

## 5 EXPERIMENTACIÓ PER IDENTIFICAR EL COMPORTAMENT MECÀNIC DELS COMPONENTS

En aquest capítol es descriu l'experimentació portada a terme per tal de determinar el comportament mecànic real de l'accionament. Al primer apartat es fixen els objectius concrets de cada sèrie d'experiments. Més endavant es planteja el disseny i la planificació dels experiments, tenint en compte les condicions de funcionament de l'accionament en l'aplicació al mecanisme de la pota del robot. Posteriorment es descriu el prototipus de l'accionament construït específicament per a aquest treball i els equips experimentals. Finalment es detallen els resultats experimentals.

### 5.1 Objectius de l'experimentació

En tots els casos l'objectiu dels experiments és determinar el parell motor necessari per tal de fer girar l'accionament dissenyat, o un subconjunt d'aquest, sota diferents condicions de funcionament.

A partir de les dades obtingudes de parell i velocitat angular a la sortida i a l'entrada de cada conjunt assajat, al capítol següent es dedueixen els models matemàtics que representen el comportament mecànic de cada element.

Per poder estudiar per separat cadascun dels elements principals de l'accionament –el motor, la transmissió per corretja dentada i el reductor *Harmonic Drive*<sup>®</sup>– s'han realitzat diferents sèries d'experiments en els que intervenen un nombre diferent d'elements:

- 1a sèrie: el motor elèctric sol
- 2a sèrie: el conjunt format pel motor elèctric i el reductor *HD*
- 3a sèrie: l'accionament complet, format pel motor elèctric, la transmissió per corretja dentada i el reductor *HD*

#### **Objectius de la 1a sèrie d'experiments**

En la primera sèrie d'experiments l'objectiu és determinar el parell necessari entre el rotor i l'estator del motor elèctric,  $T_m$ , per fer girar el motor en buit, és a dir, amb un parell nul a la sortida, i per a diferents velocitats de rotació del motor,  $\omega_m$ . El cas particular que es vol analitzar en aquesta sèrie és quan no hi ha càrregues radials, ni axials, ni de moment flexor sobre el rotor.

### **Objectius de la 2a sèrie d'experiments**

En aquest cas s'analitza el conjunt format pel motor elèctric de corrent continu connectat directament a l'entrada del reductor *HD*. L'objectiu és determinar el parell motor necessari en funció de les diferents condicions de parell i velocitat a la sortida del reductor.

### **Objectius de la 3a sèrie d'experiments**

En la 3a sèrie s'assaja el conjunt complet de l'accionament dissenyat, format pel motor elèctric, la transmissió per corretja dentada i el reductor *HD*. Un dels objectius és determinar el parell motor necessari en funció de les diferents condicions de parell i velocitat a la sortida de l'accionament.

En aquests experiments també es vol determinar, per a cada punt de funcionament assajat, el parell axial entre l'estator del motor elèctric i el seu suport. L'objectiu és disposar de les dades que permetin comprovar la relació entre el corrent d'alimentació del motor i el parell exercit per aquest entre estator i rotor. L'anàlisi d'aquestes dades es presenta al capítol 7.

## **5.2 Consideracions sobre el disseny dels experiments**

### **5.2.1 Variabilitat del sistema**

En tot experiment és lògic esperar que es produirà una certa variabilitat de les dades experimentals obtingudes sota condicions d'experimentació aparentment idèntiques. Les causes poden tenir dos orígens clarament diferenciats: per una banda la influència de magnituds o paràmetres no controlats en l'experiment, i per una altra la resolució, precisió i repetibilitat dels sensors i del sistema d'adquisició de dades.

Unes magnituds que poden influir lleugerament en els resultats obtinguts són les condicions ambientals de temperatura i humitat. Tots els experiments s'han portat a terme al mateix laboratori, en una habitació interior de l'edifici de l'Escola Politècnica Superior de la UdL i que durant els dies d'experimentació s'ha mantingut a una temperatura d'entre 22 i 23 °C i a una humitat relativa d'entre el 45 i el 50 %.

La temperatura de treball del reductor *Harmonic Drive*<sup>®</sup> afecta considerablement al seu rendiment (Harmonic Drive AG, 2003). Per tal de minimitzar l'efecte d'aquesta magnitud en la variabilitat de les dades experimentals, abans de començar cada experiment s'ha mantingut l'accionament girant en buit i a elevada velocitat fins a establir la temperatura exterior del bloc del reductor *HD* a aproximadament 30 °C.

També influencien en el comportament del reductor *HD* les dimensions exactes i la qualitat de fabricació de les peces que formen el conjunt del reductor. La precàrrega axial dels rodaments de contacte angular, entre el bloc del reductor i l'arbre de sortida, depèn de les dimensions exactes, dins els intervals de tolerància admesos, que tenen les peces sobre les que es munten els rodaments. El diàmetre i l'estat de les superfícies sobre les que llisquen els llavis dels anells d'estanquitat afecten al parell de fregament entre aquests elements. Per tant, els resultats experimentals són vàlids únicament per a la unitat assajada o per a altres unitats de característiques completament equivalents.

La tensió inicial de la corretja dentada afecta a la càrrega sobre els rodaments dels dos eixos, i també a l'estat inicial d'estirament de la corretja al voltant del qual es produeix la histeresi d'aquesta al passar del tram tesat al destesat i viceversa. Per tant, és important que en la 3a sèrie d'experiments la tensió inicial de la corretja sigui constant en tots els experiments.

Tot i així cal tenir present que el comportament del sistema assajat depèn del fregament entre parts mòbils i de la histeresi dels elements deformables, que són fenòmens que presenten una certa variabilitat intrínseca.

### **5.2.2 Condicions de funcionament a assajar**

S'han assajat els components de l'accionament en diferents condicions de funcionament, per tal de tenir una bona representativitat de la diversitat de requeriments en les articulacions a ser accionades. Així els experiments s'han planificat de manera que amb un conjunt discret de punts de funcionament es cobreix tot un ventall de possibles condicions d'operació dels accionaments en el mecanisme de la pota. Cada punt de funcionament queda definit per una parella de valors: el parell i la velocitat de gir a la sortida de l'accionament.

Es tenen situacions en les que l'accionament impulsa l'eix de sortida i altres en que l'accionament actua com a fre, oposant-se al moviment de l'eix de sortida. En l'experimentació portada a terme s'analitzen sempre situacions en que l'accionament impulsa la sortida. L'objectiu és conèixer les resistències passives en els diferents elements de l'accionament en funció de la càrrega a la que estan sotmesos i la velocitat de funcionament. Una vegada conegudes aquestes resistències passives caldrà tenir en compte que el seu efecte sempre és subministrar una potència negativa a l'element en qüestió, tant si l'accionament impulsa la sortida com si la frena.

A la Taula 5.1 es mostren els valors absoluts màxims dels parells i les velocitats angulars a les articulacions de la pota del mig a la dreta del robot,  $\Gamma_{art}$  i  $\omega_{art}$ , segons la simulació dinàmica descrita al capítol anterior. Cal recordar que les condicions de

parell i velocitat a cada articulació són les que es tenen a la sortida de l'accionament corresponent,  $\Gamma_s$  i  $\omega_s$ . A la mateixa taula també es mostren els valors absoluts màxims de les velocitats angulars de l'arbre d'entrada del reductor i del motor.

**Taula 5.1.** Condicions extremes en l'accionament de cada articulació

	Articulació		
	1a	2a	3a
màx $ \Gamma_s $ [Nm]	0,48	37,2	5,05
màx $ \omega_s $ [rad/s]	1,15	1,35	1,39
màx $ \omega_{wg} $ [rad/s]	138	162	167
màx $ \omega_m $ [rad/s]	460	540	556

A partir dels valors mostrats a la Taula 5.1 s'han decidit les condicions de funcionament en els experiments. Els rangs assajats de cada magnitud van des de zero fins el valor màxim mostrat a la Taula 5.2.

**Taula 5.2.** Valors extrems de les magnituds assajades en els experiments

	Experiments		
	1a sèrie	2a sèrie	3a sèrie
màx $\Gamma_s$ [Nm]	–	13,18	17,48
màx $\omega_s$ [rad/s]	–	$\approx 1,6$	$\approx 1,6$
màx $\omega_{wg}$ [rad/s]	–	$\approx 192$	$\approx 192$
màx $\omega_m$ [rad/s]	$\approx 600$	$\approx 192$	$\approx 640$

Els valors màxims dels parells a la sortida del reductor que s'han assajat en les 2a i 3a sèries d'experiments són inferiors al parell màxim que es dona en la 2a articulació del mecanisme de la pota estudiada. Les limitacions en l'experimentació les imposen diferents factors que es comenten més endavant al detallar les condicions experimentals.

Hauria estat preferible poder experimentar en tot el rang de parell que es dona en els accionaments de la pota del robot. Tot i així la zona on és més important analitzar el comportament és per a parells actuant baixos, on la influència relativa de les resistències passives és major.

En el mecanisme de la pota, la càrrega que actua sobre l'accionament d'una articulació la constitueix principalment el parell torsor requerit per descriure el moviment dels membres muntats a partir d'ella. El parell torsor depèn de les accions externes sobre aquests membres i de la seva pròpia inèrcia quan són accelerats. Però

també poden intervenir-hi les forces i els parells d'enllaç a l'articulació, doncs un augment en les reaccions d'enllaç pot implicar un augment de les resistències passives a l'articulació.

En els experiments realitzats el moment torsor a la sortida de l'accionament s'ha simulat per mitjà d'un objecte de massa  $m_p$  penjat d'un cable enrotllat al voltant d'un tambor solidari a l'arbre de sortida del reductor.

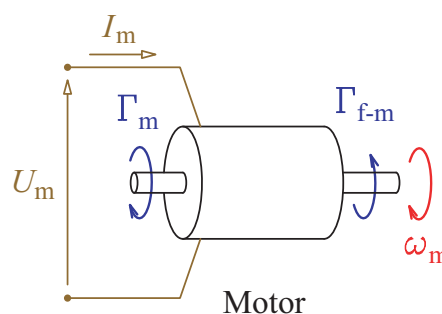
Diferents pesos de l'objecte penjat impliquen diferents moments torsors a la sortida, a la vegada que impliquen també diferents reaccions d'enllaç. Per tant amb aquesta metodologia experimental no és possible assajar diferents parells d'accionament i diferents reaccions d'enllaç per separat.

Les diferents velocitats de gir s'aconsegueixen amb diferents tensions d'alimentació del motor. No és important fixar amb precisió un valor concret de la tensió d'alimentació ni de la velocitat, doncs aquestes són enregistrades pel sistema d'adquisició de dades i el seu valor precís és tingut en compte més endavant al analitzar les dades experimentals.

## 5.3 Planificació dels experiments

### 5.3.1 Planificació de la 1a sèrie d'experiments

L'objectiu és determinar el parell motor necessari per fer girar aquest en buit. A la Figura 5.1 es mostra un esquema amb les variables que intervenen en l'experimentació.



**Fig. 5.1.** Esquema del motor amb les variables que intervenen en la 1a sèrie d'experiments

Les variables a mesurar en cada punt de funcionament són la velocitat angular del rotor,  $\omega_m$ , i la tensió i el corrent d'alimentació del motor,  $U_m$  i  $I_m$ . El parell motor,  $\Gamma_m$ , es determina amb l'Equació (5.1) a partir del corrent d'alimentació i la constant de parell del motor,  $C_T$ .

$$\Gamma_m = C_\Gamma \cdot I_m \quad (5.1)$$

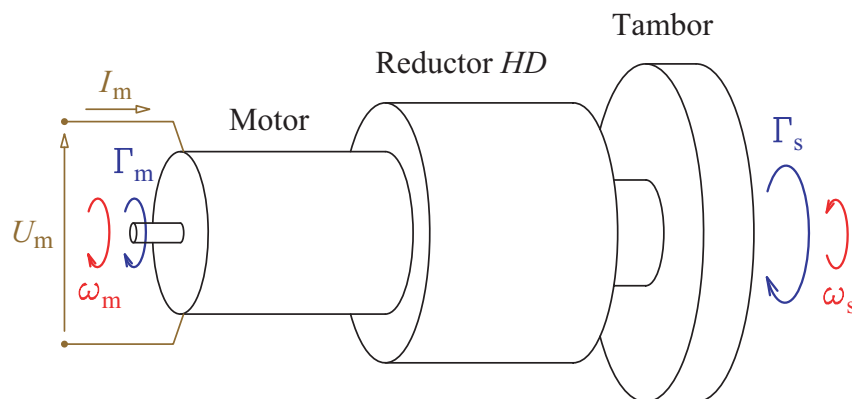
### Condicions a experimentar

S'han assajat diferents velocitats de rotació del motor, abastant tot el rang de velocitats que es donen en l'accionament, on el màxim és aproximadament 556 rad/s o 5300 min<sup>-1</sup>. Les diferents velocitats s'aconsegueixen variant la tensió d'alimentació del motor. Per tal de cobrir tot el rang de possibles velocitats del motor en l'accionament, les diferents tensions assajades s'han repartit entre zero i un màxim de 18 V. S'ha assajat un major nombre de punts per a tensions baixes, per sota de 8 V, amb l'objectiu d'identificar millor el comportament a baixa velocitat. Els valors assajats són:

$$U_m [\text{V}] = 0,6 / 1 / 2 / 3 / 4 / 5 / 6 / 7 / 8 / 10 / 12 / 14 / 16 / 18$$

### 5.3.2 Planificació de la 2a sèrie d'experiments

L'objectiu és determinar el parell motor necessari per a diferents condicions de funcionament del conjunt format pel motor i el reductor *HD*. A la Figura 5.2 es mostra un esquema del conjunt assajat amb les variables que hi intervenen.



**Fig. 5.2.** Esquema del conjunt assajat en la 2a sèrie d'experiments

Les variables a mesurar en cada punt de funcionament són també en aquest cas  $\omega_m$ ,  $U_m$  i  $I_m$ , a més de la massa de l'objecte penjat,  $m_p$ . El parell motor es determina per càlcul segons l'Equació (5.1).

El parell a la sortida,  $\Gamma_s$ , és la conseqüència del moment torsor provocat per l'objecte penjat del tambor. Es calcula amb l'Equació (5.2), a partir de la massa de l'objecte penjat,  $m_p$ , i el radi del tambor fixat a la sortida,  $r_t$ .

$$\Gamma_s = m_p \cdot g \cdot r_t \quad (5.2)$$

La velocitat a la sortida ve donada per l'Equació (5.3), on  $i_{HD}$  és la relació de reducció del reductor  $HD$ .

$$\omega_s = \frac{\omega_m}{i_{HD}} \quad (5.3)$$

### **Condicions a experimentar**

#### **Funcionament girant a velocitat constant**

S'han assajat diferents velocitats de rotació a la sortida del reductor, abastant tot el rang de velocitats que es donen en l'accionament, amb un màxim d'aproximadament 1,4 rad/s. Les corresponents velocitats del motor en aquest conjunt són menors que en l'accionament complet, doncs en aquest cas no es té la transmissió per corretja dentada entre el reductor i el motor.

Així les tensions d'alimentació emprades en aquesta sèrie d'experiments s'han distribuït linealment entre un mínim de 1 V i un màxim de 8 V.

En aquesta sèrie d'experiments s'observa una marcada influència del parell a la sortida en la velocitat del motor, quan es manté constant la tensió d'alimentació. Per aquest motiu no s'han assajat els valors mínims de tensió per a parells a la sortida elevats ni el valor màxim de 8 V per a parells a la sortida baixos. Els valors de tensió d'alimentació utilitzats són:

$$U_m [\text{V}] = 1 / 2 / 3 / 4 / 5 / 6 / 7 / 8$$

El rang de moments torsors a la sortida que s'han assajat en aquesta sèrie té com a màxim 13,18 Nm. La limitació ve imposada pel parell nominal màxim del motor, que és de 0,18 Nm. Els valors de la massa de l'objecte penjat s'han establert entre 0 i aproximadament 30 kg, amb el que s'obté el moment torsor de 13,18 Nm. Els valors assajats s'han fixat cada 10 kg, però afegint dos valors en 2 kg i 5 kg per tal d'estudiar amb major detall el rang de parells baixos a la sortida del reductor, quan la importància relativa de les resistències passives és major.

Els valors exactes de les masses assajades resulten de la massa real dels pesos comercials utilitzats en l'experimentació com a objectes penjats, i són:

$$m_p [\text{kg}] = 0 / 2,012 / 5,098 / 9,620 / 19,47 / 29,66$$

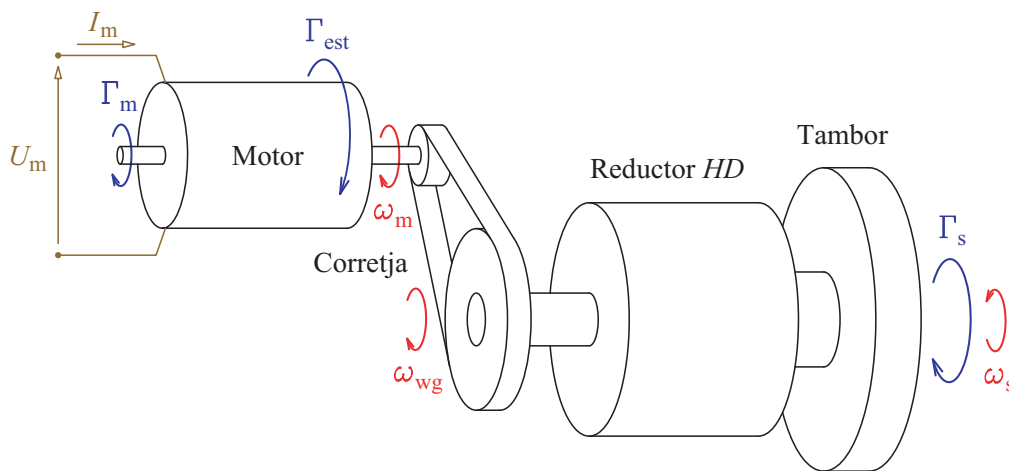
#### **Arrancada des de motor parat i mínima velocitat de funcionament estable**

Les condicions de parell a la sortida assajades són les mateixes que en el funcionant a velocitat constant.

### 5.3.3 Planificació de la 3a sèrie d'experiments

Un dels objectius és determinar el parell motor necessari,  $\Gamma_m$ , per a diferents condicions de funcionament de l'accionament complet. L'altre objectiu és determinar mecànicament el parell axial entre l'estator i el seu suport,  $\Gamma_{est}$ . A la Figura 5.3 es mostra un esquema del conjunt assajat amb les variables que hi intervenen.

Les variables a mesurar són les mateixes que en la 2a sèrie d'experiments i a més el parell axial entre l'estator i el seu suport. El parell motor es determina a partir del corrent d'alimentació amb l'Equació (5.1) i el parell a la sortida a partir de la massa de l'objecte penjat amb l'Equació (5.2). La forma de determinar el parell axial a l'estator s'explica més endavant al descriure els muntatges experimentals.



**Fig. 5.3.** Esquema del conjunt assajat en la 3a sèrie d'experiments

Les velocitats angulars de l'arbre d'entrada,  $\omega_{wg}$ , i de l'arbre de sortida del reductor,  $\omega_s$ , es calculen amb les Equacions (5.4) i (5.5), on  $i_c$  i  $i_{HD}$  són les relacions de reducció de la transmissió per corretja i del reductor HD respectivament.

$$\omega_{wg} = \frac{\omega_m}{i_c} \quad (5.4)$$

$$\omega_s = \frac{\omega_{wg}}{i_{HD}} = \frac{\omega_m}{i_c \cdot i_{HD}} \quad (5.5)$$

### Condicions a experimentar

#### Funcionament girant a velocitat constant

Les diferents velocitats s'aconsegueixen variant la tensió d'alimentació del motor, i les diferents tensions assajades s'han fixat de manera que, amb una variació lineal entre 2 V i 20 V, es cobreix el rang de possibles velocitats del motor en l'accionament



complet. Per a valors de parell a la sortida baixos s'ha assajat també 1 V com a tensió d'alimentació. Els valors de tensió utilitzats són:

$$U_m [\text{V}] = 1 / 2 / 4 / 6 / 8 / 10 / 12 / 14 / 16 / 18 / 20$$

El rang de moments torsors a la sortida assajats té com a màxim 17,48 Nm. La limitació en aquest cas ve imposada per la resistència del cable utilitzat per penjar l'objecte que provoca el moment torsor. Els valors de la massa dels objectes emprats són els mateixos que en la 2a sèrie d'experiments, afegint el valor d'aproximadament 40 kg. Els valors exactes assajats són:

$$m_p [\text{kg}] = 0 / 2,012 / 5,098 / 9,620 / 19,47 / 29,66 / 39,42$$

### Arrancada des de motor parat i mínima velocitat de funcionament estable

Les condicions de parell a la sortida assajades són les mateixes que en el funcionant a velocitat constant.

## 5.4 Descripció dels equips experimentals

### 5.4.1 Construcció del prototipus de l'accionament

#### **Conjunt del reductor *Harmonic Drive*<sup>®</sup>**

Els tres components principals del reductor *HD*, *wave generator*, *flexspline* i *circular spline*, mostrats a la Figura 5.4, els subministra l'empresa *Harmonic Drive AG*.



**Fig. 5.4.** Components principals del reductor *HD*

El reductor complet, segons el disseny presentat al capítol 3 (veure la Figura 5.5), el formen també tots els elements que guien el moviment relatiu entre els components principals, que engloben el conjunt i que permeten la fixació del reductor i dels arbres d'entrada i de sortida als elements corresponents.

L'especejament del reductor, sense incloure els cargols d'unió entre peces, es mostra a la Figura 5.6. A part dels components principals, els rodaments i els anells

d'estanquitat, hi ha un conjunt de peces dissenyades per a aquesta aplicació i que han hagut de ser fabricades expressament per tal de poder assajar el reductor. Aquestes peces s'han fabricat al taller de l'Escola Politècnica Superior de la Universitat de Lleida i s'han obtingut per mecanització amb torn i fressadora de control numèric.



Fig. 5.5. Conjunt muntat del reductor *HD*

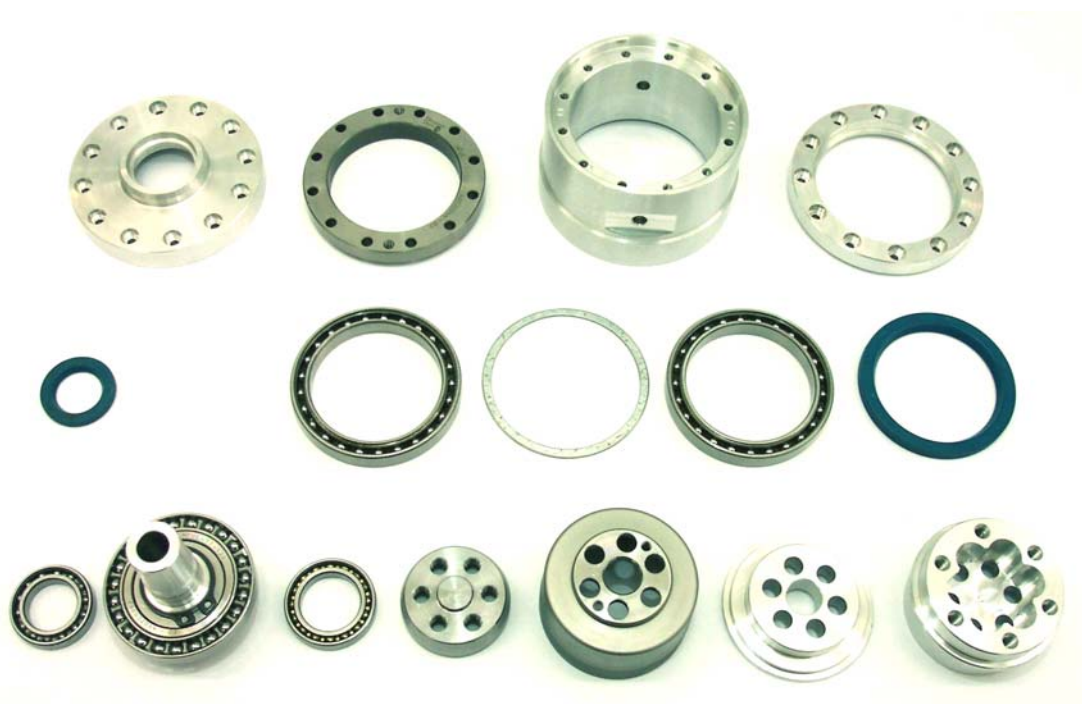
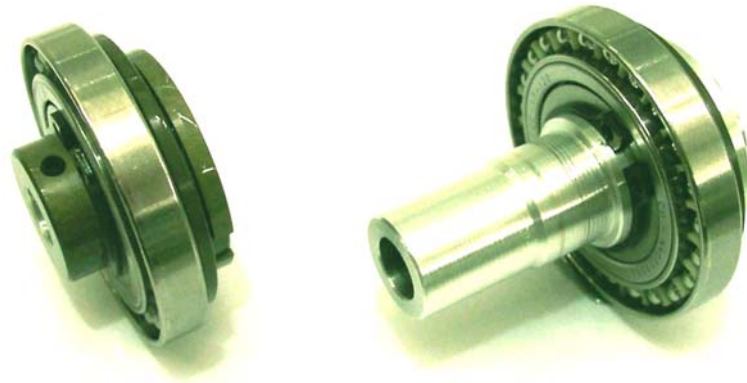


Fig. 5.6. Peces que componen el conjunt del reductor *HD*

El bloc del reductor forma un sòlid amb simetria de revolució i està dividit en 3 peces. El bloc central està obert pels dos costats de manera que es poden muntar tots els elements interiors. Dues tapes muntades amb cargols al bloc central tanquen el conjunt.

L'arbre original del *wave generator* ha estat substituït per una nova peça allargada pels dos costats (veure la Figura 5.7). En el costat interior s'hi ha afegit l'allotjament

per a un dels rodaments de suport. En l'altre s'hi troba l'allotjament per a l'altre rodament i s'allarga cap a l'exterior del bloc per fixar-hi la politja gran de la transmissió per corretja (veure la Figura 5.8). Els dos rodaments de suport són necessaris per contrarestar les càrregues radial i de moment flexor provocades per la tensió de la corretja.



**Fig. 5.7.** *Wave generator* original i amb el nou arbre d'entrada



**Fig. 5.8.** *Wave generator* amb els rodaments que suporten l'arbre d'entrada i la politja

### ***Transmissió per corretja dentada***

La transmissió per corretja es basa en una corretja dentada *Synchroflex*<sup>®</sup> T2.5 de 2,5 mm de pas i 6 mm d'amplada. Les politges són peces comercials amb les adaptacions necessàries per tal de poder-les fixar als arbres corresponents. A la politja petita, de 18 dents, s'ha ampliat el forat central a 6 mm i s'uneix al rotor del motor elèctric per mitjà d'un presoner roscat a la mateixa politja (veure la Figura 5.9).

La politja gran, de 60 dents, es fixa a l'arbre del wave generator per mitja d'un acoblament cònic específicament dissenyat (veure la Figura 5.10). Aquest acoblament

permet ajustar el posicionament axial de la politja respecte a l'arbre i assegura un muntatge concèntric. En aquesta politja s'ha rebaixat la part central pel dos costats i s'hi han practicat sis forats per tal d'alleugerir la peça.



Fig. 5.9. Motor elèctric amb la politja de 18 dents

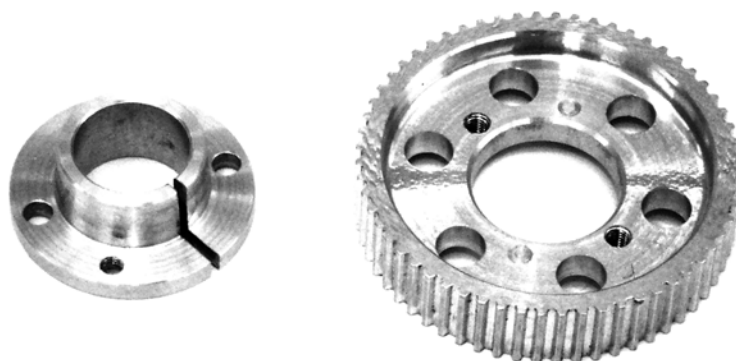


Fig. 5.10. Politja de 60 dents i acoblament cònic per fixar-la a l'arbre del *wave generator*

## 5.4.2 Muntatges experimentals

### ***Muntatge de 1a sèrie d'experiments***

El muntatge per a la 1a sèrie d'experiments realitzats és molt simple, doncs únicament s'assaja el motor elèctric funcionant en buit. Així es té el motor *MAXON® RE-40* muntat horitzontalment, amb l'estator fixat a un suport sobre la taula del laboratori (veure la Figura 5.11).

L'encòder muntat a la part posterior del rotor permet mesurar la velocitat de rotació. L'alimentació del motor es fa a través d'un circuit electrònic, a partir del qual es pot

mesurar la tensió i la intensitat d'alimentació. La regulació del motor es realitza mitjançant una font d'alimentació ajustable en tensió.

El parell entre estator i rotor provocat pels efectes electromagnètics no es pot mesurar directament, i es determina indirectament a partir del corrent d'alimentació del motor.

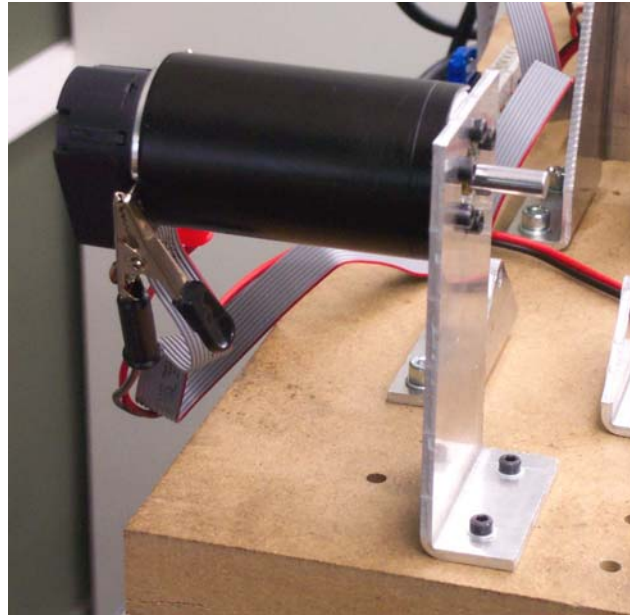


Fig. 5.11. Muntatge experimental de la 1a sèrie d'experiments

### ***Muntatge de la 2a sèrie d'experiments***

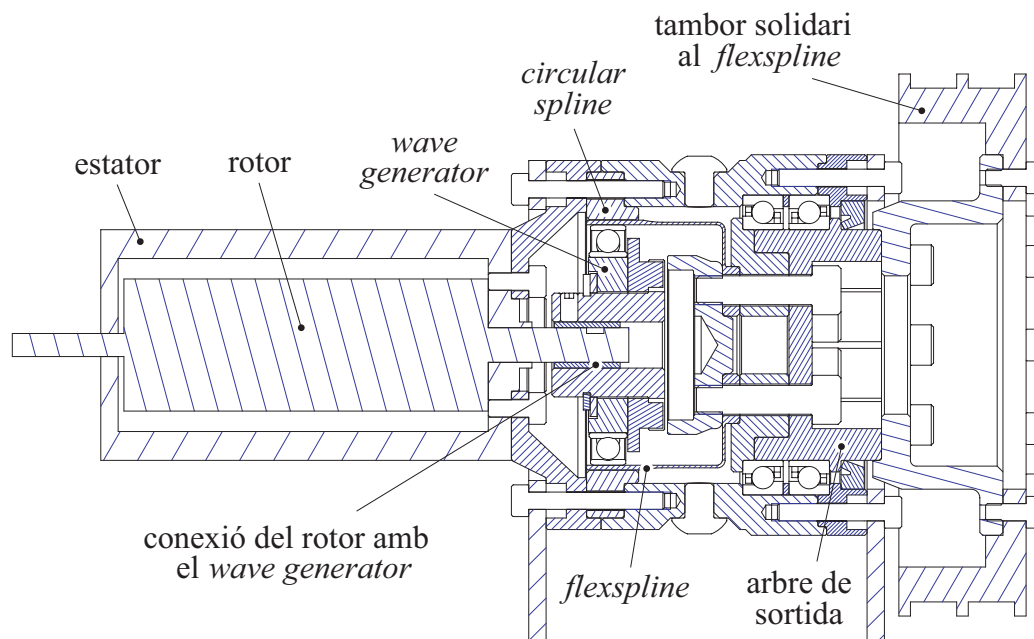
El conjunt assajat en la 2a sèrie d'experiments està format pel motor elèctric i el reductor *HD*. A la Figura 5.12 es mostra una secció d'aquest conjunt. El rotor del motor està connectat directament al *wave generator* del reductor, i a l'altre costat es té un tambor de radi  $r_t$  fixat al *flexspline*, que és l'element de sortida. Diferents objectes de massa  $m_p$  penjats d'un cable al voltant del tambor provoquen els diferents moments torsors a la sortida.

Per poder assajar el reductor *HD* directament acoblat al motor elèctric, sense la transmissió per corretja dentada, s'ha realitzat una versió diferent del conjunt del reductor. Les diferències respecte a la versió de l'accionament complet es troben en el costat de l'arbre d'entrada.

L'arbre del *wave generator* és en aquest cas l'original subministrat pel fabricant i s'uneix directament al rotor del motor mitjançant els dos presoners que incorpora aquest arbre. Així no són necessaris els rodaments de suport d'aquest arbre respecte al bloc (veure les Figures 5.12, 5.13 i 5.14). La tapa d'aquest costat té en aquest cas un disseny adaptat a la fixació del motor.

El bloc del reductor es fixa sobre una taula del laboratori, amb l'eix de simetria paral·lel i proper a un dels costats, de manera que la circumferència del tambor sobresurt per fora de la taula (veure les Figures 5.14 i 5.15).

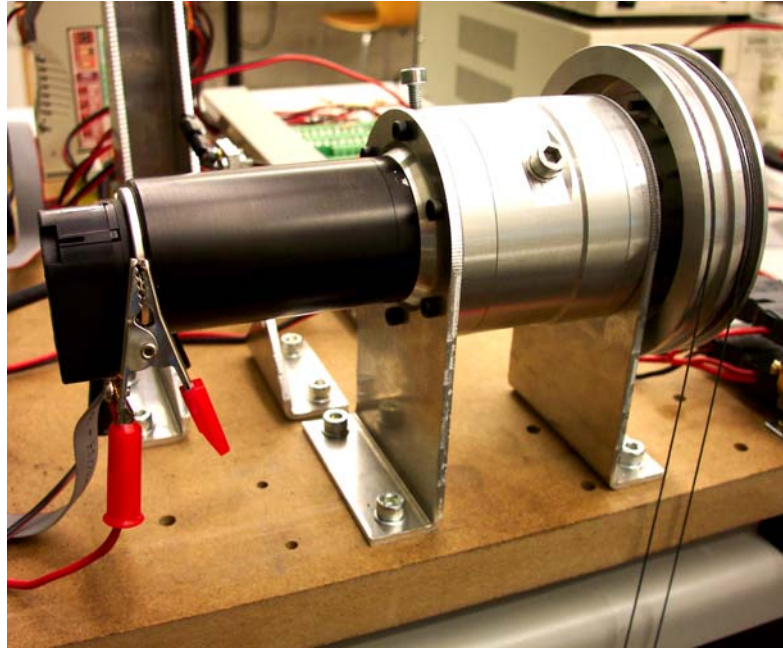
L'objecte penjat del cable enrotllat al tambor es troba inicialment recolzat sobre el terra del laboratori. Així el recorregut possible d'aquest objecte quan s'eleva és fins arribar al nivell de la taula, el que suposa un recorregut màxim d'aproximadament 500 mm.



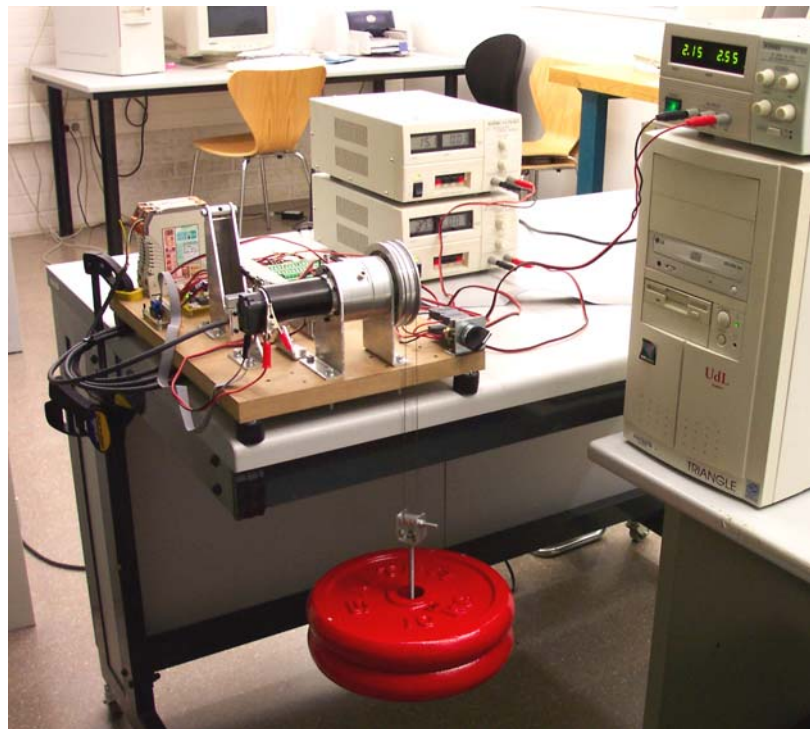
**Fig. 5.12.** Secció del conjunt assajat en la 2a sèrie d'experiments



**Fig. 5.13.** Wave generator acoblat directament al rotor del motor i tapa del bloc del reductor per fixar-hi el motor en la 2a sèrie d'experiments



**Fig. 5.14.** Conjunt del reductor *HD* connectat directament al motor elèctric



**Fig. 5.15.** Vista general del muntatge de la 2a sèrie d'experiments

El muntatge de l'encòder per conèixer la velocitat i l'alimentació a través del circuit electrònic de mesura de la intensitat són iguals que en la 1a sèrie d'experiments. La regulació del motor es realitza mitjançant una font d'alimentació que és ajustable manualment en tensió i en corrent.

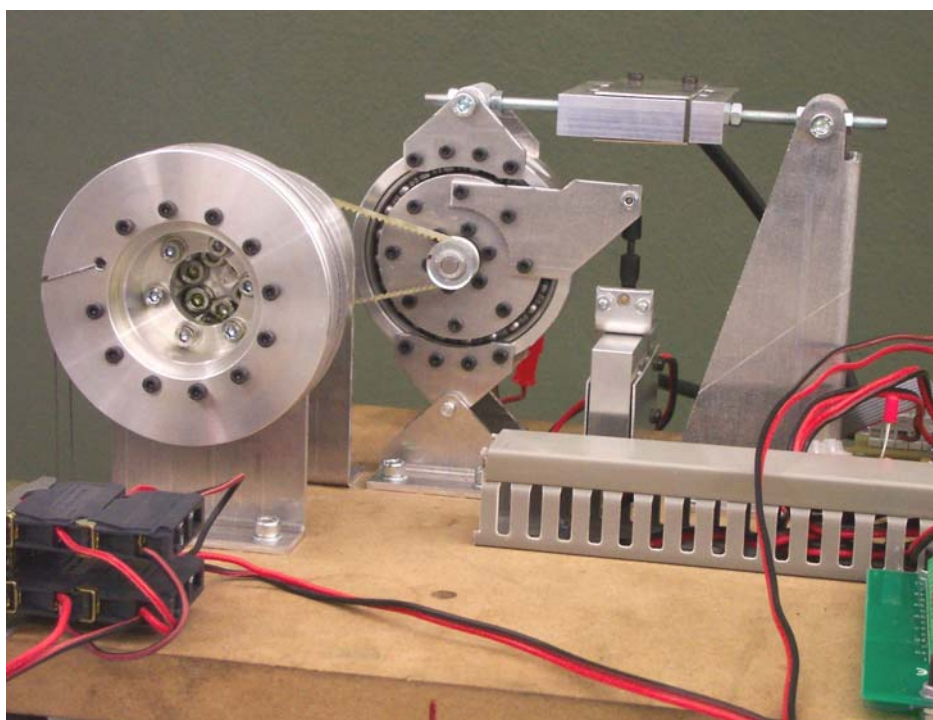
### **Muntatge de la 3a sèrie d'experiments**

En aquest cas el conjunt assajat correspon a l'accionament complet, format pel motor elèctric, la transmissió per corretja dentada i el reductor *HD*. A la sortida del reductor es té el mateix tambor que en la 2a sèrie d'experiments.

El bloc del reductor està muntat sobre una taula, de la mateixa manera que en la 2a sèrie d'experiments. La transmissió per corretja dentada transmet el moviment des del rotor del motor fins a l'eix del *wave generator*.

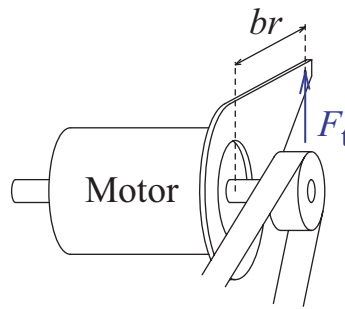
L'estator del motor es munta mitjançant una parella de rodaments de boles de contacte angular al suport del conjunt, fixant-lo a les pistes interiors dels rodaments (veure la Figura 5.16). Mitjançant un braç solidari a l'estator i un tirant, que actua verticalment sobre una cèl·lula de càrrega, s'impedeix el gir de l'estator. Aquest muntatge permet determinar el moment torsor provocat per aquest braç sobre l'estator  $M_{br}$ , en funció de la força al tirant,  $F_t$ , i la longitud del braç,  $br$ , segons l'Equació (5.6) (veure la Figura 5.17).

$$M_{br} = F_t \cdot br \quad (5.6)$$



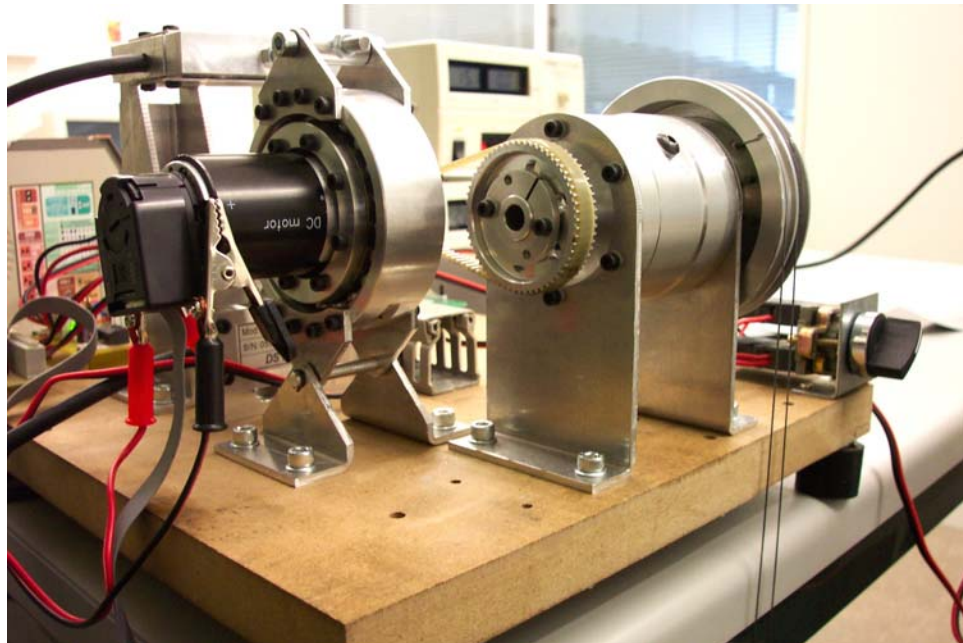
**Fig. 5.16.** Muntatge dels elements que formen l'accionament amb les cèl·lules de càrrega





**Fig. 5.17.** Esquema del muntatge del braç que impedeix el gir de l'estator

El suport d'aquest conjunt és a la vegada basculant respecte a la base, amb l'eix d'articulació paral·lel a l'eix del motor i en el mateix pla vertical. Un tirant situat horitzontalment per sobre del motor contraresta la tensió de la corretja. El tirant incorpora una cèl·lula de càrrega que permet mesurar la tensió inicial de la corretja dentada durant el muntatge (veure les Figures 5.16, 5.18 i 5.19).



**Fig. 5.18.** Suport fix del reductor i basculant del motor en la 3a sèrie d'experiments

El motor es disposa simètricament a com està en el disseny de l'accionament. La raó és evitar la interferència de tot el conjunt de suport del motor, per mesurar el parell sobre l'estator, amb el bloc del reductor.

La tensió inicial de muntatge de la corretja és de 11,1 N. Aquest valor s'ha calculat tenint en compte les recomanacions del fabricant de la corretja, i a partir del parell màxim a transmetre, que és d'aproximadament 0,42 Nm a l'arbre del *wave generator*. El càlcul s'ha fet tenint en compte les característiques del model de corretja seleccionat per a l'aplicació –*Synchroflex*<sup>®</sup> T2.5– el diàmetre de les politges de 18 i 60 dents i la distància entre eixos de les politges de 64 mm.

De la mateixa manera que en els anteriors experiments s'utilitza un encòder per conèixer la velocitat de gir del motor i l'alimentació es realitza a través del circuit de mesura de tensió i intensitat.

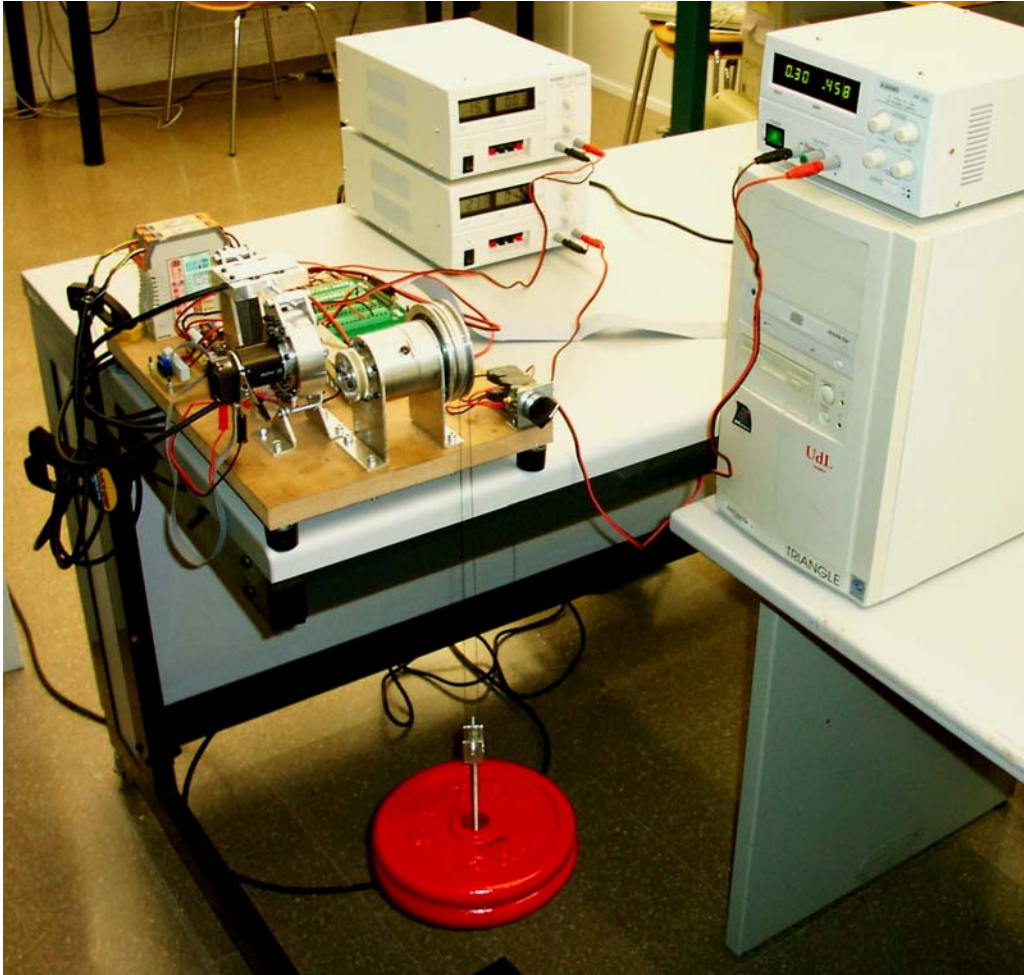


Fig. 5.19. Vista general del muntatge de la 3a sèrie d'experiments

### 5.4.3 Instrumentació

A continuació es detallen els sensors i altres elements d'instrumentació utilitzats per tal de mesurar les dades experimentals requerides.

#### Encòder a l'eix motor

L'empresa MAXONMOTOR subministra el motor elèctric amb l'encòder ja incorporat en un dels extrems del motor (veure la Figura 5.20). Aquest sensor capta la informació de l'angle girat pel rotor respecte a l'estator.

L'encòder utilitzat és el model *HP HEDL-5540 A11*. Es tracta d'un encòder òptic de 500 polsos per volta i 2 canals, el que implica una resolució de  $0,72^\circ$  i la possibilitat de discernir entre els dos sentits de rotació.

La velocitat del motor es determina de forma numèrica a partir de les dades d'angle girat i temps transcorregut, mitjançant un subprograma de tractament de dades d'encòder disponible en el software d'adquisició de dades. Les velocitats de rotació dels altres arbres de l'accionament, el d'entrada i el de sortida del reductor, es determinen també numèricament amb les corresponents relacions de transmissió.



**Fig. 5.20.** Encòder òptic *HP HEDL-5540 A11* fixat al motor

### **Sensor de corrent i circuit electrònic de mesura dels senyals de corrent i de tensió d'alimentació del motor**

Per tal de mesurar el corrent d'alimentació del motor s'utilitza un sensor de corrent continu basat en l'efecte Hall, de la marca *LEM*<sup>®</sup> i que correspon al model *LTS 15-NP* (veure la Figura 5.21).



**Fig. 5.21.** Sensor de corrent continu *LEM LTS 15-NP*

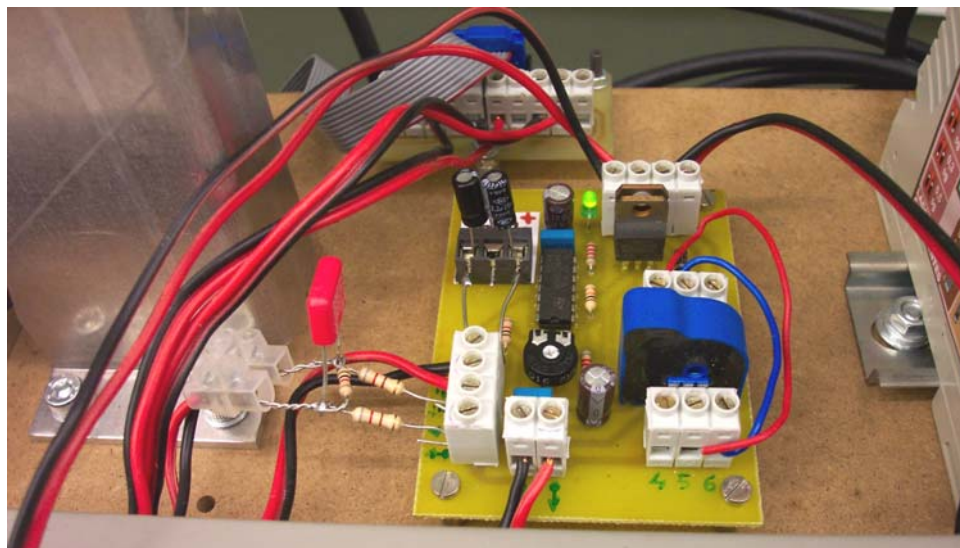
El límit nominal de la intensitat de funcionament del sensor,  $I_N$ , és configurable en tres possibilitats: 15 A, 7,5 A i 5 A. Aquest sensor pot mesurar el corrent en els dos sentits, i així es tenen uns rangs de mesura de  $\pm 15$  A,  $\pm 7,5$  A o  $\pm 5$  A. S'ha escollit el

rang de  $\pm 5$  A perquè és suficient per abastar tots els valors possibles de corrent a mesurar.

El sensor converteix el corrent elèctric a mesurar,  $I_m$ , en una senyal de tensió igual a  $2,5 \pm (0,625 \cdot I_m / I_N)$  V, de manera que a un corrent nul li correspon un senyal de 2,5 V. Aquest sensor s'alimenta a 5 V i la seva precisió és de  $\pm 0,2$  % del valor real del corrent. Un circuit electrònic específicament construït amplifica el senyal de sortida a  $5 \pm (1,25 \cdot I_m / I_N)$  V, duplicant el rang del senyal de sortida. L'objectiu és aprofitar millor la resolució del sistema d'adquisició de dades al emprar un percentatge major del rang que permet aquest sistema. El muntatge d'aquest circuit es mostra a la Figura 5.22.

A partir del corrent d'alimentació del motor,  $I_m$ , es determina el parell entre rotor i estator,  $\Gamma_m$ , segons l'Equació 5.1, on  $C_T$  és la constant de parell del motor, que en el model de motor escollit és igual a 30,2 mNm/A.

Per mesurar la tensió d'alimentació s'utilitza un divisor de tensió connectat en paral·lel als borns d'alimentació del motor, amb la finalitat d'adaptar el senyal de tensió d'alimentació del motor, de 0 a 24 V, al rang de lectura del sistema d'adquisició de dades, de 0 a 10 V.



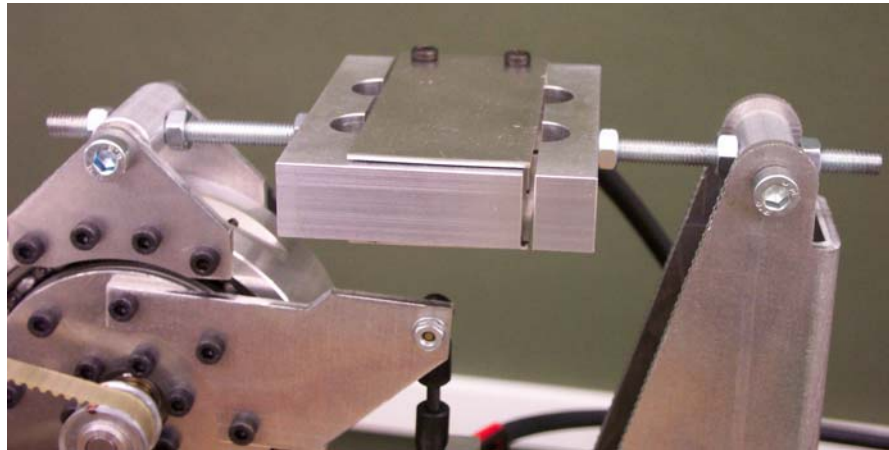
**Fig. 5.22.** Muntatge del circuit de mesura del corrent i de la tensió d'alimentació del motor

### Cèl·lules de càrrega

En el muntatge de la 3a sèrie d'experiments s'utilitzen dues cèl·lules de càrrega, les dues del mateix model. Una d'elles és per mesurar la força del tirant que compensa la tensió de la corretja (veure la Figura 5.23). L'altra és per mesurar la força sobre

l'extrem del braç solidari a l'estator, que contraresta el parell entre rotor i estator del motor elèctric.

Les cèl·lules escollides corresponen al model *514 QD* de la marca *DSEUROPE*<sup>®</sup>. El rang de mesura és de 0 a 20 N, de tracció o compressió, la tensió d'excitació és de 10 V i la sensibilitat és de 2 mV/V a fons d'escala. La seva precisió és de  $\pm 0,023\%$  del fons d'escala.



**Fig. 5.23.** Cèl·lula de càrrega *DSEUROPE 514 QD* per mesurar la pretensió de la corretja

Cada cèl·lula està connectada a un amplificador *DPF*<sup>®</sup> *FORCEFLEX* (veure la Figura 5.24) per tal d'acondicionar el senyal al rang del sistema d'adquisició de dades, al mateix temps que minimitza l'error introduït per la caiguda de tensió en els cables que connecten els amplificadors amb la tarja d'adquisició de dades. Cada conjunt de cèl·lula de càrrega i amplificador s'ha calibrat utilitzant patrons de massa coneguda.



**Fig. 5.24.** Muntatge dels dos amplificadors per a les cèl·lules de càrrega

## Bàscula digital

Per tal de determinar la massa dels diferents objectes penjant del tambor a la sortida del reductor s'ha utilitzat una bàscula digital. El model de bàscula emprat és el *ADW-15KC* de *GRAM PRECISION*<sup>®</sup> (veure la Figura 5.25), amb un rang de mesura de 0 a 15 kg i una precisió de  $\pm 2$  g.



Fig. 5.25. Bàscula digital *GRAM PRECISION ADW-15KC*

### 5.4.4 Sistema d'adquisició de dades

Els diferents sensors s'han connectat a un ordinador PC mitjançant una tarja d'adquisició de dades *NI-6023* de *NATIONAL INSTRUMENTS*<sup>®</sup>.

La connexió de l'encòder del motor es fa a través dels dos comptadors de que disposa la tarja, i s'utilitzen 4 canals analògics, amb un rang de  $-10/+10$  V, per a la resta de senyals: la tensió i la intensitat d'alimentació i les dues cèl·lules de càrrega.

La freqüència de lectura del sistema d'adquisició de dades s'ha fixat en 10 Hz. No és necessari que sigui més elevada, doncs l'experimentació es fa en condicions de règim permanent.

L'adquisició i el primer tractament de dades es porta a terme amb el software *LABVIEW*<sup>®</sup> 7.0. S'ha desenvolupat un programa específic, implementat en *LABVIEW*<sup>®</sup> i amb diferents versions per a cada sèrie d'experiments, que executa les operacions de lectura, tractament i emmagatzematge de dades (veure la Figura 5.26).

El mateix programa calcula el moment torsor sobre l'estator provocat per la força al tirant i la cèl·lula de càrrega. També realitza el càlcul del parell electromagnètic entre rotor i estator a partir del corrent d'alimentació del motor.

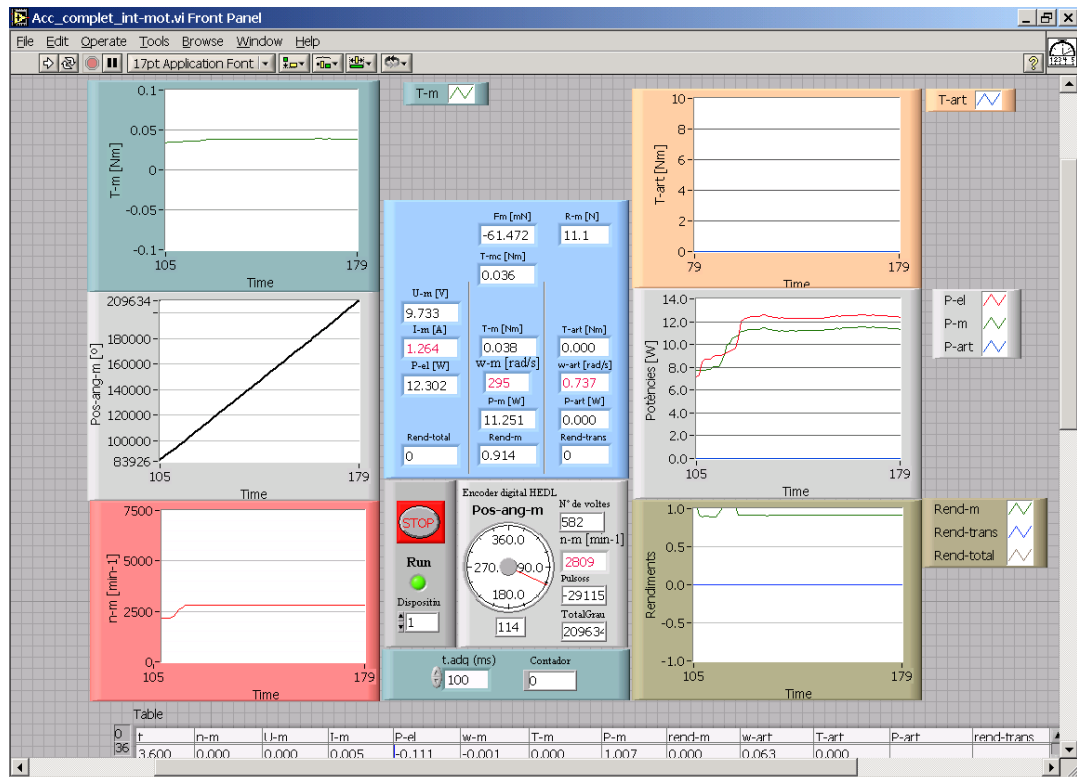


Fig. 5.26. Pantalla del programa d'adquisició de dades

## 5.5 Procés experimental

El primer pas en cada sèrie d'experiments és fer girar el conjunt a assajar en buit a elevada velocitat durant uns minuts fins establir la temperatura dels components, principalment de la corretja i del reductor *HD*.

### 5.5.1 Operativa d'experimentació en la 1a sèrie d'experiments

Una vegada establitzada la temperatura del motor, s'ajusta la tensió d'alimentació al valor desitjat, obtenint-se una determinada velocitat de gir del motor. Manualment es dona l'ordre de començar l'adquisició de dades. Aquesta es prolonga durant uns 5 s i finalment s'atura, també manualment. Es repeteix tot el procés per a cada valor diferent de la tensió d'alimentació del motor.

## **5.5.2 Operativa d'experimentació en la 2a i la 3a sèrie d'experiments**

### ***Experimentació a diferents velocitats de l'accionament***

Es situa l'objecte de massa corresponent sobre el terra, recolzant sobre una escuma flexible de 40 mm de gruix i amb el cable estirat amb una mínima tensió inicial.

Amb la sortida de la font d'alimentació del motor desconnectada es fixa aproximadament el valor de la tensió d'alimentació desitjat. S'arranca el motor manualment i suau per mitjà de la regulació de corrent de la font d'alimentació. La base d'escuma flexible sobre la que recolza inicialment l'objecte penjat contribueix a que el parell a la sortida de l'accionament augmenti progressivament.

Una vegada estabilitzada la velocitat de gir de l'accionament, manualment es dona l'ordre de començar l'adquisició de dades, i aquesta es prolonga durant un interval d'aproximadament 5 segons. Els diferents experiments es realitzen a velocitat constant de l'accionament, per tant la seva inèrcia i la de la càrrega no afecten les dades mesurades.

Una vegada aturada l'adquisició de dades es disminueix progressivament el corrent d'alimentació del motor fins que l'accionament s'atura. Seguidament es repeteix el procés per a un altre punt de funcionament, a diferent parell a la sortida o diferent velocitat de gir.

### ***Experimentació a l'arrancada i a baixa velocitat***

Per tal de determinar el parell motor en l'arrancada es parteix del conjunt en repòs, amb un dels cossos de massa coneguda penjat del tambor, sense recolzar sobre el terra, i per tant, amb el parell a la sortida corresponent.

S'incrementa manualment i progressiva la tensió d'alimentació fins que el motor arranca i l'accionament comença a girar. Seguidament es disminueix lleugerament la tensió d'alimentació fins que el motor es para. Llavors s'activa el sistema d'adquisició de dades i es torna a incrementar, molt a poc a poc, la tensió d'alimentació fins que el motor torna a arrancar. Es mesura el corrent d'alimentació en el moment en que s'inicia el gir del motor i a partir d'aquest es determina el parell motor en l'arrancada.

Per tal de determinar la mínima velocitat de rotació estable es comença amb el sistema girant a la velocitat en que queda després d'arrancar suaument. S'activa el sistema d'adquisició de dades i es va disminuint molt progressivament la tensió d'alimentació fins que el motor s'atura. Es mesura la velocitat de rotació que es tenia abans de començar la desacceleració brusca fins a aturar-se.



### 5.5.3 Obtenció del valor mitjà de les dades

#### ***Experimentació a diferents velocitats de l'accionament***

Donat un cert punt de funcionament de l'accionament, les magnituds involucrades no són exactament constants, sinó que poden oscil·lar lleugerament al voltant del valor mitjà. Aquestes oscil·lacions poden ser periòdiques amb una certa freqüència si estan relacionades amb la freqüència d'alguns dels fenòmens que es donen en l'accionament:

- a) el gir dels diferents eixos: motor, *wave generator* o *flexspline*
- b) la connexió i desconexió dels bobinats del motor
- c) vibracions conseqüència de l'elasticitat de les cèl·lules de càrrega
- d) vibracions del sistema format pel cable i l'objecte penjat

Les oscil·lacions en les magnituds mesurades també poden tenir una variació aleatòria si són provocades pels fenòmens de fregament o histeresi, de comportament intrínsecament variable.

Així prendre una única mesura en un instant determinat implicaria que cada dada experimental incorporaria una pertorbació desconeguda. L'operativa seguida és mantenir l'accionament a règim constant i prendre un conjunt ampli de mostres, aproximadament 50 al realitzar-se 10 lectures per segon durant uns 5 s, corresponents a cada punt de funcionament. S'agafa com a dada experimental la mitjana d'aquestes mostres i així la influència de les oscil·lacions pertorbadores queda minimitzada.

#### ***Experimentació a l'arrancada i a baixa velocitat***

La variabilitat pròpia de les resistències passives és encara major en l'arrancada a partir de parat i a baixes velocitats. Per això cada experiment per mesurar el parell motor en l'arrancada s'ha repetit fins a 5 vegades i s'ha agafat com a dada experimental la mitjana dels valors mesurats. Per a la mesura de la mínima velocitat estable també s'ha repetit 5 vegades cada experiment.

## 5.6 Resultats experimentals

A continuació es presenten els resultats experimentals corresponents als assaigs descrits anteriorment.

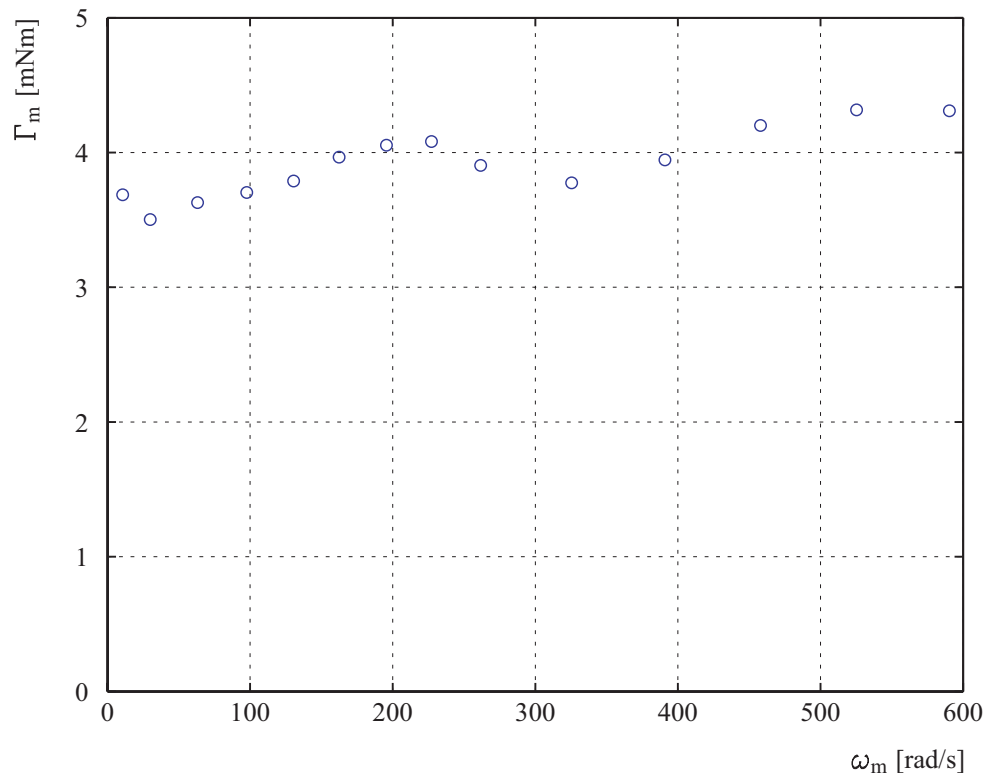
### 5.6.1 Resultats de la 1a sèrie d'experiments

Les dades obtingudes, mostrades a la Taula 5.3 i representades a la Figura 5.27, són la velocitat de rotació del motor,  $\omega_m$ , i el parell necessari entre el rotor i l'estator del

motor elèctric,  $\Gamma_m$ , per fer girar el rotor a aquesta velocitat en buit i sense càrregues axials, ni radials ni de moment flexor sobre ell. Els valors mostrats a la Taula 5.3 corresponen a la mitjana i a la desviació estàndard de les mostres de dades obtingudes per a cada punt de funcionament. Al gràfic de la Figura 5.27 es representen els punts corresponents a les mitjanes.

**Taula 5.3.** Dades experimentals de la 1a sèrie d'experiments

$U_m$ [V]		0,6	1	2	3	4	5	6
$\omega_m$ [rad/s]	$\bar{\omega}_m$	10,77	30,14	63	97,56	130,5	162,3	195,6
	$\sigma_\omega$	0,187	0,084	0,065	0,106	0,159	0,177	0,962
$\Gamma_m$ [mNm]	$\bar{\Gamma}_m$	3,688	3,403	3,229	3,703	3,788	3,967	4,054
	$\sigma_\Gamma$	0,129	0,049	0,113	0,088	0,13	0,199	0,331
$U_m$ [V]		7	8	10	12	14	16	18
$\omega_m$ [rad/s]	$\bar{\omega}_m$	227,2	261,8	325,3	390,9	458,1	525,2	590,3
	$\sigma_\omega$	0,207	0,236	0,295	0,212	0,518	0,637	0,244
$\Gamma_m$ [mNm]	$\bar{\Gamma}_m$	4,083	3,903	3,774	3,946	4,2	4,316	4,311
	$\sigma_\Gamma$	0,277	0,11	0,319	0,543	0,438	0,188	0,215



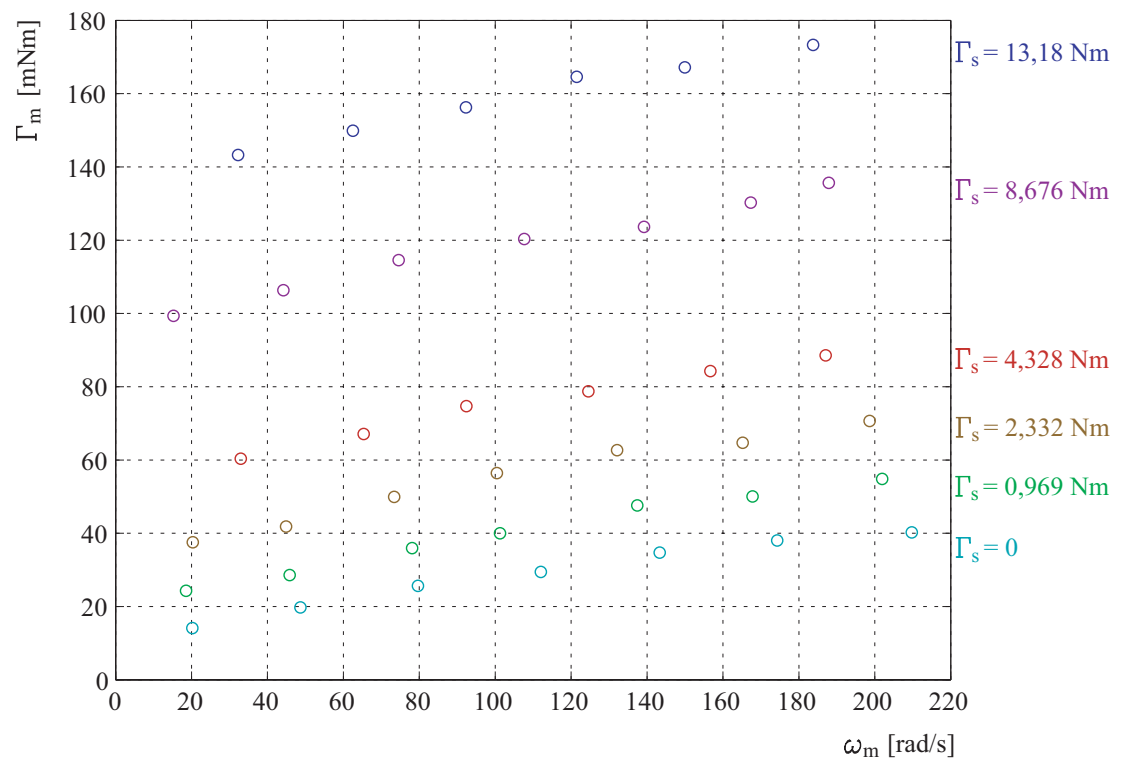
**Fig. 5.27.** Dades experimentals del parell motor en la 1a sèrie d'experiments

## 5.6.2 Resultats de la 2a sèrie d'experiments

### ***Funcionament girant a velocitat constant***

S'han obtinguts diversos conjunts de dades corresponents a diferents valors de parell a la sortida del reductor,  $\Gamma_s$ . Les dades obtingudes, mostrades a la Taula 5.4 i representades a la Figura 5.28, són la velocitat de rotació de l'arbre de sortida del reductor  $HD$ ,  $\omega_s$ , i el parell motor requerit,  $\Gamma_m$ , per tal de fer girar l'accionament a aquesta velocitat i per a diferents condicions de parell a la sortida,  $\Gamma_s$ .

Els valors mostrats a la Taula 5.4 corresponen també a la mitjana i a la desviació estàndard de les mostres de dades obtingudes per a cada punt de funcionament. Al gràfic de la Figura 5.28 es representen els punts corresponents a les mitjanes.



**Fig. 5.28.** Dades experimentals del parell motor en la 2a sèrie d'experiments

**Taula 5.4.** Dades experimentals de la 2a sèrie d'experiments

		$U_m$ [V]	1	2	3	4	5	6	7	8
$\Gamma_s = 13,18$ Nm	$\omega_m$	$\bar{\omega}_m$			32,33	62,55	92,22	121,4	150	183,8
	[rad/s]	$\sigma_\omega$			1,354	1,39	1,178	1,618	1,646	2,108
	$\Gamma_m$	$\bar{\Gamma}_m$			143,3	149,9	156,2	164,6	167,1	173,3
	[mNm]	$\sigma_\Gamma$			4,417	2,126	1,157	2,804	1,352	1,99
$\Gamma_s = 8,676$ Nm	$\omega_m$	$\bar{\omega}_m$		15,26	44,15	74,48	107,7	139,2	167,2	187,9
	[rad/s]	$\sigma_\omega$		1,175	1,401	0,472	1,942	1,444	2,367	6,965
	$\Gamma_m$	$\bar{\Gamma}_m$		99,39	106,3	114,6	120,3	123,6	130,3	135,7
	[mNm]	$\sigma_\Gamma$		1,387	1,188	1,727	2,677	2,818	1,754	2,269
$\Gamma_s = 4,328$ Nm	$\omega_m$	$\bar{\omega}_m$		33,02	65,31	92,42	124,5	156,7	187,1	
	[rad/s]	$\sigma_\omega$		0,978	0,868	1,423	1,591	1,682	2,161	
	$\Gamma_m$	$\bar{\Gamma}_m$		60,45	67,06	74,68	78,74	84,15	88,47	
	[mNm]	$\sigma_\Gamma$		1,532	1,285	2,630	2,63	2,82	1,406	
$\Gamma_s = 2,332$ Nm	$\omega_m$	$\bar{\omega}_m$	20,28	44,9	73,34	100,5	132,1	165,3	198,5	
	[rad/s]	$\sigma_\omega$	0,223	0,359	0,664	1,238	0,765	1,03	1,376	
	$\Gamma_m$	$\bar{\Gamma}_m$	37,62	41,78	49,88	56,47	62,7	64,68	70,71	
	[mNm]	$\sigma_\Gamma$	0,493	1,263	1,423	1,211	0,919	0,886	1,202	
$\Gamma_s = 0,969$ Nm	$\omega_m$	$\bar{\omega}_m$	18,65	45,84	78,15	101,2	137,4	167,7	201,9	
	[rad/s]	$\sigma_\omega$	0,183	0,566	0,669	0,594	0,723	0,598	0,45	
	$\Gamma_m$	$\bar{\Gamma}_m$	24,28	28,6	35,94	40,02	47,58	50	54,8	
	[mNm]	$\sigma_\Gamma$	0,571	0,789	1,102	1,327	0,77	0,817	0,872	
$\Gamma_s = 0$ Nm	$\omega_m$	$\bar{\omega}_m$	20,19	48,69	79,74	112,1	143,3	174,4	209,7	
	[rad/s]	$\sigma_\omega$	0,295	0,153	0,323	0,739	0,341	0,479	0,343	
	$\Gamma_m$	$\bar{\Gamma}_m$	14,14	19,82	25,57	29,49	34,67	38,05	40,19	
	[mNm]	$\sigma_\Gamma$	0,459	0,673	0,618	0,561	0,473	0,61	0,827	

### **Arrancada des de parat**

Per als diferents valors de parell a la sortida del reductor assajats,  $\Gamma_s$ , a la Taula 5.5 es mostra el valor mitjà i la desviació estàndard de les dades de parell motor en l'arrancada,  $\Gamma_m$ , obtingudes en la 2a sèrie d'experiments.

**Taula 5.5.** Dades experimentals de parell motor en l'arrancada en la 2a sèrie d'experiments

$\Gamma_s$ [Nm]	$\Gamma_m$ [mNm]	$\sigma_{\Gamma}$ [mNm]
13,18	132,9	2,82
8,676	90,6	2,39
4,328	51,3	4,00
2,332	33,2	1,42
0,969	21,1	2,39
0	10,6	2,39

### ***Mínima velocitat de rotació estable***

També per als diferents valors de parell a la sortida del reductor assajats,  $\Gamma_s$ , a la Taula 5.6 es mostra la mitjana i la desviació estàndard de la mínima velocitat estable del motor,  $\omega_{m-min}$ , obtingudes en la 2a sèrie d'experiments.

**Taula 5.6.** Dades experimentals de velocitat mínima estable en la 2a sèrie d'experiments

$\Gamma_s$ [Nm]	$\omega_{m-min}$ [rad/s]	$\sigma_{\omega}$ [rad/s]
13,18	7,08	0,179
8,676	7,20	0,274
4,328	7,10	0,235
2,332	7,24	0,305
0,969	7,40	0,464
0	7,18	0,303

### **5.6.3 Resultats de la 3a sèrie d'experiments**

#### ***Funcionament girant a velocitat constant***

En la 3a sèrie d'experiments també s'han obtinguts diversos conjunts de dades corresponents a diferents valors de parell a la sortida de l'accionament,  $\Gamma_s$ . Les dades obtingudes, mostrades a la Taula 5.7 i representades a la Figura 5.29, són la velocitat de rotació de l'arbre de sortida de l'accionament,  $\omega_s$ , i el parell motor requerit,  $\Gamma_m$ , per tal de fer girar l'accionament a aquesta velocitat i per a diferents condicions de parell a la sortida,  $\Gamma_s$ . Els valors mostrats a la Taula 5.7 també corresponen a la mitjana i a la desviació estàndard de les dades obtingudes per a cada punt de funcionament. Al gràfic de la Figura 5.29 es representen els punts corresponents a les mitjanes.

A la Figura 5.30 es representa el moment torsor provocat pel braç sobre l'estator del motor en funció del corrent d'alimentació i per a les diferents condicions de funcionament assajades.

Taula 5.7. Dades experimentals de la 3a sèrie d'experiments

		$U_m$ [V]	1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Gamma_s = 17,48$ Nm	$\omega_m$	$\bar{\omega}_m$		35,45	96,96	157,8	221,1	285,8	349,6	413,2	483,5	542,2	595,9
	[rad/s]	$\sigma_\omega$		0,372	0,455	0,214	0,959	0,936	0,542	0,99	8,091	2,792	2,133
	$\Gamma_m$	$\bar{\Gamma}_m$		59,46	64,2	68,01	70,64	74	77,08	78,01	79,47	81,52	82,97
	[mNm]	$\sigma_\Gamma$		0,822	0,478	0,711	0,988	0,634	1,012	0,901	0,859	0,462	0,635
$\Gamma_s = 13,18$ Nm	$\omega_m$	$\bar{\omega}_m$		37,19	102,4	161,1	230,4	292,4	357,9	422,6	489,1	548,7	604,9
	[rad/s]	$\sigma_\omega$		0,445	0,147	0,496	0,394	1,549	0,985	1,542	1,306	0,688	0,788
	$\Gamma_m$	$\bar{\Gamma}_m$		46,95	52,45	55,65	59,58	60,88	64,07	65,24	67,33	69,06	69,73
	[mNm]	$\sigma_\Gamma$		0,561	0,632	1,147	1,716	1,121	0,88	1,151	0,792	0,684	1,042
$\Gamma_s = 8,676$ Nm	$\omega_m$	$\bar{\omega}_m$	19,29	44,88	108,4	174,4	232,3	301,1	365,5	429,3	495	559,2	614,2
	[rad/s]	$\sigma_\omega$	0,471	0,795	0,29	0,461	0,996	1,099	1,463	2,097	0,798	0,419	1,193
	$\Gamma_m$	$\bar{\Gamma}_m$	33,69	35,46	38,78	42,06	46,53	49,54	51,52	53,41	54,47	56,09	56,76
	[mNm]	$\sigma_\Gamma$	0,62	0,617	0,424	1,457	0,481	1,194	1,081	1,364	1,676	1,129	0,701
$\Gamma_s = 4,328$ Nm	$\omega_m$	$\bar{\omega}_m$	23,12	52,35	112,2	176,7	244,3	310	372,5	441,4	504,9	562,6	630
	[rad/s]	$\sigma_\omega$	0,604	0,292	0,357	0,647	2,955	1,583	1,443	1,434	0,627	1,473	0,974
	$\Gamma_m$	$\bar{\Gamma}_m$	21,93	23,06	27,23	30,77	35,01	36,1	38,86	40,44	41,01	43,7	45,1
	[mNm]	$\sigma_\Gamma$	0,726	0,419	0,916	0,743	1,047	1,37	1,047	0,624	2,11	1,467	1,325
$\Gamma_s = 2,332$ Nm	$\omega_m$	$\bar{\omega}_m$	28,17	51,98	122,1	181,2	246,6	310,2	376,9	441,9	506,5	567,5	630,3
	[rad/s]	$\sigma_\omega$	0,314	0,265	0,678	1,188	1,257	1,419	1,552	1,251	1,296	0,983	1,498
	$\Gamma_m$	$\bar{\Gamma}_m$	16,17	17,04	21,18	24,23	27,39	29,06	31,23	33,22	35,56	35,96	37,01
	[mNm]	$\sigma_\Gamma$	0,259	0,671	0,87	0,462	0,597	0,412	2,219	0,572	2,07	1,255	1,419
$\Gamma_s = 0,969$ Nm	$\omega_m$	$\bar{\omega}_m$	26,38	54,41	118,6	181,6	245	316,7	378,3	445	511	574,8	635,6
	[rad/s]	$\sigma_\omega$	0,793	0,54	0,521	1,136	1,38	1,164	3,049	2,406	2,652	2,241	1,776
	$\Gamma_m$	$\bar{\Gamma}_m$	12,26	13,56	17,47	21,27	23,43	25,79	27,87	30,34	31,82	32,52	33,3
	[mNm]	$\sigma_\Gamma$	0,611	0,533	0,608	0,638	1,152	1,555	0,835	0,698	1,872	0,433	0,927
$\Gamma_s = 0$ Nm	$\omega_m$	$\bar{\omega}_m$	29,24	58,99	121,9	184	252,2	318,3	383,9	447,5	511,6	576,4	639,3
	[rad/s]	$\sigma_\omega$	0,21	0,216	0,796	0,518	1,185	1,271	1,393	1,462	1,783	2,322	1,756
	$\Gamma_m$	$\bar{\Gamma}_m$	9,108	11,16	15,13	16,94	18,65	21,72	22,87	25,11	25,46	25,34	27,52
	[mNm]	$\sigma_\Gamma$	0,195	0,123	0,433	1,03	0,767	0,845	1,125	0,755	2,523	1,265	1,749

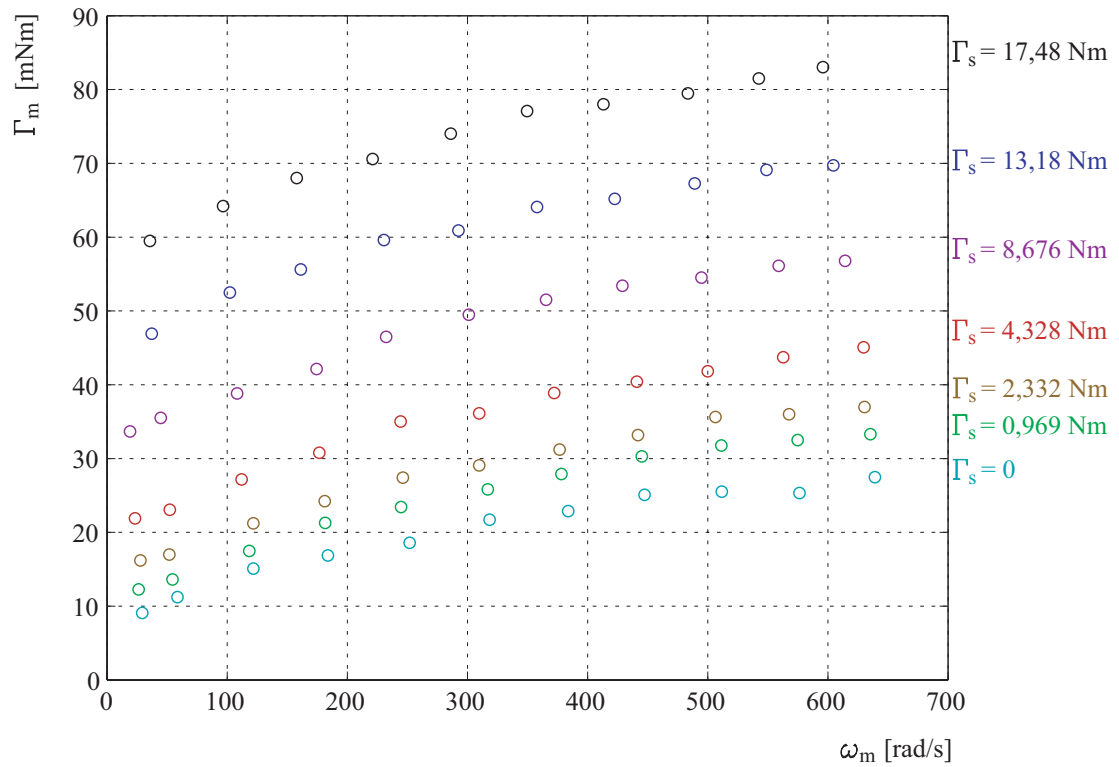


Fig. 5.29. Dades experimentals del parell motor en la 3a sèrie d'experiments

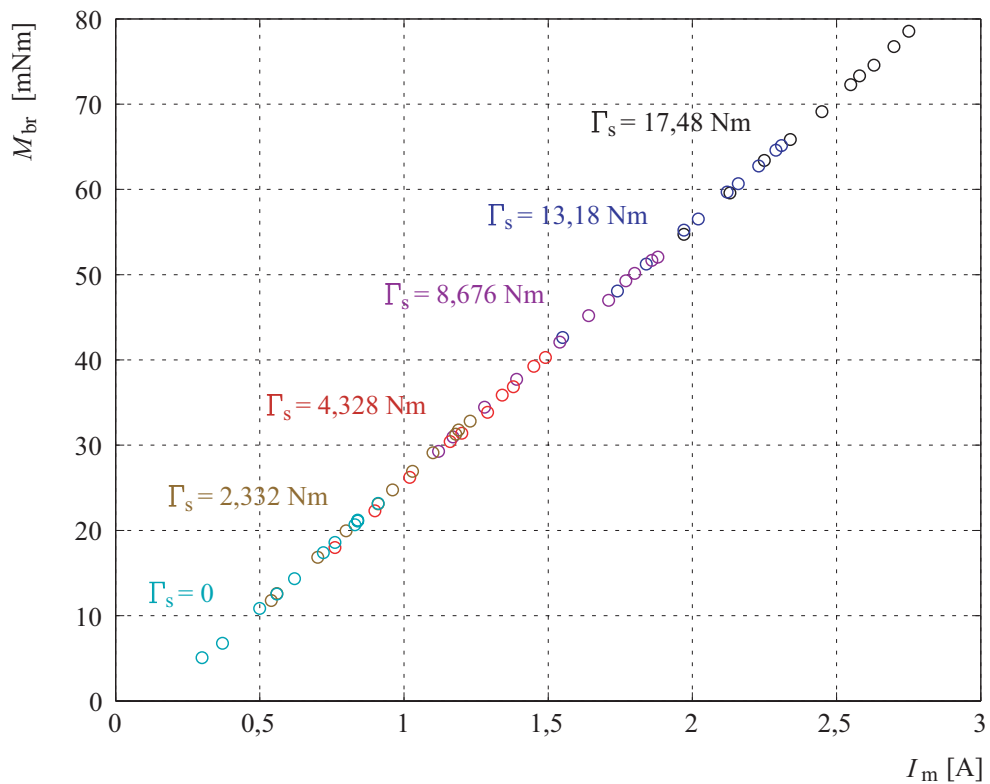


Fig. 5.30. Dades experimentals del moment torsor provocat pel braç sobre l'estator en funció del corrent d'alimentació del motor

### **Arrancada des de parat**

A la Taula 5.8 es mostra la mitjana i la desviació estàndard de les dades de parell motor en l'arrancada,  $\Gamma_m$ , obtingudes en la 3a sèrie d'experiments per a cada valor de parell a la sortida de l'accionament que s'ha assajat,  $\Gamma_s$ .

**Taula 5.8.** Dades experimentals de parell motor en l'arrancada en la 3a sèrie d'experiments

$\Gamma_s$ [Nm]	$\Gamma_m$ [mNm]	$\sigma_\Gamma$ [mNm]
17,48	58,59	2,04
13,18	46,21	1,72
8,676	33,52	2,39
4,328	22,35	2,22
2,332	15,70	1,95
0,969	11,48	1,30
0	7,85	1,64

### **Mínima velocitat de rotació estable**

Per als diferents valors de parell a la sortida de l'accionament assajats en la 3a sèrie d'experiments,  $\Gamma_s$ , a la Taula 5.9 es mostra la mitjana i la desviació estàndard de la mínima velocitat estable del motor,  $\omega_{m-min}$ , obtinguda en l'experimentació.

**Taula 5.9.** Dades experimentals de velocitat mínima estable en la 3a sèrie d'experiments

$\Gamma_s$ [Nm]	$\omega_{m-min}$ [rad/s]	$\sigma_\omega$ [rad/s]
17,48	24,60	1,342
13,18	23,40	1,140
8,676	24,00	1,225
4,328	25,20	1,924
2,332	24,30	1,924
0,969	24,70	1,987
0	24,10	1,140