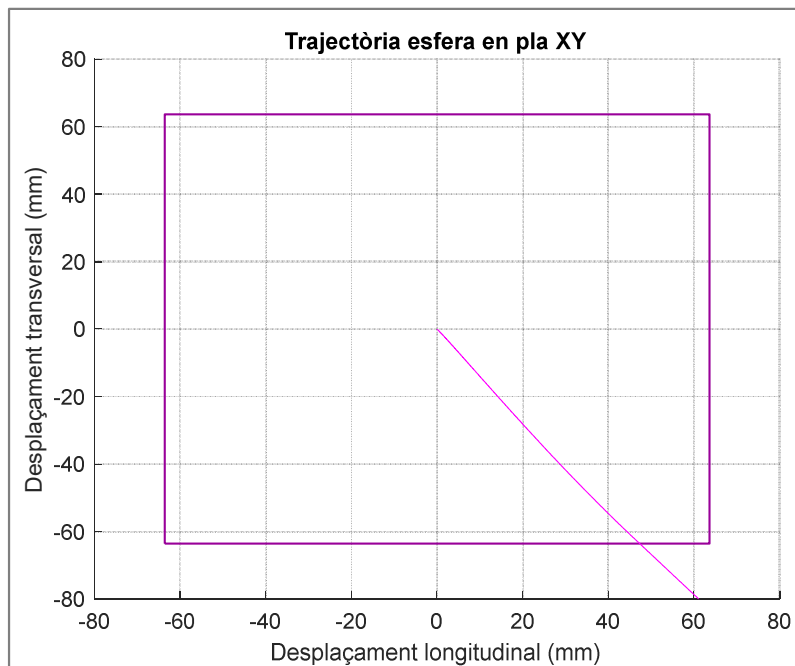


Figura 60: Trajectòria de l'esfera. Relació 5:4.  $K_i: 5-4$

Pel que fa a la **lectura de l'acceleròmetre**, s'observa que la plataforma oscil·la aproximadament  $\pm 1.25$  graus en l'eix transversal i  $\pm 1.8$  graus en l'eix longitudinal.

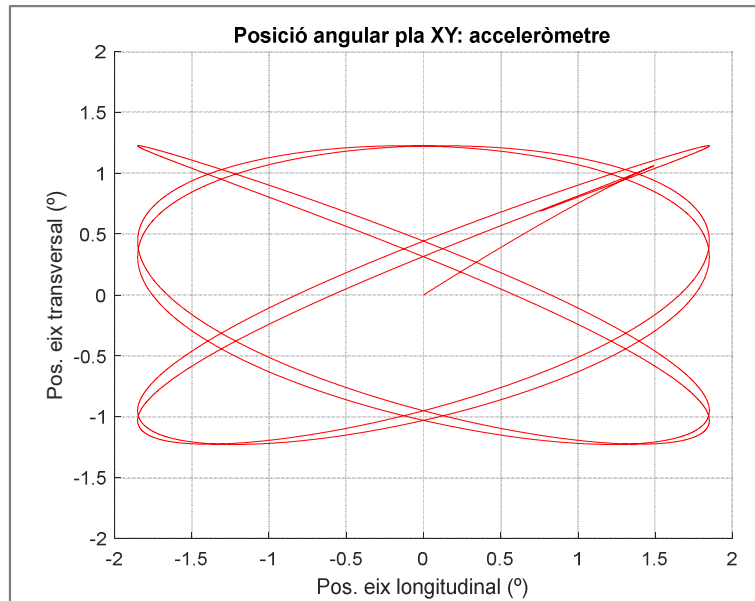


Figura 61: Acceleròmetre. Relació 5:4. Ki: 5-4

### Resultats amb Ki: 16-12.8

En aquest cas, s'ha augmentat el valor de  $K_i$  en els dos eixos, mantenint la relació 5:4, a  $K_i=12.8$  (eix longitudinal) i  $K_i=16$  (eix transversal). Les imatges següents mostren la sortida del servomotor comparat amb la senyal d'entrada.

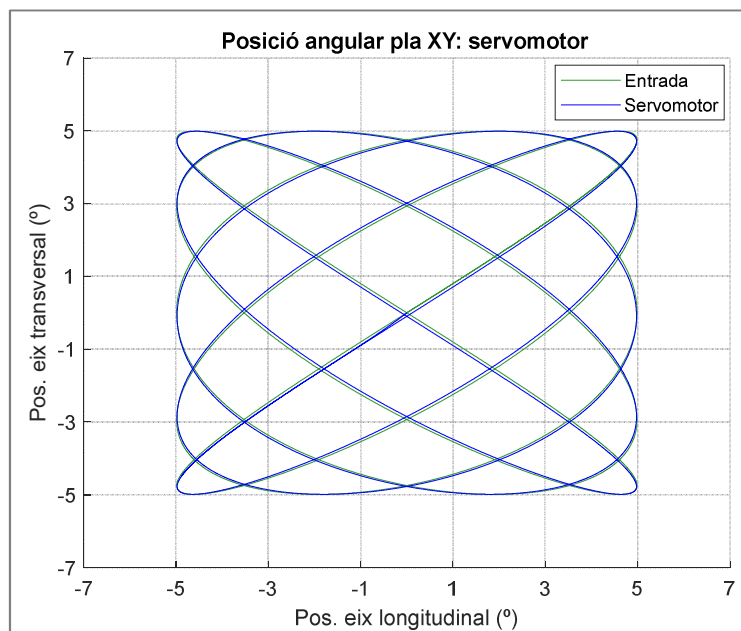


Figura 62: Servomotor. Relació 5:4. Ki: 16-12.8



Les imatges de sota mostren la comparació de la senyal de sortida del servomotor (canviada de signe per a la comparació) amb la senyal d'entrada.

S'observa que **el retard de la senyal del servomotor és mínim**, quasi imperceptible en les imatges, i el sistema és capaç de mantenir l'esfera sobre la plataforma en tot moment.

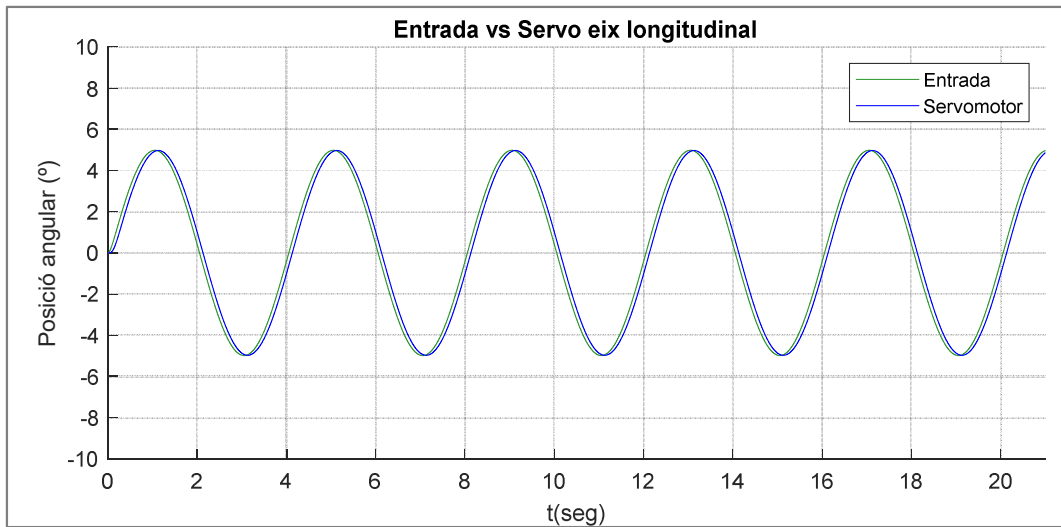


Figura 63: Sortida servomotor longitudinal. Relació 5:4.  $K_i=12.8$

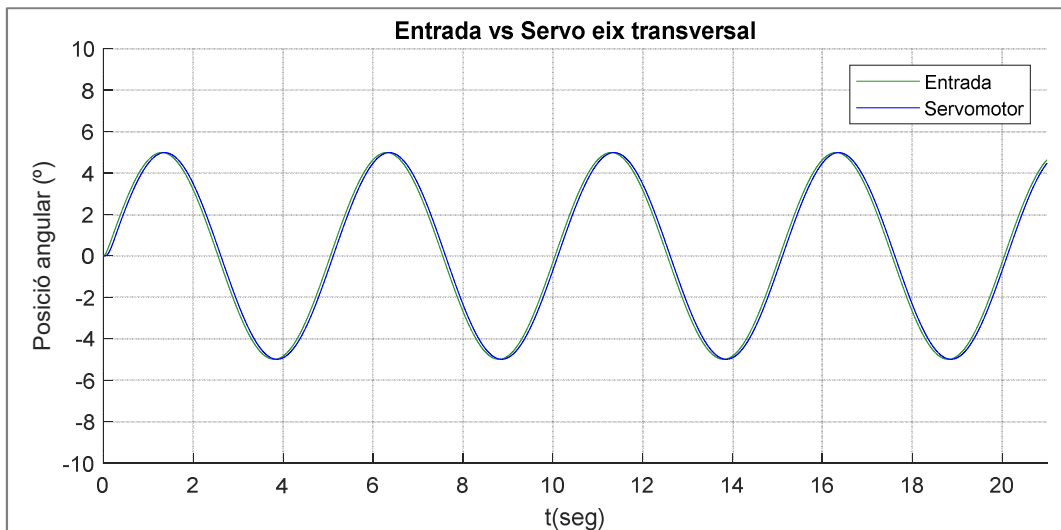


Figura 64: Sortida servomotor transversal. Relació 5:4.  $K_i=16$

En la gràfica següent s'observa com **la trajectòria de l'esfera** arriba als límits de la plataforma sense sobrepassar-la.

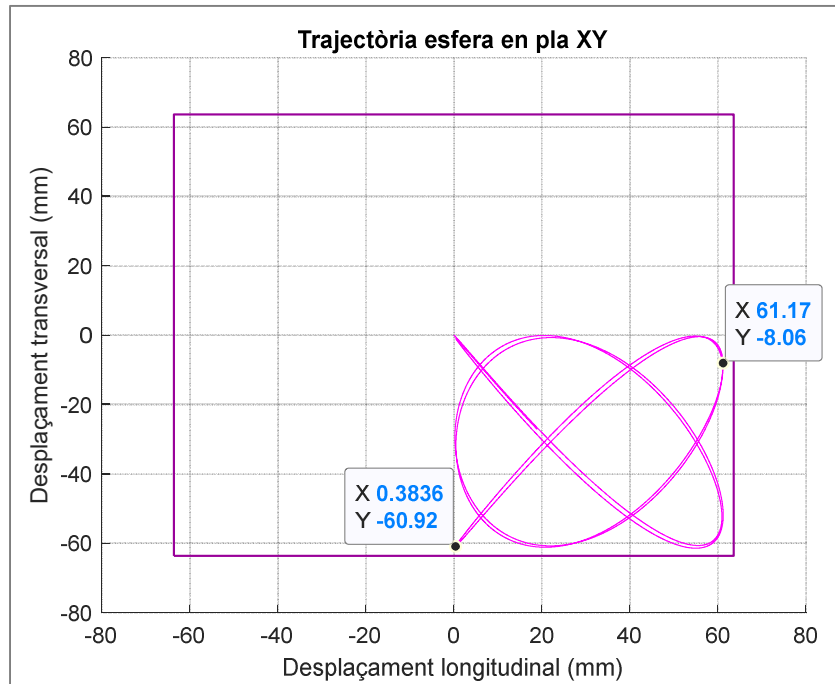


Figura 65: Trajectòria de l'esfera. Relació 5:4. Ki: 16-12.8

A la **lectura de l'acceleròmetre** s'observa que les inclinacions màximes de la plataforma es redueixen notablement, comparat amb la configuració anterior, ja que el servomotor corregeix més ràpidament les pertorbacions d'entrada.

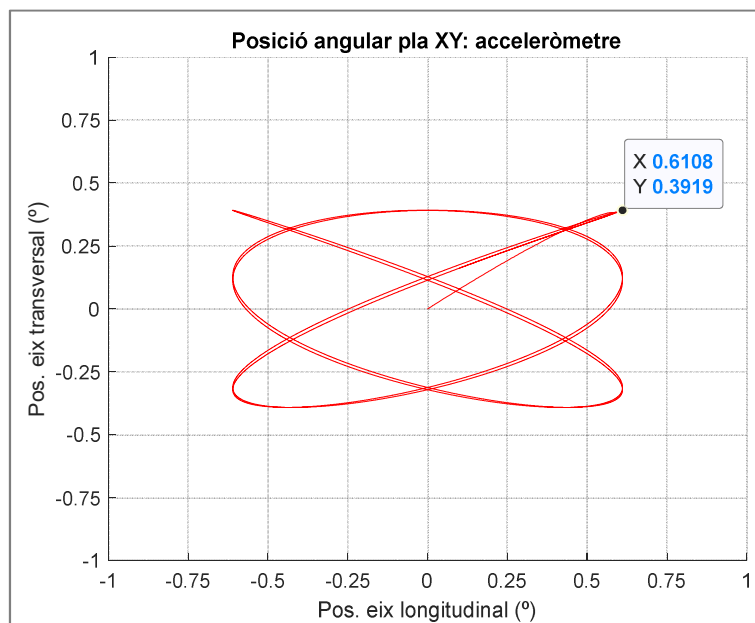


Figura 66: Acceleròmetre. Relació 5:4. Ki: 16-12.8

## Resultats amb Ki: 50-40

Finalment, s'escullen uns valors de  $Ki$  adients per a mantenir l'esfera allunyada dels límits de la plataforma:  $Ki=40$  (longitudinal),  $Ki=50$  (transversal).

En les gràfiques següents es pot comprovar que la **correcció del servomotor és quasi immediata** i molt precisa, ja que no s'aprecia cap retard de la senyal de sortida del servomotor.

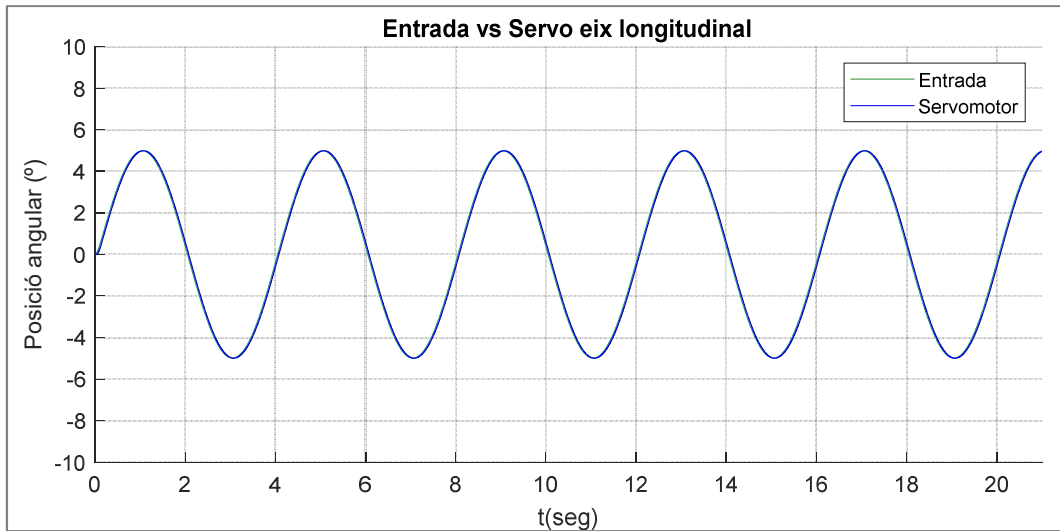


Figura 67: Sortida servomotor longitudinal. Relació 5:4. Ki: 50-40

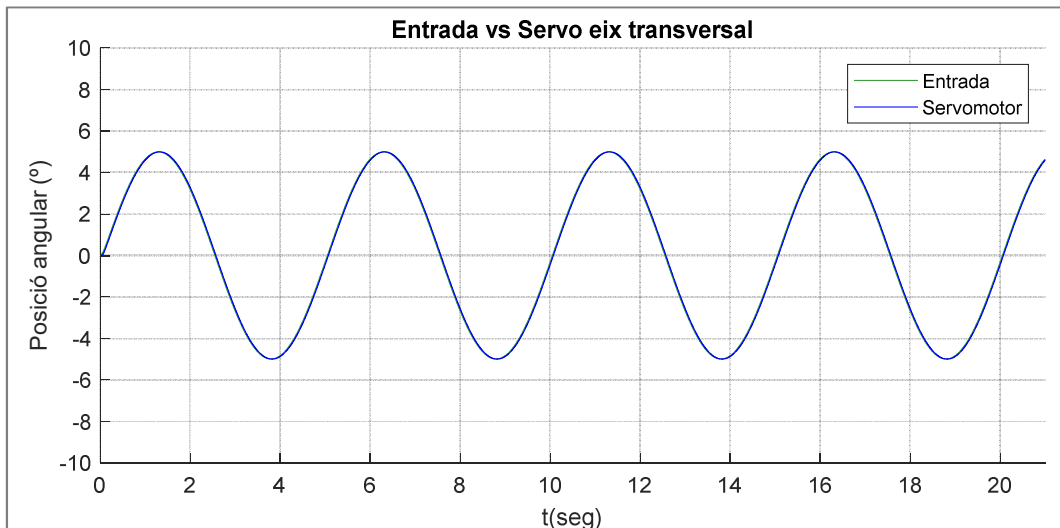


Figura 68: Sortida servomotor transversal. Relació 5:4. Ki: 50-40

En la imatge següent s'aprecia que **la inclinació de la plataforma** és mínima, ja que el servomotor corregeix les pertorbacions quasi immediatament.

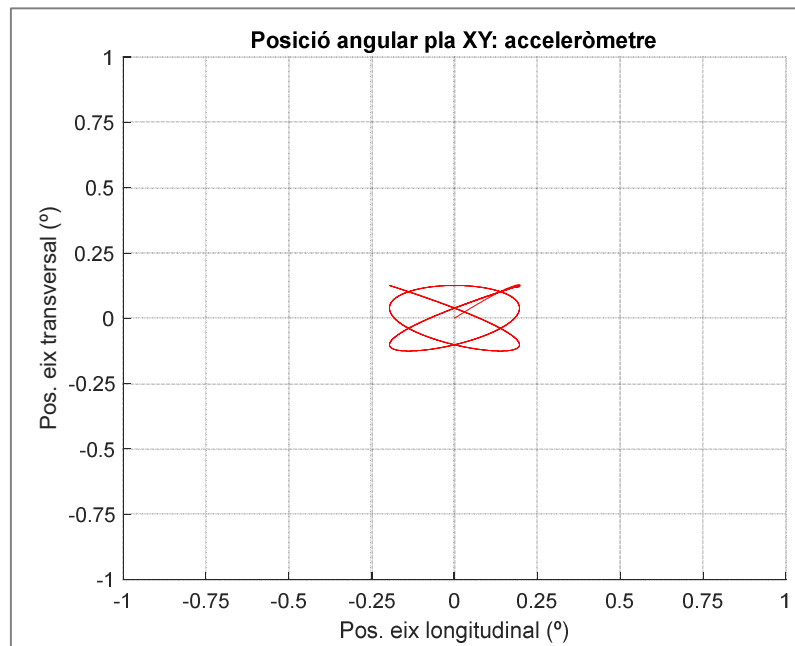


Figura 69: Acceleròmetre. Relació 5:4. Ki: 50-40

Finalment, en aquesta figura, s'aprecia clarament que **la trajectòria de l'esfera roman quasi centrada en la plataforma**, sense perill de caure.

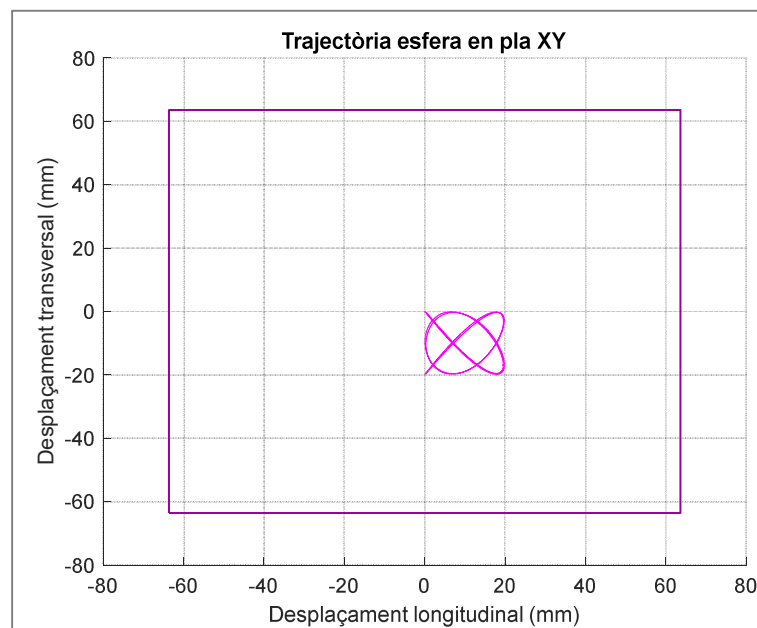


Figura 70: Trajectòria de l'esfera. Relació 5:4. Ki: 50-40

# 5. Implementació

Per a la implementació del mecanisme dissenyat i el seu posterior control, primerament es fabriquen les peces amb el mètode d'impressió 3D utilitzant el material Z-Hips, un filament molt lleuger, durador i resistent, de fàcil post processament, indicat per a prototips funcionals.

El control de posició de la plataforma es realitza amb el software de programació *Arduino IDE* i s'executa mitjançant un microcontrolador integrat en una placa *Arduino DUE*, que processa la lectura de l'acceleròmetre i envia al servomotor l'acció de control del regulador dissenyat.

En aquesta secció, es descriu el procés de muntatge de les peces i els respectius dispositius de control del mecanisme, així com l'esquema de connexions necessari pel seu correcte funcionament.

El codi que s'ha implementat a la placa *Arduino* s'explica, en aquest apartat, mitjançant un diagrama de flux amb les diferents accions a realitzar. El codi complet es pot trobar en els annexos d'aquest projecte.

L'obtenció dels resultats amb el prototip real es duu a terme mitjançant una comunicació sèrie entre *Arduino* i *Simulink*, que permet obtenir les dades de la posició angular de la lectura de l'acceleròmetre i de la correcció del servomotor a temps real.

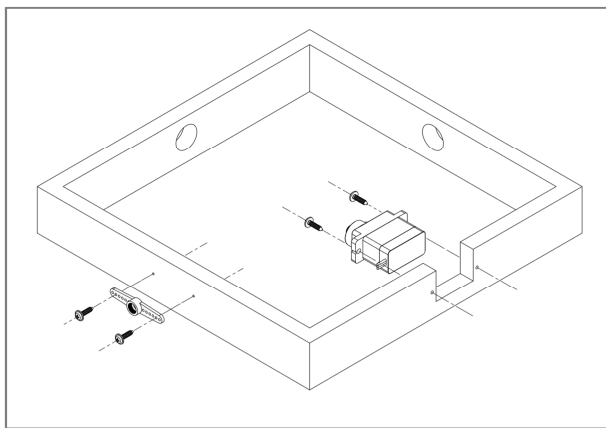
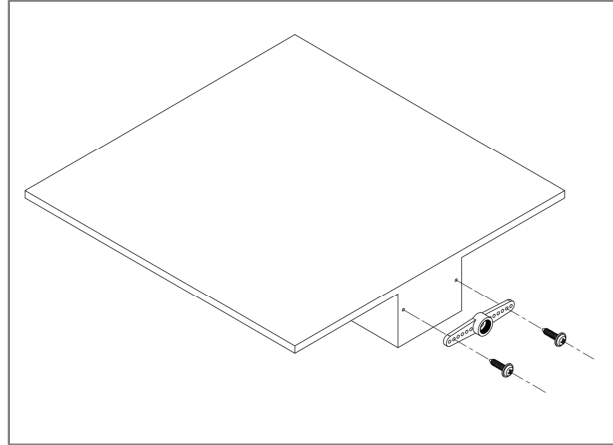
Els resultats dels assajos amb el mecanisme construït determinen el valor de  $K_i$  que serà usat en la implementació del control final del mecanisme, de manera que la plataforma retorni a la seva posició inicial per a qualsevol moviment aplicat.

Aquests resultats es comparen amb els resultats de simulació, on s'observen les similituds i diferències entre les senyals de resposta del servomotor i la lectura de l'acceleròmetre del prototip real i del simulat, quan s'assignen els diferents valors de  $K_i$  per una mateixa entrada.

## Muntatge del mecanisme

El muntatge del mecanisme es duu a terme seguint la seqüència que es mostra a continuació:

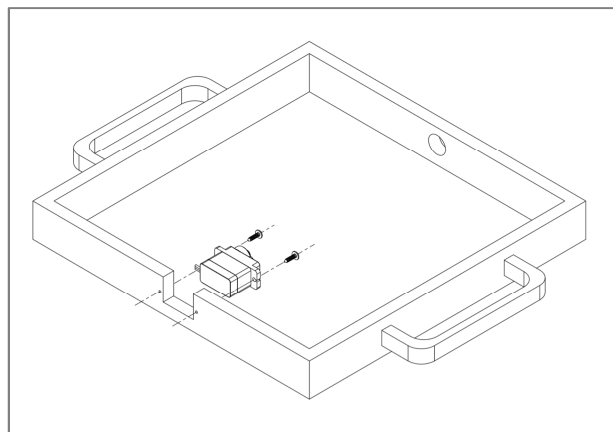
**1.** Cargolar l'espiga del servomotor de l'eix longitudinal a la plataforma pels forats indicats i amb els cargols corresponents.

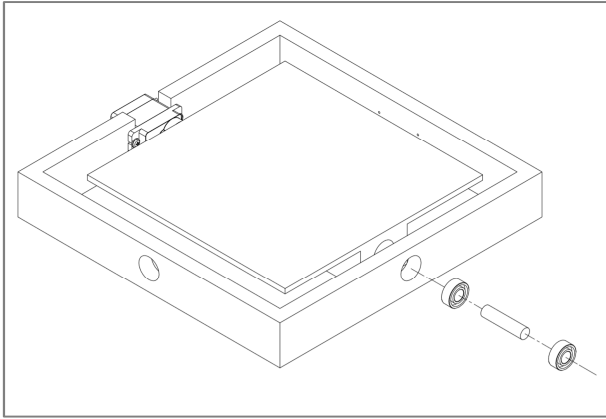


**2.** Col·locar el servomotor de l'eix longitudinal a l'espai corresponent del marc interior i cargolar-lo en els forats indicats amb els cargols propis del servomotor.

Cargolar l'espiga del servomotor de l'eix transversal al marc pels forats indicats amb els cargols corresponents

**3.** Col·locar el servomotor de l'eix transversal a l'espai corresponent del marc exterior i cargolar-lo en els forats indicats amb els cargols propis del servomotor.



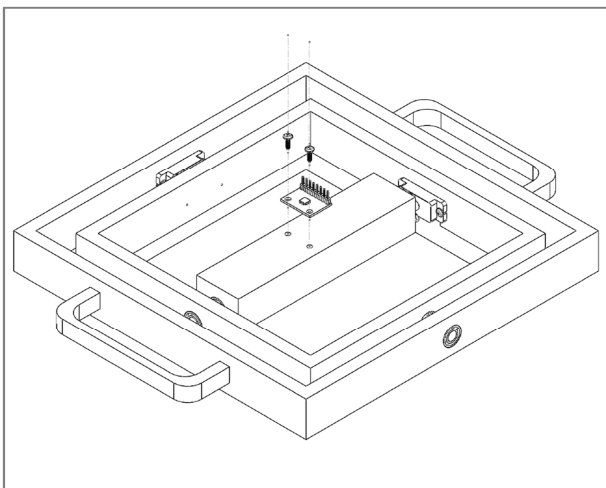
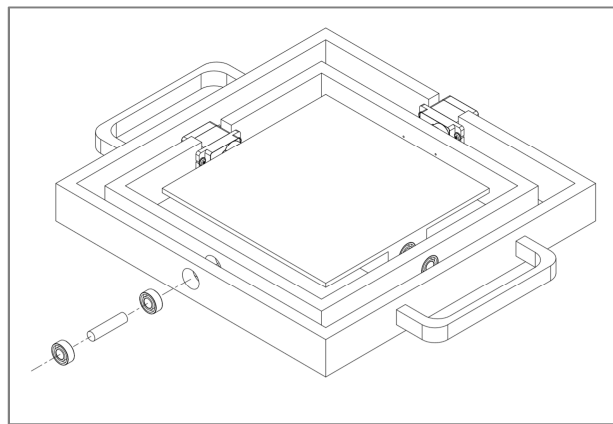


**4.** Col·locar un dels eixos a pressió entre els dos rodaments. Pressionar un dels rodaments dins el forat de la plataforma i unir-la amb el marc pressionant l'altre rodament al forat del marc interior.

Per l'altre costat, unir el servomotor de l'eix longitudinal amb l'espiga corresponent.

**5.** Col·locar l'altre eix a pressió entre els dos rodaments. Pressionar un dels rodaments dins el forat del marc interior i unir-lo amb el marc exterior pressionant l'altre rodament al forat corresponent.

Per l'altre costat, unir el servomotor de l'eix transversal amb l'espiga corresponent.



**6.** Col·locar la plataforma cap per avall i cargolar l'acceleròmetre en els forats indicats.

Figura 71: Instruccions de muntatge

## Esquema de connexions

Per a la implementació del codi amb *Arduino* és necessari connectar a la placa l'acceleròmetre per a la lectura de la posició de la plataforma i els **dos servomotors** per a la correcció de posició de cada eix.

Els cables de tensió de l'acceleròmetre es connecten a uns pins digitals de la placa, de manera que es pugui inicialitzar cada vegada que es fa servir el mecanisme.

A més, es connecta un **LED de temporització** que indicarà si l'execució es duu a terme a temps real, encenent-se quan el cicle trigui més del període indicat ( $T=0,01s$ ).

També es connecta un conjunt de **LEDs RGB** per a indicar la finalització de les ordres d'inicialització amb un color diferent, tals com la posició inicial del marc interior (vermell), la posició inicial de la plataforma (verd) i el calibratge de les posicions inicials de l'acceleròmetre (blau).

Per a carregar el codi *Arduino* a la placa, es connecta el cable **USB al port de programació**, en canvi, per a la comunicació sèrie amb *Simulink* es connecta el cable **USB al port natiu**.

Finalment, per a l'ús portable del mecanisme, és connecta una **bateria de 7,4V** que donarà la tensió d'entrada a la placa quan aquesta no estigui connectada a l'ordinador.

En l'esquema següent es mostren tots les connexions que s'han descrit:

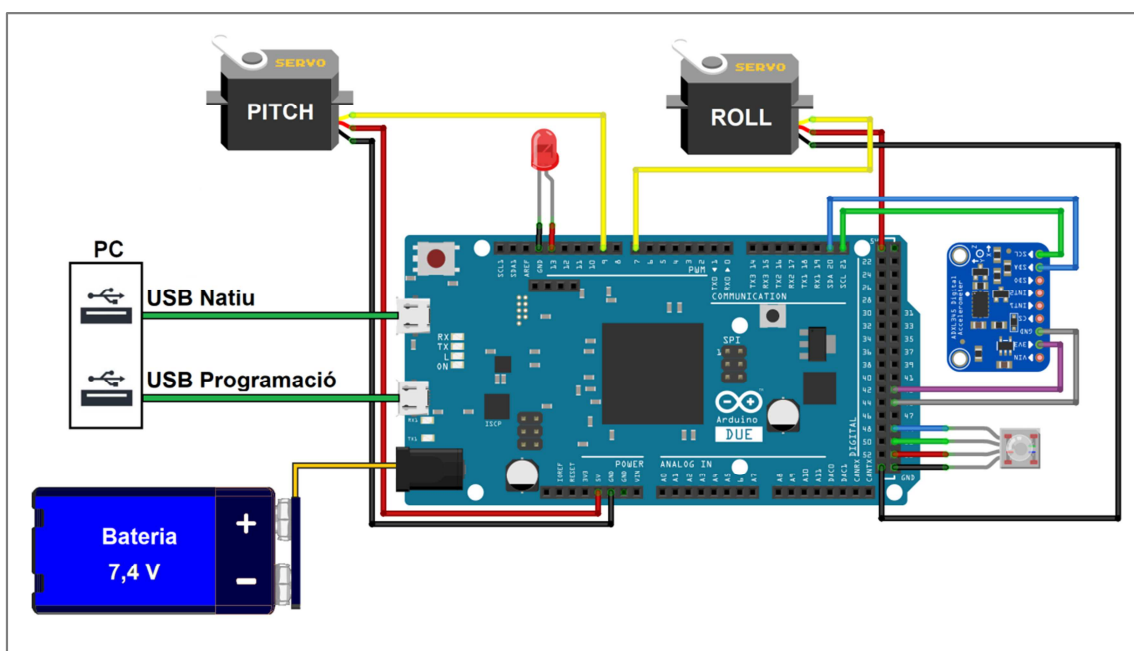


Figura 72: Esquema de connexions de la implementació



## Pins de connexió

---

### Servomotor de l'eix longitudinal (roll)

- Positiu: 5V
- Negatiu: GND
- Sortida: Pin digital #7

### Servomotor de l'eix transversal (pitch)

- Positiu: 5V
- Negatiu: GND
- Sortida: Pin digital #9

### Acceleròmetre

- Comunicació I2C: Pin SCL – Pin SDA
- Positiu: Pin digital #43 (3,3V)
- Negatiu: Pin digital #45 (0V)

### LED de temporització

- Positiu: Pin digital #13
- Negatiu: GND

### LED RGB d'inicialització

- Positiu: Pin digital #49 (blau)
- Positiu: Pin digital #51 (blau)
- Positiu: Pin digital #43 (blau)
- Negatiu: GND

### Bateria 7,4V

- Port d'alimentació de corrent continua

### USB programació

- Port de programació

### USB comunicació sèrie

- Port natiu

## Prototip d'implementació

Les imatges següents mostren el conjunt complet després del muntatge i les connexions que s'han explicat anteriorment. Com es pot observar, el mecanisme es recolza sobre un parell de suports que mantindran el sistema en estat de repòs durant la inicialització i el calibratge de la posició inicial.



Figura 73: Prototip implementació

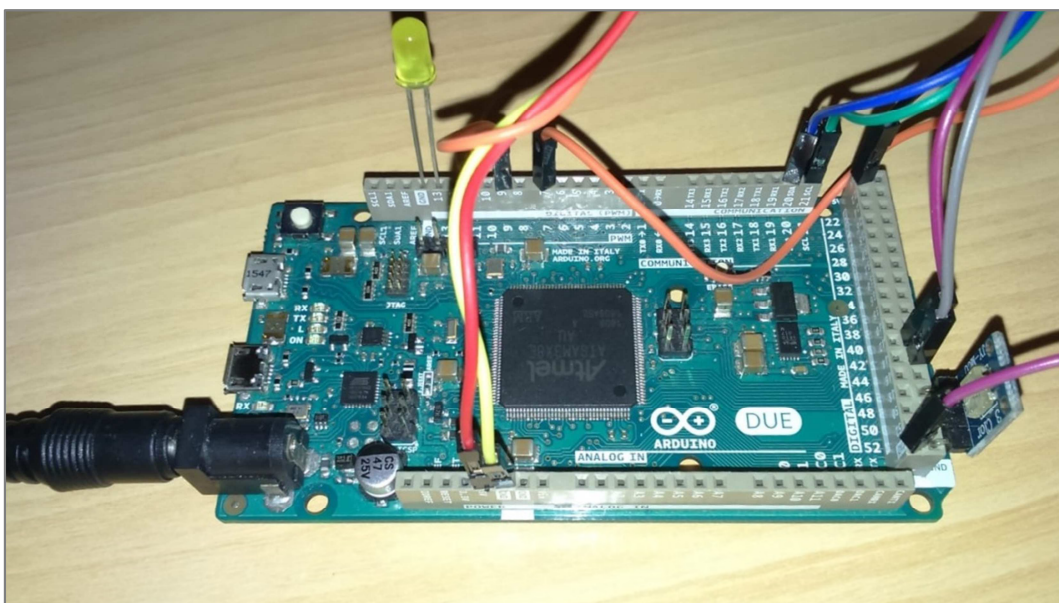


Figura 74: Connexions implementació

## Codi de control amb *Arduino*

El codi programat amb *Arduino* consta principalment **d'una funció de presa de mostres de la lectura de l'acceleròmetre i una funció de control de posició del servomotor** amb un regulador integral, per a cada eix de rotació.

Després de la funció de presa de mostres, s'executa sempre una **funció de filtratge** que suavitza la senyal de la lectura de l'acceleròmetre, eliminant el soroll no desitjat.

En primer lloc, s'executa **una funció de posicionament inicial dels servomotors i una d'inicialització de l'acceleròmetre**, d'aquesta manera el sistema es troba en estat de repòs. Seguidament, es determina l'angle inicial de la plataforma amb una **funció de calibratge**, calculant la mitjana aritmètica de les 1000 primeres mostres obtingudes. Els LEDs RGB indicaran que el posicionament inicial del mecanisme i el calibratge de l'angle inicial s'han dut a terme correctament.

Al bucle infinit s'executa de nou la funció de presa de mostres, que indica la lectura de l'acceleròmetre davant les pertorbacions introduïdes al sistema -amb el corresponent filtrat de la senyal-, i **es calcula l'error de posició** en temps real segons el valor de lectura.

Per a tancar el llaç, es duen a terme els **dos controls de posició –un per a cada eix de rotació-** que corregiran la posició del servomotor, retornant la plataforma a l'estat inicial.

Per a la obtenció dels resultats, s'inclou **una funció de comunicació sèrie entre *Arduino* i *Simulink*** per a la transmissió de dades. Això permet la modificació del valor de les variables del codi *Arduino* durant l'execució i la lectura de les senyals de l'acceleròmetre i els servomotors des de *Simulink*.

Al final del bucle infinit, s'executa sempre una **funció de temporització** que assegura que el cicle es realitza amb un període menor de l'establert. En cas contrari, s'encendrà el LED de temporització indicant que no s'està realitzant el cicle a temps real.

## Diagrames de flux

Els diagrames de flux següents mostren un esquema-resum del codi d'implementació que s'ha explicat a la pàgina anterior:

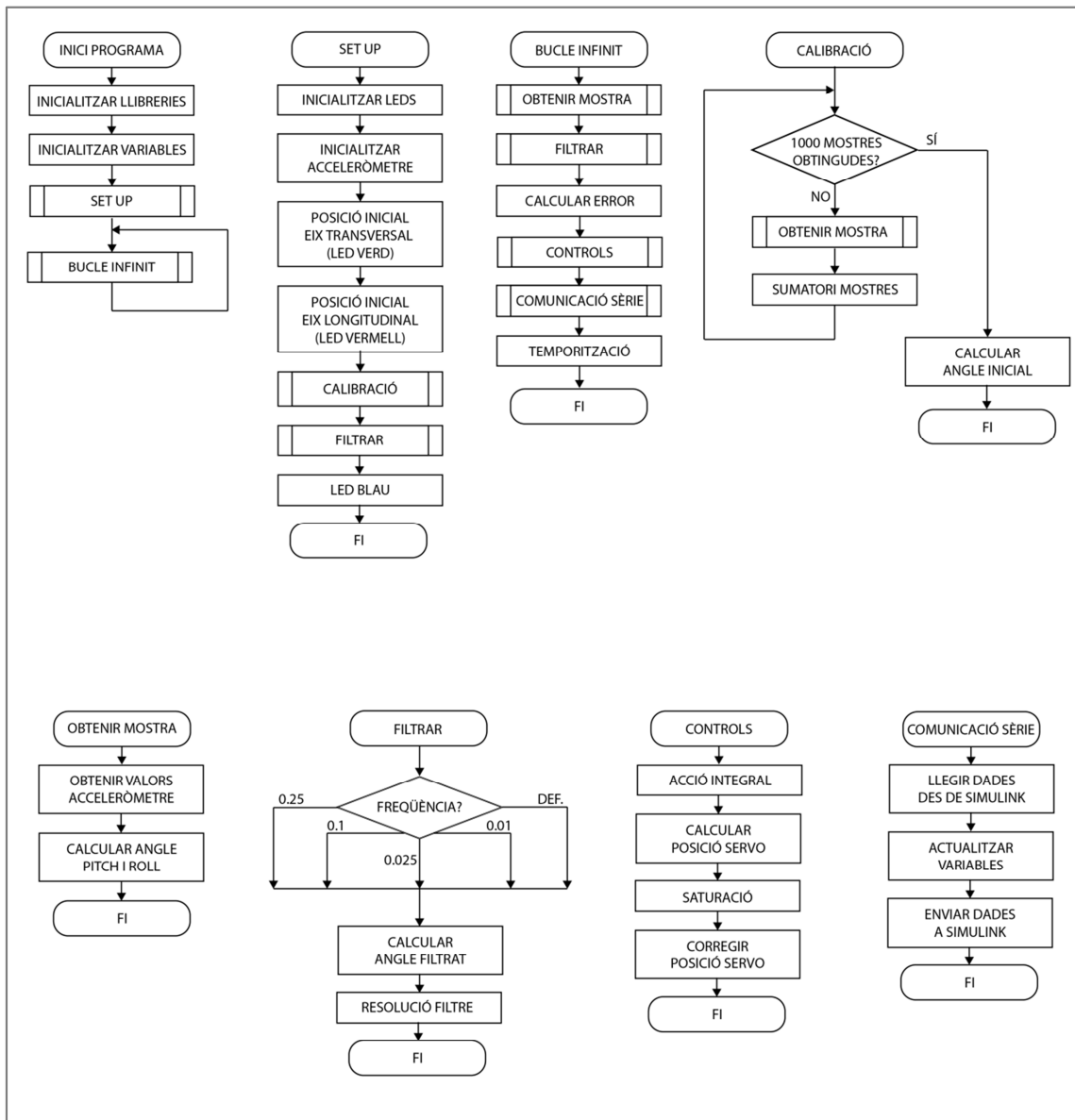


Figura 75: Diagrama de flux del codi d'implementació

Un cop carregat el programa a la placa *Arduino* a través del **port de programació**, cal desconnectar el cable USB i connectar-lo al **port natiu** per a la transmissió de dades amb *Simulink*. El port de connexió de l'ordinador serà el que s'haurà d'indicar al bloc *S-Function*, que s'explicarà en el següent apartat.

## Comunicació sèrie

L'obtenció dels resultats amb el prototip real duu a terme mitjançant una comunicació sèrie entre *Arduino* i *Simulink* que permet obtenir les dades de la posició angular de la lectura de l'acceleròmetre i de la correcció del servomotor a temps real.

A la placa *Arduino DUE*, el port de connexió USB Natiu, també anomenat *SerialUSB*, permet la transmissió i recepció de dades entre els dos entorns de programació esmentats. Per a dur a terme aquesta connexió cal programar, doncs, una funció de comunicació en el codi d'*Arduino* i l'esquema pertinent en *Simulink* per a la correcta transferència de dades.

### Entorn *Arduino*

Per a la recepció i transferència de dades, en la funció de comunicació sèrie programada en l'entorn d'*Arduino*, és necessari declarar les següents variables:

- un comptador
- un vector d'emmagatzematge de dues dades
- dues variables de tipus nombre real

Tenint en compte que el període de mostreig del codi de control és de 0,01 segons i que la comunicació sèrie ha de tenir un període mínim de 0,1 segons per al correcte funcionament, **s'executa la funció de la comunicació sèrie cada 10 voltes de cicle** computades pel comptador. Si el port de connexió USB està disponible, es duu a terme la recepció i transmissió de dades de la següent manera:

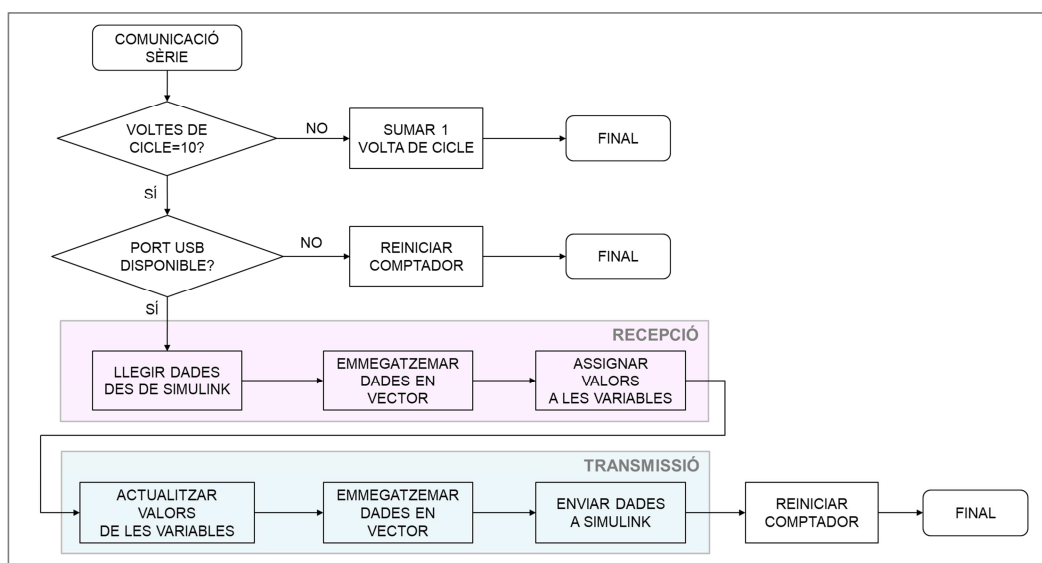


Figura 76: Esquema comunicació sèrie Arduino

A continuació s'expliquen els processos de recepció i transmissió de dades, que s'han ressaltat en color rosa i blau, respectivament, en la imatge anterior.

**Recepció (*Simulink-Arduino*):** es llegeixen, mitjançant el *SerialUSB*, les dues dades que es reben des de *Simulink* i s'emmagatzemen en el vector. Per a poder usar aquestes dades en el codi d'*Arduino*, s'assigna a cada una de les variables els dos valors corresponents del vector.

**Transmissió (*Arduino-Simulink*):** s'actualitzen de nou les dues variables anteriors amb les dades que es volen enviar des d'*Arduino*. S'emmagatzema el valor de les dues variables en un sol vector i s'envien les dades a *Simulink* mitjançant el *SerialUSB*.

## Entorn *Simulink*

L'esquema següent representa la programació per a la transferència de dades en l'entorn de *Simulink*, on també s'ha separat les parts involucrades en la transmissió i la recepció, en color blau i rosa, respectivament:

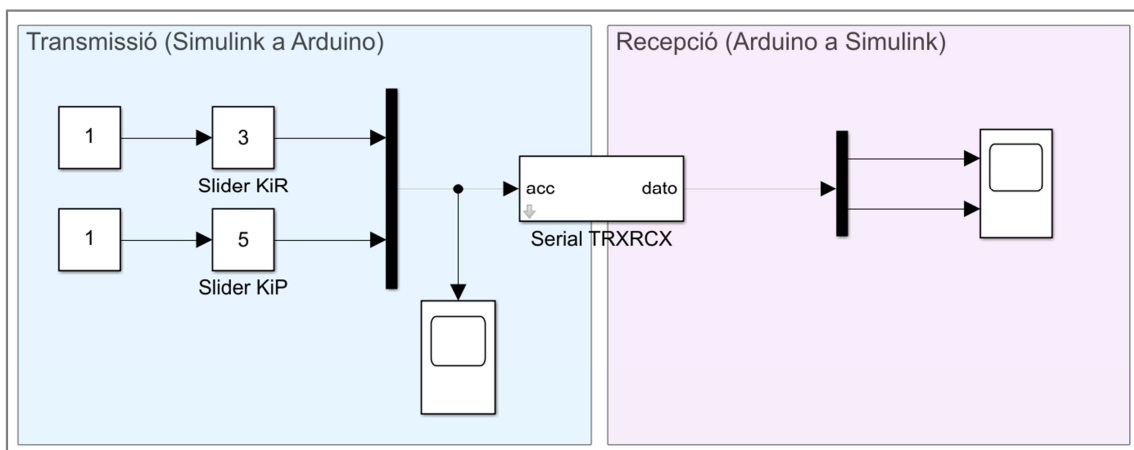


Figura 77: Esquema comunicació sèrie Simulink

La comunicació sèrie es duu a terme a través d'un bloc *S-Function*, integrat dins la unitat *Serial TRXRCX* de l'esquema, on s'especifiquen els paràmetres de comunicació següents:

- **El port de connexió:** COM8 (en aquest cas)
- **Nombre de dades transferides:** 2
- **El període de comunicació:** T=0.1 segons

En aquest cas, els processos de transmissió i recepció són els següents:

**Transmissió (*Simulink-Arduino*):** per a enviar dades a *Arduino*, es col·loquen primer dos blocs de tipus *constant* per a donar un valor inicial a les dues variables que, posteriorment, es poden variar amb un bloc *slider*. Amb un bloc multiplexor s'emmagatzemen les dues dades per a ser enviades a través del bloc *S-Function*. En el bloc de visualització que es col·loca a la sortida del multiplexor, es poden veure representar les dues dades que s'enviaran.

**Recepció (*Arduino-Simulink*):** per a la lectura de les dades rebudes des d'*Arduino*, es col·loca un bloc desmultiplexor a la sortida del bloc *S-Function* que extreu les dades rebudes en dues variables. El bloc de visualització situat a la sortida del desmultiplexor permet representar les dues variables, obtenint així les gràfiques de resultats.

### Configuració dels paràmetres de simulació

A més, per a la transferència correcta de dades a temps real cal ajustar alguns dels paràmetres de la configuració de *Simulink*:

Configuració del temps de simulació:

- **Inici:** 0 segons
- **Final:** infinit

Configuració de la resolució (*solver*):

- **Tipus de resolució:** pas fixe
- **Mètode de resolució:** discret
- **Temps de resolució:** T=0.1 segons

Configuració del ritme de simulació (*spacing options*):

- Habilitar el ritme seleccionat per a alentir la simulació
- **Temps de simulació per segon del rellotge:** 1 (simulació a temps real)

# Resultats de la implementació

Per a comparar els resultats de simulació amb els resultats del prototip real, es realitza un assaig semblant al de la seqüència d'escalons de la simulació.

Amb aquest últim experiment es determinen els valors finals de  $K_i$  permeten regular correctament la posició de la plataforma durant el funcionament normal del mecanisme.

Com en el cas de la simulació, l'entrada consta d'una seqüència simètrica d'escalons de  $\pm 20$  graus durant 3 segons, passant pels 0 graus durant 3 segons més abans de canviar de sentit però, en aquest cas, amb un règim estacionari lineal. Aquesta senyal s'aplica tant en l'eix longitudinal com en l'eix transversal, cosa que permet calcular un valor de  $K_i$  per a cada eix de rotació.

Els resultats obtinguts s'usaran per a comparar les lectures de l'acceleròmetre i les accions del servomotor entre el model simulat i el mecanisme real.

## Senyal d'entrada

Per a implementar els escalons d'entrada s'ha utilitzat un servomotor que realitzarà el moviment de rotació, primer per a l'eix longitudinal i després per al transversal, com es mostra en les imatges següents:

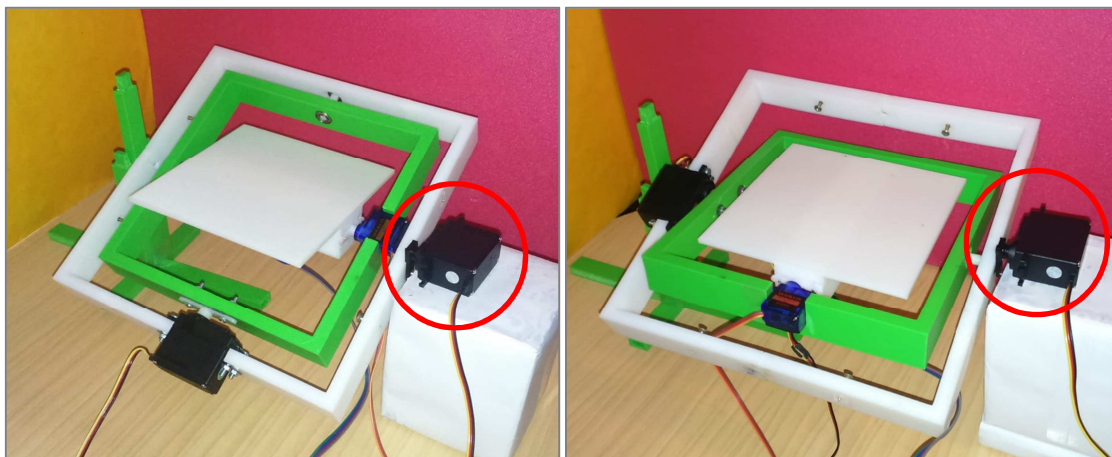


Figura 78: Servomotor per a l'entrada en l'eix longitudinal (esquerra) i en l'eix transversal (dreta)



L'entrada obtinguda del moviment del servomotor és la següent, idèntica en els dos eixos de rotació, on s'observen els escalons de 20 graus amb un règim transitori de 0,5 segons.

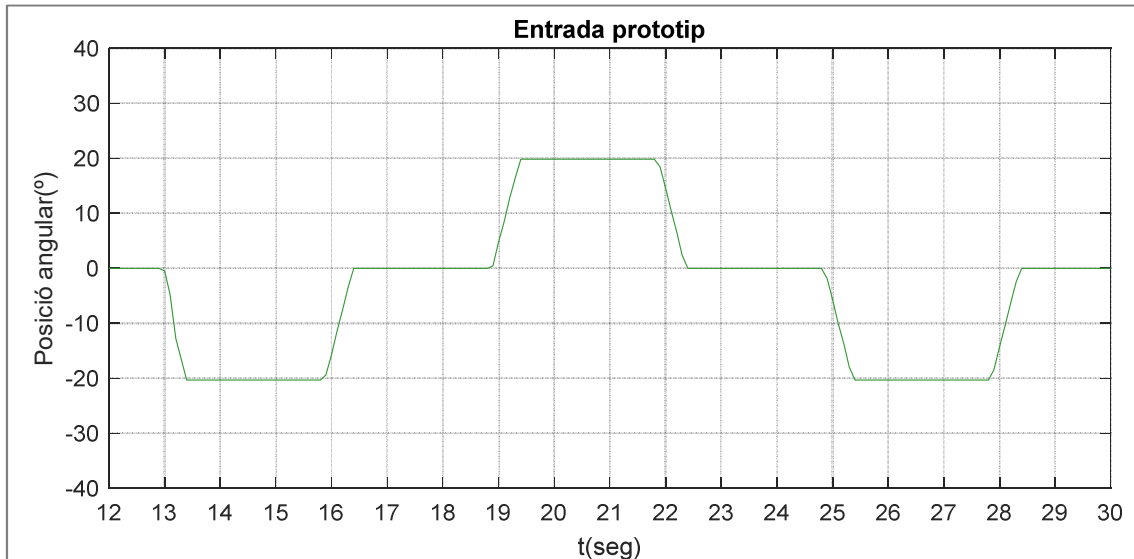


Figura 79: Senyal d'entrada de la implementació

A continuació es mostren els resultats obtinguts en aquest assaig, on es realitzen diverses proves amb diferents  $K_i$  en els dos eixos de rotació. En primer lloc se sintonitza la  $K_i$  de l'eix longitudinal i seguidament es realitza el mateix procés per a l'eix transversal.

## Metodologia

Els dos anàlisis es duen a terme amb la mateixa metodologia:

- S'introdueix al sistema l'entrada descrita anteriorment mitjançant el servomotor, per cada eix de rotació per separat.
- Utilitzant la comunicació sèrie, es varia el valor de  $K_i$  del codi d'*Arduino* amb el bloc *slider* des de *Simulink* durant l'execució.
- Es generen els resultats amb les diferents mesures preses durant l'assaig mitjançant un codi de *Matlab*.

## Eix longitudinal

### $Ki=1$

Per a començar, s'executa la primera prova amb un valor de  $Ki=1$ . Els resultats mostren, com era d'esperar, que aquest valor és massa baix ja que **la senyal del servomotor no arriba a establir-se en la posició desitjada**, exactament igual que ens els resultats de simulació.

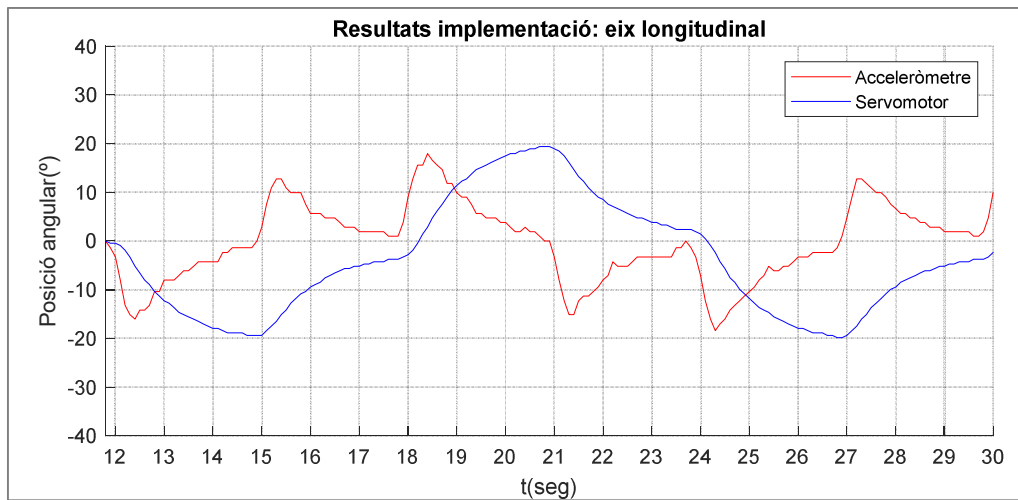


Figura 80: Resultats implementació eix longitudinal.  $Ki=1$

### $Ki=3.5$

Amb un valor de  $Ki=3.5$ , el mateix que determinat en la simulació, la senyal del servomotor presenta **un temps d'establiment d'aproximadament 1 segon**, mentre que **l'acceleròmetre llegeix una desviació màxima de 13.23 graus**, com es pot observar en la figura següent.

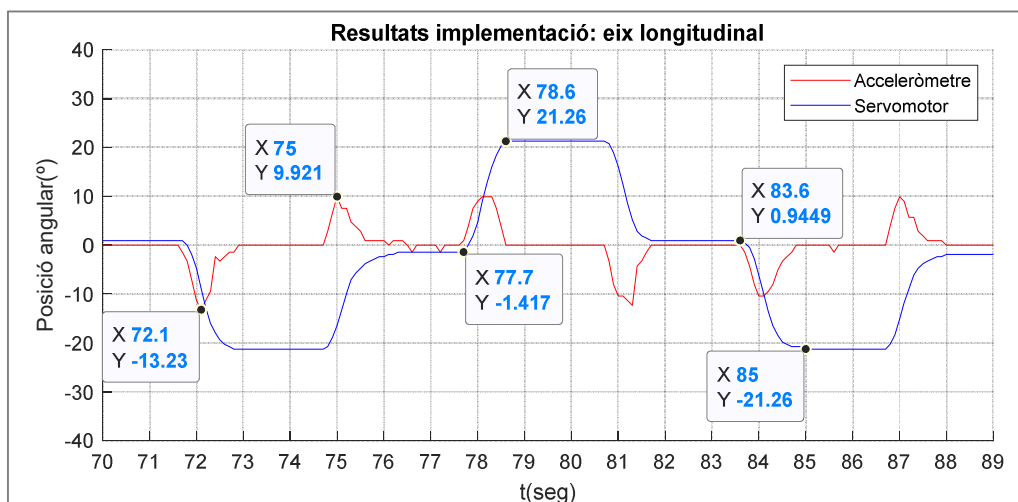


Figura 81: Resultats implementació eix longitudinal.  $Ki=3.5$

$Ki=5$

Finalment, s'augmenta el valor de la constant fins a  $Ki=5$  per a analitzar el comportament del mecanisme amb valors majors que els determinats en la simulació. En la imatge següent, s'observa que **tant la senyal del servomotor com la senyal de l'acceleròmetre oscil·len en regim permanent**.

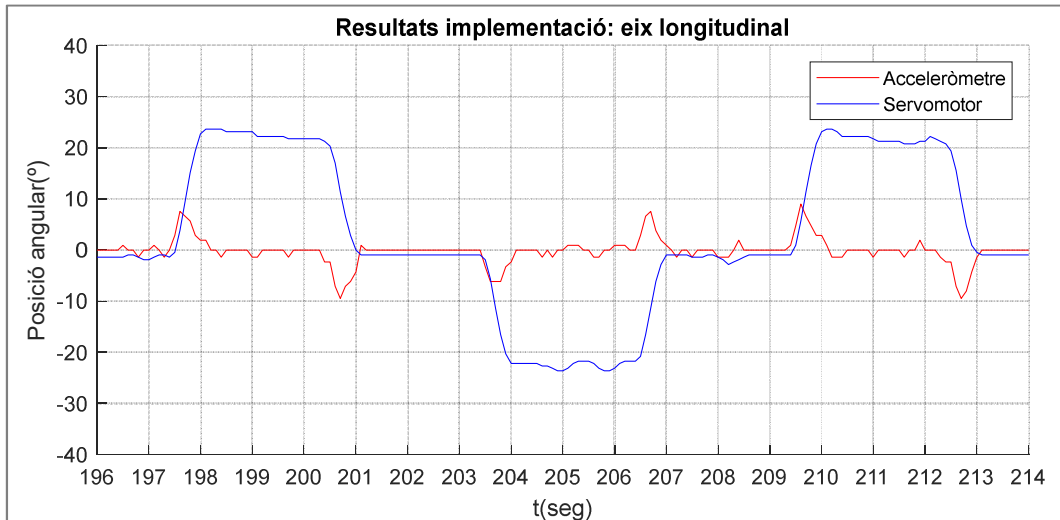


Figura 82: Resultats implementació eix longitudinal.  $Ki=5$

## Eix transversal

Davant la impossibilitat d'estabilitzar la plataforma respecte a l'eix transversal amb el servomotor escollit, es realitza en la implementació un canvi de servomotor per el següent model:



### Servomotor Hitec HS-422

- Velocitat: 0,16 segons/60 graus
- Pes: 45,5 g
- Dimensions: 40,6 x 19,8 x 36,6 mm

Així doncs, es realitza també un canvi en la simulació respecte d'aquest eix, actualitzant els paràmetres i la dinàmica del servomotor.

Amb aquesta nova configuració, els resultats de simulació i d'implementació obtinguts són els que es mostren a continuació.

$Ki=1$

Com en l'eix longitudinal, es duu a terme la primera prova amb un valor de  $Ki=1$ . Els resultats mostren, igual que en el cas anterior, que aquest valor és massa baix ja que **la senyal del servomotor no arriba a establir-se en la posició desitjada**, exactament igual que ens els resultats de simulació.

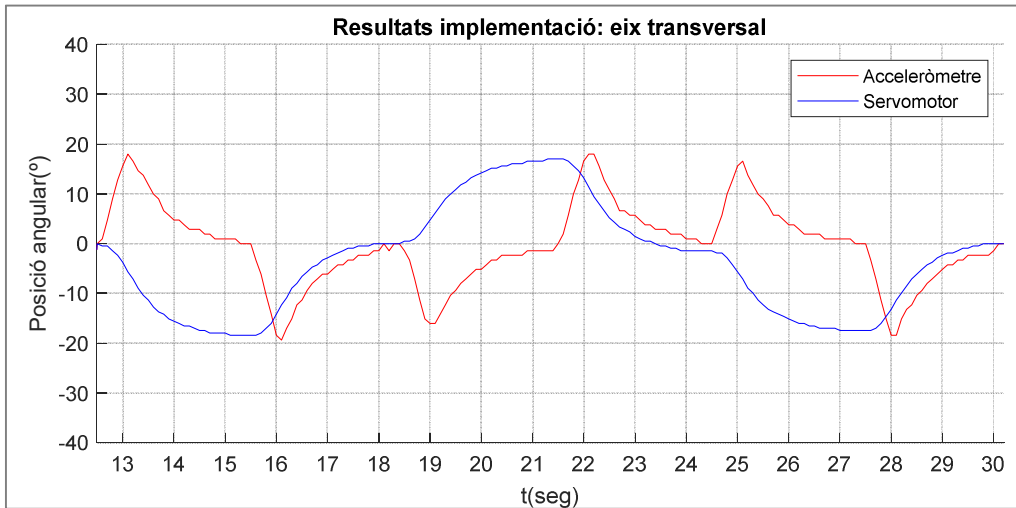


Figura 83: Resultats implementació eix transversal.  $Ki=1$

$Ki=5$

Amb un valor de  $Ki=5$ , la senyal del servomotor presenta **un temps d'establiment d'aproximadament 0,8 segons** i l'acceleròmetre llegeix una **desviació màxima de 14,65 graus**, com es pot observar en la figura següent.

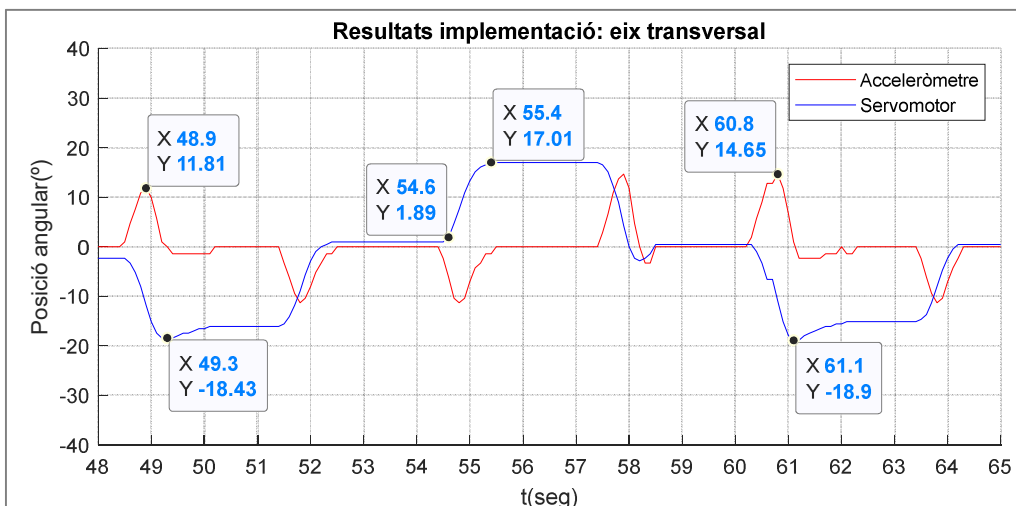


Figura 84: Resultats implementació eix transversal.  $Ki=5$

**Ki=7**

En la imatge següent es mostren els resultats amb  $Ki=7$  on s'aprecia que **el sistema pateix oscil·lacions** tant en la senyal del servomotor com en la de l'acceleròmetre, de manera que no arriba a establitzar-se en certs moments.

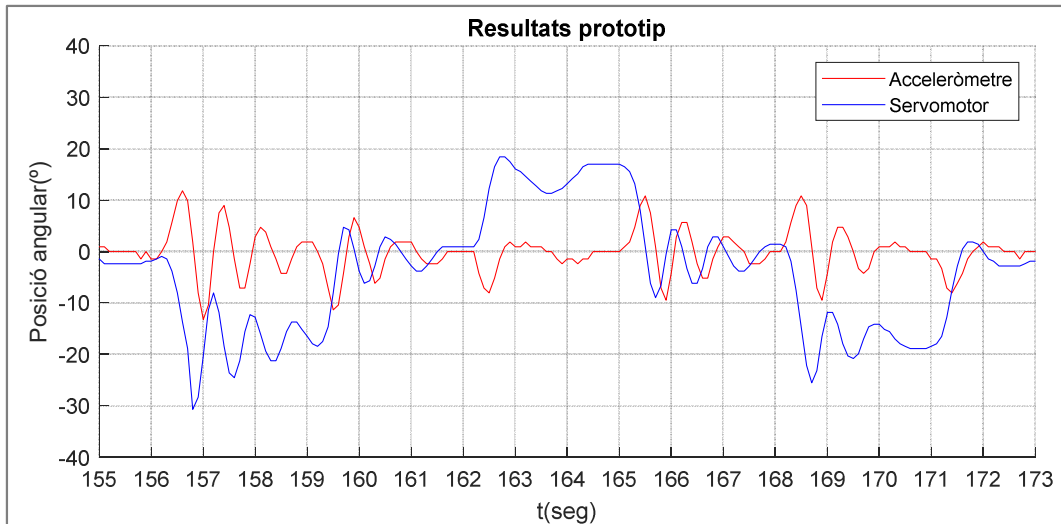


Figura 85: Resultats implementació eix transversal.  $Ki=7$

Finalment, es realitza la implementació amb un valor de  $Ki=3.5$  per a l'eix longitudinal i  $Ki=5$  per a l'eix transversal:

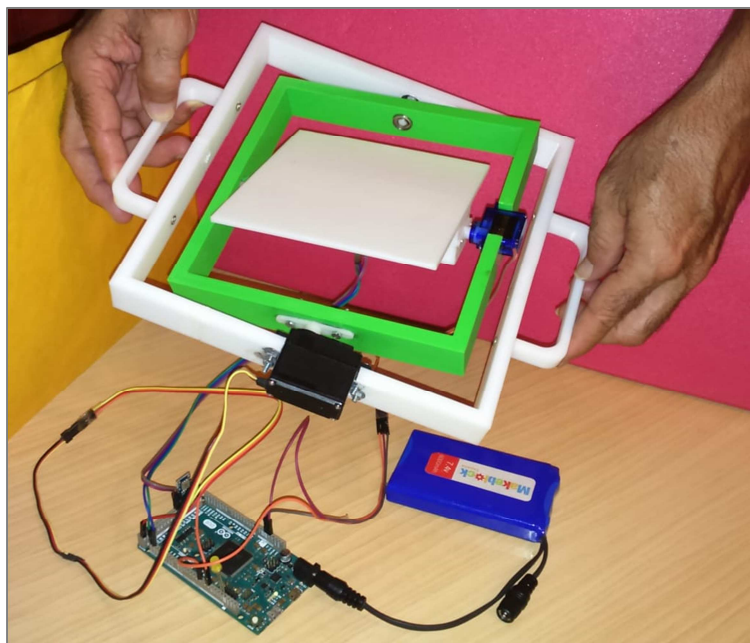


Figura 86: Implementació amb  $Ki$  corresponent

# 6. Conclusions i recomanacions

## Conclusions del treball realitzat

Amb l'anàlisi dels resultats, que descriuen comportament del mecanisme segons el tipus de control aplicat i el moviment extern al que és sotmès, i tenint en compte els objectius descrits en el capítol d'introducció, s'obtenen les següents conclusions:

- ✓ El sistema de control de la plataforma auto-estable és adequat per a la compensació ràpida i precisa de les inclinacions aplicades al mecanisme, i per tant, la plataforma és capaç mantenir-se en la posició inicial establerta.
- ✓ Així doncs, es considera que s'han assolit els objectius de disseny, control i implementació d'aquest projecte, sempre tenint en compte les limitacions dels components electrònics i materials de construcció.
- ✓ Es comprova que l'acció integral és suficient per a cancel·lar correctament les pertorbacions en règim permanent. Si, a més, s'introdueix una acció proporcional, aquesta modificarà únicament el comportament del mecanisme en règim transitori.

La plataforma auto-estable compleix les condicions establertes als objectius del projecte:

- ✓ És un mecanisme lleuger, compacte i transportable, compost per la plataforma a controlar i un marc exterior amb nanses per a aplicar les inclinacions.
- ✓ Gràcies a la funció de calibratge del codi d'implementació, s'estableix correctament la posició inicial de la plataforma, paral·lela al pla horitzontal.
- ✓ L'acceleròmetre seleccionat per a la mesura de les inclinacions és capaç de llegir correctament les desviacions angulars amb la precisió necessària.
- ✓ Mitjançant el control dels dos servomotors, la plataforma és capaç de recuperar la posició inicial ràpidament.

El desenvolupament d'aquest projecte ha permès posar en pràctica les competències i coneixements necessaris per a identificar experimentalment la diferència entre el model teòric i el prototip real.

Comparant els anàlisis de la simulació amb els d'implementació, es conclou que l'esquema i els paràmetres de simulació escollits són fidels a la realitat, ja que els resultats d'ambdós són equivalents:

- ✓ Els valors de la constant integral  $K_i$  obtinguts en la simulació són iguals que els utilitzats en la implementació del prototip real. De totes maneres, es pot comprovar que en la implementació uns valors massa grans de  $K_i$  provoquen oscil·lacions no desitjades.
- ✓ El temps d'establiment de la senyal del servomotor i la lectura de l'acceleròmetre són del mateix ordre de magnitud en la simulació que en el prototip real.
- ✓ Els resultats reals difereixen mínimament de la simulació tenint en compte la resolució de l'acceleròmetre, la velocitat de reacció i la zona morta del servomotor i l'error d'aproximació en la transferència de dades durant la comunicació sèrie.

De la simulació de l'assaig de *Lissajous*, l'objectiu del qual és determinar els valors necessaris de  $K_i$  per a mantenir l'esfera sobre la plataforma, se n'obtenen les següents conclusions:

- ✓ Amb aquest assaig s'observa que, segons l'aplicació final del mecanisme, és tant important la precisió amb la que la plataforma retorna a la seva posició inicial com la rapidesa amb la que ho fa, per petita que sigui la pertorbació aplicada.
- ✓ Els valors de  $K_i$  establerts a l'assaig d'escalons no són suficients per a mantenir l'esfera sobre la plataforma ja que la correcció del servomotor és massa lenta.
- ✓ No es pot realitzar la comparativa amb un assaig sobre el prototip real, ja que els valors massa alts de  $K_i$  provoquen oscil·lacions en les senyals de sortida del control.

## Recomanacions per a treballs futurs

Els servomotors del disseny del mecanisme s'escullen en funció de la velocitat de reacció, independentment del parell motor, vist que la càrrega a moure es mínima i interessa un control ràpid. Durant la implementació, però, s'observen oscil·lacions en l'eix transversal que no es poden amortitzar amb el control, ja que són degudes a la poca precisió del servo perquè el parell motor no es suficient.

- Es recomana canviar el servomotor Micro SG90 actual de l'eix longitudinal per un motor amb un parell motor més elevat que ofereixi més resistència a les oscil·lacions no desitjades.

En aquest projecte, la lectura de la posició de la plataforma es duu a terme mitjançant un únic acceleròmetre que llegeix les inclinacions en els dos eixos de rotació.

- Es recomana utilitzar dos acceleròmetres per a la lectura de posició, un en cada extrem de la plataforma, de manera que la lectura final de la inclinació sigui una mitjana aritmètica dels valors dels dos acceleròmetres per augmentar la precisió de lectura.

En aquest projecte, només es considera la posició inicial de la plataforma en estat horitzontal però, depenent de l'aplicació per a la que s'usi el mecanisme, podria ser d'interès establir una posició inicial diferent.

- Es recomana fer un comandament automàtic de manera que es pugui escollir l'angle d'inclinació inicial del mecanisme abans de cada ús.



# 7. Bibliografia

- [1] Grober, David E. (2003). Autonomous, self leveling, self correcting anti-motion sickness chair, bed and table. Consultat el 15/04/2019, a <https://patents.google.com/patent/US7490572>
- [2] Heldoorn, T.A. (2013). Design of a passive self-levelling. Consultat el 15/04/2019, a <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A52d69fc5-bcbb-43cc-b47d-dc8024df03f2>
- [3] Anders Karlsson, Jonathan Cressell. (2016). Self-stabilizing platform. Consultat el 12/03/2019, a <http://www.diva-portal.se/smash/get/diva2:957123/FULLTEXT01.pdf>
- [4] Dejan. (2019). DIY Arduino Gimbal | Self-Stabilizing Platform. Consultat el 12/03/2019, a <https://howtomechatronics.com/projects/diy-arduino-gimbal-self-stabilizing-platform>
- [5] Hamor, David. (2016). Ball and Plate © GPL3+. Consultat el 12/05/2019, a <https://create.arduino.cc/projecthub/davidhamor/ball-and-plate-c48027>
- [6] Sam Thompson. (2010). Self leveling surface with arduino. Consultat el 12/04/2019, a <https://www.youtube.com/watch?v=cTUBDagKdbA>
- [7] Siddhesh C. Narkar, Siddhesh R. Bhalekar, Tushar K. Nawge, Keshav H. Parab, Prafulla V. Patil. (04 / 2013). Self-Balancing Platform. Consultat el 15/03/2019, a [http://www.ijctee.org/NSPIRE2013/IJCTEE\\_0313\\_Special\\_Issue\\_24.pdf](http://www.ijctee.org/NSPIRE2013/IJCTEE_0313_Special_Issue_24.pdf)
- [8] Movi, Alta. (2017). Freely Systems. Consultat el 20/04/2019, a <https://freelysystems.com/movi>
- [9] STABLE. (2002). STABLE - Applications. Consultat el 18/04/2019, a <https://www.stable.no/>
- [10] Analog Devices. (2009). Data Sheet: Digital accelerometer ADXL345. Consultat el 15/02/2019, a <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL345.pdf>
- [11] Tower Pro. (sense data). Servomotor Micro SG90 Digital. Consultat el 15/02/2019, a <http://www.towerpro.com.tw/product/sg90-7/>
- [12] Arduino. (2019). Getting started with the Arduino Due. Consultat el 17/03/2019, a <https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoDue>