

4 SIMULACIÓ DINÀMICA DEL MECANISME DE POTA

En aquest capítol es presenta l'anàlisi que s'ha portat a terme per tal de determinar els requeriments mecànics, a les articulacions i al llarg d'un cycle de l'anadura, per tal de que la pota descrigui la seqüència de moviments desitjada.

El primer pas és concretar les especificacions de l'anadura i definir el moviment desitjat del peu respecte al cos del robot. Conegut el moviment del peu es calcula l'evolució dels angles requerits a les articulacions al llarg del cycle. El segon pas és analitzar les accions externes sobre el mecanisme.

Finalment, amb les dades obtingudes en els passos anteriors, es programa una simulació dinàmica del funcionament del mecanisme de la pota. Amb aquesta simulació es porta a terme una anàlisi dinàmica inversa que, a partir de les dades cinemàtiques del moviment i de les accions externes, dóna com a resultat els requeriments dels accionaments que governen els tres graus de llibertat del mecanisme.

4.1 Cinemàtica del moviment del mecanisme

Les seqüències de moviment de les tres potes d'un dels costats del robot són anàlogues però amb un cert desfasament en el temps. Els moviments de les potes de l'altre costat són simètriques i també amb un cert desfasament. Per això s'ha analitzat en detall únicament una de les potes, la del mig a la dreta del robot.

S'ha escollit un pota del mig perquè, tal i com s'ha explicat al capítol anterior, en un mode de funcionament normal caminant sobre un terreny pla, és la que ha de suportar majors esforços. Els altres casos es poden estudiar de manera anàloga.

4.1.1 Especificacions de l'anadura

Per a l'estudi cinemàtic del mecanisme de pota s'ha definit el sistema de referència format per un triedre directe fixat al cos del robot, amb eix x en la direcció longitudinal del robot i sentit apuntant endavant, eix y en direcció transversal i sentit positiu apuntant a l'esquerra del robot, i eix z en direcció vertical i sentit positiu cap a dalt. El sistema de referència i les coordenades emprades per descriure el moviment del mecanisme s'il·lustren a la Figura 4.1. Les potes han estat numerades començant pel costat de davant del robot, amb números senars les potes de l'esquerra i números parells les de la dreta. Per tant la pota del mig a la dreta és la número 4.

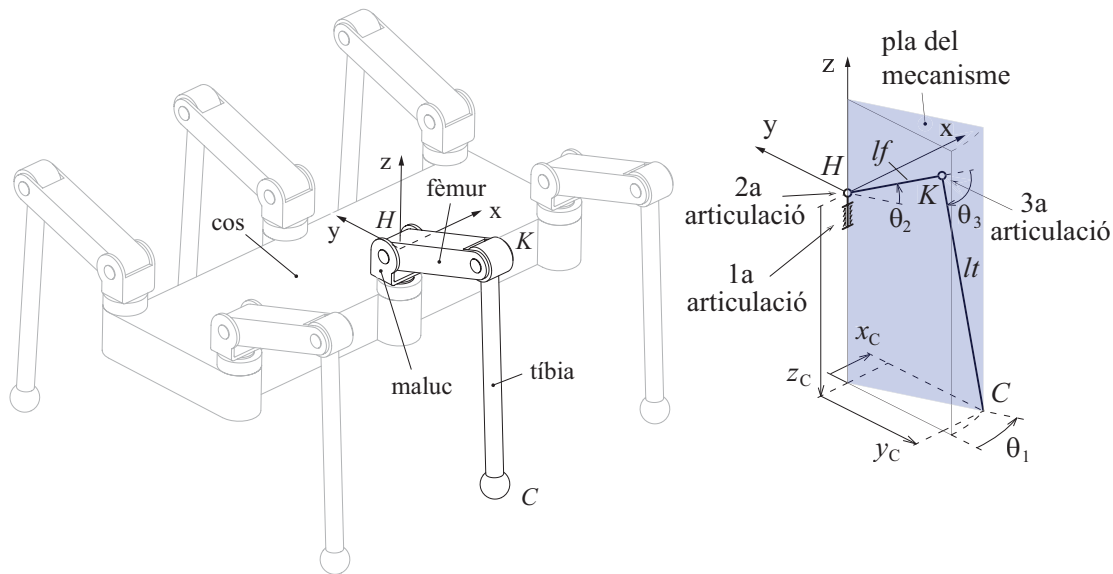


Fig. 4.1. Definició de les coordenades per descriure el moviment del mecanisme

La situació plantejada en aquest estudi és la més comú en el funcionament d'un robot caminador. Correspon a l'operació de caminar endavant en línia recta, en horitzontal o al llarg d'una pendent, i seguint una anadura de trípodos alternants. Els paràmetres que especifiquen l'anadura es relacionen a la Taula 4.1.

Seguint aquesta anadura cada pota està en fase de suport durant la meitat del període del cicle, i el desfasament entre la pota del mig i les potes anterior i posterior del mateix costat és igual a la meitat del període del cicle. El desfasament entre cada pota d'un costat i la simètrica de l'altre també és la meitat del període.

Taula 4.1. Especificacions principals de l'anadura

Tipus d'anadura	Trípodes alternants
Factor de servei	50%
Cursa longitudinal del peu (cl)	240 mm
Cursa vertical del peu (cv)	75 mm
Coordenada transversal del peu (y_c)	-170 mm
Mínima coordenada vertical del peu (z_{Cmin})	-310 mm
Velocitat d'avanç del robot (v_{av})	9,6 m/min
Període d'anadura (T)	3 s

La cursa longitudinal del peu, cl , es defineix com la distància que recorre el peu durant la fase de suport respecte a la referència fixa al cos. Aquest paràmetre s'ha fixat en 240 mm, proper al valor màxim que es pot assolir sense interferències entre les potes. Per tant el recorregut que fa el cos per cada cicle de l'anadura, anomenat gambada, és de 480 mm. El període s'estableix en 3 s i així en resulta una velocitat d'avanç del robot, v_{av} , de 160 mm/s o 9,6 m/min.

La cursa vertical del peu, cv , s'ha suposat de 75 mm però podria ser menor o major segons els obstacles presents en la trajectòria del peu.

La configuració mitja del mecanisme, il·lustrada a la Figura 4.2, té en compte les regles aconsellades per estudis existents d'eficiència energètica en hexàpodes (Marhefka, 1997).

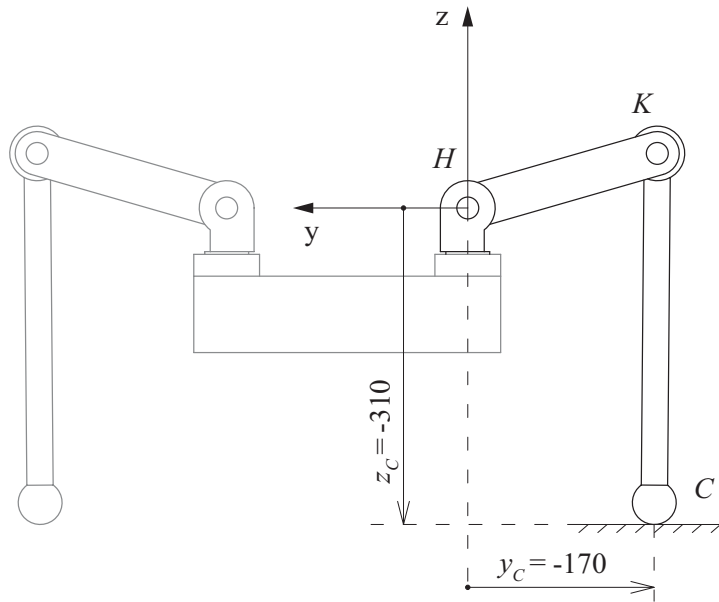


Fig. 4.2. Vista frontal del mecanisme d'una pota. Configuració mitja en la fase de suport

4.1.2 Definició de la trajectòria del peu

Cada cicle de moviment de cada pota està format per les fases de suport i de transferència i, pel cas estudiat, s'ha definit de manera que comença al principi de la fase de suport, amb el peu en contacte amb el terra i desplaçant-se enrera respecte al cos del robot.

Durant la fase de suport, quan el peu està en contacte amb el terra, aquest segueix una trajectòria recta a velocitat constant, en la direcció d'avanç i en sentit cap enrera respecte a la referència fixa al cos. Durant la fase de transferència el peu s'eleva, avança respecte al cos i baixa fins a tornar a entrar en contacte amb el terra. Durant aquesta fase de transferència, i per a simplicitat a l'hora de definir l'evolució de les coordenades del peu, la coordenada transversal, y_C , es manté constant. D'aquesta manera el peu es mou per un mateix pla vertical paral·lel al pla sagital al llarg de tot el cicle de l'anadura.

Les transicions entre els moviments endavant i endarrera del peu es defineixen mitjançant corbes de Bézier de grau 2. Els moviments d'eleva i baixa el peu també es defineixen amb corbes de Bézier, però en aquest cas de grau 3. S'aconsegueix així una continuïtat C^1 de les funcions que defineixen l'evolució d'ambdues coordenades. Per tant els components de l'acceleració del peu s'acoten en tot moment a valors finits.

La definició de l'evolució de la coordenada longitudinal, x_C , del peu respecte al cos s'il·lustra a la Figura 4.3. Cada cicle es divideix en 4 trams i a la Taula 4.2 es detallen les equacions corresponents a cada interval de temps.

En el tram (a), que correspon a la fase de suport, el recorregut del peu és igual a la seva cursa longitudinal, cl , i la seva celeritat respecte a la referència fixa al cos és v_{xr} , igual a la celeritat del cos respecte al terra, v_{av} .

El tram (b), amb una durada Δt_1 , és de transició entre el moviment endarrera i el moviment endavant del peu. A l'expressió pel càlcul de la coordenada x_C hi intervenen els paràmetres b_0 , b_1 i b_2 dels tres punts de control i els polinomis B_i^2 , anomenats polinomis de Bernstein de grau 2.

Al llarg del tram (c) el peu avança amb celeritat v_{xa} , superior a la celeritat que té en el tram (a), doncs el temps disponible per a un recorregut semblant és menor. El tram (d) és simètric al tram (b).

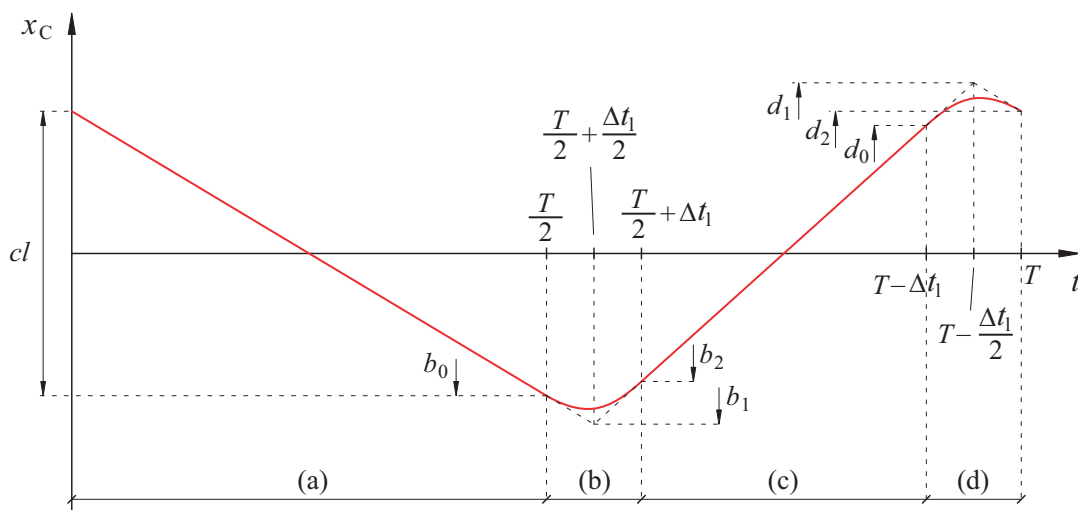
L'evolució de la coordenada vertical, z_C , també es defineix en 4 trams (veure la Figura 4.4 i la Taula 4.3). El tram (a) correspon també a la fase de suport i la coordenada vertical es manté constant en el valor z_{Cmin} .

El tram (b), amb una durada Δt_v , és el moviment d'elevat el peu recorrent una distància cv en vertical, i començant i acabant en velocitat nul·la. En la seva definició hi intervenen 4 punts de control i els polinomis de Bernstein de grau 3, B_i^3 .

Durant el tram (c) el peu avança respecte al cos mantenint constant l'alçada respecte al terra. El tram (d) és el moviment de baixar el peu, i és simètric al tram (b).

A la Figura 4.5 es representa l'evolució resultant de les coordenades longitudinal i vertical del peu respecte al sistema de referència fix al cos del robot. El gràfic correspon als valors de cursa longitudinal i transversal indicats a la Taula 4.1. L'interval de temps de transició en sentit longitudinal és $\Delta t_1 = 0,15$ s i en sentit vertical és $\Delta t_v = 0,5$ s.

L'evolució dels components longitudinal i transversal de la velocitat del peu respecte al cos es representa a la Figura 4.6.


 Fig. 4.3. Evolució de la coordenada longitudinal del peu, x_C , i paràmetres que intervien

 Taula 4.2. Equacions de defineixen l'evolució de la coordenada longitudinal del peu, x_C

Tram	Interval de temps	Equacions
(a)	$0 \leq t < \frac{T}{2}$	$x_C = \frac{cl}{2} - v_{xr} \cdot t$ $v_{xr} = \frac{cl}{T/2}$
(b)	$\frac{T}{2} \leq t < \frac{T}{2} + \Delta t_1$	$x_C = b_0 \cdot B_0^2 + b_1 \cdot B_1^2 + b_2 \cdot B_2^2$ $B_0^2 = 1 - 2u + u^2$ $B_1^2 = 2u - 2u^2$ $B_2^2 = u^2$ $u = \frac{t - T/2}{\Delta t_1}$ <div style="text-align: right;"> $b_0 = -\frac{cl}{2}$ $b_1 = \left(\frac{T/4 + \Delta t_1/2}{T/4} \right) \cdot b_0$ $b_2 = \left(\frac{T/4 - \Delta t_1}{T/4 - \Delta t_1/2} \right) \cdot b_1$ </div>
(c)	$\frac{T}{2} + \Delta t_1 \leq t < T - \Delta t_1$	$x_C = b_2 + v_{xa} \cdot t$ $v_{xa} = \frac{-b_2}{T/4 - \Delta t_1}$
(d)	$T - \Delta t_1 \leq t < T$	$x_C = d_0 \cdot B_0^2 + d_1 \cdot B_1^2 + d_2 \cdot B_2^2$ $u = \frac{t - (T - \Delta t_1)}{\Delta t_1}$ <div style="text-align: right;"> $d_2 = \frac{cl}{2}$ $d_1 = \left(\frac{T/4 + \Delta t_1/2}{T/4} \right) \cdot b_2$ $d_0 = \left(\frac{T/4 - \Delta t_1}{T/4 - \Delta t_1/2} \right) \cdot b_1$ </div>

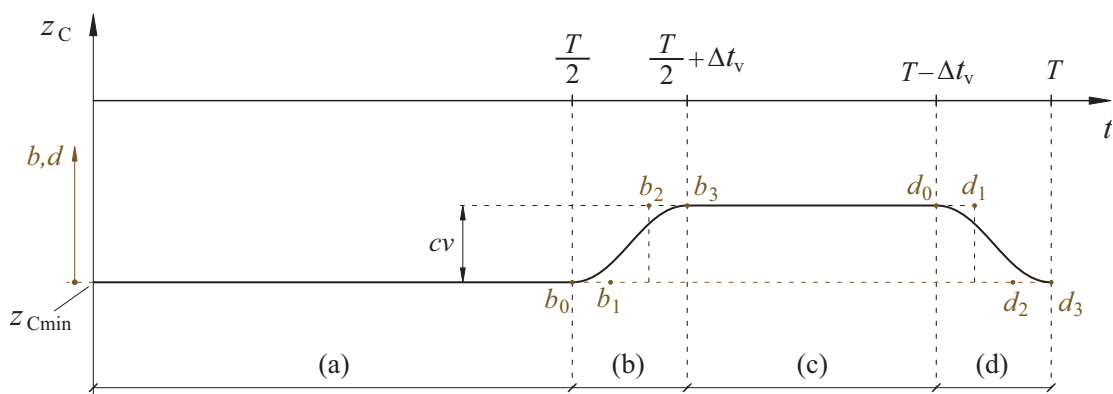


Fig. 4.4. Evolució de la coordenada vertical del peu, z_C , i paràmetres que intervien

Taula 4.3. Equacions de defineixen l'evolució de la coordenada vertical del peu, z_C

Tram	Interval de temps	Equacions
(a)	$0 \leq t < \frac{T}{2}$	$z_C = z_{Cmin}$
(b)	$\frac{T}{2} \leq t < \frac{T}{2} + \Delta t_v$	$z_C = z_{Cmin} + b_0 \cdot B_0^3 + b_1 \cdot B_1^3 + b_2 \cdot B_2^3 + b_3 \cdot B_3^3$ $B_0^3 = (1-u)^3$ $B_1^3 = 3u - 6u^2 + 3u^3$ $B_2^3 = 3u^2 - 3u^3$ $B_3^3 = u^3$ $u = \frac{t - T/2}{\Delta t_v}$
(c)	$\frac{T}{2} + \Delta t_v \leq t < T - \Delta t_v$	$z_C = z_{Cmin} + cv$
(d)	$T - \Delta t_v \leq t < T$	$z_C = z_{Cmin} + d_0 \cdot B_0^3 + d_1 \cdot B_1^3 + d_2 \cdot B_2^3 + d_3 \cdot B_3^3$ $u = \frac{t - (T - \Delta t_v)}{\Delta t_v}$

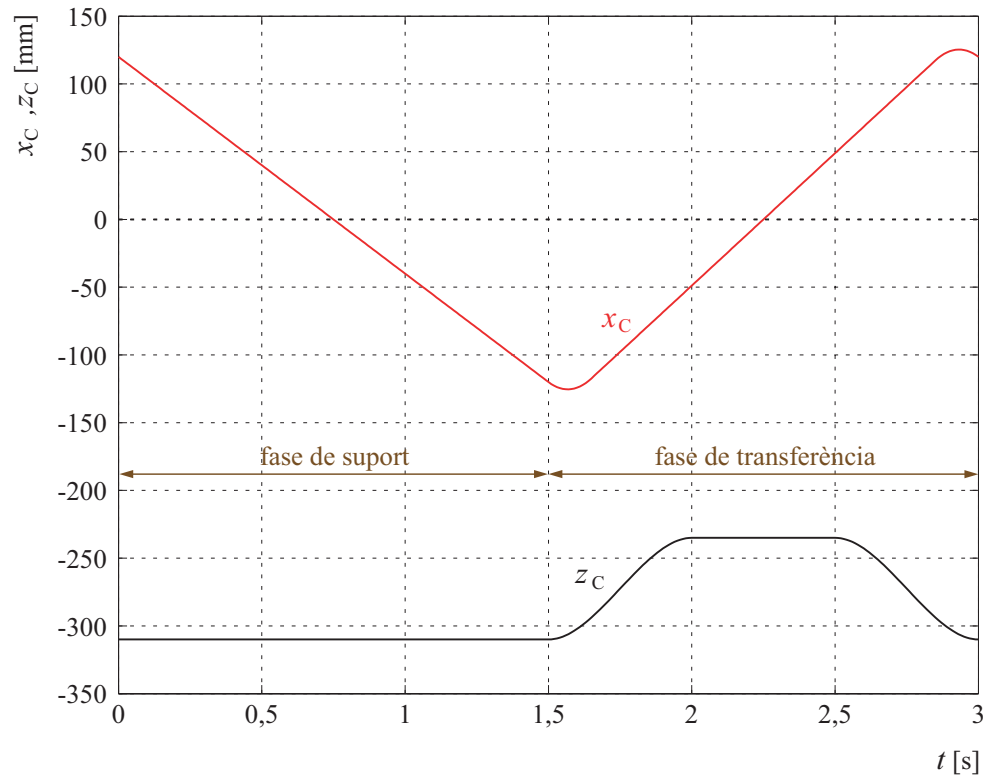


Fig. 4.5. Evolució de les coordenades del peu respecte al cos del robot

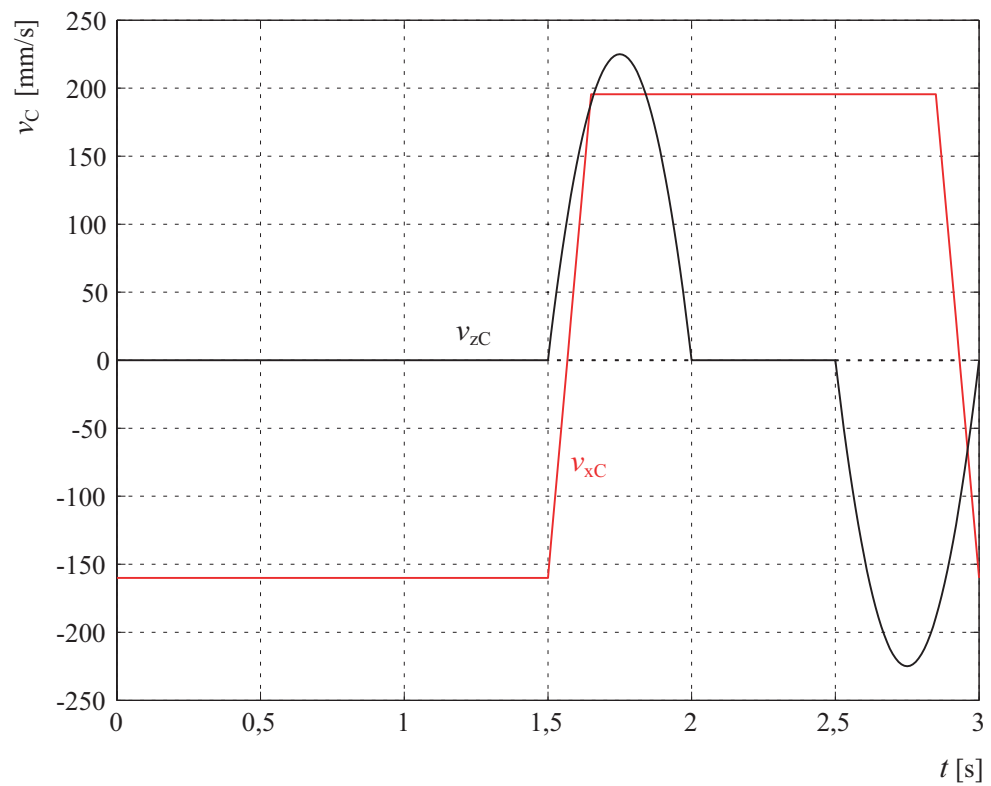


Fig. 4.6. Evolució dels components de la velocitat del peu respecte al cos del robot

4.1.3 Evolució de les coordenades angulars a les articulacions

A partir de l'evolució desitjada de les coordenades del peu al llarg del cicle ha calgut determinar l'evolució dels angles a les tres articulacions del mecanisme. Les Equacions (4.1), (4.2) i (4.3), on per abreviar $c\theta_i$ representa $\cos\theta_i$ i $s\theta_i$ representa $\sin\theta_i$, són les equacions d'enllaç geomètriques que relacionen els dos conjunts de coordenades.

$$(lf \cdot c\theta_2 + lt \cdot c(\theta_2 + \theta_3)) \cdot s\theta_1 - x_C = 0 \quad (4.1)$$

$$-(lf \cdot c\theta_2 + lt \cdot c(\theta_2 + \theta_3)) \cdot c\theta_1 - y_C = 0 \quad (4.2)$$

$$lf \cdot s\theta_2 + lt \cdot s(\theta_2 + \theta_3) - z_C = 0 \quad (4.3)$$

Aquestes equacions formen un sistema d'equacions no lineals que ha estat resolt numèricament, amb el software *MATLAB*[®], per a tot el conjunt d'instants separats 0,01 segons al llarg del cicle de l'anadura. A la Figura 4.7 es representen els resultats de l'evolució dels angles a les tres articulacions.

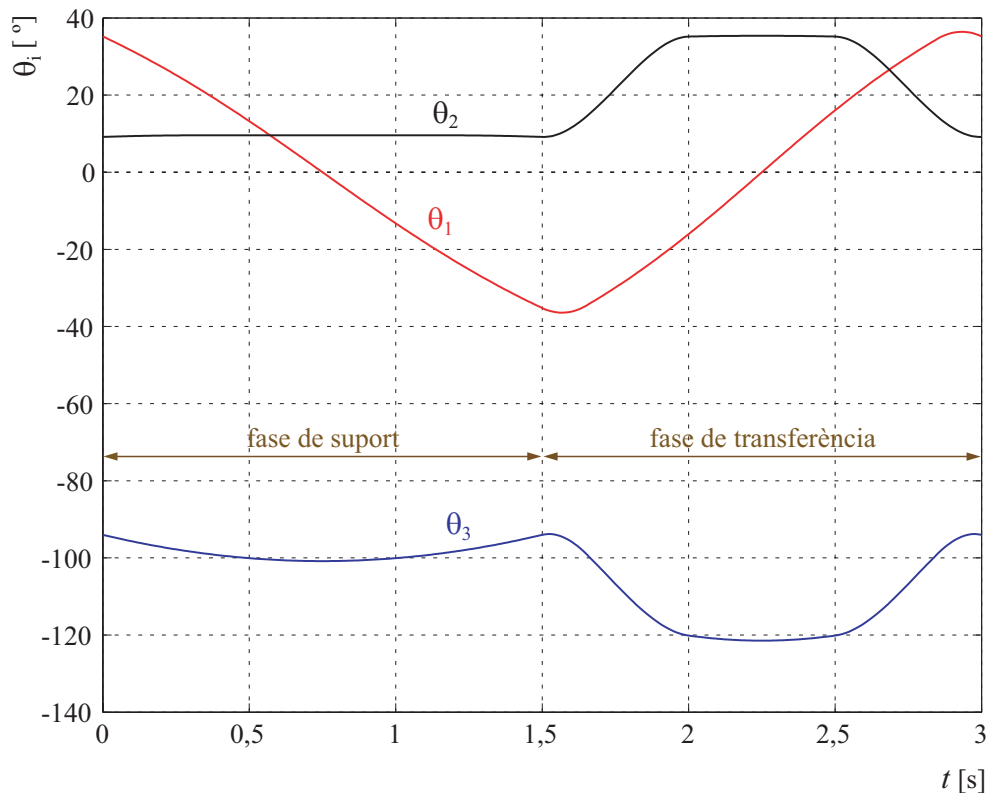


Fig. 4.7. Evolució dels angles a les articulacions al llarg d'un cicle

L'Equació (4.4) permet obtenir les velocitats angulars a les articulacions a partir dels components cartesianes de la velocitat del peu. Els components de la matriu Ψ depenen de la configuració del mecanisme en cada instant i es calculen segons l'Equació (4.5).

$$\begin{Bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{Bmatrix} = \Psi^{-1} \cdot \begin{Bmatrix} v_{xC} \\ v_{yC} \\ v_{zC} \end{Bmatrix} \quad (4.4)$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} (lf \cdot c\theta_2 + lt \cdot c(\theta_2 + \theta_3)) \cdot c\theta_1 & (-lf \cdot s\theta_2 - lt \cdot s(\theta_2 + \theta_3)) \cdot s\theta_1 & -lt \cdot s(\theta_2 + \theta_3) \cdot s\theta_1 \\ (lf \cdot c\theta_2 + lt \cdot c(\theta_2 + \theta_3)) \cdot s\theta_1 & (lf \cdot s\theta_2 + lt \cdot s(\theta_2 + \theta_3)) \cdot c\theta_1 & lt \cdot s(\theta_2 + \theta_3) \cdot c\theta_1 \\ 0 & lf \cdot c\theta_2 + lt \cdot c(\theta_2 + \theta_3) & lt \cdot c(\theta_2 + \theta_3) \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Les Equacions (4.4) i (4.5) s'han resolt per a cada instant separat 0,01 s i els resultats de l'evolució de les velocitats angulars a les tres articulacions es representen a la Figura 4.8.

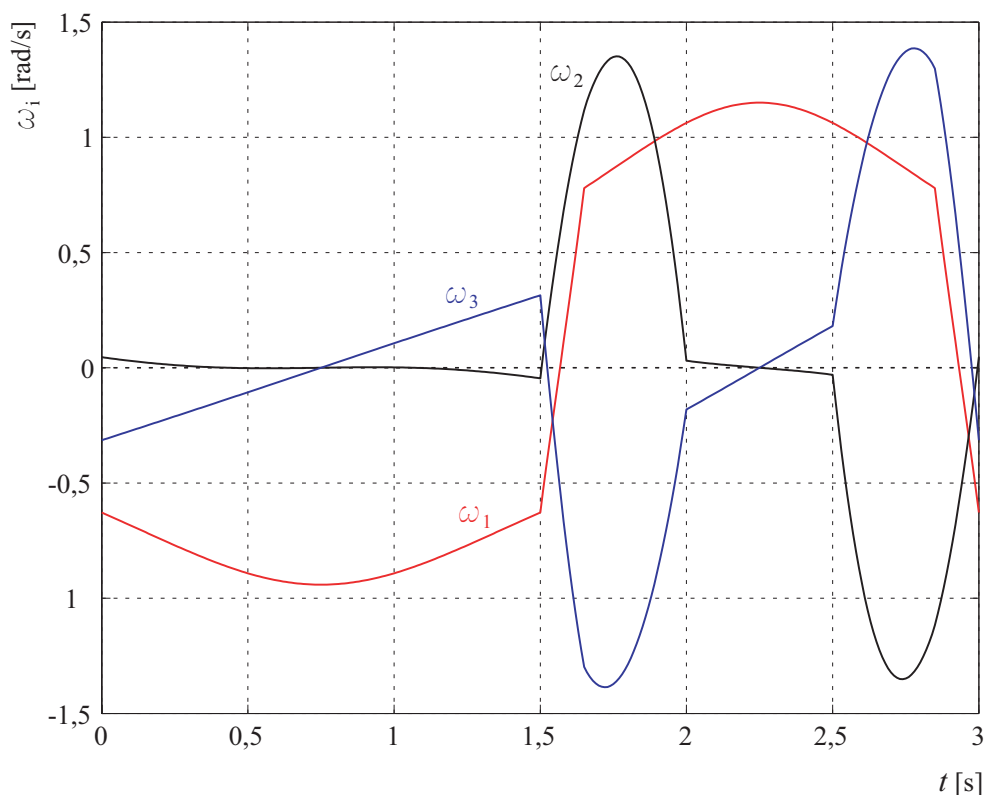


Fig. 4.8. Evolució de les velocitats angulars a les articulacions al llarg d'un cicle

Una vegada conegudes les lleis de moviment de les articulacions s'ha realitzat una simulació cinemàtica del moviment de la pota al llarg d'un cicle. L'eina emprada per a la simulació és el mòdul de mecanismes del software *Pro/Engineer*[®], el mateix que s'ha utilitzat per al disseny de la pota.

El model per a la simulació consisteix en els diferents conjunts que formen cada membre del mecanisme units mitjançant articulacions ideals. Les dades de l'evolució dels angles a les articulacions, obtingudes amb *MATLAB*[®], s'han importat amb el

Pro/Engineer[®] i són les que han governat el moviment de cada articulació idealitzada en el model al llarg de la simulació d'un cicle.

Les Figures 4.9 i 4.10 mostren la trajectòria del peu del mig a la dreta del robot, respecte al cos i respecte al terra.

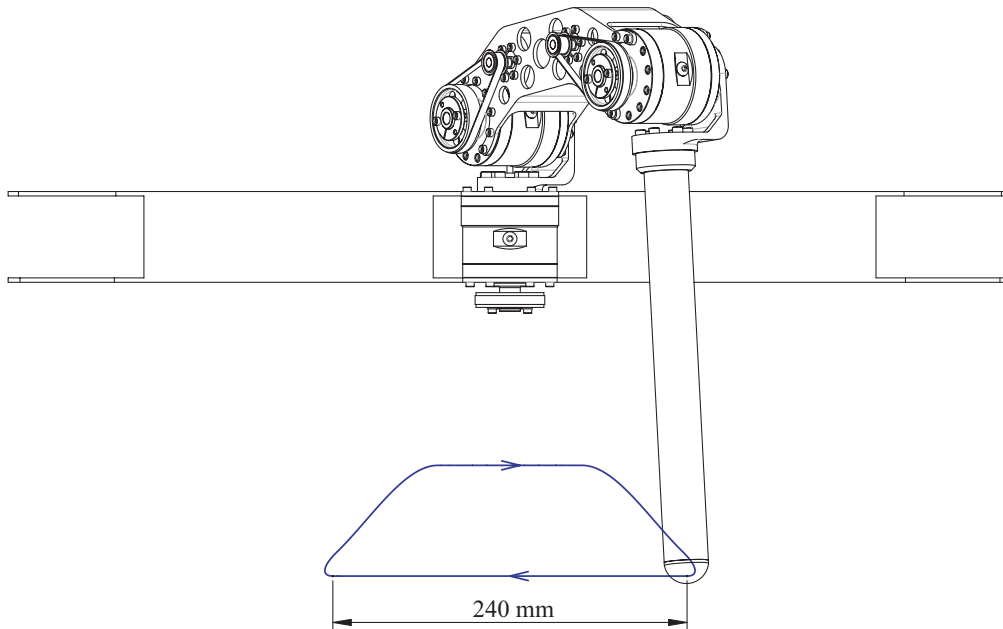


Fig. 4.9. Vista lateral de la trajectòria del peu respecte al cos del robot

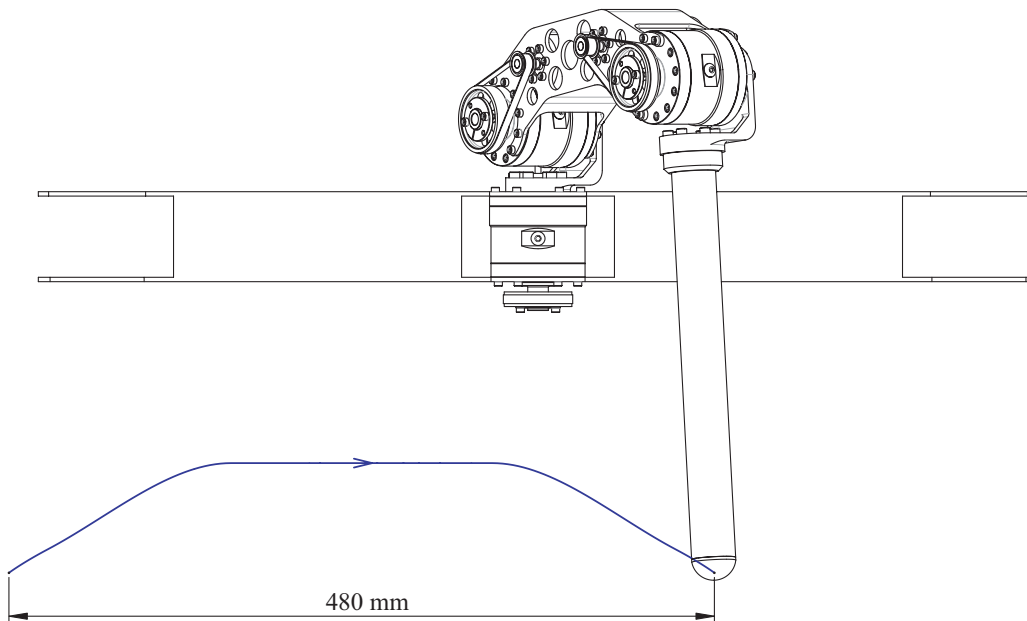


Fig. 4.10. Vista lateral de la trajectòria del peu respecte al terra

4.2 Condicions de càrrega sobre la pota

4.2.1 Evolució del centre de masses i del moment cinètic del robot

Per tal de determinar les accions externes sobre el robot al llarg de cada cicle cal conèixer l'acceleració del seu centre de masses i l'evolució del seu moment cinètic. En el mode d'operació plantejat el robot avança en línia recta, mantenint el cos una velocitat paral·lela al terra i constant. Per tant l'acceleració de qualsevol membre del mecanisme de la pota respecte a un sistema de referència fix al cos és la mateixa que l'acceleració absoluta.

Al llarg del cicle de l'anadura el centre de masses del robot varia de posició respecte al cos com a conseqüència del moviment relatiu entre les potes i aquest. Amb l'objectiu de conèixer com evoluciona la posició d'aquest punt s'ha analitzat primer l'evolució del centre de masses d'una de les potes. Així s'ha realitzat una simulació cinemàtica del moviment de la pota número 4 respecte al cos del robot.

Per a cada configuració analitzada, cada 0,01 s, s'ha determinat la posició del centre de masses de la pota, G_4 , respecte al sistema de referència fix al cos i amb origen al maluc corresponent, H_4 (veure la Figura 4.11). A la Figura 4.12 es representa l'evolució al llarg del cicle de les coordenades d'aquest punt.

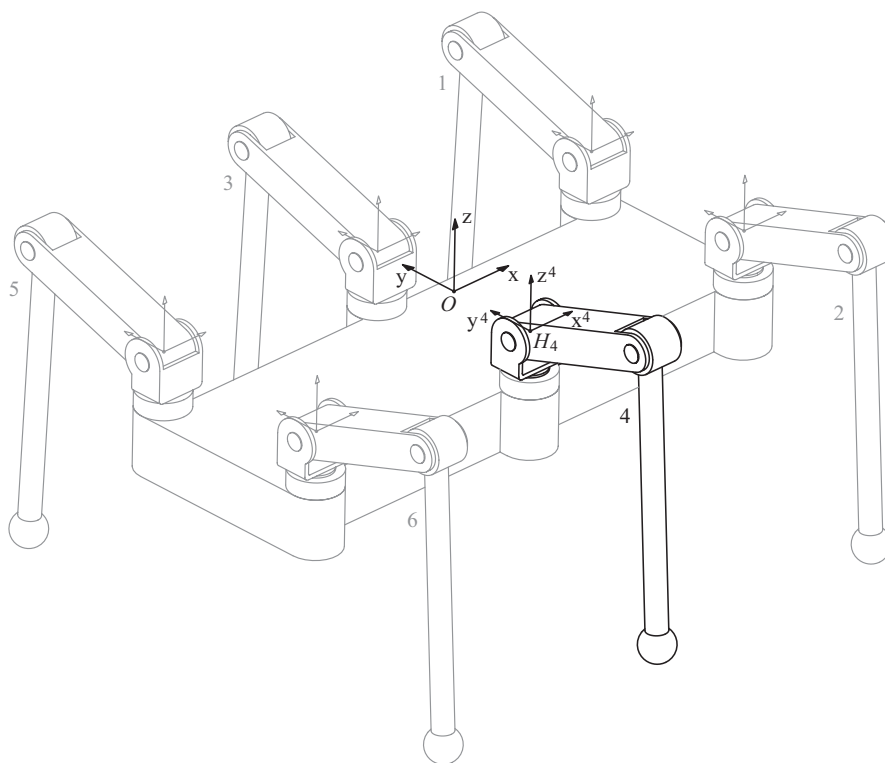


Fig. 4.11. Esquema del robot amb els diferents sistemes de referència

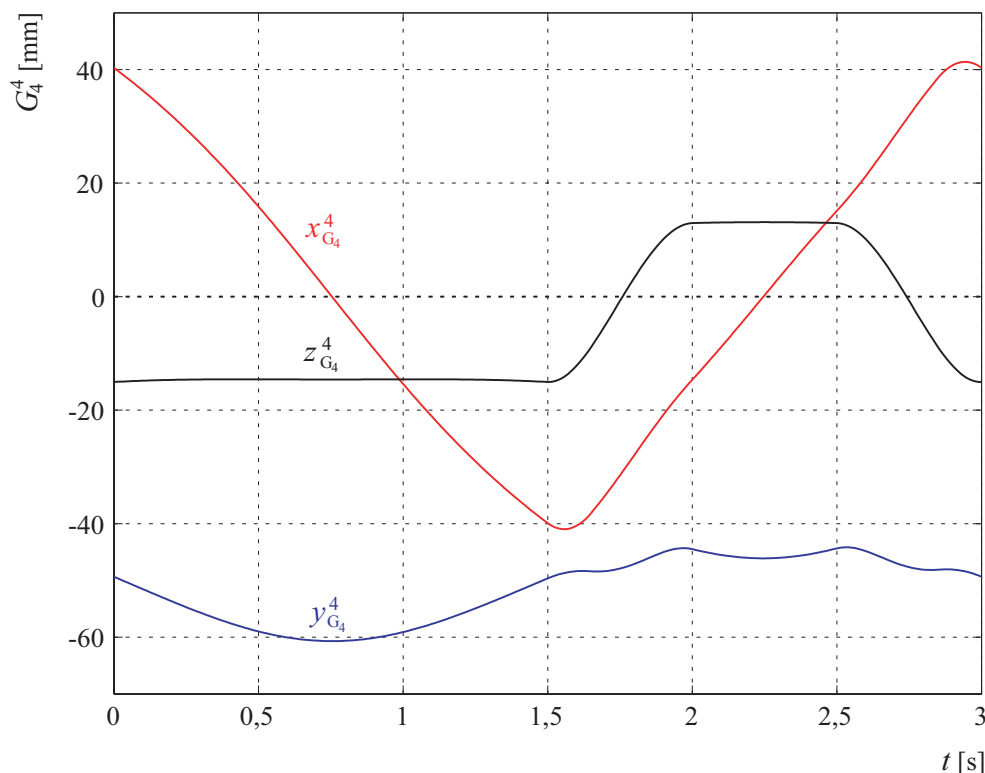


Fig. 4.12. Coordenades del centre de masses de la pota del mig a la dreta respecte al sistema de referència amb origen al seu maluc

S'ha definit un altre sistema de referència amb origen al punt O , horitzontalment centrat al cos del robot i al mateix nivell que els malucs de les diferents potes (veure la Figura 4.11). Les Equacions (4.6), (4.7) i (4.8) relacionen les coordenades del centre de masses de la pota 4 respecte al propi sistema de referència i respecte al sistema de referència amb origen a O .

$$x_{G_4} = x_{G_4}^4 \quad (4.6)$$

$$y_{G_4} = y_{G_4}^4 - 100 \quad (4.7)$$

$$z_{G_4} = z_{G_4}^4 \quad (4.8)$$

Per simetria i analogia de moviments s'ha determinat l'evolució de la posició dels centres de masses de les altres potes respecte al sistema de referència amb origen a O . Amb l'Equació (4.9) s'ha calculat la posició del centre de masses del robot, G , per a cada configuració al llarg del cicle. El centre de masses del cos, G_{cos} , s'ha considerat que coincideix amb el centre geomètric del xassís, i es situa 80,25 mm per sota del punt O .

$$\vec{r}_G = \frac{\vec{r}_{G_{\text{cos}}} \cdot m_{\text{cos}} + (\vec{r}_{G_1} + \vec{r}_{G_2} + \vec{r}_{G_3} + \vec{r}_{G_4} + \vec{r}_{G_5} + \vec{r}_{G_6}) \cdot m_{\text{pota}}}{m_{\text{cos}} + 6 \cdot m_{\text{pota}}} \quad (4.9)$$

A la Figura 4.13 es representa l'evolució de les coordenades del centre de masses del robot respecte al sistema de referència amb origen a O . L'evolució de la coordenada z_G es representa desplaçada 40 mm per a major claredat en el gràfic. S'aprecia que aquest punt es desplaça lleugerament respecte al cos, principalment en la direcció de l'eix z , on el recorregut s'apropa als 9 mm.

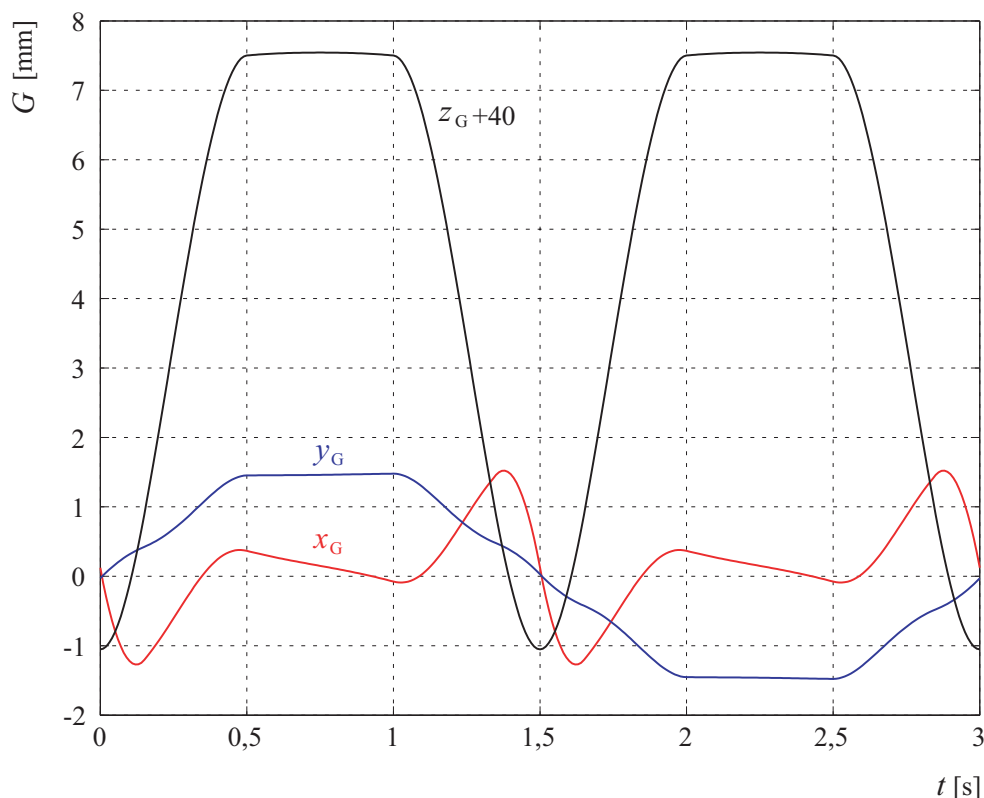


Fig. 4.13. Evolució de les coordenades del centre de masses del robot al llarg d'un cicle

Amb l'anadura de trípodés alternants un grup de tres potes es mou simètricament, i amb un desfasament de meitat del període de l'anadura, respecte a l'altre grup de tres potes. La conseqüència és que les evolucions de les coordenades longitudinal i vertical del centre de masses, x_G i z_G , es repeteixen cada meitat de cicle de l'anadura. En canvi l'evolució de la coordenada transversal y_G es repeteix per a cada cicle.

Per derivació numèrica d'aquestes coordenades, s'han calculat els components de l'acceleració del centre de masses del robot respecte al sistema de referència fix al cos. Com s'ha comentat anteriorment l'acceleració respecte a aquesta referència és igual a l'acceleració absoluta. Els resultats es representen a la Figura 4.14.

El màxim valor absolut dels components longitudinal i vertical de l'acceleració del centre de masses és aproximadament $0,2 \text{ m/s}^2$. En el cas de la component transversal és encara menor, sense arribar a $0,05 \text{ m/s}^2$. Això implica que els diferents components de la força d'inèrcia sobre el conjunt del robot equivalen, com a màxim, a aproximadament el 2% del seu pes.

Donats els reduïts valors dels components de la força d'inèrcia en comparació amb l'acció de la gravetat, s'ha adoptat la simplificació de considerar que l'operació del robot és quasiestàtica.

Per tant a l'hora d'establir les càrregues que es suposaran aplicades al peu durant la simulació del mecanisme es considera que l'acceleració del centre de masses del robot és nul·la en tot moment i que el moment cinètic de tot el conjunt és constant.

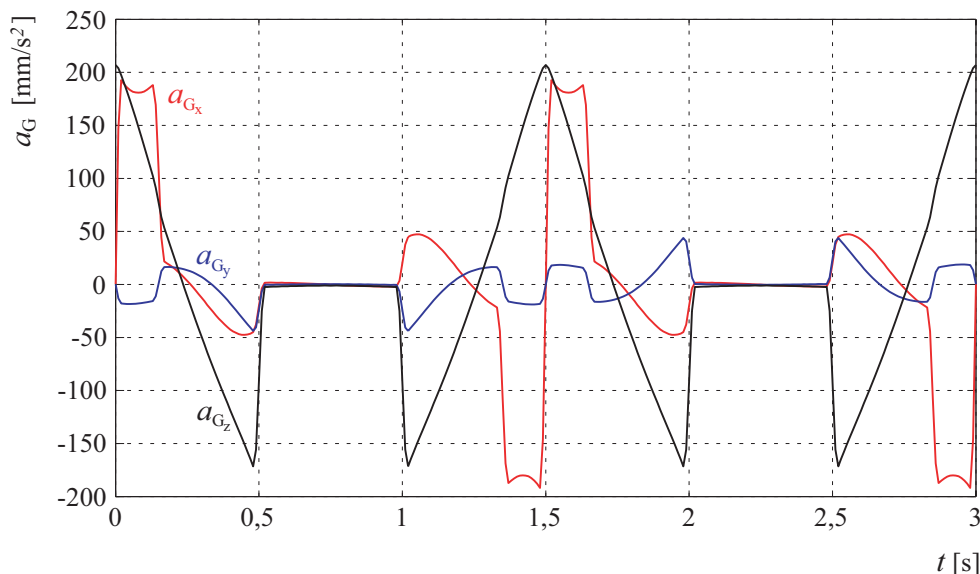


Fig. 4.14. Evolució dels components de l'acceleració del centre de masses del robot al llarg d'un cicle

4.2.2 Reaccions del terra sobre els peus

A la Figura 4.15 es representa l'esquema del robot amb totes les accions externes actuant sobre ell quan les potes 1, 4 i 5 estan en fase de suport. Es suposa que el contacte entre cada peu i el terra és puntual. La resistència que oposa l'aire al moviment del cos i de les potes es considera negligible, doncs la velocitat d'avanç del robot és molt lenta. El moviment de les potes també és lent, essent la celeritat del peu en tot moment inferior a 0,43 m/s.

Es considera que el robot camina al llarg d'una pendent en direcció longitudinal definida per un angle β respecte a la horitzontal. L'aplicació dels teoremes vectorials al conjunt del robot, amb les hipòtesis de càrrega considerades, resulta en el sistema d'equacions lineals expressat en forma matricial a la següent expressió (Equació 4.10).

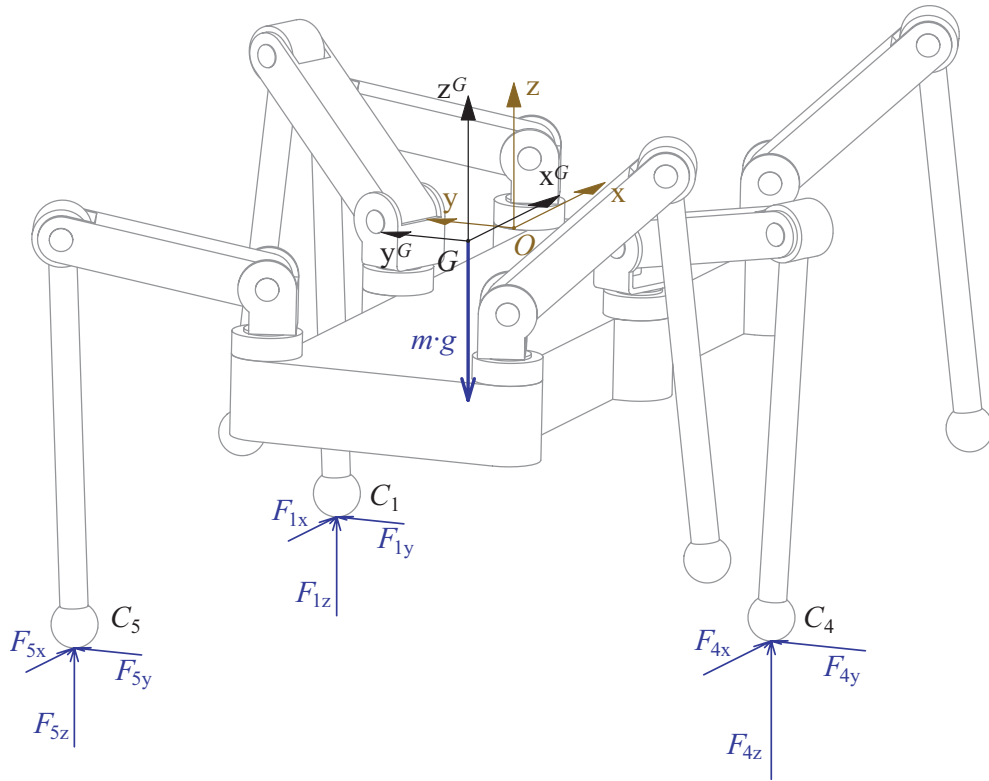


Fig. 4.15. Esquema del robot amb les accions externes sobre ell quan les potes 1, 4 i 5 estan en fase de suport

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -z_{C_4}^G & -z_{C_4}^G & -z_{C_4}^G & y_{C_1}^G & y_{C_4}^G & y_{C_5}^G \\ z_{C_4}^G & z_{C_4}^G & z_{C_4}^G & 0 & 0 & 0 & -x_{C_1}^G & -x_{C_4}^G & -x_{C_5}^G \\ -y_{C_1}^G & -y_{C_4}^G & -y_{C_5}^G & x_{C_1}^G & x_{C_4}^G & x_{C_5}^G & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} F_{1x} \\ F_{4x} \\ F_{5x} \\ F_{1y} \\ F_{4y} \\ F_{5y} \\ F_{1z} \\ F_{4z} \\ F_{5z} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ mg \cdot s \beta \\ mg \cdot c \beta \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4.10)$$

La situació presentada a la Figura 4.15 presenta certes redundàncies que es tradueixen en que l'Equació (4.10) forma un sistema de 6 equacions escalars amb 9 incògnites: els 3 components de les reaccions actuant en cada peu en fase de suport.

Per resoldre aquestes redundàncies s'apliquen una sèrie d'hipòtesis. Es considera que es disposa d'un sistema de control, amb sensors de força en els peus, de manera que en tot moment les reaccions tangencials en els peus són les mínimes que assegurin el

moviment desitjat del robot. Llavors, entre els diferents peus en fase de suport, no hi ha reaccions antagòniques en direcció longitudinal ni transversal.

Com s'ha comentat anteriorment l'operació del robot considerada és caminar sobre un terreny horitzontal o al llarg d'una pendent en direcció longitudinal. Així la resultant de forces en direcció transversal és en tot moment nul·la i, com que no es tindran forces antagòniques, la conclusió és que les tres reaccions transversals en els peus són nul·les. Es poden escriure així les Equacions (4.11) i (4.12). La reacció transversal F_{4y} és nul·la com a conseqüència d'aquestes equacions i de que la resultant de forces en direcció transversal ha de ser nul·la.

$$F_{1y} = 0 \quad (4.11)$$

$$F_{5y} = 0 \quad (4.12)$$

En quant a les reaccions en direcció longitudinal, a part de que siguin mínimes en conjunt, es suposa que el sistema de control reparteix l'esforç longitudinal en les potes anterior i posterior, les números 1 i 5 respectivament, proporcionalment a les reaccions normals que suporten, segons les Equacions (4.13) i (4.14). Així es té en cada peu el mateix marge de seguretat abans de que es produeixi lliscament.

$$F_{1x} = p \cdot F_{1z} \quad (4.13)$$

$$F_{5x} = p \cdot F_{5z} \quad (4.14)$$

Finalment es tenen 10 equacions, l'expressió (4.10) i les Equacions (4.11) a (4.14), i 10 incògnites, els 3 components de les reaccions en els 3 peus i el paràmetre p de proporcionalitat entre reaccions longitudinals i normals. La resolució d'aquest sistema en cada instant analitzat al llarg de la fase de suport, cada 0,01 s, ha permès determinar les reaccions que es suposaran aplicades als diferents peus.

Durant la transició de suport a transferència es produeix un contacte simultani dels 6 peus amb el terra. La redundància que això implicaria en un model format únicament per sòlids rígids, s'ha resolt considerant que els tacs de goma que formen els peus són perfectament elàstics. Llavors es pot fer la hipòtesi de que les reaccions verticals disminueixen, o augmenten, progressivament al llarg de la transició de suport a transferència, o viceversa. S'ha considerat que aquesta transició es realitza en 0,1 s.

En el cas de caminar en línia recta sobre un terra horitzontal, i segons les hipòtesis considerades, totes les reaccions tangencials, tant en direcció transversal com en direcció longitudinal, resulten ser nul·les en tot moment. L'evolució de les reaccions normals als peus 1, 4 i 5 es representa a la Figura 4.16.

Durant la fase de suport d'aquestes tres potes, per a $0 \text{ s} \leq t < 1,5 \text{ s}$, la reacció normal al peu 4, l'únic en contacte amb el terra en el costat dret del robot, es manté aproximadament constant. En canvi la reacció vertical al peu 1 comença essent petita i augmenta progressivament al anar-se apropant aquest peu, durant la fase de suport, al pla mig frontal del robot. En el cas del peu 5 l'evolució és simètrica a la del peu 1, al situar-se inicialment proper al pla mig frontal i allunyar-se'n després.

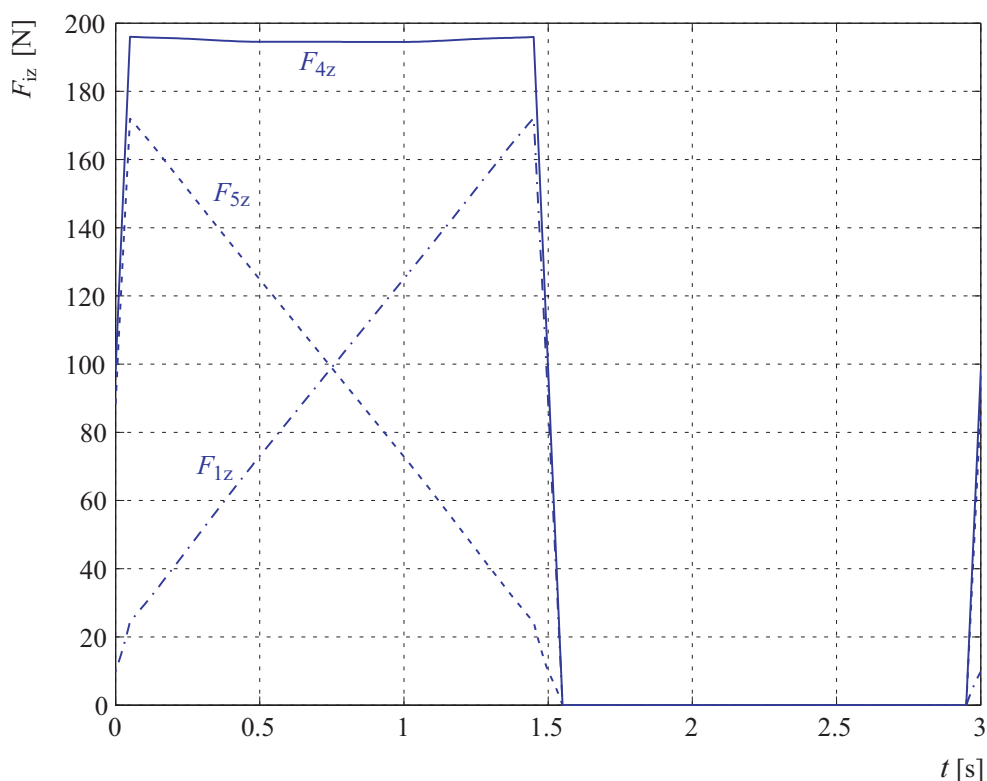


Fig. 4.16. Reaccions normals als peus al llarg d'un cicle quan el robot camina sobre un terreny horitzontal

4.3 Dinàmica del moviment del mecanisme

Una vegada establertes les condicions de càrrega que es consideren aplicades, s'ha realitzat una simulació dinàmica de la pota número 4. El cas analitzat en aquest apartat és la situació ja plantejada de caminar en línia recta, a velocitat constant i sobre un terra horitzontal.

L'objectiu de la simulació dinàmica és obtenir el parell i la potència mecànica requerits a cada articulació del mecanisme per tal d'assegurar el moviment desitjat d'avanç del robot i per tant el moviment especificat del peu respecte al cos del robot.

A la Figura 4.17 es mostra el model del mecanisme utilitzat en la simulació, amb els parells a determinar i les accions externes sobre el peu. En la simulació s'han

implementat tres motors principals, un per a cada articulació, amb el gir programat segons les lleis temporals representades a la Figura 4.7. Al caminar sobre un terra horitzontal les reaccions tangencials sobre el peu són nul·les, i la reacció normal segueix l'evolució determinada a l'apartat anterior i representada a la Figura 4.16.

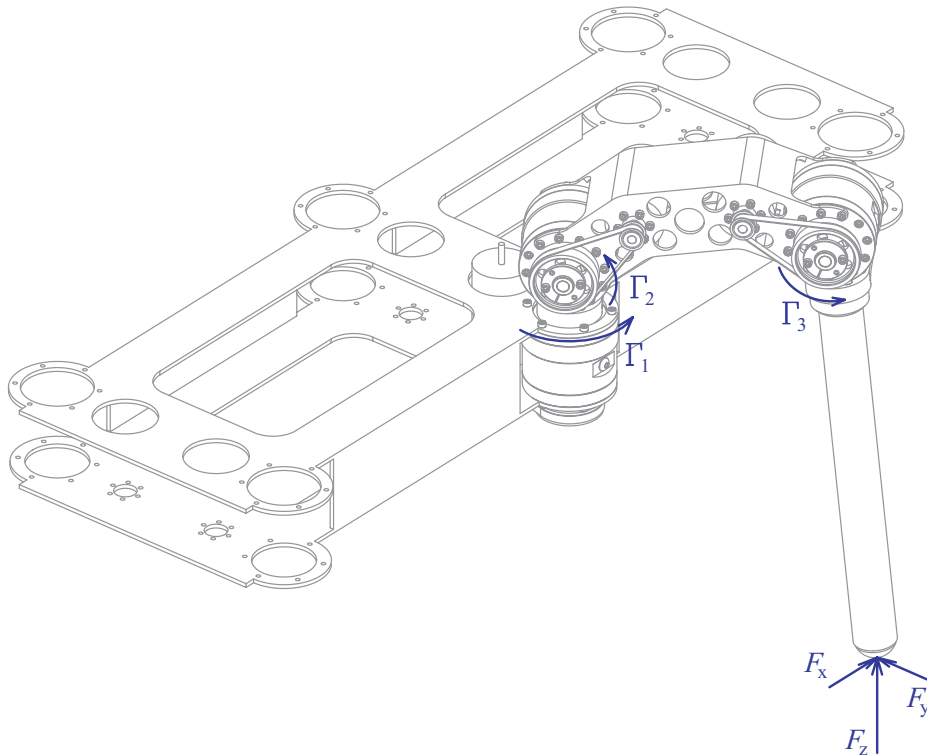


Fig. 4.17. Components de la reacció actuant sobre el peu i parells a les articulacions

La simulació s'ha plantejat de manera que totes la parts internes i mòbils de cada component de l'accionament, el rotor del motor i l'arbre d'entrada del reductor *HD*, giren en tot moment a la velocitat relativa corresponent, segons la velocitat de l'articulació, que és la de la sortida del reductor, i les relacions de transmissió entre ells. Així en la simulació es té en compte l'efecte giroscòpic, d'aquests elements que giren a alta velocitat, en els parells requerits a les articulacions.

Per cada accionament s'han programat dos motors ideals, el motor principal que governa el moviment de l'articulació i un motor secundari que governa el moviment relatiu del rotor del motor. També s'ha programat una transmissió ideal, entre el rotor i l'arbre d'entrada del reductor *HD*, amb la relació de transmissió de la corretja dentada. S'aconsegueix així que aquests elements interns de l'accionament girin a la velocitat corresponent sense que la seva acceleració angular relativa afecti al parell que ha d'exercir el motor principal. D'aquesta manera el parell que exerceix en la simulació cada motor principal és únicament el parell necessari per assegurar el moviment desitjat de l'articulació, que és el parell que l'accionament real hauria de transmetre a la seva sortida.

Els parells requerits a les articulacions evolucionen al llarg del cicle en funció de les reaccions al peu, de l'atracció gravitacional sobre els elements de la pota i de les forces d'inèrcia sobre aquests elements.

El fregament en els rodaments, i altres elements que defineixen el parell cinemàtic, és intern a l'accionament –segons el disseny presentat al capítol anterior–, i per tant no influeix en el parell requerit a la seva sortida per assegurar el moviment desitjat del mecanisme. Tampoc hi influeix la inèrcia a la rotació del rotor i de l'arbre d'entrada del reductor, que són interns a l'accionament i que en la simulació són impulsats pels motors secundaris comentats anteriorment.

A la Figura 4.18 es representen els resultats de parell requerit a les articulacions de la pota número 4, la del mig a la dreta del robot, al llarg d'un cicle. S'aprecia l'important parell en sentit negatiu requerit a la 2a articulació durant la fase de suport.

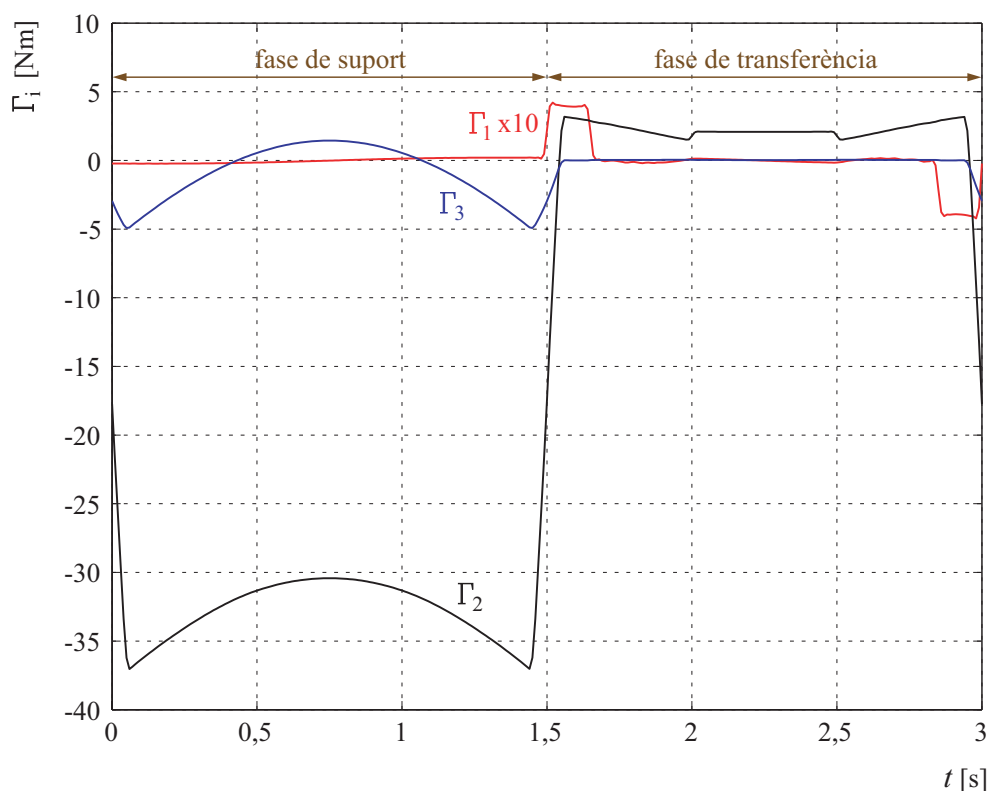


Fig. 4.18. Parells requerits a les diferents articulacions de la pota del mig a la dreta al llarg d'un cicle

Multiplicant en cada instant el parell requerit per la velocitat angular de l'articulació corresponent s'obté la potència mecànica que haurà de desenvolupar l'accionament a la seva sortida. Els resultats es representen a la Figura 4.19.

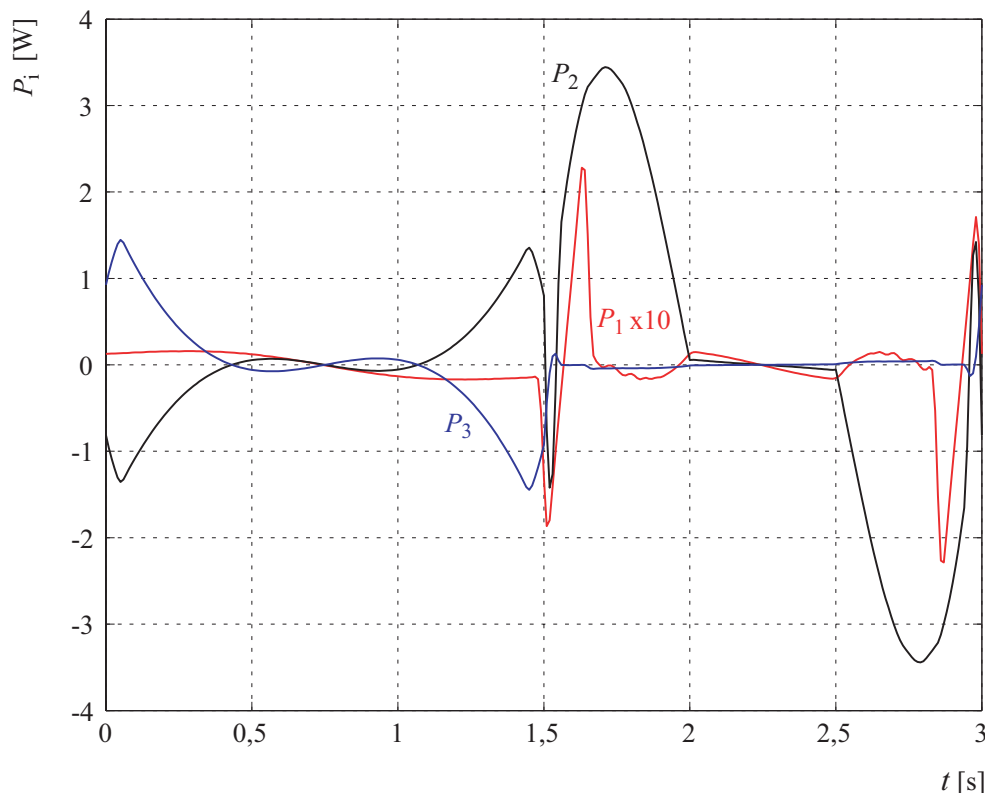


Fig. 4.19. Potència mecànica a les diferents articulacions de la pota del mig a la dreta al llarg d'un cicle

En les tres articulacions hi ha situacions en que l'accionament ha d'impulsar la sortida, quan la potència a desenvolupar és positiva, i altres en que ha de frenar la sortida, quan la potència és negativa. Si es calculés la integral de qualsevol de les corbes de la Figura 4.19 al llarg del cicle el resultat seria nul. El robot avança horitzontalment a velocitat constant i en línia recta, i el moviment del mecanisme és cíclic. Per tant la seva energia mecànica és igual al principi i al final de cada cicle.

És interessant observar que la potència mecànica a desenvolupar per l'accionament de la 2a articulació és més important al elevar el peu, per a $1,5 \text{ s} \leq t < 2 \text{ s}$, i al baixar-lo, per a $2,5 \text{ s} \leq t < 3 \text{ s}$, durant la fase de transferència, que durant la fase de suport.

A la Taula 4.4 es resumeixen els valors extrems dels paràmetres mecànics a les tres articulacions de la pota del mig a la dreta al llarg del cicle estudiat.

Taula 4.4. Sol·licitacions extremes en cada articulació del mecanisme de la pota número 4

Articulació	1		2		3	
	min	max	min	max	min	max
Parell [Nm]	-0,421	0,423	-37,0	3,18	-4,92	1,45
Vel. angular [rad/s]	-0,941	1,15	-1,35	1,35	-1,39	1,39
Pot. mecànica [W]	-0,228	0,229	-3,44	3,44	-1,45	1,45