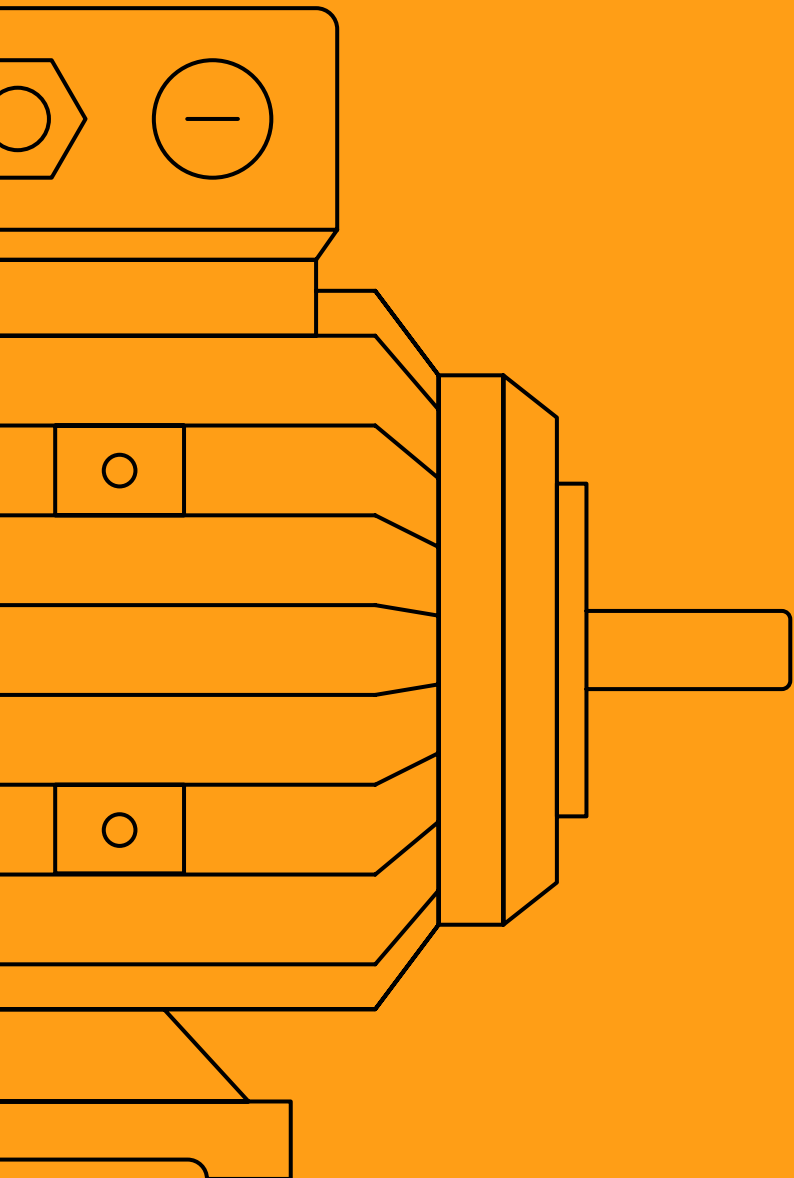
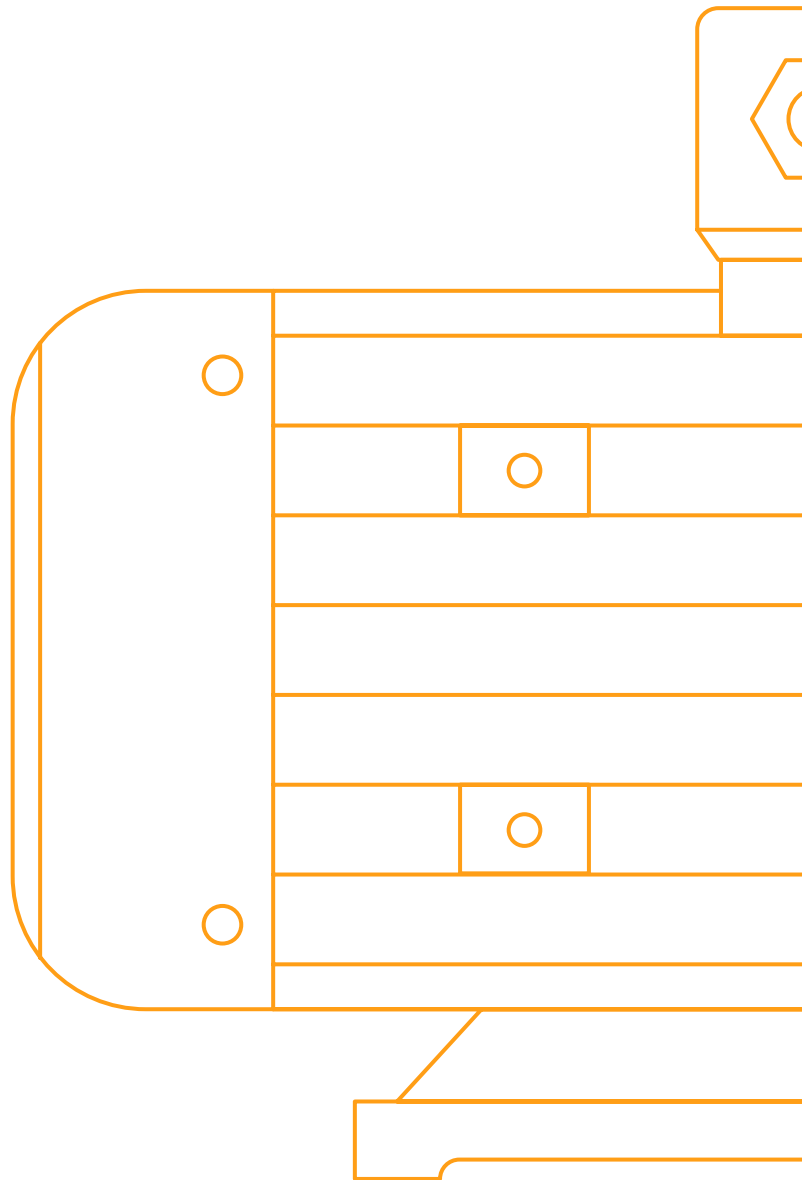


COL·LECCIÓ
BALANÇ ENERGÈTIC
D'EQUIPS CONSUMIDORS
MESURA I CÀLCUL

MOTOR
ELÈCTRIC

03

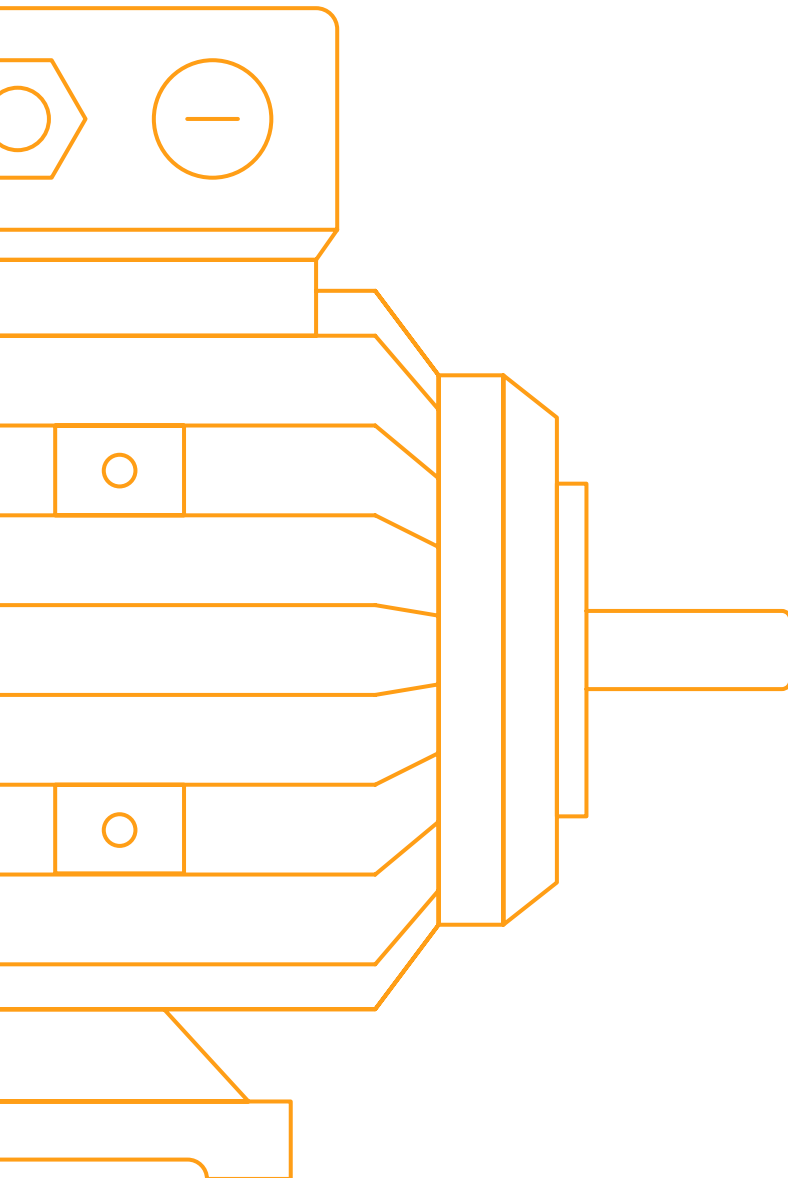




COL·LECCIÓ
BALANÇ ENERGÈTIC
D'EQUIPS CONSUMIDORS
MESURA I CÀLCUL

MOTOR
ELÈCTRIC

03



Primera edició

Juliol de 2016

Autors

Aquesta col·lecció ha estat redactada per la Universitat Politècnica de Catalunya. Daniel Garcia-Almiñana i Lluïsa F. Cabeza.

Coordinació del document

Mariona Coll - Institut Català d'Energia

Revisor del document

Josep M^a Granollers - Institut Català d'Energia

Disseny

Eva Sánchez - Institut Català d'Energia

Maquetació

OXIGEN Comunicació gràfica

Versió electrònica

icaen.gencat.cat/balancenergetic



Aquesta obra està subjecta a una llicència Reconeixement-No Comercial-SenseObres Derivades 3.0 de Creative Commons. Se'n permet la còpia, distribució i comunicació pública sempre que se'n citi la font (Institut Català d'Energia) i l'ús concret no inclogui finalitat comercial. S'ha d'informar sobre les condicions sota les que aquest treball pot ser distribuït o comunicat. Tampoc no se'n poden fer obres derivades.

Per veure'n una còpia, visiteu:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/deed.ca>

Índex

0	Pròleg	7
1	Introducció	9
1.1	Justificació del mòdul	9
1.2	Objectiu del mòdul	9
1.3	Abast del mòdul	9
1.4	Dades macroenergètiques	10
2	Descripció del sistema	10
2.1	Definició	10
2.2	Principis de funcionament i paràmetres	11
2.3	Tipologies d'equip	11
2.4	Normativa aplicable	12
2.5	Descripció gràfica	14
3	Definició del balanç energètic	15
3.1	Descripció del balanç energètic	15
3.2	Esquema del balanç energètic	16
4	Bases de càlcul	17
4.1	Formulació	17
4.2	Taules i diagrames	19
5	Planificació de mesures	19
5.1	Dades de què es disposa	19
5.2	Dades a mesurar	19
5.3	Inventari d'aparells de mesura	19
5.4	Seguretat en persones i equips	20
6	Realització de les mesures	21
6.1	Mesura de la velocitat d'angular de l'eix/rotor	21
6.2	Mesura de voltatge, intensitat i factor de potència	21
7	Exemple pràctic	23
7.1	Enunciat	23
7.2	Dades	23
7.3	Càlculs i resultat	24
7.4	Comentaris	25
8	Referències	26

0. Pròleg

La Generalitat de Catalunya va aprovar el 9 d'octubre de 2012 el Pla de l'energia i canvi climàtic de Catalunya 2012-2020 (Pecac 2020), que serveix com a guia per a les polítiques energètiques i de mitigació del canvi climàtic a Catalunya. Un dels eixos principals del pla és promoure i desenvolupar projectes d'estalvi energètic i energies renovables. Les polítiques d'estalvi i eficiència energètica es configuren com un instrument de progrés de la societat, perquè contribueixen al benestar de la població, representen un element de responsabilitat social, projecten les activitats humanes cap al desenvolupament sostenible i estableixen un marc per al desenvolupament de la competitivitat empresarial.

Les auditories energètiques són una peça clau per identificar les oportunitats i potenciar les inversions en projectes d'estalvi energètic i energies renovables. Una auditoria energètica de qualitat aporta la informació necessària a un centre consumidor d'energia, ja sigui un edifici, una indústria o una flota de transport, per tal d'establir un full de ruta amb una estratègia de millora contínua del seu consum energètic.

En aquest sentit, el novembre de 2012 l'Institut Català d'Energia (ICAEN) va publicar la *Guia metodològica per a realitzar auditories energètiques*, on es ressalta el seu paper clau, sempre que es facin de manera meticulosa. El factor de més pes per determinar la qualitat de l'auditoria és l'obtenció del nombre superior possible de dades mesurades al camp de treball.

Arran d'aquella guia, i de la resposta que va tenir entre els professionals, l'Icaen va detectar que calia complementar la guia amb la formació necessària per fer mesures de camp amb instruments portàtils, i posteriorment conèixer el balanç energètic dels sistemes en estudi. També calia dotar els destinataris d'un cert criteri en la interpretació dels valors obtinguts en les mesures amb els instruments portàtils.

D'aquí neix aquesta publicació, pensada com una col·lecció de mòduls amb una estructura similar. En primer lloc, es justifica l'elecció d'aquell equip i la seva importància en l'àmbit macroeconòmic. Després es descriu i delimita el sistema objecte del balanç energètic i la normativa que se li aplica. A partir d'aquí, es defineix el balanç energètic i tots els càlculs necessaris, fórmula a fórmula, amb les taules i diagrames de bibliografia que calguin. Finalment, es detalla la planificació de les mesures, les característiques dels instruments mesuradors i les mesures mateixes, pas a pas. Per últim, s'inclou l'aplicació de la metodologia del mòdul a un cas concret o dos, i es comenta la fiabilitat dels resultats obtinguts.

Val a dir que aquest càlcul és necessari en l'avaluació o diagnòstic que es porta a terme en una auditoria, però també pot formar part del protocol de manteniment d'una instal·lació, i per tant aquestes mesures de camp poden caldre amb certa periodicitat. És per això que aquesta col·lecció s'adreça tant als professionals del sector de la consultoria energètica com als responsables energètics dels centres consumidors d'energia.

El mòdul que ara us presentem és el tercer d'aquesta col·lecció que pren com a sistema d'estudi el motor elèctric. El balanç energètic, caracteritza els fluxos d'entrada i sortida del motor, per obtenir en un càlcul posterior, el rendiment que compara la potència elèctrica lliurada amb la potència mecànica útil del motor.

1. Introducció

1.1. Justificació del mòdul

Des de l'aparició de la màquina de vapor les màquines han anat augmentant el seu protagonisme en la indústria, en la vida quotidiana i en altres sectors, fins que actualment constitueixen un element imprescindible per a la realització de la majoria d'activitats. Són molts els tipus de màquines i dispositius que incorporen màquines elèctriques per al seu funcionament. Destaquen els motors elèctrics (molt freqüents en la indústria) i que es poden trobar en aplicacions com bombes hidràuliques, compressors, ventiladors, ascensors, elevadors, centrifugadores, cremadors, generadors, etc.

L'eficiència global dels motors elèctrics va molt lligada a les condicions d'operació d'aquest, és a dir, amb el tipus de càrrega i dispositiu amb què treballa. Altres factors a tenir en compte són el dimensionament del motor, el tipus de subministrament elèctric (sobretot pel que fa a potència reactiva), els sistemes de control i regulació del parell motor o de la velocitat angular, el tipus de transmissions que s'utilitzen per transferir el moviment del motor, l'eficiència energètica de dispositius i accessoris i el manteniment realitzat sobre el motor.

Tal com se cita en l'Estudi de les millors tecnologies disponibles en consum d'energia referents a motors elèctrics i accionament [1], "la importància dels motors en el consum global d'energia elèctrica a Catalunya i a Europa i la seva gran diversitat d'aplicacions els converteix en un factor a tenir molt en compte per reduir despeses de producció".

És per això que és necessari la realització d'un balanç energètic en motors elèctrics per tal d'avaluar-ne l'eficiència energètica i detectar si hi ha algun problema que podria ocasionar pèrdues energètiques que no sols augmenten les despeses de producció sinó també les despeses relacionades amb el medi ambient.

1.2. Objectiu del mòdul

L'objectiu d'aquest mòdul és proporcionar una metodologia i unes bases de càlcul per poder realitzar mesures en motors elèctrics per tal de caracteritzar el balanç energètic d'aquests i, en un càlcul posterior, el seu rendiment energètic.

1.3. Abast del mòdul

Aquest mòdul se centra bàsicament en els motors de corrent altern asíncrons. En l'apartat 2.3, es mostren els diferents motors elèctrics més utilitzats actualment segons la classificació anterior.

1.4. Dades macroenergètiques

En l' *Estudi de les millors tecnologies disponibles en consum d'energia referents a motors elèctrics i accionaments*, s'exposa que segons els principals fabricants mundials de tecnologies electrotècniques per a sistemes elèctrics i automatització de processos industrials, el 65% de l'electricitat que consumeix la indústria mundial és utilitzada pels motors elèctrics.

2. Descripció del sistema

2.1. Definició

Un motor elèctric és una màquina elèctrica rotativa que transforma l'energia elèctrica en energia mecànica. Un motor elèctric també pot funcionar com a generador, ja que el funcionament d'aquests és reversible.

Existeixen diferents tipologies de motors elèctrics, però en general un motor elèctric es pot considerar com una carcassa tancada a l'interior de la qual s'incorporen els dispositius necessaris que possibiliten la transformació d'energia elèctrica en energia mecànica. Aquests dispositius bàsicament són l'estator i el rotor. L'estator correspon a la part fixa del motor, juntament amb la carcassa, i està constituït per una corona de xapes ferromagnètiques ranurades per l'interior, per on passa un bobinat i on es disposen un nombre parell de sortints anomenats pols. Les fases del bobinat de l'estator coincideixen amb les de la xarxa elèctrica. L'altre element a destacar és el rotor, que correspon a la part mòbil del motor i està situat a l'interior de l'estator. El rotor bàsicament està format per una corona de xapes ferromagnètiques solidàries a l'eix del motor, les quals presenten una sèrie de ranures on s'allotja un altre bobinat.

Per altra banda, en un motor elèctric, hi poden haver altres dispositius com el sistema de connexió de les bobines de l'estator a la xarxa elèctrica, elements de suport com rodaments i coixinets, condensadors per disminuir la tensió d'encesa del motor, els dispositius d'activació del motor i el sistema de refrigeració, entre altres.

Tal com ja s'ha comentat, els motors elèctrics són els accionaments més freqüents en la indústria, ja que poden satisfer un gran nombre de necessitats motrius de les màquines: des d'arrancar-les, suportar i aturar càrregues, etc. A més a més, respecte a altres motors com poden ser els de combustió, els motors elèctrics, per la mateixa potència de sortida, presenten una grandària més reduïda, subministren un parell motor molt més elevat, tenen més facilitat en la regulació i el control de la velocitat i el parell, més eficiència energètica, més seguretat i més facilitat de manteniment.

2.2. Principis de funcionament i paràmetres

El funcionament d'un motor elèctric es basa en el principi de la inducció electromagnètica.

En primer lloc, el corrent elèctric proporcionat al motor origina un camp magnètic giratori a les xapes ferromagnètiques de l'estator. Al mateix temps aquest camp magnètic envolta el rotor i n'indueix un corrent sobre el bobinat d'aquest. Posteriorment, pel fet d'originar un corrent en el rotor, es crea un altre camp magnètic de polaritat oposada al camp magnètic de l'estator. Com que el camp magnètic de l'estator i el del rotor tenen polaritat oposada, s'origina una repulsió entre aquests que provoca el moviment de rotació del rotor, el qual intenta assolir la velocitat de rotació del camp magnètic de l'estator, és a dir, la velocitat de sincronisme. La diferència entre la velocitat de sincronisme i la del rotor s'anomena lliscament i està referenciat respecte a la velocitat de sincronisme.

Finalment, cal dir que l'eix és solidari al rotor i n'obté el mateix moviment proporcionant la velocitat requerida pel dispositiu connectat al motor.

Un cop es coneixen els principis de funcionament dels motors elèctrics, ja se'n pot determinar l'eficiència. Per fer-ho, en aquest mòdul es referencien dos mètodes.

El primer mètode consisteix a relacionar la potència mecànica útil del motor amb la potència elèctrica consumida. Cal dir que aquest mètode prové de la realització del balanç energètic en el motor i es basa en el parell d'aquest. Per tant, els paràmetres necessaris per calcular l'eficiència, segons aquest mètode, són el parell motor, la velocitat angular del rotor i la potència elèctrica subministrada a l'estator.

El segon mètode consisteix, sense calcular l'eficiència, a avaluar el lliscament dels motors, partint de la velocitat de sincronisme i tenint en compte que aquest ha de ser el més baix possible per tal de confirmar que el motor està operant correctament. Per aquest mètode, els paràmetres necessaris són les velocitats angulars de l'estator i el rotor quan el motor opera amb règim estacionari.

Finalment cal dir que el segon mètode és molt més fàcil d'aplicar perquè en el primer mètode es presenta la dificultat de la mesura del parell i es requereix un mesurador de parell. De tota manera, es pot obtenir una aproximació si es disposa de les corbes de parell proporcionades pel fabricant del motor.

2.3. Tipologies d'equip

Tal com s'ha referenciat a l'apartat 1.3, els motors que es tracten en aquest mòdul bàsicament són els motors de corrent alterna asíncrons que, alhora, són els més usats en la indústria.

En l'àmbit dels motors asíncrons, se'n destaquen dues tipologies: els motors de gàbia d'esquirol i els motors de rotor bobinat.

Motors asíncrons de gàbia d'esquirol. En aquest tipus de motors, el bobinat del rotor està constituït per unes barres de coure o d'alumini que se situen en les ranures de la corona rotòrica. Aquestes barres, a la vegada, estan unides a uns anells del mateix material en els seus extrems, i d'aquí ve el nom d'aquest tipus de motors ja que les barres i els anells configuren una geometria semblant a una gàbia d'esquirol. Les bobines de l'estator poden estar connectades en estrella o triangle en el cas que es tracti d'un motor trifàsic. Els motors de gàbia d'esquirol proporcionen un parell relativament petit i la intensitat d'arrencada és força elevada.

Motors asíncrons de rotor bobinat. En general un motor de rotor bobinat posseeix un grup complet de bobinats en el rotor que en certa manera constitueixen la imatge del bobinat de l'estator. Si es tracta de motors trifàsics, normalment les fases del bobinat del rotor estan connectades en estrella i en els extrems dels tres fils del bobinat s'acoblen uns anells lliscants que giren solidàriament amb l'eix del motor. Aquests anells estan curtcircuitats a través d'unes lamel·les fixes respecte a l'estator i muntades en els mateixos anells, les quals permeten la connexió del rotor amb l'exterior (col·lector). Per tant, en aquest tipus de motors es poden destacar tres parts: el nucli del motor, les bobines i el col·lector.

Amb aquest tipus de motor s'obtenen parells elevats, menys intensitat de corrent en l'arrencada i més facilitat per controlar la velocitat de gir mitjançant l'ús de resistències elèctriques en el circuit del rotor. Però per altra banda, constructivament és molt més complex que el de gàbia d'esquirol, és menys robust, és més costós i requereix molt més manteniment a causa del desgast associat a les lamel·les i als anells lliscants. Per aquests darrers motius, els motors de rotor bobinat s'utilitzen menys que els de gàbia d'esquirol.

2.4. Normativa aplicable

La normativa aplicable en aquest mòdul bàsicament és el Reglament d'instal·lacions tèrmiques als edificis (RITE) de setembre del 2013 [2], el Reglament Electrotècnic per a Baixa Tensió (REBT) [3] i les normes internacionals IEC60034-2-1 [4] i IEC60034-30 [5]. També aplica el Reial decret 187/2011 [6], corresponent a la transposició espanyola de la Directiva d'ecodisseny 2009/125/CE [7].

Al RITE, concretament al segon punt de l'apartat IT 1.2.4.2.6 *Eficiència energètica de los motores eléctricos*, s'exposa que els rendiments mínims dels motors elèctrics s'establiran en el reglament (CE) núm. 640/2009 de la Comissió, de 22 de juliol de 2009, pel qual s'aplica la Directiva 2005/32/CE del Parlament Europeu i del Consell pel que fa als requisits de disseny ecològic per als motors elèctrics.

En l'apartat 3, s'esmenta que queden exclosos els motors per ambients especials, encapsats, no ventilats, motors directament acoblats a bombes, submergibles, de compressors hermètics i d'altres.

A l'apartat 4 s'esmenta que l'eficiència s'haurà de mesurar d'acord amb la norma UNE-EN 60034-2.

En instal·lacions tèrmiques on s'utilitzen motors elèctrics de gàbia d'esquirol trifàsics amb protecció IP 54 o IP 55, de 2 o 6 pols i de disseny estàndard de 1,1 a 90 kW de potència, els rendiments mínims exigits per aquest tipus de motors seran els que s'exposen en la Taula 3.1. (RITE 2007).

kW	1,1	1,5	2,2	3,0	4,0	5,5	7,5	11	15
%	76,2	78,5	81	86,2	84,2	85,7	87	88,4	89,4
kW	18,5	22	30	37	45	55	75	90	
%	90	90,5	91,4	92	92,5	93,0	93,6	93,9	

Taula 3.1. Rendiments mínims per a motors elèctrics de gàbia d'esquirol amb protecció IP 54 o IP 55 de 2 o 6 pols, en funció de la potència [2].

Al REBT, concretament a la instrucció tècnica complementària ITC-BT-47 *Instalaciones de receptores. Motores*, s'exposen les condicions de connexió d'un motor elèctric, els tipus de conductors en la connexió del motor, la protecció del motor contra sobreintensitats, la protecció del motor contra l'absència de tensió, s'exposen els aspectes relacionats amb la intensitat d'arrencada del motor, així com la instal·lació de resistències i reòstats per regular-la.

Finalment, a la norma internacional IEC60034-2-1 s'estableixen els procediments de càlcul per determinar l'eficiència energètica dels motors elèctrics, i a la norma internacional IEC60034-30 s'estableix la classificació energètica d'aquests en funció d'aquella eficiència.

En el cas del Reial decret 187/2011, aquest és d'aplicació als productes relacionats amb l'energia (ErP), ja sigui pel seu consum directe d'energia com pel fet que afecta el consum d'altres aparells. Aquesta normativa es materialitza en reglaments específics per a cada família de productes, els quals fixen els requeriments d'ecodisseny mínims que els productes han de complir per poder disposar del marcat CE.

2.5 Descripció gràfica

Des de la Figura 3.1 a la Figura 3.7, es mostra la descripció gràfica del principi de funcionament, dels components i de les diferents tipologies de motor elèctric.



Figura 3.1.



Figura 3.2.

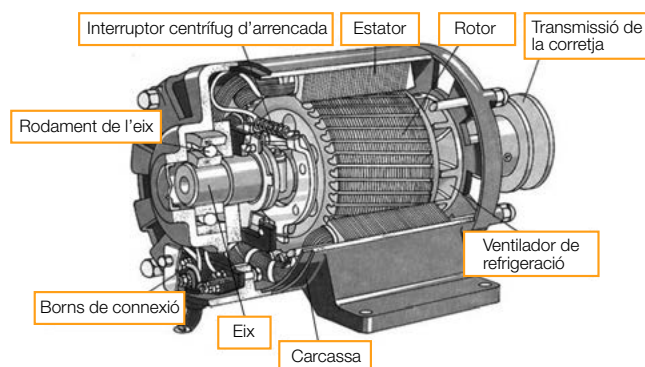


Figura 3.3.



Figura 3.4.



Figura 3.5.

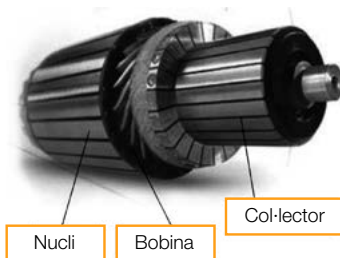


Figura 3.6.



Figura 3.7.

Figura 3.1. Principi de funcionament d'un motor elèctric.

Figura 3.2. Aspecte exterior d'un motor elèctric.

Figura 3.3. Esquema dels components més destacats d'un motor elèctric.

Figura 3.4. Interior d'un motor elèctric. Estator.

Figura 3.5. Interior d'un motor. Rotor.

Figura 3.6. Rotor bobinat i parts que el constitueixen.

Figura 3.7. Esquema d'un rotor de gàbia d'esquirol.

3. Definició del balanç energètic

3.1. Descripció del balanç energètic

Per tal de calcular l'eficiència energètica dels motors elèctrics, s'ha de caracteritzar el balanç energètic d'aquests. Al balanç energètic d'un motor elèctric es comptabilitza com a única entrada la potència elèctrica subministrada al motor a través de la xarxa elèctrica i, com a sortides, la potència mecànica útil del motor, les pèrdues amb origen magnètic associades als bobinats i al material ferromagnètic de l'estator i del rotor, les pèrdues amb origen elèctric, les pèrdues per transferència de calor associades a l'efecte Joule en els conductors i que produeixen una dissipació de calor per radiació a través de la carcassa del motor, les pèrdues associades al fregament entre les peces del motor comptabilitzant el consum energètic que representa el sistema de ventilació i altres pèrdues addicionals producte dels altres materials metàl·lics del motor en els quals es pugui induir corrent elèctric.

Un cop es tenen caracteritzats els fluxos d'entrada i sortida, es pot calcular l'eficiència energètica d'aquests, és a dir, la relació entre la potència mecànica del motor i la potència elèctrica subministrada a aquest.

En les mesures *in situ*, es caracteritza de manera directa la potència mecànica útil a partir del parell i la velocitat angular del rotor. Per altra banda, la potència mecànica útil es pot obtenir de manera indirecta calculant-la a partir de les pèrdues anteriorment referenciades. La mesura indirecta no es pot fer sense pertorbar el funcionament del motor i, per tant, sols es realitza en el banc d'assaig en el laboratori. Els assajos més utilitzats en el laboratori bàsicament són l'assaig de "rotor parat" (curtcircuit) i l'assaig de "rotor lliure" (circuit obert o en buit).

Tot i que els motors elèctrics presenten eficiències elevades, encara es poden millorar utilitzant variadors de freqüència per regular i adequar la velocitat angular de sortida del motor, compensar la potència reactiva de la instal·lació elèctrica que alimenta el motor mitjançant bateries de condensadors, optimitzar-ne el funcionament a partir de les corbes de parell, reutilitzar l'energia dissipada en el cas que el motor freni o actuï com a reductor, i sobretot, utilitzar accionaments directes com el conjunt motor-convertidor que redueix les pèrdues per fregament a les peces mecàniques.

3.2. Esquema del balanç energètic

A l'Equació 3.1, es mostra la relació entre el flux d'entrada i els fluxos de sortida en un motor elèctric, i la Figura 3.8 mostra l'esquema del balanç energètic.

$$P_e = P_u + P_f + Q_p + P_{mag} + P_{addicional} \quad \text{Equació 3.1}$$

On:

P_e [kW] correspon a la potència elèctrica subministrada al motor.

P_u [kW] correspon a la potència mecànica útil a la sortida del motor.

P_f [kW] correspon a les pèrdues de potència ocasionades pel fregament de les peces del motor i pel sistema de ventilació.

Q_p [kW] correspon a la potència de pèrdues elèctriques i per transferència de calor.

P_{mag} [kW] correspon a les pèrdues magnètiques en l'estator i el rotor del motor.

$P_{addicional}$ [kW] correspon a les pèrdues addicionals que es puguin presentar en els motors elèctrics.

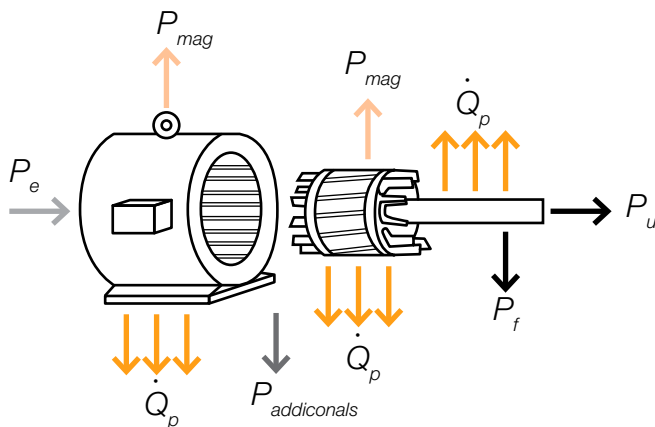


Figura 3.8. Esquema del balanç energètic a un motor elèctric.

4. Bases de càlcul

4.1. Formulació

A continuació, es referencien les bases de càlcul dels dos mètodes mostrats a l'apartat 2.2.

Segons el primer mètode basat en el parell del motor elèctric, primerament s'ha de calcular la potència mecànica útil del motor mitjançant l'Equació 3.2:

$$P_u = \frac{M \cdot n}{9550} \quad \text{Equació 3.2}$$

On:

P_u [%] correspon al rendiment energètic del motor.

M [N·m] correspon al parell de sortida proporcionat pel motor. Es pot agafar com a referència el parell proporcionat per les corbes parell-r.p.m proporcionat pel fabricant en funció de la velocitat angular mesurada en l'eix del motor.

n [r.p.m] correspon a la velocitat angular en revolucions per minut.

El valor 9550 correspon al factor de conversió de la velocitat angular a unitats del sistema internacional, és a dir, a $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$ i a més a més preveu el pas de W a kW de la potència.

Un cop calculada la potència mecànica útil i amb la potència elèctrica mesurada es pot calcular el rendiment energètic del motor mitjançant l'Equació 3.3:

$$\eta = \frac{P_u}{P_e} \cdot 100 \quad \text{Equació 3.3}$$

On:

η [%] correspon al rendiment energètic del motor.

Si no es pot mesurar la potència directament, es pot calcular per a motors monofàsics mitjançant l'Equació 3.4 i per a motors trifàsics l'Equació 3.5.

$$P_e = V \cdot I \cdot \cos \phi \quad \text{Equació 3.4}$$

On:

P_e [W] correspon a la potència elèctrica subministrada al motor.

V [v] correspon al voltatge del motor.

I [A] correspon a la intensitat del motor.

$\cos \phi$ [-] correspon al factor de potència del motor.

$$P_e = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \phi \quad \text{Equació 3.5}$$

Pel segon mètode, basat en el lliscament, en primer lloc s'ha de calcular la velocitat de sincronisme o velocitat de gir del camp magnètic de l'estator mitjançant l'Equació 3.6:

$$n_e = \frac{120 \cdot f}{n^\circ \text{ pols}} = \frac{60 \cdot f}{n^\circ \text{ parell de pols}} \quad \text{Equació 3.6}$$

On:

n_e [r.p.m] correspon a la velocitat de gir del camp magnètic de l'estator.

f [Hz] o [s⁻¹] correspon a la freqüència de la xarxa elèctrica que alimenta l'estator (50 Hz o s⁻¹ a Espanya).

Un cop es té caracteritzada la velocitat de sincronisme i mesurada la velocitat angular del rotor, es pot calcular el lliscament mitjançant l'Equació 3.7:

$$s = \frac{n_e - n_r}{n_e} \cdot 100 \quad \text{Equació 3.7}$$

On:

s [-] correspon al lliscament entre el rotor i l'estator; aquest valor ha d'estar comprés entre 1 i 6% per tal d'assegurar una alta eficiència del motor en les condicions nominals.

n_r [r.p.m] correspon a la velocitat angular del rotor amb el motor en règim estacionari.

4.2. Taules i diagrames

En aquest mòdul, no es necessita la utilització de taules i diagrames. En tot cas, es poden utilitzar les plaques de característiques situades en el mateix motor i les corbes parell-r.p.m. proporcionades pel fabricant.

5. Planificació de mesures

5.1. Dades de què es disposa

- Dades que proporciona el fabricant a partir de la placa de característiques del motor: nombre de pols, connexions i els paràmetres nominals de funcionament.
- Freqüència elèctrica de la xarxa que alimenta el motor: f [Hz] ó [s-1]
- Parell de sortida proporcionat pel motor: M [N·m]

5.2. Dades a mesurar

- Potència elèctrica subministrada al motor: P_e [kW]
- Voltatge del motor que alimenta la bomba: V [V]
- Intensitat del motor: I [A]
- Factor de potència del motor: $\cos \phi$ [-]
- Velocitat angular del rotor: n_r [r.p.m]

5.3. Inventari d'aparells de mesura

- Tacòmetre (Figura 3.9): Variables mesurades: n_r

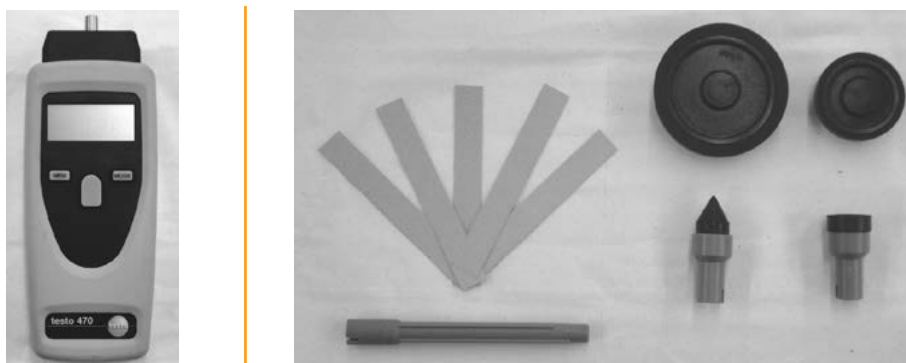


Figura 3.9. Set de mesura de r.p.m.

- Analitzador de xarxes elèctriques (Figura 3.10):
Variables mesurades: V , I , $\cos \phi$, P_e . Desequilibri de fases.

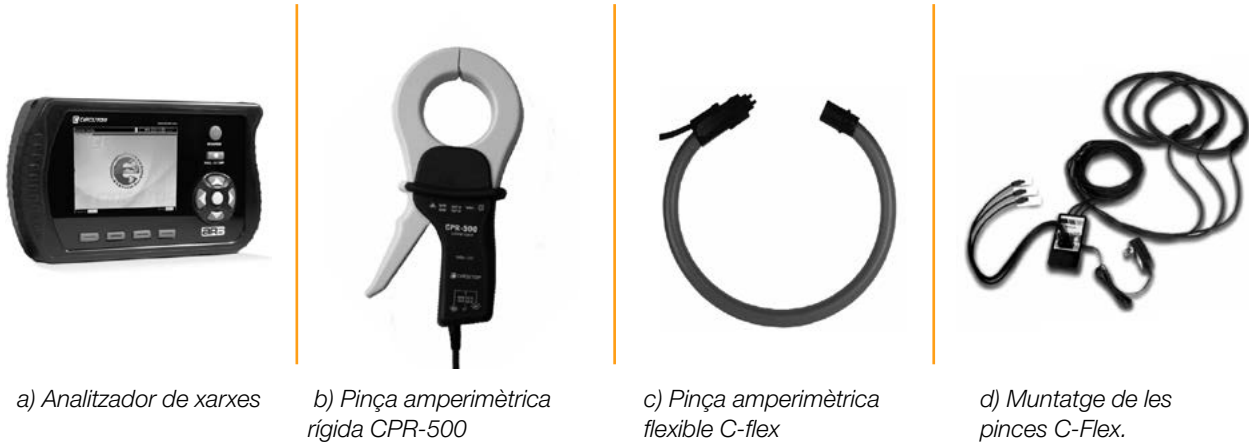


Figura 3.10. Analitzador elèctric AR6 + accessoris.

5.4. Seguretat en persones i equips

Abans de fer qualsevol mesura, és necessari i imprescindible llegir les instruccions d'ús de l'aparell o dispositiu de mesura.

Seguretat per a les persones. En la mesura de la variable n_r , s'ha tenir en compte, tant si la mesura és òptica com mecànica, que aquesta es realitza a molt poca distància de l'eix del motor en moviment i, per tant, s'ha de mantenir certa distància de seguretat entre les mans que subjecten l'aparell i l'eix. A més, és aconsellable no portar peces de roba que puguin minimitzar aquesta distància de seguretat. També cal tenir en compte que la mesura es fa en un motor elèctric en funcionament i, com a tal, s'ha d'evitar al màxim la proximitat amb la zona amb càrrega elèctrica del motor mentre es realitza aquesta mesura.

En la mesura de les variables V , I , $\cos \phi$, P_e i altres paràmetres elèctrics, s'ha de tenir en compte que es duu a terme sobre els borns de connexió del motor i, com a tal, la mesura ha de ser realitzada per un tècnic expert amb carnet d'electricista, que no treballi mai sol, que disposi d'elements de protecció com guants i calçat aïllant, que utilitzi eines normalitzades, que hagi fet un curs de seguretat industrial per tal de tenir recursos preventius i que conegui, en la mesura del possible, el Pla específic de riscos laborals de l'empresa.

Seguretat en equips. És aconsellable no tractar de manera brusca el tacòmetre, els accessoris del set de mesura de r.p.m. o l'analitzador de xarxes.

Abans de qualsevol operació, modificació de les connexions, canvi, manteniment o reparació, cal desconnectar l'aparell de tota font d'alimentació. Quan se sospiti d'un funcionament erroni o fallada de l'equip o de la protecció, aquest ha de deixar-se fora de servei per assegurar-se que no es pugui produir cap connexió accidental.

6. Realització de les mesures

6.1. Mesura de la velocitat d'angular de l'eix/rotor

Si es realitza una mesura òptica:

1. S'ha de seleccionar "rpm".
2. S'ha de posar i enganxar la pista reflectora en l'eix del rotor del motor elèctric.
3. S'ha de situar l'instrument perpendicularment a la pista a una distància màxima de 35 cm.
4. Des de l'inici de la mesura, cal esperar entre 0,5 segons i un període.
5. En acabar la mesura, cal guardar-la o anotar-la

Si es realitza una mesura mecànica:

1. S'ha d'incorporar la sonda mecànica tipus con mitjançant l'adaptador en la part superior del tacòmetre.
2. S'ha de seleccionar "rpm + el símbol del con".
3. Cal inserir la sonda tipus con en l'eix del motor alineant-la amb aquest.
4. Des de l'inici de la mesura, cal esperar entre 0,5 segons i un període.
5. En acabar la mesura, cal guardar-la o anotar-la.

6.2. Mesura de voltatge, intensitat i factor de potència

1. S'han de connectar les preses de tensió i les pinces amperimètriques segons el tipus d'instal·lació, tal com s'indica a la Figura 3.11, en les connexions del motor elèctric del compressor. Cal tenir en compte les normes de seguretat del manual i les referenciades en l'apartat 5.4.

2. S'engega l'aparell i se selecciona el tipus de mesura a realitzar prement la icona [ANÁLISIS DE MEDIDAS]. Un cop s'obri la llista amb les diferents mesures disponibles, s'ha de seleccionar mitjançant el cursor gris el tipus de mesura a realitzar segons les configuracions presentades en la Figura 3.11.

3. Un cop seleccionada la mesura que s'ha de realitzar, s'ha de prémer la tecla dinàmica [ACCIONES] i seleccionar [REGISTROS]. S'obrirà una pantalla on es podran visualitzar els paràmetres principals de la connexió a analitzar.

4. S'han de llegir les mesures, guardar-les o anotar-les. És convenient deixar l'analitzador connectat durant el temps en que es realitzen les altres mesures perquè integri tot el període.

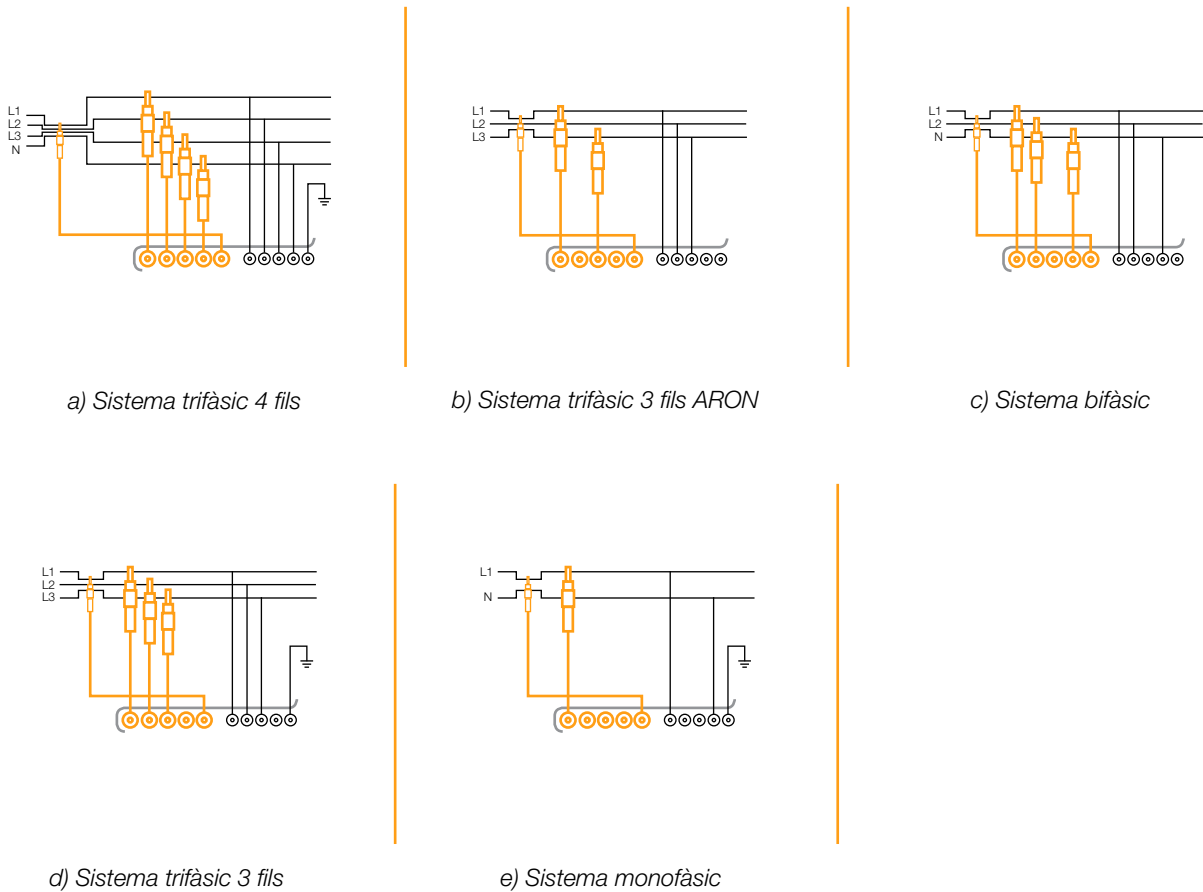


Figura 3.11. Tipus de configuracions a les xarxes elèctriques.

7. Exemple pràctic

7.1. Enunciat

En una fàbrica es té un motor asíncron trifàsic de gàbia d'esquirol accionant una màquina rotatòria. Amb la finalitat de reduir els costos de producció derivats del consum energètic, l'empresa es planteja avaluar energèticament els equips amb què treballa.

Coneixent les dades que proporciona el fabricant a partir de la placa de característiques del motor, es demana calcular l'eficiència energètica del motor.

7.2. Dades

A la Taula 3.2 i Taula 3.3, es mostra el recull de les dades de què es disposa i les dades mesurades en el motor.

Paràmetres	Unitats	Dada
Tipus de connexió del motor	-	Estrella
n° pols: Nombre de pols del motor	-	4
f : Freqüència elèctrica de la xarxa	Hz	50
η : Eficiència energètica	%	90
M : Parell de sortida proporcionat pel motor	N·m	233

Taula 3.2. Dades principals de què es disposa del motor elèctric.

Paràmetres	Unitats	Dada
P_e : Potència elèctrica subministrada al motor	kW	40,88
n_r : Velocitat angular del rotor	m	1475

Taula 3.3. Dades mesurades en el motor.

7.3. Càlculs i resultat

A partir de les dades referenciades en la Taula 3.2 i Taula 3.3, es pot calcular l'eficiència energètica a partir del mètode basat en el parell del motor.

En primer lloc, es procedeix a calcular la potència mecànica útil de sortida del motor:

$$P_u = \frac{M \cdot n}{9550} \qquad P_u = \frac{233N \cdot m \cdot 1475 \text{ rpm}}{9550} = 35,98 \text{ kW}$$

Finalment, amb la potència mecànica calculada i la potència elèctrica mesurada, es pot calcular l'eficiència energètica:

$$\eta = \frac{P_u}{P_e} \cdot 100 \qquad \eta = \frac{35,98 \text{ kW}}{40,88 \text{ kW}} \cdot 100 = 88\%$$

Per avaluar el funcionament del motor pel mètode del lliscament, en primer lloc s'ha de calcular la velocitat de gir del camp magnètic de l'estator:

$$n_e = \frac{120 \cdot f}{n^\circ \text{ pols}} \qquad n_e = \frac{120 \cdot 50 \text{ Hz}}{4 \text{ pols}} = 1500 \text{ rpm}$$

Amb la velocitat de gir del camp magnètic de l'estator i la velocitat de gir mesurada en el rotor, es pot calcular el lliscament:

$$z = \frac{n_e - n_r}{n_e} \cdot 100 \qquad z = \frac{(1500 - 1475) \text{ r.p.m.}}{1500 \text{ r.p.m.}} = 1,67 \%$$

7.4. Comentaris

Com es pot comprovar, el motor treballa pràcticament a plena càrrega, cosa que implica que l'eficiència hauria de ser pròxima a 90%, tal com s'especifica en la placa de característiques del motor. En canvi, l'eficiència proporcionada pel càlcul correspon al 88%. Tot i aquesta petita diferència del 2%, es pot concloure que el motor funciona correctament.

De tota manera, s'aconsella repetir diverses vegades les mesures i els càlculs per avaluar la repetibilitat i minimitzar o descartar, com a possible problema, els errors de mesura. Es pot comprovar també l'estat dels rodaments i elements mecànics que en la conversió d'energia elèctrica a mecànica puguin provocar pèrdues per fregament, ja que aquestes pèrdues no depenen de la càrrega de treball del motor i acostumen a ser les més importants.

Per altra banda, es poden comprovar les pèrdues per transferència de calor, elèctriques i magnètiques, encara que aquestes depenen de la càrrega i treballant pràcticament a la càrrega nominal no haurien d'afectar en la pèrdua del 2% de l'eficiència del motor.

Finalment, pel que fa al lliscament, es pot comprovar que està comprès entre l'1 i el 6% i, per tant, es pot afirmar que el motor en les condicions nominals opera correctament.

8. Referències

[1] Estudi de les millors tecnologies disponibles en consum d'energia referents a motors elèctrics i accionament

http://icaen.gencat.cat/web/.content/10_ICAEN/17_publicacions_informes/08_guies_informes_estudis/informes_i_estudis/arxiu/2012_informe_motors.pdf

[2] *Reglamento de Instalaciones térmicas en los Edificios. Versión consolidada. Setembre de 2013.*

<http://www.minetad.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reglamento/RDecreto-1027-2007-Consolidado-9092013.pdf>

[3] Reial decret 842/2002. Reglament Electrotècnic per Baixa Tensió. BOE 18 de setembre 2002.

http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2002-18099

[4] *Máquinas eléctricas rotativas. Parte 2-1: Métodos normalizados para la determinación de las pérdidas y del rendimiento a partir de ensayos (excepto las máquinas para vehículos de tracción). (Ratificada por AENOR en noviembre de 2014.)*

<http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0053468> \ | “.WC7DuLbhCUk” <http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0053468#.WC7DuLbhCUk>

[5] Internacional Electrotechnical Commission (IEC). IEC 60034-30. *Rotating electrical machines. Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motors.* ED.1.0. ISBN 2-8318-1013-0. 2008-10.

https://webstore.iec.ch/preview/info_iec60034-30-1%7Bed1.0%7Db.pdf

[6] Reial decret 187/2011, relatiu a l'establiment de requisits de disseny ecològic aplicables als productes relacionats amb l'energia. BOE 3 de març de 2011.

http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2011-4038

[7] Directiva 2009/125/CE, per la qual s'instaura un marc per a l'establiment de requisits de disseny ecològic aplicable als productes relacionats amb l'energia.

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:285:0010:0035:es:PDF>

