



IKER
GAZTE
NAZIOARTEKO
IKERKETA EUSKARAZ

VI. IKERGAZTE

NAZIOARTEKO IKERKETA EUSKARAZ

2025eko maiatzaren 28, 29 eta 30a
Bilbo, Euskal Herria

ANTOLATZAILEA:
Udako Euskal Unibertsitatea (UEU)



Aitortu-PartekatuBerdin 4.0

ZIENTZIAK ETA NATURA ZIENTZIAK

**LINAC7 Proiektuko Plasma
Seinaleen Azterketa
Azpilaginketan Oinarritutako
Neurketa Sistemaren bitartez**

*Jon Vivas, Inari Badillo,
Joaquín Portilla, Inigo Arredondo,
Josu Jugo eta Jorge Feuchtwanger*

85-92 or.

<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.vi.05.10>

ANTOLATZAILEA



BABESLEAK



EUSKO JAURLARITZA
GOBIERNO VASCO



LAGUNTZAILEAK



LINAC7 Proiektuko Plasma Seinaleen Azterketa Azpilaginketan Oinarritutako Neurketa Sistemaren bitartez

Jon Vivas¹, Inari Badillo¹, Joaquín Portilla¹, Iñigo Arredondo¹, Josu Jugo¹, Jorge Feuchtwanger^{1,2}

¹ Elektrizitatea eta Elektronika Saila, Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU). Sarriena auzoa z/g. 48940 Leioa - Bizkaia
² Ikerbasque, Basque Foundation for Science. Euskadi Plaza 5, 48009 Bilbao - Bizkaia

jon.vivas@ehu.eus

Laburpena

Lan honetan, azpilaginketan oinarritutako 18 GHz-rainoko goi-maiztasuneko seinaleak aldi berean neurtzeko gai den neurketa-sistema baten diseinua, inplementazioa eta karakterizazioa aurkezten dira. Sistema ioi-iturri batean dauden plasma-seinaleak aztertzeko erabili da, islapen-koefizientearen eta islatutako seinaleen espektro-analisan zentratuz. Emaizteko aldaketa nabarmenak erakusten dituzte plasmaren eta ioi-iturriaren barruko uhin elektromagnetikoaren arteko elkarrekintzan, irrati maiztasuneko seinalearen maiztasunaren eta potentziaren arabera, baita gas-emariaren arabera ere. Aldaketa horiek islapen koefizientearen bat-bateko jauzietan islatzen dira, plasmaren argitasun eta egoera fisikoarekin korrelazioan daudenak.

Hitz gakoak: Azpilaginketa, Irrati-maiztasuna, Espektro analisia, ECR plasma

Abstract

This paper presents the design, implementation, and characterization of a subsampling-based measurement system capable of simultaneously measuring high-frequency signals up to 18 GHz. The system is applied to analyze the plasma signals of an ion source, focusing on the reflection coefficient and the spectral analysis of the reflected signals. The results show significant changes in the interaction between the plasma and the electromagnetic wave inside the ion source, depending on the radio frequency signal's frequency and power, as well as the gas flow rate. These changes are reflected in abrupt jumps in the reflection coefficient, which correlate with the plasma's luminosity and physical state.

Keywords: Subsampling, Radio-frequency, Spectrum analysis, ECR plasma

1 Sarrera eta motibazioa

Goi maiztasuneko seinaleen eskuratzeari ikerketa eta garapen arlo garrantzitsua da hainbat esparrutan, komunikazio ingeniartzatik hasita medikuntza eta fisikara arte (Huang *et al.*, 2023), (Taleb *et al.*, 2021). Hala ere, banda zabalera eta laginketa-tasa handiagoak dituzten datu eskuratzeko sistemen eskari gero eta handiagoak erronka sakonak azalarazten ditu, besteak beste, kostuen, konplexutasunaren eta baliabideen kontsumoaren aldetik. Nyquist eta Shannon-en lagintze teoremaren arabera, seinale baten maiztasun altuena f_M izanik denbora eremuan seinalea $0.5/f_M$ segundoro lagindu behar da jatorrizko seinalea berreskuratzeko ($0.5/f_M$ maiztasuna Nyquist-en maiztasuna bezala ezagutua izanik). Hortaz, goi maiztasuneko seinaleen denbora eremuko informazio guztia eskuratzeko beharrezkoak diren lagintze maiztasunak oso altuak izan daitezke, eta horrek datuen neurketan, prozesamenduan, bidalketan eta biltegiratzean kostu handiak dakartza. Testuinguru honetan, azpilaginketan oinarritutako sistemak irtenbide berritzaile gisa agertu dira muga horiei aurre egiteko, Nyquist maiztasunaren gainetik dauden seinaleen eskuratzeko eraginkorra ahalbidetuz (Oya *et al.*, 2011).

Azpilaginketa-sistemak ondoko ideiaz baliatzen dira: erabilpen kasu askotan ez da beharrezkoa seinalea Nyquist-en maiztasunean lagintzea jatorrizko seinaleetik erabilgarria den informazio guztia zehaztasunez berreskuratzeko. Hau bereziki interesgarria suertatzen da analisipeko seinalea maiztasun eremuan osagai kopuru txiki batez osatua dagoenean (seinale arinak bezala ezagutzen direnak) edo maiztasun domeinuan agertzen diren seinale ordenatuen potentziak potentzia legea jarraitzekotan (seinale konprimagarriak bezala ezagutzen direnak) (Rani *et al.*,

2018). Horrela izanik, seinalea Nyquist-en maiztasunean lagindu beharrean, azpilaginketa-sistemek iragazketa eta/edo prozesatze teknika aurreratuak aplikatzen dituzte intereseko seinalearen osagaiak hautatzeko eta Nyquist-en maiztasuna baino baxuagoan laginduz goi maiztasuneko seinalearen aliasetik nahi den informazioa eskuratzeko.

Bereziki interesgarria izan daiteke partikula azeleragailuetan azpilaginketa sistemak erabiltzea, bai azterketa bai kontrol aplikazioetan (Badillo, 2015), esperimentu hauetan aurkitzen diren seinaleek maiztasun altuak baina desbideraketa txikiak izan ohi dituztelako. Horrela izanik, LINAC7 proiektuko (Feuchtwanger *et al.*, 2022) partikula-azeleragailu linealean aurkitzen den Elektroi Erresonantzia Ziklotronikoko (ECR, *Electron Cyclotron Resonance*) ioi iturriko Irrati-maiztasun (RF) seinalea azpilaginketa-sistemekin aztertzea proposatu da, plasmaren egoera modu ez intrusibo, zehatz eta merke baten bitartez aztertzeko.

2 Arloko egoera, eta ikerketaren helburuak

Azpilaginketa-tekniken kontzeptua sakonki aztertu eta baliozkotu da aurretik egindako lan ugaritan ((Xia, 2000), (Venkataramani eta Bresler, 2000)), non teknika hauen eraginkortasuna erakutsi duten. Azpilaginketa teknikak, izatez, Nyquist-en maiztasuna baino baxuagoa den lagintze maiztasun bat erabiltzean sortzen diren aliasetatik informazioa lortzean oinarritzen dira. Hau aurrera eramateko hainbat bide erabili daitezke, eta ohikoena (eta lan honetan jarraitua) azpilaginketa uniforme da. Azpilaginketa uniformean jatorrizko seinalearen laginak periodo konstante batekin lortzen dira (T_s), baita ere lagintze maiztasun konstante batekin adieraziak (f_s).

Beste azpilaginketa teknika batzuen adibideak dira seinalea aldi berean neurtzeko hainbat erloju erabiltzea (Tzou *et al.*, 2012) eta seinale bide berean hainbat Lagintze eta Euskailu anplifikadore (THA, *Track-and-Hold Amplifier*) erabiltzea Seinale-Zarata Ratioa (SNR, *Signal to Noise Ratio*) hobetzeko (Oya *et al.*, 2012). Aurrerapen hauek azpilaginketa metodoen garrantzia sendotu dute, bereziki ikerketa inguruneetan, non kostu eta konplexutasun murrizketen aldetik onura esanguratsuak eskaintzen jarraitzen duten (Wang *et al.*, 2020).

Plasma-egoera zehaztu ahal izateko, plasma sortu den ala ez jakiteaz gain, honen propietateak ere ezagutzea berebizikoa da; bereziki interesgarriak izan daitezke elektroi eta ioien dentsitatea eta hauen tenperatura eta/edo energia banaketa. LINAC7 proiektuan erabilitako ECR ioi-iturrian oinarritutako plasma ganberan erabili litezkeen diagnostiko teknikak lau kategoriatan banatzen dira, bakoitzak bere abantailak eta eragozpenak dituelarik (Toivanen *et al.*, 2022): Mikrouhinen detekzioa, plasmaren partikulen detekzioa, plasma barneko detekzioa, erradiazioa detekzioa.

LINAC7 proiektuko ioi ganberaren kasuan, neurketa zuzenean eta erradiazio neurketan oinarritutako teknikak ez dira eraginkorrak izango, erabilitako ganberak 3 GHz-eko erresonantzia maiztasuna izateko diseinatu izan delako eta zunda bat sartzeak maiztasun hau aldatuko lukeelako, zuzeneko neurketa erabilezina bihurtuz; bestetik, plasmako partikulen energia ez da erradiazio neurketa praktikoak egiteko nahikoa. Plasmatik ateratako partikulen analisia burutuz plasmaren egoera aztertzea erabilgarria izan daiteke diseinu etapetan (Feuchtwanger *et al.*, 2018). Hala ere, ez da posible izango teknika mota hauek erabiltzea sortutako izpia lagin bat irradiatzeko erabiliko denean (azken helburua den horretan), analisi teknikek osotasunean harrapatzen baitute partikulen izpia.

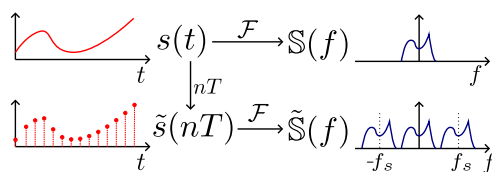
Horrela, azpilaginketa teknikak erabiliz, LINAC7 proiektuko ioi ganberan aurkitzen den plasma seinalea aztertzeko helburuak dituen ikerketa hau burutu da, helburuak hauek izanik: Lehen, azpilaginketan oinarritutako neurketa ez zuzenetan oinarritutako sistema bat diseinatu, inplementatu, eta karakterizatzea, eta bigarrena garatutako sistema LINAC7 proiektuko ioi ganberan aurkitzen diren plasma seinaleak aztertzeko erabiltzea.

3 Azpilaginketa uniforme

Seinale bat uniformeki lagindu ezker (lagin guztien arteko denbora tarte berdina izanik, T_s), eta lagindutako seinale horren gainean Fourierren transformatua aplikatu ezker, espektro periodiko bat lortuko da non espektroaren periodoa erabilitako laginketa-maiztasunaren berdina den. Fenomeno hau, eta lan honetan erabilitako nomenklatura, 1. Irudian aurki daitezke. Gainera, espektroaren magnitudea jatorriarekiko simetrikoa izango dela suposatuko da lan honetan, denbora-seinale errealean analisiaren kasuan bezala.

Nyquist-Shannonen lagintze teoremaren arabera, jatorrizko seinalean aurki daitezkeen maiztasun altuena $f_{o,MAX}$ bada, seinalea guztiz berreskuratu daiteke $2f_{o,MAX}$ maiztasunean seinalea laginduz (Shannon, 1949). Beste modu batera esanez, Nyquist-Shannonen teorema bete ezker lagindutako seinalearen transformatuan ez da aliasen arteko gainezarmenik gertatuko, eta jatorrizko seinalearen informazio guztia zuzenean berreskuratzea posible izango da. Osterantzean, seinalea Nyquist maiztasunaren azpitik lagintzekotan, jatorrizko seinalearen informazio par-

1. Irudia: Denbora-seinale jarraituaren ($s(t)$) eta laginduen ($\tilde{s}(t)$) Fourierren transformatuak ($\mathbb{S}(f)$ eta $\tilde{\mathbb{S}}(f)$).



tziala bakarrik lortuko da eta ezin izango da zuzenean jatorrizko seinalea berreraiki. Azken kasu honi deritzo azpilaginketa, eta lan honen helburua azpilaginketa bitartez neurtutako seinaleetatik informazioa lortzea izango da.

Jatorrizko seinalea f_o maiztasuneko sinusoide bat izatekotan, Fourier Transformatu Azkarra (FFT, *Fast Fourier Transform*) egin ostean neurtuko litzatekeen aliasaren (f_m) eta sistemaren laginketa-maiztasunaren (f_s) arteko erlazioa aztertuz, f_m -ren balioa ondorengo ekuazioarekin kalkula daiteke (Vivas, 2023b):

$$f_m = \begin{cases} f_o \bmod f_s & : 0 \leq (f_o \bmod f_s) \leq \frac{f_s}{2} \\ f_s - (f_o \bmod f_s) & : \frac{f_s}{2} < (f_o \bmod f_s) < f_s \end{cases} \quad (1)$$

Eragiketa hau desegin eta jatorrizko maiztasuna lagintze maiztasuna eta aliasaren maiztasuna (f_s eta f_m) ezagutuz berreskuratu nahi bada, erlazioa honako hau da:

$$f_o = \begin{cases} \left\lfloor \frac{f_o}{f_s} \right\rfloor f_s + f_m & : 0 \leq (f_o \bmod f_s) \leq \frac{f_s}{2} \\ \left(\left\lfloor \frac{f_o}{f_s} \right\rfloor + 1 \right) f_s - f_m & : \frac{f_s}{2} < (f_o \bmod f_s) < f_s \end{cases} \quad (2)$$

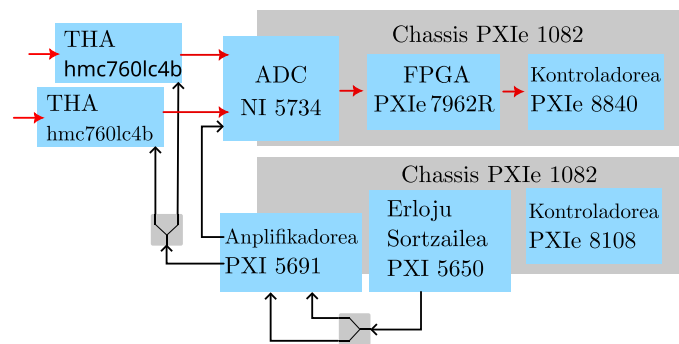
Azken bi ekuazioetatik eratortzen da edozein tonu puru (hau da, maiztasun bakar batez sortutako seinalea) lagindu ostean alias bakarra lortuko dela $[0, f_s/2]$ tartean FFTa egin ostean; bestalde, jatorrizko maiztasunaren tarteari buruzko informazioa $((n-1)f_s/2 < f_o < nf_s/2 : n \in \mathbb{N})$ arabera n -garren Nyquisten zonalde bezala ezagutzen dena beharrezkoa izango da alias horren jatorria den seinalea berreskuratzeko. Hau bat dator Shannon-Nyquist teoremak dioenarekin, seinalea berreraikitzeko ez baita nahikoa aliasaren maiztasuna jakitearekin. Erlazio hau Nyquisten zonalde bakar batean dauden seinale konprimagarri baten osagai espektralak berreskuratzeko erabili daiteke, seinalearen maiztasun mugak ezagunak badira.

Azpilaginketa bidezko seinale berreskuratzeak banda estuko seinale bat Shannon-en teoremak ezarritako laginketa-maiztasunarekin alderatuz askoz baxuagoa den batekin eskuratzea ahalbidetzen du. Maiztasun desberdineko sinusoideen batura bezala sortutako seinale bat aztertzean maiztasun ezberdin bakoitzak aliaz ezberdin bat sortuko du lagindutako espektroaren lehen Nyquisten zonaldean, azpilaginketa neurketatik informazioa lortzea zailduz. Hala ere, maiztasun bakarra aztertzen den kasuetan edo seinale bakoitzaren aliasak bereiz daitezkeen kasuetan, lagindutako sistemaren datu-irteera nabarmen murriztu daiteke, datu-tasa murriztuak dakartzan onurakin: hala nola datu biltegitarte murriztua, denbora errealean analisi sinplifikatua eta neurketa sistema merkeagoak. Proposatutako abantailak jatorrizko seinalearen maiztasunaren eta laginketa-maiztasunaren arteko alde erlatiboaren proportzionalak dira. Inplementazio ezberdinen arteko alderaketa errazteko helburuarekin, $\eta = \frac{f_o}{f_s}$ erlazioa defini daiteke (Vivas *et al.*, 2024). η -ren balioa zenbat eta handiago izan, orduan eta baliabide gehiago aurreztuko dira neurketa sistemaren inplementazioan (Shannonen teorema betetzen duen sistema batean $\eta_{\text{MAX}} < 0.5$ izanik).

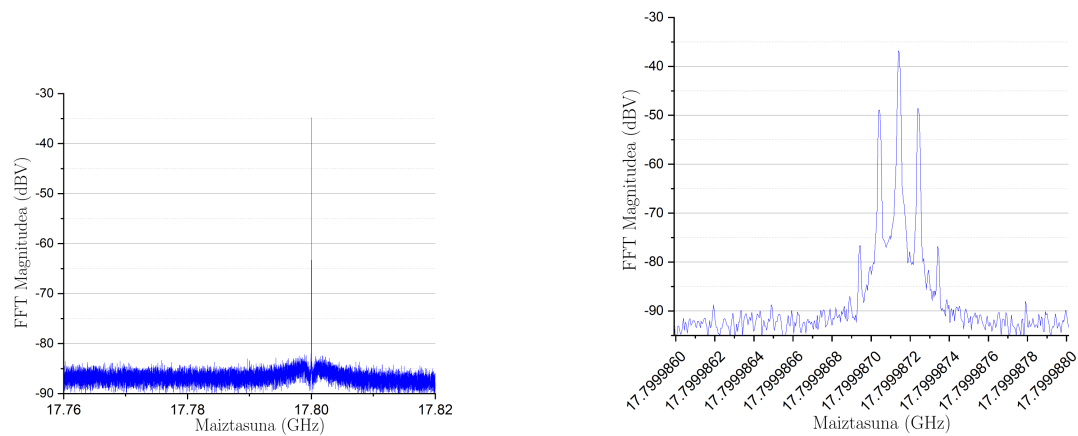
4 Azpilaginketan oinarritutako neurketa sistema

Azpilaginketa uniformean oinarritutako neurketa sistema bat diseinatu eta inplementatu da, LINAC7 proiektuko ioi ganberan aurkitzen den plasma seinalea aztertzeke erabiliko dena. Burutu beharreko neurketa 3 GHz-eko bi seinale esturen aldibereko neurketa izango da, plasma ganberara igorritako eta bertatik islatutako seinalearen analisia burutu ahal izateko. Proposatutako neurketa sistema 2. Irudian aurki daiteke, eta hiru osagai nagusiz dago osatua: lehena, azpilaginketa neurketa burutzen duen neurketa sistema, NI-5734 bihurgailu analogiko/digitalean (ADC, *Analog to Digital Converter*) oinarritua. Honi lotutako ate-matrize programagarri (FPGA, *Field-Programmable Gate Array*) eta kontroladorearen bitartez seinalearen analisi numerikoa burutzen da, jasotako datuen Fourierren Transformatu Azkarra (FFT, *Fast Fourier Transform*) burutuz eta (2) jarraituz espektroaren zuzenketa eginez. Kontroladore hau emaitzak bidaltzeaz arduratzen da baita ere. Bigarrena, erabilitako ADCaren banda zabale-ra eraginkorra handitzeko erabili diren Lagintze eta Euskailu anplifikadoreak (THA, *Track-and-Hold Amplifier*),

2. Irudia: Proposatutako azpilaginketa neurketa sistema (Vivas *et al.*, 2024).

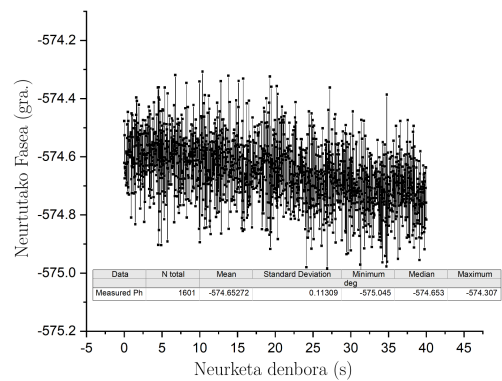


3. Irudia: Azpilaginketan oinarritutako neurketa sistemaren neurketaren emaitzak (Vivas *et al.*, 2024). a) eta b) kanal bakar batean eginiko tonu puru eta modulatuaren neurketak dira; c) eta d) bi kanalen arteko fase-aldearen neurketak dira.

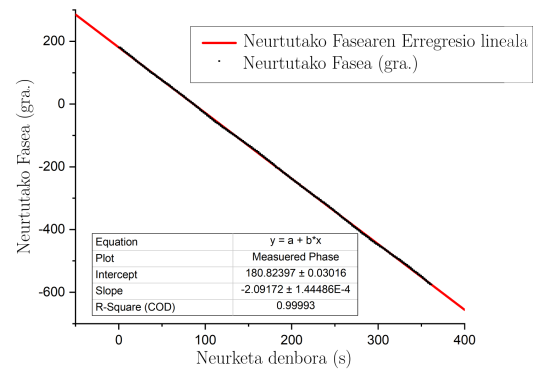


(a) 17.8 GHz-eko tonu purua, 120 MHz lagindua eta 50,000 puntu erabiliz aztertua. 10 neurketen arteko RMS batezbestekoa erabilia.

(b) 17.8 GHz-eko tonu modulatu (100 Hz AM, %50 sakone-ra), 1.2 MHz lagindua (1/100 dezimaketa erabiliz) eta 250,000 puntu erabiliz aztertua. 10 neurketen arteko RMS batezbestekoa erabilia.



(c) 4.18 GHz-eko tonu puru banatua (bi kanaletan desfase konstante izanik), 120 MHz lagindua eta 50,000 puntu erabiliz aztertua.



(d) 4.18 GHz-eko tonu puru banatua (bi kanaletan desfase aldatkorra izanik, 4.18 deg/s), 120 MHz lagindua eta 50,000 puntu erabiliz aztertua.

hmc-1061 bereziki; hauek 18 GHz-eko seinaleak lagintzeko erabili daitezke. Azkenik, lehen bi sistemen arteko sinkronizazioa bermatzen duen erloju seinalea sortzen duen sistema dago, beharrezkoa den anplifikadorearekin eta komunikazioetarako erabilia den kontroladorearekin. Hiru osagai hauen konfigurazioa, datu biltzea, eta prozesaketa egiteko LabVIEW erabili da.

Aipatu den bezala, erabilitako THAek 18 GHz-eko neurketak ahalbidetzen dituzte, 120 MHz-ko laginketa-maiztasuna erabiliz gero gehienezko η 150 izanik. Proposatutako sistema R&S-SMF100a seinale-sorgailu bat erabiliz aztertu da, bi konfigurazio desberdinetan. Lehenengo konfigurazioan, seinale puru edo modulatu bat sortu da eta neurketa-sistemara zuzenean pasarazi da. Bigarren konfigurazioan, sorgailuaren tonu puru bat bi bidetan banatu da, seinaleetako bat neurketa-sistemara zuzenean sartuz eta bestea fase-aldagailu batetik pasaraziz neurketa-sistemara sartu aurretik (Vivas *et al.*, 2024).

Proposatutako bi neurketa hauetan sistemak 18 GHz-eko seinaleak aztertze gaitasuna duela bermatu da, bai eta honen inguruan dauden seinale hurbilekin bereizmena izateko gaitasuna ere (ikusi 3a. eta 3b. Irudiak, non 17.8 GHz-eko seinale baten gaineko 100 Hz-eko modulazioak bereizi diren). Gainera, bi kanalen arteko fase aldeak neurtzeko gaitasuna zehaztu da, 0.2 gradu ko desbideraketa estandararekin eta fase aldaketa motelak $R^2 = 0.9999$ -ko korrelatuarekin (ikusi 3c. eta 3d. Irudiak). Guztirako sistemaren zehaztapenak 1 Taulan laburtu dira.

1. Taula: Proposatutako neurketa sistemaren zehaztapen experimentalak 120 MHz-eko lagintze maiztasuna erabiliz. † 50.000 datu puntu erabiliz, 25 ms-ro prozesatuz; * 250.000 datu puntu hartuz, 1/100 dezimaketa erabiliz eta 250 ms-ro prozesatuz. (Vivas *et al.*, 2024)

Sarrera banda zabalera	0 Hz - 18 GHz	
Tarte dinamikoa	57 dB	
Zarata zorua	-70 dBm	
Kanalen arteko fase desbideraketa (SDV)	0.2 gradu	
Maiztasun bereizmena	2.4 kHz [†]	4.8 Hz [*]
Neurtze banda zabalera	60 MHz [†]	1.2 MHz [*]

5 Plasma seinaleen neurketa

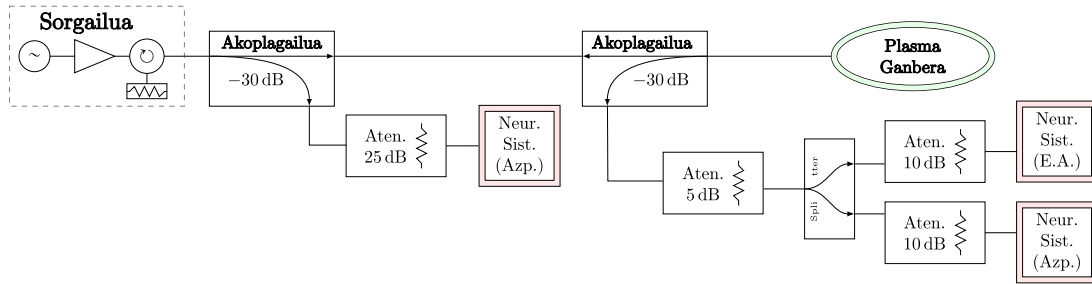
Azpilaginketa neurketa sistema proposatua erabiliz, LINAC7 proiektuko ioi ganberan aurkitzen den plasma seinalea aztertu da. Neurketak ioi iturrian plasma sortzeko erresonantzia ganberara igorri beharrek 3 GHz-eko seinale esturen eta ganberatik islatutako uhinen aldebereko neurketak izan dira. Erabilitako lagintze maiztasuna igorritako eta islatutako uhinen espektroa Nyquisten zonalde baten erdialdean agertzeko aukeratu dira (110 MHz eta 120 MHz tartean).

Plasmaren egoera ezberdinak aztertze, ganberara isuritako hidrogeno gasaren kontzentrazioa (3 eta 5 SCCM tartean), ganberara igorritako RF seinalearen maiztasuna (2980 MHz eta 3000 MHz inguruan) eta potentzia (5 W eta 120 W tartean) konbinazio ezberdinak aztertu dira. Bereziki aztertuak izan dira plasmak potentzia baxuko egoeretan erakutsi dituen egoera aldaera bortitzak, aurreko lanetan biestabilitate bezala aztertuak izan direnak (Elorza, 2022).

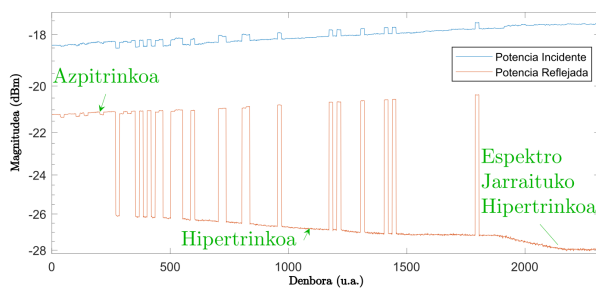
Neurketa hauek burutzeko 4. Irudiko muntaia erabili da. Muntaiari bi direkzio-akoplagailu erabili dira, igorritako eta islatutako seinalea aldi berean neurtu ahal izateko, eta islatutako uhina bi bidetan banatu da. Bai igorritako bai islatutako uhina lan onetan aurkeztutako neurketa sistemara sartu dira, bi uhinen arteko anplitude eta fase aldaketak neurtu ahal izateko. Gainera, islatutako uhina espektro analizatzaile baten bitartez aztertu da, islatutako uhina benetan estua dela bermatzeko eta azpilaginketak modu egokian aplikatu daitezkeela bermatzeko. Azkenik, plasmaren luminositatean neurtu da baita ere, plasmari zuzenean begiratzeko prestatua dagoen leihatila batean CMOS kamera bat jarritz.

Neurketa sistema honen bitartez plasman gertaturiko egoera aldaketa bortitzek islatutako uhinean eragina dutela berrikusi da, eta aldaketa horiek zehaztasunez aztertzea lortu da. Bereziki, aldaketa bortitz hauek plasmaren isapen koefizientearen eragina zehaztea lortu da, lortutako emaitzak luminositatean aztertutako egoera jauziekin guztiz bat etorriz (ikusi 5. Irudia). Gainera, islatutako uhinean igorritako maiztasunaz gain, espektro oso bat behatu da, espektro honen jatorria plasma barnean gertatutako fenomenoaren arteko eta plasmaren natura ez-linealaren arteko elkarrekintza izanik. Hau da, maiztasun baxuko fenomenoek sortutako seinaleak plasma ganberan sartutako seinalearekin nahasten dira, ganberatik modulaturatutako seinale bat ateraz (ikusi 6. Irudia).

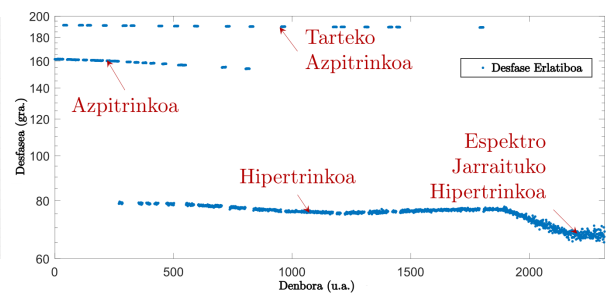
4. Irudia: Plasma neurketa burutzeko muntaia (Vivas, 2023a). Bi neurketa sistema erabili dira: Azpilaginketan oinarritua, bi kanalez osatua, eta igorri eta islatutako seinaleak aldi berean neurtzeko erabilia, eta espektrora analizatzailerak, islatutako uhinak neurtzeko erabilia.



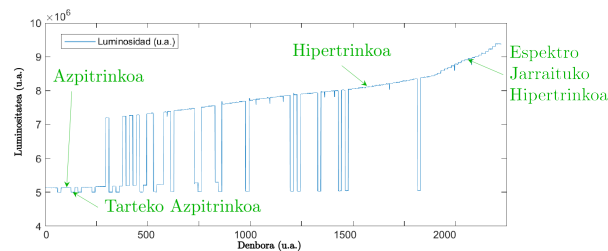
5. Irudia: 0.33 W/s potentzia aldatetarekin plasmaren aldaketa bortitzen azterketa, bai islapen koefizientearen magnitude eta fasean, bai plasmaren luminositatean.



(a) Islapen koefizientearen magnitudea.



(b) Islapen koefizientearen fasea.



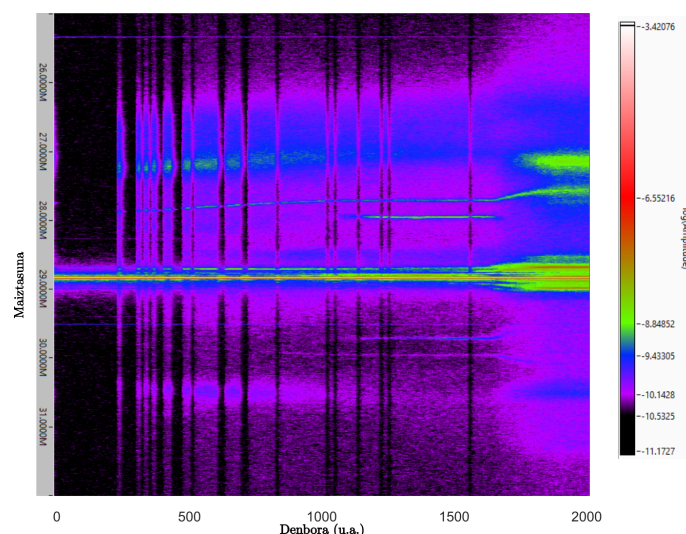
(c) Plasmaren luminositatea.

5 eta 6 Irudietan ikusi daitekeen moduan, potentziaren aldaketa motelek sortutako egoera jauziek plasma ganberaren erantzun elektromagnetikoa aldatzen dute, islatutako seinalearen magnitude eta fasea aldatuz; buruturiko esperimentu honetan, lau egoera ezberdin izendatu ahal izan dira, ganberaren barnean uhin elektromagnetikoa-ren eta plasmaren arteko erlazioaren arabera zehaztuak. Potentzia ahul baten kasuan, egoera azpitrinkoak aurki daitezkeela aurrean dezakegu, uhin elektromagnetikoa erantzun espektrala kamara hutsaren erantzunaren oso antzekoa baita, eta beraz plasma eta uhinaren arteko elkarrekintza ahula dela esanez. Potentzia handitzean ikusitako egoera hipertrinkoetan, aldiz, plasmaren islapen koefizientearen jauziak gain espektrora agertzen diren ez linealtasunen ondorioz plasma eta uhin elektromagnetikoa arteko interakzioa bortitza dela aurrean dezakegu.

6 Ondorioak

Azpilaginketaren oinarritutako sistema proposatu, martxan jarri eta karakterizatu da, 18 GHz-etan bi kanaletan aldi berean neurtzeko gai dena eta 120 MHz-eko lagintze-maiztasun maximoaren bitartez 57 dB-ko tarte dinamiko duena. Proposatutako sistema erabiliz, LINAC7 proiektuko ioi iturrian aurkitzen den ganbera plasmara igorritako eta bertatik islatutako seinaleak aztertu dira, islapen koefizientearen aldaketak eta islatutako espektrora analizatuak.

6. Irudia: 0.33 W/s potentzia aldaketarekin plasmaren aldaketa bortitzen espektro azterketa.



Jasotako seinalearen analisiak, plasmaren eta ganbera barneko uhin elektromagnetikoaren arteko elkarrekintzan aldaketa bortitzak daudela erakutsi du; elkarrekintza aldaketa hauek plasma ganberara igorritako RF seinalearen maiztasun eta potentziaren eta ganberara sartutako gas fluxuaren arabera dira, eta islapen koefizientean jauzi bortitzak izatea eragiten du, plasmaren luminositatearekin (eta beraz plasmaren egoera fisikoarekin) bat datozenak. Lortutako emaitzen egokitasuna ikusirik, erabilitako tresna eta tekniken baliagarritasuna erakutsi da, aukeratutako aplikazioari mugatuak ez daudenak.

7 Etorkizunerako planteatutako norabidea

Behin neurtutako sistema prestatua izanik, eta lehen analisiak plasmaren egoera aztertzeko bidea bideragarria dela jakinik, lanaren hurrengo pausuak bi bide izango lituzke.

Lehena, instrumentua bera beste arlo batzuetara eramatea, eta eskuratzeko instrumentu hutsa beharrezko kontrol sistema bihurtzea; honen ideia nagusia neurtutako sistema ganbera erresonante baten azterketa egiteko erabilia izatea izango litzateke. Alde batetik, datuen eskuratzeko tratamendu zorrotzagoak eginez, bereziki FPGA-ko baliabideak eskuragarri daudela jakinik, neurtutako seinalearen desbideraketak aztertzeko erabilgarria den fase eta koadratura (IQ, *In-phase and Quadrature*) osagaien kalkulua burutuz, adibidez (Fan *et al.*, 2023). Beste alde batetik, eginiko neurtutako horiek magnetotriaren kontrola burutzeko erabili daitezke.

Bigarrena, plasmaren eta LINAC7 proiektuarekin lotua, eginiko analisiaren bitartez azeleragailuaren funtzionamenduan erabilgarria den analisia egitea. Lan honetan aurkeztutako emaitzek plasma aztertzeko aukera ona ematen dute, azeleragailuaren funtzionamenduan erabilgarria den analisia egiteko aukera paregabea eskainiz. Ildo honetan, bereziki interesgarria izango litzateke, besteak beste, islatutako seinalearen analisiaren bitartez ioi iturritik ateratzen den protoi sortaren egoera aurreratu, adibidez, plasma ganberaren eredu ez lineal baten bidez.

Erreferentziak

- Badillo, Inari, 2015. *Advanced techniques for diagnostics and control applied to particle accelerators*. Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU) tesia.
- Elorza, Mikel, 2022. Modelo global para el estudio del plasma de hidrógeno generado en una fuente de iones ECR. Master amaierako lana, UPV-EHU.
- Fan, Xiaozhe, Mustapha Slamani, Li Song, Raghu Srinivasamurthy, eta John Ferrario. 2023. A real time fpga-based iq imbalance measurement and calibration system for high volume production testing. In *2023 IEEE 32nd Microelectronics Design & Test Symposium (MDTS)*, 1–7.
- Feuchtwanger, J., V. Etxebarria, J. Portilla, J. Jugo, I. Badillo, eta I. Arredondo. 2018. Hydrogen electron cyclotron resonance ion sources plasma characterization based on simple optical emission spectroscopy. *Nuclear*

- Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 881.44–47.
- Feuchtwanger, Jorge, Victor Etxebarria, Joaquin Portilla, Josu Jugo, Iñigo Arredondo, Inari Badillo, Estibaliz Asua, Nicolas Vallis, Mikel Elorza, Beñat Alberdi, Rafael Enparantza, Iratxe Ariz, Iñigo Muñoz, Unai Etxebeste, eta Iñaki Hernandez. 2022. New generation compact linear accelerator for low-current, low-energy multiple applications. *Applied Sciences* 12.
- Huang, Yong, Jingjing Guo, Lizhong Jiang, Yeping Huang, Yutao Lou, Xiaowei Li, Yang Chen, eta Luxin Yan. 2023. Photonics-assisted two-step microwave frequency measurement based on frequency-to-time mapping. *Optical and Quantum Electronics* 55.792.
- Oya, J. R. G., F. Munoz, A. Torralba, A. Jurado, A. J. Garrido, eta J. Banos. 2011. Data acquisition system based on subsampling for testing wideband multistandard receivers. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 60.3234–3237.
- , F. Munoz, A. Torralba, A. Jurado, F. J. Marquez, eta E. Lopez-Morillo. 2012. Data acquisition system based on subsampling using multiple clocking techniques. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 61.2333–2335.
- Rani, Meenu, S. B. Dhok, eta R. B. Deshmukh. 2018. A systematic review of compressive sensing: Concepts, implementations and applications. *IEEE Access* 6.4875–4894.
- Rouphael, Tony J. 2009. Chapter 7 - uniform sampling of signals and automatic gain control. In *RF and Digital Signal Processing for Software-Defined Radio*, ed. by Tony J. Rouphael, 199–234. Burlington: Newnes.
- Shannon, C.E. 1949. Communication in the presence of noise. *Proceedings of the IRE* 37.10–21.
- Taleb, Houssein, Abbass Nasser, Guillaume Andrieux, Nour Charara, eta Eduardo Motta Cruz. 2021. Wireless technologies, medical applications and future challenges in wban: a survey. *Wireless Networks* 27.5271–5295.
- Toivanen, V., B. S. Bhaskar, I. V. Izotov, H. Koivisto, eta O. Tarvainen. 2022. Diagnostic techniques of minimum-B ECR ion source plasma instabilities. *Review of Scientific Instruments* 93. 013302.
- Tzou, Nicholas, Thomas Moon, Xian Wang, Hyun Choi, eta Abhijit Chatterjee. 2012. Dual-frequency incoherent subsampling driven test response acquisition of spectrally sparse wideband signals with enhanced time resolution. In *2012 IEEE 30th VLSI Test Symposium (VTS)*, 140–145.
- Venkataramani, R., eta Y. Bresler. 2000. Perfect reconstruction formulas and bounds on aliasing error in subnyquist nonuniform sampling of multiband signals. *IEEE Transactions on Information Theory* 46.2173–2183.
- Vivas, J., 2023a. Análisis de un plasma de resonancia ciclotrónica mediante el estudio de las ondas electromagnéticas incidente y reflejada. Fisikako gradu amaierako lana, UPV/EHU.
- , 2023b. Sistema de adquisición de datos de la onda incidente y reflejada en una fuente de iones de resonancia ciclotrónica. Ingeñieritza elektronikoko gradu amaierako lana, UPV/EHU.
- , I. Badillo, J. Portilla, I. Arredondo, J. Feuchtwanger, eta J. Jugo. 2024. Practical deployment of subsampling-based high-frequency signal acquisition system. *Jornadas de Automática* 45.
- Wang, Hechen, Fa Foster Dai, Zhan Su, eta Yanjie Wang. 2020. Sub-sampling direct rf-to-digital converter with 1024-apsk modulation for high throughput polar receiver. *IEEE Journal of Solid-State Circuits* 55.1064–1076.
- Xia, X.-G. 2000. An efficient frequency-determination algorithm from multiple undersampled waveforms. *IEEE Signal Processing Letters* 7.34–37.

8 Eskerrak/Aipamenak

Lan hau Eusko Jaurlaritzako Hezkuntza Saileko (IT1533-22) eta Eusko Jaurlaritzako Industria, Trantsizio Energetiko eta Jasangarritasun Saileko (KK-2024/00065) laguntzen baita burutu da. Laguntza jaso da baita ere Espainiar gobernuko Zientzia, Berrikuntza eta Unibertsitate Ministerioaren "Proyectos de I+D de Generación de Conocimiento" programaren bidez (PID2023-148792OB-I00) eta FEDER programaren bidez.

Lan hau *Análisis de un Plasma de Resonancia Ciclotrónica Mediante el Estudio de las Ondas Electromagnéticas Incidente y Reflejada* (Vivas, 2023a) eta *Sistema de Adquisición de datos de la onda Incidente y Reflejada en una Fuente de Iones de Resonancia Ciclotrónica* (Vivas, 2023b) gradu amaierako lanen eta *Practical deployment of subsampling-based high-frequency signal acquisition system* (Vivas et al., 2024) lanen uztartzetik eratorria izan da.