

Partikulen azeleragailuetan mikrofonikak kontrolatzeari buruzko oinarritzko kontzeptuak: MADRC algoritmoa

Ander Elejaga, Josu Jugo, Pablo Echevarría
Euskal Herriko Unibertsitatea, Helmholtz Zentrum Berlin
ander.elejaga@ehu.eus, josu.jugo@ehu.eus

Laburpena

Artikulu honen helburu nagusia partikulen azeleragailuetan kargatutako partikulak azeleratzeko oinarritzko kontzeptuak modu errazean azaltzea da, baita mikrofonikak kontrolatzeko arloan egiten ari garen lana ezagutaraztea ere. Horrela, dibulgazio-lan honen bidez, publiko ez-zientifikoarentzat eskuragarriago bihurtu nahi da makina horiei buruzko ezagutza, zalantzarik gabe gizateriaren mugarri zientifikoak baitira. Horretarako, lehenik eta behin, partikulen azeleragailuek gaur egungo gizartean dituzten erabilerei eta garrantziari buruzko azalpen labur bat egiten da. Ondoren, makina horien funtzionamendua ulertzeko oinarri teorikoak planteatzen dira, Lorenz-en indarrak eta erresonantziak bezalako oinarritzko kontzeptuak azalduz. Azkenik, kabitare erresonante deiturikoetan nabarmen berezia egiten da, partikulak azeleratzen dituzten gailuak bait dira. Gure lana kabitare supereroaleek (SRF) jasaten duten egungo arazo bat da, mikrofonien bidezko desintonizazioa deritzona. Desintonizazio hori kabitareak jasaten dituen perturbazio mekanikoetatik dator, eta horrek eraginkortasuna galtzea dakar partikuletara energia transferitzerakoan. Horrela, proposatzen dugun soluzioa ere labur-labur aipatzen da (Modified Active Disturbance Rejection Algorithm edo MADRC), eta orain arte lortutako emaitzak azaltzen dira. Hitz gakoak: Partikula Azeleragailuak, kontrol automatikoa, mikrofonikak

Hitz gakoak: Partikula Azeleragailuak, kontrol automatikoa, mikrofonikak

Abstract

The main purpose of this article is to explain in a simple way the basic concepts for the acceleration of charged particles in particle accelerators, as well as to publicize the work that we are carrying out in the field of microphonic control. In this way, through this informative work, it is intended to make knowledge about these machines more accessible to the non-scientific public, which are undoubtedly a scientific milestone for humanity. To do this, first of all, a brief exposition on the uses and importance of particle accelerators in today's society is made. Afterwards, the theoretical bases are raised to understand the operation of these machines, explaining basic concepts such as Lorentz forces and resonances. Finally, special emphasis is placed on the so-called resonant cavities, which are the devices in which the particles are accelerated. Our work deals with a current problem suffered by superconducting cavities (SRFs) called detuning by microphonics. Said detuning derives from mechanical disturbances suffered by the cavity and translates into a loss of efficiency when transferring energy to the particles. In this way, the solution that we propose (control algorithm "Modified Active Disturbance Rejection Algorithm" or MADRC) is also briefly mentioned and the results obtained to date are exposed.

Keywords: Particle accelerator, automatic control, microphonies

1. Sarrera eta motibazioa

Partikula-azeleragailuak teknologia handiko gailuak dira, unibertsoaren funtsezko egitura aztertzen laguntzen digutenak. Gailu horiek eremu elektrikoak eta magnetikoak erabiltzen dituzte kargatutako partikulen energia zinetikoa handitzeko, hala nola elektroiak, protoiak edo ioiak, eta argiaren abiaduratik hurbil dauden abiaduretan azeleratzeko. Partikula horiek azeleratuta daudenean, materiaren izaera hobeto ulertzen laguntzen diguten esperimentuak egiteko eta elkarren artean nola elkarrengaitan duten jakiteko erabiltzen dira.

Partikulen azeleragailuen erabilera nagusietako bat partikulen fisikan da, non materiaren egitura eta unibertsoa aztertzeko erabiltzen diren. Zientzialariek partikula-azeleragailuak erabiltzen dituzte partikula subatomikoen izaera eta horiek gobernatzen dituzten funtsezko indarrak ikertzeko, hala nola grabitatea [1], elektromagnetismoa eta indar nuklearra. Partikulak abiadura oso altuetan azeleratzean eta elkarren artean talka eginaraztean, partikula subatomikoek elkarren artean nola elkarrengaitan duten eta energia handiko talketan nola sortzen eta suntsitzen diren azter daiteke. Horrek aurrerapen esanguratsuak ekarri ditu unibertsoaren egiturari eta bilakaerari buruz dugun ulermenean, Higgs-en Bossoia, quark top edo antimateria bezalako aurkikuntza garrantzitsuetara eramanez [2].

Partikulen azeleragailuen beste erabilera garrantzitsu bat medikuntzan da. Erradiatio-terapian, energia handiko partikula-sortak erabiltzen dira gorputzean minbizi-zelulak suntsitzeko. Partikula-azeleragailuek partikula-sortak tumoreetara zehatz-mehatz apuntatzeko aukera ematen diete medikuei, inguruko ehun osasuntsuei ahalik eta kalte txikiena eginez. Tratamendu horrek emaitza handiak eman ditu bularreko, biriketako eta prostatako minbizietan, eta horien biziraupen-tasa % 90ekoa izan da [3].

Partikulen azeleragailuak industrian ere erabiltzen dira materialak ikuskatzeko eta produktuak esterilizatzeko. Partikula-sortak material opakoetan sar daitezke, eta horrek aukera ematen du materialen konposizioa aztertzeko eta bestela ikusezinak liratekeen akatsak edo irregulartasunak detektatzeko [4]. Produktuak esterilizatzeko ere erabiltzen dira, hala nola gailu medikoak, elikagaiak eta laborategiko ekipak.

Azkenik, partikulen azeleragailuek garrantzi handia dute energia garbiko teknologien ikerketan, hala nola fusio nuklearrean. Fusio nuklearrak, energia askatzeko atomo nukleoak fusionatzeko prozesua dena, energia iturri mugagabe eta iraunkorra eman lezake [5]. Partikula-azeleragailuak fusio nuklearra lortzeko beharrezko baldintzak ikertzeko eta fusioa energia-iturri gisa bideragarria izan dadin teknologiak garatzeko erabiltzen dira.

2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

2.1 Kabitate erresonanteak

Makina oso konplexuak izan arren eta gailu asko izan arren bere barnean, azterlan honetan kabitate erresonanteak azpimarratu nahi ditugu bereziki, partikulak azeleratzeko energia-transferentzia egiten duten gailuak baitira. Horrela, bada, makina horiek eremu elektromagnetiko oszilatzaileak erabiltzen dituzte kargatutako partikuletara energia transferitzeko, Faraday-Maxwell-en legeetan eta Lorenz-en indarretan oinarrituta [6]. Kasu honetan, partikulak azeleratzeko erabiltzen diren oinarritzko kontzeptuak honako hauek dira: Alde batetik, eremu elektriko baten aurrean kargatutako partikulek Coulomben legearen bidez kalkula daitekeen indar elektriko bat jasaten dute.

$$\vec{F}_e = q * \vec{E} \quad (1)$$

Non q partikularen karga den eta $\vec{E}$ eremu elektrikoaren intentsitatea partikula dagoen puntuan. Indar elektrikoaren norabidea eremu elektrikoaren norabide berean da, karga positiboa bada, eta kontrako norabidean, karga negatiboa bada. Bestalde, kargatutako partikula eremu

magnetiko batean zehar mugitzen denean, bai partikularen abiadurarekiko, bai eremuarekiko indar perpendikular bat jasaten du, eta Lorenz-en Legearen bidez kalkula daiteke.

$$\vec{F}_m = q * \vec{v} \times \vec{B} \quad (2)$$

$\vec{v}$ partikularen abiadura izanik eta $\vec{B}$ eremu magnetikoaren intentsitatea. Ahalik eta eremu elektriko altuenak lortzeko, nahitaezkoa da eremu elektromagnetiko oszilakorretara jotzea. Kasu honetan, irrati maiztasunera. Eremu horiek sortzeko, kabitare erresonanteak erabiltzen dira, gehienetan zilindrikoak.

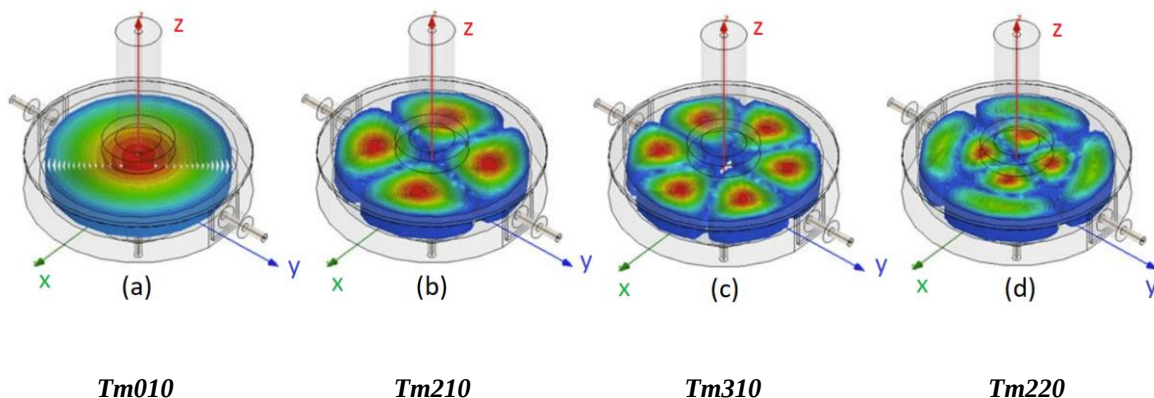
1. irudia. Tesla motatako kabitare erresonante supereroalea



kabitare edo barrunbe zilindrikoa zilindro formako espazio itxi eta hutsa da, material oso eroalez eginda dagoena. Barrunbean frekuentzia espezifiko batean uhin elektromagnetiko bat aplikatzen bada, bertan erresonatu egin dezake, eta horrek esan nahi du uhinaren energia barrunbean metatzen dela. Kabitare zilindriko bateko erresonantzia elektromagnetikoa matematikoki deskriba daiteke kabitarearen barruko uhin elektromagnetikoaren ekuazioaren soluzioaren bidez, eta horrek erresonantzia posibleen multzo bat lortzea dakar. Erresonantzia modu horietako bakoitzak maiztasun espezifiko bat eta lotutako uhin forma bat ditu, eta erresonantzia moduaren maiztasunetik oso hurbil edo maiztasun berdina duten uhin elektromagnetikoek bakarrik erresonatu dezakete kabitarean [7]. Garrantzitsua da kontuan hartzea erresonantzia-modu horien maiztasuna barrunbearen geometriaren mende baino ez dagoela.

Horrela, barrunbean uhin elektromagnetiko bat injektatzen da, *Tm010* (transverse magnetic) modua kitzikatzeko behar den maiztasunarekin, 2. irudian ikusten dena. Horrela, gradiente oso altuko eremu elektriko bat sortzen da kabitarearen ardatzaren norabidean. Ondorioz, kargatutako partikula batek zeharkatzen duenean, eremu elektrikoa hautematen du eta horren intentsitatearen arabera azeleratzen da. Aldi berean, eremu magnetiko azimutal bat ere sortzen da, partikulak erdiko ardatzetik ez barreiatzen laguntzen duena.

2. irudia. Kabitare zilindriko baten erresonantzia modu batzuk.



2.2 Mikrofonien ondoriozko desintonizazioa

Gure ikerketak azken belaunaldiko azeleragailuek gaur egun dituzten arazoetako bat konpontzen du: mikrofonien ondoriozko desintonizazioa. Gaur egungo kabitare erresonanteak

oso eraginkorrak dira eta eremu elektriko oso altuak sortzen dituzte, baina, aldi berean, oso sentikorrak dira perturbazio mekanikoekiko. Izan ere, aurreko atalean azaldu den bezala, kabitateen erresonantzia-maiztasuna haien geometriagatik bakarrik definitzen da. Gaur egungo kabitateak hain dira sentikorrak, non egituren mikrometro gutxi batzuk aldatze hutsak ehundaka hertzeren aldakuntzak sor baititzake haien erresonantzia-maiztasunean [8].

Desintonizazio hori kabitatea funtzionatzen ari den bitartean jasaten dituen perturbazio mekanikoek eragiten dute. Huts-ponpen bibrazioetatik etor daitezke, kabitateak estaltzen dituen helioaren burbuletatik, eta baita kabitatetik igarotzean partikula-sortak sortutako indar elektromagnetikoetatik ere.

Horrela, kabitatea desintonizatzen denean, jada ez du bere maiztasun nominalean erresonatzen, eta, beraz, injektatzen ari zen irrati-frekuentziako seinalea jada ez da gai eremu elektromagnetikoak eraginkortasunez sortzeko. Horrek esan nahi du energia gehiago kontsumitzen dela eta, kasu batzuetan, azeleragailuak gaizki funtzionatzen duela.

Partikulen azeleragailuetan mikrofonía bidezko desintonizazioa murrizteko hainbat estrategia erabil daitezke. Neurri bat isolamendua eta moteltze mekanikoa dira, azeleragailuaren osagaiei kanpoko bibrazioen transmisioa murrizteko erabil daitezkeenak. Azeleragailuaren osagaietan isolamendu- eta moteltze-gailuak instalatu daitezke, bibrazioa eta perturbazio mekanikoak murrizteko. Esekidura pneumatikoko sistemak edo moteltze aktiboko sistemak oso eraginkorrak izan daitezke helburu horretarako.

Bibrazioak horrela ezabatu ezin diren kasuetarako, kontrol aktiboa izenez ezagutzen den beste neurri bat dago. Berrelikadura-sistemak erabiliz, posible da eremu elektromagnetikoko fluktuazioak neurtzea eta kabitatearen geometria hainbat eragingailuren bidez doitztea. Horri esker, partikula sortaren egonkortasuna mantentzen da, baita kanpoko bibrazioak daudenean ere.

Laburbilduz, partikula-azeleragailuetan mikrofonien ondoriozko desintonizazioa murriztea zeregin kritikoa da partikula-sortaren egonkortasuna eta zehaztasuna bermatzeko. Aurretik aipatutako teknika guztien konbinazioa funtsezkoa da partikula azeleragailuetan mikrofonien ondoriozko desintonizazioa murrizteko eta makinaren funtzionamendu egokia bermatzeko.

3. Ikerketaren muina: MADRC kontrol algoritmoa

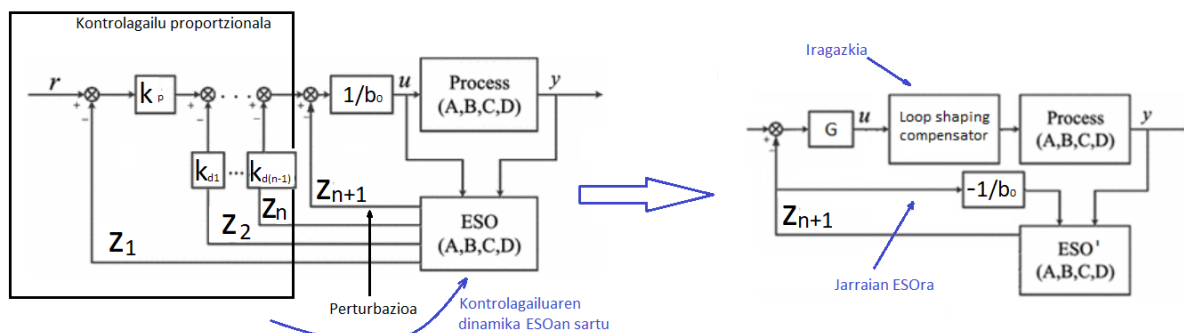
Gure lana mikrofonien kontrol aktiboan zentratzen da, zehazkiago, MADRC algoritmoa erabiliz (ADRCren modifikazio bat). Funtsean, kabitatearen desintonizazioa etengabe kalkulatzen da, uhin islatuak eta erasotzaileak neurtuz. Informazio hori eskuratu ondoren, ADRC algoritmoak desintonizazioa zuzentzeko behar den kontrol-seinalea kalkulatu eta eragingailu piezoelektrikoetara bidaltzen du. Eragingailu horiek barrunbea mekanikoki konprimatzeko edo luzatzeko gai dira, jasaten ari diren perturbazioei aurre egiteko.

Perturbazio aktiboak baztertzeko algoritmoa (ADRC) kontrol aurreratuko teknika bat da, sistema dinamiko ez-linealetarako eta denboran aldakorrek diren sistemetan erabiltzen dena. Perturbazio aktiboen eredu bat erabiltzen du kanpoko perturbazioak denbora errealean zenbatesteko eta ezeztatzeko. Sistema osoa modelatu beharrean, ADRCak kanpoko perturbazioak modelatzen ditu eta sistemaren perturbazio gehigarri gisa tratatzen ditu. Horretarako, egoera hedatutako behatzaile bat (ESO edo *Extended state observer*) erabiltzen du kanpoko perturbazioak neurtzeko eta iragartzeko, eta kontrolatzaile bat perturbazioak konpentsatzeko. Kontrolatzaileak funtzio lineal bat erabiltzen du denbora errealean kontrol-lege bat sortzeko, automatikoki doitzen dena sistemaren baldintzak aldatzen diren heinean [9].

Algoritmoaren errendimendua hainbat sistemaren gainean probatu ondoren, horien artean kabitata supereroale bat, argi geratzen da atzerapenarekiko duen sentikortasun berezia. Kontrol-seinalea gehiegi atzeratzen denean kontrolatu beharreko sistemara iristen, algoritmoa kalkulatzeke abiaduragatik edo eragingailuen dinamikagatik beragatik, sistema desegonkortsu

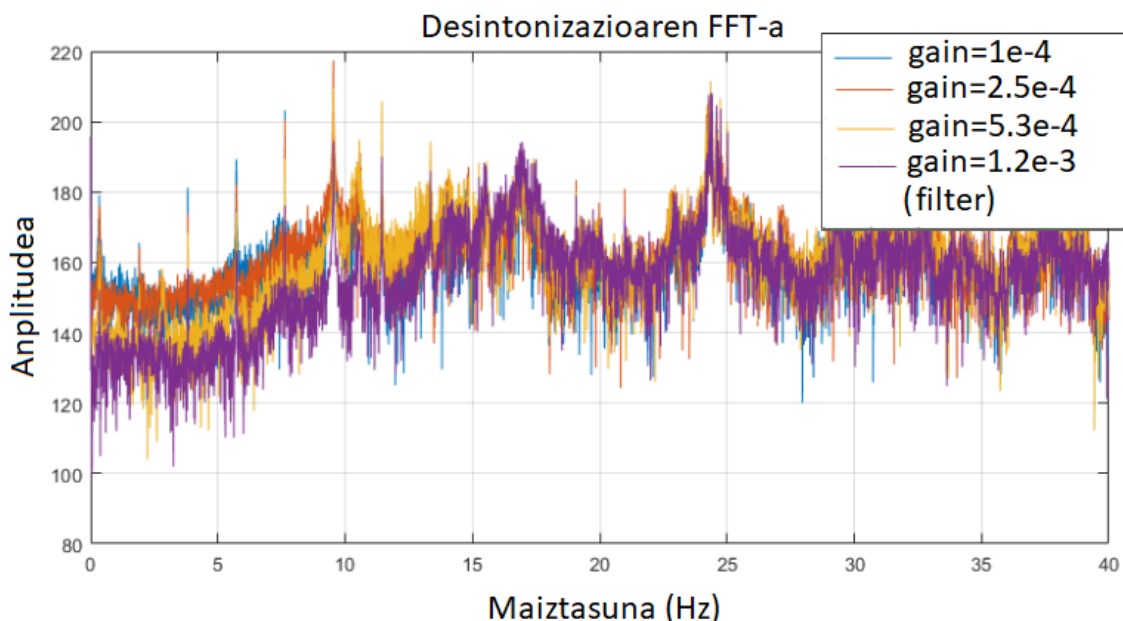
egiten da. Gure ikerketak algoritmoa birdefinitzean zentratzen dira, atzerapenarekiko erresistenteagoa izan dadin

3. irudia. ADRC algoritmotik MADRC algoritmora pasatzeko egin diren aldakuntzak



Alde batetik, kontrolatzaile proporzionala ESO-ko dinamikan bertan barneratzen da. Horrek algoritmoaren diseinu trinkoagoa eta sinpleagoa ahalbidetzen du. Ondoren, perturbazioaren feedback zuzena egiten da ESO-an. Hori posible da perturbazioen kontrolean erreferentzia beti zero delako, eta, beraz, aldaketa horrek ez duelako inola ere aldatzen sistemaren egonkortasun erlatiboa. Azkenik, sistema nahiko ezegonkorra den maiztasun-tarte oro zuzendu ahal izateko, "Loop shaping" izeneko iragazki bat sartzen da. Aldaketa horiei esker, sistemaren begizta irekia azter dezakegu, sistema ezegonkortzen duten maiztasunak zein diren jakiteko, eta, ondoren, hainbat iragazkiren bidez zuzendu ahal izateko.

4. irudia. HZBko Tesla kabitarearen desintonizazioa maiztasun eremuan, kontrolagailuaren irabaziaren arabera (gain)



4. irudian, Helmholtz Zentrum Berlinen (HZB) dagoen HobiCat proba-bankuko barrunbe supereroale batean algoritmoa ezartzean lortutako emaitzak ikus daitezke. Esperimentu honetan, hainbat irabazi (3. Irudian agertzen den G-a) aplikatu zitzaizkion kontrolagailuari, errendimendua aztertzeo eta egonkortasun-muga aurkitzeko. Ikus daitekeenez, zenbat eta handiagoa izan irabazia, funtzionamendua orduan eta hobe da, harik eta irabazia $5.3e-4$ denean sistema ezegonkortu arte. Sistemaren egonkortasuna hobetzeko eta irabazia handitu ahal izateko, aurrerapen-sare bat (iragazkia) aplikatzen da, eta horren bidez irabazia $1.2e-3$ arte igotzeko gai gara, errendimendua hobetuz. Erakusten den Fourierren transformazioan ikus daitekeenez, kontrolatzailea gai da kabitarearen desintonizazioa 17 Hz-ko banda-zabalera bateraino murrizteko. Modu honetan, 17 Hz-tik behera dauden perturbazioak 20dB-tan

txikitzea lortzen dun. Oraingo helburua kontrolatzailearen banda-zabalera hedatzen saiatzea da, maiztasun altuagoko perturbazioak kontrolatzeko gai izan dadin.

4. Ondorioak

Partikulen azeleragailuak funtsezko makinak dira gizartearentzat, unibertsoaren ulermena irauli dutelako, minbiziaren aurkako tratamenduan lagundu dutelako eta fusio nuklearra bezalako ikerketa zientifikoetarako funtsezko tresnak direlako. Horregatik, oso garrantzitsua da gailu horiek fintzen jarraitzea, gaur egun pairatzen dituzten arazo nagusiei aurre eginez. Horietako bat mikrofonien ondoriozko desintonizazioa da, perturbazio mekanikoen ondoriozko kabitare erresonanteen funtzionamendu okerrari erreferentzia egiten diona. Ikerketa honetan, perturbazio horiek kontrol aktiboko sistema baten bidez kontrolatzea lortu da. Horretarako, lehendik zegoen kontrol-algoritmo bat birdiseinatu da, haren arazo handienetako bat zuzentzeko: atzerapenarekiko sentikortasuna. Horrela, 17 Hz-ko banda-zabalera duten mikrofonien murrizketa lortu da, gaur egun erabiltzen diren kontrolatzaileen errendimendua gaindituz, hala nola PIDak.

5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Lehen esan bezala, etorkizunerako lehen helburua egungo kontrolatzailearen banda-zabalera hobetzea da, hainbat iragazki ezarriz. Gainera, Adaptive Feedforward (AFF) kontrol bat gehitzea ere pentsatu da, maiztasun handieneko perturbazio konstanteak kontrolatzeko.

6. Erreferentziak

- [1] G. Dvali, "A Lecture on the Hierarchy Problem and Gravity". CERN, Geneva, Switzerland.
- [2] M. J. G. Veltman, "The Higgs Boson", Sci. Am., vol. 289, no. 4, pp. 94-101, Oct. 2003.
- [3] Henderson, R. H., Hoppe, B. S., & Nichols, R. C. (2009). Proton therapy for prostate cancer: The initial Loma Linda University experience. International Journal of Radiation Oncology Biology Physics, 74(5), 1371-1376. doi: 10.1016/j.ijrobp.2008.10.079
- [4] M. D. Dyce and A. B. Mason, "Particle Accelerators in Mass Spectrometry," in Analytical Chemistry, vol. 54, no. 5, pp. 802-809, Apr. 1982.
- [5] R. J. Goldston and A. F. Sontag. (2014). Energy, the Environment, and the National Interest: Fusion Energy and Its Potential Contributions. Annual Review of Environment and Resources, 39(1), 265-296. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-031113-144147>
- [6] Jackson, J. D. (1998). Classical Electrodynamics (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- [7] S. E. Schwarz, "Resonant Cavities," Springer Science+Business Media, 2014.
- [8] A. Grudiev, E. Montesinos, and F. Perez, "Experimental observation of microphonics-induced detuning in superconducting cavities," in Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams, vol. 13, no. 9, Sep. 2010.
- [9] H. Gao, "An Active Disturbance Rejection Control for Nonlinear Systems," in IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 48, no. 2, pp. 361-376, Feb. 2003.

7. Eskerrak eta oharrak

Eskerrak eman nahi dizkiot HZB zentroari egonaldiko 3 hilabeteetan hartu nautilako eta bere instalazioetan esperimentatzen utzi didatelako. Egunero ez da horrelako instalazio zientifiko batean lan egiteko aukerarik izaten, maila handiko zientzialariekina batera.

Azkenik, baina ez garrantzi gutxiagokoa, nire tesi-tutoreei, Josu Jugori eta Pablo Echevarriari, eskerrak eman nahi dizkiet eman didaten laguntza guztiagatik, haiek gabe ikerketa hau ez bailitzateke posible izango. Eskerrik asko guztioi.