

Gradu Amaierako Lana  
Ingenieritza Elektronikoko Gradua

# RF kabitare baterako LLRF sistema baten azterketa eta simulazioak

Egilea/Autor:  
Julen Urain  
Zuzendaria/Director/a:  
Josu Jugo





# Laburpena

Partikula azeleragailuen munduan sekulako eboluzioa egon da 1929. garren urtean, Kaliforniako unibertsitatean, lehenengo aldiz garatu zenetik ziklotroia. Gaur egun, industriako kasu arruntenetatik goi mailako ikerkuntza espezializatuenetaraino hedatuak daude.

Ioi sortak era egokian azeleratzeko prozesuan, hainbat atal garrantzitsutan finkatu beharko da arreta, hala nola, ioien fokalizazio egokia, kabitaten hozte prozesuak edo azelerazio prozesuak. Azeleragailuen espezializazioa dela eta, lan hau soilik azelerazio prozesu honen kontrol egokira bideratuta egongo da.

Partikulak eremu elektromagnetikoez azeleratzen dira. Eremu hauek kasu bakoitzeko beharretara moldatu beharko dira eta ondorioz, eremu hauek sortuko dituen RF kabitatea kontrolatu beharko da; bai sarrera seinalea modifikatuz eta baita fisikoki kabitatea aldatuz.

RF kabitare hauen kontrola LLRF (Low level radio frequency) deituriko kontrol egituraz egin ohi da. Izenak dioen moduan, LLRF kontrol egituran, maila txikiko seinaleak erabiliko dira berrelikadura egiteko. Anplitude txikiko seinaleak izatea inplementatzeko erraztasuna bermatuko du, hardware eskakizun txikiagoak izanda eta bestetik; fidagarriagoa izango da sistema.

LLRF kontrol-sistemak 3 begizta izan ohi ditu: anplitude begizta, fase begizta eta erresoantzi maiztasun doiketa begizta. Lehenengo biek kabitatera sartutako tentsioaren anplitude eta fase guk nahi duguna izatea bermatuko du eta bestetik, doiketa begiztari esker kabitarearen erresoantzi maiztasuna kontrola dezakegu. Kabitare anitzeko sistemetan, eremu elektromagnetikoak, kabitarean zehar, lautuko duen begizta ere izango du.

Lan honetan, LLRF sistemen mundura sarrera emango da. Introdusio txiki baten ondoren, LLRF sistemen deskribapena zein simulazioak egingo

dira.

Lehenik, kabitarearen eredu matematikoa lortuko da. Eredu matematiko hau izango da simulazioetan kontrolatuko dena eta ondorioz, RF kabitarearen eredu matematiko egokiak, simulazioen baliogarritasuna bermatuko du, benetako sistema batera pasatzean. RF kabitareak eremu elektromagnetikoak sortuko dituen kabitarearen denez, RF zirkuituetako teoriak baliatu beharko da, bere transferentzi funtzioa lortzeko.

Kabitarearen eredu matematikoa izanda, LLRF kontrol begiztak gehituko zaizkio. Kontrol atala bi atal nagusitan banatuko da.

Alde batetik, anplitude eta fase begiztak aztertzean, IQ seinaleen bidezko begiztak erabiliko dira. Lanean, anplitude eta fase kontrola aldi berean egitearen onurak kontsideratuko dira, fase eta anplitude begizta orokorren aurrean. Behin IQ begizta diseinaturik dagoenean, simulazioak bizkortuko dituen eredu sinpleko begizta diseinatuko da.

Beste aldetik, erresonantzi maiztasun begiztaren azterketa egingo da. Erresonantzi maiztasunaren begizta arrunta kabitareak sortutako fase aldaketaren detekzio bidez egin ohi da. Atal honetan, hasieran, fase aldaketa detekzio bidezko begiztaren deskribapena egingo da lehenik eta ondoren, LLRF kontrol sistemetan berrikuntza den doiketa kontrola aztertuko da. fase aldaketa detektu beharrean, kabitarearen sarreraren gertatuko den islapen potentzia detektuko da. Begizta hau oinarria hurrengo da: Kabitarearen erresonantzi maiztasuna egokia denean, islatutako potentzia minimoa izango da, ondorioz, sistemaren kontrola islatutako potentzia minimoa bilatzera bideratuko da.

Lanaren azken atalean, Islapen potentzia bidezko doiketa begiztaren baliogarritasuna, benetako kabitare baten frogatuko da, simulaziotik benetako sistemara egin beharko diren modifikazio guztiak kontsideratuz.

# Gaien Aurkibidea

Laburpena . . . . .	I
<b>1 Sarrera</b>	<b>1</b>
1.1 RF kabitatea eta LLRF sistema . . . . .	4
1.2 Helburuak . . . . .	9
<b>2 Kabitatearen ereduaren matematikoa</b>	<b>10</b>
2.1 Ereduaren Simulazioak . . . . .	14
2.2 Analogikotik diskretura . . . . .	16
<b>3 Anplitude eta fase begiztak</b>	<b>18</b>
3.1 IQ begizta . . . . .	19
3.1.1 IQ demodulatzailearen behe pase iragazkia . . . . .	21
3.1.2 Trasferentzi funtzioaren egokitzapena . . . . .	21
3.1.3 Anplitude eta fase begiztaren simulazioa . . . . .	22
3.1.4 Sistemaren eredu sinplifikatua . . . . .	25
<b>4 Erresonantzi-maiztasunaren doiketa begizta</b>	<b>31</b>
4.1 Fase aldaketa bidezko erresonantzi-maiztasun doiketa begizta .	32

4.2	Potentzia islatuaren transferentzi funtzioa . . . . .	33
4.3	Islaturiko potentziarekiko doiketa begizta . . . . .	34
4.4	Doiketa begizta benetako kabitate baten . . . . .	38
4.4.1	Islaturiko potentziaren menpeko begiztaren simulazioak	40

# Kapitulua 1

## Sarrera

Partikula azeleragailuak, bere izenak dioen moduan, eremu elektromagnetikoen bidez kargaturiko partikulak abiadura oso handietara azeleratzeko makina da. Azeleragailuak, industria zein ikerkuntzako arlo ezberdin askotan aurki ditzazkegu.

Kasurik hedatuena, izpi katodikoen tutu bidezko telebistetan da. Kasu honetan, filamentu baten sortutako elektroiak azeleratu egiten dira potentzial diferentzia baten ondorioz eta fosforozko pantaila baten jo izpia eginez. Elektroien hauen norabidea aldatu egiten da bobina batzuen ondorioz irudiak sortu ahal izateko[18].

Medikuntzako tratamendu asko partikula azeleragailuz baliatzen dira ere. Minbizia kentzeko erabilitako erradiazio bidezko terapiak partikula azeleragailuz baliatzen dira. Adibidez, azeleragailu linealak oso erabiliak dira, metodo ezberdinekin zaila izango litzatekeen lekuetara iristeko[3].

Segurtasunean beste aldetik, azeleragailu partikulek sortutako X izpiez baliatuz, kamioiek eraman dezaketen kontrabandoa kontrolatzeko erabiliak dira.

Ikerkuntzan ardaizten bada, bi zail nagusi kontsidera ditzakegu. Alde batetik, ikerkuntza teorikoa egiteko, hau de unibertsoaren galdera zailenak erantzun ahal izateko, oso famatuak dira azeleragailuak, adibidez, Higgs-en bosoi famatua azeleragailuei esker aurkitu zen.

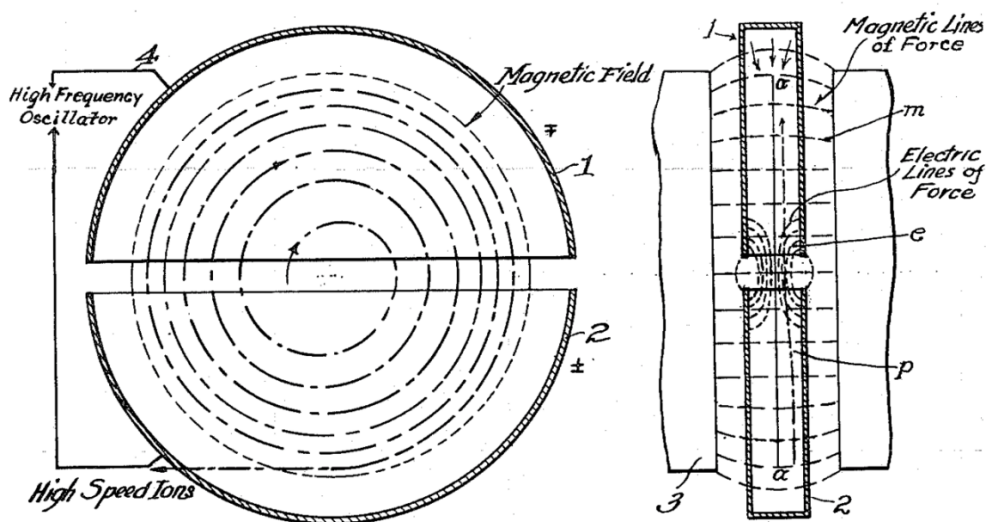
Hauetan, energia oso altuko partikulen arteko talkak egiten dira, beraien

arteko interakzioak eta materiaren propietateak ikasi ahal izateko. Ezaguna Ginebran aurkitu daitekeen LHC-a da. Kasu honetan, bi hadron sorta azeleratu egiten dira azeleragailu zirkular batean eta behin energia oso altuetan aurrez aurreko talka eragiten da. Honi esker, Big Bang-ean aurkitu ahal ziren egoera berdinak aurki daitezke[1].

Beste aldetik, ikerkuntza aplikatua, biologian zein material berrien ikerkuntzan erabili ohi dira mota askotako azeleragailuak. Adibide bat ematearren, material hidrofobikoen sorreran, azeleragailu bati esker platino, titanio eta brontze molekulak bonbardeatzen dira metal baten kontra, materialaren gainazala modifikatuz ura ekidi dezan.

Azeleragailuen itxura aztertzean, dibertsifikazio handiak egon dira hauek izan duten eboluzioa dela eta. Gaur egun, ziklotroi, sinkrotroi, linac, bevatroi, betatroi etab. ditugu.

Lehen ziklotroia 1929an diseinatu zen. Honen funtzionamendua hurrengo da: D itxurako bi imaneri esker partikulek espora ibilbidea dute biratuz bi imanen artean. Bira erdi bakoitzean potentzial diferentzi batek azleratu egiten ditu partikula hauek eta ondorioz, partikula espiratik irtetean energia handia jasoa izango du, emandako biren beste. [9]



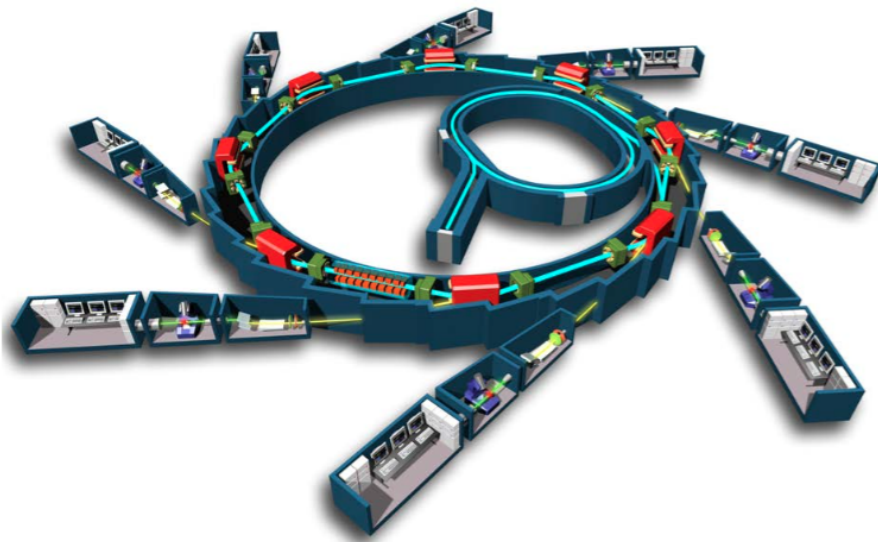
Irudia 1.1: 1934 ziklotroi patentea

Baita ere, izaera lineala duten azeleragailuak daude, Linac deituak. Mota honetako azeleragailuak N hodi dituzte bata bestearen atzean. Hodiaren artean, ioi sortak azelerazio bat pairatzen du eta behin hodi barruan, Fa-



raday kailoa baten egongo balira moduan dabiltza, kanpoko eremuek eragin gabe. Ondorioz, hodi hauek gure ioi sortak fokalizatzeko eta desbidera ez daitezzen erabil ditzakegu. Linac-ak izan ziren lehenengo azeleragailu partikulak, nahiz eta beraien garrantzia azeleragailuak garatzean txikitu egin zen. Hala ere, badirudi hurrengo generazioko azeleragailuak Linac-ak izango direla berriez. Linac-en erabilera oiko bat espalaziorako energi iturri izatea da. Non, azeleratutako ioi sortak material baten kontra jaurtitzen diren[2][4].

Hala ere, gaur egungo azeleragailu askok konbinatu egiten dituzte azeleragailu mota ezberdinak. Sinkrotoi modernoek, adibidez, hiru etapa izan ohi dute: Lehenik Linac bat dute, non, ioi sortak energia maila zehatz batera igoko diren; ondoren, ioi sorta hauek Booster sinkrotoi-ra sartzen dira eta hemen beharrezkoa den azelerazioa emango zaie ioiei. Azkenik, eraztun nagusira sartuko dira sortak eta bertan kurbaturaren ondorioz, argi izpiak emitituko dituzte. Argi izpi hauen informazioa azeleragailuan dauden detektore askoren artean jasoko dute eta zientzilariei bidali. Argi izpietatik lortutako informazio hau izango da ikerketak egiteko erabiliko den informazioa.



Irudia 1.2: Sinkrotoi baten eskema sinplifikatua

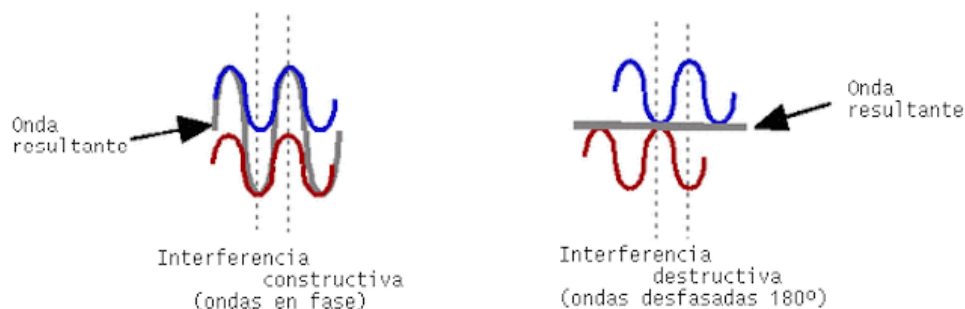
## 1.1 RF kabitatea eta LLRF sistema

Lan honetan aztertuko den kontrola partikula azeleragailuek dituzten RF kabitate azeleradore batera bideratuko da. Gainera, aztertutako kabitatean ez da kontsideratuko ioi sortaren presentzia, nahiz eta benetako kabitate baten, ioi sorta bat kabitatera sartzean kabitateko eremuetan eragina izango lukeen.

RF kabitatea hutsean dagoen egitura da, barnean hainbat gelaxka edo gelaxka bakarria izan dezakeena, non, eremu elektromagnetikoak konfinaturik dauden.

RF kabitatea partikula azeleragailu baten zati garrantzitsuetako bat da. Ioiak azeleratzeko kabitateak emandako eremuak egokiak izan beharko dira, partikulak modu eraginkorrean azeleratu ahal izateko. Kabitatera iristen diren partikulak, kabitateko eremuek duten fase zehatz bat ikusiko dute. Sinkronizaturiko partikulek azelerazio handiagoa jasoko dute, fase ezberdina dutenekin konparatuz. Ondorioz, kabitatearen helburua azelerazio ahalik eta handiena ematea denez, gure eremuen fase eta anplitudea era egokian kontrolatu beharko dugu.

RF kabitateen beste eginkizuna ioi paketeak(Bunches) eratzea izango da. Kabitatearen eremuekin fasean dauden ioi sortak azelerazio handiagoa jasango dute eta aldiz, kontrafasean daudenak moteldu egingo dira. Ondorioz, ioi sortak paketeetan bilduko dira eta paketa moduan bidaiatu. Honi esker, partikulen arteko talkak errazago bermatuko dira eta beste aldetik, energi handiagoko ioi sortak direnez, argi izpi intentsoagoak eragingo dituzte eta detekzioa erraztuko dute.[10]



Irudia 1.3: Partikulen eta kabitatearen arteko fasearen garrantzia

Kabitateen munduan, kondukzio normalekoak eta superkonduktoreak dau-

de. Nahiz eta, superkonduktoreak askoz kalitate faktore hobea izan eta galera txikiagoak, mantentze lanak askoz zailagoak dira hozte sistema konstante bat behar dute eta. Ondorioz, nahiz eta azeleragailu proiektu handi askok ( LHC, ATLAS, CEBAF, SNS) kabitate superkonduktoreak erabili, ikerkuntza asko egin beharko da hauen kostu eta kalitatea hobetzeko.

Kabitate hauek kontrolatzeko erabiltzen den kontrol sistema Low Level Radio Frequency (LLRF) sistema da. Kabitatearen sartzen diren seinaleak oso maiztasun handikoak dira. RF kabitateek behar dituzten kontrol sistemak egiteko aldiz hardware-aren limitazioetara egokitu beharko dira eta ondorioz, informazioa tentsio txikietara jaisten da. Behe maiztasuneko kontrolak fidagarritasun handiagoa eta sistemaren inplementazio errazagoa bermatuko du.

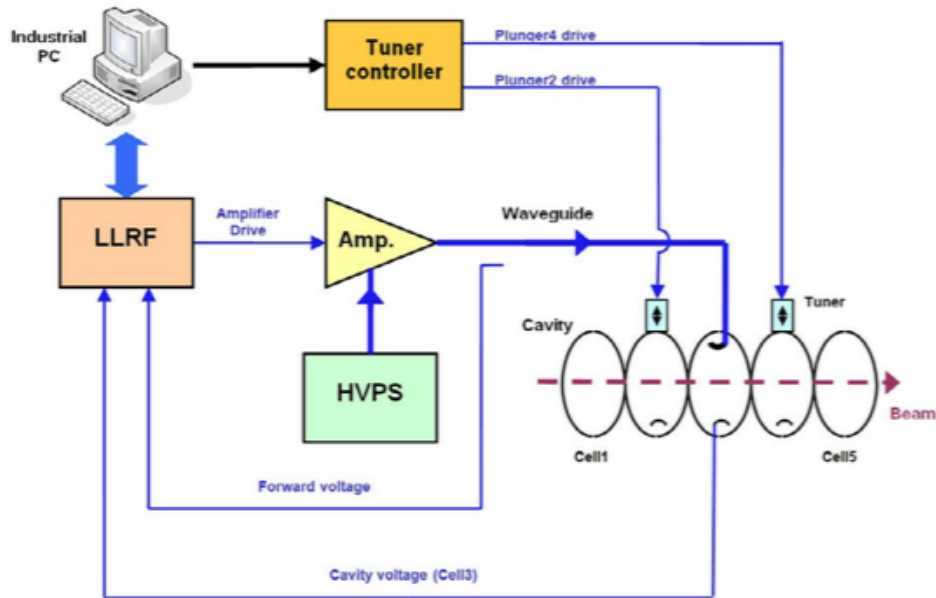
LLRF kontrol sistemaren helburua kabitateko tentsioaren fase eta anplitudearen estabilitatea mantentzea da, sartutako tentsioa kontrolatuz eta erresonantzia maiztasuna ezartzea kabitatearen tunner-ak(motoreak) kontrolatuz. Badaude kasuak, zelda askoko kabitateetan, kabitatearen inguruko eremuaren uniformetasuna bermatzeko begiztak ere erabiltzen diren LLRF sistemetan. Lan honetan, zelda bakarreko kabitate aztertuko denez, ez zaio garrantzirik emango begizta honi.

LLRF sistemaren garapenean hiru begizta diseinatuko dira. Alde bate-tik, kabitatean sartutako eremuen anplitudea setpoint balio konstante baten inguruan mantenduko duen begizta; bestetik, kabitateko eremuen fasea balio finko baten mantenduko duena eta azkenik, kabitatearen erresonantzia maiztasuna doitu egingo duen begizta, kabitateak azelerazio maximoa eman dezan. Lehenengo bi begiztek, kabitatean sarturiko tentsio seinalea kontrolatuko dute eta erresonantzia maiztasunaren doiketa begiztak aldiz, kabitatearen itxura modifikatuko duten motoreak.

Kasu ideal baten kabitateak ez luke izango potentzia islapenik, eragin termikorik edo korrante aldaketarik ioi sortan edo kabitatean. 1.6. irudian ikusi daitekeen moduan[11].

Hala ere, benetako kasu baten, kanpo zein barne perturbazioak edo sistemaren ezlinealtasunak izango direnez, LLRF kontrol sistemak estabilitatea bermatzen du.

Anplitude begizta-ren kasuan, ioi sorta kabitatean sartutako tentsio aldaketak, anplifikadoreen efektu ez linealak eta elementu pasiboen atenuazioaren eraginak kontrolatzeko dago.



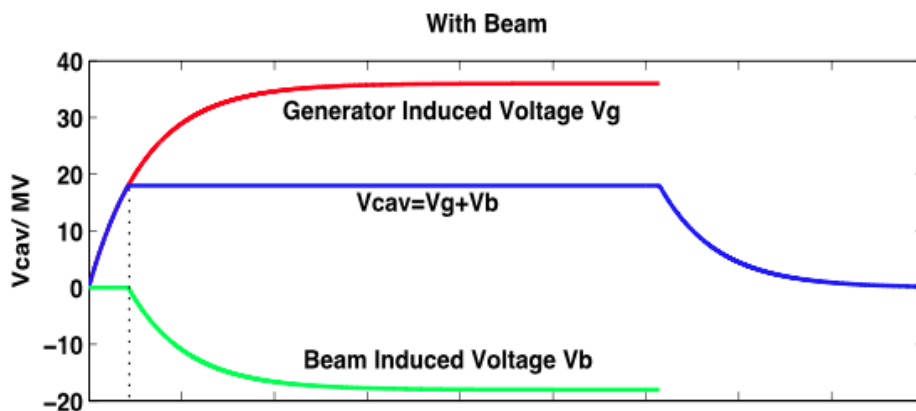
Irudia 1.4: LLRF sistema 3 begiztekin[?]

Fasean gertatu daitezkeen perturbazio nagusiak amplifikadoreen efektu ez-linealek, efektu termalek eta RF seinale sorgailuak eman dezakeen fase zaraten ondoriozkoak izan ohi dira. Bai anplitude, zein fasean gertaturiko perturbazioak azkar zuzendu beharko ditugu eta ondorioz, fase eta anplitude begiztegi begizta azkarrak deitu ohi zaie.

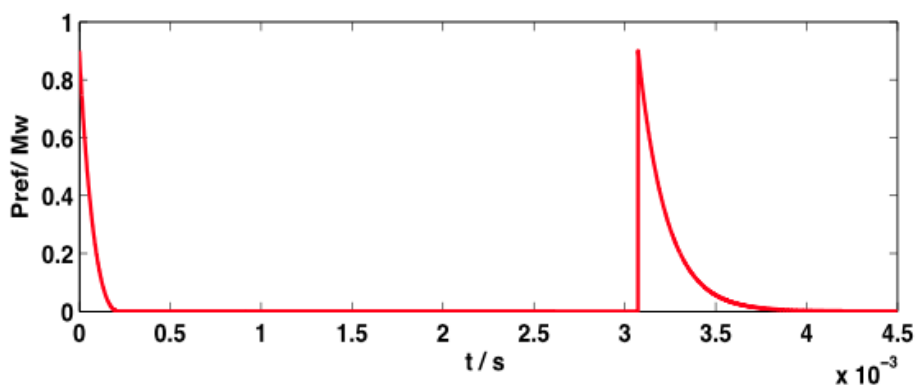
Erresonantzi maiztasun doiketa begiztegi aldiz efektu termalen ondoriozko perturbazioak izaten dira eta hauen kontrol eta zuzenketak ez dira izan behar fase eta anplitude kontrolak bezain azkarrak. Ondorioz, doiketa begiztegi begizta motela deitu ohi zaio.

Fase eta anplitude begiztegi kasuan, RF eremuen fase eta anplitude estabilitateaz aparte, baita ere beharrezko izango da banda zabalera nahikoa, rango dinamiko egokia edo zaratarekiko suszeptibilitatea bermatzea. Exijentziak ohikoak bermatzeko nahikoa da PID-az baliatuz, hala ere, estabilitate zein erantzun finagoak behar diren kasuetan beste kontrolagailu mota batzuz baliatu beharko dira. Hala nola, polo-kokaeraren berrelikadurak[5].

Kontrol motaren inguruan, fase eta anplitude begiztegi kontrol ohikoa bi begiztegi egiten da. Anplitude begiztegi analogiko arruntak, RF-DC detekto-re bat eta VCA batez diseinatzen da. Fase begiztegi analogiko arrunta aldiz,



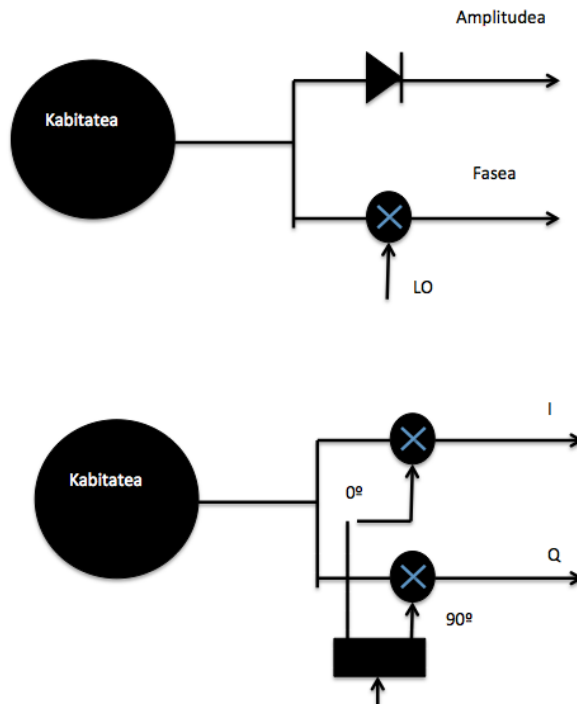
Irudia 1.5: Kabitateko tentsioa ioi sorta kargaturik dagoenean



Irudia 1.6: Potentzia islatua ioi sorta kargatzean

fase detektore eta VCO batez egiten da, hau da PLL bat. Hala ere, Lanean aztertuko den fase eta anplitude begizta IQ modulazio-demodulazio bidez egingo da bere onuren ondorioz anplitude eta fase begizta arruntan aurrean. Adibidez, IQ simetriari esker, fase kontrola 360 egin ahalko da, begizta digitaletan erabilgarria da, begizta bakarra beharko dugu eta errore handien aurrean erantzun hobeagoa ematen du.

Frekuentzi-doiketa begiztaren helburua, kabitateak dituen motorrak kontrolatuz, ioi sorta kabitatean sartzean edo efektu termalen ondorioz sortutako islapen potentzia ahalik eta gehien minimizatzea izango da. Doiketa begiztak ehun Hz inguruko banda zabalera izango du. Lan honetan islapen potentzia bidezko begizta diseinatuko da doiketa hau egiteko. Begizta hau berrikuntza



Irudia 1.7: goian)anplitude eta fase detekzio arruntak. behean) anplitude eta fase detekzioa IQ bidez

bat da LLRF sistemen munduan eta ondorioz, orokorra den fase aldakuntza begizta aurkeztuko da lehenik. Fase aldakuntza detekzio bidezko begiztetan sarrerako seinalearen fasea eta kabitatearen eremuaren fasea konparatu egingo da eta erresonantzi maiztasunean dagoen fase aldaketarekin konparatu. Honela erresonantzia maiztasunaren doiketa begiztak erresonantzi maiztasunean dagoen fase aldaketa bilatuko du.[6]

LLRF sistemak izan daitezke analogikoak, digitalak edo bien arteko konbinazio. Nahiz eta historian zehar sistema analogikoak hasieran erabili, FPGA-er eskertan LLRF sistemetan iraultza bat egon da. Sistema digitalek flexibilitate handiagoa, erreprogramablea izatea eta sistemaren aldagailuen kontrol egonkorra ematen dute[7]. Hala ere, Sistema analogikoak ez dira digitalak bezain sofistikatuak eta atzerapen oso txikiak izaten dituzte sistema digitalen aurrean. Izandako espezifikazioen arabera, mota bateko edo besteko LLRF sistemak erabiliko dira, ez bait dira arruntak soluzio generiko konfigurabileak ematen dituzten LLRF sistemak[8]. Partikula azeleragailu bakoitzak, espezifikazio eta limitazio ezberdinak dituzte eta.

## 1.2 Helburuak

Lan honek lau puntu nagusi jorratuko ditu:

1. Helburu nagusia LLRF sistema baten deskribapena eta simulazioa izango da. Alde batetik, anplitude eta fase begiztan IQ seinaleen bidezko kontrol sistema deskribatuko da eta bestetik, frekuentzi doiketa begizta. Ohikoak diren beste begizta mota batzuekin konparatuko dira lan honetan azterturiko begiztak laburki ulerpena egokia izan dadin. Helburua ez da izango gure begizten alde on eta txar guztiak jakitea.

2. IQ bidezko begiztaren kasuan gainera, kabitatearen eredu sinplifikatu baten baliogarritasuna aztertuko da. Eredu sinplifikatua egokia bada, gure simulazioen ejekuzio denbora murriztu egingo da eta hau erabilgarria izango da denbora luzeko simulazioak egitean. Puntu honen helburua, eredu sinplifikatuaren aurkezpena eta baliogarritasuna izango da, baina ez dira aztertuko sistema honen limitazioak.

3. Frekuentzia doiketa aztertzean, islapen potentzia bidezko doiketa begiztaren diseinua egingo da. Helburua, begiztaren filosofiaren deskribapena izango da eta horretarako beharko dituen atalak aztertu.

4. Azken atal moduan eta modu labur baten, lanean azterturiko LLRF begizta benetako RF kabitate baten erabiltzeko egin beharko diren modifikazioak deskribatuko dira. Behin begizta egokitua dagoela benetako RF kabitateara lorturiko emaitzak aurkeztuko dira. Lan honen helburua aldiz, ez da izango benetako sistema baten erabilitako instrumentazio elektronikoa aurkeztea. Lan honetan, LLRF sistemak modu abstraktuago batean aztertzen da, bere filosofia ulertuz eta ez da sakonduko erabilitako instrumentazioan.

# Kapitulua 2

## Kabitatearen eredu tapen matematikoa

LLRF sistema diseinatzeko, lehenik; RF kabitatearen eredu matematikoa lortu beharko da, honen gainean aztertzeko.

RF kabitatearen eremua hurbilketa batean RLC sistema baten moduan ereduza daiteke. Eredu tapen honek kabitatearen izaera erresonantea, potentzi islapena edo kabitatearen denborarekiko erantzuna adieraz dezake, kabitatearen analisisian interesgarrien diren atalak.

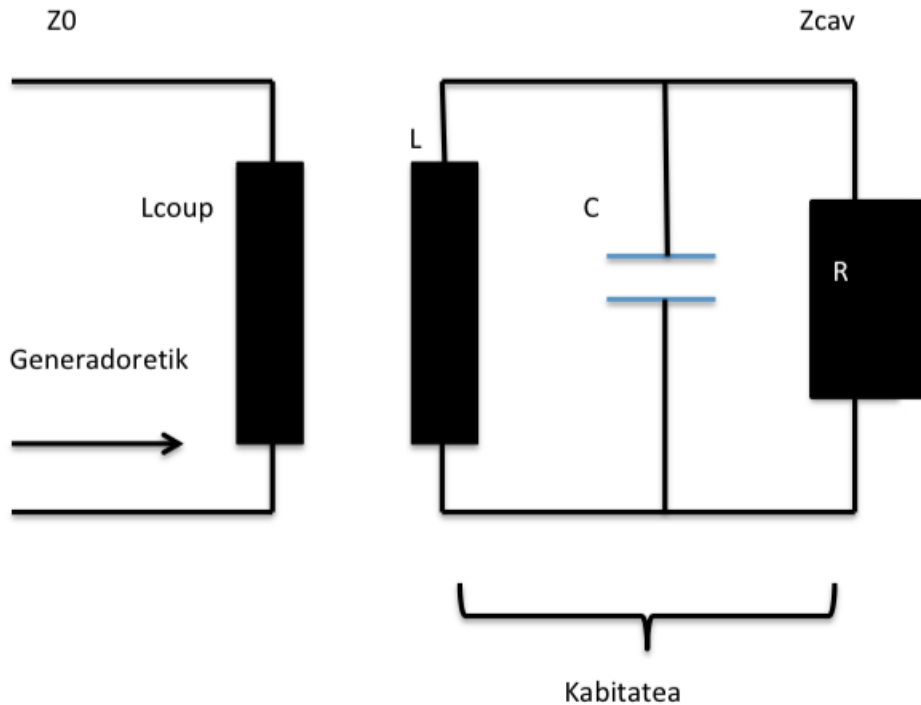
Lehenik eta behin, sistemaren bode diagrama eta denboran erantzuna aztertu nahi da, ondorioz; Laplace-n transformatua erabiliko da kabitateko RF eremuak aztertzeko.

Kontsideratuz RLC zirkuitua, bere inpedantzia  $Z_c$  Laplace eginez (2.1):

$$Z_c = \frac{RLs}{RLCs^2 + Ls + R} = \frac{\frac{Rw_0}{Q_0}}{s^2 + \frac{w_0}{Q_0}s + w_0^2} \quad (2.1)$$

Hala ere, kabitate hau sisteman barneratzeko akopladore bat erabili beharko da eta hau induktiboa den elean  $L_{coup}$  bat gehitu beharko zaio transferentzi funtzioari (Kabitateko energia transmisioa kapazitiboa ere izan ahal da, baina RF kabitateentzako erabilitako akopladore komuna induktiboa izan ohi da [12]) (2.2)





Irudia 2.1: Kabitatearen eredu tapena elementu elektrikoekin

$$Z = \frac{L_{coup}}{L} Z_c = \frac{L_{coup}}{L} \frac{RLs}{RLCs^2 + Ls + R} \quad (2.2)$$

eta  $\beta$  definituz (2.3):

$$\beta = \frac{L_{coup}}{L} \frac{R}{Z_0} \quad (2.3)$$

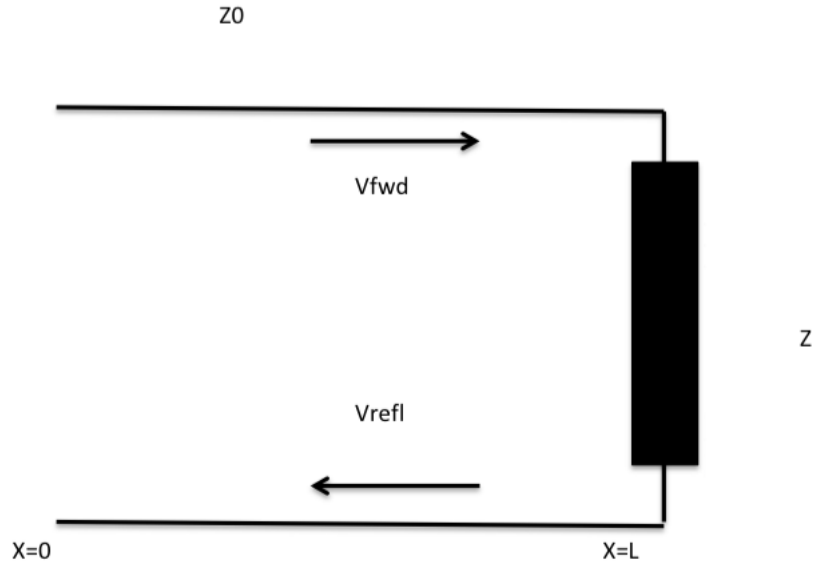
Potentzi transmisioa handiena eta islaturiko potentzia minimoa izateko  $R = Z_0$  eta  $L_{coup} = L$  den kasuan izango da, hau da  $\beta = 1$  denean. Hemendik argi ikusten da ondorioz, erresonantzi maiztasun doiketa begiztak kabitatearen inдукtantzia eta erresistentzia modifikatu dituela kabitatearen forma aldatuz eta doiketa begiztaren helburua  $\beta = 1$  mantentzea izango da.

$Z_0$  izanik transmisio lerroaren inpedantzia karakteristikoa, sistemaren inpedantzia( $Z$ )  $\beta$ -ren menpe hurrengoa lortzen da (2.4):

$$Z = \frac{\beta L s}{RLCs^2 + Ls + R} \quad (2.4)$$

Orain dugun funtzioak kabitateko tentsioa eta kabitateko korronea erlazionatzen digun inpedantzia da.

Lortu nahi den erlazioa kabitateko tentsioa eta sartutako korronearekin ematen dena da. Horretarako transmisio lerro baten zeharreko tentsio eta korrone uhinak kontsideratuko dira (2.5,2.6):



Irudia 2.2: Transmisio lerroa;  $Z$  kabitatearen inpedantzia,  $Z_0$  kablearena

$$V(x) = V_{fwd}(x) + V_{refl}(x) \quad (2.5)$$

$$I(x) = I_{fwd}(x) - I_{refl}(x) \quad (2.6)$$

$$V_{cav} = V_{fwd}(L) + V_{refl}(L) = V_{fwd}(1 + \Gamma) = I_{fwd}Z_0(1 + \Gamma) \quad (2.7)$$

$\Gamma$  (erreflekzio indizea) izanik(2.8):

$$\Gamma = \frac{V_{refl}}{V_{fwd}} = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \quad (2.8)$$

Ikusi daitekeen moduan kabitarearen inpedantzia  $Z = Z_0 = 50\Omega$  denean  $V_{refl}=0$  izango da, hau da ez da egongo tentsio islaturik. Informazio hau interesgarria izango da islaturiko potentzia bidezko begizta diseinatzean.

(2.4) ordezkatzen badugu (2.8)-n:

$$\Gamma = \frac{\beta Ls - RLCs^2 - Ls - R}{\beta Ls + RLCs^2 + Ls + R} \quad (2.9)$$

eta hemendik lortu nahi den transferentzi funtzio atera daiteke(2.10):

$$Z'_{cav} = \frac{V_{cav}}{I_{fwd}} = \frac{2\beta Z_0 Ls}{RLCs^2 + \beta(L+1)s + R} \quad (2.10)$$

Transferentzi funtzioarekin lan egitean askoz erosoagoa egingo da  $Q_0$ (kalite faktorea) eta  $w_0$ ( erresonantzi maiztasuna)-rekin lan egitea. Jakinik 2.11 eta 2.12:

$$Q_0 = \frac{R}{w_0 L} = R w_0 C \quad (2.11)$$

$$w_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.12)$$

$Z'_{cav}$   $Q_0$  eta  $w_0$ -ren menpe jarri dezakegu:

$$Z'_{cav} = \frac{V_{cav}}{I_{fwd}} = \frac{2\beta Z_0}{\beta + 1 + Q_0\left(\frac{s}{w_0} + \frac{w_0}{s}\right)} \quad (2.13)$$

$\beta = 1$ ,  $Z_0 = 50\Omega$ ,  $Q_0 = 30$  eta  $w_0 = 9000 * 2\pi$  rad/s izanik lortzen den transferentzi funtzioa hurrengoa da(2):

$$Z'_{cav} = \frac{5654866.8 * s}{9.593 * 10^{10} + 113097.34 * s + 30s^2}$$

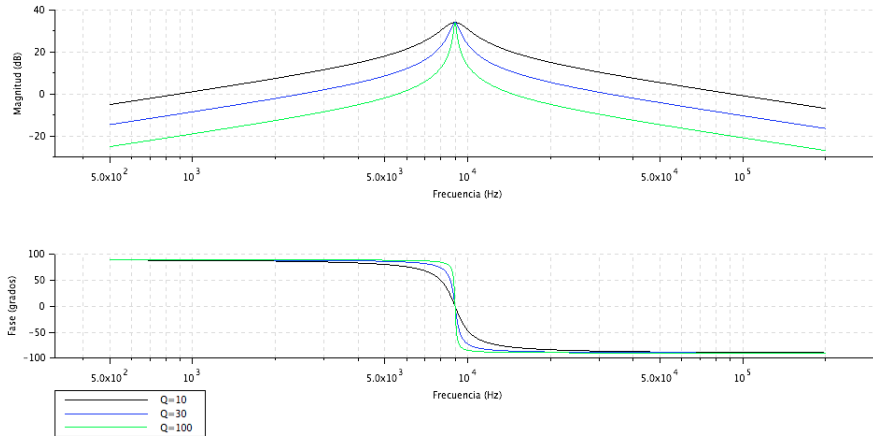
Nahiz eta lehenengo simulazio baten transferentzi funtzio hau erabili, LLRF sistema ezartzean transferentzi funtzioari modifikatu egin beharko da.

Transferentzi funtzio honek  $V_{cav}$   $I_{fwd}$ -ekiko ematen du eta benetako kabitateak  $V_{fwd}$  jasotzen du, ondorioz, LLRF sisteman erabili beharko den transferentzi funtzioak  $V_{cav}$   $V_{fwd}$ -ekiko izan beharko da.

## 2.1 Ereduaren Simulazioak

Orain kabitateko eremuan transferentzi funtzioa lortu dela, bere erantzuna azter daiteke bai frekuentzian eta baita denboran.

Lehenik, transferentzi funtzioaren Bode diagrama lortuko da,  $Q$  eta  $\beta$  faktore ezberdinen aurrean:

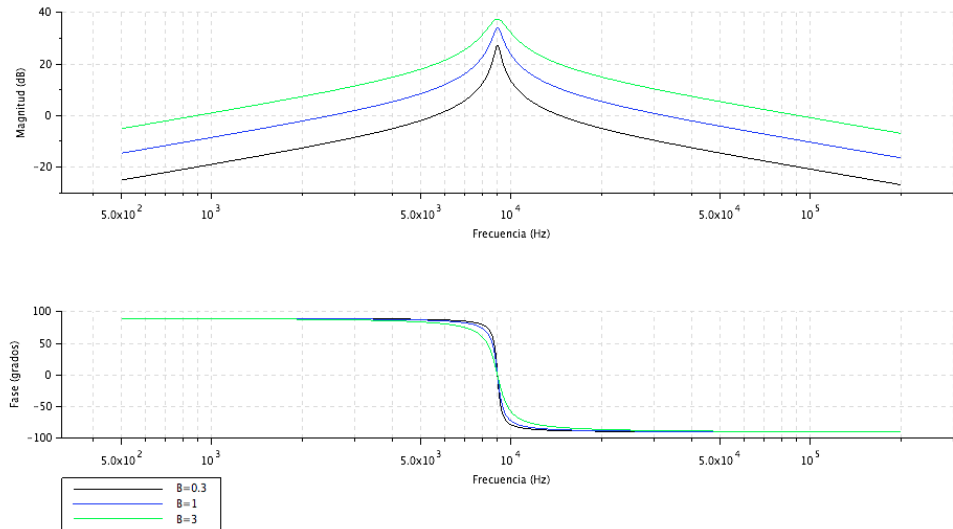


Irudia 2.3: kabitatearen erantzuna frekuentzian, kalitate faktore desberdinen aurrean

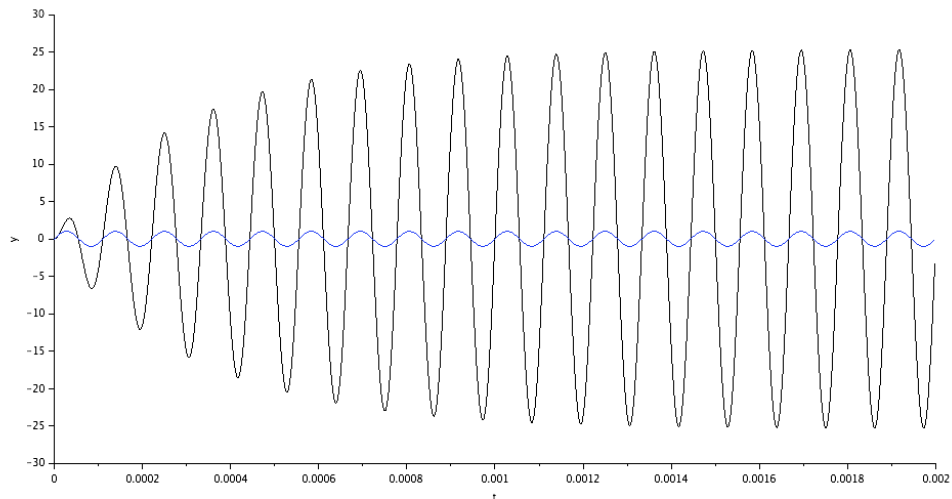
Azter dezakegun moduan,  $Q$  handitzen den eanean banda zabalera murriztuko da, ondorioz, kabitatea ahalik eta selektiboena izan dadin, kalitate faktore ahalik eta handiena izatea nahi da (Irudia 2.3).

Beste aldetik,  $\beta$  handiagoa den kasuetan, kabitateak emandako irabazia handiagoa izango da. Hala ere, ezin da ahaztu behar erresonantzi-maiztasunean energia transmisio maximoa izateko. Hau da, islaturiko potentzia 0 izateko  $\beta = 1$  izan behar dela [12, pag23] frogatzen den moduan (Irudia 2.4).

Denbora eremuko azterketa egiten bada  $w_0$  maiztasuneko seinale sinusoidalak elikatuz sarreran eta  $Q=30$ ,  $\beta=1$  izanda (Irudia 2.5):



Irudia 2.4: kabitarearen erantzuna frekuentzian,  $\beta$  faktore desberdinen aurrean.



Irudia 2.5: Beltzez kabitareko eremuen tentsioa, urdinez sarrerako korrante seinalea, denboraren funtzio.

Lan honetan kontsideratzen den kabitatean ez da egongo ioi sortarik kargatuta. Onarpen hau egoki da RF laborategietarako( ez dago ioi sortzaile-rik) edo sinkrotroi batzuetan( ioi-aren eragina arbuigarria denean), hala ere, Linac-etan, sorgailuak sortutako tentsioa, kabitateko tentsioen mailakoak direnez, ioi sorta kabitatean sartzean guztiz aldatuko du kabitateko eremuen anplitude zein fasea.

Behin ioi sorta kabitatean dugula, kabitatean neurturiko inpedantzia aldatu egingo da. Inpedantzia aldaketa honek islaturiko potentzian eragin zuzena izango du, ondorioz, gure begizta azkarrekin, doitu egingo dugu sistema galera minimoak izateko ioi sortaren korrante eta fase horrentzako. Ondoren, ioi sortaren korrante zein fasea aldatzean, gure begiztak berriz doitu beharko dute kabitatearen akoplamendu faktorea.

## 2.2 Analogikotik diskretura

Hurrengo ataletan diseinatuko diren begiztak analogiko zein diskretuak izan daitezke. Laborategiko sisteman(simulazio ondoren eramango den laborategikoa) hala ere, kabitatea eta IQ moduladorea analogikoak izango dira. Ondorioz, atal analogikoak digitalekin elkartu ahal izateko seinale analogikoa lagindu egin beharko da. Laginketa frekuentzia ezin dezakegu edozein hartu.

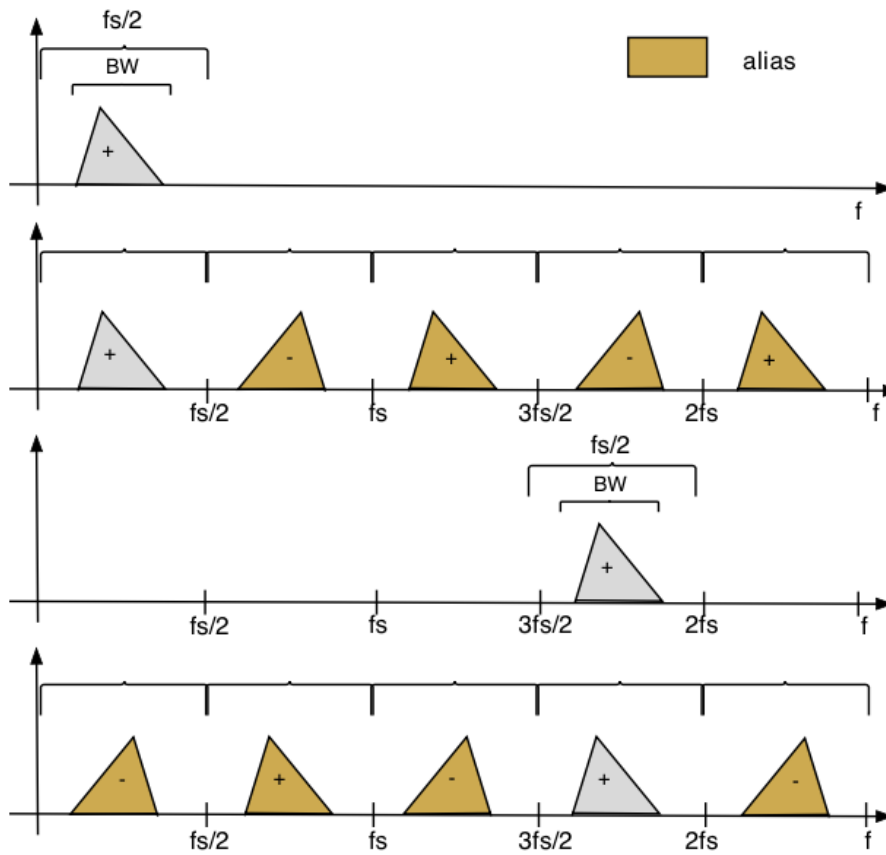
Laginketa hauen maiztasuna egitean hurrengo kontsiderazioak hartuko dira:

Laborategian erabilitako laginketa maiztasuna, subsampling deituriko teknika baten bidez aukeratua izan da. Subsampling-ean, Nyquist-en teorema bete beharrez, Nyquist-Shannon teorema modifikatuaz baliatzen da. Ondorioz, banda zabalera maiztasun maximoa baino txikiagoa denean, laginketa maiztasuna banda zabalerarekin erlazionatua hartzeko aukera ematen du eta ondorioz laginketa maiztasuna maiztasun maximoa baino txikiagoa izan ahal-ko da. [13]:

$$w_s > 2w_0 \quad \text{Nyquist-en arabera} \quad (2.14)$$

$$w_s > 2BW \quad \text{Nyquist-Shannon-en arabera} \quad (2.15)$$

Lanaren kasuan, SciLab bidezko simulazioak egiteko, maiztasun maximoa baino 50 aldiz handiagoa zen laginketa periodoa hartu da, simulazioak ez bait



Irudia 2.6: Goian OverSampling teknika; Behean SubSampling teknika[13]

dira denbora errealean simulatzen. Ondorioz, ez dago laginketa maiztasun maximorik, soilik simulazioen ejekuzio denbora. Laginketa periodo laburragoa hartzeak ordenagailuak behar duen denbora ejekuzioa handitu egingo du, baina hori izango da arazo bakarra. Hala ere, simulazio denbora murrizteko eta laginketa periodoa txikiagotzeko IQ begiztan eredu sinplifikatua erduztatuko da.

# Kapitulua 3

## Anplitude eta fase begiztak

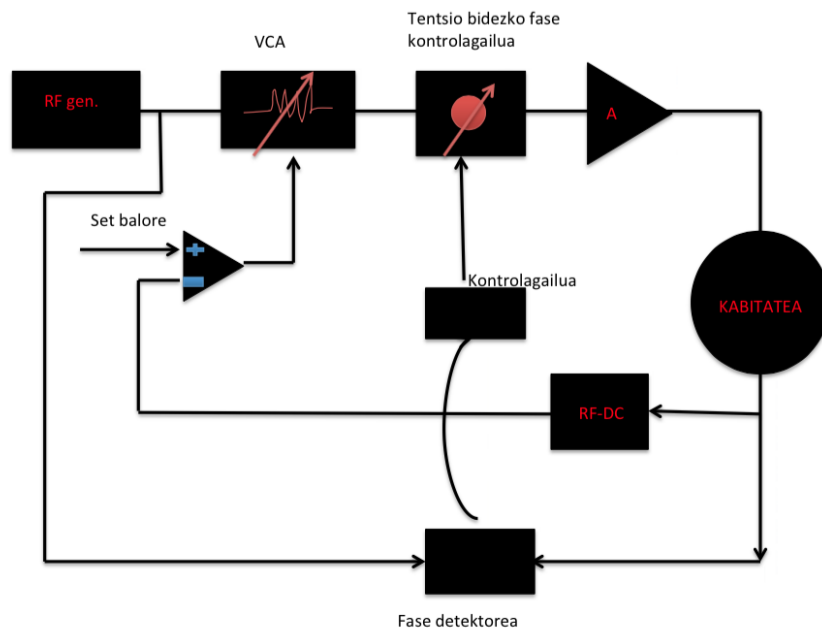
Lan honetan anplitude zein fase begiztak IQ begizta bidez egingo dira. Hala ere, interesgarria da fase eta anplitude begizta arruntak aurkeztea, IQ begiztaren ulerpena hobea izan dadin.

Anplitude begizta analogiko arruntaren kasuan RF-DC detektoreaz eta voltage controlled attenuator(VCA) bidez diseinatzen da. Lehenik, kabitatek irtendako RF tentsio seinalea schottky diodo batetik pasatzen da eta ondoren behe-pase iragazki batetik. Hemendik RF seinalea DC-ra pasako da anplitudea emanaz. Seinale hau erreferentzi balioarekin konparatu egiten da errore seinalea lortuz eta hau VCA-an sartzen da errore seinalea egokituz kabitateko sarrerara.

Fase begizta analogiko arruntak, fase detektorea, kontroladorea eta voltaiaz kontrolaturiko fase aldatzaileaz osatua dago. Fasea detektatzeko, kabitatek lortutako tentsio seinalea modulatu egiten da RF seinale lokal batez. Seinalea behe pase iragazki batetik pasatzean fasearekiko linealki proportzionala den seinalea lortuko da, fasearen balio txikiatarako. Fase txikietan soilik erabilgarria denez, fase begizta honek 180-tan erabilgarria izango da eta ez 360tan;  $\sin(fase) \approx fase$  fasea txikia denean

Behin seinale hau lortua dagoela konparatu egiten da erreferentzi fasearekin eta hau kontroladorean sartzen da. Kontrol seinale honek kabitatean sartuko den tentsio seinalearen fasea aldatuko du tentsioaz kontrolaturiko fase aldatzaileari esker[16].





Irudia 3.1: LLRF sistema arrunta 3 begiztekin

### 3.1 IQ begizta

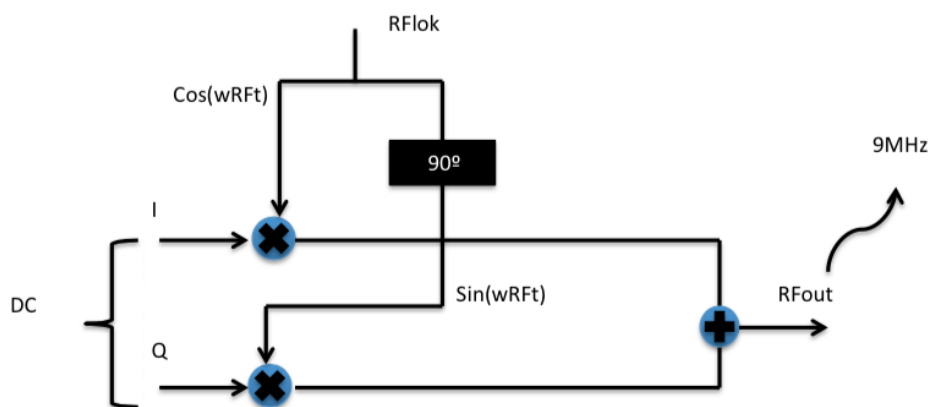
Kabitateko tentsioaren anplitude zein fasearen kontrola, begizta tradizionalak (Phase detector, VCA...) [14] edo In-Phase Quadrature (IQ) begiztez egin daiteke. IQ modulazioaz hainbat onura ditu begizta arrunten aurrean. IQ-k simetria gordetzen du I/Q seinaleen artean, bere elektronika askoz sinpleagoa da beste begiztekin konparatuz eta fase kontrol tarte zabalagoa du, hau da 0-360-ko tartea du, non fase begizta tradizionalak 180ko tartean soilik lan egin dezaket[15]. Hala ere, shottky diodo bidezko tentsio detekzioak zarata gutxiago sartuko dio seinaleari IQ detekzioarekin konparatuz.[16]

Lehenik, IQ begizta analogikoa aztertuko da, nahiz eta ondorengo simulazioetan IQ begizta digitala erabili.

Kabitateko irtendako seinalearen I eta Q balioak lortuak daudela, seinale bakoitza erreferentzi balioekin (fase eta anplitudea dituztena) konparatuko dira eta bertatik lortutako errore seinalea PID-an sartu egingo da kontrol seinale bat lortuz. PID kontrolagailuaren funtzionamendua lanaren bukaeran apendize moduan aurkitu daiteke.

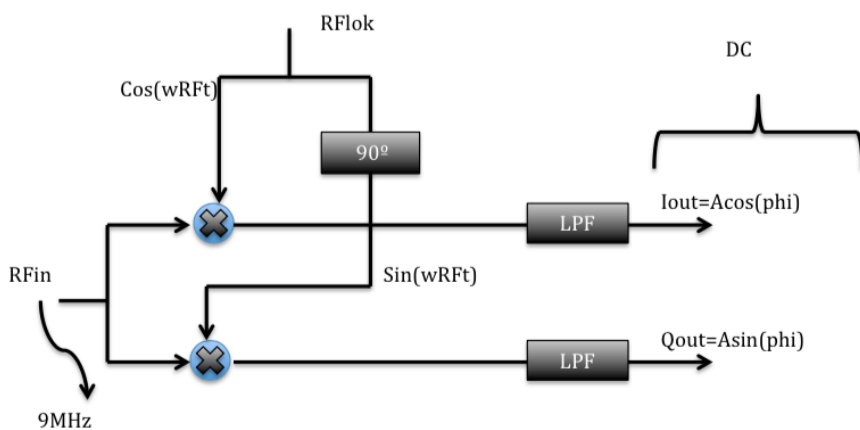
Behin I eta Q seinaleen kontrol seinaleak lortuak daudela, kabitatean berriz sartzeko modulatu egiten dira IQ modulazio bidez:

$$A \sin(2\pi ft + \phi(t)) = A \sin(2\pi ft) \cos(\phi(t)) + A \cos(2\pi ft) \sin(\phi(t)) \quad (3.1)$$



Irudia 3.2: IQ modulazioa

Kabitatetik irteerako RF tentsio seinalea demodulatu egiten da I eta Q seinaleak lortuz.



Irudia 3.3: IQ demodulazioa

3.3 Irudian ikusi daitekeen moduan, seinaleari bi modulazio egiten zaizkio, modulazioen artean 90 egonda eta bertatik I eta Q lortuko dira behe-paseko

iragazkitik pasa ondoren. I/Q seinaleak hasierako seinalearen anplitude eta fasearen menpeko bi seinale konstante dira. Gainera, beren simetriaren ondorioz, kalkulu sinple batzuekin seinalearen anplitude zein fasea lortu daiteke:

$$|RF_{out}| = \sqrt{I_{in}^2 + Q_{in}^2} \quad (3.2)$$

$$\angle RF_{out} = \arctan2(I_{in}, Q_{in}) \quad (3.3)$$

### 3.1.1 IQ demodulatzaileren behe pase iragazkia

Kabitatik irtendako seinale demodulatzean, lehenago aurrean adierazi den moduan, kosinu eta sinuagatik modulatu da seinalea. Modulaketa honek DC-ko osagaiak ( $I_{out}, Q_{out}$ ) ematez aparte, RF seinaleak ere emango ditu:

$$A \cos(w_{RF}t + \phi) \sin(w_{RF}t) = \frac{A}{2} (\sin(2w_{RF}t + \phi) - \sin(\phi)) \quad (3.4)$$

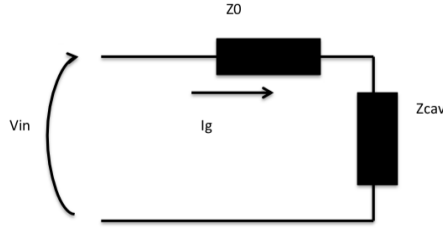
$$A \cos(w_{RF}t + \phi) \cos(w_{RF}t) = \frac{A}{2} (\cos(2w_{RF}t + \phi) + \cos(\phi)) \quad (3.5)$$

$$Q = \frac{A}{2} \sin(\phi) \quad (3.6)$$

Ikusten den moduan  $2w_{RF}$  maiztasunean gai bat lortzen da eta ezabatu egin beharko da iragazkiaren ondoren DC-ko osagaiak soilik izan ahal izateko. Ondorioz, behe paseko iragazkiaren bandazabalera  $2w_{RF}$  baino txikiagoa izan beharko da. Simulazioak egiteko  $BW = w_{RF}/10$  hartu zen, baldintza bete zezan.

### 3.1.2 Trasferentzi funtzioaren egokitzapena

2. kapituluaren lortutako sistemak kabitateara sartutako tentsioa eta kabitateko korrantearekin erlazionatzen zituen inpedantzia ematen zuen. Orain aldiz, IQ begizta martxan jartzeko, berrelikatu egingo den seinalea kabitatearen tentsioa da; ondorioz, sartutako tentsioa eta kabitateko tentsioa erlazionatzen dituen transferentzi funtzioa behar da. Honetarako hurrengo zirkuitua kontsideratzen da,



$$V_0 = I_g Z'_{cav} \quad (3.7)$$

$$V_0 = \frac{Z'_{cav}}{Z_0 + Z'_{cav}} V_g \quad (3.8)$$

Transferentzi funtzioa  $TF = \frac{Z}{Z+R_g}$  izango da.

$Z_0 = 50\Omega$  kontsideratuz:

$$TF = \frac{5.42 * 10^{17} s + 6.39 * 10^{11} s^2 + 1.68 * 10^8 s^3}{4 - 602 * 10^{23} + 1.62 * 10^{18} s + 2.89 * 10^{14} s^2 + 5.089 * 10^8 s^3 + 45000 s^4} \quad (3.9)$$

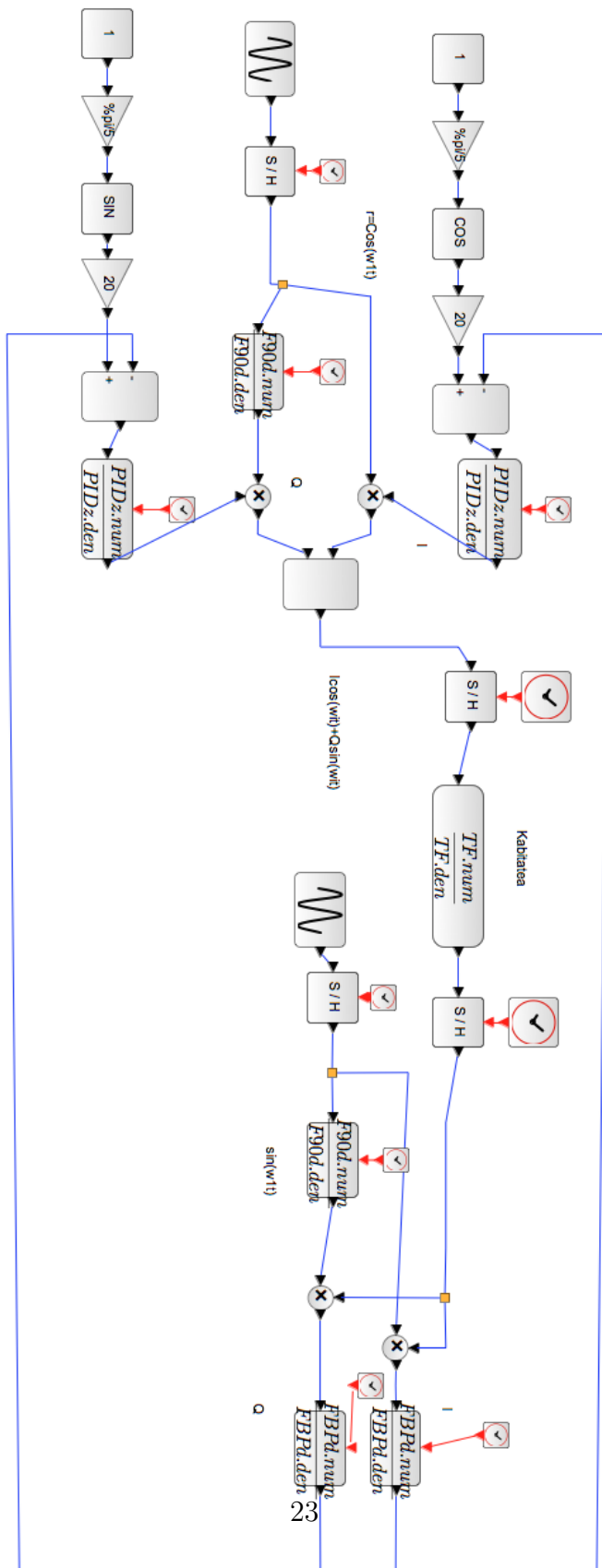
### 3.1.3 Anplitude eta fase begiztaren simulazioa

Lehenengo saiakera baten, sistemaren fasearen erantzuna aztertzen da. PID-an  $K_d=K_i=0$  eta  $K_p=1$ -n utzi da. Fasean erreferentzia 60 jarri da eta salto bat -15ra 0.025 segunduan transizio eta egonkortze denbora ikus ahal izateko (Irudia 3.6).

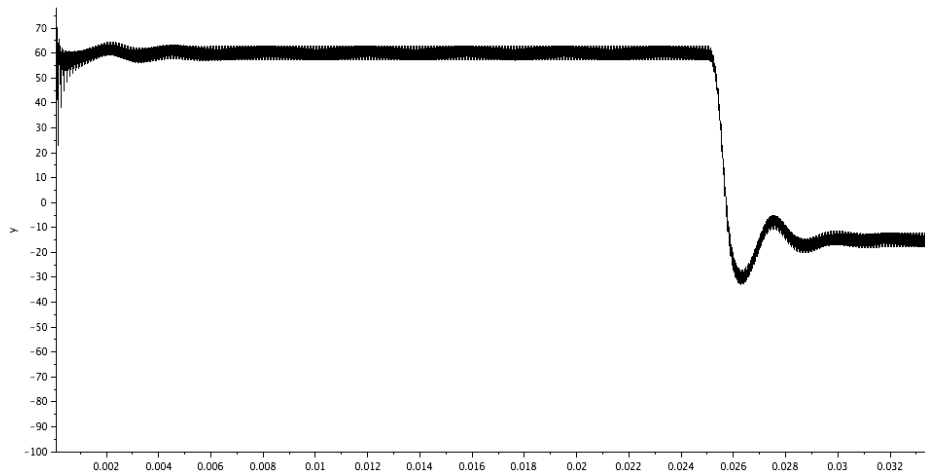
Ikusten denez, sistemaren errorea +4 -koa da. Offset handiagoa izango balitz,  $K_i$  handituz, setpoint-arekiko errorea murriztuko zen, bainon egonkortze denbora handituko litzateke.

Bigarren simulazioan, anplitudearen erantzuna aztertzen da, lehenago agertzen den moduan anplitudea lortzeko  $V_{out} = \sqrt{I^2 + Q^2}$  da. Lehenengo saiakeran, 50-ean jarriz erreferentzia, hurrengo balioak erabili dira  $K_p=1$  eta  $K_i=K_d=0$ . Emaitza 3.7 irudian ikusi daiteke:

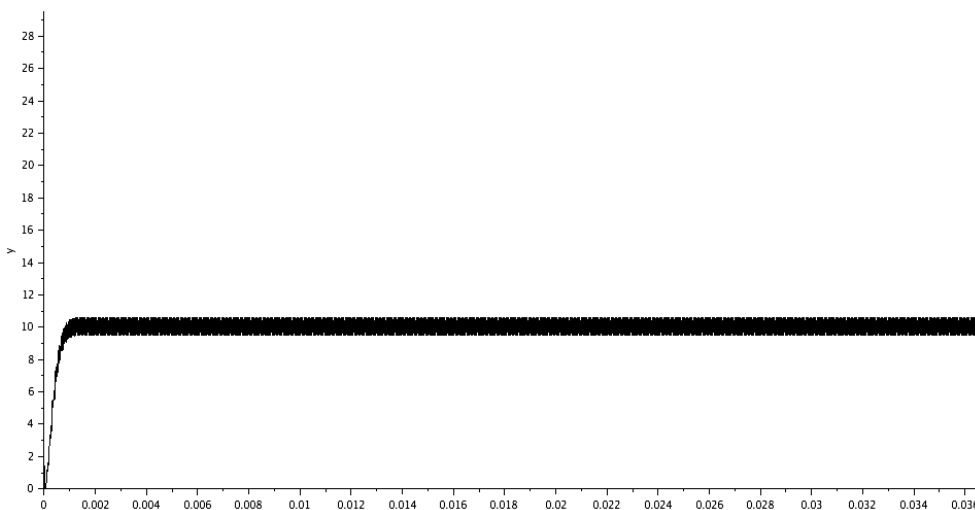
Orain argi ikus dezakegu offset errorea erreferentziarekiko. errore hau zuzentzeko  $K_i$  handitu egin ahal da eta erantzuna bizkortzeko eta egonkortzeko



Irudia 3.4: IQ begizta



Irudia 3.5:  $V_0$ -ren fasea denboraren menpe.

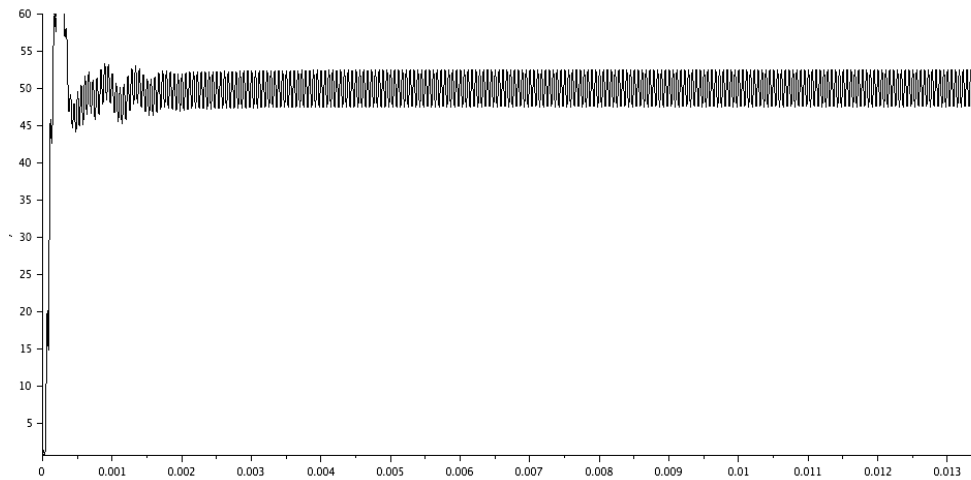


Irudia 3.6:  $V_0$ -ren amplitudea denboraren menpe  $K_p=1$  eta  $K_i=0$  kasuan

$K_p$  ere. Ondorioz,  $K_p=70$  eta  $K_i=40$  diren kasuan hurrengo grafika lortzen da (Irudia 3.8):

Ikusi dezakegun moduan, offset-eko errorea nahiko txikia da bestearekin konparatuz eta arazo moduan, orain sistema oszilakorra da.  $K_d$  handituz oszilazio hauek murriztu ahal dira.

PID-ak helburuaren beharretara moldatu dezake sistema, ondorioz, sistema oso azkarra behar bada,  $K_p$  handia jarriko da eta  $K_i$  txikia. Aldiz, offset



Irudia 3.7:  $V_0$ -ren anplitudea denborarekiko  $K_p=70$  eta  $K_i=40$  den kasuan errore txikikoa nahi bada  $K_i$  handia izango da etb.

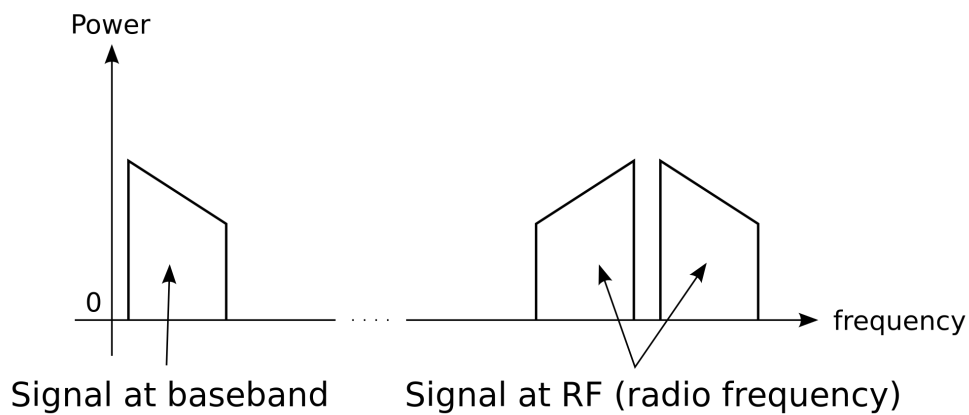
### 3.1.4 Sistemaren eredu sinplifikatua

LLRF sistemak RF atal bat (kabitatea) eta base-banda atal bat du (LLRF). Honen ondorioz simulazioak egiteko denbora handia izan daiteke. RF aldaketak oso azkarrak diren bitartean, base-bandako denboran aldaketak nahiko motelak dira. Ondorioz, RF atalerako laginketa maiztasun handi bat behar da, base-banda atalerako behar den laginketa maiztasuna askoz txikiagoa den bitartean. Honek, simulazioak denbora asko irautea eragin dezake, base-bandako aldaketak ikusi ahal izateko, laginketa asko egin beharko direlako. RF kabitatea zenbat eta frekuentzi handiagoetan ibili, orduan eta eragin handiagoa izango du simulazio denboran arazo honek.

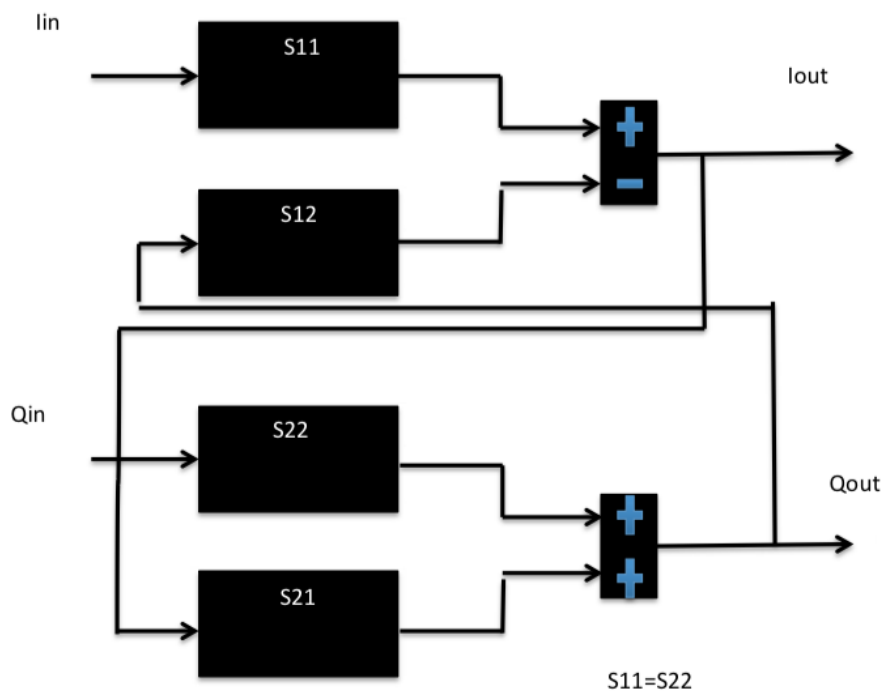
Konponbidea RF kabitatearen base-bandako baliokidea lortzea izango da. Ondorioz, laginketa maiztasun txikiagoak erabili ahalko dira, denboran luzeagoak diren simulazioak eginez, konputazio denbora tarte txiki baten.

Eredu sinplikatua sistema diseinatzean, I eta Q gaiak daudenez, buruzburuko eraginez aparte ( $I_{out}/I_{in}$ ), eragin gurutzatuak ere kontuan hartu beharko lirateke ( $I_{out}/Q_{out}$ ). 3.10 irudian base-bandako eredu sinplifikatuaren bloke diagrama ikusi daiteke:

Ikusi daitekeen moduan, sarrera moduan DC seinaleak izango dira, hau



Irudia 3.8: RF seinalearen informazioa basebandan



Irudia 3.9: Basebandako eredu baliokidea

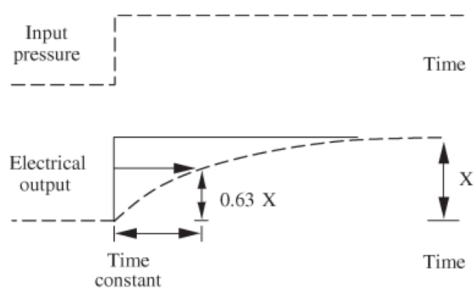
da, I eta Q seinaleak eta beste aldetik, I eta Q-ren simetria dela eta  $I_{out}/I_{in}$  eta  $Q_{out}/Q_{in}$  transferentzi funtzioak berdinak izango dira teorikoki.

Lehenengo hurbilketa batean, atal gurutzatuak arbuia egingo dira. Eredu sinplikatua lortzeko lehen mailako sistema bat hartzen da. Lehen mailako eredu lortzeko lehenik eta behin, denbora konstantea lortu behar da.



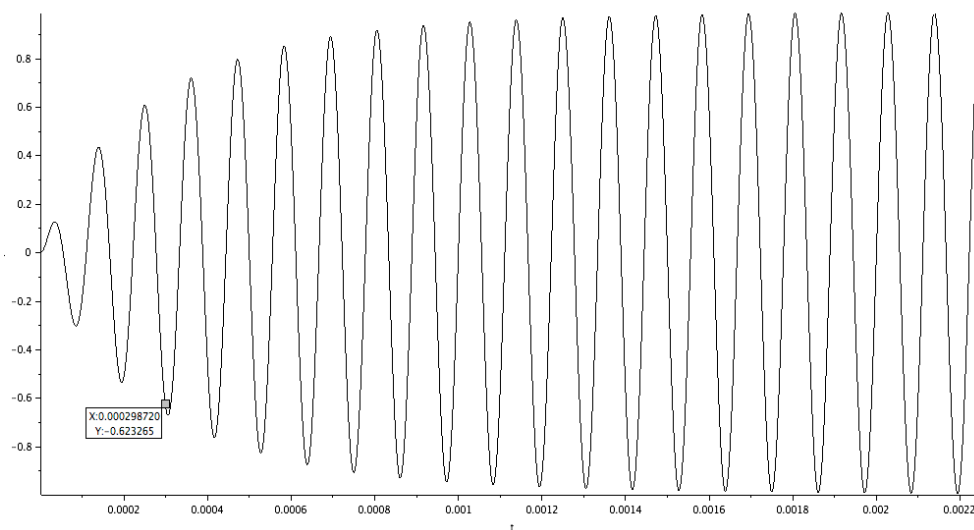
Lehen mailako TF=  $K/(1+Ts)$  T:denbora konstantea

Denbora konstante definizioz, maila aldaketa baten aurrean, sistemak  $(1-1/e)x = 0.63x$  anplitudea lortzeko behar duen denbora da, x egoera egonkorreko anplitudea izanik.



Irudia 3.10: denbora konstantearen irudikapena

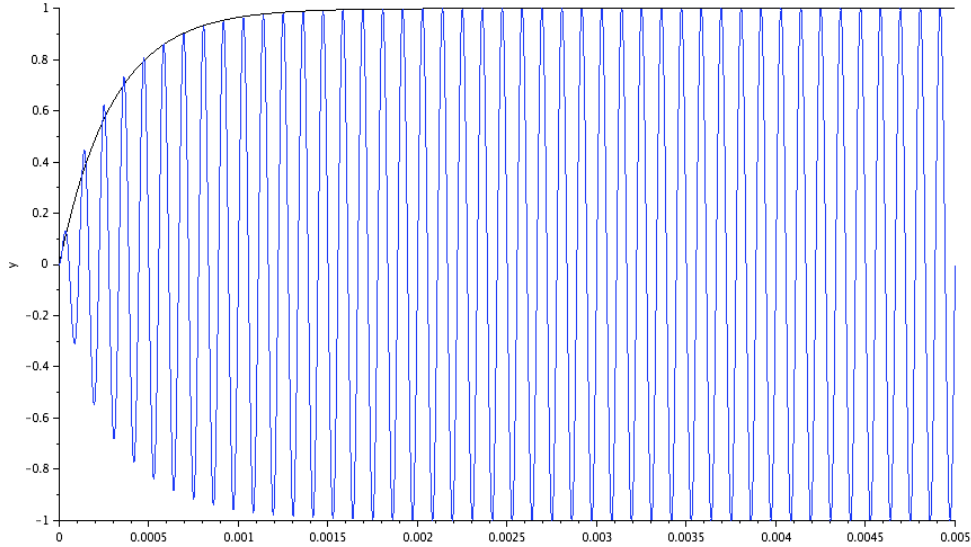
Badago aukera ere, denbora konstantea maiztasun eremutik lortzea, hau  $T=1/BW$  bait da, baina, lan honen kasuan denbora eremutik lortuko da:



Irudia 3.11:  $V_{out}/V_{in}$  funtzioaren irteera, denbora konstantea 0.632-an dugu  $x=1$  izanik.

3.12 iruditik lortzen da  $T=2.98E-4$  dela eta  $K$  lortzeko ereduztapen osoaren eta eredu sinplifikatuaren egoera egonkorreko anplitudeak konparatuz lortzen da.

RF ereduaren irteera normalizatu egin eta eredu sinpleko irteerarekin konparatu(Irudia 3.13)



Irudia 3.12: RF eredu normalizatuaren irteera urdinez eta eredu sinplifikatuaren irteera beltzez.

RF ereduaren irabazia  $K=1/0.41$ -ekin normalizatua dagoenez, eredu sinplearen irabazia, RF eredu ez-normalizatuaren berdina izan dadin  $K=0.41$  izango da.

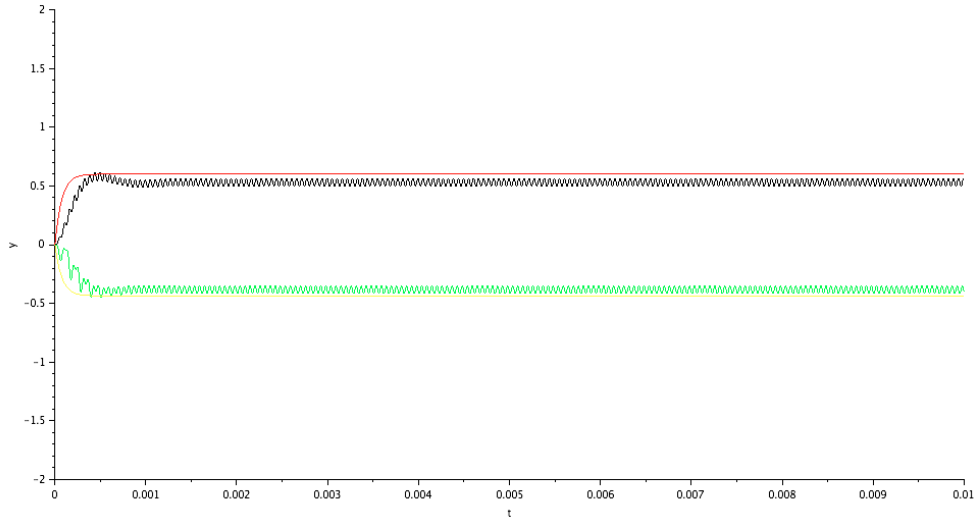
Lortutako transferentzi sinplifikatua hurrengoa da:

$$TF_{Simple} = \frac{0.41}{1 + 0.000297s} \quad (3.10)$$

Behin lehen-mailako sistema diseinatua dagoela, simulazioak egingo dira. Eredu sinplifikatuaren begizta eraikitzean, LPF-a gehitzea garrantzitsua da. RF begizta LPF-a goi-mailako gaiak baztertzeko erabiltzen zen. Eredu sinplean, DC-ko osagaiak erabiltzen direnez, badirudi ez dela behe pase iragazkirik behar. Hala ere, behe mailako iragazkia baztertzen bada eredu sinpleko sistemaren izaera aldatu egingo da eta ez du izango RF sistemaren erantzun antzekoa.

LPF-aren garrantzia ikusteko, lehenengo saiakeran ez da behe-paseko iragazkia erabiliko. Fasearen erreferentzia  $-\pi/5$  eta anplitudearen erreferentzia

1-ean jarriko da.  $K_i=0$  eta  $K_p=8$  izanda hurrengo erantzuna lortzen da(Fig 4.14):

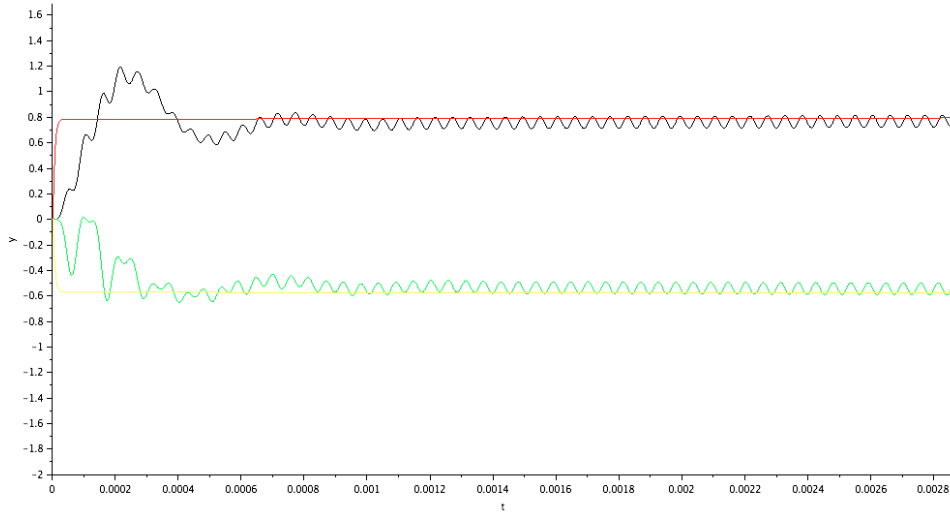


Irudia 3.13: I eta Q seinaleak irteeran eredu simple eta RF ereduaren  $K_p=8$  eta  $K_i=0$  kasuan.(LPF gabe)

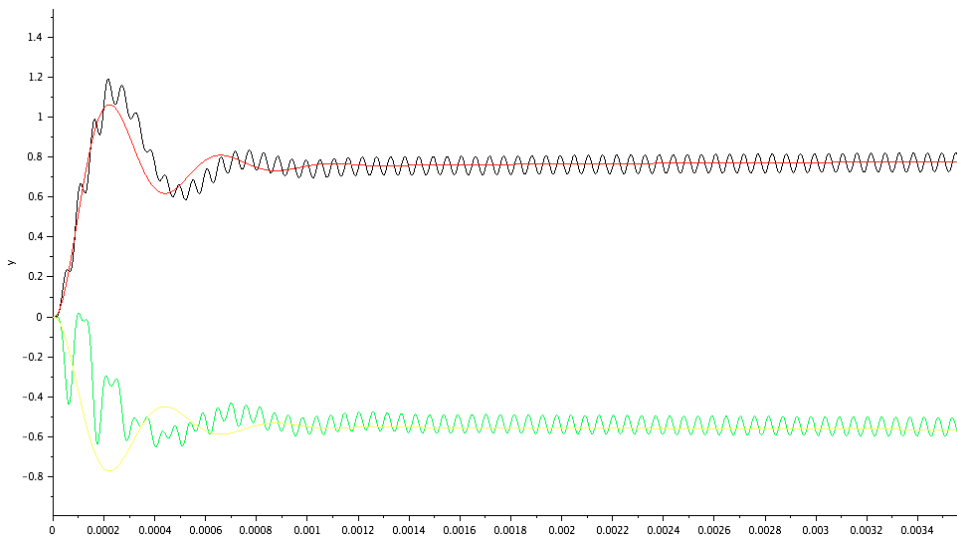
Ikusi daitekeen moduan,  $K_p$  txikitzen eredu sinplifikatuak nahiko ondo jarraituko dio RF ereduko sistemari. Aldiz,  $K_p$  eta  $K_i$  handitzean hurrengo erantzuna lortzen da,  $K_p=30$  eta  $K_i=205$  kasuan(Fig 4.15):

Ikusi daitekeen moduan, eredu sinpleak ez du jarraitzen RF ereduaren irteera. Ondorioz, LPF gaia gehitzea kontsideratu behar da eta lortutako grafika hurrengoa da(Fig 4.16):

Oraingo kasuan, eredu sinpleko I(gorritz) eta Q(horiz) lehenengo kasuan baino hobeto jarraitzen dute RF sistemaren jarrera. Suposatu daiteke gai gurutzatuen adizioak benetako eta eredu sinplearen erantzuna gehiago berdinduko duela. Hala ere, lan honetan ez da aztertu gai gurutzatuen eragina, simulazioetarako nahiko da eta buruz-burukoa.



Irudia 3.14: I eta Q seinaleak irteeran eredu sinplean eta RF ereduan. (LPF gabe)



Irudia 3.15: I eta Q seinaleak irteeran eredu sinplean eta RF ereduan(LPF kontsideratuz)

## Kapitulua 4

# Erresonantzi-maiztasunaren doiketa begizta

Lanaren hasieran komentatu den moduan, aztertuko den LLRF sistemak 3 begizta ditu. Anplitude eta fase kontrola IQ begiztari esker egiten da eta kabitarearen erresonantzi maiztasunaren kontrola aldiz erresonantzi maiztasun-doiketa begiztari esker.

Frekuentzi doiketa begiztak kabitarearen erresonantzi-maiztasuna kontrolatuko du, islaturiko potentzia minimoa izan dadin, ioi sorta kargatzen denean kabitarean edo efektu termalen ondoriozko aldaketak gertatzean.

Begizta diseinatzeko bi mota aztertuko dira lan honetan. Alde batetik eta LLRF sistema gehienetan erabiltzen dena sarrerako eta irteerako(kabitateko) seinaleen arteko fase aldaketarekin erlazionatua dago. Gainera, Begizta azkarrean IQ bidezko begizta erabiltzen diren LLRF sistemetan, IQ bidez lorturiko seinaleaz baliatzen da fase aldaketa hau lortzeko.

Beste aukera bat islapen potentziaz baliatzea izango da. Erresonantzi maiztasunean islaturiko potentzia minimoa izango da kabitareaz aztertutugunean ikusi dugun moduan. Ondorioz, islaturiko potentzia jasotzen bada, sistema, minimoa bilatuz kontrola daiteke.



IQ begizta erabiltzen den kasuan fase detektoreen beharrea, fasearen detekzioaz aparte, beste sistema osoa berdina izango litzateke.

Lan honetarako diseinatu zen begizta beste filosofia batez funtzionatzen du. Kasu honetan ez da bilatuko erreferentzi balio zehatz bat baizik eta potentzia islatua minimoa izatea. Erresonantzi maiztasunean potentzia islatua minimoa da; ondorioz, doiketa begizta minimo hori bilatzera bideratua egongo da.

Begizta diseinatu aurretik potentzia islatuaren transferentzi funtzioa lortuko da, sarrerako tentsioaren aurrean.

## 4.2 Potentzia islatuaren transferentzi funtzioa

Kabitatean islaturiko potentzia erduztapena egiteko hainbat kontsiderazio egin behar dira. Transferentzi funtzioak irabazi minimoa emango du erresonantzi maiztasunean.

Erresonantzi-maiztasunean energia maximoa transmitituko da kabitatera eta ondorioz, islatua minimoa izango da. Baita ere, sistemaren motorrak kontuan hartu beharko dira. Doiketa begiztak motor hauek kontrolatzen ditu eta hauek gure transferentzi funtzioaren erresonantzi maiztasuna aldatu beharko dute, potentzia islatu minimoko erresonantzi maiztasuna bilatuz. Potentzia islatuaren anplitudearekin lan egiten denez, transferentzi funtzioaren fasea azterketa ez da emango, teorian egokia da eta.

Nahiz eta kasu errealean transferentzi funtzioak minimo bat izango duen erresonantzi maiztasunean. Hala ere, simulazioetan arazo numerikoak ematen ditu ereduak. Ondorioz, erabiliko den transferentzi funtzioak maximoa emango du erresonantzi maiztasunean errazagoa da eta eredu matematiko hau erabiltzea.

Ondorioz, ordenagailu bidezko simulazioetan erabiliko den begiztaren logika inbertsoa izan beharko da. Hau da, maximoa bilatuko du, minimoa bilatu beharrea. Ondoren, begizta benetako kabitate baten erabiltzean, logika inbertitu beharko da.

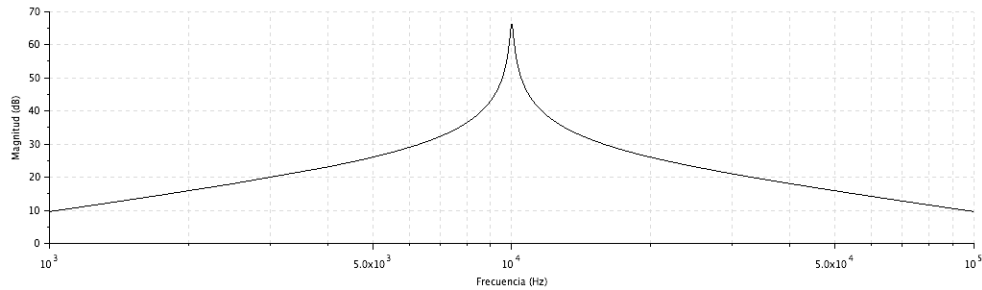
Nahiz eta simulazioko sisteman maximoa bilatzen egon, jarraian minimoa bilatzen dela esango dugu benetako sistema baten filosofia mantendu ahal izateko.

$\frac{P_{isl}}{V_{in}}$  (s) itxura 2.ordenako sistema baten itxura izango du:

$$TF1 = \frac{K(w_0 + a)}{s^2 + 2\delta(w_0 + a) + (w_0 + a)^2} \quad (4.1)$$

non, K :sistemaren irabazia,  $\delta$ : indargetze faktorea, a: motorran eraginez aldaturiko maiztasun tartea eta  $w_0$ : kabitatearen erresonantzi maiztasun naturala

K=30,  $\delta=0.007$  eta  $a=1000*2\pi$  jarriz eta  $w_0=9000*2\pi$  rad/s izanez, bode diagramaren magnitudearen itxura hurrengoa da:



Irudia 4.2: 2. ordenako sistemaren bode diagramaren magnitudea

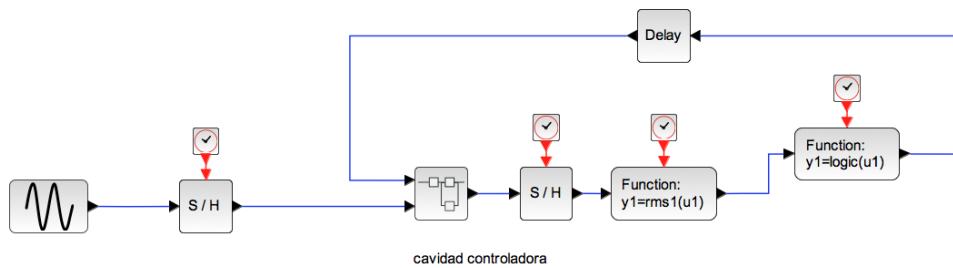
Ikusi daitekenez minimoa motorren eraginez aldatuko egingo da; ondorioz, benetako kabitatearen  $\beta$ (2.kapitulua) efektu termalen ondorioz aldatzean, begiztak motorrak kontrolatuko ditu ahalik eta transmisio egokiena egon dadin eta ondorioz, potentzia islapen txikiena izateko.

IQ begiztak ez bezala, potentzia islapen bidezko begiztak ez du erreferentzi bat izango. Horren beharrea potentzia islatuaren magnitude minimoa bilatuko du.

### 4.3 Islaturiko potentziarekiko doiketa begizta

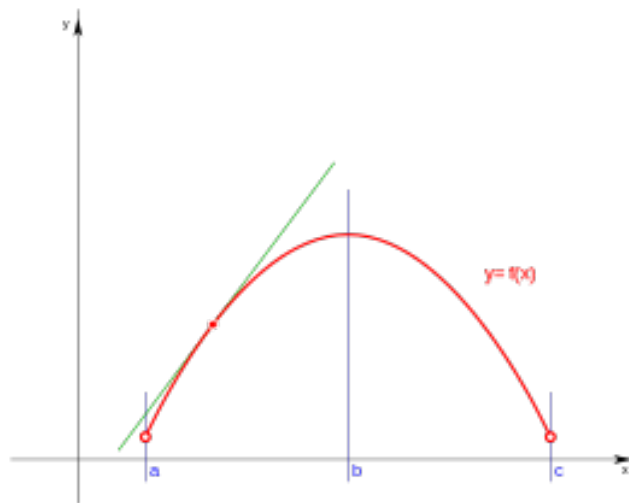
Doiketa begiztaren helburua, kabitateak emandako islaturiko potentzia minimoan mantentzea izango da. Behin minimoan dagoenean, ahalik eta oszilazio txikienak izatea nahi izango du; ahalik eta zehatzena izan dadin.





Irudia 4.3: Doiketa begitzaren bloke diagrama

Erabiliko den logika oso sinplea izango da. Denbora tarte definitu baten bi balio hartuko dira, hau da denboraren hasierakoa eta denbora tarte horren bukaerako balioa eta beraien artean konparatu dira. Berain artean malda berakorra badute, sistemak motorrari zentzu horretan jarraitzea esango dio eta malda gorakorra bada aldiz, norantza aldatzeko esango dio sistemak, hau da funtzioaren deribatua aztertuko da.



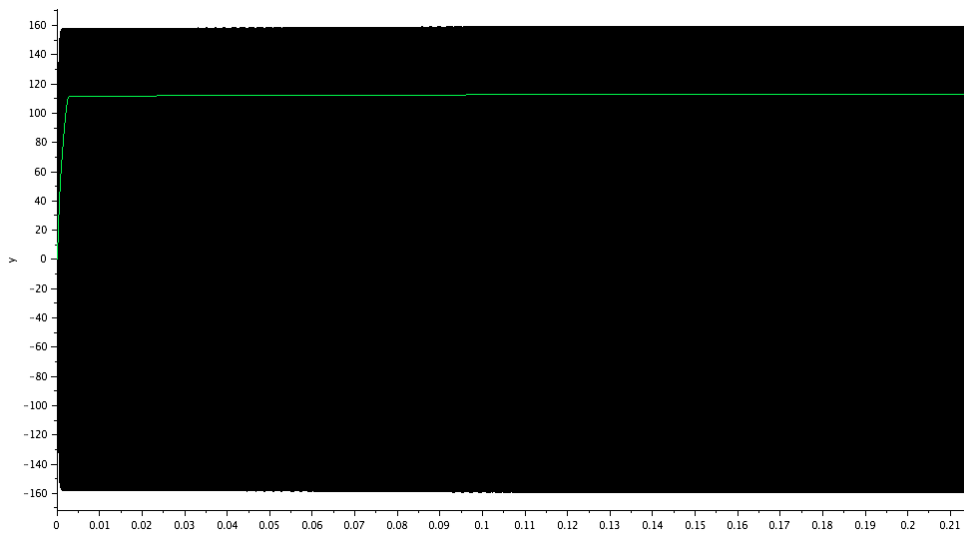
Irudia 4.4: funtzio baten deribatuaren adierazpen grafikoa

Beste aldetik, malda handiagoa den kasuetan motorrak aldaketa handiagoak egingo ditu eta minimora gerturatzen den einean malda txikiagoa denez, motorrak aldaketa txikiagoak egingo ditu eta honi esker minimoan mantentzea errazagoa izango da.

Irteerako seinalea(kabitateko tentsioa) RF modukoa denez, lehenik eta behin bere root mean square(rms)-a lortu beharko da, balioak konparatu

ahal izateko. Gainera, benetako sisteman islaturiko potentziaren seinalea oso txikia izango da eta zarata arbutu ahal izateko batezbestekoa egin beharko da.

Simulazioak egiteko sisteman 1000 laginketen batezbestekoa(rms) hartuko da, 50 periodoko. Begiztak aldaketa azkarrak izango balitu, lagin gutxiago hartu beharko lirateke berain arteko ezberdintasunak oso handiak izan daitezke eta, baina, motela denez, 1000 lagin kantitate egokia da.



Irudia 4.5: transferentzi funtzioaren irteera beltzez eta rms-a berdez denboraren menpe.

Behin sistemaren rms-a lortua dagoela bloke logiko baten sartuko da. bloke logikoaren irteeran hurrengo funtzioa betetzen duen seinalea egongo da:

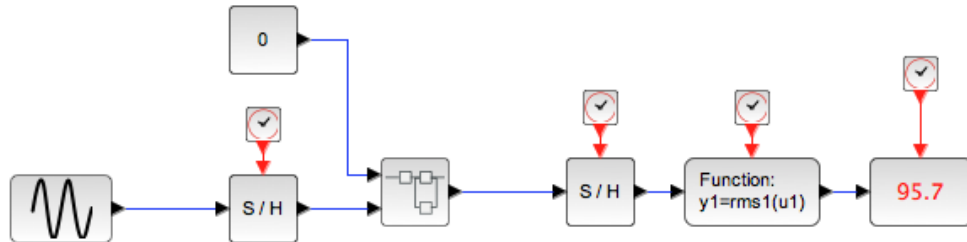
$$z = -C|x - X_{min}| \quad (4.2)$$

non C: motorraren noranzkoa,  $X_{min}$ : erresonantzi maiztasunean dugun islapen potentzia da, x: blokeraren sartzen den seinalea

Benetako sisteman logika blokearen irteera hau modifikatu egin beharko da motorren driverrak jasotzen duten seinaleetara. Simulazioak egiteko aldiz definitu den funtzioa egokia da.

Lehenik eta behin balioak definitzeko  $X_{min}$  lortu behar da. Kasu ho-

netan irteera seinale handiena izango da erresonantzi maiztasunean, nahiz eta benetan minimoa izan. Ondorioz, sistema begizta irekian jarri zen eta rms-aren irteera hartu erresonantzi maiztasunean, behin orekatua zegoenean  $X_{min} = 95.7$  zen.



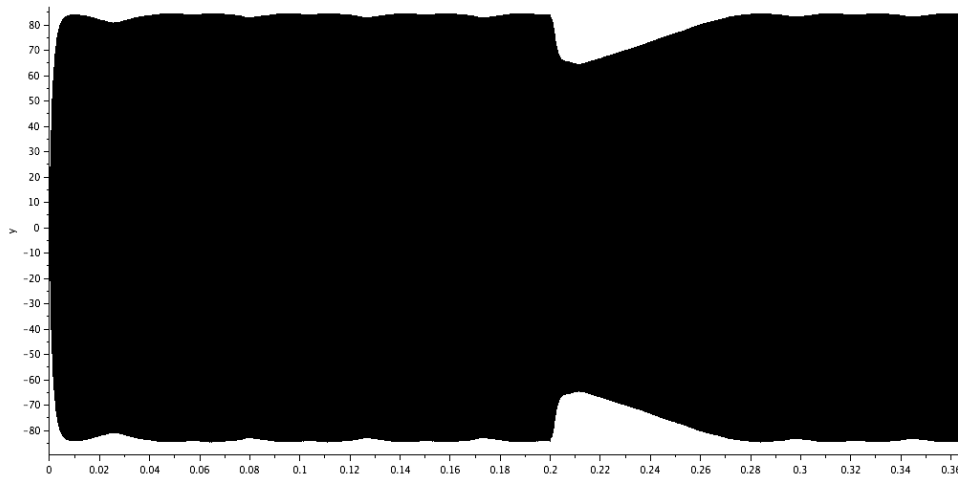
Irudia 4.6: doiketa begizta irekia, kabitatearen erresonantzi maiztasuna  $f_0=9000$  Hz denean

$X_{min}$  definitua dagoenean, gure sistema erresonantzi maiztasunera iristean,  $x - X_{min} \approx 0$  izango da, ondorioz bloke logikoaren irteera oso txikia izango da eta ondorioz motorraren aldaketak ere txikiak izango dira. Honi esker, behin erresonantzi-maiztasunean gure sistema orekatu egingo da.

Beste aldetik C-ren funtzioa definitu behar da, hau da gure deribatua. Funtzioa hurrengoa da. Bloke logikoak kontadore bat izango du eta bloke hau deitzen dugun bakoitzean kontadorea baten igoko da. 2500 prozesuro konparatu egingo dira izan diren azken 50 rms-en batura eta kontadorea hasi zen momentuko 50 rms-en baturarekin. Simulazioa minimo bat bilatzen dagoenez, rms-batura balio berria hasieran zegoena baino txikiagoa bada, ez du C balioaren noranzkoa aldatuko. Aldiz, handiagoa bada C balioaren zentzua aldatuko du.

C-ren noranzkoa aldatzen den arren, bere moduloa konstante mantenduko da. Moduloaren balioa trasferentzi funtzioaren itxuraren menpekoa izango da. Malda oso txikia badu, C-ren modulo handia izango da eta al-dapa bortitzekoa bada aldiz C-ren moduloa txikia definituko da. C balioaren moduloa motorraren aldaketek kabitatean dueten eraginera egokitua egongo da. Simulaziorako ereduaren  $\delta$  nahiko txikia zenez, nahiko tontor eztua zuen eta ondorioz, C txikia hartu zen.  $C=0.0007$  erantzun nahiko azkarra zuen sistemak.

Simulazio bat egin zen, 0.2 segunduan sistema aldatuz eta hurrengo emaitza lortu zen:



Irudia 4.7: trasferentzi funtzioaren irteera denborarekiko, 0.2 segunduan, kabitatea aldatuz.

Grafikan azter daitekeen moduan, begizta motela denez 0.1 segundu behar ditu bere lehengo egoerara bueltatzeko, baina azkenean egonkortu egiten da berriz.

Kapituluan hasieran adierazi den moduan, simulazioetan maximoa bilatuko du nahiz eta benetako sisteman, sistemaren minimoan egonkortuko zen.

## 4.4 Doiketa begizta benetako kabitate baten

Behin doiketa begiztaren funtzionamendua egokia dela ikusten dela, benetako kabitate baten probatu egingo da. Honetarako, erresonantzi maiztasun doiketa begiztaren hainbat atal modifikatu beharko dira.

Alde batetik, ordenagailu bidezko simulazioetan erabili zen laginketa maiztasuna ezin da berriz erabili. Ekipamenduak emandako limitazioetara egonkortu beharko da eta ondorioz sub-sampling teknika erabili beharko da.

Benetako kabitatean, islaturiko potentzia jasotzeko RF zirkulatzailerik bat erabili zen. Honen funtzionamendua hurrengoa da. Zirkulatzailerik hiru sarrerarik/irteerarik izango ditu. 1 sarreratik sarturiko energi guztia 2 atetik irtengo da (kabitatearen sarrera), 2 atetik sarturikoa 3 atetik eta 3 atetik sarturikoa

1 atetik irtengo da. Ondorioz, 2 sarreratik sarturiko islaturiko potentzia 3 irteeratik jasoko dugu eta irakurri egin ahalko dugu.



Irudia 4.8: RF zirkulatzaila

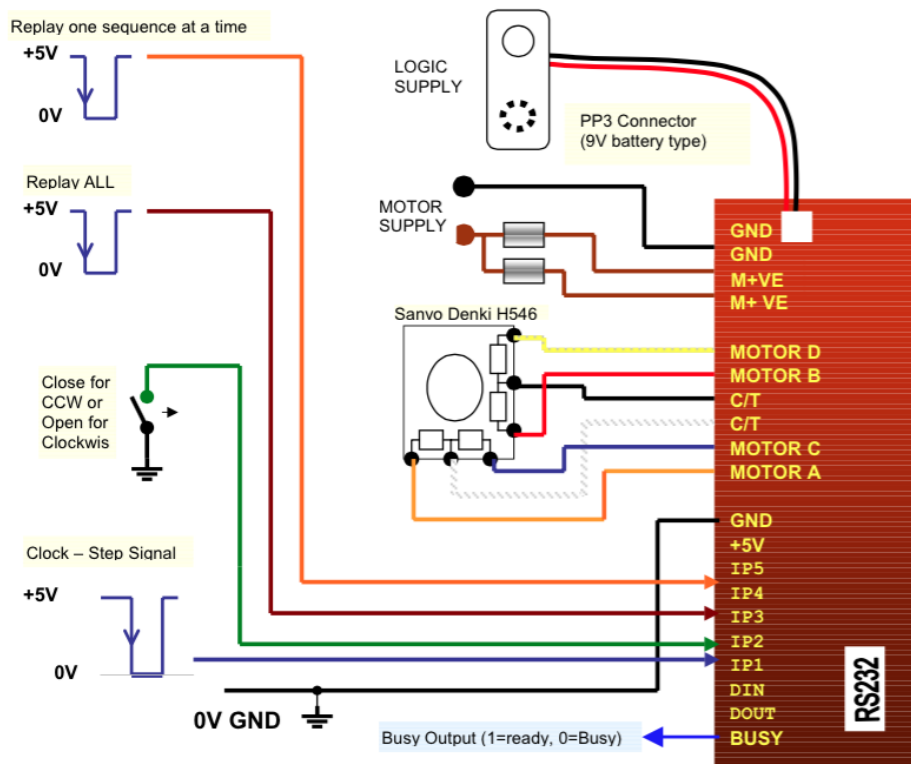
Hala ere, zirkulatzailak nahiko zarata sartuko digu eta islaturiko potentzia seinalea txikia denez zaila izango da ezberdintzeko. Hau zuzentzeko, hainbat batezbesteko egin beharko dira.

Beste aldetik, motorrak kontrolatzeko driverretara moldatu beharko da kabitatetik lorturiko informazioa.

Erabili den motorren driverrak EasyStep 3000 da[17]. Driverrak hurrengo eskema beteko dute(Fig 5.9):

Aurreko atalean adierazi den moduan, motorrak bi informazio jaso beharko ditu. Alde batetik, motorraren noranzkoa eta bestetik motorraren abiaduraren modulua. Ordenagailuko simulazioan bi datuak batera zijoazen, kasu honetan aldiz, informazioa IP1 eta IP2 pinetan banatzen da.

Alde batetik, IP2 pin-ak motorren noranzkoa emango du eta ondorioz, kabitatearen erresonantzi maiztasuna txikiagotu edo handitu egingo da motorraren noranzkoaren menpe.  $IP2=1$  denean, motorrak erlojuaren orratzen kontrako norabidean mugituko da eta aldiz,  $IP2=0$  denean, erlojuen orratzen norabidean. Bai alde batera zein bestera mugitzean, kabitatearen forma aldatu egingo da eta ondorioz, motorra alde batera mugitzean kabitearen



Irudia 4.9: Driverren konfigurazioa Slave moduan

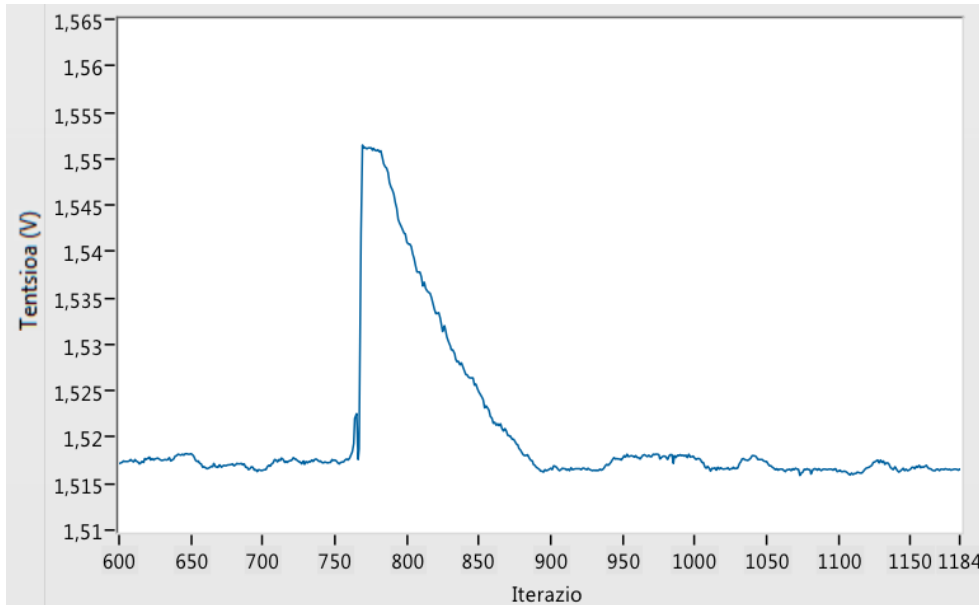
erresonantzi maiztasuna maiztasun txikiagoetara mugituko da eta beste norabidean handitu.

Beste aldetik, IP1 pin-ak motorren bira kantitatea emango du. IP1 pin-ak 101 pausua jasotzean motorrak egin dezakeen mugimendu txikiena egingo du. Ondorioz, C-ren moduloa (4.2 ekuazioa) handia denean, IP1-en 101 itxurako segida luzeak sartuko dira, asko mugitzeko eta aldiz, erresonantzi maiztasunetik gertu dagoenean, IP1-en 101 segida gutxi sartuko dira, mugimendu txikiak egitea nahi da eta.

#### 4.4.1 Islaturiko potentziaren menpeko begiztaren simulazioak

Behin doiketa begizta egokitua dagoela benetako kabitatera, funtzionatzen jarri da. Benetako kabitatean indar bat eginez, bere itxura aldatu daiteke, ondorioz, behin kabitatea egonkortua zegoela X kg pisu bat jarri zitzaion gai-

nean. Grafikan azter daitekeen moduan, islaturiko potentzia handitu egiten da kabitatearen desakopleagatik, baina motorrak funtzionatzen hasten dira berriz akoplatu ahal izateko.



Irudia 4.10: Islaturiko tentsioa egindako iterazioen aurrean

Ikusi daitekeen moduan, pisua jartzean 1.55V iristen da islaturiko tentsioaren erantzuna, baina motorren eraginez, minimora bueltatzen da 250 iterazio baino gutxiago eginez.

# Ondorioak

1. Lan honetan, lehenengo helburu zen LLRF sistema baten ulerpena eman da. Nahiz eta begiztak mota askotakoak izan daitezkeen kasu bakoitzean (Anplitude begiztan, IQ, shottky bidez...); LLRF sistema baten estruktura 3 begizta ondo definituak eta beraien arteko ezberdintasun garrantzitsuak banatzea lortu da. Hau da, begizta bakoitzak kontrolatuko duena ondo banantzea.

2. Anplitude eta fase begizten azterketan, eredu sinplifikatuaren azterketa egin da. Eredu sinplifikatua, behe paseko iragazkiaren eragin argia ikusi da. Sistemak askoz hobeto jarraitzen zuen RF-ko sistema LPF-a gehitzean. Bestetik, eredu sinplifikatua buruz-buruko gaiak soilik hartzean lortutako emaitza egokiak aztertu dira. Lanak ez du argitu gai gurutzatuak gehitzean lortuko liratekeen emaitzak eta atal hau etorkizunean aztertu beharko litzateke. Hala ere, buruz-buruko gaiak emaitza onak ematen zuten simulazio gehienetan.

3. Frekuentzi doiketa begiztan, islapen bidezko doiketa begiztaren azterketa eta diseinua egin da. Eredu matematikoaren diseinua izandako arazoak aurkeztu dira eta etorkizunean eredu hobeari azterketa egin beharko litzateke. Hala ere, islatutako potentzia bidezko begiztaren funtzionamendu egokia ikusi da. Islapen potentzia bidezko begiztan bloke logikoaren gehikuntza berezia egiten du, PID-z lortutako kontrol seinale bidezko begizten aurrean.

4. Azkeneko atalean islatutako potentzia bidezko doiketa begizta benetako kabitare batean erabili da. Lanean egindako hainbat modifikazio, hala nola, driverren egokitzapena aztertu da. Hala ere, SciLab-etik LabView-rako (benetako sistemari erabilitakoa) aldaketa guztiak ez dira aztertu. Atal honen frekuentzi doiketa begiztaren baliogarratasuna frogatu nahi izan da eta lanean aurkeztutako emaitzak ikusiz, argi dago bere funtzionamendu egokia.



# Bibliografia

- [1] **P. Faugeras**, The LHC Project: Status and Prospects, *aurkeztua APAC01, Beijing, China*
- [2] **P. B. Wilson**, 1982, High Energy Electron Linacs: Application to Storage Ring RF Systems and Linear Colliders, *American Institute of Physics, New York*
- [3] **Masao Murakami**, Radiotherapy using a laser proton accelerator. web artikulua: [http : //arxiv.org/pdf/0804.3826.pdf](http://arxiv.org/pdf/0804.3826.pdf)
- [4] **R. Brinkmann**, Linear Collider Projects at DESY, *aurkeztua EPAC98*
- [5] **E. Onillon**, Low Level RF Feedback Loop Design, web artikulua: [http : //icfa - nanobeam.web.cern.ch/](http://icfa-nanobeam.web.cern.ch/)
- [6] **S. N. Simrock**, 1996, Transient Beam Loading Based Calibration of the Vector-Sum for the TESLA Test Facility
- [7] **H. Klingbeil, U. Laier, K. Ningel, S. Schfer, C. Thielmann, and B. Zipfel**, 2011, New digital low-level rf system for heavy-ion synchrotrons , *Phys. Rev. ST Accel. Beams 14, 102802*
- [8] **H. Ma, M. Champion, M. Crofford, K. Kasemir, M. Piller, L. Doolittle, and A. Ratti**, Low-level rf control of spallation neutron source: System and characterization, *Phys. Rev. ST Accel. Beams 9, 032001*
- [9] **Ernest Orlando Lawrence**, [http : //es.wikipedia.org/wiki/Acelerador\\_de\\_particulas](http://es.wikipedia.org/wiki/Acelerador_de_particulas)
- [10] **Xabier Cid Vidal Ramon Cid**, [http : //www.lhc-closer.es/2/4/7/2](http://www.lhc-closer.es/2/4/7/2)

- [11] **R. Zeng**, An Introduction to LLRF systems, *ESS RF Workshop, Uppsala*, web powerpoint [https : //indico.cern.ch/event/163229/session/0/contribution/1/material/slides/1.pdf](https://indico.cern.ch/event/163229/session/0/contribution/1/material/slides/1.pdf)
- [12] **Hooman Hassanzadegan**, Design, Analysis and Implementation of a Versatile Low Level Radio Frequency System for Accelerating Cavities, *Spain*
- [13] **I. Badillo J. Jugo, J. Portilla, J. Feutchwanger, C. San Vicente, V. Etxebarria**, PXIe-based LLRF architecture and versatile test (bench for heavy ion linear acceleration)
- [14] **C. Rossi et. al.**, The Low Level RF System of ELETTRA, *Aurkeztua EPAC89'*
- [15] **H. Hassanzadegan et. al.**, 2006, Analogue and Digital LLRF for the ALBA Synchrotron, *aurkeztua EPAC06, Edinburgh, Scotland*
- [16] **Joydip Jana**, 2012, A Fast Feedback Control System using FPGA for RF signals
- [17] **Active Robots**, 2005, Easy SStep 3000 user guide
- [18] **Margaret Rouse**, web artikulua: [http : //whatis.techtarget.com/definition/cathode – ray – tube – CRT](http://whatis.techtarget.com/definition/cathode-ray-tube-CRT)