

### IV.1. Introducció

En el capítol 2 s'ha proposat un accionament SRM per aplicacions de petita potència i reduïda tensió amb sensors de posició. En el capítol 3 s'ha proposat un accionament SRM per aplicacions de petita potència i reduïda tensió sense sensors de posició.

En aquest capítol es presenten els resultats experimentals aconseguits amb els prototipus utilitzats. Aquest resultat es mostren de forma que es puguin comparar les prestacions del mateix motor treballant amb un sistema de control que requereix sensors i un altre, el proposat, que no els utilitza.

### IV.2. Estructures electromagnètiques.

En la figura 4.1 es mostren les estructures electromagnètiques dels prototipus SRM 12/8 i 8/6. En la taula IV-I es donen les dimensions principals i els paràmetres elèctrics dels motors objecte de treball, observant-se que el volum prismàtic d'ambdós motors és pràcticament el mateix. En la taula IV-II es mostra la resistència de fase.

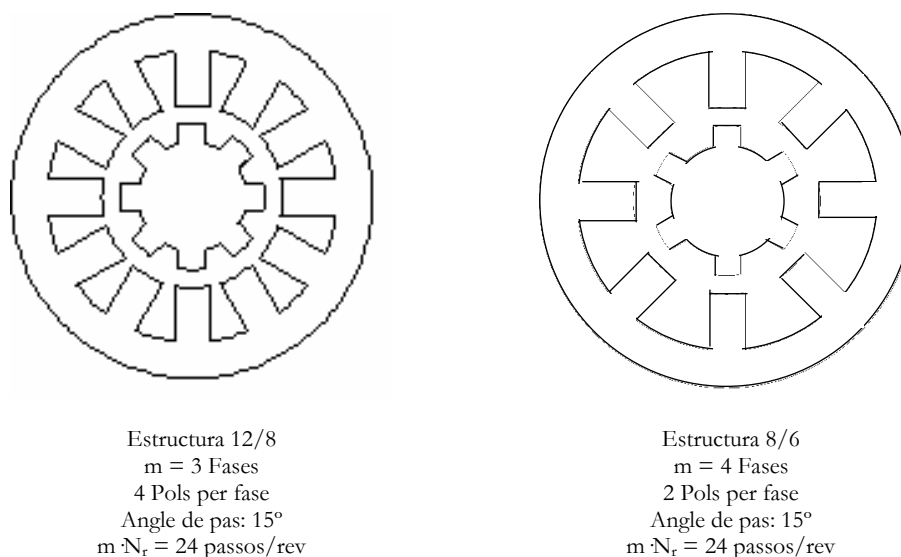


Figura 4.1. Estructures electromagnètiques SRM.

ESTRUCTURA ELECTROMAGNÈTICA		
	12/8	8/6
$N_s$	12	8
$N_r$	8	6
D (mm)	15.50	15.75
$D_o$ (mm)	46.30	53.30
L (mm)	33.00	31.75
$D^2L$ (mm <sup>3</sup> )	7928	7875
N (esp/pol)	186	(*)
$\varnothing_c$	0.23	(*)

$N_s$  = n° pols estator.  
 $N_r$  = n° polos rotor.  
D = Diàmetre rotor.  
 $D_o$  = Diàmetre exterior estator.  
L = Longitud.  
 $D^2L$  = Volum prismàtic.  
N = n° espiras por pol.  
 $\varnothing_c$  = Diàmetre conductor.

Taula IV.I. Dimensions principals de les estructures 12/8 i 8/6.

(\*) Dades no disponibles

SRM	12/8	8/6
Tensió	24 V	
$R_{20^{\circ}\text{C}}$ ( $\Omega$ )	22.0	5.5

Taula IV-II. Resistència de fase i tensió d'alimentació.

Les figures 4.2. i 4.3 corresponen a l'aspecte real del prototipus SRM 12/8. Les figures 4.4. i 4.5. al SRM 8/6.

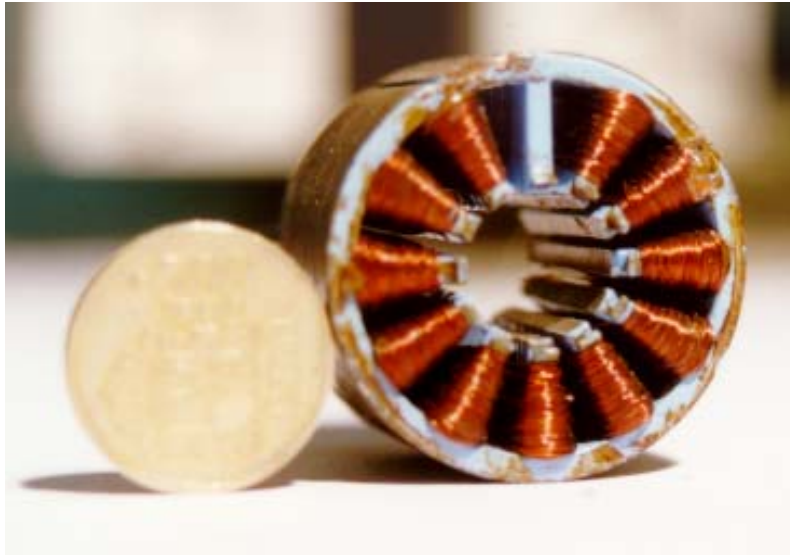


Figura 4.2. SRM 12/8, Estator.



Figura 4.3. SRM 12/8. Rotor.

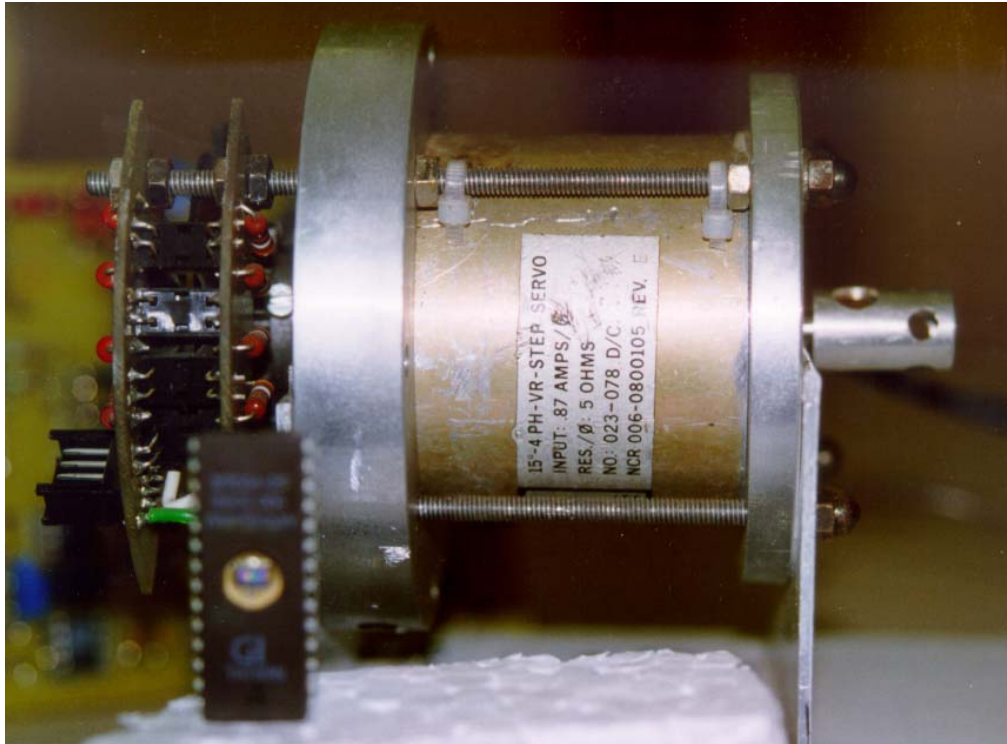


Figura 4.4. 8/6 SRM.

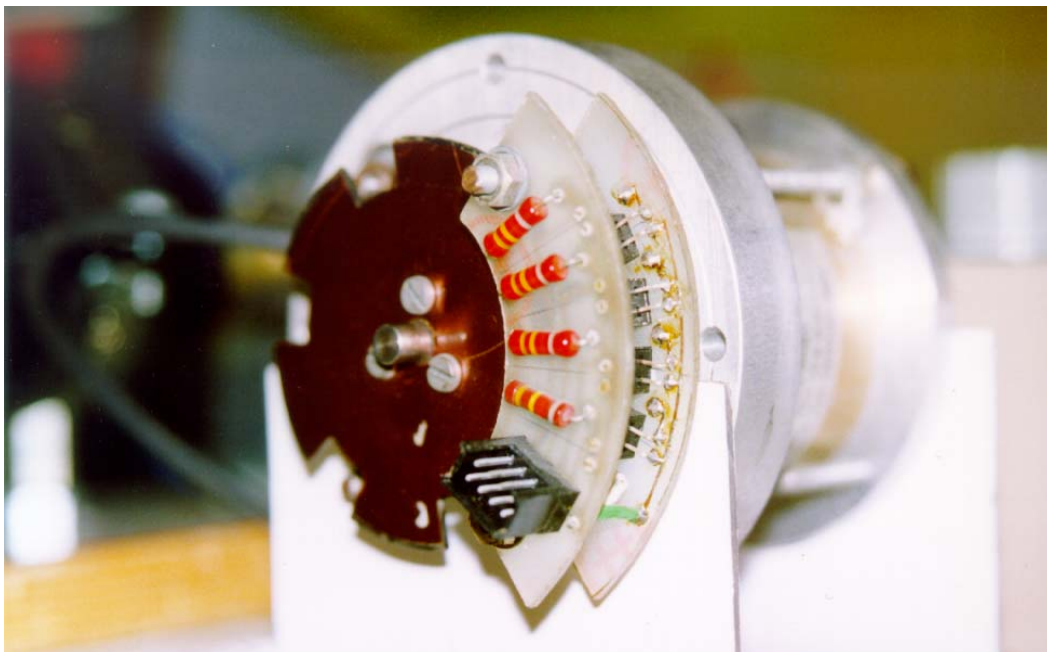


Figura 4.5. 8/6 SRM. Sensor de posició.

### IV.3. Caracterització magnètica.

La determinació de les característiques magnètiques del SRM és un aspecte de gran importància, degut a la forta no linealitat del motor, l'elevada distorsió en la font d'alimentació deguda al convertidor i el nivell de saturació del circuit magnètic. Tot això crea una gran dificultat a l'hora d'obtenir amb precisió el comportament magnètic (inductància i corbes del flux concatenat respecte del corrent instantani).

S'ha construït un equip específic per a l'obtenció d'aquestes dades. El funcionament del sistema es basa en l'equació elèctrica del SRM. Així, metre una fase del SRM s'alimenta amb corrent continu controlable per mitjà d'un pont amb 4 transistors IGBT, el rotor del SRM s'acobla a un conjunt reductor-motor pas a pas, figura 4.6.

Mitjançant un sistema d'adquisició de dades es recull, per cada posicionament, a partir de les formes d'ona de la tensió i el corrent de fase, així com la posició angular, poden obtenir-se les corbes de flux concatenat versus corrent per a diferents posicions o la inductància de fase versus la posició per diferents corrents. Les corbes d'inducció respecte a la posició per distints valors dels corrents es mostren en les figures 4.7. i 4.8.

Les corbes de magnetització (flux concatenat respecte el corrent de fase) per a diferents posicions del rotor compreses entre la posició alineada i no alineada es mostren en les figures 4.9. i 4.10. De l'anàlisi de les corbes de magnetització es desprèn que en el SRM 12/8 la relació parell – corrent és de l'ordre de 5,8 vegades major que en el SRM 8/6.

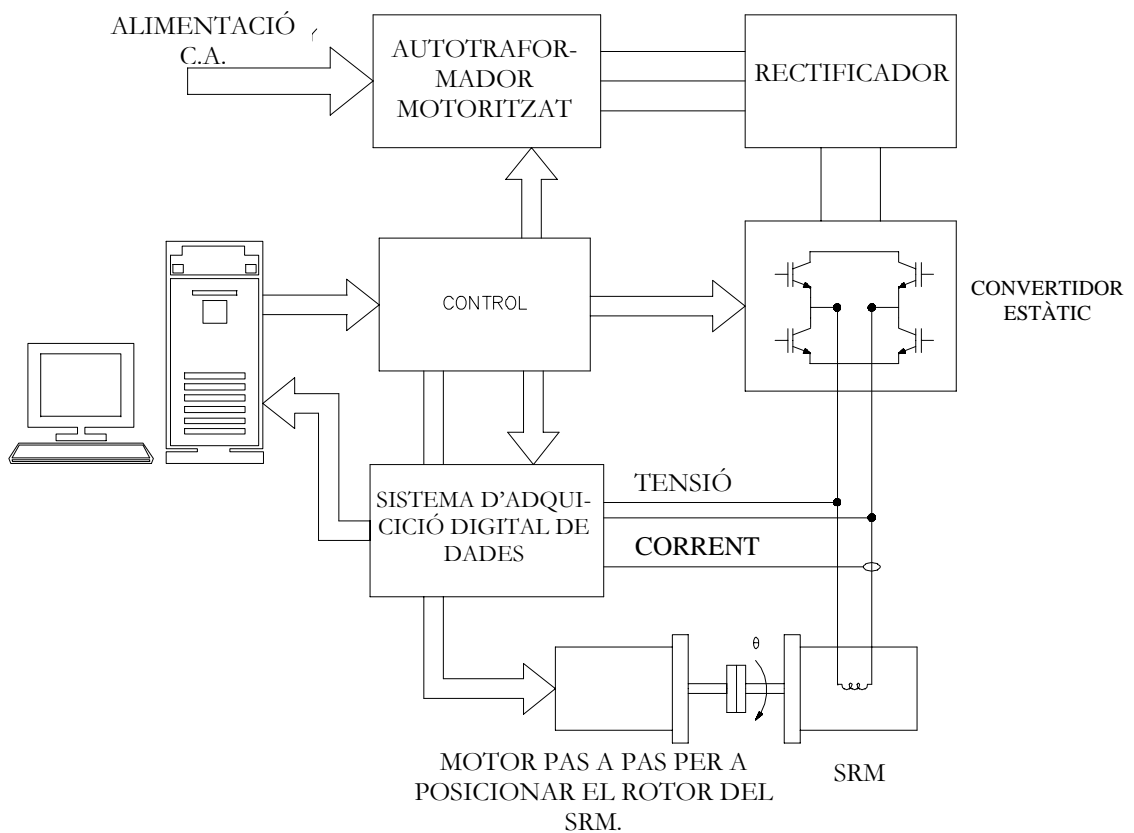


Figura 4.6. Diagrama de blocs de l'equip per a la mesura d'inductàncies.

Inductàncies SRM 12/8

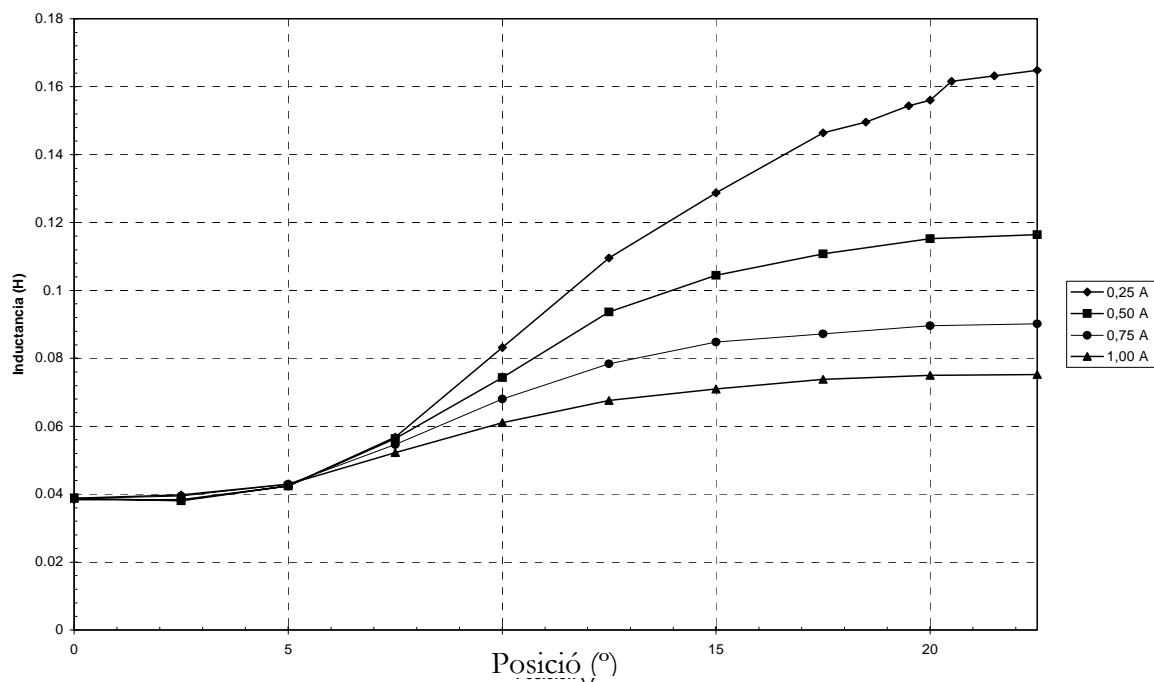


Figura 4.7. SRM 12/8 Inductàncies de fase per a diferents posicions i corrents de fase

Inductàncies SRM 8/6

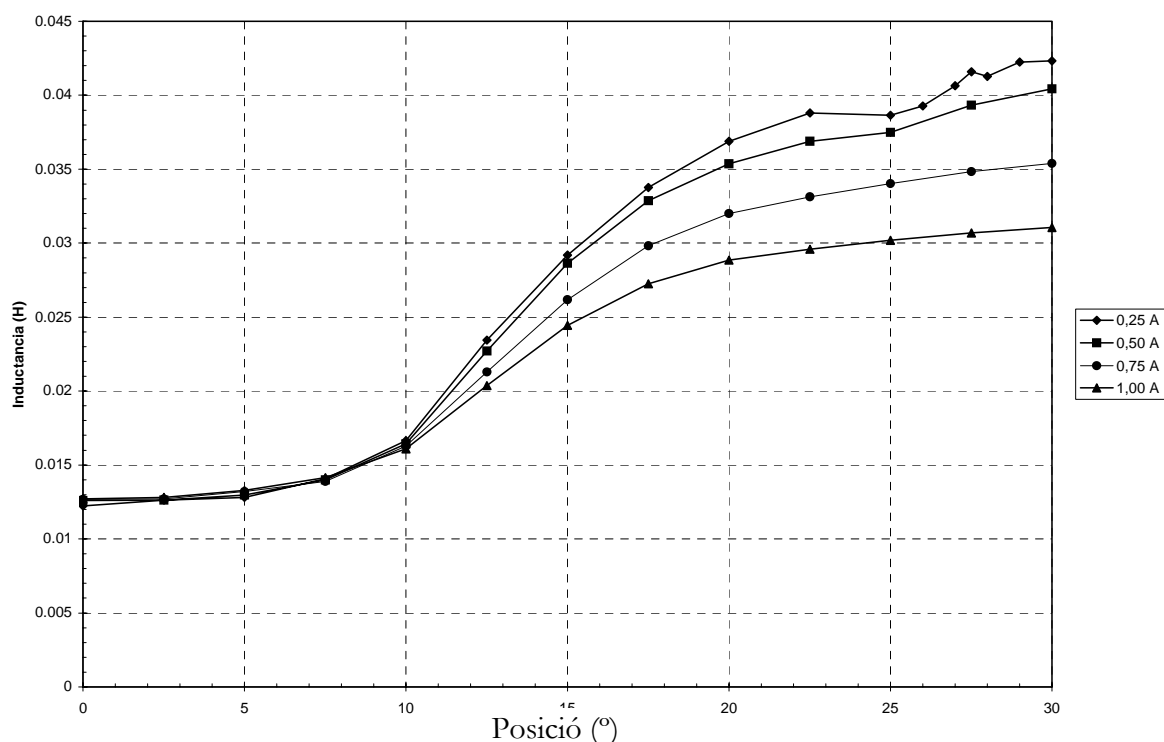


Figura 4.8. SRM 8/6 Inductància de fase respecte la posició del rotor per diferents valors de corrent de fase.

### Flux Concatenat SRM 12/8

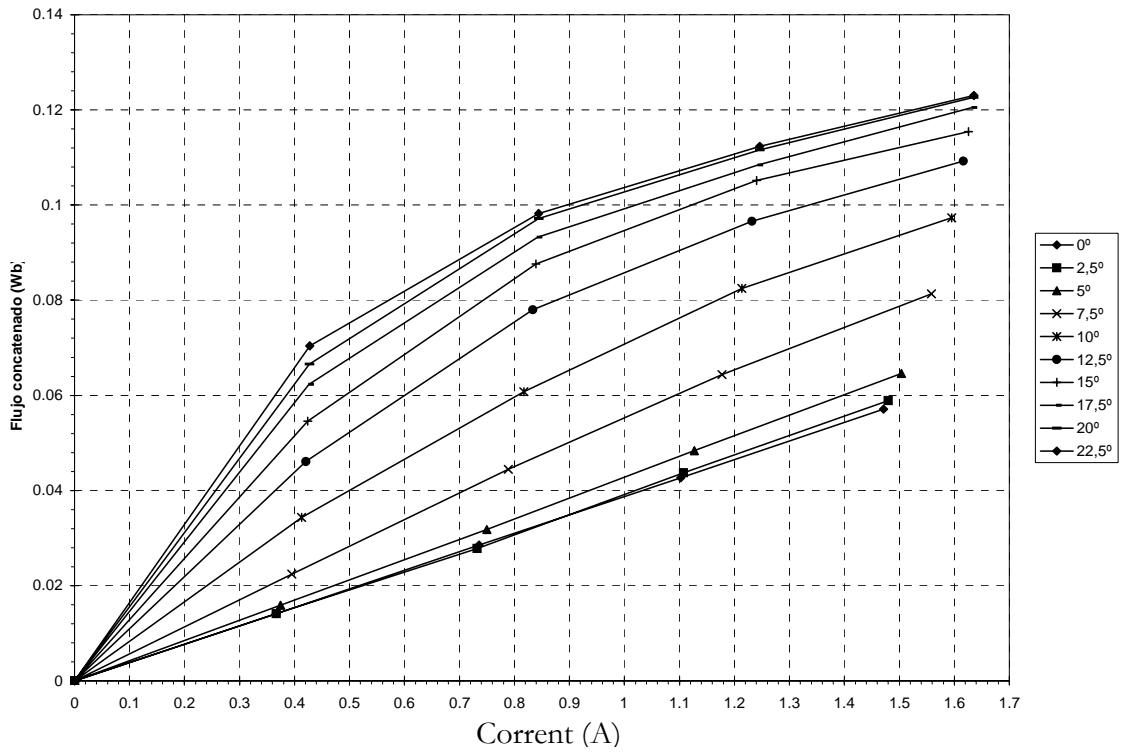


Figura 4.9. SRM 12/8 Flux concatenat respecte del corrent de fase i la posició del rotor.

### Flux Concatenat SRM 8/6

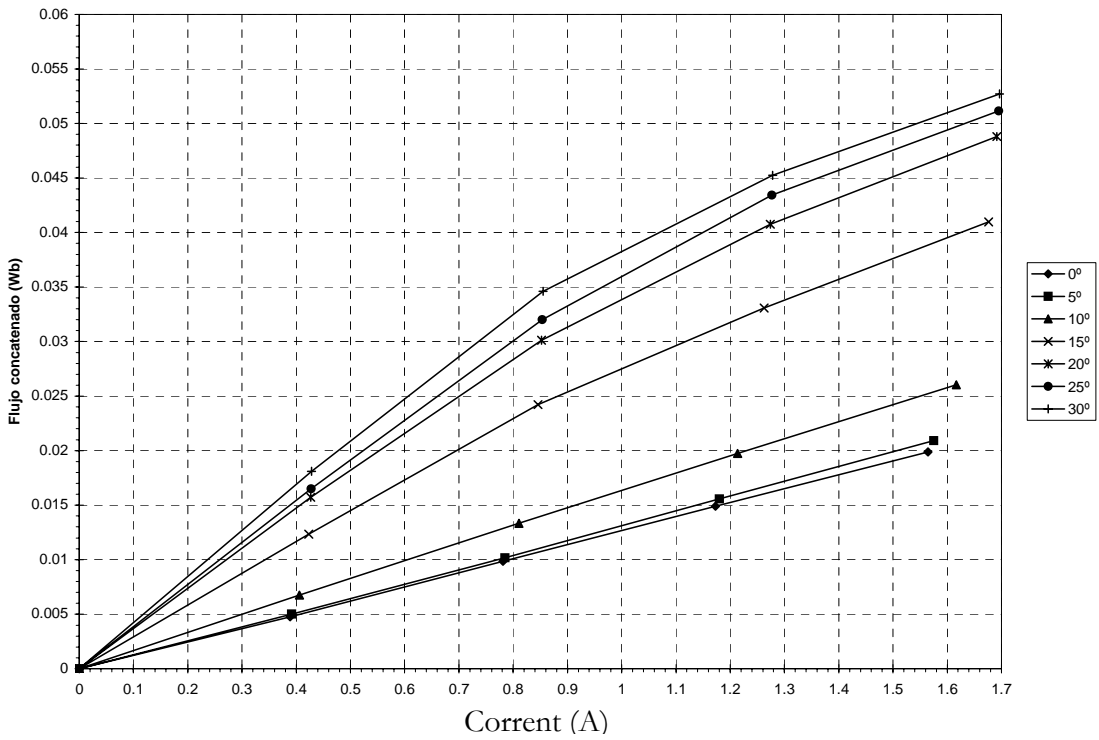


Figura 4.10. SRM 8/6. Flux concatenat respecte del corrent de fase per diferents posicions del rotor (compreses entre la posició alineada i la posició no alineada).

#### IV.4. Determinació experimental de les formes d'ona de tensió i corrent en el SRM.

Alimentant el convertidor estàtic amb una font CC, i utilitzant un oscil·loscopi, es poden obtenir les diferents formes d'ona de les magnituds elèctriques de l'accionament, figures 4.11. [CAT97] , 4.12., 4.13., 4.14., 4.15. i 4.16.

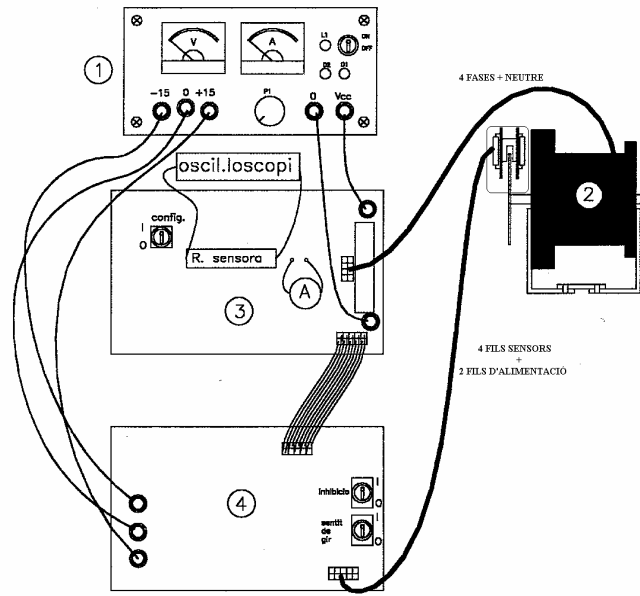


Figura 4.11. Obtenció formes d'ona. (1): Font CC d'alimentació. (2): Motor + Sensor de posició. (3): Placa convertidor estàtic. (4): Placa de control.

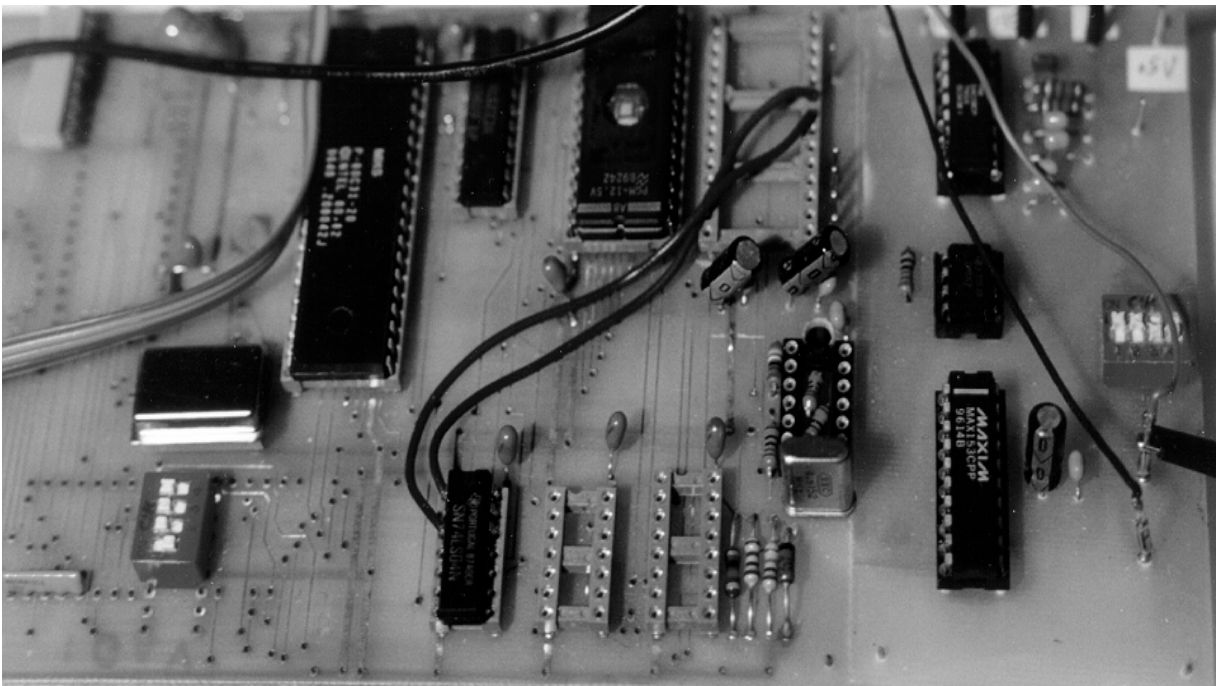




Figura 4.12. *Hardware* : Placa de control.

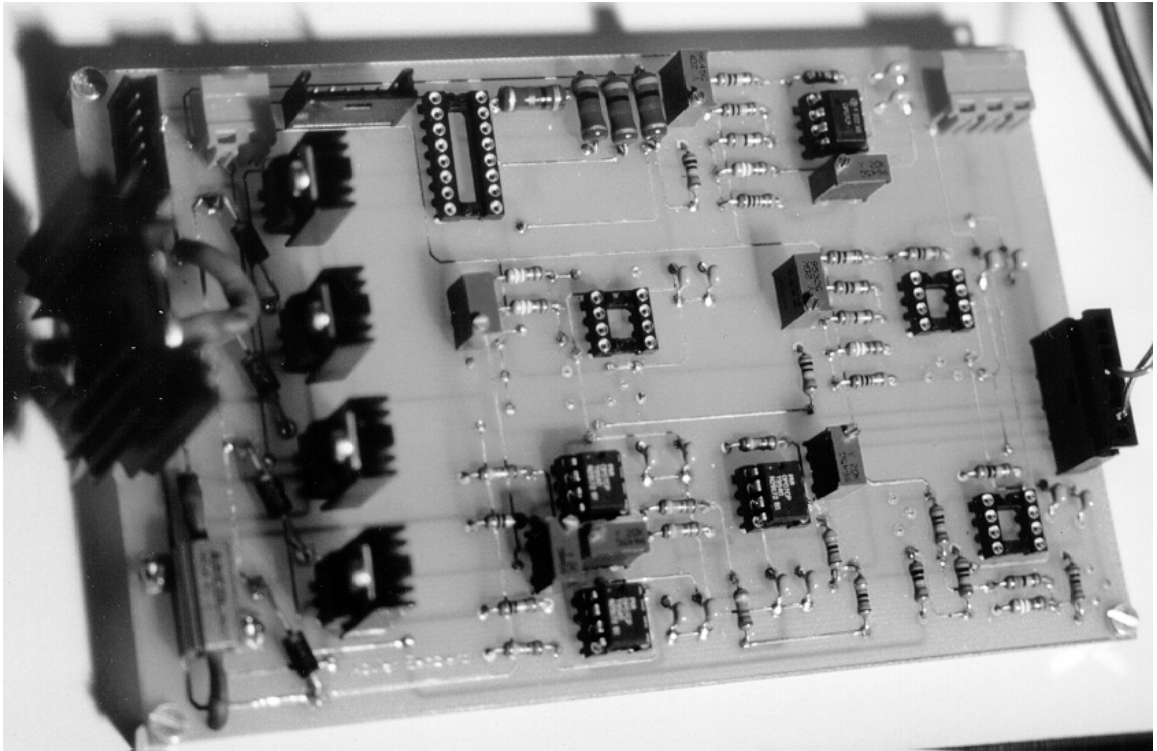


Figura 4.13. *Hardware*. Placa convertidor Unipolar de 4 fases, SRM 8/6.

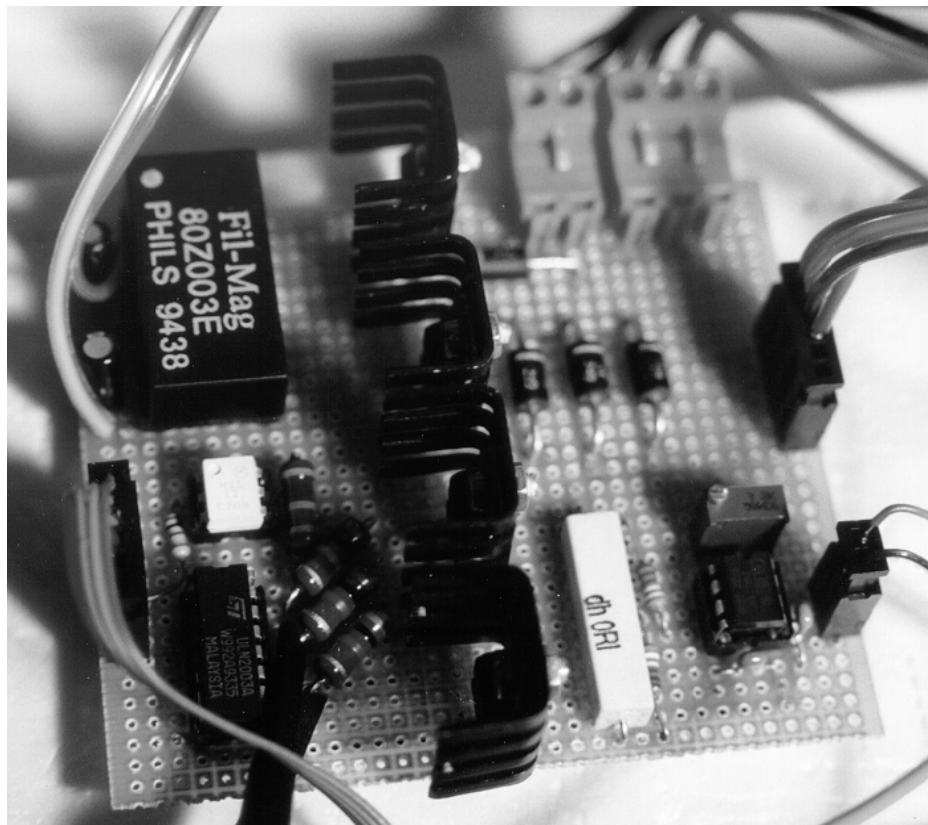


Figura 4.14. *Hardware*. Paca convertidor Miller per 3 fases, SRM 12/8.

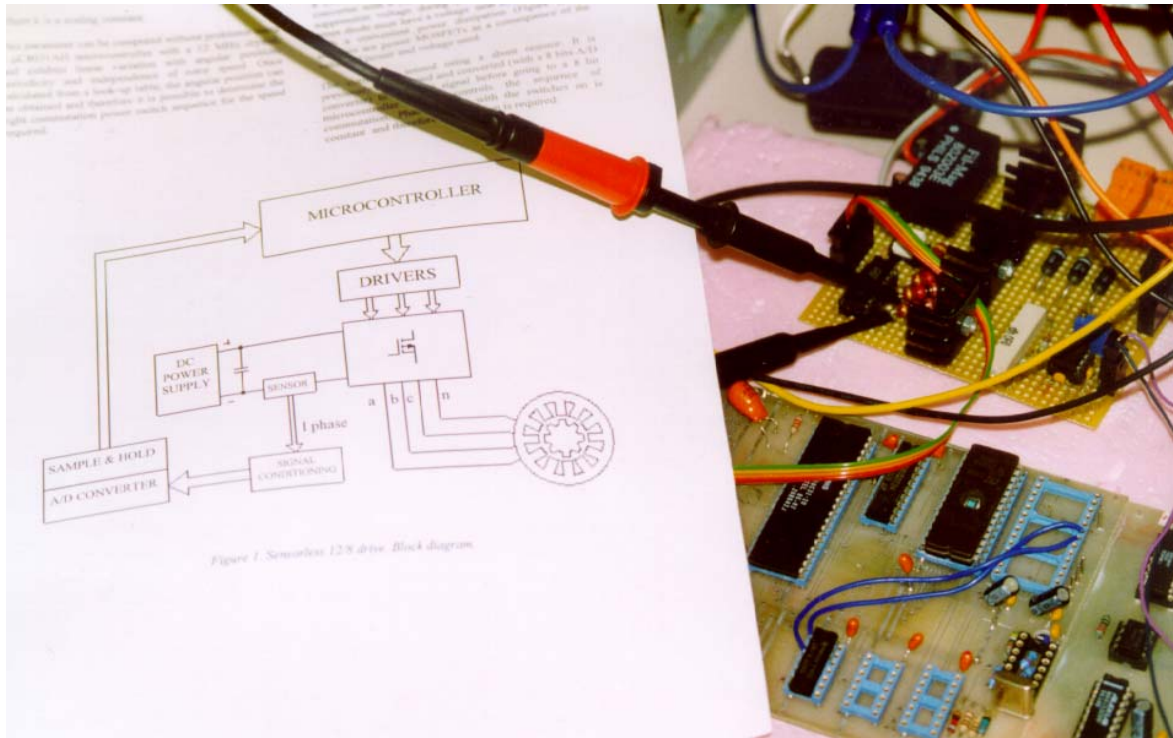
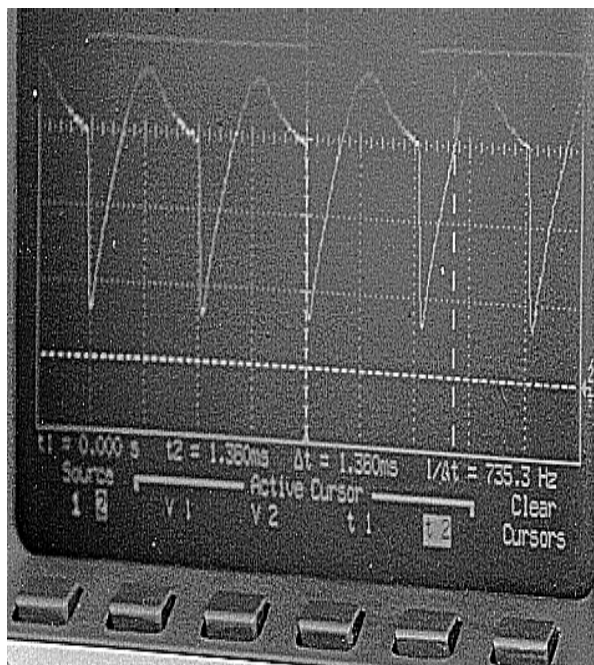
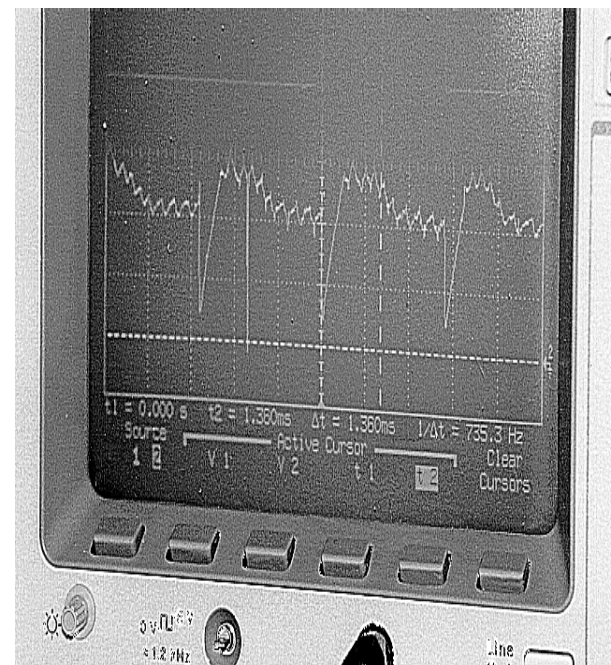


Figura 4.15. Obtenció formes d'ona.



a)



b)

Figura 4.16. Formes d'ona: a) Convertidor Unipolar, b) Convertidor Miller.

#### IV.5. Construcció del sensor de posició.

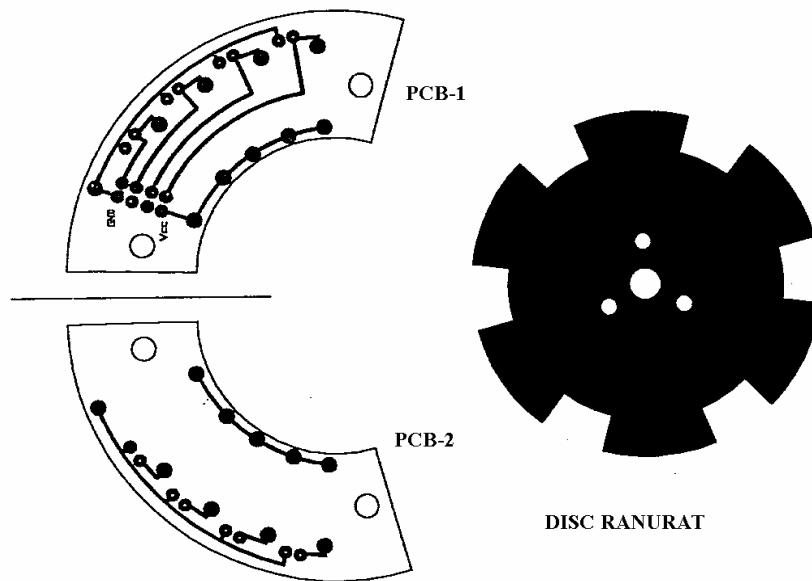


Figura 4.17. Detall del captador de posició del rotor. Plaques de circuit imprès que realitza el connexionat els opto-interruptors i disc ranurat.

#### IV.6. Determinació experimental de la corba característica parell-velocitat.

Per extreure les corbes característiques dels accionaments SRM, en la gamma de parells (fins 100 mNm) i velocitats (fins 10000  $\text{min}^{-1}$ ), es va optar en un principi per acoblar al SRM un conjunt motor CC-Encoder (Excitació independent, amb imants permanents, marca Crouzet) actuant com a fre. El conjunt motor-encoder s'utilitzava com a generador. Connectant una resistència de càrrega en borns de l'induit, la tensió  $V_{cc}$  proporcionada per aquest farà circular un corrent  $I_{cc}$  pel rotor. El resultat serà un parell de frenada, depenent del valor de la resistència de càrrega. Les figures 4.18. i 4.19. mostren el muntatge descrit.

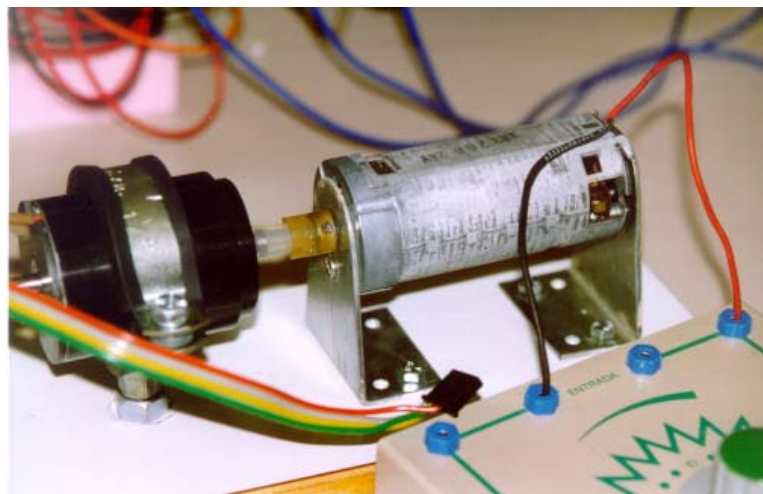


Figura 4.18. Conjunt SRM acoblat a un generador CC. com a fre.

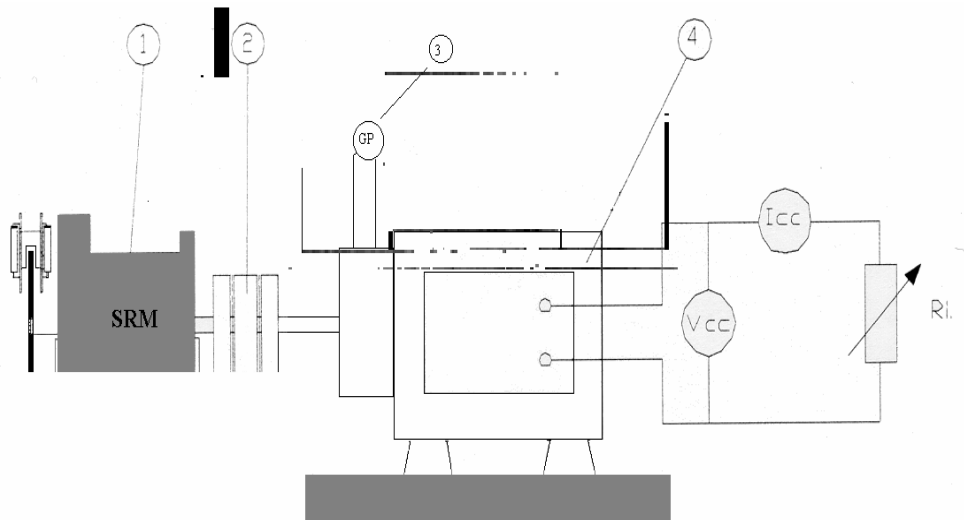


Figura 4.19. Muntatge per extreure les corbes característiques parell-velocitat. (1) SRM, (2) Acoblament flexible (desalineaments), (3) Encoder, (4) Generador amb resistència de descàrrega variable.

La velocitat de rotació s'obtenia dels polsos generats per l'encoder (1 pols per revolució). La resistència de càrrega variable era  $R_i$ . Les pèrdues mecàniques de la màquina CC treballant com a generador es poden modelar utilitzant una resistència de pèrdues  $R_p$ . Aquesta és funció de la velocitat prèviament. S'havia calibrat la dependència de  $R_p$  respecte la velocitat en forma de gràfic, figura 4.20.

#### Assaig de buit

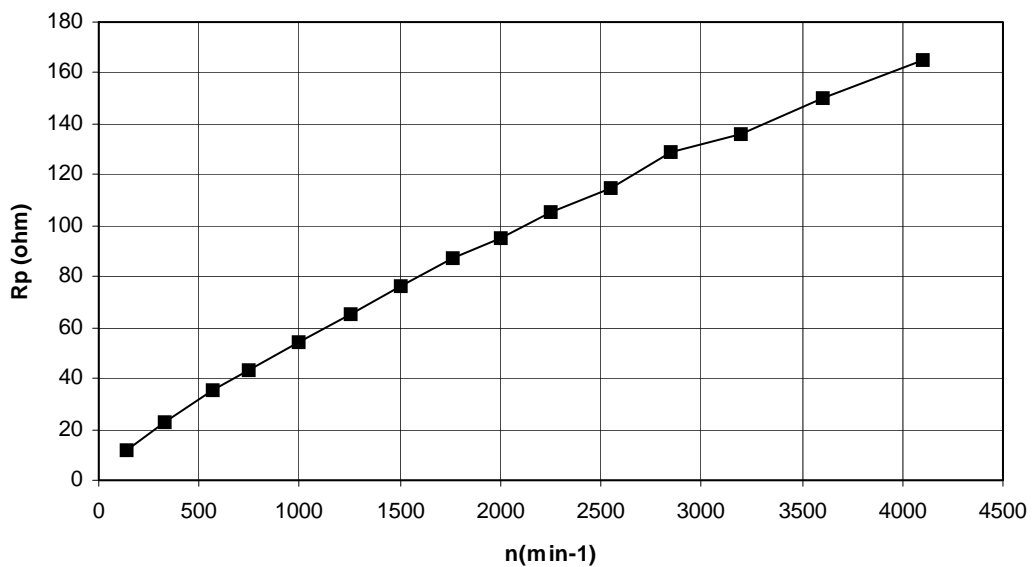


Figura 4.20. Resistència de pèrdues ( $R_p$ ) en funció de la velocitat de gir



En règim permanent M útil SRM  $M_u$  (mNm) = M frenada  $M_f$  (mNm) produït pel generador de CC., utilitzant els paràmetres  $I_{cc}$  (mA),  $V_{cc}$  (V),  $R_p$  ( $\Omega$ ),  $R_{ind}$  ( $\Omega$ ),  $n$  (min<sup>-1</sup>) s'obtenia a partir de les equacions (1), (2) i (3):

$$M_f = \frac{\text{Potència útil SRM}}{2\pi \cdot \frac{n}{60}} \quad (1)$$

$$\text{Potència útil SRM} = (V_{cc} \cdot I_{cc}) + (R_{ind} \cdot I_{cc}^2) + (\text{Per mag} + \text{Per mec}) \quad (2)$$

$$\text{Per mag} + \text{Per vel} = \frac{(V_{cc} + (R_{ind} \cdot I_{cc}))^2}{R_p} \quad (3)$$

El rang de velocitats aconseguit d'aquesta forma (de 400 fins a 1600 min<sup>-1</sup>) era força limitat, sobretot per la banda alta de velocitat. Fet que va fer necessari utilitzar un mètode menys restrictiu, tal com mostra les figura 4.21.

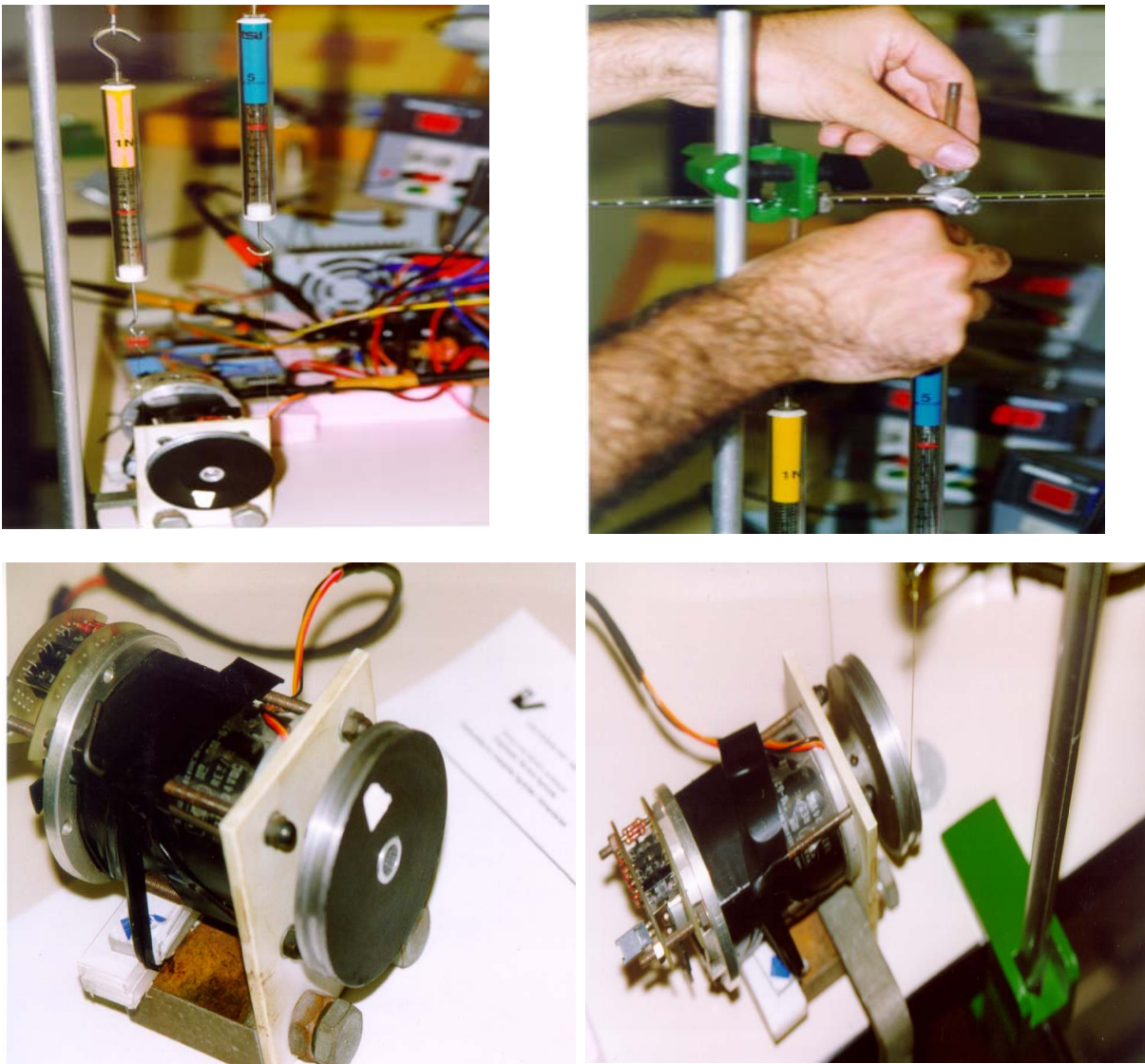


Figura 4.21. Sistema de mesura del parell per mitjà de 2 dinamòmetres.

El valor del parell de frenada es calcula a partir de la resta de la lectura dels 2 dinamòmetres i la multiplicació pel radi de la politja. Si la velocitat de treball roman constant, el parell resistent ha de ser el mateix que el parell proporcionat pel motor.

En la figura 4.22. s'observa com en la politja s'ha efectuat una marca per a la possible utilització d'un tacòmetre sense contacte directe. Un altre possibilitat per a la lectura de la velocitat és utilitzar la freqüència d'excitació de les fases del motor. Aquest cas es fa servir en l'accionament sense sensors (és multiplica la freqüència d'excitació d'una fase per una constant que depèn del nombre de fases i pols, 7.5 pel 12/8 SRM i 10 pel 8/6 SRM). Els resultats obtinguts s'han anat millorant al llarg dels darrers treballs publicats [AND99, AND98a, AND98b, AND98c, AND96, CAS98, CAS97].

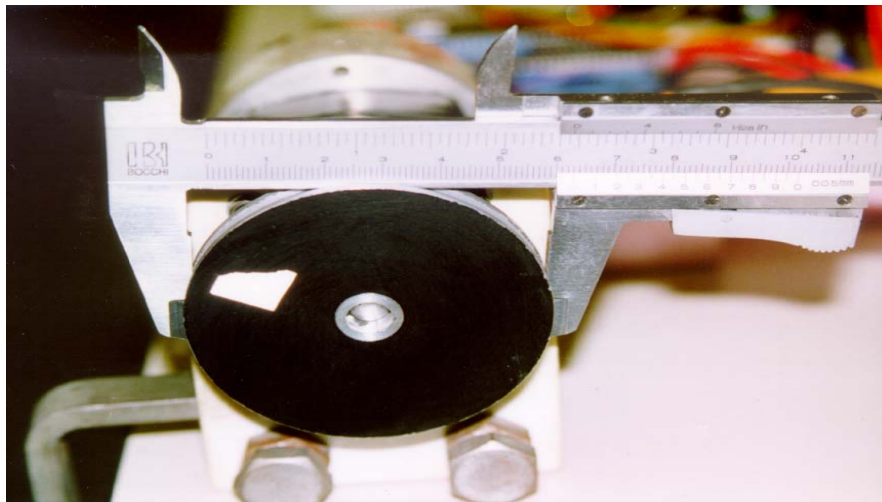


Figura 4.22. Politja utilitzada per a la mesura del parell motor.

## **IV.7. SRM amb sensors de posició. Resultats experimentals**

Utilitzant l'oscil·loscopi s'han capturat formes d'ona del corrent de fase i tensions en borns dels interruptors de potència.

Amb el banc de proves descrit s'han obtingut les corbes característiques parell-velocitat de prototipus de 4 (SRM 8/6) i 3 fases (12/8) per accionaments que no requereixen un control de velocitat (convertidor Unipolar: característica natural) o, en el cas contrari, que requereixen una regulació de la velocitat (convertidor Miller: característica a parell constant).

### **IV.7.1. SRM per aplicacions en las que la regulació de velocitat no és necessària (convertidor Unipolar).**

#### **IV.7.1.1. Formes d'ona dels corrents i les tensions.**

##### **A. SRM 8/6**

Per constatar la importància del correcte muntatge del sensor [CAT97], a continuació es mostren diferents formes d'ona corresponents al corrent de fase en funcionament unipolar, figura 4.23.

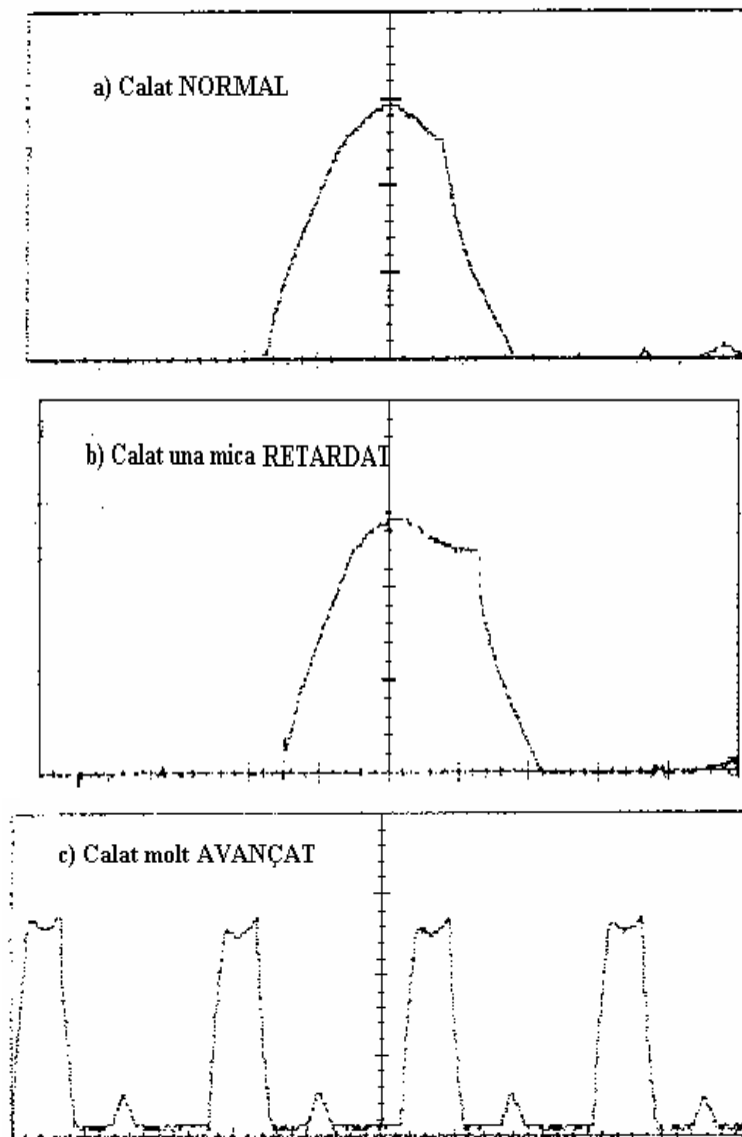


Figura 4.23. SRM 8/6. Diferents posicions relatives rotor-disc ranurat (sensor de posició)

- a) Calat Normal (sense avançament de fase i amb una durada de la conducció igual a l'angle de pas)
- b) Calat una mica retardat (endarreriment de l'inici de la conducció),
- c) Calat molt avançat: mal funcionament. El consum de corrent creix molt mentre el parell motor pràcticament és constant).



Les figures 4.24. i 4.25. representen el corrent de fase pel SRM 8/6. En el cas de la figura 4.24 s'ha afegit la forma d'ona que adopta la tensió en borns del interruptor estàtic de la fase en conducció.

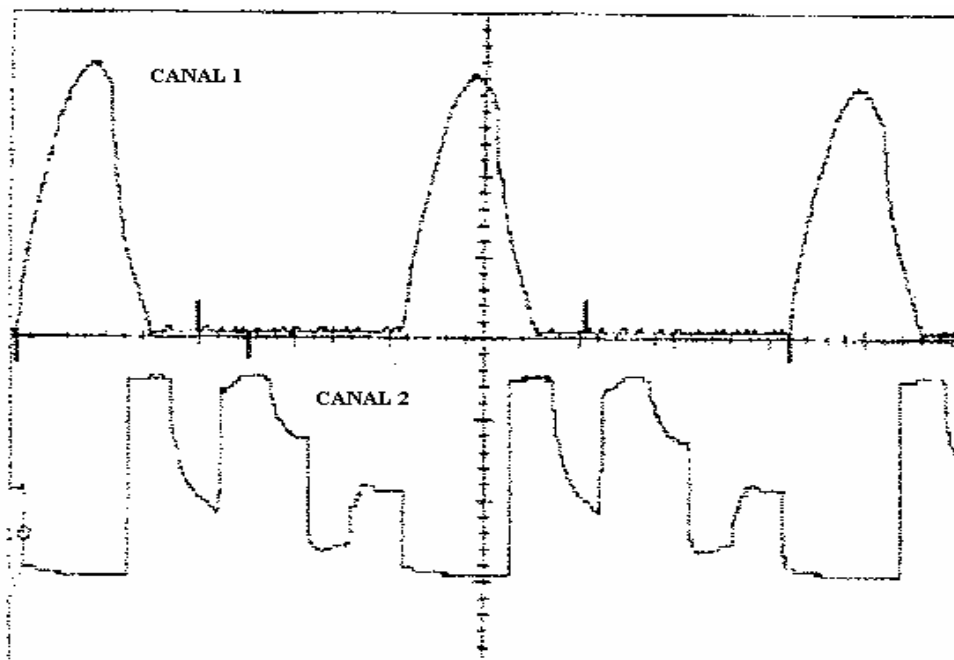


Figura 4.24. SRM 8/6 Unipolar. Corrent de fase (canal 1, 100 mA/div) i la tensió en borns dels interruptors estàtics (canal 2, 20 V/div).

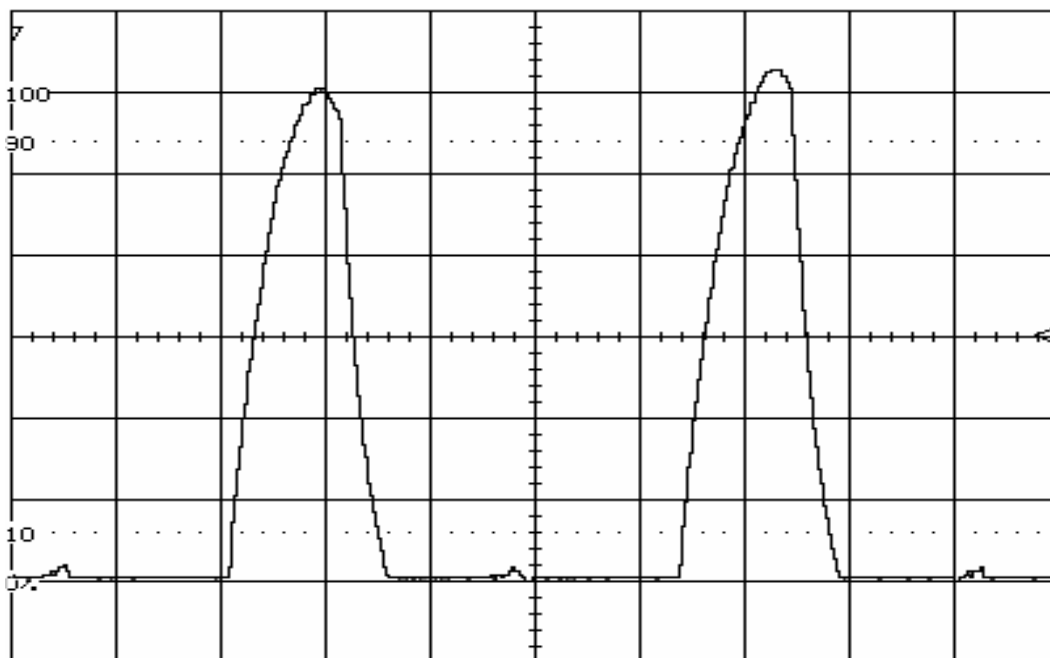


Figura. 4.25. Forma d'ona del corrent de fase SRM 8/6 alimentat amb convertidor unipolar. Escala: 1 ms/div , 0.2 A/div Punt de funcionament: 2000 min<sup>-1</sup> , 40 mNm (representat en la figura 4.27. com a punt P).

## B. SRM 12/8.

El circuit de desexcitació del convertidor unipolar s'ha configurat inicialment amb resistències de supressió de  $47\Omega$  i  $100\Omega$  (figura 4.26).

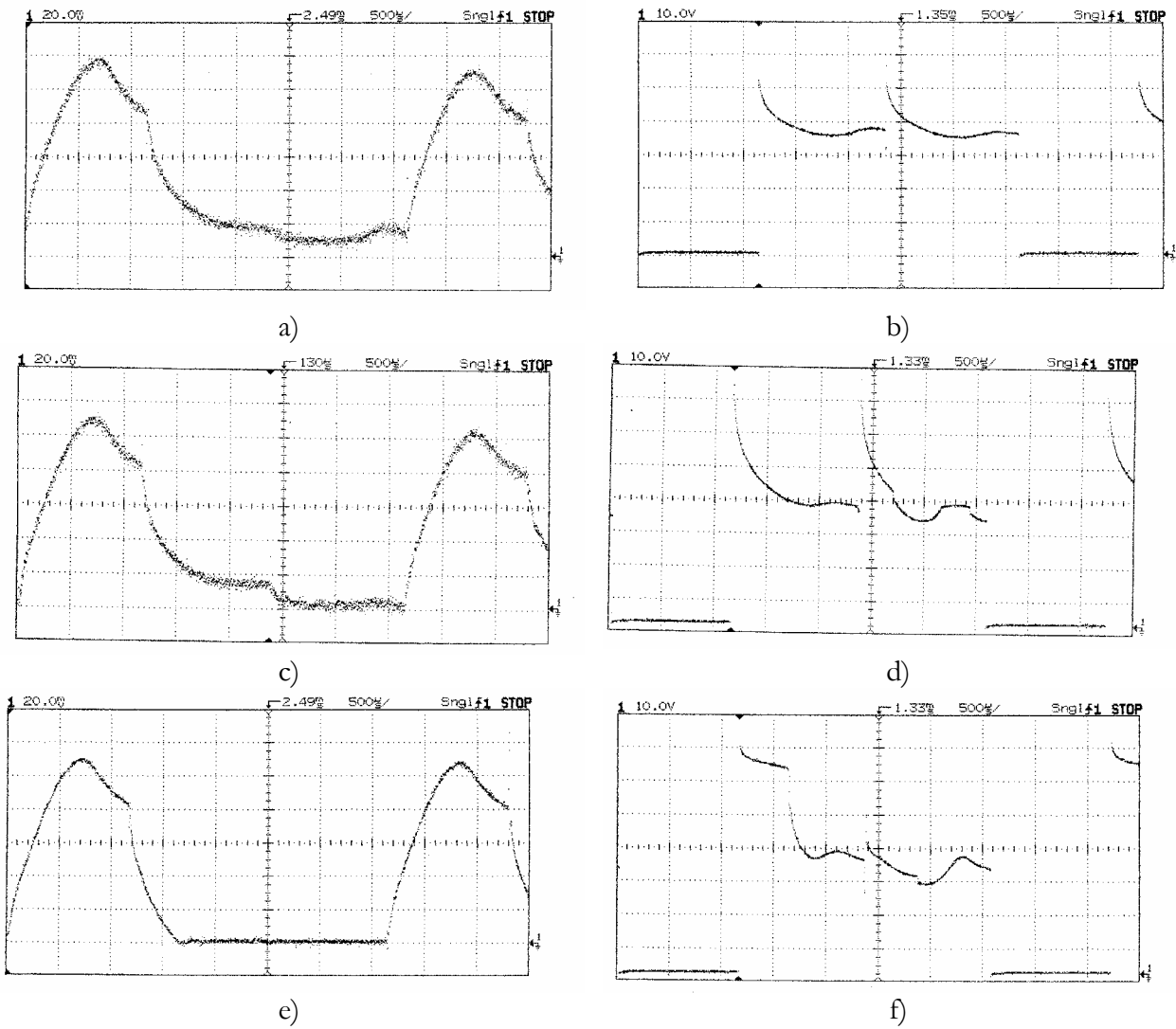


Figura 4.26. SRM 12/8, convertidor unipolar

- (a) Forma d'ona del corrent (fase A)  $N= 2101 \text{ min}^{-1}$ ,  $R_d = 47 \Omega$ .
- (b) Tensió en borns de l'interruptor (fase A)  $N = 2101 \text{ min}^{-1}$ .
- (c) Forma d'ona del corrent (fase A)  $N= 2105 \text{ min}^{-1}$ ,  $R_d = 100 \Omega$ .
- (d) Tensió en borns de l'interruptor (fase A)  $N = 2105 \text{ min}^{-1}$ .
- (e) Forma d'ona del corrent (fase A)  $N= 2098 \text{ min}^{-1}$ , Zener 30 V.
- (f) Tensió en borns de l'interruptor (fase A)  $N = 2098 \text{ min}^{-1}$ , Zener 30 V.

(Escala  $1\text{mV} = 4 \text{ mA}$ ).

L'anàlisi de les formes d'ona del corrent i la tensió de la figura 4.26. mostra que amb valors de resistència elevats el corrent disminueix més ràpidament però la tensió en borns de l'interruptor augmenta considerablement. Substituint la resistència de dissipació per un díode zener, de tensió zener propera a la tensió d'alimentació i potència adequada, el corrent mostra un comportament millor, tot i que l'estrès en tensió de l'interruptor segueix essent elevat. Aquesta opció s'ha de situar només en aplicacions de petita potència (menys de 50 W).

#### IV.7.1.2. Corbes parell-velocitat.

##### A. SRM 8/6

L'assaig efectuat en banc de proves [AND96], amb tensió d'alimentació 24V, funcionament unipolar, circuit de dissipació  $V_z=24V$ ,  $R_d = 5,6 \Omega$  i ajust normal del disc sensor (figura 4.23.), es recull en la figura 4.27.

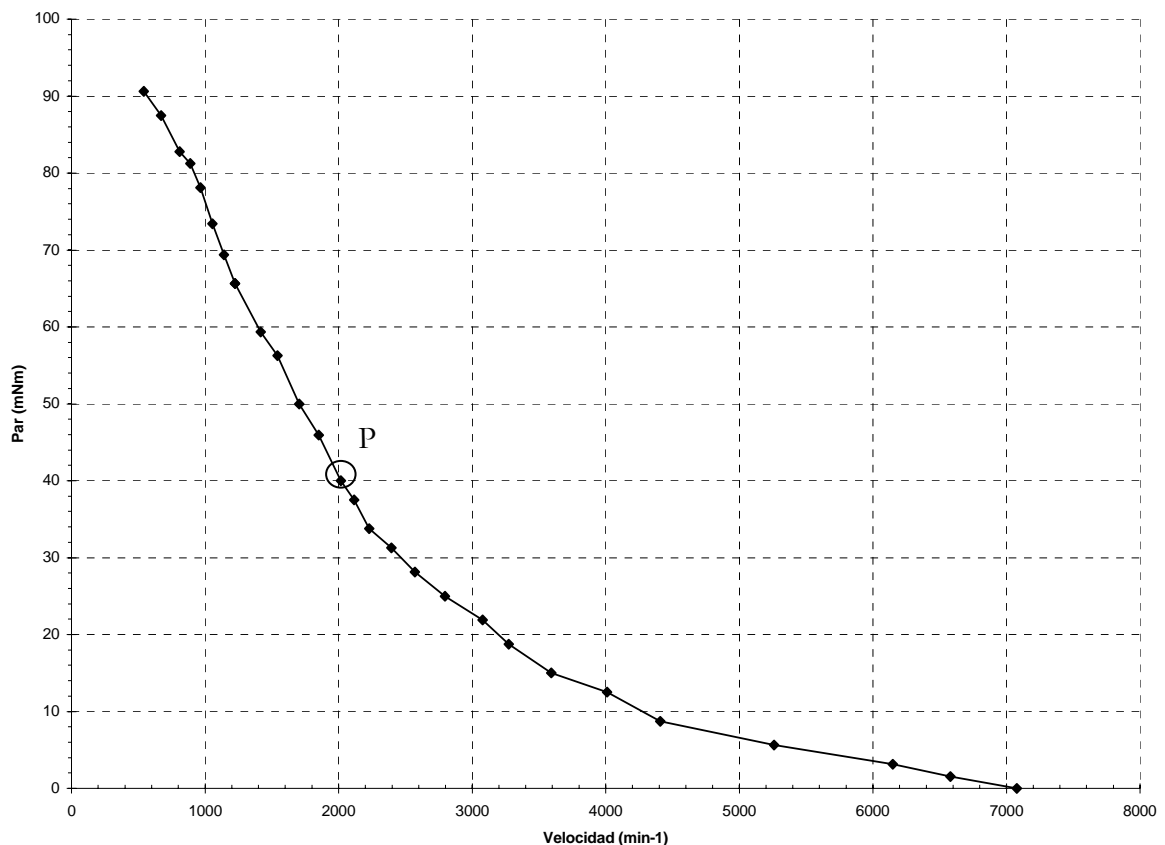


Figura 4.27. Característica natural del SRM 8/6 (convertidor unipolar,  $V_{cc}=24V$ ,  $V_z=24V$ ,  $R_d=5,6 \Omega$ ). Calat del disc ranurat en la posició normal (sense avançament de fase i amb una durada de la conducció igual a l'angle de pas). La forma d'ona del corrent en el punt de funcionament P correspon a la figura 4.25.

## B. SRM 12/8.

Tan si s'utilitza una resistència com un díode zener, la característica parell-velocitat es mes o menys inversament proporcional al quadrat de la velocitat. Per tan el punt de funcionament de l'accionament depèn de la càrrega (figura 4.28.).

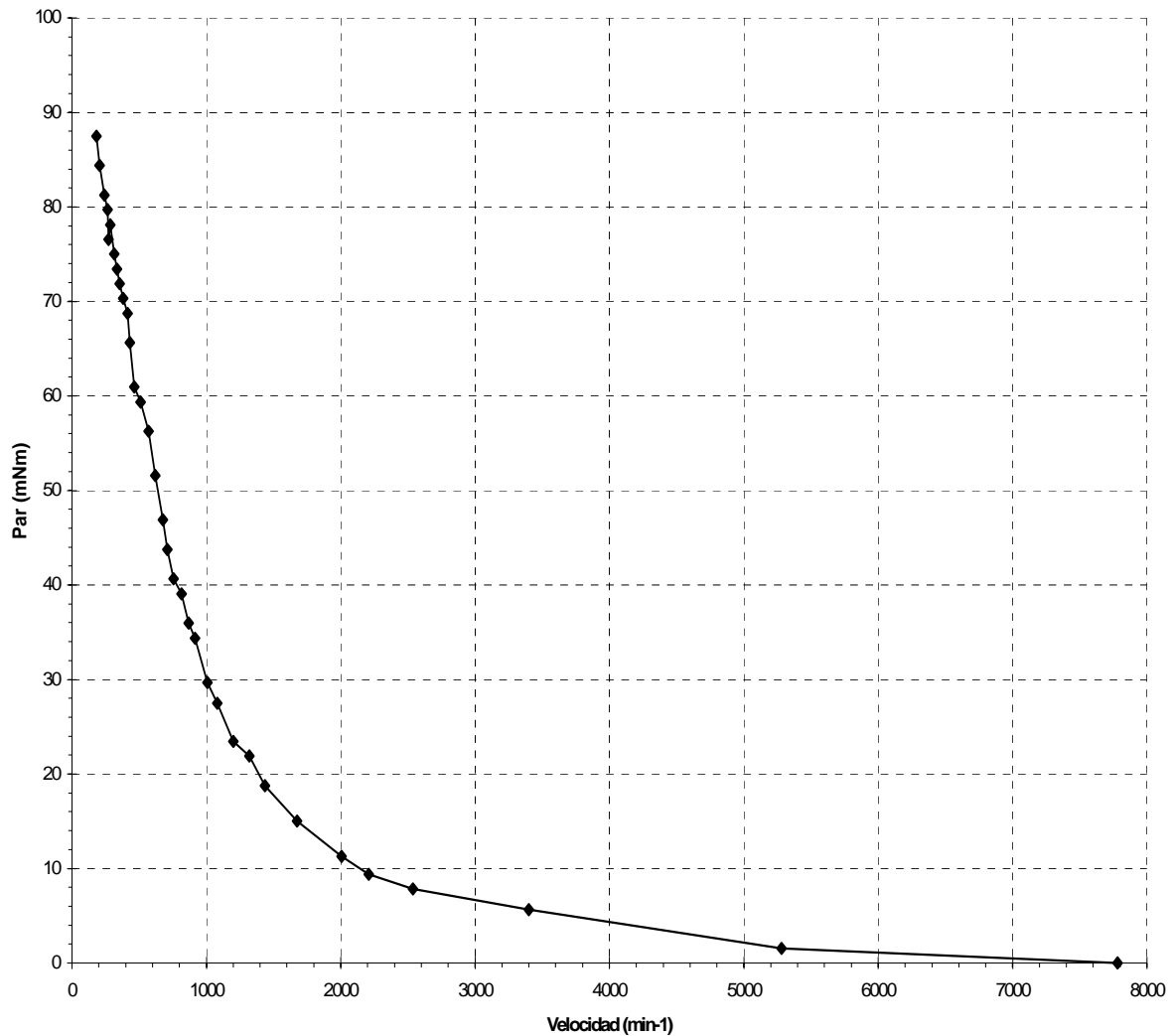


Figura 4.28. Característica parell-velocitat per a un accionament SRM12/8 amb convertidor unipolar alimentat a 24 V i díode zener de supressió  $V_z = 24V$ . Calat del disc ranurat en la posició normal (sense avançament de fase i amb una durada de la conducció igual a l'angle de pas).

## IV.7.2. SRM per aplicacions en las que la regulació de velocitat és necessària (convertidor Miller).

### IV.7.2.1. Formes d'ona dels corrents i les tensions.

#### A. SRM 8/6

En la figura 4.29. es mostra el comportament de l'accionament amb trossejat del corrent (mitjançant un convertidor Miller), a diferents velocitats de treball.

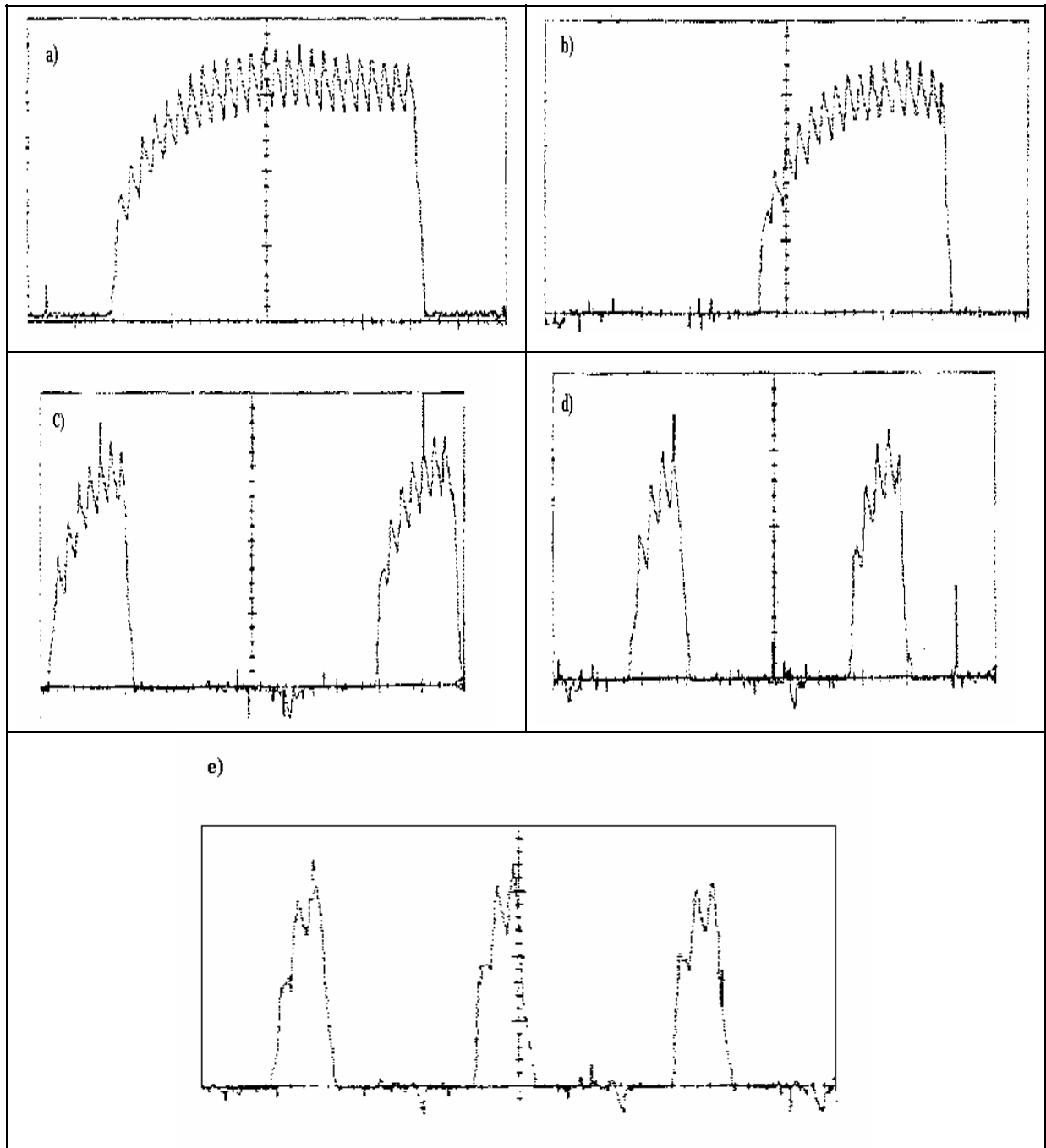
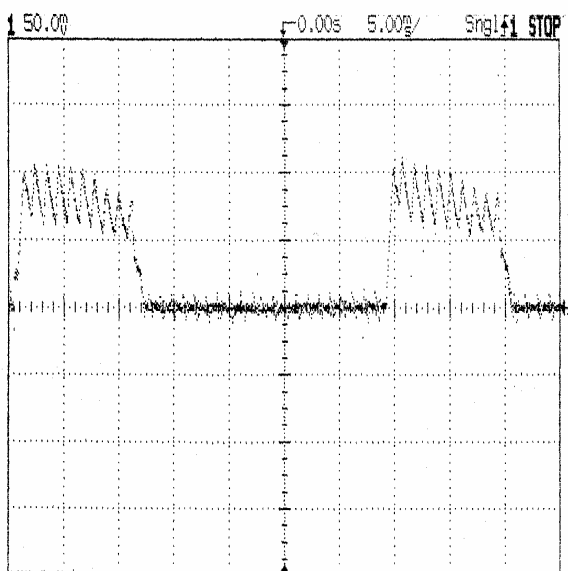


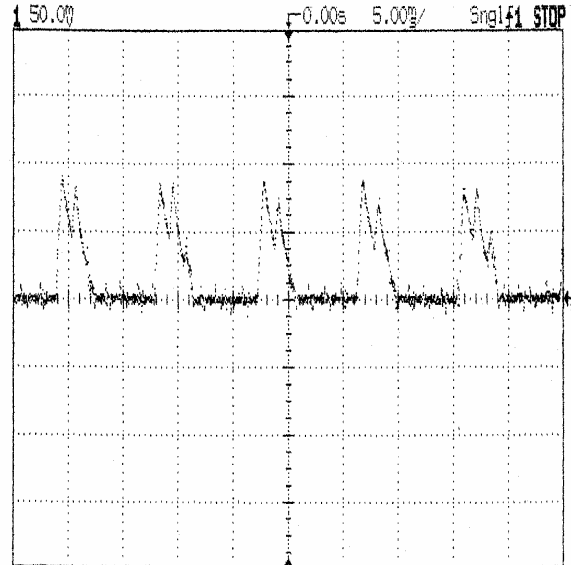
Figura 4.29. SRM 8/6 amb Convertidor Miller. Corrent de fase per a)  $180 \text{ min}^{-1}$ , b)  $318 \text{ min}^{-1}$ , c)  $640 \text{ min}^{-1}$ , d)  $986 \text{ min}^{-1}$ , e)  $1595 \text{ min}^{-1}$ .

## B. SRM 12/8

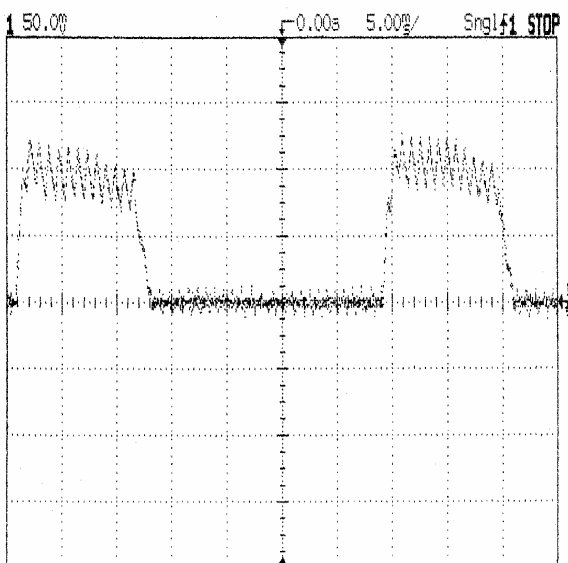
Les formes d'ona del corrent obtingudes amb un convertidor Miller es mostren en la figura 4.30.



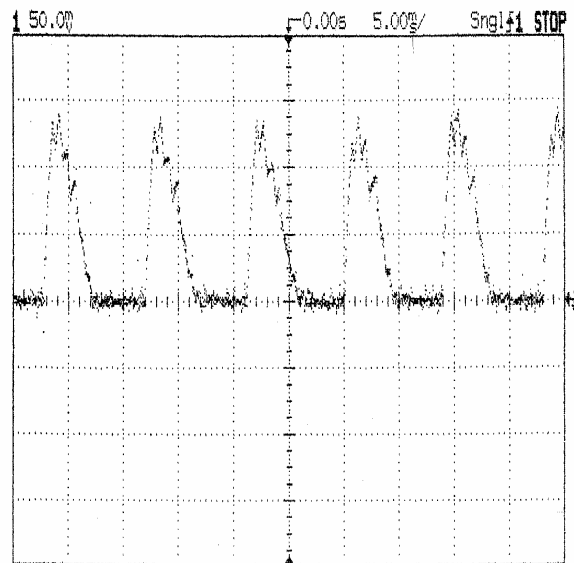
a)



c)



b)



d)

Figura 4.30. SRM 12/8. Cconvertidor Miller. Formes d'ona del corrent.

- (a) (b) Forma d'ona del corrent (fase A) per 2 valors de càrrega,  $N = 207 \text{ min}^{-1}$ .  
(c) (d) Forma d'ona del corrent (fase A) per 2 valors de càrrega,  $N = 727 \text{ min}^{-1}$ .  
(Escala:  $1\text{mV} = 4 \text{ mA}$ )

#### IV.7.2.2. Corbes parell-velocitat.

L'evolució del parell motor (mNm) en funció de la velocitat, per diferents corrents de fase i estructura electromagnètica, es mostra en les figures 4.31 i 4.32. A baixes velocitats, i per un corrent de fase prefixat, el parell motor es manté pràcticament constant. Aquesta és la missió del trossejador que incorpora el convertidor Miller i que permet una regulació a parell constant.

##### A. SRM 8/6

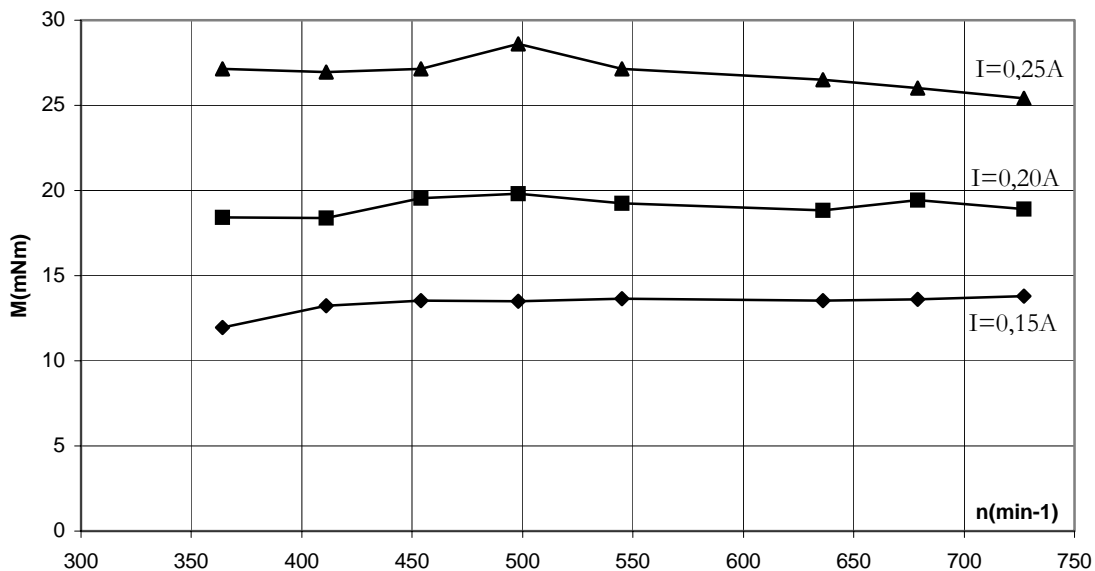


Figura 4.31. SRM 8/6. Corba característica parell-velocitat per diferents valors del corrent de fase. Treball a parell constant.

##### B. SRM 12/8

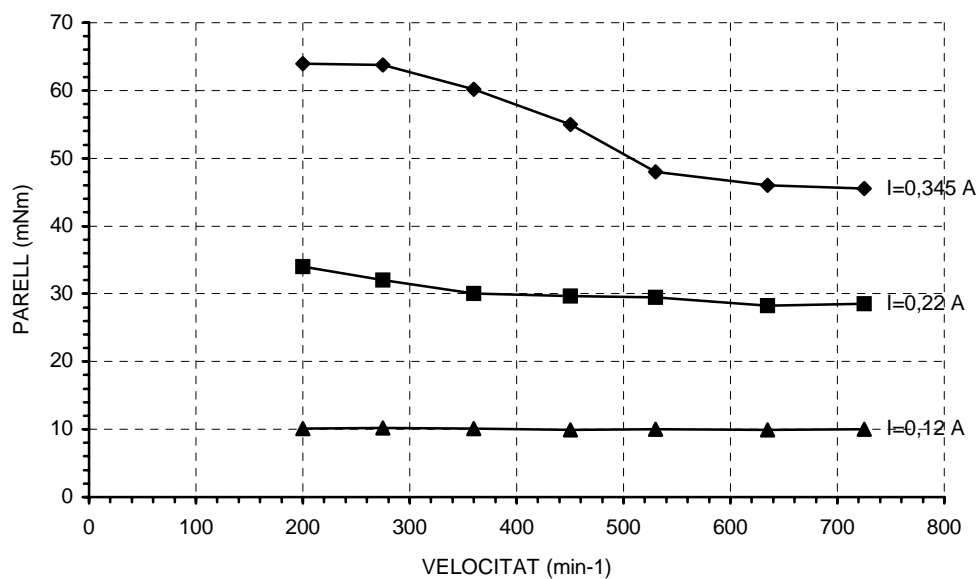


Figura 4.32. Característica parell-velocitat per a un SRM 12/8 amb convertidor Miller.

## IV.8. SRM sense sensors de posició. Resultats experimentals.

De forma anàloga al apartat IV.7. es presenten a continuació les corbes característiques parell-velocitat dels prototipus SRM 8/6 i SRM 12/8 per dos tipus d'accionaments de velocitat.

### IV.8.1. SRM per aplicacions en les que la regulació de velocitat no és necessària (convertidor Unipolar).

#### A. SRM 8/6

La corba característica parell-velocitat obtinguda pel mètode de la inductància de fases es mostra en la figura 4.33. (20Mhz)

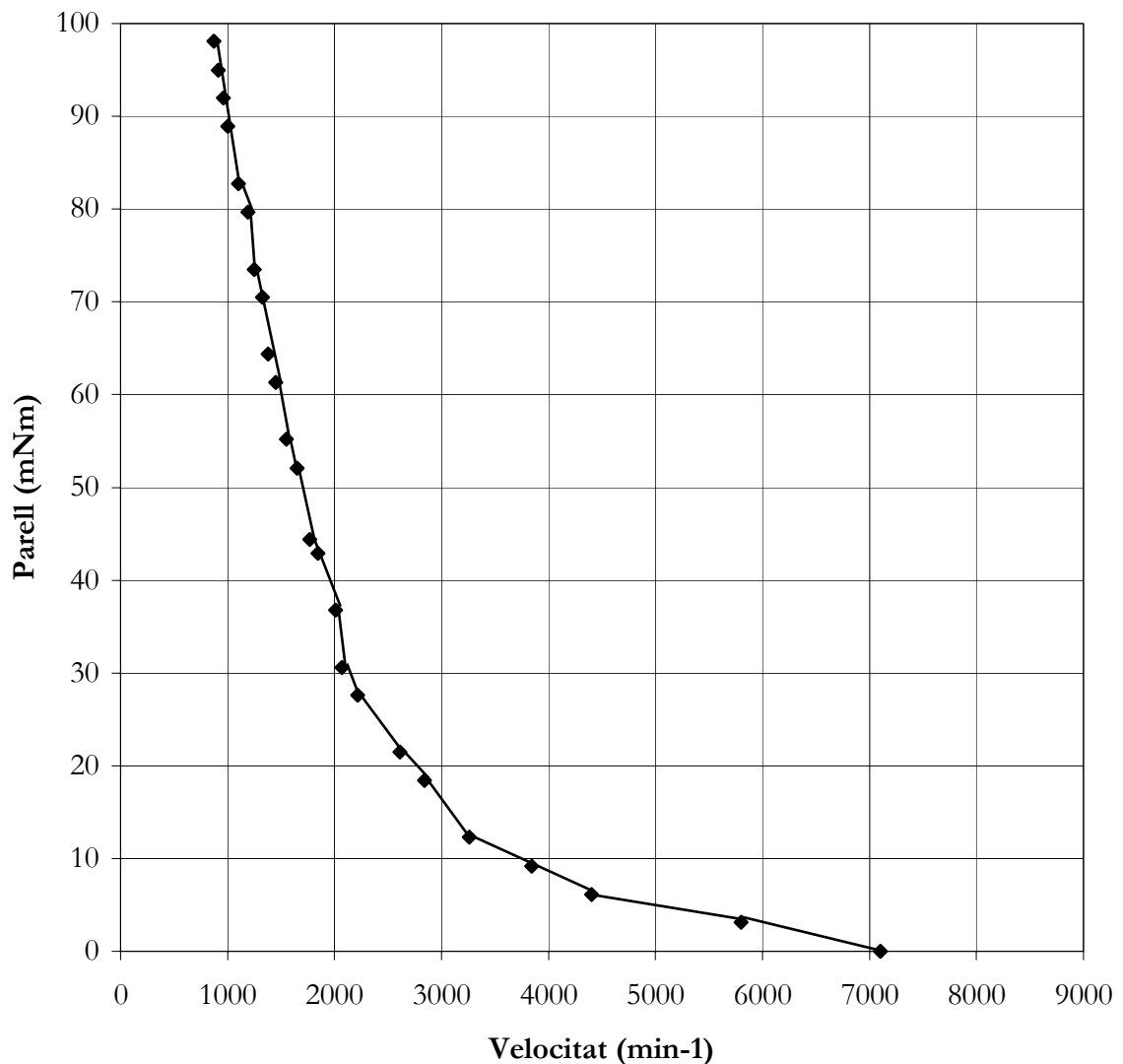


Figura 4.33. Corba característica parell-velocitat sense sensors SRM 8/6.



## B. SRM 12/8

Les corbes característiques parell-velocitat obtingudes tan pel mètode de la pseudoinductància com pel de la inductància de fase s'han representat de forma comparativa en la figura 4.34.[CAS98].

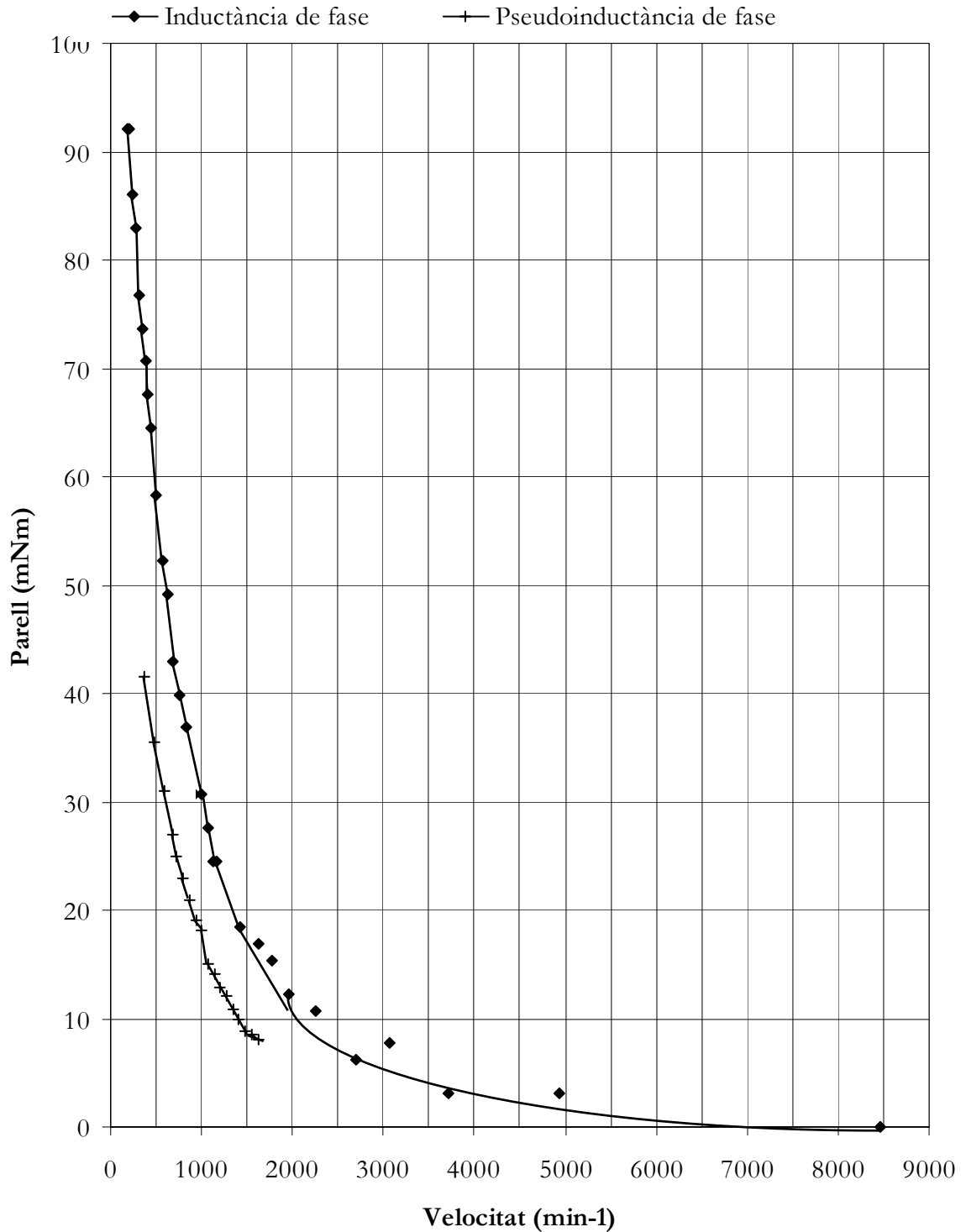


Figura 4.34. Corbes característiques parell-velocitat sense sensors i amb dos mètodes diferents Inductància de fase (20Mhz); Pseudoinductància de fase(20Mhz) SRM 12/8.

#### IV.8.2. SRM per aplicacions en les que és necessària la regulació de velocitat (convertidor Miller).

L'accionament amb regulació de velocitat a parell constant s'ha desenvolupat pel cas de 3 fases. El motor emprat ha estat el SRM 12/8. Els resultats obtinguts [CAS99] es mostren en la figura 4.35.

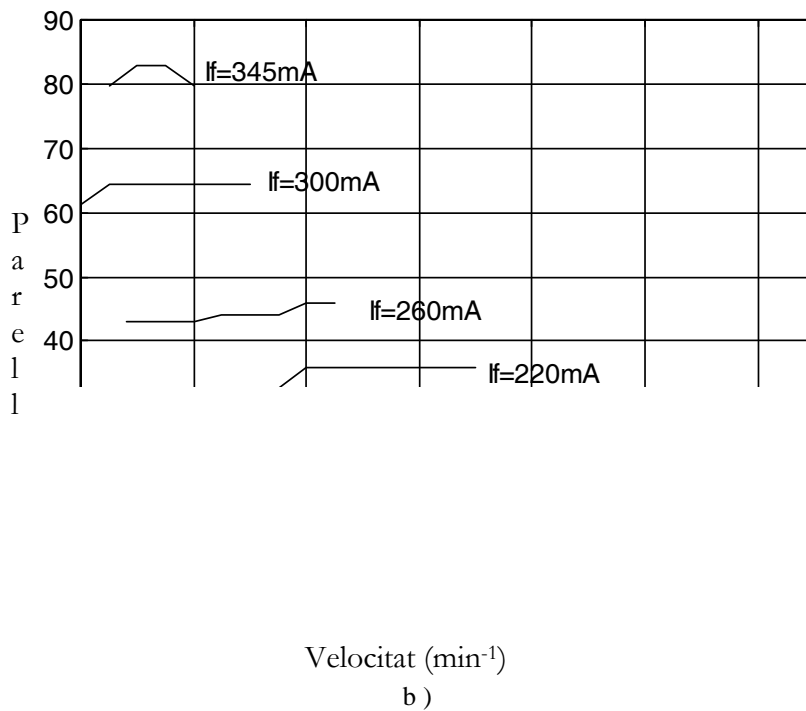
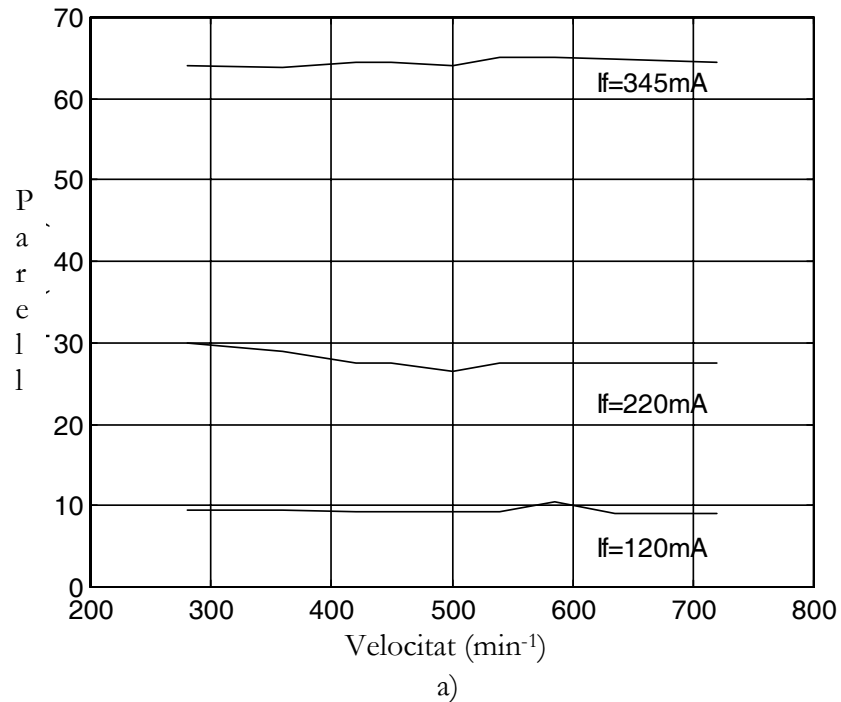


Figura 4.35. Regulació de velocitat a parell constant per SRM 12/8. Parell en mNm. If: Corrent eficaç per fase. a) 20MHz: 200 to 800 min<sup>-1</sup>. b) 40MHz: 200 to 1500 min<sup>-1</sup>.

### IV.8.3. Dependència dels paràmetres pseudoinductància i inductància de fases respecte la posició rotòrica.

Les figures 4.36. i 4.37. mostren de forma experimental la dependència dels paràmetres pseudoinductància de fase i inductància de fase respecte la posició rotòrica [CAS97].

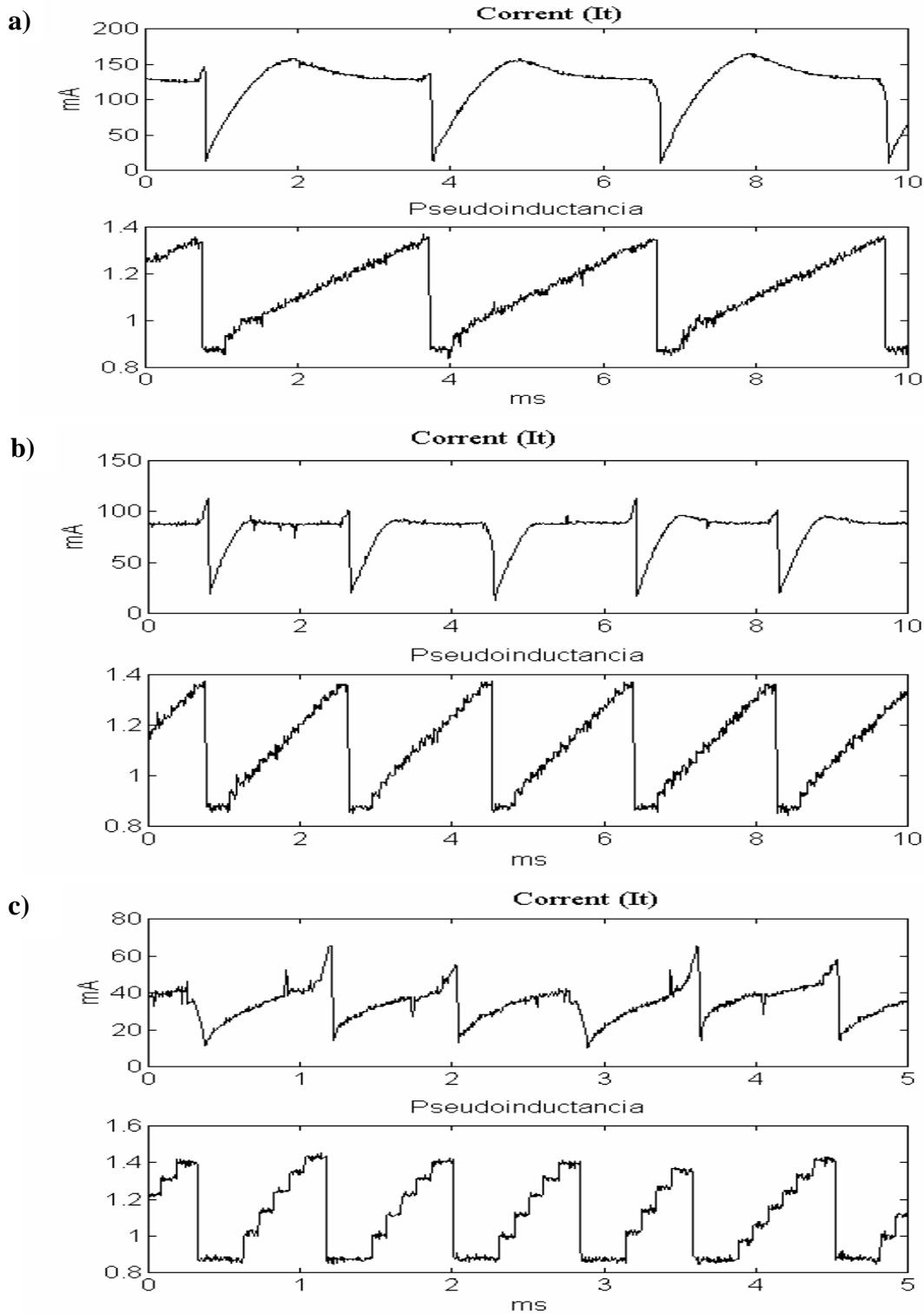


Figura 4.36. Utilització del paràmetre Pseudoinductancia ( $\mu\text{C}$  treballant amb rellotge de 12 MHz; temps de cicle  $55\mu\text{s}$ ) a)  $787\text{ m}^{-1}$ , b)  $1330\text{ m}^{-1}$ , c)  $2880\text{ m}^{-1}$ .

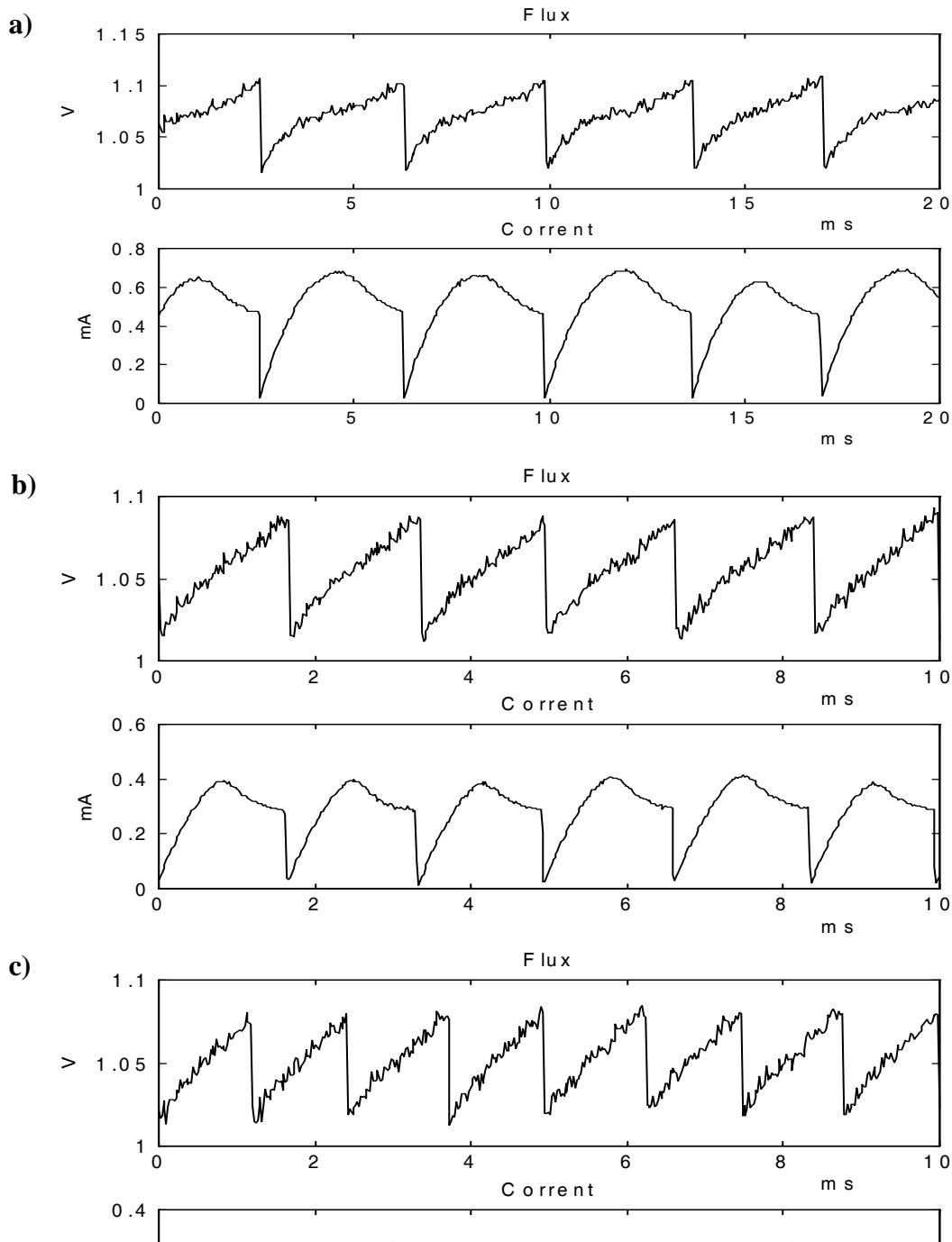


Figura 4.37. Utilització de la inductància de fase. Representació del flux magnètic i el corrent de fase ( $\mu\text{C}$  treballant amb rellotge de 20 MHz, temps de cicle  $75\mu\text{s}$ ).  
 650  $\text{m}^{-1}$ , b) 1500  $\text{m}^{-1}$ , c) 3000  $\text{m}^{-1}$

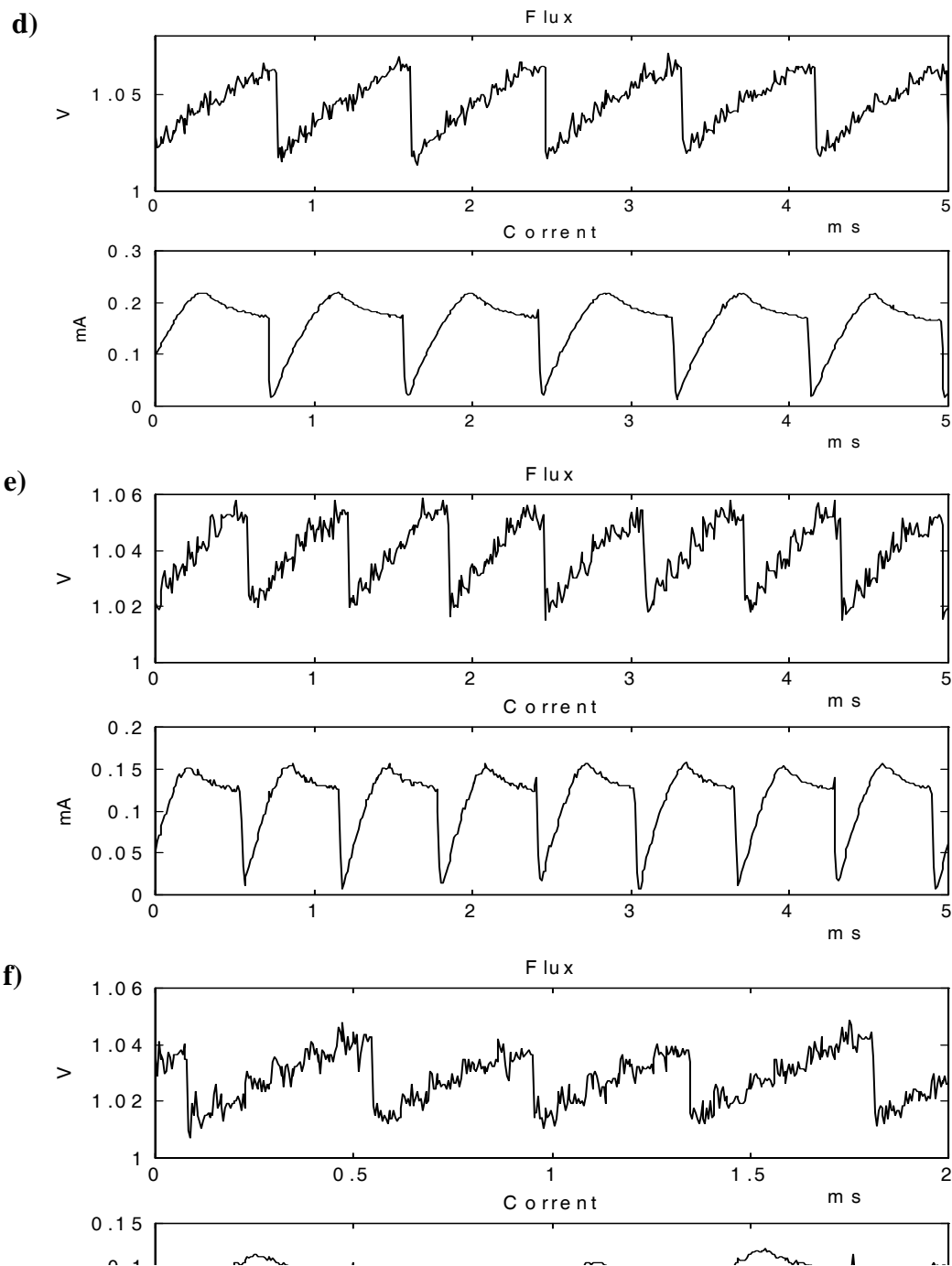


Figura 4.37. (continuació). Utilització de la inductància de fase. Representació del flux magnètic i el corrent de fase ( $\mu\text{C}$  treballant amb rellotge de 20 MHz, temps de cicle  $75\mu\text{s}$ ).  
d)  $3000\text{ m}^{-1}$ , e)  $4000\text{ m}^{-1}$ , f)  $5775\text{ m}^{-1}$

## Referències.

- [AND96] P. ANDRADA, F. CASTELLANA, E. MARTINEZ, J.I. PERAT, J.A. SÁNCHEZ I M. TORRENT. “12/8 Switched Reluctance Drives for low cost and low voltage applications.” ICEM-96 Vigo, 10-12 Setiembre 1996.
- [CAS99] F. CASTELLANA, X. ESCALERA, P. ANDRADA. “Low cost adjustable speed sensorless 12/8 switched reluctance drive for low power and low voltage applications”. 7<sup>th</sup> IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation ETFA’99. Barcelona, 18-22 Octubre 1999. (en premsa).
- [CAS98] F. CASTELLANA, P. ANDRADA, , E. MARTINEZ, J.I. PERAT. “Sensorless control of Switched Reluctance Drives for low power and low voltage applications”. 5th European Space Power Conference (ESPC-98) Tarragona, 21-25 Setembre 1998.
- [CAS97] F. CASTELLANA, P. ANDRADA, , E. MARTINEZ, J.I. PERAT, J.A. SÁNCHEZ I M. TORRENT. “Accionamiento de reluctancia autoconmutado sin sensores de posición para pequeñas potencias”. 5as Jornadas Hispano-Lusas de Ingeniería Electrica. Salamanca 3-5 Julio 1997, pp. 57-64.
- [CAT97] I. CATALÀ. “Accionament de baix cost per un motor de reluctància autocommutat”. TFC Departament d’Enginyeria Elèctrica, EUPVG-UPC, octubre, 1997.