

# Trenbide ardatzen eta bogien saiakuntza-bankua

## Railway axle and bogie test bench

Paul Gómez-Tejedor<sup>1</sup>, Ernesto García Vadillo\*<sup>1</sup>, Nekane Correa<sup>1</sup>,  
Javier Santamaría<sup>1</sup>, Rakel Robles<sup>1</sup>, Olatz Oyarzabal<sup>1</sup>, Javier Astarloa<sup>1</sup>,  
Raúl Cosgaya<sup>1</sup>, Felipe Uriondo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ingeniaritza Mekanikoa Saila, Bilboko Ingeniaritza Eskola,  
Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU)

<sup>2</sup> Ingeniaritza Elektrikoa Saila, Bilboko Ingeniaritza Eskola,  
Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU)

**LABURPENA:** Artikulu honek UPV/EHuko Ingeniaritza Mekanikoa sailean diseinatu eta eraikitako *roller rig* edo bogien saiakuntzarako bankua erakusten du. Saiakuntza-bankuaren trenbide zabalera 5»ekoa da. Eskala hori aukeratzearen arrazoia merkatuan eskala horretako osagaiak aurkitzeko erraztasuna da. Artikuluan, zenbait laborategi, ikerketa-zentro, unibertsitate eta trenbide-sektoreko enpresatan dauden ardatz, bogie eta trenen saiakuntza-bankuen azterketa konparatiboa egiten da. Horrez gain, saiakuntza-banku horien beharra, aplikazio-eremua, prestazioak eta mugak aztertzen dira. Azterketa konparatibo horren helburua da artikulu honetan deskribatzen den saiakuntza-bankuaren ezaugarriak eta prestazioak mugatzea da. Bestalde, egindako proiektua deskribatzen da, hautatutako osagaiak eta horien justifikazioa aurkeztuz, betiere prezioa beharrezko ezaugarri eta prestazioekin uztartuz.

**HITZ GAKOAK:** trenbide dinamika, roller rig, abiadura kritikoa, egonkortasuna trenbide zuzenean.

**ABSTRACT:** This paper describes the roller-rig or test bench for railway axles and bogies, designed and built in the Department of Mechanical Engineering of the University of the Basque Country (UPV/EHU). It is a 5» gauge test bench, having chosen this scale due to the ease of finding components of the same scale on the market. In this article, a comparative study of already existing axle, bogie and railway vehicles test benches located in laboratories, research centres, universities and in railway sector companies is carried out. The need for these test benches, the field of application, their performance and their limitations are explained. As a result of this comparative study, the characteristics and performance required for the present test bench have been selected. Finally, the project carried out is described, as well as the individual components chosen and their justification, combining price with the necessary features and performance.

**KEYWORDS:** railway dynamics, roller rig, critical speed, straight track stability.

\* **Harremanetan jartzeko / Corresponding author:** Ernesto García Vadillo. Ingeniaritza Mekanikoa Saila, Bilboko Ingeniaritza Eskola, Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU). Plaza Ingeniero Torres Quevedo 1, 48013, Bilbo. – ernesto.garcia-vadillo@ehu.eus

**Nola aipatu / How to cite:** Gómez-Tejedor, Paul; García Vadillo, Ernesto; Correa, Nekane; Santamaría, Javier; Robles, Rakel; Oyarzabal, Olatz; Astarloa, Javier; Cosgaya, Raúl; Uriondo, Felipe (2024). «Trenbide ardatzen eta bogien saiakuntza-bankua». *Ekaia*, 46, 2024, 355-370. (https://doi.org/10.1387/ekaia.25888).

Jasotze-data: 2024, urtarrilak 9; Onartze-data: 2024, maiatzak 8.

ISSN 0214-9001 - eISSN 2444-3255 / © UPV/EHU Press



Lan hau Creative Commons Aitortu-EzKomertziala-PartekatuBerdin 4.0 Nazioartekoa lizentzia baten mende dago

## 1. SARRERA

Jakina denez, tren arrunten dinamikaren arazoan artean ardatz muntatuen ezegonkortasun dinamikoa eta bogieak bihurgunean behar bezala inskribatzea bereizten dira. Arazo horiek kontrajarriak dira, zeren lehenengoari mesede egiten dioten faktoreek bigarrenari kalte egiten baitiote, eta alderantziz.

Lehenengo arazoari dagokionez, hau da, trenbide zuzenetan agertzen den ardatzen ezegonkortasun dinamikoari dagokionez, trenaren zirkulazio-abiadura handitzean gertatzen da. Teorian, abiadura kritikoa bat dago, eta abiadura horren gainetik ardatz muntatuen albo-portaera bortitza izaten hasten da. Egoera horretan, ardatzek oszilazio handiak izaten dituzte trenbidearen zeharkako norabidean, gurpilen erlaitzen eta errailen aurpegi aktiboaren arteko talken bidez balaztatzen direnak. Jakina, egoera hori onartezina da, eta trenak ezin du zerbitzuan abiadura kritikoa lortu. Arazo horren kontrola hartzeko, bogieak eta ardatzak ahalik eta abiadura kritikorik handiena izateko diseinatu behar dira, trenaren zirkulazio-abiadura maximotik gora. Abiadura kritikoa handitzen laguntzen duten faktoreak gurpilen konikotasun txikia eta esekidura primario zurrinak dira, hau da, bihurgunean modu egokian inskribatzeari kalte egiten dioten faktoreak.

Bigarren arazoari aurre egiteko, hau da, bihurgunean inskripzio ona lortzeko, aukera ezberdinak daude. Lehenengo aukera, erradio txikiko kurban kasuan batez ere, gurpilen konikotasun handia izatea da, errailen inklinazio berarekin konbinatuta. Bigarren aukera da esekidura primario oso biguna erabiltzea, batez ere luzetarako norabidean. Horri esker, ardatzek ahalik eta norabide erradialena hartzen dute bihurgunean. Ondorioz, pseudo-irristadurak (gurpil eta errailaren arteko kontaktu puntuan dagoen abiadura erlatiboaren eta trenaren aitzinamendu abiaduraren arteko erlazioa), pseudo-irristadura indarrak eta gurpilaren (erlaitzetan) eta errailaren (kurbaren kanpoaldeko errailaren aurpegi aktiboan) higadurak murrizten dira. Horrez gain, kirrinkak ez sortzea lortzen da, eta korrugazioa agertzearen aukerak txikiagotu egiten dira. Hirugarren aukera da errodadura independentea duten ardatzetara edo ezohikoak diren bogietara jotzea.

Aipatutako faktoreen atariko diseinua egiteko, alde aurretik trenbide-dinamikako paketeren batekin egiaztatu behar da, hala nola, SIMPACK [1] erabiliz. Horrez gain, oso erabilgarria litzateke aurreko faktoreek trenbide zuzenean eta kurban duten eragina fisikoki ikustea ahalbidetzen duen entsegu-banku bat izatea. Entsegu-bankuari esker, faktore horiez gain, beste batzuk ere ziarra daitezke, hala nola, esekitzen ez den masa, gurpilen errodadurako zirkunferentzia nominalaren diametroa, gurpilaren profila, ardatzen arteko distantzia, eta abar. Hori bera bogie arruntetatik haratago ere heda daiteke, eta ezohikoak diren bogiei aplikatu. Saiakuntza-bankuei buruzko lan eta argitalpen ugari daude trenbide-gaietan espezializatutako hainbat laborategitan. Horietako batzuk hurrengo ataletan deskribatuko dira.

## 2. ARDATZEN EGONKORTASUN DINAMIKOAREN PLANTEAMENDU MATEMATIKOA TRENBIDE ZUZENEAN

Ezaguna denez (ikus [2]), trenbidearen gainean libre dagoen ardatz muntatu batek mugimendu sinusoidal bat deskribatzen du, zeinaren uhin-luzera  $\lambda_1$  Klingel (1) formularen bidez ematen den, non  $r_0$  gurpil bakoitzaren errodaduraren erradio nominala den,  $d$  trenbidearen zabaleraren erdia den, eta  $\delta_0$  gurpilen konikotasuna.

$$\lambda_1 = 2\pi \sqrt{\frac{r_0 d}{\delta_0}} \quad (1)$$

Horren ondorioz, ardatz muntatuaren mugimendua ez da guztiz egonkorra trenbide zuzenetik zirkulatzen duenean, eta  $\lambda_1$  uhin-luzerako oszilazioa izango du oreka-posizioaren inguruan. Gainera, ikus daitekeenez, uhin-luzeraren formula honetan ez dira agertzen ez ardatz muntatuaren masa, ezta abiadura ere.

Antzeko zerbait gertatzen da bastidorearekin lotura zurruna duten bi ardatz muntatuz osatutako bogie batean. Azterketa kuasiestatiko bat egiten bada, (2) ekuazioan adierazitako uhin-luzera ( $\lambda_2$ ) lortzen da, non  $L$  ardatz muntatuaren arteko distantziaren erdia den.

$$\lambda_2 = 2\pi \sqrt{\frac{r_0}{\delta_0} \left(1 + \frac{L^2}{d^2}\right)} \quad (2)$$

Berriz ere, kasu horretan, bogiea trenbide zuzenetik zirkulatzen duenean ez da egonkorra, ezta ezegonkorra ere. Hau da,  $\lambda_2$  uhin-luzerako oszilazioa izango du oreka-posizioaren inguruan.

Analisi dinamiko bat egiten bada bogiea abiadura jakin batean zirkulatzeko dagoela, eta ardatz bakoitzaren  $M$  masa eta inertzia momentua  $I$  kontuan hartzen badira, (3) ekuazioan azaltzen den polinomio bereizgarria lortzen da. Ekuazio honetan,  $C$  pseudo-irristadura indarraren eta pseudo-irristaduraren arteko erlazioa da eta  $s$  ardatzen arteko distantzia.

$$M \cdot I \cdot p^4 + 4 \frac{C}{V} \cdot [I + M \cdot (d^2 + s^2)] p^3 + \left(\frac{4C}{V}\right)^2 \cdot (d^2 + s^2) \cdot p^2 + 16C^2 \cdot \frac{\delta_0 \cdot d}{r_0} = 0 \quad (3)$$

Polinomio bereizgarri horren erroak ( $p$ ) kalkulatu, sistema edozein abiaduratan ezegonkorra dela lortzen da, zati erreal positiboa duen erro konplexua duelako. Hau da, bastidoreari zurrunki lotutako bi ardatz muntatuz osatutako bogie batean, edozein abiaduratan dinamikoki ezegonkorra dela ondorioztatzen da, trenbide zuzenetik zirkulatzen duenean.

Modu erraz batean analitikoki azter daitekeen kasurik orokorra elastikoki gidatutako ardatza da. Ardatz muntatuen mahuken eta bogiearen bastidorearen arteko loturak gantz-kaxen bidez egiten dira. Lotura horietako bakoitzaren alboko zurruntasunak  $K_y$  aldagaiaren bidez izendatzen dira, eta luzerakoak  $K_x$  bidez. Gainera, pentsa daiteke  $C_x$  eta  $C_y$ , hau da, pseudo-irristadura indarraren eta pseudo-irristaduraren arteko erlazioak, desberdinak direla luzetarako eta zeharkako ardatzetan. Kasu horretan,  $V_c$  abiadura kritikoa agertzen da. Abiadura horren azpitik ardatz muntatua dinamikoki egonkorra dela bermatzen da trenbide zuzenetik zirkulatzen duenean, eta horren gainera, ostera, ezegonkor bihurtuko dela. Abiadura kritikoa  $V_c$  balioa (4) ekuazioan adierazten da.

$$V_c = \sqrt{\frac{2d^2 \left( \frac{K_x}{C_x} + \frac{K_y}{C_y} \right) \left( \frac{Md^2}{C_y} + \frac{I}{C_x} \right)}{\left( \frac{Md^2}{C_y} + \frac{I}{C_x} \right) \frac{\delta_0}{r_0} d - \left( \frac{Md^2}{C_y} \frac{K_x}{C_x} + \frac{I}{C_x} \frac{K_y}{C_y} \right)} \quad (4)$$

Ekuazio hori  $C_x$  eta  $C_y$  berdinak direla onartuz sinplifikatu daiteke, bai eta ardatz muntatu baten  $M$  masa gurpiletan kontzentratzen dela ere. Kasu horretan, gurpil bakoitzak  $M/2$  balioko masa izango lukeela beteko litzateke, eta plano horizontalean ardatz muntatuaren inertzia (5) ekuazioan adierazten den bezala kalkulatu litzateke.

$$I = 2 \cdot \left( \frac{M}{2} \cdot d^2 \right) = M \cdot d^2 \quad (5)$$

Bi baldintza horiekin, (4) ekuazioa (6) ekuazioan agertzen den bezala idatz daiteke.

$$V_c = \sqrt{\frac{K_x + K_y}{\left( \frac{\delta_0}{r_0 d} - \frac{(K_x - K_y)^2}{4C^2} \right) M}} \quad (6)$$

(6) ekuazioa ikusita, erraza da eredu sinplifikatu horretarako baliozkoak diren ondorio hauek ateratzea:

- Ardatz muntatuaren masa izendatzailean agertzen da; beraz, haren balioa handituz gero, abiadura kritikoa murriztuko litzateke eta, ondorioz, ezegonkortasun dinamikoa sortuko litzateke.
- $K_x$  eta  $K_y$  zurruntasunak zenbakitzailean agertzen dira; beraz, itxuraz, zenbat eta handiagoak izan, orduan eta handiagoa izango da

abiadura kritikoa. Hala ere, baldintza horrek muga bat du; izan ere, lehen esan bezala, ardatzak bastidorera modu zurrunean konektatuta dituen bogie bat, hau da,  $K_x = K_y = \infty$ , ezegonkorra da zerotik gorako abiaduran.

- Gurpilen konikotasuna izendatzailearen lehen zatian agertzen da, zeinu positiboarekin. Beraz, konikotasuna handitzeak abiadura kritikoa murriztea ekarriko luke. Horrek azaltzen du abiadura handiko trenetan trenbide arruntetan erabiltzen den konikotasunaren erdia erabiltzearen joera.
- Errodaduraren erradio nominalarekin eta trenbidearen zabalarekin, kontrakoa gertatzen da, izendatzailearen zati positiboa zatitzen baitute. Bi parametro horietako edozein handituz gero, abiadura handitu egingo da, eta, beraz, egonkortasun dinamikoa erraztu egingo da. Esate baterako, lokomotorren errodadura-erradioak atoian eramandako kotxeenak baino askoz handiagoak izaten dira, neurri batean, lokomotorrek ardatzetan esekita ez dagoen masa handiagoa izan dezaketela konpentsatzeko, erreduktoreak eta transmisioa direla eta. Trenbidearen zabalerrari dagokionez, ondorioztatzen da Iberiar Penintsulako linea arruntetan erabilitakoak, zabalera estandarra baino 233 mm handiagoa direnak, beti bermatzen dutela egonkortasun dinamiko handiagoa, eta, beraz, abiadura kritikoa handiagoa.
- Luzetarako eta zeharkako ardatzetan zurruntasunak desberdinak izateak ere egonkortasuna errazten du, beren arteko desberdintasuna ber bi izendatzailean kenduz agertzen baita. Beraz, handiak izateaz gain, desberdinak izatea ere komeni da. Ez da erraza baldintza hori praktikan lortzea, kautxu-metalezko esekidura primario konikoak erabiltzen direnean. Hori lortzeko modu erraz bat zulaketa bertikal txikiak egitea da, batez ere norabide batean,  $x$ -n adibidez, eta ez bestean.
- Azkenik, pseudo-irristadura eta pseudo-irristaduraren indarra lotzen dituen konstantea izendatzailearen zati negatiboa zatituz agertzen da. Beraz, zenbat eta txikiagoa izan, orduan eta handiagoa izango da izendatzailean geratzen den zatidura, eta orduan eta txikiagoa izango da izendatzailea bera erroaren barruan, eta egonkortasunerako joera handiagoa izango du ardatz muntatuak.

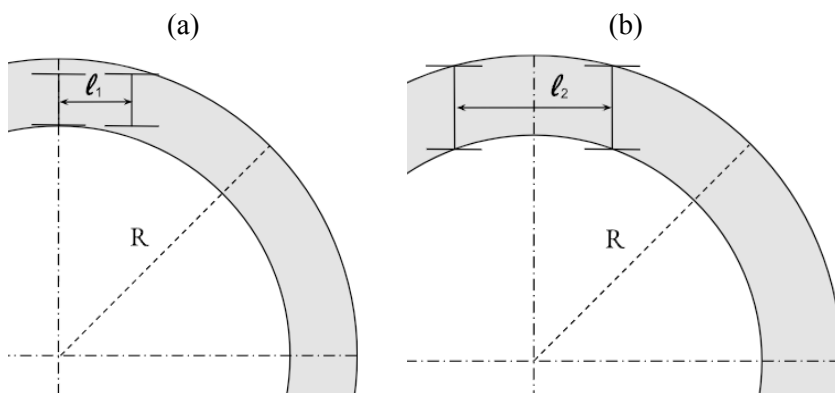
Aurrekoak erakusten du trenbide zuzenetik zirkulatzen duen ardatz muntatuaren dinamikaren azterketa konplexua dela, bai eta aurretik erabilitako eredu lineal sinpleekin ere. Horrek guztiak saiakuntza-bankua erabiltzearen beharra justifikatzen du, lehenik, emaitza analitikoaren baliozkotze esperimentala izateko, eta ondoren, zenbakizko emaitzak software egokiren batetik abiatuta balioztatzeko. Hori guztia, trenbidean proba-fasea igaro behar duten prototipoak eraiki aurretik.

### 3. KURBAN INSKRIBATZEA

Jakina denez, tren arrunten gurpilen tronkokonikotasunak bihurgunean modu naturalean inskribatzea ahalbidetzen du, kurbaren kanpoko eta barruko errailaren arteko garapenaren aldea behar bezala konpentsatuz. Hala ere, bogie oso baten kasuan, non ardatz muntatuek kurbari modu erradialean libre egokitzeko gaitasuna galdu duten, inskripzioa zaildu egiten da. Ondorioz, pseudo-irristadurak areagotu egiten dira, bihurgunean gainzabalerak batzuk izatera behartuz, besteak beste.

Bihurgune batean inskribatzen den bogie baten bi muga-egoera agertzen dira. Lehenengoa martxa librearen muga da eta 1.(a) irudiko egoerarekin bat dator, zeinetan  $l_1$  luzerako bogiea irudikatu den. Egoera horretan, aurreko gurpilearen erlaitzaren ertzak kanpoko errailaren kontra jotzen du, eta atzeko ardatza, berriz, erradialki kokatuta geratzen da bihurgunean. Bigarren ardatz horren kanpo-gurpileko gurpil-errail arteko ukipen-puntua plano bertikalaren barruan dago, diametrala, gurpilearen biraketa-ardatzetik igarotzen dena. Hala ere, lehen ardatzaren kanpo-gurpileko gurpil-errail arteko ukipen-puntua aurreratuta dago gurpilearen biraketa-ardatzetik igarotzen den plano bertikal diametral batek erraila moztuko lukeen gunearikiko.

Mugako bigarren egoera martxa behartuaren muga da eta 1.(b) irudiko egoerari dagokio, zeinetan  $l_2$  luzerako bogiea irudikatu den. Han, bogiea kurban sartzen da, baina muga-egoeran, hain zuzen ere, zeren eta, kurbaren erradioa gutxituz gero edo ardatzen arteko distantzia apur bat handituz gero, bogiea bihurgunean sartzean ezinezkoa izango bailitzateke. Muga egoera honetan, kurbaren kanpoaldeko bi gurpiletan gurpil-errail arteko kontaktua aurreratuta dagoen puntu batean gertatzen da (lehen ardatzaren kasuan, martxaren noranzkoan) edo atzeratuta dagoen puntu batean (bigarren ardatzaren kasuan), gurpil horietako bakoitzaren biraketa-ardatzetik igarotzen den plano bertikal diametral batek erraila moztuko lukeen gunearikiko.



1. irudia. (a) martxa librearen muga eta (b) martxa behartuaren muga.

Egoera horiek ondorio garrantzitsuak dituzte segurtasunaren alde-  
tik (erlaitzaren igotzea). Horrez gain, honako kasu hauek gerta daitezke:  
pseudo-irristadura altuak, ezohiko higadurak gurpilaren erlaitzean, kurba-  
ren kanpoko errailaren aurpegi aktiboaren higadura, korrugazioa sortzea,  
kontaktu-nekea, kirrinkak, eta abar.

Esan bezala, trenak izan behar dituzten ezaugarriak, bihurtzeko ondo ins-  
kribatzea errazteko, kalte egiten diote egonkortasunari trenbide zuzenetik zir-  
kulatzean. Beraz, trenaren diseinu-ezaugarri batzuk aurkitu behar dira, zirku-  
latu behar duen trazaduraren kurbaren gutxieneko erradioarekin bateragarriak  
direnak, eta, horien barruan, ezegonkortasun dinamikoa lortu baino lehen, tren-  
bide zuzenetik ahalik eta abiadurarik handiena izatea ahalbidetuko dutenak.

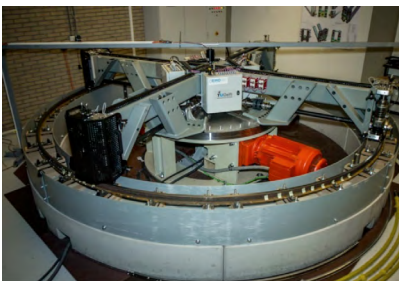
Lehen hurbilketa bezala, kurba baten inskripzio-azterketak metodo analiti-  
koen bidez egin daitezke, hala nola, Übelacker teoria [3] eta marruskadura-zen-  
troaren kontzeptua erabiliz. Bigarren fasea, inskripzioa zenbakizko metodoen  
eta *multibody* programen bidez modelizatzea izango litzateke, gurpil-errail ar-  
teko kontaktuaren lotura modelizatzeko gai direnak. Prototipoa eraiki eta pro-  
bak hasi aurretik, saiakuntza-banku bat izatearen aukera dago, analitikoki eta  
zenbakiz lortutako aurretiazko emaitzak esperimentalki egiaztatzeko.

#### 4. SAIKUNTZA-BANKU BAT APLIKAZIO BAKOITZERAKO

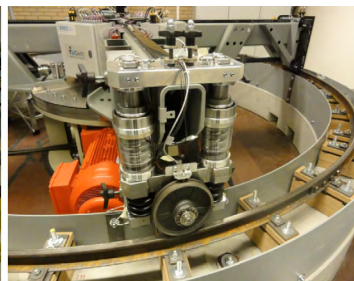
Atal honetan, dauden bankuetako batzuk eta horien aplikazio-eremua  
erakusten dira, bereziki egileek fisikoki ezagutu dituztenak.

Saiakuntza-banku asko daude, eskalatutako trenbideetatik ibiltzen diren  
ibilgailu instrumentatuetatik bereizten direnak. Azken horietako bat Acei-  
tuno *et al.* [4]-k egindakoa litzateke. Antzeko beste kasu bat da ibilgailu  
osoa izan beharrean gurpil bakarra duena, Delft-eko Unibertsitatean eraiki-  
tako [5], eta 2. irudian erakusten dena. Ikus daitekeenez, gurpil hori errail  
bakarra duen bide zirkular baten gainetik doa.

(a)



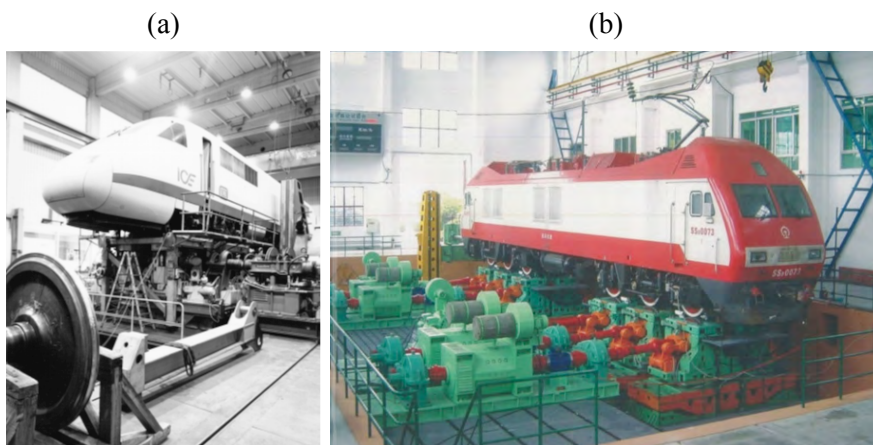
(b)



**2. irudia.** (a) Zili Li eta Rolf Dollevoet-en taldeak eraikitako entsegu-bankua [5]  
eta (b) xehetasuna.

Eskala osoko saiakuntza-bankuen kasuan, lehen garapenetako bat Roller Rig-a izan zen, Alemaniako Deutsche Bahn-ek Munich-Froimann duen ikerketa eta garapen zentroarena, 1977an erabiltzen hasi zena. 1982an, 500 km/h-ko abiadura egin ziren entseguak (ikus 3(a). irudia) [6].

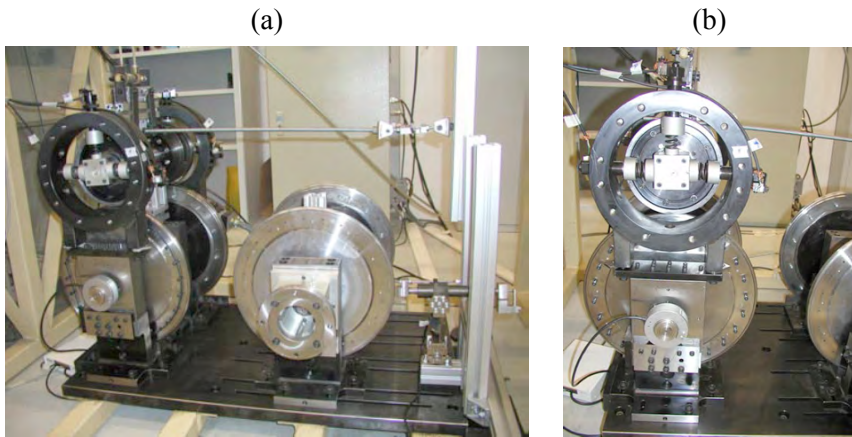
3(b). irudiak 3(a). irudian azaltzen den saiakuntza-bankuaren baliokidea erakusten du, Chengduko South West Jiaotong Unibertsitateko Traction Power State Key Laboratory-n dagoena. Azken horretan, abiadura handiko tren txinatarren trakzio-buruak entseatzen dira. Segurtasun arazoengatik, bisitariak eraikinaren goiko leihoetatik baino ezin ditu abiadura handiko probak ikusi. Saiakuntzaren abiadura pantaila batean agertzen da, hormaren goiko aldeko panelean, argazkiaren ezker aldean. Entseguetan zehar, 270 km/h-ko abiaduratik aurrera, arrabolen (errailaren lana egiten dute) alboetan kitzikapenak eragiten hasten dira, ibilgailuaren egonkortasuna egiaztatzeko zirkulazio-abiadura handietan.



**3. irudia.** (a) Alemaniako Deutsche Bahn-en saiakuntza-bankua [6] eta (b) Traction Power State Key Laboratory-ren saiakuntza-bankua.

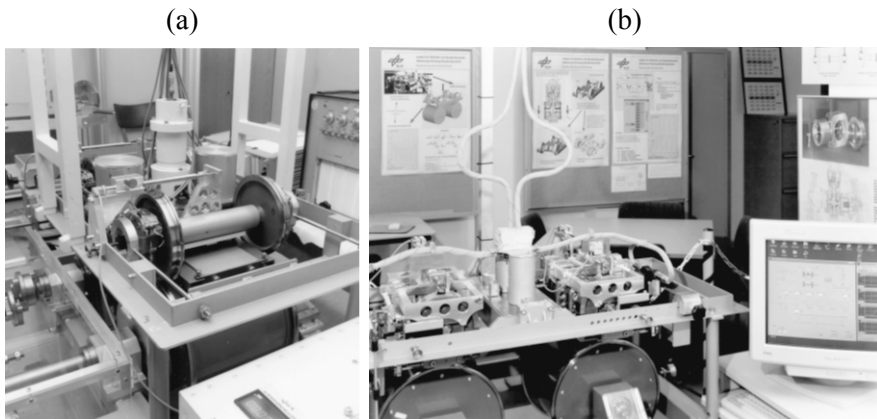
Oso ugariak dira eskalatutako arraboldun bankuak, jarraian deskribatuko dugun bezala. Marruskadura-koefizienteak neurtzeko aplikazioei dagokienez, 4. irudian agertzen den Torinoko Politeknikoan egindako bankua nabarmentzen da. Banku hori 1/5 eskalan eraikita dago, eta, ikus daitezkeenez, esekitako ardatz muntatu bat du, lehen arrabol-parearen gainean errodatzen duena.





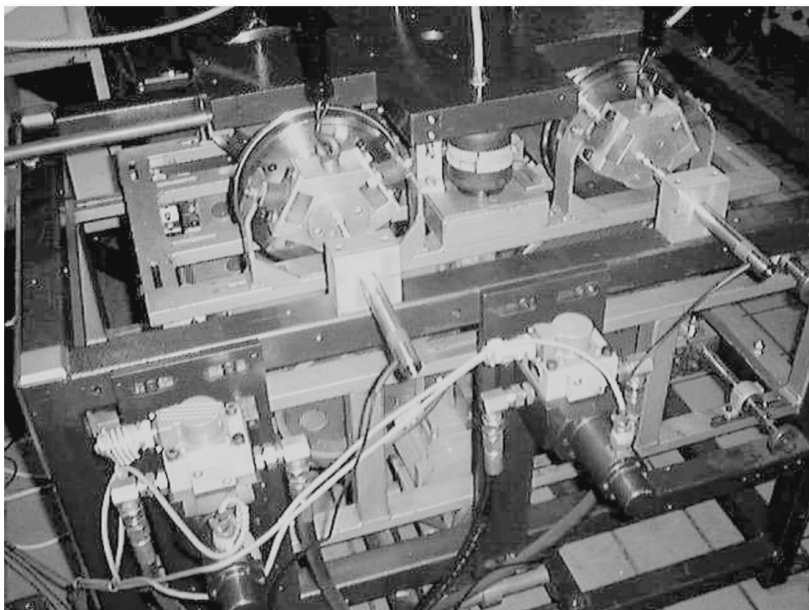
**4. irudia.** Torinoko Politeknikoan eraikitako arrabol-bankua: (a) Argazki osoa eta (b) esekidura-sistemaren xehetasuna [7].

Muga-zikloak eta egonkortasuna aztertzeko arrabol-bankuei dagokienez, 80ko hamarkadako lehenengo garapenetako bat Delft-eko Unibertsitateak egindakoa da, MAN-en bogie berri bat aztertzeko DLR-ri utzia Banku horrek ere 1/5 eskala du, eta 5(a). irudian agertzen da, lehen aipatutako bogiearen saiakuntzetako bat egiten duen bitartean. Irudiaren eskuineko aldeak (5(b) irudia) edozein bogietarako egokia den saiakuntza-banku horren eboluzioa erakusten du, bogie ezohikoentzako ere baliozkoa dena [6].



**5. irudia.** (a) 1/5 eskalako bankua eta (b) bankuaren eboluzioa [6].

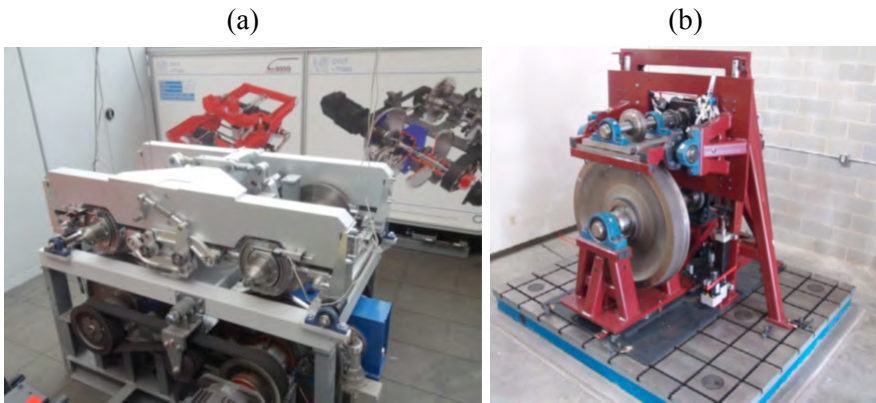
Manchester Metropolitan University-ko Rail Unit-ek ere, gaur egun Huddersfieldeko Unibertsitatean kokatua, 250 mph abiadura maximoetarako eskalako saiakuntza-banku propioa garatu zuen. Aukeratutako eskala ere 1/5 izan zen, eta azelerometroak, desplazamendu-transduktoreak eta galga estentsometrikoak ditu. Helburu hauek ditu: gurpil-errail arteko higadura aztertzea, esekidura desberdinen portaera ezagutzea, errodadura independenteko sistemen ebaluazioa, bihurgunean inskripzioa aztertzea, bai eta banku osoaren inklinazioaren bidez peraltea sartzea ere, bihurgunean bidearen geometria simulatzeko, eta abar. Banku hori 6. irudian ikus daiteke.



**6. irudia.** Manchester Metropolitan University-ko Rail Unit-en saiakuntza-bankua [6].

Aipatu beharreko beste arraboldun banku bat Pragako CTU-rena da [8], bogie osoak entseatzeko erabiltzen dena, baina kasu honetan 1/3,5 eskalan. Banku hori 7(a). irudian agertzen da.

Kasu jakin batzuetan, gurpilaren eta errailaren arteko kontaktuaren problematika ikertu behar da, bogiearen beste faktoreetako batzuek eraginik izan gabe. Egoera horietan nahiago izaten da gurpil bakarreko bankuak diseinatzea, errailaren lana egingo duen disko bakar baten gainean biraka. Horrelako banku bat Virginia Tech-ena da [8], 7(b). irudian agertzen dena.



**7. irudia.** (a) CTU-Praga-ren saiakuntza-bankua eta (b) Virginia Tech-en bankua [8].

## 5. SAIKUNTZA-BANKUA UPV/EHU-N

Ingeniaritza Mekanikoa Sailak saiakuntza-banku bat eraiki du bogie eta ardatz muntatueterako, kurba baten inskripzioan gertatzen diren fenomenoak eta trenbide zuzenetik zirkulatzean agertzen diren ezegonkortasun dinamikoak ulertzera bideratua. Aukeratutako trenbidearen zabalera 5» da, 0,127 m Nazioarteko Sistemari. Eskala 1:12 da, osagai estandarrak eskuratzeko erraztasunagatik aukeratua, normalean tren tripulatuak esaten zaiena-ekin bat datorrelako.

Bankuaren bidez trenbide zuzen, baita kurba batetik zirkulazioa simulatu ahal izatearen premisak (gurpil bakoitzaren euskarriaren abiadura lineala desberdina izatea lortu behar da) bi motor independente erabiltzearen komenigarritasuna ekarri zuen.

Lortu nahi ziren gehieneko abiaduren kalkuluek (300 km/h-ko abiadurei dagozkienak errealitatean) eta probatu beharreko ardatz eta bogien gehieneko pisuak (5 kg inguru), eta, ondorioz, gainditu beharreko marruskadura-indarrek, gomendagarria egin zuten gutxienez 125 W-eko potentziako bi motor edukitzea.

Motor mota bakoitzaren abantailak eta desabantailak aztertu ondoren, arreta berezia jarriz prestazioei, erregulazioari, kontrolari, elikadurari eta multzoaren prezioari, aplikazio honetarako korrante zuzeneko motorrak erabiltzea erabaki zen. Halaber, sare elektrikora konektatu ahal izatea erabaki zen, bateriak erabili beharrean. Soluzio horrek abantailak zituen motor asinkrono trifasikoen aldean, horiek hiru pultsu-erregulagailu beharko baitzituzten, bankuaren prezioa eta tamaina handituz. Kasu honetan, korrante zuzeneko motorren beste abantaila handi bat segurtasuna zen. Izan ere, lan egiteko segurua den tentsio maximoa, elektrokuzioa gertatuz gero, giza gorputzean kalte nabarmen-

nik eragiten ez duena, 48 V-koa da giro lehorrean eta 24 V-koa giro heze edo bustian. Bilatutako sistemak 24 V-tan funtzionatuko luke, eta, beraz, haren funtzionamendua elektrikoki segurua da edozein egoeratan.

Merkatuan motorrak bilatu eta gero, aukerarik onena 250 W, 24 V, 13.7 A eta 2.650 rpm-koa zela ikusi zen. Aukeratutako motorra, artezgailua eta abiadura-erreguladorea erakusten ditu 8. irudiak.



### **8. irudia.** Motorra, aztergailua eta abiadura-erregulagailua.

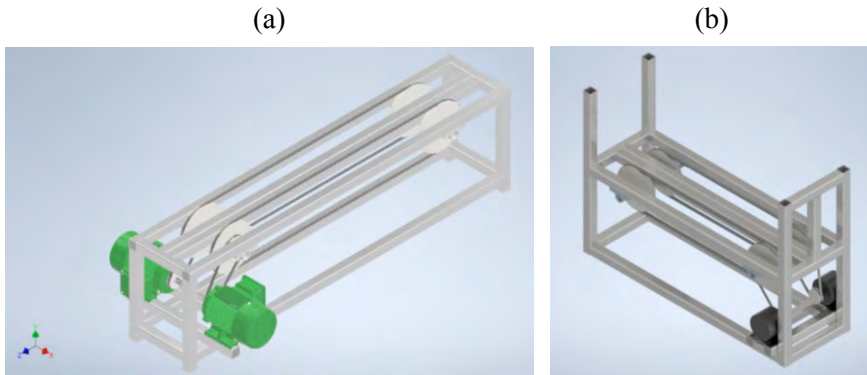
Artezgailuak 220 V-ko sarrera eta 24 V-ko irteera tentsiorako erosi dira. 1.500 W-rainoko potentzia du; zifra hori justifikatzen da elikatzen duen motorraren potentzia hirurekin biderkatu behar delako. Horrez gain, biko segurtasun-faktore bat gehitu behar da, gehiegi berotuko ez dela ziurtatzeko. Motorrak elikatzeke artezgailuak direla bermatu da, eta ez LED argiztapenerako, azken horiek ez baitira motorrekin bateragarriak. Aukeratutako artezgailuen abantaila da doikuntza-torloju bat dutela, irteerako tentsioa doitzeko eta, horrela, artezgailutik motorrera meta daitekeen errorea murrizteko, behar den tolerantziara iritsi arte.

Motorraren abiadura-erregulagailuaren ezaugarriak DC 6-60 V dira, eta 12 V, 24 V, 36 V eta 48 V-ko iturriekin lan egin dezakete, aplikazio honetarako egokiak, eta 30 A arte, pultsu zabalerako modulazioarekin (*Pulse Width Modulation*, PWM). Pulsu zabalerako modulazioa duen erregulagailuaren funtzionamendua aldizkako seinale baten lan-zikloa aldatzean oinarritzen da (senoidala edo karratua, adibidez), karga batera bidaltzen den energia-kantitatea kontrolatzeko.

PWM-ak korronea erregulatzen du seinale elektriko baten pultsuen zabalera aldatuz, horrela motorrari emandako potentzia kantitatea doitzuz. Erregulagailuak erregulazio-tolerantzia izan behar du, erradio handiko kurba bateko inskripzioa simulatu ahal izateko. Kasu horretan, motor baten eta besteren artean egon behar duen abiadura-aldea oso txikia da. Erregulagailuaren ardura diferentzia hori ematea da, eta potentziometroak duen ibilbide minimoaren arabera, diametro handiagoko edo txikiagoko kurbak simulatu ahal izango dira.

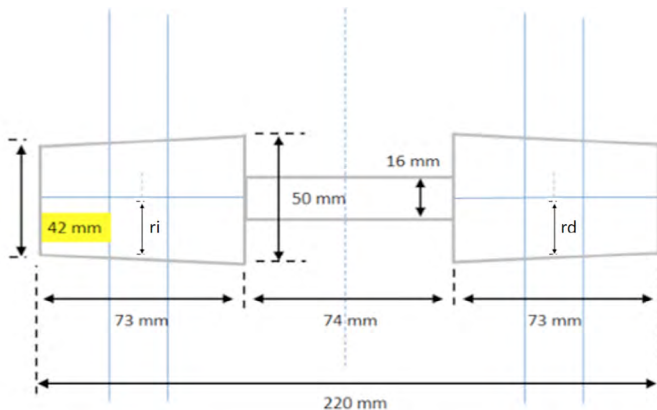
Erregulagailu horrek, zehazki, % 0tik % 100era funtzionatzen du, zenbaki oso guztietatik pasatuz; beraz, motor baten eta besteren artean teoriarian izan dezakegun alde txikiena % 1-ekoa da. Beraz, motorraren gehieneko abiadura 3.300 rpm-koa bada, doitu ahal izango duen gutxieneko aldea 33 rpm-koa izango da.

9. irudiak hasierako 3D diseinuaren lehen eredua (a) eta diseinu renderizatua (b) erakusten ditu.



**9. irudia.** (a) Hasierako diseinua eta (b) diseinu renderizatua.

Motorrek elkarren artean duten biraketa-abiaduraren aldea kontrolatzea funtsezkoa da zuzen batetik zirkulazioa mantentzeko eta bihurgunean behar bezala inskripzioa simulatzeko. Fabrikatu eta entseatzeko diren ardatzetatik, 10. irudian erakusten dena zabalera iberikoan erabiltzen den konikotasun bera duen bikonoa da, hau da,  $1/20$  edo  $0,05$ . Gradutan adierazita, konikotasun hori  $3,1^\circ$  da.



**10. irudia.**  $1/20$  konikotasuna duen bikonoa.

Konikotasun horretako bikono batentzat, bi motorren arteko biraketa-abiaduran dagoen ezberdintasunen ondorioak 1. taulan azaldutakoak dira. Han, lehenengo bi zutabeek abiaduraren aldea erakusten dute (DV), m/s-tan eta % -etan, hurrenez hurren. Hirugarren zutabeak ardatz muntatuaren zeharkako desplazamendua erakusten du (y), abiadura-diferentzia horren ondorioz gertatuko dena. Taula honetan ikus daitekeenez, zirkulazioa zuzen batetik simulatuz, bi motorren arteko biraketa-abiaduraren aldea % 1ekoa izanik, ardatz muntatuak akats hori 2,12 mm-ko zeharkako desplazamenduarekin konpentsatuko du. Zifra hori guztiz onargarria da.

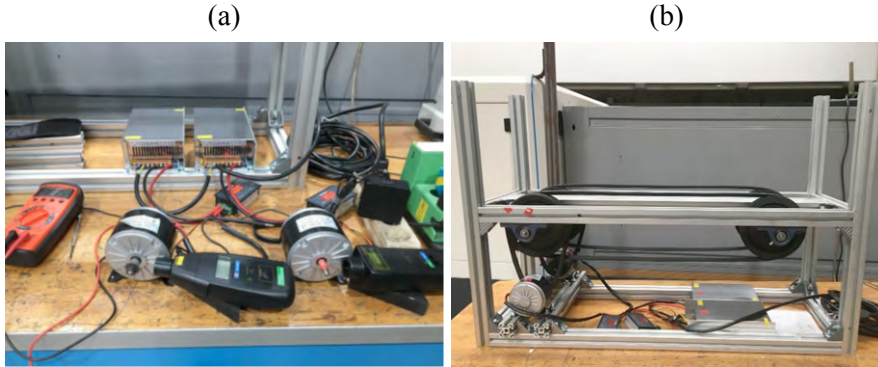
Azken lau zutabeek simulatu nahi den kurbaren erradioa bi motorren artean eragin behar den biraketa-abiaduran dagoen aldearekin erlazionatzeko aukera ematen dute. Adibidez, 1.500 m-ko erradio-kurba batek motorren biraketa-abiaduren artean % 0,1eko aldea eragitea eskatuko luke.

**1. taula.** Kontaktu bakoitzaren abiadura-aldea, zeharkako desplazamenduaren eta kurbaren erradioaren arteko erlazioa

DV (m/s)	DV (%)	y (mm)	R eskala(m)	ri (mm)	rd (mm)	R erreala (m)
0,008	0,1	0,21	127,00	23,21	23,19	1.500,00
0,016	0,2	0,42	63,50	23,22	23,18	750,00
0,024	0,3	0,64	42,33	23,23	23,17	500,00
0,032	0,4	0,85	31,75	23,25	23,15	375,00
0,040	0,5	1,06	25,40	23,26	23,14	300,00
0,048	0,6	1,27	21,17	23,27	23,13	250,00
0,056	0,7	1,48	18,14	23,28	23,12	214,29
0,064	0,8	1,69	15,88	23,29	23,11	187,50
0,072	0,9	1,91	14,11	23,30	23,10	166,67
0,080	1,0	2,12	12,70	23,32	23,08	150,00
0,088	1,1	2,33	11,55	23,33	23,07	136,36
0,096	1,2	2,54	10,58	23,34	23,06	125,00
0,104	1,3	2,75	9,77	23,35	23,05	115,38
0,112	1,4	2,96	9,07	23,36	23,04	107,14
0,120	1,5	3,18	8,47	23,37	23,03	100,00
0,128	1,6	3,39	7,94	23,39	23,01	93,75
0,136	1,7	3,60	7,47	23,40	23,00	88,24
0,144	1,8	3,81	7,06	23,41	22,99	83,33
0,152	1,9	4,02	6,68	23,42	22,98	78,95
0,160	2,0	4,23	6,35	23,43	22,97	75,00

Aurrekoaren ondorioz, beharrezkoa izan da motor, artezgailu eta abiadura-erreguladore multzo bakoitzaren abiadurak doitzea, dagozkion ta-

kometroen bidez (ikus 11(a). irudia), portaera egokia lortuz, desbideratze nabarmenik gabe. Bankuaren multzoa, metakrilatoz babesteko alboko panelak jarri gabe, 11(b). irudian ikus daiteke.



**11. irudia.** (a) Takometroak eta (b) banku multzoaren antolaketa.

## 6. ONDORIOAK

Artikulu honetan UPV/EHU diseinatu eta eraikitako ardatz muntatueta-rako eta trenbideko bogietarako saiakuntza-bankua deskribatu da. Bankuaren lehen helburua da ardatzak eta bogieak zuzen batetik zirkulatzeko dutela simulatzea, ezegonkortasunak aztertuz, erraila simulatzen duen elementuaren aitzinamendu-abiadura pixkanaka handitzen den heinean. Bigarren helburua da ardatz edo bogien kurbako inskripzioa aztertzea. Artikuluan deskribatzen dira azkenean egokienak izan diren osagaiak, bereziki motorrei, artezgailuei eta abiadura-erregulagailuei dagokienez. Poleek mekanizazio-lan neketsuak behar izan dituzte, eta errailak simulatzen dituzten uhalei eusten dieten gidetxoak bat behar izan dute. Oso inbertsio txikiarekin lortu da helburu hori.

Eraikitako bankuak oraindik baditu erronkak. Gaur egungo egoeran, peralte-gutxiegitasun nulua dugu. Hau da, kurban dauden ardatzen edo bogien peralte praktikoa peralte teorikoarekin bat baletor bezala jokatzen du, eta ez dago konpentsatu gabeko zeharkako azeleraziorik. Etorkizuneko helburuetako bat azelerazio hori kanpotik eragitea da, baita bankuari kulunka eragitea ere, peralte praktikoa egokia simulatzeko. Bigarren erronka bat bogie ezohikoen fabrikazioa litzateke [8].

## 7. ESKER ONAK

Egileek eskerrak eman behar dizkiete Zientzia eta Berrikuntza Ministerioari (MCI), Estatuko Agentziari (AEI) eta Eskualde Garapeneko Eu-

ropako Funtsa-ri (FEDER-ERDF) erakunde finantzataile gisa (PID2019-109483RB-I00 kontratuaren bidez), bai eta Eusko Jaurlaritzari ere, IT1464-22 eta KK-2023/00029 atalen bidez emandako diru-laguntzazatik, eta doktoretza aurreko laguntzazatik (PRE\_2021\_2\_0047).

## BIBLIOGRAFIA

- [1] SIMPACK. 2018. *Documentation, Dassault Systemes Simulia Corp.* France.
- [2] ASTARLOA J. 2019. *Trenbideak ikasgaiaren apunteak*. Bilboko Ingeniaritza Eskolako Argitalpen Zerbitzua. Bilbo.
- [3] IWNICKI S. 2006. *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*. Taylor & Francis.
- [4] ACEITUNO J.F., CHAMORRO R., GARCÍA-VALLEJO D., eta ESCALONA J.L. 2017. «On the design of a scaled railroad vehicle for the validation of computational models». *Mechanism and Machine Theory*, **115**, 60-76.
- [5] NAEIMI M., LI Z., PETROV R., SIETSMA J. eta DOLLEVOET R. 2018. «Development of a new downscale setup for wheel-rail contact experiments under impact loading conditions». *Experimental Techniques*, **42**, 1-17.
- [6] JASCHINKI A., CHOLLET H., IWNICKI S.D., WICKENS A. eta WÜRZEN J. 1999. «The application of roller rigs to railway vehicle dynamics». *Vehicle System Dynamics*, **31**, 345-392.
- [7] BOSSO N., GUGLIOTTA A., SOMÀ A. eta SPIRYAGIN M. 2009. «Methodology for the determination of wheel-roller friction coefficient on 1/5 scaled test rig». *8<sup>th</sup> International Conference on Contact Mechanics and Wear of rail/wheel systems (CM2009)*. Firenze, Italy.
- [8] MYAMLINA S. eta lankideak. 2017. «Testing of railway vehicles using roller rigs». *Procedia Eng*, **187**, 688-695.
- [9] SANTAMARIA J. eta VADILLO E.G. 2004. «Equivalent conicity and curve radius influence on dynamical performance of unconventional bogies». *Vehicle System Dynamics*, **41**, 133-142.