

Trenbide ardatzen eta bogien saiakuntza-bankua

(Railway axle and bogie test bench)

Paul Gómez-Tejedor¹, Ernesto García Vadillo^{1*}, Nekane Correa¹, Javier Santamaría¹, Rakel Robles¹, Olatz Oyarzabal¹, Javier Astarloa¹, Raúl Cosgaya¹, Felipe Uriondo²

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

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

LABURPENA: Artikulu honek UPV/EHU-ko Ingeniaritza Mekanikoa sailean diseinatu eta eraikitako roller rig edo bogien saiakuntzarako bankua erakusten du. Saiakuntza-bankuaren trenbide zabalera 5"ekoa da. Eskala hau aukeratzearren arrazoia merkatuan eskala horretako osagaiak aurkitzeko erraztasuna da. Artikuluan, hainbat laborategi, ikerketa-zentro, unibertsitate eta trenbide-sektoreko enpresetan dauden ardatz, bogie eta trenen saiakuntza-bankuen azterketa konparatiboa egiten da. Horrez gain, saiakuntza-banku horien beharra, aplikazio-eremua, prestazioak eta mugak aztertzen dira. Ikasketa konparatibo horren helburua, artikulua honetan deskribatzen den saiakuntza-bankuaren ezaugarriak eta prestazioak mugatzea da. Bestalde, egindako proiektua deskribatzen da, hautatutako osagaiak eta horien justifikazioa aurkeztuz, beti ere 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

1

***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.garciavadillo@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.(2023). <<Trenbide-ardatzen eta bogien saiakuntza-bankua>>, Ekaia, xx, xx-xx. (https://doi.org/10.1387/ekaia.25888)

Jasoa: urtarilak 9, 2024; Onartua: maiatzak 8, 2024

ISSN 0214-9001-eISSN 2444-3225 / © 2024 UPV/EHU



Obra Creative Commons Atribución 4.0 Internacional-en lizentziapean dago

1. SARRERA

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

Lehenengo arazoari dagokionez, hau da, trenbide zuzenetan agertzen den ardatzen ezegonkortasun dinamikoiari dagokionez, trenaren zirkulazio-abiadura handitzean ematen da. Teorian, abiadura kritikoa bat dago, eta abiadura horren gainera 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 hau onartezina da eta trenak ezin du zerbitzuan abiadura kritikoa lortu. Arazo horren kontrola hartzeko, bogie 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 kurben kasuan batez ere, gurpilen konikotasun handia izatea da, errailen inklinazio berarekin konbinatuta. Bigarren aukera, esekidura primario oso biguna erabiltzea da, 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 gurpilarren (erlaitzetan) eta errailaren (kurbaren kanpoaldeko errailaren aurpegi aktiboan) higadurak murrizten dira. Horrez gain, kirrinkak ez sortzea lortzen da eta korrugazioa agertzearen aukerak txikiagotzen dira. Hirugarren aukera, errodadura independentea duten ardatzetara edo ezohikoak diren bogietara jotzea da.

Aipatutako faktoreen atariko diseinua egiteko, alde zuzenetik trenbide-dinamikako paketeren batekin egiaztatzea 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 ziurtatu daitezke, hala nola, esekitzen ez den masa, gurpilen errodadura zirkunferentzia nominalaren diametroa, gurpilarren profila, ardatzen arteko distantzia, etab. Hau 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 λ_1 Klingel (1) formularen bidez ematen den, non r_0 gurpil bakoitzaren errodaduraren erradio nominala den, d trenbidearen zabaleraren erdia den, eta δ_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 λ_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 (λ_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, λ_2 uhin luzerako oszilazioa izango du oreka posizioaren inguruan.

Analisi dinamiko bat egiten bada bogiea abiadura jakin batean zirkulatzen 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 honen erroak (p) kalkulatu, sistema edozein abiaduratan ezegonkorra dela lortzen da, zati erreala 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 orokorrena elastikoki gidatutako ardatza da. Ardatz muntatuaren 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 honetan, 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.

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

Ekuazio hori C_x eta C_y berdinak direla onartuz sinplifikatu daiteke, bai eta ardatz muntatu baten M masa gurutetan kontzentratzen dela ere. Kasu horretan, gurutil 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 honetarako baliozkoak diren ondorio hauek ateratzea:

- Ardatz muntatuaren masa izendatzailean agertzen da, beraz, bere 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 zabalerekin kontrakoa gertatzen da, izendatzailearen zati positiboa zatitzen baitute. Bi parametro horietako edozein handituz gero, abiadura handitu egingo da, eta, beraz, egonkortasun dinamikoa erraztuko 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 dela eta. Trenbidearen zabalerei dagokionez, ondorioztatzen da Iberiar Penintsulako linea arruntetan erabilitakoak, zabalera estandarra baino 233 mm handiagoa direnak, beti bermatzen dutela egonkortasun dinamiko handiagoa, eta, beraz, abiadura kritiko 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-irristadura indarra lotzen dituen konstantea izendatzailearen zati negatiboa zatituz agertzen da. Beraz, zenbat eta txikiagoa izan, orduan eta handiagoa izango da izendatzailean geratzen den zatidura, 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

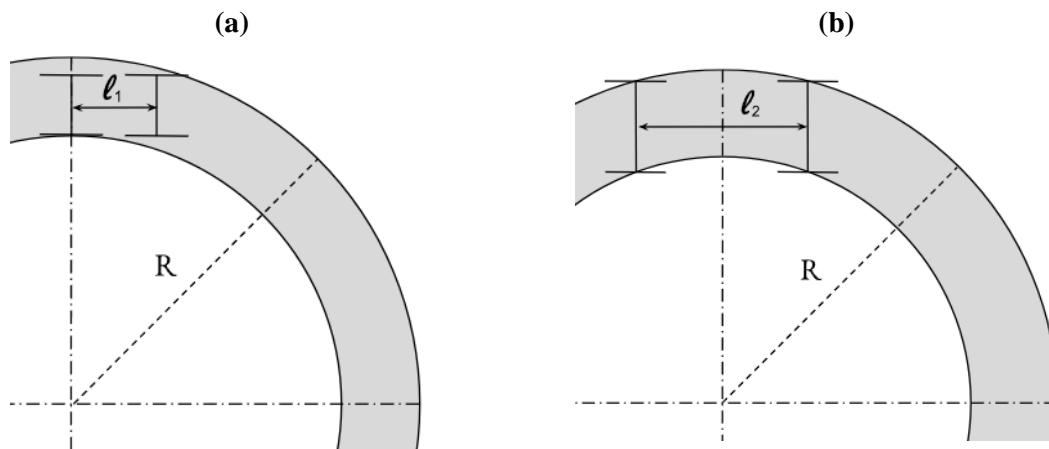
esperimentala izateko, eta ondoren, zenbakizko emaitzak software egokiren batetik abiatuta balioztatzeko. Hori guztia, trenbidean proba-fasea igaro behar duten prototipoak eraiki aurretik.

3. KURBAN INSKRIBATZEA

Jakina denez, tren arrunten gurpilen tronkokonikotasunak bihurgunean modu naturalean inskribatzea ahalbidetzen du, kurbaren kanpoko eta barruko errailaren arteko garapenaren alde behar bezala konpentsatuz. Hala ere, bogie oso baten kasuan, non ardatz muntatuek kurbari modu erradialean libre kokatzeko gaitasuna galdu duten, inskripzioa zailtzen da. Ondorioz, pseudo-irristadurak areagotu egiten dira, bihurgunean gainzabalera 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 da. Egoera horretan, aurreko gurpilaren erlaitzaren ertzak kanpoko errailaren kontra jotzen du eta atzeko ardatza, berriz, erradialki kokatuta geratzen da bihurgunean. Bigarren ardatz honen kanpo gurpileko gurpil-errail arteko ukipen-puntua plano bertikalaren barruan dago, diametrala, gurpilaren biraketa-ardatzetik igarotzen dena. Hala ere, lehen ardatzaren kanpo gurpileko gurpil-errail arteko ukipen-puntua aurreratuta dago gurpilaren 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 da. Bertan, bogiea kurban sartzen da, baina muga-egoeran, hain zuzen ere, kurbaren erradioa gutxituz gero edo ardatzen arteko distantzia apur bat handituz gero, bogiea bihurgunean sartzean ezinezkoa izango litzatekeelako. 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 hauek ondorio garrantzitsuak dituzte segurtasunaren aldetik (erlaintzaren igotzea). Horrez gain, hurrengo kasuak eman daitezke: pseudo-irristadura altuak, ezohiko higadurak gurpilaren erlaintzean, kurbaren kanpoko errailaren aurpegi aktiboaren higadura, korrugazioaren formakuntza, kontaktu-nekea, kirrinkak, etab.

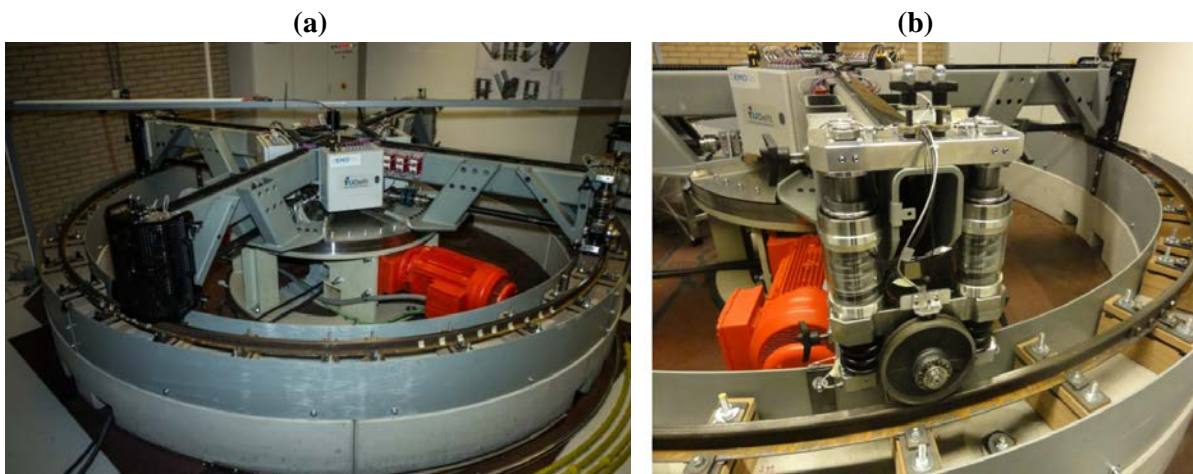
Esan bezala, trenak izan behar dituzten ezaugarriek, bihurtunean ondo inskribatzea errazteko, kalte egiten diote egonkortasunari trenbide zuzenetik zirkulatzean. Beraz, trenaren diseinu-ezaugarri batzuk aurkitu behar dira, zirkulatu behar duen trazaduraren kurbaren gutxieneko erradioarekin bateragarriak direnak, eta, horien barruan, ezegonkortasun dinamikoa lortu baino lehen, trenbide zuzenetik ahalik eta abiadurarik handiena izatea ahalbidetuko dutenak.

Lehen hurbilketa bezala, kurba baten inskripzio-azterketak metodo analitikoaren bidez egin daitezke, hala nola, Übelacker teoria [3] eta marruskadura-zentroaren kontzeptua erabiliz. Bigarren fasea, inskripzioa zenbakizko metodoen eta *multibody* programen bidez modelizatzea izango litzateke, gurpil-errail arteko kontaktuaren lotura modelizatzeko gai direnak. Prototipoa eraiki eta probak 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.

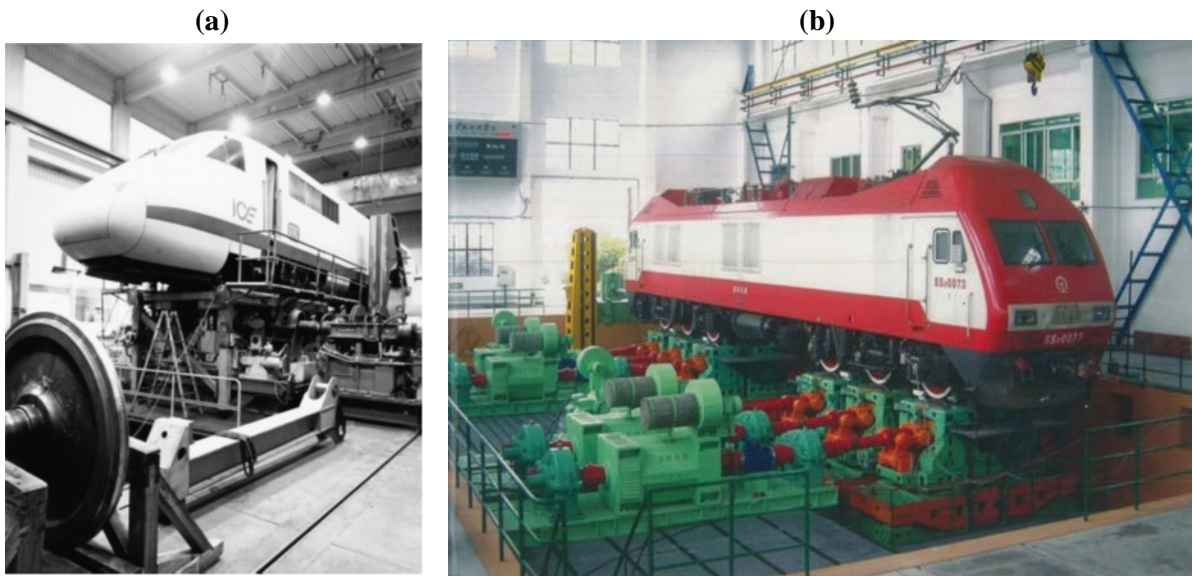
Saiakuntza-banku asko daude, eskalatutako trenbideetatik ibiltzen diren ibilgailu instrumentatuetatik bereizten direnak. Azken horietako bat Aceituno et al. [4] egindakoa litzateke. Antzeko beste kasu bat, ibilgailu osoa izan beharrean gurpil bakarra duena da, Delft-eko Unibertsitatean eraikitakoa [5],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



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

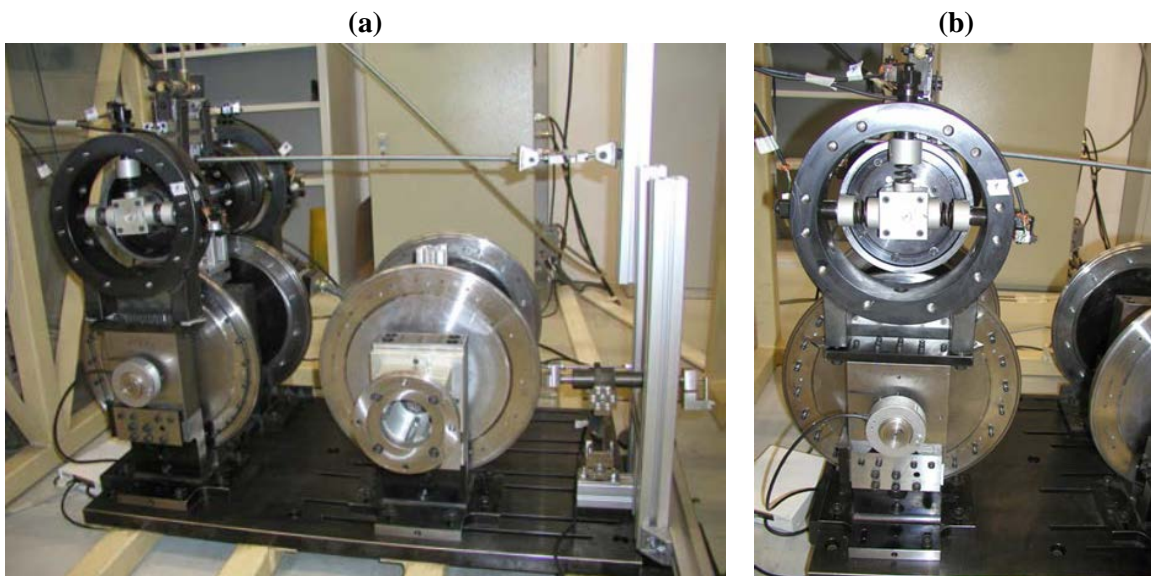
Eskala osoko saiakuntza-bankuen kasuan, lehen garapenetako bat Roller Rig-a izan zen, Alemaniako Deutsche Bahn-ek Munich-Froimannen duen ikerketa eta garapen zentroarena, 1977an erabiltzen hasi zena. 1982an, 500 km/h-ko abiadura egin ziren entseguak (ikus 3(a). irudia) [6].

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 arrazoiengatik, 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 daitekeenez, esekitako ardatz muntatu bat du, lehen arrabol-parearen gainean errodatzen duena.



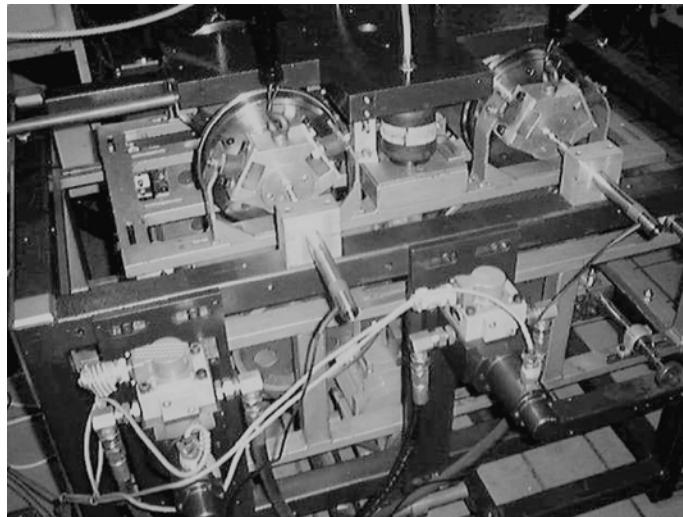
4. irudia. Torinoko Politeknikoan eraikitako arrabol-bankua: (a) Argazki osoa eta (b) esekidura-sistemaren xehetasuna [7].

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 lagatua. 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 balizkoa dena [6].



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

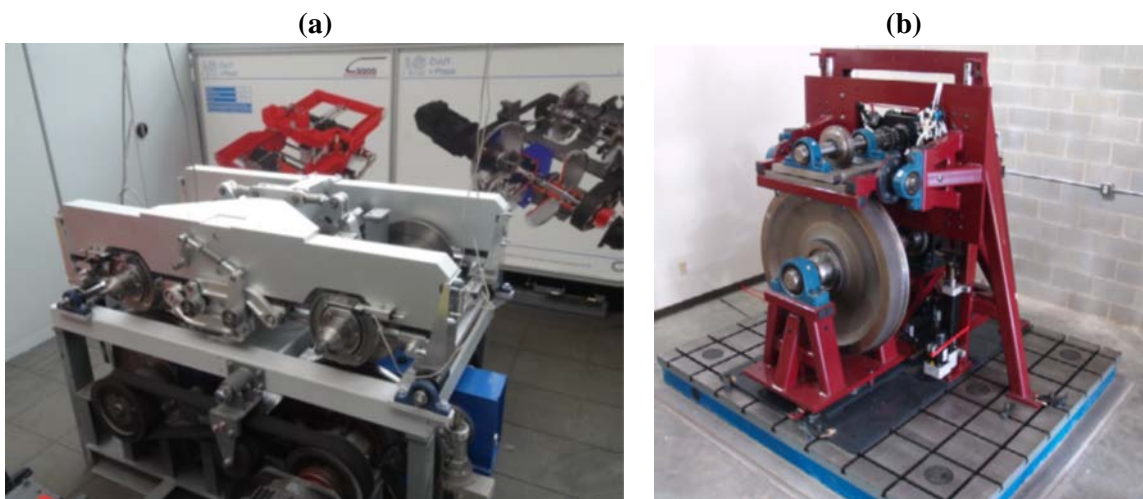
Manchester Metropolitan University-ko Rail Unit-ek ere, gaur egun Huddersfieldeko Unibertsitatean kokatua, 250 mph abiadura maximoetarako eskalako saiakuntza-banku propioa garatu zuen. Aukeratutako eskala ere 1/5 izan zen, eta azelerometroak, desplazamendu-transduktoreak eta galga estentsometrikoak ditu. Helburu hauek ditu: gurpil-errail arteko higadura aztertzeta, esekidura desberdinen portaera ezagutzeta, errodadura independenteko sistemen ebaluazioa, bihurgunean inskripzioa aztertzeta, baita banku osoaren inklinazioaren bidez peraltea sartzeta, bihurgunean bidearen geometria simulatzeko, etab. Banku hau 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 hau 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 muntatuetarako, 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 Sistemak. Eskala 1:12 da, osagai estandarrak eskuratzeko erraztasunagatik aukeratua, normalean tren tripulatuak esaten zaionarekin 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, gaintitu beharreko marruskadura-indarrek, gomendagarria egin zuten gutxienez 125 W-eko potentziako bi motor edukitzea.

Motor mota bakoitzaren abantaila eta desabantailak aztertu ondoren, arreta berezia jarritz 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 pulsu-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 nabarmenik 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, bere 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. 8. irudiak aukeratutako motorra, artezgailua eta abiadura-erreguladorea erakusten du.



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

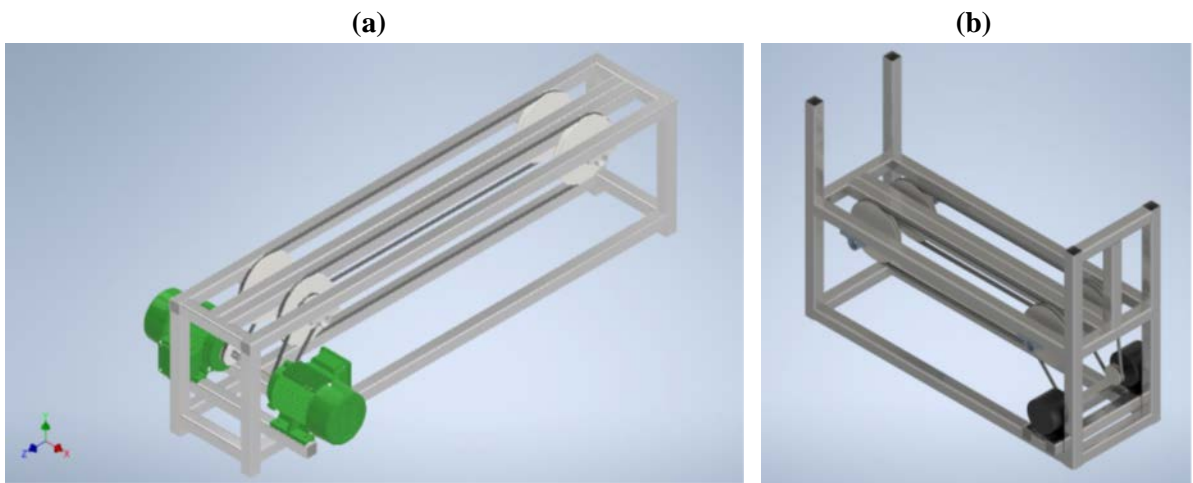
Arteztgailuak 220 V-ko sarrera eta 24 V-ko irteera tentsiorako erosi dira. 1.500 W-rainoko potentzia du, zifra hori elikatzen duen motorraren potentzia hirurekin biderkatu behar delako justifikatzen da. Horrez gain, biko segurtasun-faktore bat gehitu behar da, gehiegi berotuko ez dela ziurtatzeko. Motorrak elikatzeke arteztgailuak direla bermatu da, eta ez LED argiztapenerako, azken horiek ez baitira motorrekin bateragarriak. Aukeratutako arteztgailuen abantaila doikuntza-torloju bat dutela da, irteerako tentsioa doitzeko eta, horrela, arteztgailutik motorrera metatu 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, pulsu 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 pulsuaren 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 bestearen 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.

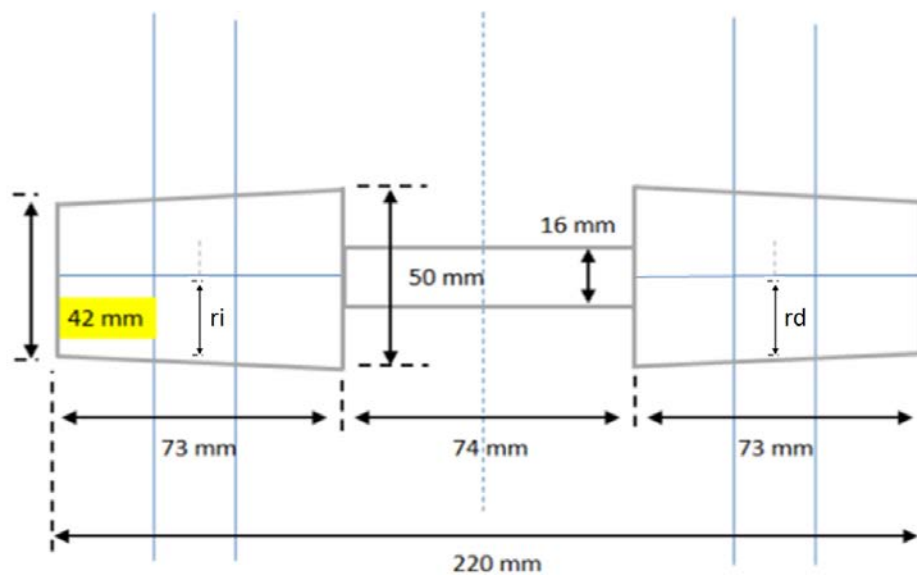
Erregulagailu horrek, zehazki, % 0tik % 100era funtzionatzen du, zenbaki oso guztietatik pasatuz; beraz, motor baten eta bestearen artean teoriaran izan dezakegun alde txikiena % 1-ekoa da. Beraz, motorraren gehieneko abiadura 3.300 rpm-koa bada, doitu ahal izango duen gutxieneko aldea 33 rpm-koa izango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

9. irudiak hasierako 3D diseinuaren lehen eredu (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 bihurtunean 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. Bertan, 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 desplazamendu 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 takometroen 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-n diseinatu eta eraikitako ardatz muntatuetarako eta trenbideko bogietarako saiakuntza-bankua deskribatu da. Bankuaren lehen helburua, ardatzak eta bogieak zuzen batetik zirkulatzen dutela simulatzea da, ezegonkortasunak aztertuz, erraila simulatzen duen elementuaren aitzinamendu-abiadura pixkanaka handitzen den heinean. Bigarren helburua, ardatz edo bogien kurbako inskripzioa aztertzea da. 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 gidek doikuntza bat behar izan dute. Oso inbertsio txikiarekin lortu da helburu hori.

Eraikitako bankuak oraindik badiu erronkak. Gaur egungo egoeran, peralte gutxiegitasun nulua dugu. Hau da, kurban dauden ardatzen edo bogien peralte praktikoa peralte teorikoarekin bat baletor bezala jokatzeko 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].

ESKER ONAK

Egileek eskerrak eman behar dizkiete Zientzia eta Berrikuntza Ministerioari (MCI), Estatuko Agentziari (AEI) eta Eskualde Garapeneko Europako Funtsa-ri (FEDER-ERDF) erakunde finantzatzaile gisa, PID2019-109483RB-I00 kontratuaren bidez, bai eta Eusko Jaurlaritzari ere, IT1464-22 eta KK-

2023/00029 atalen bidez emandako finantza-laguntzagarik, eta doktoretza aurreko laguntzagarik (PRE_2021_2_0047).

7. 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». *8th 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.