



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

**Partikula-azeleragailuei  
zuzendutako diagnostiko eta  
kontrol teknika aurreratuak**

*I. Badillo, J. Jugo eta J. Portilla*

557-563 or.

<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.i.77>

ANTOLATZAILEA:



BABESLEAK:



LAGUNTZAILEAK:



# Partikula-azeleragailuei zuzendutako diagnostiko eta kontrol teknika aurreratuak

I. Badillo eta J. Jugo eta J. Portilla

J. Feuchtwanger eta C. San Vicente eta V. Etxebarria

UPV/EHU. Zientzia eta Teknologia Fakultatea, Elektrizitate eta Elektronika saila

## Laburpena

Lan honek partikula-azeleragailuei zuzenduriko diagnostiko eta kontrolerako teknika aurreratuak auzerzten ditu. Alde batetik, sorta-posizioaren monitorea (BPM, Beam Position Monitor ingelesez) deritzon diagnostiko tresna baten garapena eta horrekin egindako saiakerak deskribatzen dira. Bestetik, maila baxuko RF (LLRF, Low Level-RF ingelesez) izeneko kontrol sistema digital baten garapena eta hura balidatzeko laborategi-montaia aurkezten da. Honekin batera, seinale azkarrak lagintzeak eta prozesatzeak dakarren kostua arintzeko, azpilaginketa izeneko teknika berritzailea eta berarekin lan egiteko garatutako metodologia aurkezten da.

**Hitz gakoak:** azpilaginketa, data-eskuratze azkarra, BPM, LLRF

## Abstract

*In this paper, advanced techniques for diagnostics and control applied in particle accelerators are presented. On the one hand, the development of a diagnostics tool known as Beam Position Monitor or BPM is presented, along with several experiments. On the other, a digital Low Level-RF or LLRF control system and the corresponding testbench for its validation is described. On top of that, an advanced sampling technique known as undersampling is described and used in the presented applications in order to deal with the cost-related drawbacks of the sampling of fast signals.*

**Keywords:** undersampling, fast data acquisition, BPM, LLRF

## 1 Sarrera eta motibazioa

Partikula azeleragailuak gaur egungo zientzia ulertzeko eta asmo handieneko esperimendu fisikoak burutzeko ezinbesteko tresnak dira. Haien koplexutasuna dela eta, erronka teknologiko handia suposatzen dute. Halere, partikula azeleragailuak ez dira soilik mugatzen esperimendu handietako esparrura. Partikula-azeleragailu gehienak aplikazio industrialean eta medikuetan erabiltzen dira, munduan milaka eginek. Hortaz, bere garrantziagatik, partikula-azeleragailuen inguruan egiten den ikerketa eta tresna berrien garapena oso bizia da.

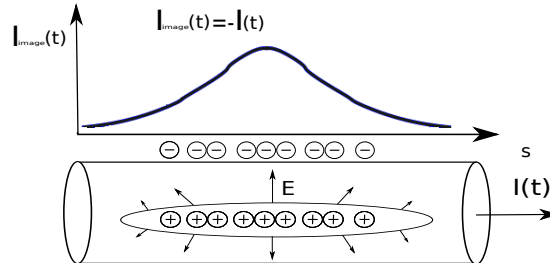
Lan honetan, partikula-azeleragailuetan ohiko diren bi tresna aurkezten dira, sorta-posizio monitorea (BPM, Beam Position Monitor ingelesez) diagnostikoa eta maila baxuko RF kontrol sistema (LLRF, Low Level-RF ingelesez). Honetaz gain, hauen bertsio digitalean lan egiteko aproposa den azpilaginketa izeneko lagintze teknika azaldu eta praktikan jartzen da.

BPMak, azeleradore lineal zein zirkularretako diagnostiko tresnarik ohikoenak dira (Shafer, 1989). Gailu hauek, azterketapean dagoen partikula sortaren diagnostiko ez-suntsitzaileak lortzeko erabiltzen dira. Bi oinarritzko neurketa eskaintzen dituzte:

- Sortaren masa zeharkako zentrua, hau da, posizioa.
- Partikula multzoen luzera-forma: profila.

Implementazio fisikoa eta oinarritzen diren teknologiaren arabera, BPMak hiru multzotan sailka daitezke (P. Forck, 2009): ebaketa lineal, stripline eta botoi motakoak. Lan honetan, azken mota horretakoak erabili izan dira, efektu kapazitiboan oinarrituta. Gailu horiek, partikula izpien eremu elektrokoak elektrodo txiki batzuetan induzituriko karga elektrokoak neurtzen dute, 1 irudian ikutzen den moduan. Eremu elektroko hau partikula multzo (bunch ingelesez) bakoitzarekin erlazionatuta dago, eta beraz,

1 Irudia: Partikula-sortak sorturiko irudi-korronea



denbora dependentea da. Ondorioz, pick-up izeneko sentsoreek jasotako neurketak frekuentzia altuko korrone alternoko seinaleak dira. Sortaren posizioa, hau da, sortaren masa zentrua kalkulatzeko, konduktore zentralaren inguruan zeharka kokaturiko lau sentsore erabiltzen dira. Aurrez aurreko sentsoreetan neurtutako tentsio diferentziak ematen du masa zentruaren kokapena plano bakoitzean, hurrenez hurren.

LLRF kontrol sistema, azeleragailuen beste ezinbesteko atalak dira. Haien eginkizuna, erresonantzia-kabitateetan partikula sortari gertatzen zaion energia transferentzia egokia bermatzea da. Horretarako, RF azelerazio eremuak kontrolatu eta partikula bunch-ekin sinkronizatu behar dira (Baudrenghien, 2011). Ohiko LLRF kontrol sistema batek, bi begizta ditu. Alde batetik, abiadura handiko begizta bat partikulek ikusten duten tentsioaren amplitudea eta fasea kontrolatzeko. Berrelikadura begizta hori, tentsio altuko iturriaren ripple-ak bezalako perturbazioak konpentsatzeko gai izan behar da, kabitatearen betetzea kontrolatzeaz gain. Bestetik, begizta motelago bat, erresonantzia-kabitatearen maiztasuna kontrolatzeko. Horrek, kabitatearen erresonantzia-maiztasun nominala mantentzen du temperatura aldaketan eta perturbazio mekanikoen aurrean.

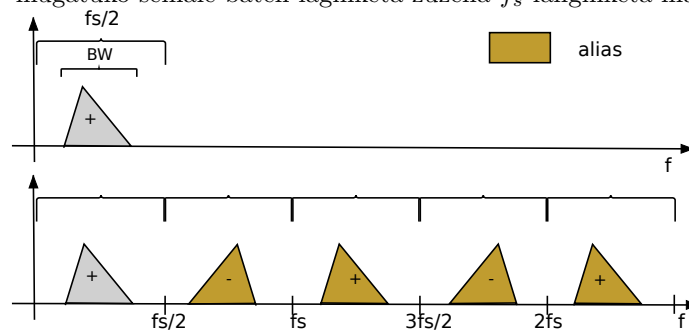
Aurretik azaldutako bi tresna horien garapenerak beharrezkoa den prozesaketa guztia era digitalean burutu da. Horrek, seinale analogikoen laginketa dakar, eta maiztasun altuko RF seinaleak izanda bi kasuetan, zenbait arazo suertatzen dira. Laginketa teknika ohikoak erabilia, oso lagintze azkarren erabilera nahitaezkoa suertatzen da, eta horrek, oso ekipamendu garestiak suposatzen ditu.

Nyquist-en laginketa teoremaren arabera,  $\omega_0$  banda zabalera mugatuko seinale bat  $\omega_s$  laginketa-maiztasunaz lagindurik, lortutako sekuentziak seinale originalaren informazio guztia edukiko du eta aliasing deritzon fenomeno ekidituko du. Beti ere  $\omega_s > 2\omega_0$  baldintzapean.

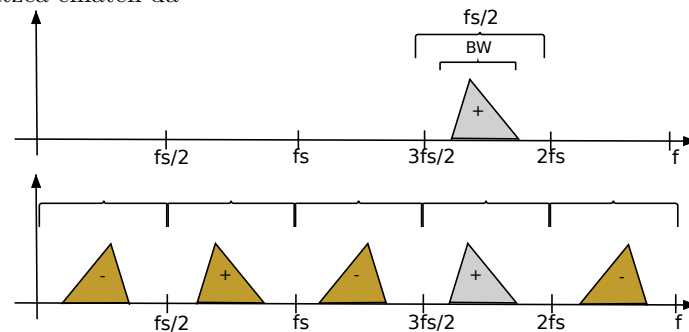
Hala ere, teorema horren bertsio modifikatu batek, Nyquist-Shannon-en teoremak, dio laginketa-maiztasun minimoa seinale originalaren banda zabaleraren (BW) bikoitza (eta ez maiztasun altueneko osagaiaren maiztasuna) izan behar dela seinale originala berreraiki ahal izateko:  $\omega_s > 2BW$ . Horrela, aliasing-a gertatzen da maiztasun-osagaien gainezarmena gertatu gabe. Aliasing hori, hau da, seinale originalaren errepikapen periodikoak, maiztasun-espektroan desplazaturik agertzen da (Lyons, 2001).

Modu horretan, azpilaginketa izeneko laginketa teknika fenomeno horretaz baliatzen da eta behe-maiztasunetan agertzen diren alias-ak erabiltzen ditu seinale originala berreraikitze (Mishali eta Eldar, 2011). Horrek, lagintze motelagoa ahalbidetzen du, eta ondorioz, koste baxuagoko lagintze-txartelen erabilera. Laginketa zuzenaren (oversampling) eta azpilaginketaren (undersampling) arteko desberdintasunak 2 eta 3 irudian ikusi daitezke.

2 Irudia: BW mugatuko seinale baten laginketa zuzena  $f_s$  langinketa-maiztasuna izanik



3 Irudia: BW mugatuko seinale baten azpilaginketa  $f_s$  langinketa-maiztasuna izanik. Kasu honetan, espektro-alderantzikatzea ematen da



## 2 Ikerketaren helburuak

Lan honen helburuak, partikula azeleragailuetan funtsezkoak diren diagnostiko eta kontrol tresnen inguruko teknika berritzaileen garapena da. Diseinatu eta martxan jarri dira bi sistema ikuspuntu digital batetik. Helburua ahalik eta sistema modular, flexible eta berkonfiguragarriak lortzea da. Horretaz gain, elementu horien berezkoak diren espezifikazioak ere bete behar dira. BPM-ari dagokionez, erabilitako laborategia-montaia eta hardwarearekin lor daitekeen posizio neurketaren zehaztasun maximoa aztertu nahi da. LLRF sistemaren diseinua, ioi astuneko azeleragailu baten espezifikaziopean egin da. Horietan bete beharreko zehaztasun baldintzak,  $< 1^\circ$  fasean eta  $< 1\%$  amplitudean dira (Hassanzadegan, 2011). Beste alde batetik, azpilaginketa teknika aztertzeko ere du helburu lan honek. Azterketa teorikoe-tatik abiatuta, aurkeztutako BPM eta LLRF-an erabiltzeko aukera ikusi nahi da eta bere erabilpenak dakarren abaintailak zein desabantailak aztertu.

## 3 Ikerketaren emaitzen aurkezpena

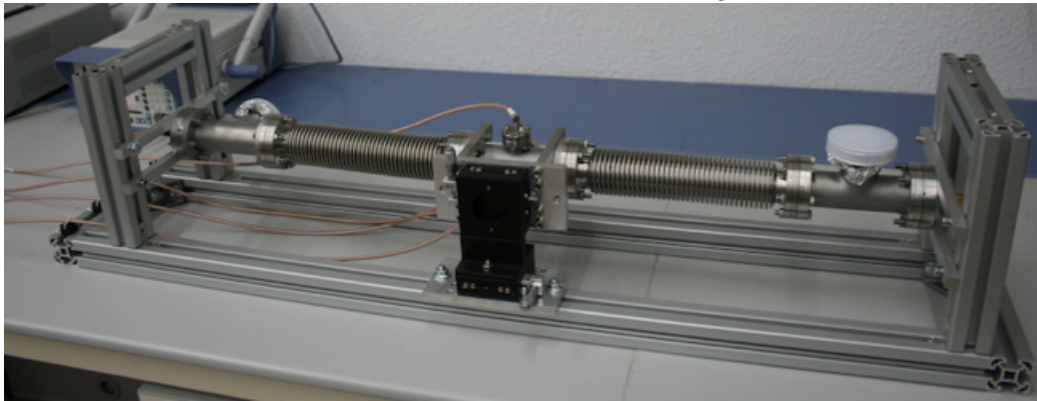
### 3.1 BPM

BPM-aren balidazio esperimental burutzeko, UPV/EHU-ren Automatika eta RF taldeek diseinatutako eta eraikitako laborategia-montai bat erabili da (4 irudia). Horretan, kuprezko eroale zentral bat aurkitzen da eta sarrera RF iturri batera konektatuta dago, zeinak partikula sortaren lana egiten duen 352 MHz-etako seinale bat sortuz. Bloke zentralak, lau irekidura ditu, zeinetan sentsoareak kokatzen diren. Lehen aipatu den bezala, horiek jasotako tentsio diferentziatik, partikula-sortaren posizioa kalkulatu daiteke 1 eta 2 ekuazioek adierazten duten moduan.

$$\Delta U_x = \Delta U_{eskuma} - \Delta U_{ezkerra} \quad (1)$$

$$\Delta U_y = \Delta U_{goi} - \Delta U_{behe} \quad (2)$$

4 Irudia: BPMaren montaia laborategian



Modu honetan, konduktorearen zentruarekiko sortaren posizio horizontal eta bertikalak, 3 eta 4 ekua-  
zioetatik lor daitezke (Strehl, 2006):

$$x = \frac{1}{S_x} \frac{\Delta U_{eskuma} - \Delta U_{ezkerra}}{\Delta U_{eskuma} + \Delta U_{ezkerra}} + \delta_x = \frac{1}{S_x} \frac{\Delta U_x}{\Sigma U_x} + \delta_x \quad (3)$$

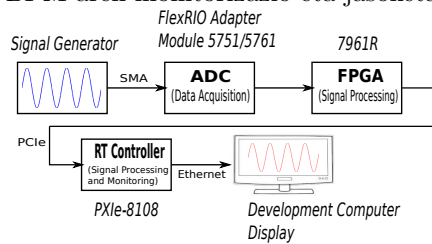
$$y = \frac{1}{S_y} \frac{\Delta U_{goi} - \Delta U_{behe}}{\Delta U_{goi} + \Delta U_{behe}} + \delta_y = \frac{1}{S_y} \frac{\Delta U_y}{\Sigma U_y} + \delta_y \quad (4)$$

non  $S_x$  eta  $S_y$  x eta y norabideetako sentzibilitateak (%/mm-tan neurtuak) eta  $\delta_x$  eta  $\delta_y$  zentru  
elektrokoarekiko desbiazioaren offset zuzenketak (mm-tan emanda) diren.

Bloke zentral hori, 2D traslazio linealeko egitura mikrometrikoko batekin lotuta dago. Horrek, hodia  
bi planoetan desplazzea ahalbidetzen du, konduktore zentrala geldirik mantendurik (I. Badillo, 2014).  
Modu horretan, sortaren luzera-desbiazioa simulatzen da.

Datu eskuraketa eta monitorizazioari dagokionez, denbora errealeko sistema digital bat eratu da,  
National Instruments-en PXI arkitekturan oinarritua. Horrekin batera, errendimendu altuko FlexRIO  
txartelak erabili dira, FPGA txarteletan oinarrituak, data-eskuraketa eta prozesamendu azkarra aha-  
bidetzen baitute. Data-eskuraketarako azpilaginketa teknikak erabili dira, FlexRIO FPGA txarteletan  
inplemtaurik. Txartel horietan bertan lehenasun handiko datu prozesaketa ere burutzen da. Datu ho-  
riek denbora errealeko kontrolagailu batera bidaltzen dira, bertan hain errestriktiboak ez diren kalkuluak  
burutzeko. Azkenik, erabiltzailerako interfazea ordenagailu arrunt batean erakusten da. Sistema guztia  
LabVIEW pean garatu da. Deskribapen hori, 5 irudian ikus daiteke. 9

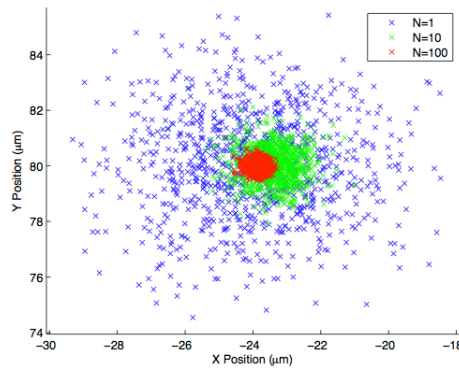
5 Irudia: BPM-aren monitorizazio eta jasoketaren eskema



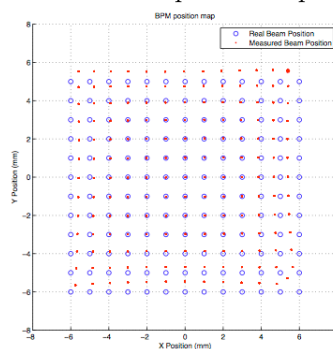
Montaiaz baliatuta, hainbat esperimentu burutu dira. Garrantzitsuenetarikoa bat, neurketen zehaz-  
tasunean batazbestekoak kalkulatzearen ondorioak aztertzea da. 6 irudian aurkezten den modura,  
batazbestekoak ziurgabetasun estatistikoa murrizten du, baina kalkulu-denbora handitu.

Beste esperimentu baliotsu bat, posizio mapa sortzea izan da sistemaren ez-linealitateak identifikatze-  
ko. Hau 7 irudian ikus daiteke. Lortutako informazioa erabiliko da ezlinealsastunen eragina murrizteko.

6 Irudia: partikula sortaren masaren posizioa N batzbesteko kalkulaturata, N 1, 10 eta 100 izanda



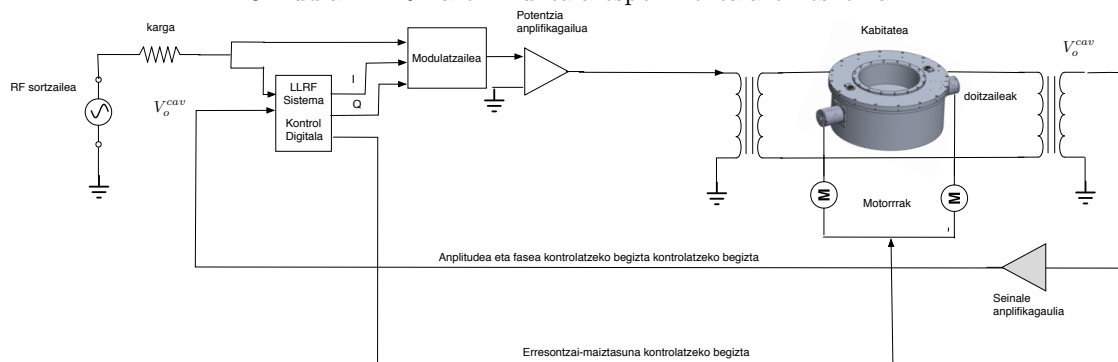
7 Irudia: posizio mapa



### 3.2 LLRF sistema

Ikerketa taldeak garatu duen LLRF sistema laborategian balidatu eta frogatzeko, 8 irudian deskribatzen den 80 MHz-tan lan egiten duen muntaia diseinatu eta eraiki da. Bere elementu zentrala aluminiozko 80 MHz-etan kabitare erresonante bat da.

8 Irudia: LLRF-aren muntaia experimentalaren eskema



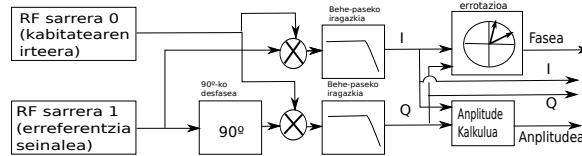
LLRF kontrolaren muina PXI xasis batean inplementatu da, FPGA txartelak erabiliz seinale digitalen prozesamendurako eta denbora errealeko sistema bat kontrol algoritmoen inplementaziorako. Seinale-eskuraketa FlexRIO txartel berkonfiguragarrien arkitekturan oinarritzen da, bai azpilaginketa zein laginketa zuzeneko teknikak erabiliz. FPGA txartelen arteko denbora errealeko komunikazioan ahalik eta errendimendu altuagoa lortzeko, puntuz puntuko transmisioa erabili da. Sistema osoa

LabVIEW-n garatu da, prototipoaren garapen-prozesua eta berkonfiguragarritasuna erraztuz.

Anplitude eta fasearen kontrola I/Q modulazioan oinarrituta dago. Horrek, seinalearen amplitude eta fasearekin lan egitea ahalbidetzen du, seinale eramailearekin jokatu gabe (I. Badillo, 2015). Gainera, bai fasea bai amplitudea begizta bakar batean kontrolatzeko aukera ematen du.

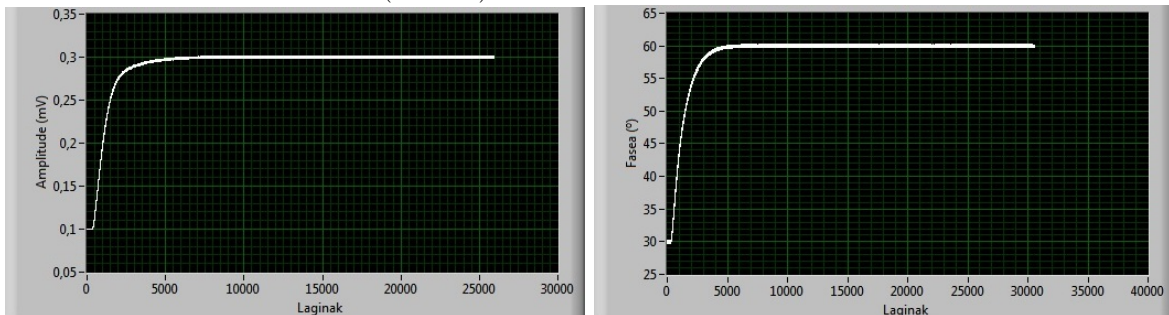
Behin kabitatearen irteerako eta erreferentziarako RF iturriaren seinaleak digitalizatu direnean eta horiei dagozkien I eta Q parametroak kalkulatu direnean, ikusi 9 irudia, independenteki erregulatu egiten dira diseinatutako kontroladorearen bitartez, PID bat kasu honetan. Kontrolagailuen bidez kalkulatu berri diren I eta Q parametro zuzenduak sortu egiten dira RF seinale sortzailea den FPGA txartel baten bitartez, eta seinale-moduladore baten sarrerara bidaltzen dira. Horrek, dagokion RF seinale berria sortuko du, fase eta amplitude egokiarekin, eta kabitatearen sarrerara eramaten da, honela begizta itxiz.

9 Irudia: I/Q modulazioa eta fase eta amplitude detekzioa FPGA-n



Lortu den begizta itxiak, sistema kontrolatu ahal izateko beharrezkoa den banda zabalera egokia du. PD kontrolagailuen parametro egokiak erabiliz, lortu da eskatutako fase eta amplitude baldintzak lortzea. 10 irudian ikus daiteke bai fase bai amplitudearen erantzuna hautazko sarrera baten aurrean.

10 Irudia: kabitatearen irteeran neurtutako fase erreferentzia aldaketa (ezker) eta erantzuna amplitude erreferentzia aldaketaren aurrean (eskuma)



Erresonantzia-maiztasunaren doiketarako begiztari dagokionez, begizta hori denbora errealeko kontrolagailu baten inguruan itxi da. Horren arrazoia, denbora-eskakizun baxuak izatea da (Jana eta Lad, 2012). Horregatik, FPGA-n egindako implementazio purua ez da beharrezkoa errendimendu aldetik, eta, ondorioz, horrek dakarren garapen konplexutasuna ez da beharrezkoa eret. Begizta horrek, kabitatearen aldeetan kokaturiko bi motore kontrolatzen ditu. Motore hauek enbolo bana mugitzen dute norabide erradialean, horrela kabitatearen geometria aldatuz eta, ondorioz, erresonantzia-maiztasuna doituz.

## 4 Ondorioak

Lan honetan planteatu den laginketa teknika berritzaileak, azpilaginketak, emaitza positiboak eman ditu seinale azkarrak lagintzeko orduan partikula azeleragailuen aplikazioetan. Modu honetan, balidatuta geratu da bere erabilpena zenbait RF sistemetan, horrek dakarren kostu abantailarekin. Beste alde batetik, PXI arkitekturan eta LabVIEW-n oinarritutako soluzio digital modular, flexible eta berkonfiguragarriak, egokia dela erakutsi du partikula azeleragailuen diagnostiko eta kontrolean.

## 5 Etorkizuneko lana

Hasiera batean planteaturiko helburuak beteta, lan honek hainbat etorkizuneko pausu aurkezten ditu. Garrantzitsuena, aurkeztutako bi sistema baldintza errealetan frogatzea da. Hau erraztuta geratzen da garaturiko sistemaren natura modularragatik, zeinek diseinaturiko sistema laborategitik atera eta azeleragailu baten integratzea ahalbidetzen duen. Bestalde, garaturiko prototipoak beste analisi eta kontrol teknikak garatu eta testatzeko aukera ematen dute modu errez batean.

### Erreferentziak

- BAUDRENHIEU, P. 2011. Low level rf part 1. CERN Accelerator School CERN-2011-007 Proceedings, pp: 341-367.
- HASSANZADEGAN, HOUMAN, 2011. *Design, Analysis and Implementation of a Versatile Low Level Radio Frequency System for Accelerating Cavities*. University of the Basque Country tesia.
- I. BADILLO, J. JUGO, C. SAN VICENTE J. PORTILLA J. FEUCHTWANGER V. ETXEBARRIA. 2014. Hil testing of a compact beam position monitor diagnostic for particle accelerators. In *IIS 2014 The 60th International Instrumentation Symposium*. University of the Basque Country UPV/EHU.
- I. BADILLO, J. JUGO, J. PORTILLA J. FEUCHTWANGER C. SAN VICENTE V. ETXEBARRIA, 2015. Pxi-based llrf architecture and versatile test bench for heavy ion linear acceleration.
- JANA, JOYDIP, eta MAHENDRA LAD. 2012. *A fast feedback control system using FPGA for RF signals*. Lambert Academic Publishing.
- LYONS, R. G. 2001. *Understanding Digital Signal Processing*. Prentice Hall.
- MISHALI, MOSHE, eta YONINA C. ELДАР. 2011. Sub-nyquist sampling. *IEEE Signal Processing Magazine* .
- P. FORCK, P. KOWINA, D. LIKIN. 2009. Beam position monitors. In *CERN Accelerator School*.
- SHAFER, R. E. 1989. Beam position monitoring. In *AIP Conference Proceeding*.
- STREHL, P. 2006. "beam instrumentation and diagnostics". *Springer* .

## 6 Eskerrak eta oharrak

Autoreek eskertu nahi dute bai Eusko Jaurlaritzaren babes partziala GIU06/04 eta GIU08/01 Ikerketa Taldeei emandako laguntzen bitartez eta baita ere Bizkaiko Foru Aldundiaren babesa 6/12/TK/2012/00032 proiektuaren bitartez.