



IKER  
GAZTE  
NAZIOARTEKO  
IKERKETA EUSKARAZ

# I. IKERGAZTE

NAZIOARTEKO IKERKETA EUSKARAZ

2015eko maiatzaren 13, 14 eta 15  
Durango, Euskal Herria

ANTOLATZAILEA:  
Udako Euskal Unibertsitatea (UEU)

## INGENIARITZA ETA ARKITEKTURA

**Makina Elektrikoen Portaera  
Bibroakustikoaren Neurketa eta  
Simulazioa**

*A. Telleria, A. McCloskey,  
X. Arrasate eta X. Hernandez*

522-529 or.  
<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.i.72>

ANTOLATZAILEA:



BABESLEAK:



LAGUNTZAILEAK:



## Makina Elektrikoen Portaera Bibroakustikoaren Neurketa eta Simulazioa

Telleria A, McCloskey A\*, Arrasate X\*, Hernandez X\*\*

\*Ingeniaritza Mekanikoko departamendua, Ingeniaritza fakultatea. Mondragon Unibertsitatea, Loramendi 4, 20500 Arrasate/Mondragón, Espainia.

\*\*Ingeniaritza Mekanikoko departamendua, Orona EIC, Lastaola Poligonoa, 20120 Hernani, Espainia

[ander.tellerias@alumni.mondragon.edu](mailto:ander.tellerias@alumni.mondragon.edu), [amccloskey@mondragon.edu](mailto:amccloskey@mondragon.edu),  
[jarrasate@mondragon.edu](mailto:jarrasate@mondragon.edu), [xhernandez@orona-group.com](mailto:xhernandez@orona-group.com)

### Laburpena

Makina elektrikoen zarata eta bibrazioa kezka garrantzitsuak dira. Beronen efizientzia hobetzeko burututako aldaketek bibrazio maila onartezin bat ekar dezakete. Ondorioz, makina hauen portaera bibroakustikoa aurreikusiko duten erremintak garatzea nahitaezkoa da. ABAQUS softwarearen laguntzaz, iman iraunkorreko motor sinkrono baten bibrazio portaera aztertzeke modelo bat garatu da, elementu finituen metodoa erabiliz. Makinaren osagai eta azpimultzo guztiak analisi modal esperimentalen (AME) bidez balioztatuak izan dira. Gainera, modelizazio aspektu batzuk hobetu egin dira, beraz modelo fidagarri bat sortu da. Estatore laminarra, altzairuzko zenbait xaflez osatuta dagoenez, material ortotropo bat bezala kontsideratu da, eta harilkatua ere solido ortotropo bezala kontsideratu dira. Errotore-ardatz azpimultzoa ere AME-ren bidez balioztatua izan da. Bestalde, errotorea multzoarekin lotzen duten errodamenduak malguki erradial batzuen bidez modelizatu dira. Gainera, bibrazioaren erantzuna zein den lortzeko, makina osoaren gain indar elektromagnetikoak aplikatu dira. Indar hauek estatore eta errotorearen hartz eta poloen artean dagoen fluxu magnetikoaren dentsitatearen bidez lortu dira. Horretarako, 2Dko elementu finituen modelo bat garatu da FLUX-en. Amaitzeko, igorritako potentzia akustikoaren neurketa esperimentalak ere burutu da.

Hitz gakoak: Motor elektrikoak, Bibrazioak, Inposatutako erantzuna, Zarata elektromagnetikoa.

### Abstract

*Noise and vibration of electrical machines is a major concern. Changes in the machine design to improve its efficiency can lead to unacceptable vibrations. Tools to predict its vibratory and acoustic performance at the design stage need to be developed. An improved finite element model has been developed to analyse the vibration behaviour of a permanent magnet synchronous motor (PMSM) using the finite element software ABAQUS. All components and subsets of the machine have been modelled and validated by experimental modal analysis (EMA) performed on them. Some modelling issues have been overcome so that an accurate enough model has been reached. The laminated stator, as it is formed by a pack of several steel sheets, has been treated as an orthotropic material and windings have been considered a solid orthotropic part as well. The rotor-shaft assembly has also been verified by EMA. The bearings that join the rotor to the assembly of the stator have been represented by radial springs. The electromagnetic forces are applied to the whole machine model in order to obtain the vibration response. These forces are obtained from the magnetic air-gap flux density which has been obtained with a 2D finite element model developed by FLUX. Finally, it has also been obtained the experimental acoustic power that the machine emits.*

*Keywords: Electric motors, Vibrations, Forced response, Electromagnetic noise.*

## 1. Sarrera eta motibazioa

Inbertsoreen erabilerak bibrazio eta zarata arazoak sortzen dituzten kitzikapen harmonikoak sartzen ditu sisteman. Zarata eta bibrazioek erabiltzailearen kalitate eta konfortaren pertzepzioan eragin zuzena daukate. Gaur egun, kosteak gutxitze aldera, makinaren efizientzia hobetzea nahitaezkoa da, eta ondorioz estatorearen geometria optimizatu behar da. Gainera, makinaren bibrazio portaera restriktio bat da, geometrian egiten diren zenbait aldaketek bibrazio onartezin batzuk sor ditzaketelako.

Motor elektrikoetako zarata eta bibrazioaren jatorriak hiru taldetan sailkatu daitezke:

- Zarata elektromagnetikoa: Estatore eta errotorean aplikatzen diren indar magnetikoen ondorioz sortuak.
- Zarata mekanikoa: Eszentrikotasunek, errodamenduek etab. sortua.
- Zarata aerodinamikoa: Hozketarako dagoen haizagailuak sortua.

Zarata hauen eraginaren kontribuzioa kasuaren arabera aldatzen da. Aztertutako kasuan, haizagailurik ez dagoenez, sisteman ez dago zarata aerodinamikorik. Gieras et al. [2] eta Timar and Lai [6] autoreen arabera, zarata mekaniko eta aerodinamikoak abiadurarekin handitzen dira. Hala ere, Timar and Lai [6]-ek dioenaren arabera, abiadura oso baxuetan ere zarata mekaniko eta elektromagnetikoen eragin nabarmena daukate. Kawasaki et al. [3] bezalako beste autore batzuen arabera, “1000 Hz-ren azpitik dagoen zarata batez ere norabide erradialeko kitzikapen elektromagnetikoak sortua da”, eta Lakshmikanth et al. [4]-en arabera, potentzia baxuko edo ertaineko makinetan, faktore nabarmenena elektromagnetikoa da. aztertutako makinaren biraketa abiadura baxua denez, makina osasuntsu baten kasurako zarata mekanikoa baxua litzateke, ondorioz soilik zarata elektromagnetikoa kalkulatu da.

## 2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Egin behar honetarako elementu finitu bidezko modelo estruktural bat garatu behar da, analisi modal esperimentalaren (AME) balioztatua izango dena.

Bestalde, motor elektrikoa modelizatzeko, zenbait aspektu garatu behar dira. Hasteko, estatorea altzairuzko xafla batzuen pilaketaz osatuta dagoenez, zurruntasun balio ezberdinak ditu norabide erradial eta axialean, Gieras et al. [2], Verdyck and Belmans [7] and Wang and Lai [8] autoreen arabera. Ondorioz, estatorea errepresentatzeko erabili den solidoari propietate ortotropoak atxiki zaizkio. Propietate hauen balioak lortzea zaila da, fabrikazio prozesuan zehar eragindako presioaren arabera delako (Wang and Williams [9] and Watanabe et al. [10]), eta baita ere xafla guztiak lotzeko erabili den teknikaren arabera. Ondorioz bere propietateak neurketa esperimentaletako emaitzen arabera doitu dira.

Ondoren, harilkatuaren modelizaziorako estrategia ezberdinak aurkitu dira, bibliografia ezberdinetan arakaturik. Belmans et al. [1] eta Wang and Lai [8] autoreen arabera, harilkatuaren masaren kontribuzioa bere zurruntasunarena baino askoz ere garrantzitsuagoa da, eta ondorioz elementu hauek masa gehigarri bat bezala kontsideratu dira. Hala ere, ezin da ziurtasun osoz jakin ea estrategia hau edozein geometria duen estatorean aplikagarria den. Ondorioz, Gieras et al. [2]-en arabera, estatoreen hortzen arteko bolumena betetzen duten harilkatu zatiak ere solido bat bezala modelizatzen dira. Elementu hauen propietateak estimatzeko, berriz ere analisi modal esperimentaleko emaitzez baliatu da.

Beste aspektu garrantzitsu bat elementuen arteko loturak dira. Hasiera batean, torloju bidezko loturak zurrunk bezala kontsideratzen dira, eta ondorioz elementu hauen bidez lotuta dauden gainazalak elkar itsatsita baleude bezala kontsideratu dira. Errotorearen kasuan, errodamenduen bidez lotuta dagoenez, malguki batzuk sartu dira norabide erradialean, errodamenduak kokatuta dauden lekuetan, hain zuzen.

## 3. Analisi esperimentalak

### 3.1 Erabilitako elementuak eta jarraitutako prozedura

Neurketa esperimentaletarako ondorengo ekipoa erabili da:

- Brüel & Kjaer ekoizlearen Front end bat eta ordenagailu eramangarri bat, Pulse Labshop softwarea duena.
- Mailu sentsoeduna.
- 10 azelerometro triaxial.

Aztertutako sistemak soka elastiko batzuen bidez zintzilikatu dira, lotura baldintzen eragina ekidinez, sistemen frekuentzia naturalak kalkulatzeko.

Sistema bakoitzean diskretizazio espazial desberdin bat erabili da, eta ondorioz neurtutako puntuen kopurua eta posizioa aldakorra izan da neurketatik neurketara. Aztertutako osagarriak honako hauek izan dira:

- Estatore laminarra
- Estatore laminarra eta harilkatua
- Estatorea, harilkatua eta tapak
- Errotorea eta ardatza
- Aurreko bi sistemak, errodamenduen bidez lotuta (freno gabe)
- Makina osoa

Freno gabeko muntaia errodamenduen portaera eta zurruntasuna aztertzeko erabili da. Honetarako ardatzean hainbat azelerometro kokatu behar direnez, freno eta gainerako beste elementu batzuk (frenoaren euskarriak etab.) ez dira kontutan hartu muntaian.

### **3.2 Operazioan neurtutako bibrazio maila**

Kasu honetan ere aurrez azaldutako neurketa ekipo bera erabili da, maila ezik. Neurketa hau egiteko, makina mahai baten gainean zurrunki lotu da.

Bibrazio maila neurtzeko ere azelerometroak kokatu dira motorraren gainazalean zehar. Motorraren lan baldintzei dagokienez, kargapean eta abiadura nominalean neurtu da bere bibrazio maila.

### **3.3 Operazioan neurtutako potentzia akustikoa**

Potentzia akustikoaren neurketa bibrazioaren baldintza eta leku berean burutu da. Hau neurtzeko, bost mikrofono kokatu dira makinatik 0,5 metrotara, beronen ondoan paralepipedo irudikari bat osatuz. Potentzia akustikoaren balioa lortzeko ISO 3746 araua jarraitu da.

## **4. Elementu finitu bidezko modelo estrukturala**

Elementu finituetako modelo bakoitza neurketa esperimentaletan lortutako modoekin elementuen propietateak egiaztatuz garatu da. Hala ere, zenbait elementuk erakusten duten zailtasuna dela eta, aktualizazio prozesu bat egin da Virtual.Lab-eko optimisation modulua erabilita.

Analisi modalean aztertutako frekuentzia tartea 0 eta 2500 Hz artekoa izan da, makina honek sortutako zarata frekuentzia baxukoa delako.

### **4.1 Estatorearen modeloa**

Aurrez esan bezala, estatorea altzairuzko xaflen pilaketez osatuta dago. Horregatik, propietate ortotropoak atxiki zaizkio solido bezala modelizatzerakoan. Lortutako propietateak altzairuaren antzekoak dira norabide erradialean, baina norabide axialean aldatu egiten dira, xaflen arteko aire pilaketa eta lotura sistemagatik. Hala ere, neurketa esperimental eta teorikoaren arteko errore erlatibo guztiak %6 baino txikiagoak izan dira. Kasu honetan ez da egin ez kalkulu teorikorik ezta simulaziorik ere, aztertutako estatorea aurrez kalkulatuta zegoen beste makina baten berdina delako.

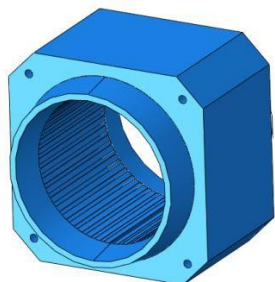
### **4.2 Estatore eta harilkatuaren modeloa**

Harilkatua kobrezko hari batzuen bidez osatuta dago, zeintzuk material isolatzaile baten bidez estaliak dauden. Estatorearekin gertatu den bezalaxe, estatorearen hortzen arteko harilkatu

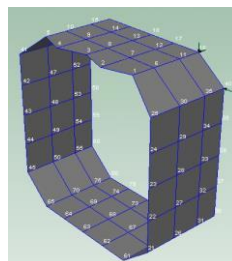
zatia solido baten bitartez modelizatu da, eta propietate ortotropoak atxiki zaizkio. Propietate hauek modo esperimentaletan lortutako balioen arabera doitu dira. Ondorengo irudian (1 irudia) ikus daitezke erabilitako modelo numeriko zein esperimentalak.

### 1. irudia. Estatore eta harilkatuaren modelo numeriko eta esperimentalak

Modelo numerikoa



Modelo esperimentalak



Modelo numerikoan, estatore eta harilkatuaren arteko lotura Abaqu sek eskaintzen duen “tie” loturaren bidez egin da, zeinetan bi gainazalen arteko nodoak elkar itsasten dituen.

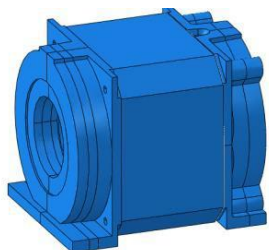
Multzo honi tapak erantsen zaizkionean, deformazio axialak ezeztatzen dira, eta ondorioz analisi honetan modo hauek eragiten duten propietateak egoki atxikitzeari eman zaio garrantzia.

### 4.3 Estatore, harilkatu eta tapen modeloa

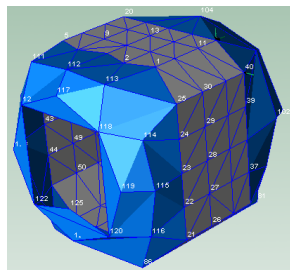
Kasu honetan aurreko multzoari bi tapak erantsi zaizkio (2 irudia). Tapetako batek balaztatze sistema osatzen duten elementuak eusteko balio du, eta besteak aldiz polea.

### 2. irudia. Estatore, harilkatu eta tapen modeloa

Modelo numerikoa



Modelo esperimentalak



Bi elementu hauek torloju bidez daudenez lotuta estatorearekin, lotura zurrun bezala modelizatu dira. Materialari dagokionez, burdinurtuz eginda daude (EN-GJL-250 (GG-25)), eta beronen propietate mekanikoak aplikatu zaizkie bi tapei.

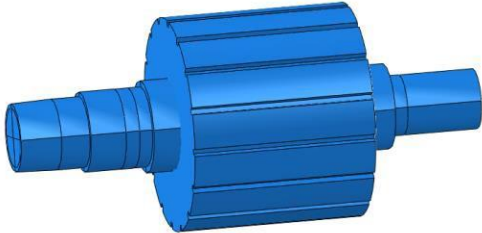
### 4.4 Errotore eta ardatzaren modeloa

Errotoreari dagokionez, elementu hau ere xafla batzuen pilaketaz osatuta dago, eta bere barnean iman iraunkorrak ditu. Horregatik, honi ere neurketa esperimentaletik eratorritako propietate ortotropoak atxiki zaizkio. Ardatza aldiz altzairuzkoa da eta propietate isotropoak kontsideratu dira kalkuletarako.

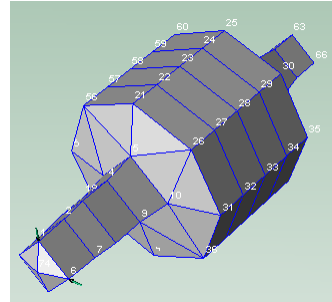
Loturari dagokionez aldiz, bi elementuen arteko lotura zurruna bezala kontsideratu da (3 irudia).

### 3. irudia. Errotore eta ardatzaren azpimultzoa

Modelo numerikoa



Modelo esperimental

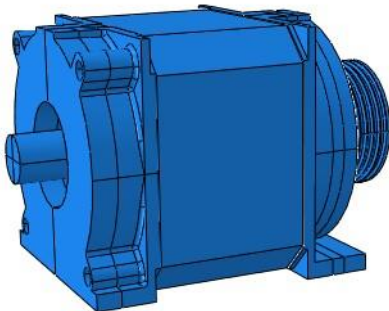


### 4.5 Freno gabeko azpimultzoa

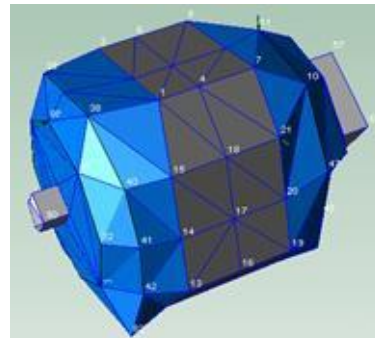
Ardatza eta errotorea estatore, harilkatu eta tapen modeloari gehitu zaio, eta bi azpimultzoak malgukien bidez elkartu dira (4 irudia). Polea ere azpimultzo berean kokatu da.

### 4. irudia. Freno gabeko multzoko modeloa

Modelo numerikoa

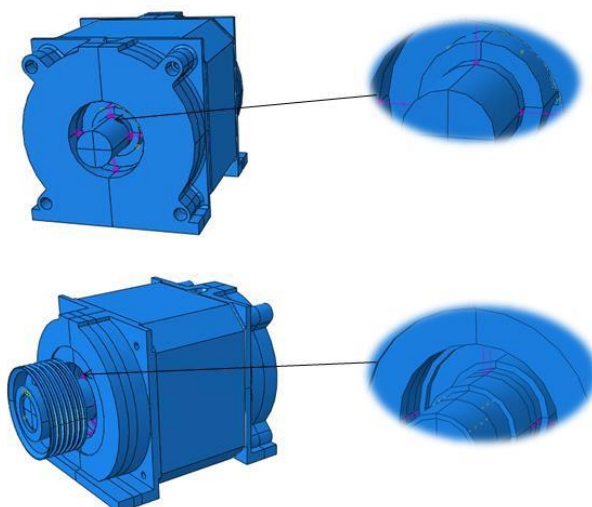


Modelo esperimental



Malgukiei dagokienez, frenoaren aldekoa lau malguki erradialen bidez modelizatu da, plano bakoitzeko bi. Polearen aldekoa aldiz bi ilaratako errodamendu bat denez, plano bakoitzeko lau malguki kokatu dira, eta norabide axialean ere zurruntasun bat aplikatu da, karga axialak jasango dituen (5 irudia).

**5. irudia. Malgukien modelizazioa**



Zurruntasunaren balioak analisi esperimentaletik lortu dira, eta aplikatutako balioak honako hauek izan dira (1 Taula):

**1. Taula. Malgukien zurruntasunen balioak**

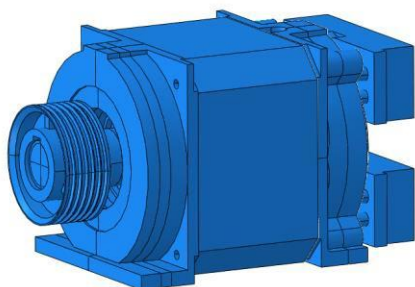
| Malgukia                   | Zurruntasun koef.(kN/mm) |
|----------------------------|--------------------------|
| Frenoaren aldekoa          | 200 x 2                  |
| Axiala, polearen aldean    | 5.09 x 8                 |
| Erradiala, polearen aldean | 166.115 x 4              |

**4.6 Makina osoa**

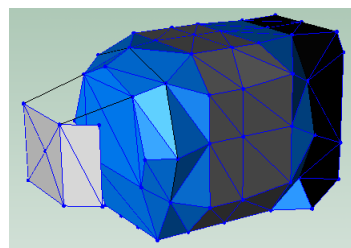
Aztertu den azkeneko azpimultzoan makina osoa aztertu da. Horretarako, aurreko azpimultzoari balazta sistemako elementuak gehitu zaizkio, hala nola diskoa eta kanpoko bi blokeak (6 irudia). Elementu hauek aluminioz eta altzairuz eginda daudenez, ez da zailtasunik egon beraien propietateak identifikatzerako orduan. Loturari dagokionez, aurreko kasuetan bezala lotura zurruna dela kontsideratu da, eta elementuak elkarri itsatsita baleude bezala modelizatu dira.

**6. irudia. Makina osoaren modelo numeriko eta esperimentalak**

Modelo numerikoa



Modelo esperimentalak



Kalkuluei dagokienez, esan behar da makina osoa bi baldintzatan kalkulatu dela: Bata aske, gomazko sokan bidez zintzilikatuta, eta bestea oinarria plataforma zurrun bateri lotuta duela.

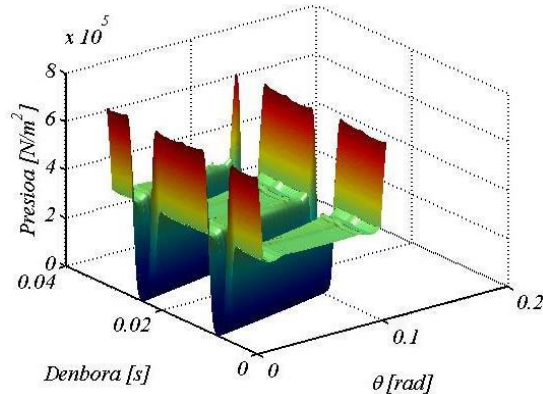


## 5. Bibrazioaren erantzunaren kalkulua

### 5.1 Indar elektromagnetikoen kalkulua

Bibrazioaren erantzuna kalkulatzeko, lehenengo indar elektromagnetikoak kalkulatzea nahitaezkoa da. Indar hauek kalkulatzeko, elementu finituen metodoa aplikatu da, 2D -ko FLUX softwarea erabiliz. Kalkulua egiteko, makinaren oinarriko frekuentziari dagokion denbora tarte hartu da kontutan, eta ondoren denboraren domeinutik frekuentzia ra pasatu da, FFT bat aplikatuz (7 irudia).

7. irudia. Presioaren distribuzioa hortz baten gainean

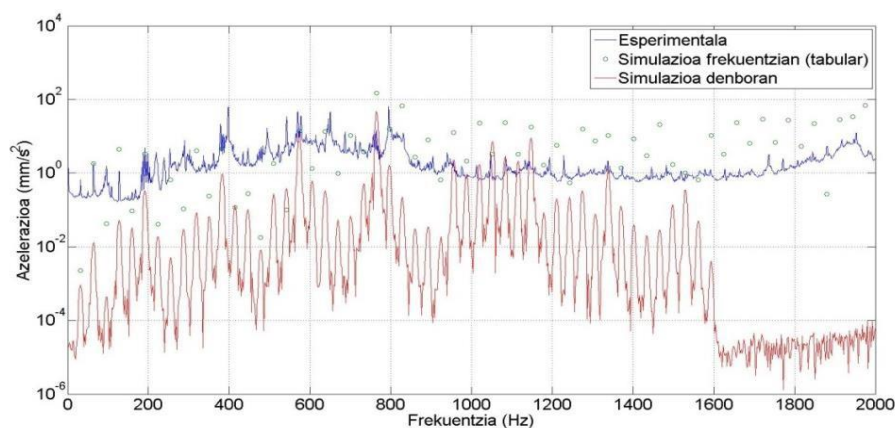


### 5.2 Indarren aplikazioa eta bibrazioaren kalkulua

Aurrez kalkulaturako indar elektromagnetikoak estatorearen hortzetan eta errotorearen poloetan aplikatu dira. Hau egiteko bi modu daude: bata *Tabular* deiturikoa, pultsu baten bezalakoa dena, eta bestea simulazio tenporala. Lehenengo kasuan lortutako espektroa diskretua da, karga bakoitzak bere maiztasuna duelako. Bigarrenetan, aldiz, espektro jarraitua lortu da, bakarrik egoera egonkorreko denbora zati bat aztertu delako. Gainera, denbora zati hau periodiko izateko *Hann* leihoa aplikatu zaio erantzunari, eta ondorioz emaitza jarraitua lortu da. Amortiguamenduari dagokionez, beronen balioa neurketa esperimentaletatik lortu da.

Behin kalkulu teorikoa egin eta gero, lortutako emaitza neurketa esperimentalarekin alderatu da, estatorearen erdiko azelerazio normalaren balioa grafikaturaz kasu bakoitzerako (8 irudia).

8. irudia. Azelerazioaren konparaketa





## 6. Ondorioak

Hasieran definitutako helburua lortu da, hau da, makinaren bibrazio eta zarata maila kalkulatzea. Zailtasun handiena estatore, harilkatu eta errotorearen propietateak identifikatzean egon da, elementu ezberdinen pilaketez eginda daudenez propietateak ez direlako guztiz uniformeak, eta beraien balioa identifikatzea zaila da. Gainera, elementuen arteko loturak ere eragina dauka, batez ere gainazalak elkarrekin lortzean sortzen diren presioak.

Kontutan eduki beharreko beste aspektu garrantzitsu bat sistemaren modelizazioa da. Teorian elementuen tamaina zenbat eta txikiagoa izan orduan eta emaitza zehatzagoak lortzen dira, baina emaitza kalkulatzea luzeagoa da, eta askoz memoria gehiago okupatzen du modeloak. Horregatik, errekurtsoen kontsumoaren eta zehaztasunaren arteko oreka topatzea garrantzitsua da. Gainera, elementuen tamainaz gain elementu motak ere eragina dauka kalkuluan. Adibidez, elementu lineal edo koadratikoak aukeratzea, edota integrazio murriztua edo ez erabiltzeak eragina dauka, sisteman hourglass bezalako efektuak sor ditzakeelako.

Amaitzeko, esan beharra dago azelerazioaren konparaketaren grafika ez dela behin-betikoa, behin-behinekoa baizik. Horregatik, ez dira RMS bezalako parametroak kalkulatu, oriandik ere emaitza alda daitekeelako. Puntu batzuetan desberdintasun nabarmenak ikus badaitezke ere, adostasunak ere nabarmenak dira (adibidez, maiztasun naturalak identifikatu dira). Ondorioz, etorkizunari begira beste neurketa batzuk planteatu dira, batez ere zarata mekanikoa eta elektrikoa desberdintzeko balioko dutenak.

## 7. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Etorkizunari begira, hainbat azterketa paralelo ari dira egiten. Alde batetik, modelo numerikoen aplikazioa ari da aztertzen, literaturan errebisatuz sistema era ezberdinetara modelizatuz. Esate baterako, estatore eta harilkatua eratzun bidez modelizatzea egokia den edo ez ikusteko froga desberdinak egin dira.

Bestalde, estatore eta errotoreko hartz eta poloen diskretizazioaren optimizazioa ere ari da lantzen. Diskretizazio hau ondo egitea garrantzitsua da, lortutako emaitza guztiz aldatzen delako. Motor honen kasuan, hartz eta polo kopuruen arteko zatiketak zenbaki oso bat ematen duenez, errotorean aplikatutako kargak periodo osoak izango dituzte, eta ondorioz indar netoa nulua izango da. Horregatik, diskretizazio desegoki batek indar neto bat eragingo luke errotorearen gainean.

## 7. Erreferentziak

- Ronnie JM Belmans, Dirk Verdyck, Willy Geysen, and Raymond D Findlay. Electromechanical analysis of the audible noise of an inverter-fed squirrel-cage induction motor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 27 (3), 539–544, 1991.
- Jacek F Gieras, Chong Wang, and Joseph Cho Lai. *Noise of polyphase electric motors*. CRC press, 2005.
- Ryo Kawasaki, Yasuo Hironaka, and Masaharu Nishimura. Noise and vibration analysis of eleva tor traction machine. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 369–377. Institute of Noise Control Engineering, 2010.
- S. Lakshmikanth. Noise and vibration reduction in Permanent Magnet Synchronous motors –A review. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 2 (3), 405 –416, 2012.
- A. McCloskey, X. Arrasate, G. Almandoz, X. Hernandez. Vibro-acoustic finite element analysis of a Permanent Magnet Synchronous Machine. 9th International Conference on Structural Dynamics, Eurodyn 2014.
- PL Timar and JCS Lai. Acoustic noise of electromagnetic origin in an ideal frequency-converter-driven induction motor. *IEE Proceedings -Electric Power Applications*, 141 (6), 341 –346, 1994.
- D. Verdyck and R.J.M. Belmans. An acoustic model for a permanent magnet machine: modal shapes and magnetic forces. *IEEE transactions on industry applications*, 30 (6), 1625–1631, 1994.
- C. Wang and JCS Lai. Vibration analysis of an induction motor. *Journal of sound and vibration*, 224 (4), 733–756, 1999.
- Huan Wang and Keith Williams. The vibrational analysis and experimental verification of a plane electrical machine stator model. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 9 (4), 429–438, 1995.
- S. Watanabe, S. Kenjo, K. Ide, F. Sato, and M. Yamamoto. Natural frequencies and vibration behaviour of motor stators. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (4), 949–956, 1983.