

ÍNDIX

1 INTRODUCCIÓ	1
1.1 Objectius de la tesi	1
1.2 Interès dels vehicles caminadors	2
1.2.1 Avantatges dels robots caminadors sobre terreny irregular	3
1.2.2 Inconvenients des robots caminadors	4
1.3 Tipologies de robots caminadors existents	6
1.3.1 Robots caminadors estàtics i dinàmics	6
1.3.2 Robots inspirats en exemples biològics	7
1.3.3 Robots de concepció alternativa	10
1.4 Mecanismes de les potes	12
1.4.1 Requeriments del mecanisme de la pota	12
1.4.2 Classificació dels mecanismes de pota segons diferents criteris.....	13
1.5 Accionaments per a les articulacions dels robots caminadors.....	16
1.5.1 Definició d'accionament	16
1.5.2 Requeriments dels accionaments segons el règim de funcionament	17
1.5.3 Especificacions dels accionaments pels moviments de les potes.....	18
1.5.4 Tipus d'accionaments per a robots caminadors	18
1.6 Interès de l'eficiència energètica en robots caminadors	23
2 ESTAT DE L'ART DE L'ACCIONAMENT DE ROBOTS CAMINADORS	27
2.1 Configuració dels robots i estratègies de moviment per a l'eficiència energètica	28
2.1.1 Robots caminadors estàtics	28
2.1.2 Robots caminadors dinàmics	32
2.2 Estudi cinemàtic i dinàmic d'accionaments aplicats a robots caminadors	35

2.3 Els reductors <i>Harmonic Drive</i>	41
2.3.1 Descripció i principi de funcionament	41
2.3.2 Característiques i prestacions segons el subministrador	43
2.3.3 Aplicació a l'accionament de robots caminadors	45
2.3.4 Modelització dels reductors <i>HD</i>	50
2.4 Les transmissions per corretja dentada	55
2.4.1 Característiques de les transmissions per corretja dentada	55
2.4.2 Aplicació a l'accionament de robots	56
2.4.3 Modelització de les transmissions per corretja dentada.....	57
3 MODEL MECÀNIC DE LA POTA	59
3.1 Tipologia del robot i del mecanisme de pota escollits	59
3.2 Model cinemàtic del mecanisme	61
3.3 Disseny mecànic de la pota	64
3.3.1 Implementació del mecanisme de la pota	64
3.3.2 Conjunt de l'accionament	71
3.4 Característiques inercials del model	74
3.4.1 Modelització de les característiques inercials de les peces	74
3.4.2 Massa resultant dels conjunts	76
3.5 Modelització de les articulacions	77
4 SIMULACIÓ DINÀMICA DEL MECANISME	79
4.1 Cinemàtica del moviment del mecanisme	79
4.1.1 Especificacions de l'anadura	79
4.1.2 Definició de la trajectòria del peu	81
4.1.3 Evolució de les coordenades angulars a les articulacions	86
4.2 Condicions de càrrega sobre la pota	89
4.2.1 Evolució del centre de masses i del moment cinètic del robot	89
4.2.2 Reaccions del terra sobre els peus	92
4.3 Dinàmica del moviment del mecanisme	95

5 EXPERIMENTACIÓ PER IDENTIFICAR EL COMPORTAMENT MECÀNIC DELS COMPONENTS	99
5.1 Objectius de l'experimentació	99
5.2 Consideracions sobre el disseny dels experiments	100
5.2.1 Variabilitat del sistema	100
5.2.2 Condicions de funcionament a assajar	101
5.3 Planificació dels experiments	103
5.3.1 Planificació de la 1a sèrie d'experiments	103
5.3.2 Planificació de la 2a sèrie d'experiments	104
5.3.3 Planificació de la 3a sèrie d'experiments	106
5.4 Descripció dels equips experimentals	107
5.4.1 Construcció del prototipus de l'accionament	107
5.4.2 Muntatges experimentals	110
5.4.3 Instrumentació	116
5.4.4 Sistema d'adquisició de dades	120
5.5 Procés experimental	121
5.5.1 Operativa d'experimentació en la 1a sèrie d'experiments	121
5.5.2 Operativa d'experimentació en la 2a i la 3a sèries d'experiments	122
5.5.3 Obtenció del valor mitjà de les dades	123
5.6 Resultats experimentals	123
5.6.1 Resultats de la 1a sèrie d'experiments	123
5.6.2 Resultats de la 2a sèrie d'experiments	125
5.6.3 Resultats de la 3a sèrie d'experiments	127
6 CARACTERITZACIÓ DE LES RESISTÈNCIES PASSIVES EN L'ACCIONAMENT	131
6.1 Motor elèctric de corrent continu	131
6.2 Reductor <i>Harmonic Drive</i>	133
6.2.1 Comportament girant a velocitat constant	134
6.2.2 Comportament a l'arrencada i a baixa velocitat	143
6.2.3 Caracterització resultant del reductor <i>Harmonic Drive</i>	145
6.3 Transmissió per corretja dentada	147
6.3.1 Comportament girant a velocitat constant	147

6.3.2 Comportament a l'arrencada i a baixa velocitat	157
6.3.3 Caracterització resultant de la transmissió per corretja dentada	159

7 COMPORTAMENT MECÀNIC DE LA MAQUINA ELÈCTRICA DE CORRENT CONTINU 163

7.1 Principi de funcionament d'una màquina elèctrica de corrent continu d'imants permanents 163

7.1.1 Parell electromecànic entre estator i rotor	164
7.1.2 Tensió induïda als debanats del rotor	164
7.1.3 Esquema elèctric equivalent	164
7.1.4 Relació entre l'alimentació elèctrica del motor i les condicions de funcionament mecànic	165
7.1.5 Característiques del model de motor escollit per a l'accionament	165

7.2 Prestacions i rendiment en funcionament normal com a motor ... 168

7.2.1 Corba característica del motor	168
7.2.2 Rendiment del motor	170
7.2.3 Funcionament del motor en règim no estacionari	174

7.3 Funcionament de la màquina als quatre quadrants: motor, generador i fre 175

7.3.1 Corba característica de la màquina	175
7.3.2 Balanç de potències a la màquina	177

8 MODEL GLOBAL DELS ELEMENTS DE TRANSMISSIÓ DE L'ACCIONAMENT 179

8.1 Reductor *Harmonic Drive* 179

8.1.1 Parell de fregament a l'arbre de sortida	180
8.1.2 Dinàmica de rotació del subsistema arbre de sortida	181
8.1.3 Reductor com a transmissió ideal	181
8.1.4 Parell de fregament a l'arbre d'entrada	181
8.1.5 Dinàmica de rotació de l'arbre d'entrada	182
8.1.6 Balanç de potències al reductor <i>HD</i>	183

8.2 Transmissió per corretja dentada 184

8.2.1 Parell de fregament a l'arbre de sortida	184
8.2.2 Dinàmica de rotació del subsistema arbre de sortida	185
8.2.3 Corretja dentada com a transmissió ideal	185
8.2.4 Parell de fregament a l'arbre d'entrada	186

8.2.5 Dinàmica de rotació de l'arbre d'entrada	186
8.2.6 Balanç de potències a la transmissió per corretja dentada	187

9 SIMULACIÓ DELS ACCIONAMENTS I AVALUACIÓ ENERGÈTICA..... 189

9.1 Estudi del cas 1190

9.1.1 Trajectòria del peu i requeriments a les articulacions en el cas 1 190

9.1.2 Simulació dels accionaments en el cas 1 192

9.1.3 Avaluació energètica d'un cicle en el cas 1 204

9.2 Estudi del cas 2206

9.2.1 Trajectòria del peu i requeriments a les articulacions en el cas 2 206

9.2.2 Simulació dels accionaments en el cas 2 207

9.2.3 Avaluació energètica d'un cicle en el cas 2 214

9.3 Estudi del cas 3215

9.3.1 Trajectòria del peu i requeriments a les articulacions en el cas 3 215

9.3.2 Simulació dels accionaments en el cas 3 216

9.3.3 Avaluació energètica d'un cicle en el cas 3 218

9.4 Estudi del cas 4219

9.4.1 Trajectòria del peu i requeriments a les articulacions en el cas 4 219

9.4.2 Simulació dels accionaments en el cas 4 221

9.4.3 Avaluació energètica d'un cicle en el cas 4 225

10 CONCLUSIONS I RECOMANACIONS227

10.1 Conclusions 227

10.2 Recomanacions 231

11 BIBLIOGRAFIA235

NOMENCLATURA

Llistat de símbols

Símbol	Descripció
α	Acceleració angular
Γ	Parell
Γ_a	Parell de fregament en buit a l'arrencada
Γ_{arr}	Parell del motor elèctric a l'arrencada
Γ_b	Parell de fregament en buit
Γ_{dif}	Diferència entre els valors experimental i segons model del parell motor
Γ_o	Parell de fregament en buit dinàmic
Γ_{res}	Parell resistent a la sortida del motor
Δt_l	Durada de la transició de moviment del peu en direcció longitudinal
Δt_v	Durada del moviment del peu en direcció vertical
η	Rendiment
η_{em}	Rendiment electromecànic del motor
η_{tot}	Rendiment total del motor
μ	Coefficient de fregament sec
θ	Coordenada angular
σ	Desviació estàndard
ω	Velocitat angular
ω_a	Velocitat angular característica de l'efecte Striebeck
ω_o	Velocitat de rotació en buit del motor elèctric
Ψ	Matriu de canvi de velocitats generalitzades
a_x, a_y, a_z	Components de l'acceleració
a, b	Paràmetres del model no lineal del parell de fregament
b_i, d_i	Ordenades dels punts de control d'una corba de Bézier
$B_i^n(u)$	Polinomi de Bernstein de grau n
br	Longitud del braç solidari a l'estator
c	Coefficient de fregament viscos
cl	Cursa longitudinal del peu respecte al cos
cv	Cursa vertical del peu respecte al cos
C_F	Constant de parell del motor elèctric de corrent continu
C_ω	Constant de velocitat del motor elèctric de corrent continu
eqm	Error quadràtic mitjà
E	Tensió induïda al rotor

E_{ele}	Energia elèctrica proporcionada al motor
E_k	Energia cinètica
E_m	Energia transmesa entre motor i corretja dentada
E_s	Energia transmesa a la sortida del reductor <i>HD</i>
E_{wg}	Energia transmesa entre corretja dentada i reductor <i>HD</i>
F	Component de la força
F_t	Força al tirant
g	Acceleració de la gravetat terrestre
i	Relació de reducció
I_m	Intensitat de corrent elèctric d'alimentació del motor
I_N	Intensitat nominal del sensor de corrent
J_m	Moment d'inèrcia del rotor del motor elèctric
J_{wg}	Moment d'inèrcia del conjunt arbre d'entrada del reductor <i>HD</i>
K	Rati entre rendiments real i nominal del reductor <i>HD</i>
L	Inductància equivalent dels debanats del motor
lf	Longitud del fèmur
lt	Longitud de la tibia
m	Massa
M_{br}	Moment torsor provocat pel braç solidari a l'estator
n	Número de punts experimentals
N	Relació de reducció del reductor <i>Harmonic Drive</i>
p	Rati entre les reaccions longitudinal i normal al peu del robot
P	Potència
P_{ele}	Potència elèctrica d'alimentació del motor
P_{mec}	Potència mecànica desenvolupada pel motor
P_{util}	Potència útil a la sortida del motor
\vec{r}	Vector de posició
r_t	Radi del tambor
R	Resistència elèctrica equivalent en borns del rotor
T	Període de l'anadura
t	Temps
U_m	Tensió d'alimentació en borns del motor elèctric
U_{nom}	Tensió nominal d'alimentació del motor
v_x, v_y, v_z	Components de la velocitat
v_{av}	Velocitat d'avanç del robot
v_{xa}	Celeritat del peu respecte al cos durant la fase de transferència
v_{xr}	Celeritat del peu respecte al cos durant la fase de suport
x, y, z	Coordenades cartesianes

Llistat de subíndexs

Subíndex Descripció

1	Articulació 1
2	Articulació 2
3	Articulació 3
art	Articulació
c	Transmissió per corretja dentada
cos	Cos del robot
cs	Circular spline
e	Entrada
est	Estator
exp	Experimental
f	Fregament
fs	Flexspline
G	Centre de masses
HD	Reductor <i>Harmonic Drive</i>
i	Ideal
m	motor
max	Màxim
min	Mínim
mod	Model
p	Objecte penjat
pota	Pota del robot
RP	Resistències passives
s	Sortida
wg	Wave generator

RESUM

Els robots caminadors presenten alguns avantatges respecte als tradicionals robots mòbils amb rodes, que es resumeixen en major mobilitat i capacitat de superació d'obstacles. Un dels principals problemes actuals en el desenvolupament de robots caminadors és l'elevat consum energètic i la poca autonomia, com a conseqüència de l'elevada massa dels accionaments i del seu rendiment limitat.

Un primer objectiu d'aquesta tesi és desenvolupar i caracteritzar energèticament un accionament rotatiu per a les articulacions de la pota d'un robot caminador. Les seves principals especificacions són: capacitat de transmetre un parell elevat, lleuger i compacte, fàcilment controlable i rendiment elevat. Un cop desenvolupat aquest accionament s'analitza el comportament energètic global de la pota.

S'han analitzat diversos estudis existents relacionats amb el treball mecànic que per caminar han de desenvolupar els mecanismes de les potes del robot. També s'han estudiat altres publicacions que tracten del rendiment dels accionaments en robots caminadors.

La pota dissenyada és de tipus insecte, amb tres graus de llibertat, i l'aplicació considerada és un robot hexàpode. L'accionament rotatiu consta de tres elements: un motor de corrent continu, una transmissió per corretja dentada i un reductor *Harmonic Drive*[®]. El conjunt d'aquest reductor s'ha dissenyat específicament per a aquesta aplicació, de manera que el mateix conjunt materialitza l'enllaç de cada articulació de la pota.

Per tal de determinar els requeriments mecànics a les articulacions, s'ha portat a terme una simulació dinàmica del moviment de la pota. Aquesta simulació s'ha realitzat considerant que les articulacions del mecanisme són ideals i sense resistències passives. Aquestes es tracten posteriorment al analitzar el comportament del reductor. Els resultats obtinguts són els parells requerits a les diferents articulacions al llarg d'un cicle.

Amb l'objectiu de determinar el comportament real dels components de l'accionament, per a diferents parells transmesos i per a diferents velocitats de gir a la sortida, s'han plantejat i realitzat diverses sèries d'experiments. Per portar a terme els experiments ha estat necessària la construcció d'un prototipus de l'accionament.

A partir de les dades experimentals s'han definit uns models matemàtics que representen les resistències passives que es tenen a cada component de l'accionament

per a diferents condicions de funcionament. S'ha realitzat un ajust per mínims quadràtics per tal determinar els paràmetres dels models que millor ajusten els resultats a les dades experimentals.

Com que cada motor de l'accionament treballa com tal o com fre, segons la fase del moviment, s'ha analitzat en detall el funcionament d'una màquina elèctrica de corrent continu d'imants permanents, des del punt de vista de la conversió de potència elèctrica en mecànica i viceversa, en els 4 quadrants i tenint en compte els diferents modes de funcionament: com a motor, com a fre-generador i com a fre. Pel model de motor escollit per a l'aplicació s'han determinat els rendiments electromecànic i total previstos.

Posteriorment s'han definit uns models globals del comportament mecànic dels elements de transmissió de l'accionament: la corretja dentada i el reductor *HD*, que integren la modelització de les resistències passives i també inclouen la inèrcia de les parts mòbils de cada element.

Finalment s'ha realitzat la simulació dels tres accionaments d'una pota al llarg d'un cicle de l'anadura del robot. Aquesta simulació s'ha portat a terme a partir dels requeriments de parell i velocitat angular a cada articulació i utilitzant els models dels elements definits anteriorment. L'objectiu de la simulació és estimar l'energia intercanviada a cada element de l'accionament, avaluant per separat l'energia transmesa en sentit directe, des de l'alimentació del motor a la sortida del reductor, i en sentit invers. El resultat més important és l'estimació de l'energia elèctrica que cal subministrar a cada motor per cada cicle de moviment de la pota.

Dels diversos casos analitzats se'n treu la conclusió que l'energia elèctrica que cal subministrar als motors és sempre molt superior, de l'ordre de 30 vegades, a l'energia mecànica que l'accionament transmet a l'articulació. La despesa energètica dels motors depèn poc de les condicions de càrrega a les que està sotmesa la pota, en canvi el moviment que descriuen les articulacions al llarg del cicle hi té una influència important. Reduint el recorregut angular del moviment de les articulacions s'aconsegueix un considerable estalvi energètic, doncs disminueix l'energia dissipada per les resistències passives.