

## I.1. El present de l'enginyeria electromecànica (EEM).

Els continus canvis tecnològics que es donen en la actual *societat de la informació*, han minvat la capacitat de sorpresa dels individus. És fàcil doncs no valorar tecnologies que, encara que ja estan molt consolidades, continuen essent de gran utilitat. Ens referim als ginyes electromecànics. Per mitjà de la posada en pràctica de coneixements aplicats, recollits en les àrees d'Enginyeria Elèctrica i Enginyeria Mecànica, s'ha generat una gran quantitat d'aparells que s'han introduït en el nostre entorn immediat, proporcionant-nos una utilitat però sobretot donant-nos una major qualitat de vida. El conegut lema *tot elèctric* n'és un bon exemple.

La col·laboració entre la mecànica i l'electricitat permet satisfer la creixent demanda d'energia i força motriu en l'àmbit industrial, en el domèstic o en el de l'oci. Les transformacions entre diverses manifestacions de l'energia (corrent elèctric i els canvis de forma en la seva presentació: moviment, sensors, actuadors...) en són un clar exponent.

Avui en dia, malgrat que els objectius tradicionals de l'EEM segueixen essent vigents, es posa l'èmfasi en els criteris de màxima eficiència energètica, fiabilitat, respecte per l'entorn i reducció de despeses. És des d'aquest punt de vista que s'ha d'entendre l'amplia definició que actualment es confereix al terme *màquina elèctrica*. La incorporació dels dispositius electrònics s'ha realitzat en dues etapes, primer amb l'arribada dels dispositius de potència i després amb l'utilització de sistemes electrònics de regulació i control.

En un primer moment es milloraren els interruptors d'estat sòlid (tecnologies híbrides Efecte de Camp-Bipolars, creixement de la freqüència de treball, disminució de pèrdues en commutació, increment de les potències en joc...) i posteriorment els sistemes de control s'han anat sofisticant (alta densitat d'integració, ASIC, CPLD's, FPGA,  $\mu$ Controladors, DSP's, ...).

S'ha passat d'una transformació energètica realitzada exclusivament a partir d'estructures electromagnètiques (ferro i coure) a un nou escenari, on segueix existint el ferro i el coure, però amb una participació cada vegada més gran del silici (entenen tan *Hardware* com *Software*), figura 1.1.

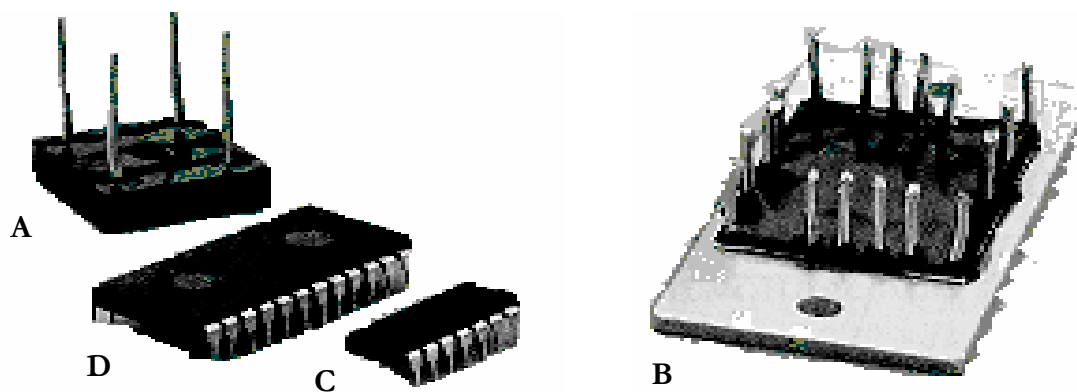


Figura 1.1. Participació del silici en els accionaments elèctrics (A: Pont d díodes rectificadors, BUS DC; B: Mòdul de transistors de Potència, configuració de l'estructura del convertidor; C: Circuits de govern dels transistors, Drivers; D: Circuit de control, ASIC, CPLD,  $\mu$ C, DSP ...).

El terme *Mecatrònica* és relativament recent i està molt lligat a l'automàtica. Introduït pels japonesos, suposa la penetració a gran escala de la tecnologia electrònica en el món dels accionaments de velocitat regulable i petita potència. La màquina elèctrica és l'element que proporciona la força motriu i fa possible aconseguir el canvis d'energia cinètica demanats. L'electrònica constitueix una segona interfície (la primera correspon al camp magnètic d'acoblament) entre la força motriu produïda i una font d'energia d'alt valor afegit: l'energia elèctrica. La col·laboració entre les tecnologies elèctrica, mecànica i electrònica ha fet possible la viabilitat tècnica de principis de funcionament ja coneguts però que fins ara no podien posar-se en pràctica (màquines de commutació electrònica: *brushless*, motor de reluctància autocommutat, figura 1.2). En aquestes l'estructura electromagnètica es simplifica a canvi de sofisticar l'alimentació i el control de la màquina.

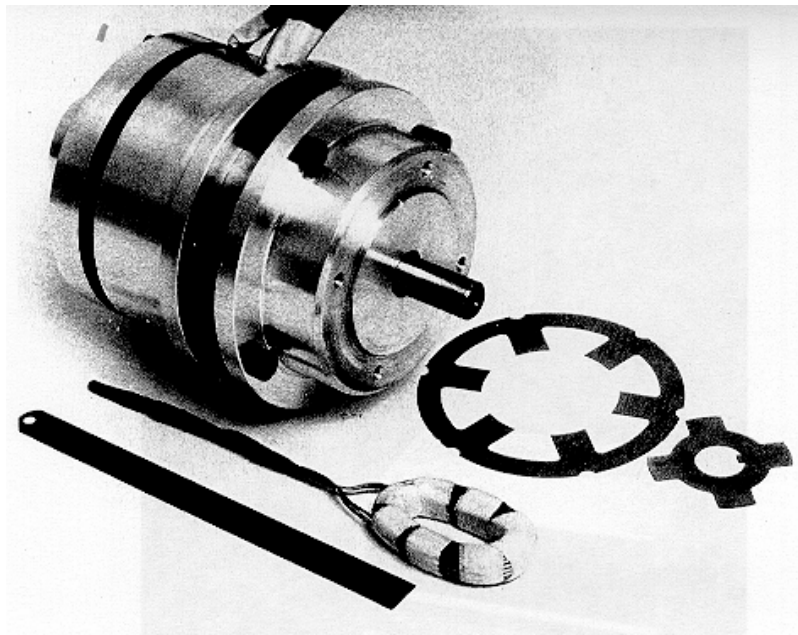


Figura 1.2. Motor de reluctància autocommutat (SRM), despeçament (T.J.E. Miller “Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motors”, Clarendon Press-Oxford, 1989)

## I.2. Accionaments elèctrics: Perspectiva.

L'elecció de l'accionament no és una tasca senzilla. Generalment es dona més d'una solució possible per a cada tipus d'aplicació. Atenent al criteri de la potència requerida, els accionaments es poden classificar en 3 grups:

- Segment de petita potència (menys de 1 kW).
- Segment de mitjana potència (entre 1 kW i 1 MW)
- Segment de gran potència (més de 1 MW).

L'objecte del treball es limita al segment d'accionaments de petita potència i tensió reduïda, sense entrar en el camp dels microaccionaments (magnètics, electrostàtics o piezoelèctrics).

Cada any es fabriquen centenars de milions de petits motors, de tipus electromagnètic, per ser utilitzats a la llar, al treball, dins l'automòbil... La seva potència sol ser molt inferior al kW, repartint-se en un gran ventall de possibilitats constructives. Les estructures electromagnètiques utilitzades, encara que nombroses, no han estat totalment explorades. Molts d'aquests motors funcionen sense alimentació electrònica i, per tant, la seva utilització està concebuda i limitada a una determinada font d'energia elèctrica. Ja sigui una xarxa elèctrica industrial de tensió alterna sinusoidal a freqüència fixa (110-240 V 50/60 Hz), una xarxa de corrent continu de tensió reduïda (fins 60 V) o alimentació des de bateria.

Diverses raons, entre elles l'adaptació de la font d'alimentació al tipus de consum o la necessitat de regular la velocitat de la màquina, han portat a la incorporació dels convertidors estàtics. La condició demanada és que el cost d'aquesta electrònica sigui baix.

Els criteris d'elecció d'un accionament, per a una aplicació específica, depenen de la potència, el marge de velocitats, el cost, les condicions ambientals de treball, la capacitat de dissipació de les pèrdues, i per descomptat, dels requeriments de la pròpia aplicació.

### **I.3. L'accionament elèctric: Generalitats.**

Les tres raons més importants a l'hora d'escollir entre un accionament de velocitat variable i un de velocitat constant són: l'estalvi energètic aconseguit, la millor adaptació a les necessitats de la càrrega i l'eliminació de sobresol·licitacions mecàniques i elèctriques (acceleració controlada) que poden causar estrès en les parts mecàniques i en els materials elèctrics i magnètics. Els accionaments de gran potència utilitzen els motors clàssics: corrent continu amb bobines d'excitació i commutació mecànica (tot i que cada vegada menys), motors d'inducció i màquines síncrones. La raó fonamental és l'òptim aprofitament dels materials constructius, l'alt rendiment i la constància del valor instantani del parell (absència de fluctuacions). En els accionaments de petita potència els requeriments de les càrregues són més variables. Els aspectes de rendiment i aprofitament dels materials són encara importants, però no tant com el rang de velocitat, la relació parell/inèrcia, el tipus de frenat...

Els dispositius emprats en l'alimentació de les màquines presenten també particularitats diferenciatives. Per grans potències (MW) només es disposa de tiristors i derivats<sup>1</sup>, sota commutació natural o forçada per la càrrega. En potències mitjanes (centenars de kW's) podem imposar<sup>2</sup> l'instant de commutació. Finalment per potències petites (fins a alguns kW's) el transistor d'efecte de camp i porta aïllada<sup>3</sup> és el més adequat, admetent freqüències de treball elevades<sup>4</sup>.

#### **A. Components**

L'accionament elèctric<sup>5</sup>, també anomenat sistema de control del moviment<sup>6</sup> o de la força motriu, consta de 4 parts diferenciades: convertidors estàtics per a modificar la forma de presentació de l'energia elèctrica<sup>7</sup>, motor, càrrega i control, figura 1.3.

---

<sup>1</sup> SCR, GTO.

<sup>2</sup> IGBT, Transistors Bipolars, transistors Darlingtón i variants dels tiristors (GTO i MCT,FCT).

<sup>3</sup> MOSFET

<sup>4</sup> Pulse Width Modulated converters

<sup>5</sup> *DRIVE*

El control de l'accionament tendeix a realitzar-se principalment amb tècniques digitals<sup>8</sup>. Una tendència actual en els petits accionaments és la integració de tots els components per disminuir despeses i augmentar la fiabilitat.

El mercat d'accionaments de velocitat variable elèctrics no deixa de créixer. Es preveu una forta disminució dels accionaments tradicionals de C.C. a favor dels de C.A., una forta disminució dels accionaments mecànics i un lleuger increment dels hidràulics, tal i com es reflexa en la Taula I-1 [VAS96]. Respecte als accionaments elèctrics de baix cost i petita potència [KEN91, VAS96] les previsions de creixement fetes el 1993 eren extraordinàries i mostraven una notable segmentació del mercat, Taula I-2.

Les últimes dades disponibles [DRU98] parlen d'un volum de mercat de prop de 10 milions d'accionaments (el 50% de petita potència i baix cost), on el 45% dels accionaments és de propòsit general, el 32% per servosistemes i el 23% correspon als accionaments d'altres prestacions. El mercat Europeu representa el 30% del total, seguit del Japonès (25%), el Nord-americà (23%), l'Asiàtic, excepte el Japó (13%) i la resta del món (9%). Les previsions actuals (1998) pel període 1998-2001 preveuen un creixement del mercat del 7% anual. El repartiment del mercat no variarà significativament.

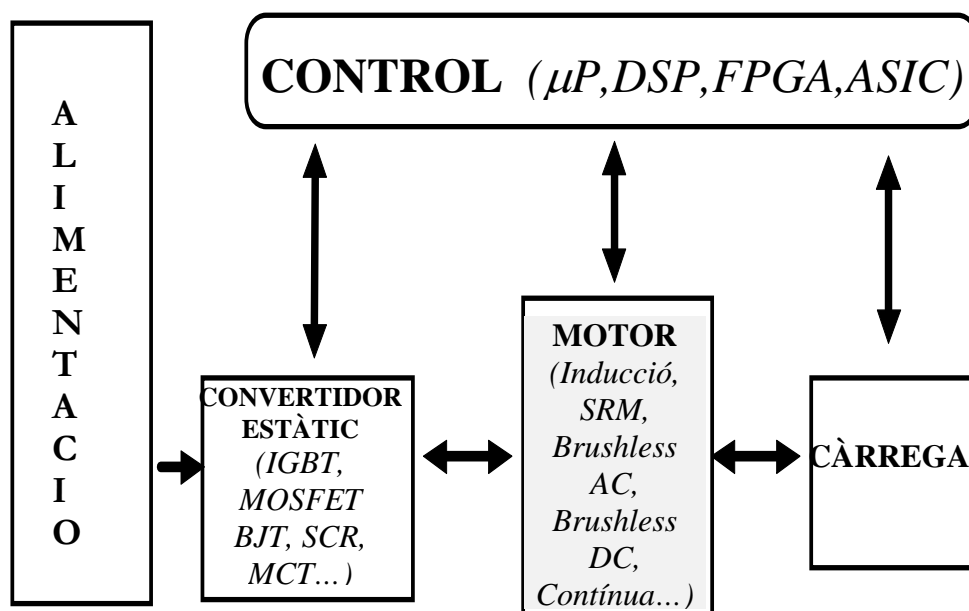


Figura 1.3. Diagrama de blocs d'un accionament elèctric.

	1995	2002	Variació (%)
Accionaments elèctrics de C.A.	50.9	67,8	+33
Accionaments elèctrics de C.C.	26.6	14,9	-56
Accionaments mecànics	13.9	7,6	-55
Accionaments hidràulics	8.6	9,7	+13

Taula I-1. Mercat Europeu d'accionaments de velocitat variable (Valor %). Període 1995-2002, font Frost & Sullivan (1996)

<sup>6</sup> Motion control system

<sup>7</sup> Power electrònic converter

<sup>8</sup> μC, μP, DSP, PLD (GA, FPGA...), ASCIC

	1993		1993-2000	
	Volum %	Valor %	Volum %	Valor (%)
Accionaments de C.C.	27	20	5	10
Servomotors	11	5	150	125
Motors d'inducció + Conv. freqüència	50	19	100	100
ACCIONAMENTS DE BAIX COST	6	20	120	75
ALTRES	6	2	30	15

Taula I-2. Valor i volum del mercat MUNDIAL d'accionaments elèctrics (Font Vas & Drury)

Cada tipus de càrrega requereix un rang de velocitat determinat i unes especificacions ben diferenciades. El control de la posició és molt més important que el control de la velocitat per algunes aplicacions en l'automatització de processos o en el cas dels perifèrics d'ordinador. En el camp de la robòtica i dels actuadors, convenen unes prestacions dinàmiques molt bones<sup>9</sup> que minimitzin el temps emprat entre canvis de càrrega o modes de treball. Pels accionaments de ventiladors o bombes el que interessa és un bon comportament en règim permanent.

## B. Requeriments

En la taula I-3. es resumeixen les característiques i requeriments desitjats en un accionament elèctric de qualsevol potència (no solen complir-se tots a l'hora).

CARACTERÍSTICA	REQUERIMENTS DESITJABLES
Normatives generals Internacionals/ Comunitàries	Total compliment
Parell (o potència)	Proporcionar-ne el màxim demanat de forma continuada
Sentits de gir	Funcionament en ambdós sentits
Frenat	Regeneratiu i/o dinàmic
Sobrecàrrega	Durant llarg temps
Alimentació	Universal (CC o CA de freqüència diversa)
Tipus de control	Velocitat, parell o. posició
Precisió del control	Màxima possible
Programabilitat	Admissible
Interfície	Amb altres equips de control o comunicació
Prestacions dinàmiques	(Elevat quocient parell/inèrcia, acceleració i desacceleració màximes necessàries)
Reductor de velocitat	Absència ( <i>Direct Drive</i> )
Protecció	Mecànica i electrònica
Nivell de soroll	El mínim possible
Radiació electromagnètica conduïda o generada (EMI)	Compliment de totes les normatives
Nivell d'harmònics	Baix, tan en el convertidor com en el motor
Manteniment	Mínim, fàcil i econòmic
Ambient	Capacitat per a treballar en ambients hostils (alta temperatura, elevada humitat, atmosferes explosives...)

Taula I-3. Requeriments desitjables en els accionaments.

<sup>9</sup> Quocient parell/moment d'inèrcia elevat.

En el cas d'accionaments de petita potència prima sobre tot el baix cost. Altres aspectes importants són l'absència de manteniment, el funcionament no sorollós, un rendiment acceptable i un volum petit.

### C. Contribució de les noves tecnologies

Nombroses tecnologies aparegudes a finals d'aquest segle han influït en el comportament dels accionaments elèctrics. Les més importants són l'electrònica digital, els circuits integrats de potència, els semiconductors de potència, els nous materials magnètics i les eines de disseny CAE<sup>10</sup> per a anàlisi electromagnètic<sup>11</sup> (càlcul numèric, elements finits).

També podem considerar contribucions diverses com la dels nous materials plàstics, sensors de tensió o corrent (integrats dins el mateix interruptor de potència en alguns casos), sensors optoelectrònics o d'efecte Hall, transductors molt precisos de velocitat i posició simultànies (resolver), noves estructures de convertidors (minimització del nombre d'interruptors i del circuit de control).

### D. Condicionaments introduïts pels tipus de motors

El procés d'elecció del tipus de motor és cada vegada més complex. L'aparició de nous materials i components, així com la posada en pràctica d'idees innovadores, complica la selecció. La resposta a la pregunta quin és el motor adequat per a una determinada aplicació, no és tan fàcil de respondre com fa alguns anys. Llavors la tria era simple: motors de corrent continu per accionaments de velocitat variable i motors de corrent altern asíncrons per velocitat constant (figura 1.4).

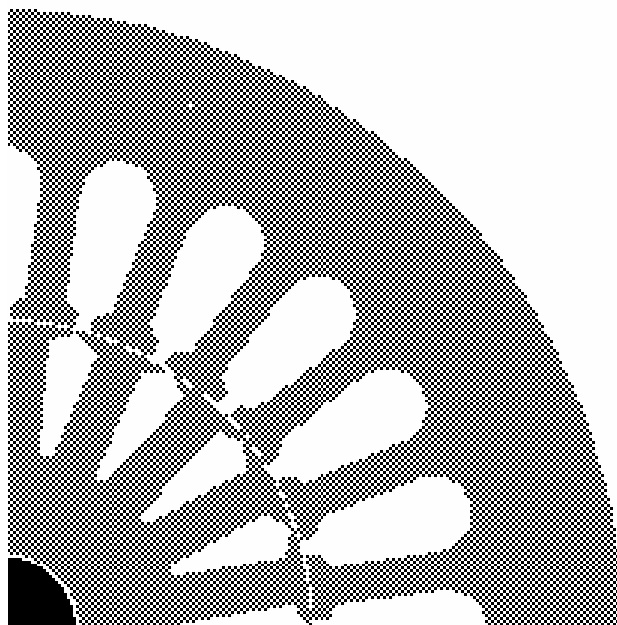


Figura 1.4. ¼ Motor de corrent altern asíncron (o d'inducció)

<sup>10</sup> *Computed Aided Engineering*

<sup>11</sup> F.E.A. (*Field Electromagnetic Analysis*)

Cal insistir en que és el motor el que determina les característiques de l'accionament i els requeriments tan del convertidor estàtic (tipus de dispositius de potència i forma de treball) com del control. Els motors actuals es poden classificar en dos grans blocs, els considerats *tradicionals* i els incorporats últimament o *no convencionals*.

Els motors tradicionals (clàssics) són motors que generen un parell instantani quasi constant (absència d'arissat), utilitzen directament la tensió alterna sinusoïdal de la xarxa elèctrica o una tensió contínua (alterna rectificada o provenint d'un acumulador electroquímic), podent arrancar sense necessitat d'electrònica addicional. Els motors no convencionals s'utilitzen per a propòsits específics, no són d'utilització general com els clàssics. Fins fa pocs anys no s'han començat a fabricar en grans quantitats. Les innovacions introduïdes per aquests parteixen dels motors amb excitació desacoblada (motor de contínua i motor síncron) i es succeeixen en dues etapes.

En un primer moment l'objectiu es la substitució dels debanaments d'excitació (recorreguts per corrent continu) per imants permanents. És el cas del motor de corrent continu amb col·lector i imants permanents en estator (figura 1.5).

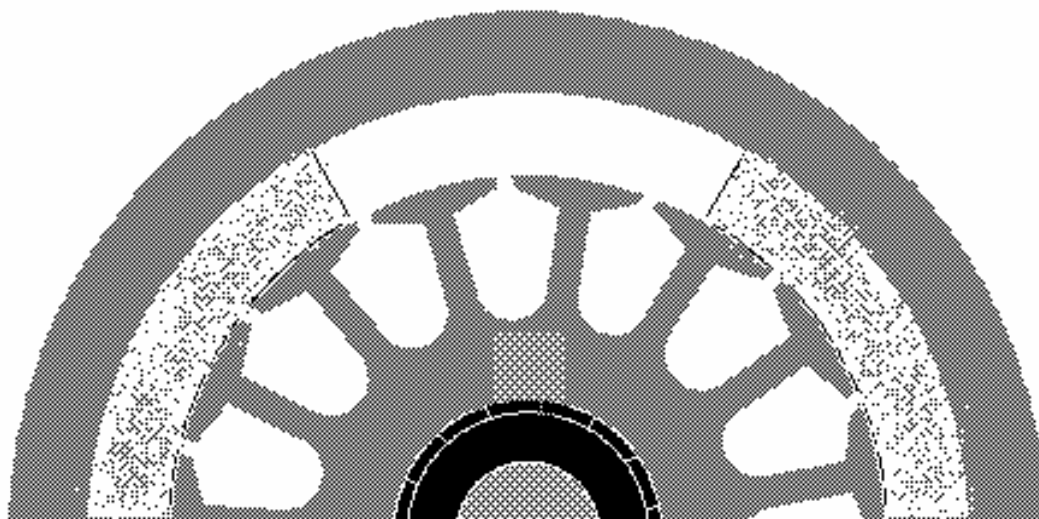


Figura 1.5.  $\frac{1}{2}$  Motor de corrent continu amb excitació a base de imants permanents.

La segona etapa incorpora la transformació del col·lector, passant d'una versió mecànica a una versió electrònica, fet que representa el naixement dels motors sense escobretes<sup>12</sup>, també anomenats màquines de commutació electrònica.

El motor de corrent continu ha estat el motor tradicional dels accionaments de velocitat. La tendència a buscar-li un substitut es deguda fonamentalment als problemes generats pel commutador mecànic. Aquest no és l'únic inconvenient<sup>13</sup> que s'argumenta, però és ben cert que les escobretes i el col·lector de delgues són una font de paràsits (emissió electromagnètica) i d'avaries (manteniment).

<sup>12</sup> *Brushless*

<sup>13</sup> El cost i el manteniment són també poc favorables

El ràpid desenvolupament dels MCE s'entén per la considerable disminució de despeses dels dispositius de potència i dels sistemes de control en els últims anys [MUL94], fet que ha permès vèncer el tòpic inconvenient de precisar una electrònica més complexa. Una màquina amb commutació electrònica agrupa un conjunt de blocs profundament interrelacionats que s'han de tractar com un de sol.

Entenem per commutació la inversió del sentit del corrent en la bobina de l'induït adient en tot moment. La màquina clàssica de corrent continu utilitza uns contactes lliscants (col·lector de delgues i escombretes) per aconseguir-ho, detectant (independentment de la posició del rotor) la bobina que ha de commutar en cada instant.

Per obtenir el parell màxim cal que la bobina a commutar sigui aquella que en aquest instant està en quadratura amb el flux creat per l'excitació. La commutació per contactes lliscants imposa, però restriccions al motor de C.C. Les restriccions de caire dimensional limiten la F.E.M. de reactància, la tensió entre delgues, la velocitat tangencial del col·lector i l'amplada de les delgues. Tot plegat es tradueix en una limitació de la potència, tensió i velocitat de la màquina. Les restriccions funcionals afecten a la seguretat i a la fiabilitat: el motor de C.C. no pot treballar directament en atmosferes explosives ni corrosives i necessita manteniment permanent.

Sempre ha existit un gran interès per substituir els contactes lliscants per un dispositiu que realitzés les funcions de commutació i detecció sense els inconvenients exposats [AND91a]. En les MCE la funció de commutació es realitza substituint les delgues per interruptors estàtics<sup>14</sup> governats per sensors de posició rotòrica. La funció de detecció permet escollir l'instant adequat per obtenir el màxim parell per unitat de corrent. L'absència del col·lector mecànic possibilita l'elecció d'estator com a circuit de potència. El rotor no s'escalfa tant, i estant alliberat del col·lector, pot girar a altes velocitats.

En el cas de que les formes d'ona de la f.e.m. i del corrent sigui trapezoïdal és parlarà de motors de C.C. sense escombretes o Brushless DC. Si les formes d'ona de la f.e.m. i del corrent són sinusoidals és parlarà d'un motor Síncron amb imants permanents o Brushless AC [AND91b], figura 1.6. Prescindint dels imants i amb una forma constructiva que optimitza la relació d'inductàncies s'aconsegueix el motor síncron de reluctància. Recentment s'ha donat a conèixer una nova forma constructiva d'aquest motor que augmenta encara més el quocient d'inductàncies (figura 1.7.), es tracte del motor tipus ALA (rotor laminat axialment).

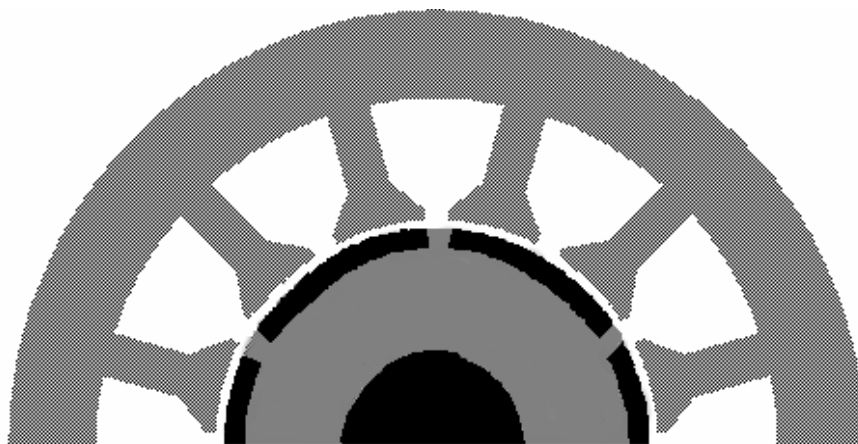


Figura 1.6. ½ Motor síncron amb imants exteriors.

<sup>14</sup> En base a transistors.



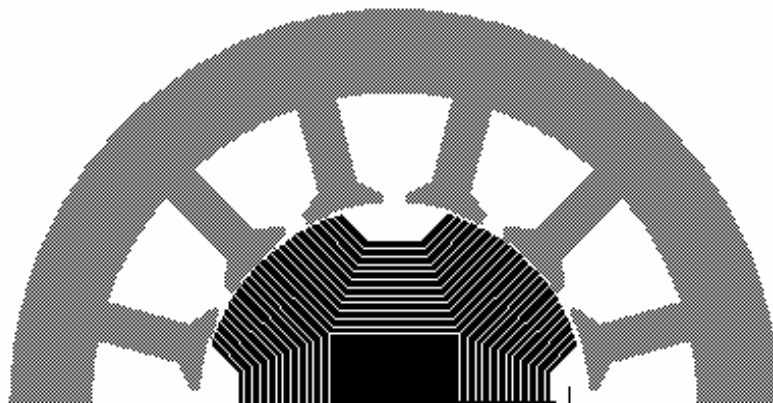


Figura 1.7.  $\frac{1}{2}$  Motor síncron de reluctància amb laminació axial (ALA). 4 pols

En aquesta segona etapa mereix una especial atenció el motor de reluctància autocommutat (SRM) amb pols sortints a l'estator, sobre els que es disposen bobines concentrades, que connectades entre si a parelles diametralment oposades, formen les fases del motor; i pols sortints, també, en el rotor. L'alimentació de les fases d'aquest motor es fa per polsos de tensió constant que són commutats segons la posició rotòrica i el tipus de control. Figura 1.8.

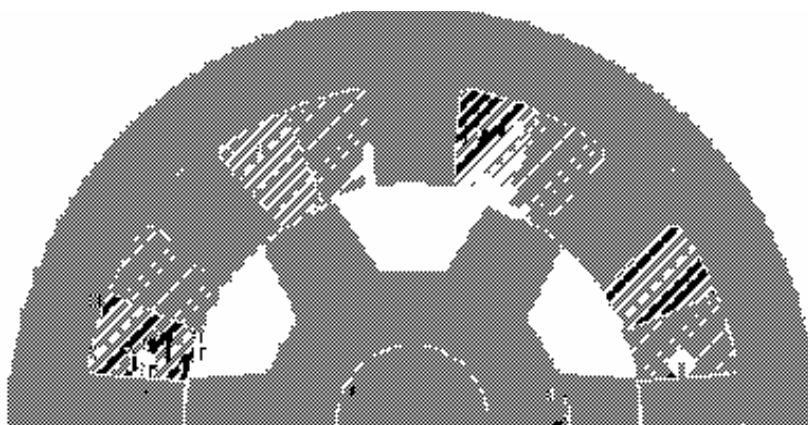


Figura 1.8.  $\frac{1}{2}$  Motor de reluctància autocommutat (SRM) de 4 fases.

El motor d'inducció o asíncron no ha sofert cap transformació morfològica des de la seva concepció a finals del segle passat. De per sí mateix és ja un motor sense escobretes. Actualment els avenços en materials elèctrics, magnètics, electrònica de potència i processadors digitals de senyal (DSP) han fet possible la seva utilització com a accionament de velocitat variable, superant la dificultat de control inherent a l'acoblament entre rotor i estator.

Els nous tipus de control disponibles per aquesta màquina (control vectorial) han millorat molt el seu comportament dinàmic. Fet que, junt amb la seva senzilla construcció i manteniment pràcticament nul fa que avui sigui l'accionament de velocitat per excel·lència en l'entorn industrial.

## I.4. Accionaments elèctrics per aplicacions de petita potència i tensions reduïdes.

Els accionaments de petita potència ( $< 1\text{kW}$ ) no formen una família homogènia, [ALL92]. Aquests presenten moltes diferències, com es pot observar en la figura 1.9., segons el tipus de forma constructiva i alimentació requerida. Els accionaments elèctrics de petita potència són principalment de tipus electromagnètic. Els accionaments piezoelèctrics presenten darrerament, però un desenvolupament considerable. La seva principal aplicació es troba en la motorització de teleobjectius (equipaments àudio-vídeo: autofocus) doncs treballen a molt baixa velocitat ( $100\text{ min}^{-1}$ ) i en absència d'alimentació presenten un parell de fre intrínsec.

En les aplicacions de potència reduïda la presència de Circuits Integrats d'aplicació específica (ASIC's) és cada vegada més habitual, integrant en un mateix xip el control i els dispositius de potència. Els CP's s'utilitzen per a controlar motors de corrent continu sense escobretes, motors pas a pas o motors de corrent continu amb col·lector.

En el rang de potència de menys de  $50\text{ W}$  i de tensions fins a  $60\text{ V}$ , que és el segment objecte d'aquest treball, els accionaments generalment utilitzats són els motors de C.C. convencionals excitats amb imants permanents i, cada cop més, els motors de C.C. sense escobretes [MOU92].

Hi ha moltes aplicacions que requereixen petites potències i tensions reduïdes, en els marges abans citats en sectors tan diversos com l'auxiliar de l'automòbil, ventiladors, equips electrònics, petits electrodomèstics, etc.

En aquest treball es proposarà el motor de reluctància autocommutat com una alternativa a les solucions convencionalment acceptades.

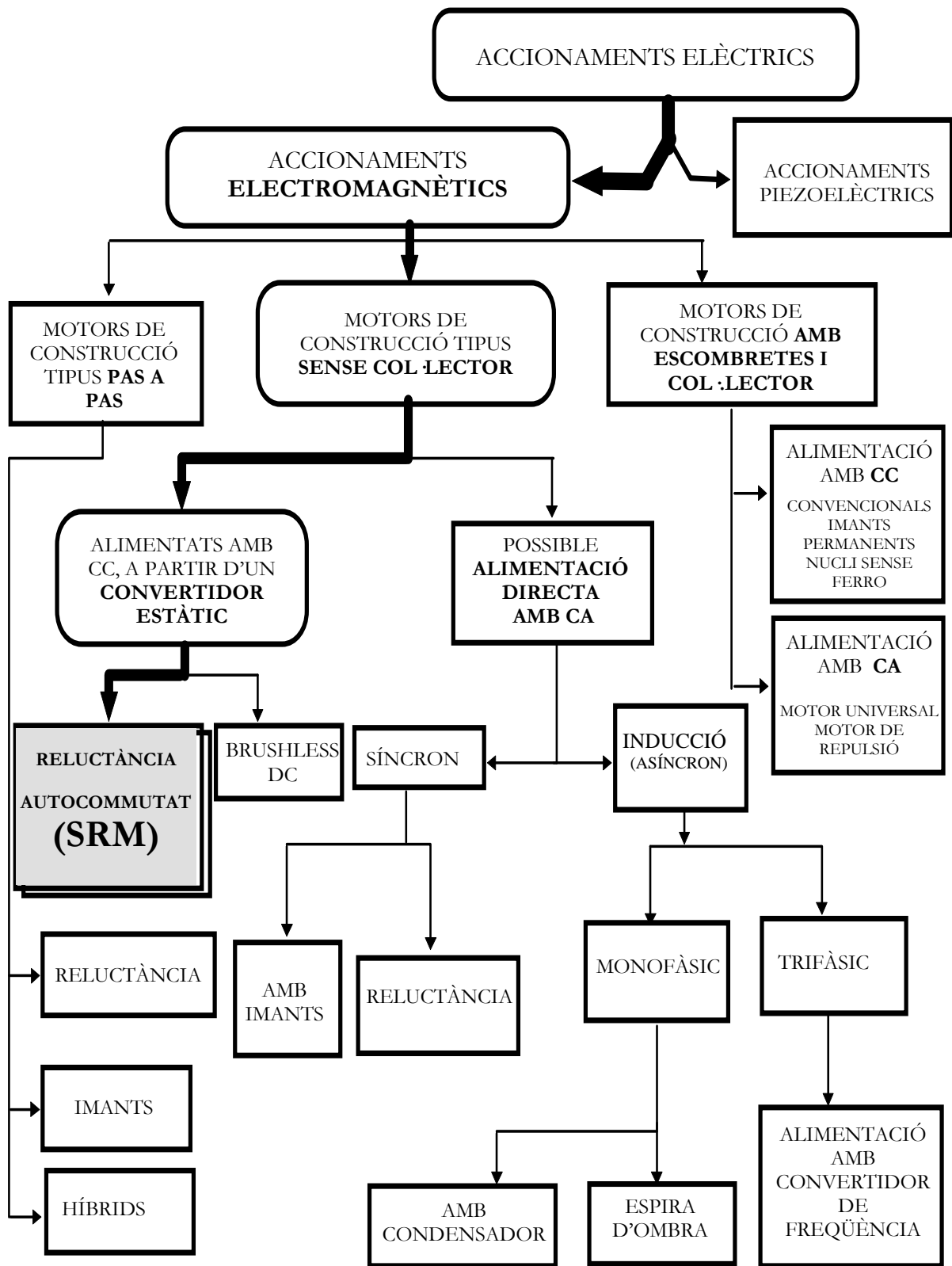


Figura 1.9. Classificació dels accionaments elèctrics de petita potència (< 1kW).

## Referències.

- [ALL92] Q. ALLANO. “Petits moteurs électriques”. Techniques de l’Ingenieur, D3 720.
- [AND91a] P. ANDRADA, R. CAUMONS, E. MARTINEZ. “Máquinas de corriente continua sin escobillas”. Thecknos N° 122, pp. 11-18, 1991.
- [AND91b] P. ANDRADA, J. PERAT, M. TORRENT, R. CAUMONS, E. MARTINEZ. “Accionamientos síncronos autopilotados, excitados con imanes permanentes”. Automatización integrada. Revista de robótica. N° 64, pp. 68-72, Diciembre 1991.
- [DRU98] W. DRURY. “The Variable Speed Drives Market. Past, present and a view on the future”. ICEM 98, Istambul, pp. 1-8.
- [KEN91] T. KENJO, “Electric motors and their controls”, Oxford University Press 1991, capítulos 1 i 6. Appendix II: History of motor science.
- [MOU92] MOULINEX. “Motor de CC: sin escobillas para accionamiento de ventiladores”. Estudi intern (no publicat), Abril 1992.
- [MUL94] B. MULTON, “Nouvelles possibilités avec les moteus à alimentation électronique”. RGE N° 1/94, Janvier 1994
- [VAS96] P. VAS, W. DRURY, “Future of electrical machines and drives”, ICEM 96, Vigo, pp. 491-496.