Kaosa Goi-Maiztasuneko zirkuituetan

J. Jugo
A. Anakabe

Elektrizitate eta Elektronika Saila
Euskal Herriko Unibertsitatea / Zientzi Fakultatea
644 P.K., 48080 Bilbo

Laburpena: Zirkuitu elektronikoak sistema oso konplexuak direnez, zirkuitu horiek diseinatzerakoan sinplifikazioak egiten dira. Baina benetan, sistema ez-linealak izanik, dinamika oso aberatsa dute, fenomeno bitxien agerpena, kaosa barne, ahalbideratuz. Horregatik, zirkuituen simulazioa garrantzi handiko tresna bilakatzen da diseinuak balidatzeko. Hala ere, goi-maiztasuneko zirkuituak ezin dira simulazioen bidez era errazean aztertu. Alde batetik, denbora-eremuan elementu batzuen ereduztapena zaila suertatzen da eta gainera, simulazioak eraginkorrak izan daitezen, iragankorra oso luzea izan daiteke. Beste aldetik, ez-linealtasunen agerpenak maiztasun-eremua erabiltzea zailtzen du. Bi eremuak nahastuz, balantze harmonikoa jaio zen arazoa konpontzeko. Baina teknika hori, zuzenean, ez da ez-egonkortasunak detektatzeko gai. Gaur egun, arazo hori saihesteko teknika berriak garatzen ari dira. Teknika horiek zirkuituaren egonkortasuna sistemaren maiztasun-erantzunaren bitartez aztertzen dute.

1. SARRERA

Naturak oso portaera konplexua du. Fenomeno metereologikoak, hots, eguraldia, konplexutasun horren adibide ezagunak dira. Naturan gertatzen diren fenomeno fisikoak aztertzeko, eredu matematikoak erabiltzen dira. Era sinplean, matematika gure ingurunea ulertzeko hizkuntza da eta edozein sistema fisiko aztertzeko edo sistema horretan eragiteko sistema beraren eredu matematikoa behar dugu. Normalean, ereduak ekuazio diferentzialen bitartez egiten dira, [1], [2].

Hala ere, lana errazteko, ez da sistema osoaren deskribapena egiten, baizik eta guri interesatzen zaigun sistemaren ezaugarrien deskribapena. Normalean, eredu horiek ekuazio diferentzial linealetara mugatzen dira eta funtzionamendu-tarte txikietan edo ertainetan (hau da, operazio-puntua gehiegi aldatzen ez denean) baliagarriak dira.

Nolanahi ere, prozesu fisikoen aipatutako konplexutasunagatik, askotan ekuazio linealak ez dira nahikoak eta, batez ere, ereduztatu nahi den funtzionamendu-tartea handia denean edo sistemaren dinamika, berez, oso ez-lineala denean, eredu ez-linealak erabili beharko dira. Kasu hauetan, fenomeno bitxiak dituzten dinamika oso konplexuak ager daitezke, [3]. Kaosa azken honen adibide garbia da.

Orokorrean, irrati-komunikaziorako zirkuituak sistema ez-linealen multzo horretan sar daitezke, zirkuitu hauetan ez-linealtasunak sarritan agertzen baitira, [4]. Honela izanik, eredu ez-linealen adibide dira, eta askotan, dinamika oso aberatsak lotuta dituzte.

Idazki honen helburua irrati-komunikaziorako zirkuituetan ez-linealtasunek, zer nolako arazoak eragiten dituzten azaltzea da. Laburbilduz (eta sinplifikatuz), lortu nahi ditugun soluzioei oinarrizko soluzio deituko diegu, baina sarritan, desiratu ez diren soluzioak agertzen dira. Oinarrizko soluzioetatik aldentzen diren egoera horiei ez-egonkortasunak deritze. Aurrerago, kontzeptu hori argiago geratuko da. Berez, idazki honen izenburu zehatzagoa «Egonkortasuna goi-maiztasuneko zirkuituetan» litzateke.

Irrati-komunikaziorako goi-maiztasuneko zirkuituen gaian sakondu baino lehen, haria ez galtzeko, kontzeptu minimo batzuk aztertuko dira. Hasteko, sistema lineal eta ez-linealen deskribapena jorratuko da, sistema baten maiztasun-erantzunaren definizioa emanez. Bigarren atalean ikusiko da, zer dela eta agertzen diren eredu ez-linealak irrati-komunikaziorako zirkuituetan. Hirugarren atalean, goi-maiztasuneko zirkuituak simulatzean dagoen arazoa azalduko da eta arazo hori saihesteko metodoa aurkeztuko da: balantze harmonikoa.

Bigarren bloke batean, lehenengo atalean, aipaturiko ez-egonkortasunen deskribapena egingo da. Bigarren atalean, ez-egonkortasunak, kaosa barne, agertzen dituzten zirkuituak deskribatuko dira. Eta amaitzeko, ez-egonkortasunak aurkitzeko orduan balantze harmonikoak duen hutsunea azalduko da. Era batez, hutsune hori gainditzeko gaur egun jorratzen ari diren bideak erakutsiko dira.

2. OINARRIZKO KONTZEPTUAK

Atal honetan sistema lineal, ez-lineal eta irrati-komunikaziorako zirkuituei buruzko azaleko deskribapenak emango dira, mamia ulertzeko baina zehaztasun handirik gabe.

2.1. Sistema lineal eta ez-linealen deskribapena

Sistemen dinamika, ekuazio diferentzialen bitartez adierazten da. Orokorrean,

$$f(u, y, u^1, y^1, \ldots, u^{n)}, y^{n)}) = 0$$

non goi-indizeek deribatuak adierazten dituzten eta $u(t)$ eta $y(t)$-k sistemaren sarrera eta irteera, hurrenez hurren. f funtzioa lineala bada ekuazio diferentziala lineala da, f ez-lineala bada, berriz, ekuazio diferentzial ez-lineala.

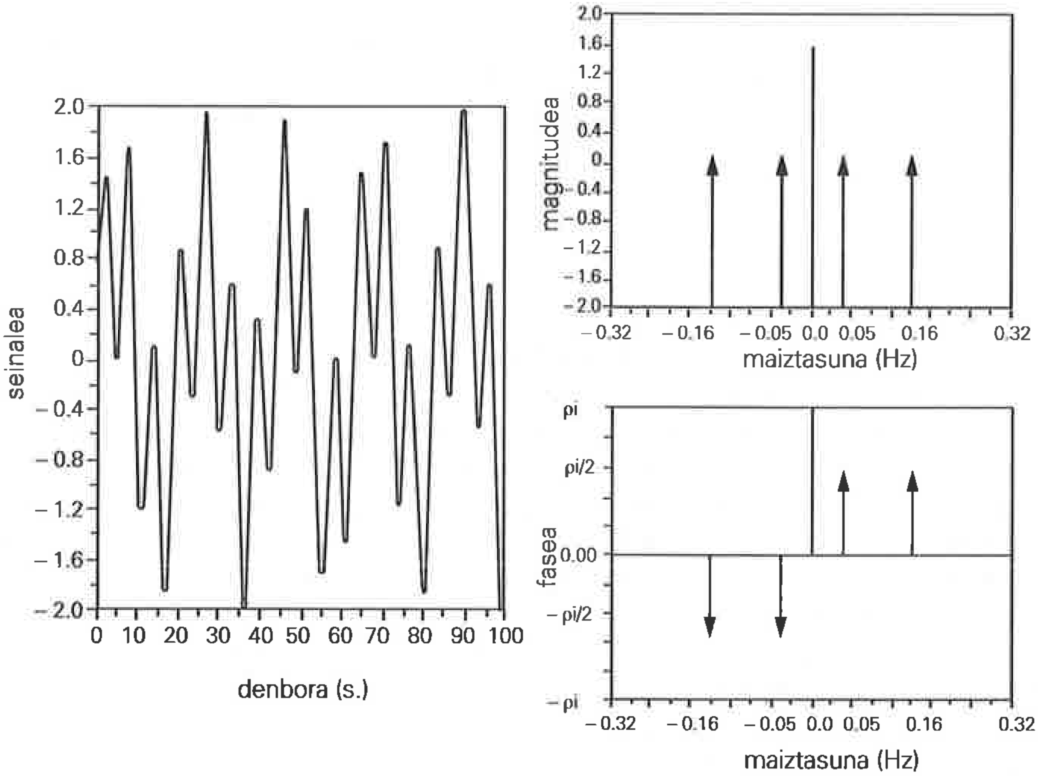
Sistema linealen kasuan, deskribapen errazagoa eta erosoagoa aurki daiteke Laplace-ren transformatua erabiliz, [1]. Deskribapen horri, transferentzi funtzio deritzo eta sistemaren sarrera eta irteeraren arteko erlazioa ematen du.

$$Y(s) = G(s)U(s) = \frac{num(s)}{den(s)}U(s)$$

$Y(s)$ eta $U(s)$, irteera eta sarreraren Laplace-ren transformatuak dira hurrenez hurren eta $G(s)$ transferentzi funtzioa (TF) da. $num(s)$ eta $den(s)$ s aldagaian bi polinomio dira. $num(s)$ polinomioaren erroei, transferentzi funtzioaren zeroak deritze eta $den(s)$ polinomioaren erroei, sistemaren poloak. Zero eta polo horiek sistemaren dinamikaren eta egonkortasunaren berri ematen dute, batez ere poloek. Egonkortasuna hitzaldiaren gaiarekin oso lotuta dago. Hasteko, egonkortasun hitzarekin zer ulertzen den azaldu behar da. Definizio desberdinen artean, oinarrizkoena hauxe izan daiteke: sistema bat egonkorra dela esaten da, sarrera bornatu baten aurrean irteera bornatua bada. Poloekin lotuz, aurreko baldintza, sistemaren polo guztien alde erreala negatiboa denean betetzen da, [2]. Horrela izanik, poloen azterketa nahikoa da sistema baten egonkortasuna zehazteko, edo beste era batera esanda, transferentzi funtzioak sistemaren egonkortasunari buruzko informazioa du. Geroxeago ikusiko denez, zirkuitu elektrikoetan egonkortasun hitzak beste esanahi bat izango du, nahiz eta azaldutakoarekin lotuta egon.

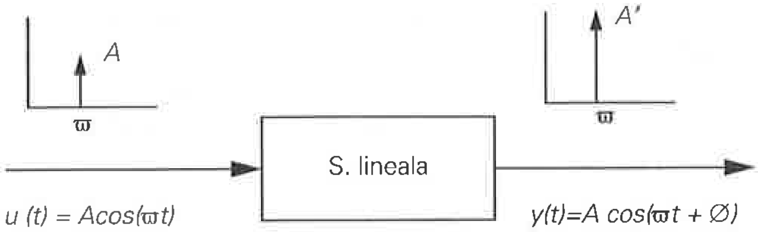
Sistemen dinamika deskribatzeko, askotan, denbora-eremuan lan egiten da, ekuazio diferentzialen integrazioren bidez sistemaren denborarekiko eboluzioa ikusiz, baina beste kasu batzuetan praktikoagoa da maiztasun-eremuan egindako deskribapena. Azken deskribapen hau Fourier-en serietan eta Fourier-en transformatuan oinarritzen da (Laplace-ren transformatua horren orokorpen bezala har daiteke). Fourier-en teoriaren arabera, edozein seinale periodiko kosinu (edo sinu) oinarria erabiliz deskriba daiteke, hau da, $y(t) = y(t+T) = \sum A_i \cos(\frac{2\pi}{T}nt + \phi_i)$, T seinalearen periodoa izanik.

Normalean, kosinuak erabili beharrean esponentzial konplexuak erabiltzen dira $y(t) = y(t + T) = \sum A_i \, exp(2\pi fnt)$ non $f = 1/T$ maiztasuna den. Azpimarragarria da deskribapen horretan f maiztasuneko kosinu seinale baten energia f eta $-f$ maiztasuneko esponentzial konplexuen artean, hau da, maiztasun positibo eta negatiboen artean, banatzen dela. 1. irudian bi osagai, hots, bi maiztasun, dituen seinale baten deskonposizioa ikus daiteke maiztasun-eremuan.



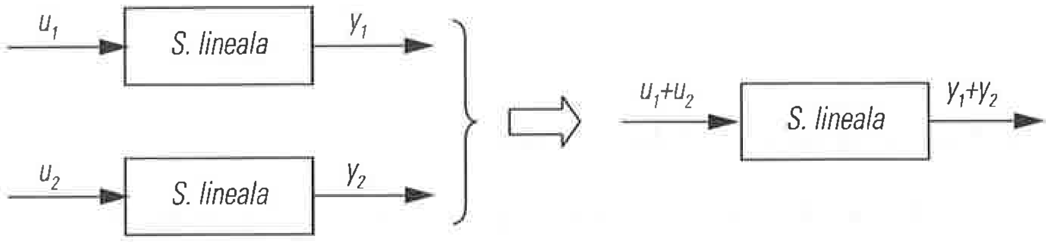
1. irudia. Seinalea denbora-eremuan eta maiztasun-eremuan. Seinalea bi maiztasunetan (2 positibo eta 2 negatibo) deskonposatzen da.

Horretaz baliatuz, seinaleak eta sistemen erantzunak maiztasun-eremuan adieraz daitezke. Eremu honetan, sistema lineal batek seinale batengan duen eragina maiztasun-erantzunaren bitartez erraz adierazten da. Sistema lineal batek sarrera moduan sinusoide bat badu, orduan, irteerako seinaleak sarrerako seinalearen maiztasun berbera izango du, baina bere modulua eta fasea aldatu egingo dira, 2. irudian ikus daitekeenez. Nabaritu kosinuen deskonposizioa (eta bakarrik modulua) erabili dela, irudia sinplifikatzeko.



2. irudia. Sistema linealaren erantzuna sinusoide baten aurrean.

Sistema baten sarrera $u(t) = Acos(\omega t)$ bada, orduan irteera $y(t) = A'cos(\omega t + \phi)$ izango da. Hau da, sistemak zenbaki konplexu batez «biderkatzen du» sarrera. Zenbaki konplexu hori maiztasunaren menpekoa da eta edozein maiztasunetarako kalkulatzen bada sistemaren maiztasun-erantzuna, $G(j\omega)$, lortzen da. Edozein seinale periodikoren aurrean sistemaren erantzuna ezagutzeko, seinale hori maiztasun desberdineko seinaleen batuketa bezala deskonposatzen da eta irteera maiztasun-erantzuna erabiliz lortzen da. Gogoratu behar da sistema linealetan gainezarmenaren printzipioa betetzen dela. Hau da, bi sarrera desberdinen batuketak, bi irteeren batuketa sortzen du.

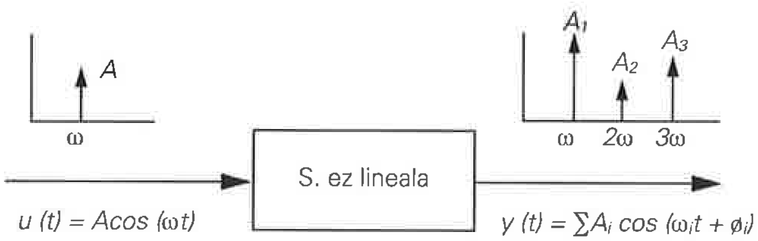


3. irudia. Gainezarmenaren printzipioa.

Seinale guztiak ezin dira Fourier-en garapena erabiliz deskonposatu, baina hala ere, orokortzea eginez aurreko ideia erabil daiteke. Edozein seinale, maiztasun desberdineko seinaleetan deskonposatuta badago, sistemaren $G(j\omega)$ maiztasun-erantzuna erabiliz, irteerako $Y(j\omega)$ seinalea lor daiteke. Honela, $U(j\omega)$ sarrerako seinalea bada maiztasun-eremuan, orduan $Y(j\omega) = G(j\omega)U(j\omega)$ da.

Bestalde, sistema baten transferentzi funtzioa eta maiztasun-erantzuna oso lotuta daude. Transferentzi funtziotik abiatuz, maiztasun-erantzuna oso era errazean kalkulatzen da; aldagai-aldaketa baten bidez. Honela, $G(s)$ TF-an $s = j\omega$ aldaketa egiten bada, $G(j\omega)$ maiztasun-erantzuna lortzen da. Funtsean, hau da Laplace-ren eta Fourier-en transformatuen arteko erlazioa.

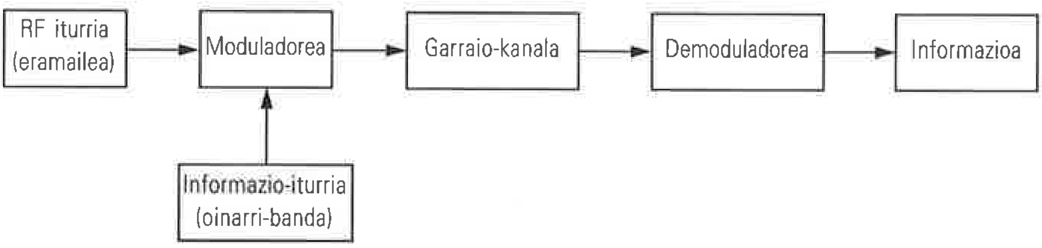
Aurreko lan-era komunikaziorako sistementzat oso aproposa da, arlo honetan (beste askotan bezala) maiztasun-deskonposizioa naturala baita, [5]. Baina sistema ez-lineala denean, sarrera sinu seinalea izanik, orokorrean, irteera ez da aurreko kasuan bezain sinplea izango, goi-harmonikoak agertzen baitira eta beste kasu batzuetan egoera askoz korapilatsuagoak ere: maiztasun-zatiketak, beste maiztasunen agerpenak eta kaosa besteak beste. Hauek, preseski, guri interesatuko zaizkigun ez-egonkortasunak izango dira. Beraz, aurreneko metodoa sistemaren elementu linealekin erabil daiteke, baina, orokorrean, eta «a priori», zirkuitu elektronikoen kasuan denbora eremuan lan egin beharko da, eta ezin izango dira maiztasun-eremuak dauzkan abantailak erabili.



4. irudia. Sistema ez-linealaren erantzuna sinusoide baten aurrean. Kasu honetan, goi-harmonikoak sortzen dira.

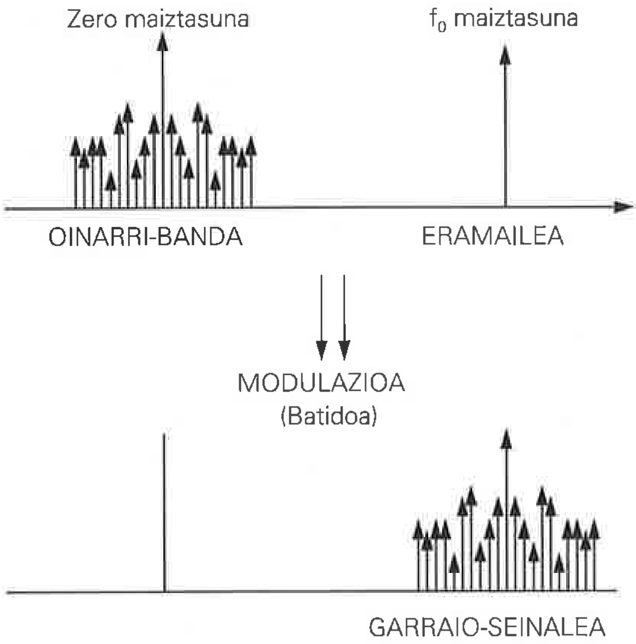
2.2. Irrati-komunikaziorako zirkuituak

Irrati-komunikaziorako eskema sinple bat hurrengoa izan daiteke, [4]:



5. irudia. Irrati-komunikaziorako sistema baten eskema sinplifikatua.

Seinale bat, hau da, informazioa, garraiatu nahi bada (maiztasun-eremuan oinarri-banda deitzen dena) eramaile deritzon maiztasun altuagoko seinale bat behar da. Oinarri-banda ezberdinak, hau da informazio ezberdinak, garraiatzeko maiztasun ezberdinetako eramaileak behar dira, garraio-kanal ezberdinak osatuz. Prozesu hori aurrera eramateko, nahastaile bat behar da, eramaile bakoitzak dagokion oinarri-banda har dezan. Prozesu horri modulazio deritzo eta, sistema linealen ezaugarrietatik argi ikus daitekeenez, elementu ez-lineal baten bitartez egin behar da nahitaez, modulazioan maiztasun osagai berriak azaltzen baitira.



6. irudia. Modulazioaren prozesua.

Edozein sistema ez-lineal hartuta, bi maiztasun ω_1 eta ω_2 ezberdineko seinaleak sartzen badira, irteeran horien «batidoa» agertzen da, hau da, irteerako seinalearen osagaiek $n\omega_1 + m\omega_2 \ \forall n,m \in Z$ maiztasunak izango dituzte. Zoritxarrez, batido hori seinale guztien artean gertatzen da, desiragarriak ez diren nahasketa ugari ere agertuz. Efektu hori saihesten saiatu behar da. Modulatzeko, eramailea eta oinarri-bandaren arteko nahasketa egiten da eta ondoren lortutako seinalea iragazten da interesatzen ez zaizkigun osagaiak kentzeko. Honela oinarri-banda dagokion kanalean eramatea lortzen da, irrati-maiztasuneko (RF) seinale bat eramailea izanez. Informazioa eramaten duena RF seinale horren modulazioa da. Metodo ezberdinak daude oinarri-bandak duen informazioa RF seinalera eramateko (AM eta FM modulazioak adibidez). Metodo horiek RF seinalearen ezaugarriren bat aldatzen dute informazio-seinaleak jasaten dituen aldaketak islatuz. Seinalea transmititu ondoren, jasotako puntuan kontrako prozesua aurrera eraman behar da informazioa berreskuratu ahal izateko.

Irrati-komunikazioan, beraz, elementu oso erabiliak dira osziladoreak, RF seinalea edo eramailea sortzeko; anplifikatzaileak, transmisioan galtzen den potentzia berreskuratzeko bereziki; iragaziak, RF kanalak banatzeko eta nahi ez diren seinaleak txikitzeko eta beste zirkuitu asko. Ikusitakoaren arabera, aipatutako elementuak zenbat eta linealagoak izan, portaera hobea izango dute, eramailea eta oinarri-banda nahasteko prozesuan salbu. Baina hala ere ezin dira ez-linealtasunak guztiz ekidin, batzuetan beharrezkoak izango direlako, nahastaileen kasuan bezalaxe, eta bestetan, operazio-puntu askotan elementua ez-lineala delako, anplifikatzaileen kasuan bezala.

Beste aldetik, eta orokorrean hartuta, sistemak, pasibo eta aktiboen artean bana daitezke, [2]. Pasiboek energia xurgatzen dute eta beti dira egonkorrak. Aktiboak berriz, energia emateko gai dira eta ez-egonkorrak izan daitezke. Arlo guztietan agertzen dira bateko zein besteko elementuak eta denak izan daitezke ez-linealak. Sistema aktiboek ezegonkortzeko joera daukatela esan daiteke, energia ematen dutelako. Horrela izanik, elementu aktiboak joera hori gutxitzeko eta are linealagoak izateko diseinatzen dira. Goian aipatutako elementuen artean, asko aktiboak dira, anplifikadoreetatik hasiz.

Ikusten denez, irrati-komunikaziorako zirkuituetan, beste arloetan gertatzen den bezala, bi ezaugarri batzen dira: aktibotasuna eta ez-linealtasuna. Horrexegatik, zirkuitu hauetan oso handia da ez-egonkortasunak agertzeko joera. Gehienetan, ez-egonkortasun horiek ekidin behar dira, gure diseinuak baliogabetu ditzaketelako.

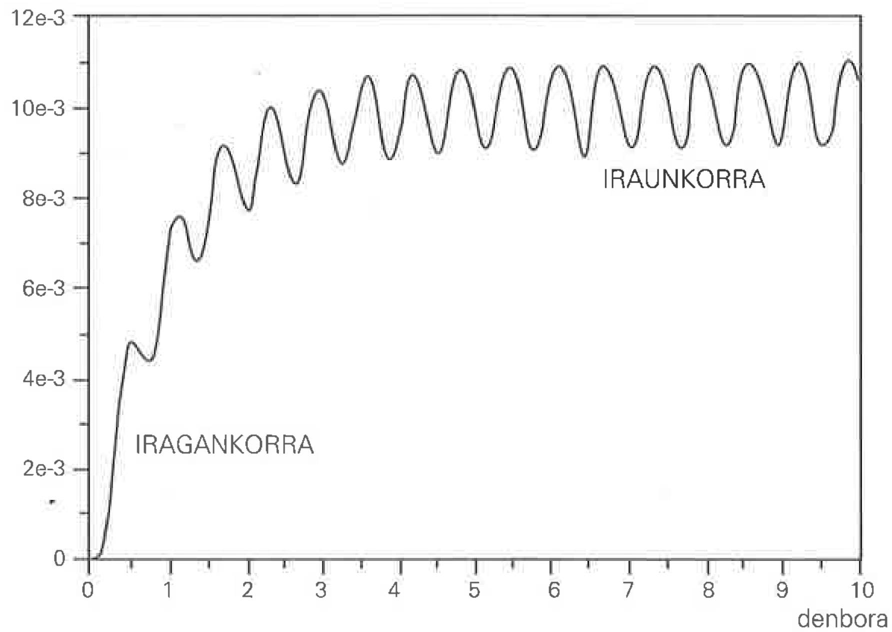
Amaitzeko, konturatu behar dugu komunikazioaren arloa gero eta garatuagoa dagoela eta, beraz, komunikazio-sistemei ahalmen gehiago eskatzen zaiela, informazio gehiago garraiatzeko. Hortaz, eramaile gisa gero eta maiztasun altuagoak erabili beharko dira. Maiztasun altuko, hots, goi-maiztasuneko, eramailea erabiliz kanal gehiago sartu ahal izango dira eta gainera kanal bakoitzak oinarri-banda zabalagoa eraman ahal izango du.

2.3. Goi-maiztasuneko zirkuituen simulazioa

Simulazioa oso tresna lagungarria da zirkuituak diseinatzerakoan. Logikoa denez, simulazioa programa informatikoen bidez egiten da. Esan denez, ez-linealtasunak direla eta, zirkuituak aztertzeko denbora-eremuan lan egin behar da. Hau ez da arrazoi bakarra, zeren denbora-eremuan sistemaren iragankorraren (hasierako denboran gertatzen denaren) azterketa era zuzenean egiten da, nahiz eta ikusiko dugunez, horrek zailtasunak ekarriko dituen goi-maiztasuneko zirkuituen kasuan. SPICE izeneko programa oso erabilia da denbora-eremuan zirkuitu elektronikoen simulazioa egiteko. Denbora-eremuko abantailarik handiena zirkuitu baten erantzuna oso era grafikoan lor daitekeela da. Honela, ez-linealtasunek eragindako efektu bitxiak zuzenean ikus daitezke. Zirkuitu bat diseinatzerakoan, anplifikadore bat adibidez, ez da bere dinamika konplexu osoa kontuan hartzen, sinplifikazio batzuk eginez lan egiten da (bestela lana oso konplexua litzateke). Burututako diseinuaren simulazioak portaera ezegokia agertzen badu, kaosa adibidez, argi geratzen da diseinua berregin behar dela. Simulazioaren bidez, ezertarako erabilgarriak izango ez diren prototipoen fabrikazioa ekidin daiteke; hau oso garrantzitsua da prototipoak oso garestiak baitira. Orduan, diseinatzerakoan kontuan hartzen ez diren eraginak simulazioen bidez neurtzen dira.

Gaur egun, goi-maiztasuneko sistemek gero eta erabilpen zabalagoa dute, batez ere telefonia mugikorraren garapenaz geroztik. Hala ere, goi-maiztasuneko zirkuituetan SPICE bezalako programak ez dira hain erabilgarriak. Esan denez, simulazio-programa honek denbora-eremuan lan egiten du eta goi-maiztasuneko zirkuituetan agertzen diren zenbait elementu ezin dira eremu horretan ondo modelizatu. Elementu horiek, normalean, maiztasun-eremuan ereduztatzen dira. Bestalde, goi-maiztasuneko zirkuituetan denbora seinaleak oso azkarrak dira eta zirkuituaren iranganko rra oso luzea da seinaleen periodoarekin alderatuz.

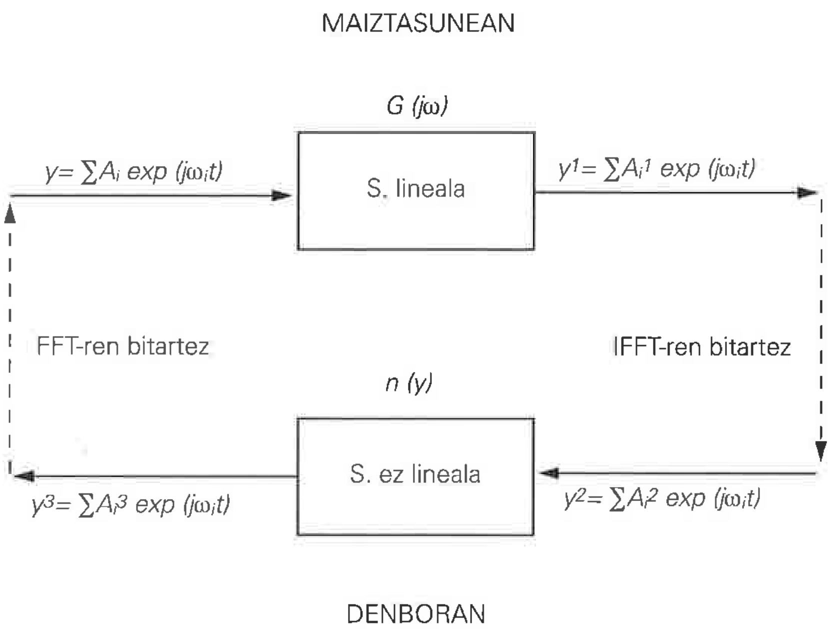
Gogoratu seinalearen iraunkorra dela bilatzen dena eta denbora-eremuan lan egitean, seinalearen iraunkorra lortu ahal izateko iragankor osoa aztertu behar da. Horrexegatik, maiztasun altuagoa erabili ahala, simulazio-denbora handitu egiten da. Simulazio denbora asko handitzen bada denbora-eremuko simulazioa ez da batere erabilgarria izango.



7. irudia. Seinale baten iragankorra eta iraunkorra.

Aurretik esan denez, ez-linealtasunek maiztasun-eremuan arazoak sortzen dituzte. Maiztasun altuek berriz, denbora-eremuan goian aipatutako arazoa dakarte. Beraz irrati-komunikazioko zirkuituetan arazo hauek ekiditeko beste metodo bat erabili behar da bai denbora-eremuan bai maiztasun-eremuan lan eginez. Metodo horri balantze harmoniko deritzo, [6].

Hasteko, suposatzen da soluzioa periodikoa dela, hau da, soluzioan maiztasun-oinarri bat daukagula (argi dago horrek simuladorearen ahalmena gutxitu egiten duela) eta zuzenean soluzioaren iraunkorra bilatzen da. Orduan, sistemaren alde linealetan maiztasun-eremua erabiltzen da eta alde ez-linealetan denbora-eremua. Alde linealak eta ez-linealak konektatzeko, seinaleak denbora-eremutik maiztasun-eremura eta maiztasun-eremutik denbora-eremura pasatu behar dira, horretarako FTT-ren teknika erabiltzen da. FFT-k Fast Fourier Transform esan nahi du ingelesez eta seinale baten Fourier-en transformatua egiteko erabiltzen da. Azkenik, soluzioa aurkitzeko Newton-Rapson algoritmoa erabiltzen da (soluzioa izateko ziklo osoa eginez hasierako emaitza lortu behar da).



8. irudia. Balantze harmonikoa. Newton-Rapson-en bitartez iteratuz $A_i = A_i^3\ \forall i$ soluzioa lortzen da.

Metodo hau erabiliena da goi-maiztasuneko zirkuituak diseinatzeko. Hala ere, bere ahalmena bi aldetatik mugatuta dago: soluzioaren egitura aurretik finkatu behar da eta lortutako emaitza faltsua (matematikoa) suerta liteke.

3. EGONKORTASUNA GOI-MAIZTASUNEKO ZIRKUITUETAN

3.1. Oso dinamika aberatsa

Sistema ez-linealak aztertzea oso korapilatsua da zeren eta oso dinamika ezberdinak aurki daitezke, [3]. Sistema linealen kasuan, oso teknika eraginkorrak eta indartsuak daude, Laplaceren transformatua kasu. Baina sistema ez-linealen kasuan ez dago metodo orokorrik eta gainera sistema ez-linealen ezagutza askoz ere murritzagoa da. Logikoa denez, hemen ez da dinamika ez-lineala era sakonean aztertuko baina egoera interesgarri batzuk aurkeztuko dira, zirkuitu elektronikoetan oinarrituz. Klasifikazio xumea eginez sistema ez-linealak autonomo eta ez-automoetan bana daitezke. Sistema autonomoak ez-bortxatuak direnak dira, hau da, sarrera gisa RF seinalerik ez dutenak. Sistema ez-autonomoak, berriz, sarrera gisa RF seinaleak dituztenak dira.

Sarritan aurki ditzakegun soluzioak, hots, sistemaren irteerak, hurrengo eran bana daitezke:

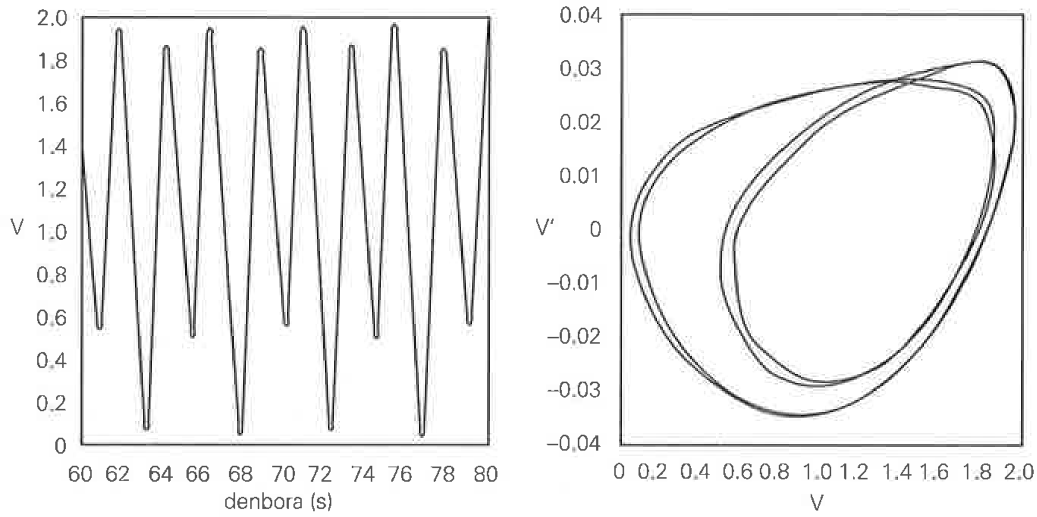
Sistema autonomoetan:

—DC soluzioak, hau da, oszilaziorik gabeko seinalea. Oinarrizko soluzioa.
—Oszilazio baten agerpena. Oszilazio askea deitzen da. Osziladoreak diseinatzerakoan honelako soluzioak bilatzen dira.
—Dinamika korapilatsuak: oszilazio bat baino gehiagoren agerpena, oszilazioen zatiketak, kaosa...

Sistema ez-autonomoetan:

—Sarrerako seinalearen maiztasun bereko seinalea eta bere goi-harmonikoak. Oinarrizko soluzioa.
—Maiztasunaren zatiketa ezberdinak. Oinarrizko maiztasuna eta maiztasun horren zatiketa ezberdinak: zati bi, zati hiru, zati lau, ...
—Maiztasun aske baten agerpena. Irteera ez da periodikoa.
—Kaosa.

Maiztasun-zatiketak dauzkagunean irteera periodikoa da, baina, irteerako seinalearen maiztasuna oinarrizko maiztasunaren erdia, laurdena edo beste zatiketaren bat da. 9. irudian ikus daiteke zatiketa baten adibidea.



9. irudia. Oinarrizko maiztasunaren zatiketaren agerpena. Oinarrizko soluzioaren inguruan sistema ez-egonkorra da.

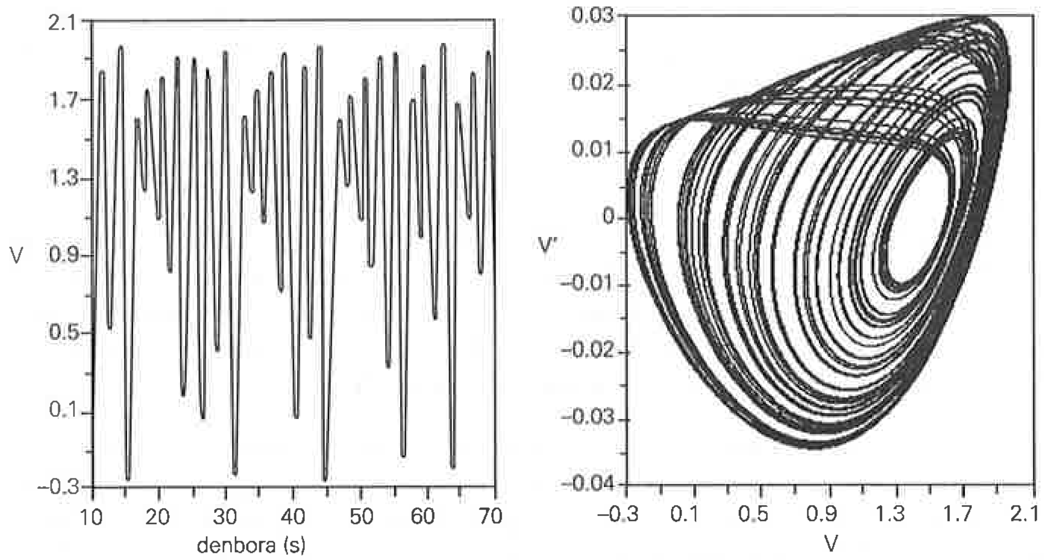
Sistema autonomoetan bi oszilazio aske agertzen badira, hau da, maiztasunak erlazionaturik ez dauzkaten bi oszilazio, edo sistema ez-autonomoetan oszilazio aske bat (sarrerako seinalearen maiztasunarekin erlazionatuta ez dagoen maiztasuneko oszilazioa) agertzen bada, orduan irteera seinale ez-periodikoa izango da. Azkenik, seinaleen artean bitxienetarikoa kaosa izan daiteke. Baina, zer da kaosa?

Fase-espazioan sistemaren aldagaien eboluzioa adierazten da. Sistema batek kaosa aurkezten duela esaten da ondoko baldintza hauek betetzen baditu (era ez-zehatzean):

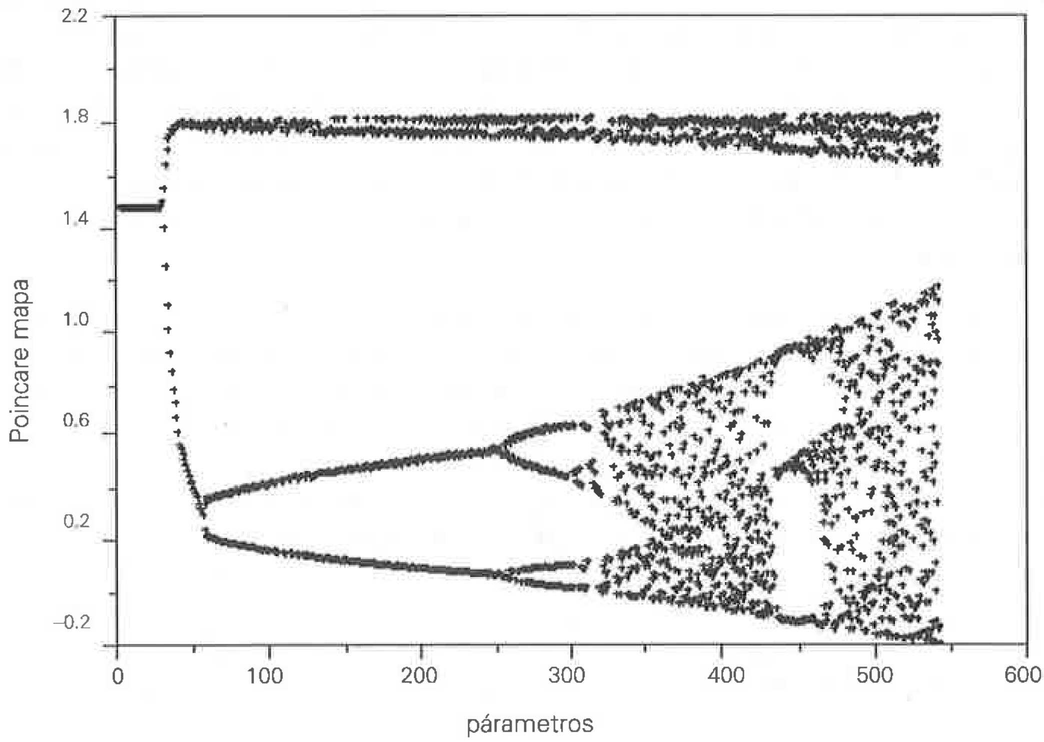
—Sistema hasierako baldintzen aldaketei buruz oso sentibera da, hau da, hasierako baldintzak oso gutxi aldatuz sistemaren irteera asko aldatzen da.
—Fase-espazioko ibilbidea ez da inoiz mozten, hau da, aldagai guztiek ez dituzte inoiz balio berberak hartzen.
—Ibilbidea fase-espazioko zonalde itxian kokatzen da.

10. irudian kaosa agertzen duen sistema baten irteera ikus daiteke. Fase espazioko grafikari erreparatuz gero kaosaren bigarren baldintza betetzen ez dela ematen du, ibilbidean ebakidurak daudelako. Baina sistema hirugarren ordenakoa denez fase-espazioak hiru dimentsio dauzka, eta beraz, grafikan adierazten dena ibilbidearen proiekzioa da fase-espazioko bi dimentsiotan.

Normalean sistema berak portaera guztiak ager ditzake, parametro baten balioaren arabera. 11. irudian horren adibidea ikus daiteke sistema autonomo baten kasuan, konkretuki, Chua-ren zirkuituaren kasuan. Grafika



10. irudia. Kasu honetan dinamika kaotikoa ikus daiteke, bai denbora bai fase espazioan.



11. irudia. Bifurkazioen diagrama. Soluzioen eboluzioa ikus daiteke, parametro baten balioaren arabera.

honetan fase ezpazioko gainazal batean ibilbidearen ebakidurak irudikatzen dira parametro baten arabera, ibilbide osoa era laburbilduan erakustearren. Prozedura horri Poincare mapa deritzo eta bifurkazioen diagrama erakusten du. DC soluziotik hasiz, bifurkazio bakoitzak zatiketa berri baten agerpena adierazten du. Lehenengo bifurkazioak (Hopf-en bifurkazioak) oszilazio askearen agerpena dakar. Parametroaren balio baterako puntu-kopurua handia denean, kaosa dagoela esan nahi du. Grafikan ikus daiteke parametroa handitzean kaosa agertzen dela, baina parametroa gehiago handitzean kaosa desagertu egiten da zatiketak soilik geratuz. Parametroa handituz kaosa berragertzen da. Fenomeno horri leihoa deritzo. Hurrengo atalean jokaera hau duten adibide batzuk azalduko dira.

Goi-maiztasuneko zirkuituak aztertzean hasierako planteamendua hauxe da: balantze harmonikoa erabiliz soluzio anitz aurki daiteke, baina horietatik bat baino ez da benetakoa, besteak matematikoak dira. Soluzioen izaera lortzeko, sistemaren egonkortasuna aztertu behar da soluzio horien inguruan. Sistema soluzio baten inguruan egonkorra bada (soluzioa egonkorra bada) orduan soluzio hori benetakoa da, [7]. Bestalde, soluzioa ez-egonkorra bada soluzio hori matematikoa da eta ez da sistemaren benetako irteera. Normalean, soluzio sinpleak espero direnez kasu korapilatsuak salbuespentzat hartzen dira eta, horrexegatik, simuladore komertzialetan oinarrizko soluzioak deitu ditugun horiek dira kontuan hartzen diren bakarrak. Simuladoreek oinarrizko soluzioen egonkortasuna aztertu gabe, benetako soluziotzat hartzen dituzte beti. Hau honela da orain arte ez delako egon egonkortasuna aztertzeko metodo orokor eta sinplerik. Sarritan ez da arazorik agertzen, baina azalduz gero egindako simulazioek ez lukete ezertarako balioko. Honela, simulazio horietan oinarrituz burututako diseinua baliogabetua geratzen da diru- (eta denbora) galera handia ekarriz.

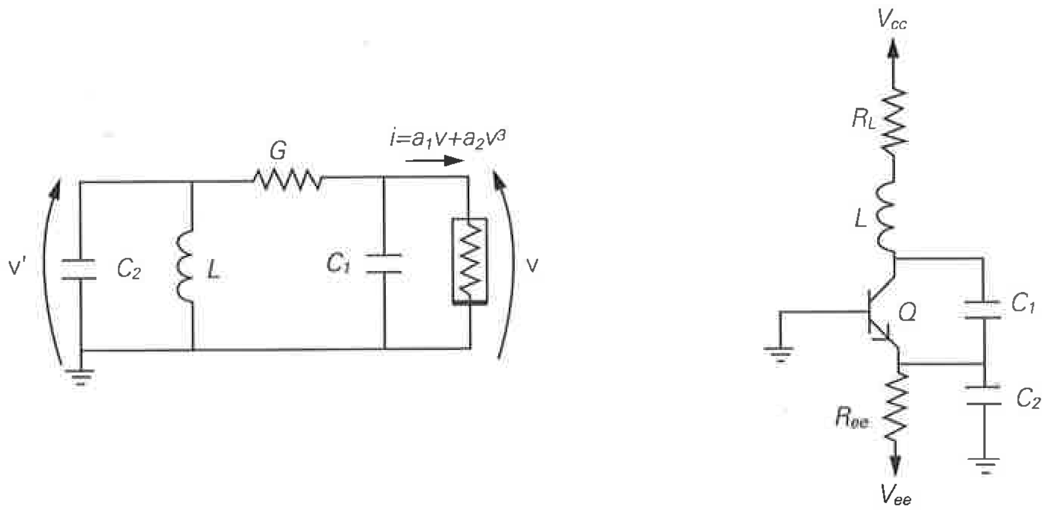
Sistema autonomoa bada, korronte jarraituko (DC) soluzioa da zirkuituan espero den soluzioa (sinpleena) eta oinarrizko soluziotzat hartuko da. Sistema ez-autonomoa bada, zirkuituaren irteeran, soluzio gisa, sarrerako seinalearen maiztasun berbera duen seinaleaz eta bere goi-harmonikoez osatutako seinalea aurreikusten da. Kasu honetan horixe izango da oinarrizko soluzioa. Hauexek dira, kasu bakoitzean balantze harmonikoaren metodo klasikoak erabiliz aurkitzen diren soluzioak (egia esateko DC kasua ez da askotan aztertzen HB-a erabiliz). Baina posible da oinarrizko soluzio hauek benetako soluzio ez izatea. Gaur egun soluzioen egonkortasuna aztertzeko metodoak prestatzen ari dira edo zeudenak hobetzen ari dira simuladore komertzialetan metodo hauen aplikazioa posible egiteko.

Hasieran egindako egonkortasunaren definizioa hemen aldatu egingo da, baino funtsean oso erlazionatuta daudela ikusiko da. Sistemaren soluzio baten egonkortasuna aztertzeko nahikoa da aztertzea sistema soluzio horretan mantentzen den edo bertatik aldentzen den. Ez-egonkortasunak testuinguru honetan oinarrizko soluzioak ez direnak izango dira eta, normalean, soluzio ez desiratuak dira. Egonkortasuna, era lokalean, fase-espazioko soluzio baten inguruan, eta orokorrean azter daiteke. Nahiz eta azterketa orokorra zehatzagoa izan, erabiltzen den metodoa azterketa lokaletik abiatzen da.

Era lokalean, soluzio bat aztertzeko, soluzio horren inguruan sistemaren linealizazioa egiten da, [7], [8]. Horrela, operazio-puntu horren inguruan eredu lineala lortzen da eta egonkortasuna ohizko teknika linealak erabiliz, hau da, egonkortasunaren hasierako definizioa erabiliz, azter daiteke, adibidez poloen kokapena aztertuz. Eredu linealak polo egonkorrak soilik badauzka, orduan soluzioa egonkorra da, benetako soluzioa. Eredu linealean polo ez-egonkorrak badaude, aurretik aipatutako egoerak ager daitezke

3.2. Zirkuituak, adibide bezala

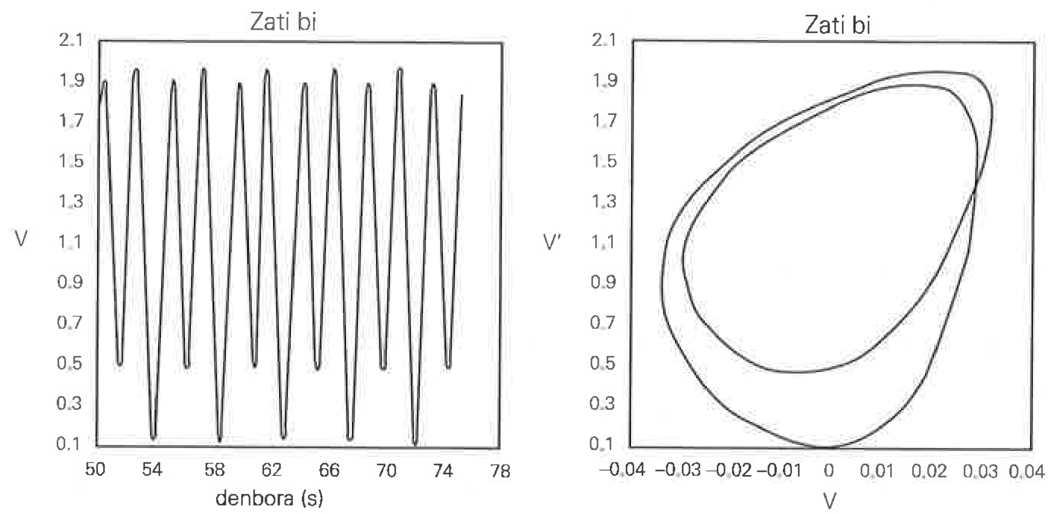
Ez-egonkortasunak oso arraroak direla pentsa daiteke, hau da, ez direla maiz gertatzen, baina askotan agertzen dira. Ez-egonkortasunez eta dinamika konplexuez hitz egiten denean, hobe da adibide batzuk ipintzea egoera deskribatzeko. Adibideak ugariak izan daitezke, anplifikadoreak, osziladoreak, zatitzaileak, PLL-ak... baina beharbada osziladoreak dira aztertzeko errazenak. Hemen bi osziladore ezberdin hartuko dira etsenplu gisa: Chuaren zirkuitua, [8], eta Colpitts osziladore bat, [9].



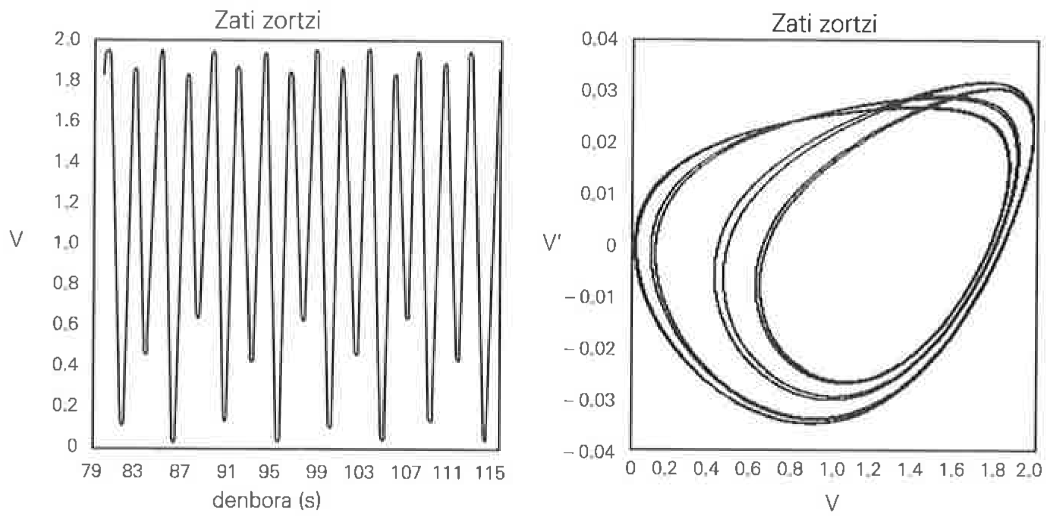
12. irudia. Chuaren zirkuitua ezkerrean eta Colpitts osziladorea eskuinean.

Bi zirkuitu hauek dinamika antzekoak aurkezten dituzte eta parametroren baten balioa aldatuz aurretik aipatutako dinamika guztiak agertzen dituzte: oszilazio askeak, zatiketak, kaosa... Logikoa denez, zirkuitu hauetan oszilazio askea desiragarria da, oszilazioa sortzeko diseinatzen baitira. Kasu honetan, ez-egonkortasuna «ona» da. Beste efektuak, berriz, ez dira desiragarriak.

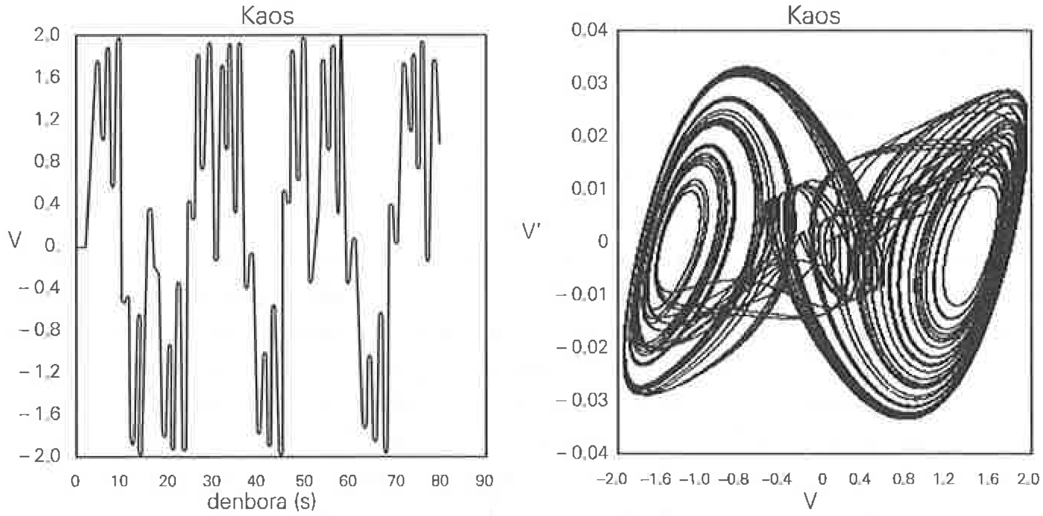
13, 14 eta 15. irudietan Chuaren zirkuituaren irteera ezberdinak aurkezten dira (Colpitts osziladorearenak antzekoak dira). Dinamika desberdin hauek parametro baten, erresistentzia baten balioa aldatuz agertzen dira. Osziladoreak



13. irudia. Chuaren zirkuituaren irteera: Zatiketa biz.



14. irudia. Chuaren zirkuituaren irteera: Zatiketa zortziz.



15. irudia. Chuaren zirkuituaren irteera: Dinamika kaotikoa.

sistema autonomoak direnez hauen oinarrizko soluzioa DC soluzioa da, baina osziladoreen funtzioa oszilazio askea sortzea da, beraz soluzio hori da aztertu beharko dena. Honegatik zaila da osziladoreak balantze harmonikoaren bidez aztertzea. Arazo hori saihesteko metodo bat aurrerago ikusiko da.

3.3. Ez-egonkortasunak balantze harmonikoan

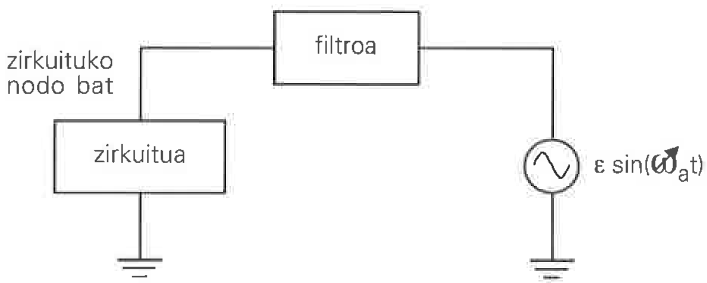
Goi-maiztasuneko zirkuituen diseinuak balidatzeko balantze harmonikoan oinarritutako simuladoreen balioa argia da. Baina metodo honekin ez dira soluzio posible guztiak kontuan hartzen, sinpleenak soilik. Hau da, ezin dira ez-egonkortasunak detektatu, oinarrizko soluzioak bakarrik.

Arazo horrek kostu handia ekar dezake. Simulazioan diseinu ona zirudien zirkuituak, prototipo bihurtu ondoren, bilatzen ez zen portaera izan dezake. Gaur egun, ez-egonkortasunak simulazio bidez detektatzeko saioak garatzen ari dira, [7], [11], [10]. Hemen, prestatzen ari diren soluziobideak azalduko dira, nahiz eta arlo hau garapen-bidean egon.

Sistemaren dinamika guztiz ezagutzeko azterketa orokorra egin behar da, baina ez dago simulazio bitartez azterketa hori egiteko era errazik. Gogoratu behar da, egonkortasunaren analisia diseinu-etapan egin behar dela, eta beraz, denbora garrantzitsua dela. Halaber, azterketa hori konplexua denez ezingo luke edozein diseinatzailek egin. Beraz, azterketa lokala egiten da, lorturiko oinarrizko soluzioaren inguruan sistemaren linealizazioa eginez.

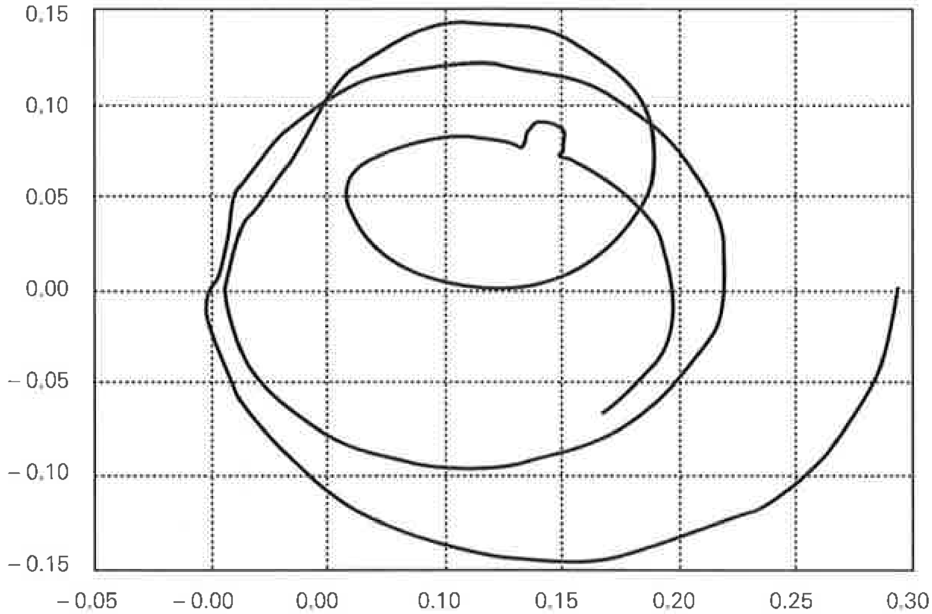
Balantze harmonikoarekin zuzenean seinaleen iraunkorra lortzen denez, era errezean lor daiteke sistema linealizatuaren maiztasun-erantzuna. Lortutako maiztasun-erantzunaz baliatuz sistema linealetan erabiltzen den egonkortasun-analisia burutu daiteke. Maiztasun-erantzuna lortzeko, aztertu nahi den operazio-puntura eraman behar da sistema lehenik eta behin. Horretarako sondaren metodoa deritzon metodoa erabil daiteke, [10]. Metodo hori perturbazio ezaren printzipioan oinarritzen da: seinale bat (oszilazio bat, adibidez) puntu bateko soluzio posible bada, puntu horretan seinale bera sortzen duen iturria konektatuz, iturriak ez du zirkuitua batere perturbartzen, hau da, berdin-berdina da iturria konektatzea edo ez. Baina balantze harmonikoaren kasuan, iturria jartzeak edo ez jartzeak, zirkuitua soluzio batera edo bestera eramatea dakar. Adibidez, osziladoreen kasuan, diseinu sinpleen arabera zirkuituan sortuko litzatekeen oszilazioa sartzen da. Sistemaren soluzioa izanez, horrek ez du zirkuitua perturbatzen. Sistema aztertzean (soluzio horren inguruan) egonkorra ateratzen bada, soluzioa benetakoa da, bestela kalkulu sinpleen emaitza hori soluzio matematikoa da eta benetako soluzioa konplexuagoa da.

Aztertu nahi den soluzioaren ingurura eramaten da sistema eta sarrera gisa beste sonda bat erabiltzen da (anplitude txikikoa linealtasuna mantentzeko). Maiztasun konkretu baterako, maiztasun-erantzuna sarrera eta zirkuituaren irteeraren arteko erlazioa da. Beraz, interes-tartean maiztasunaren ekorketa eginez sistemaren maiztasun-erantzuna lortzen da.



16. irudia. Maiztasun-erantzuna lortzeko zirkuitu-eskema, sonda bidez.

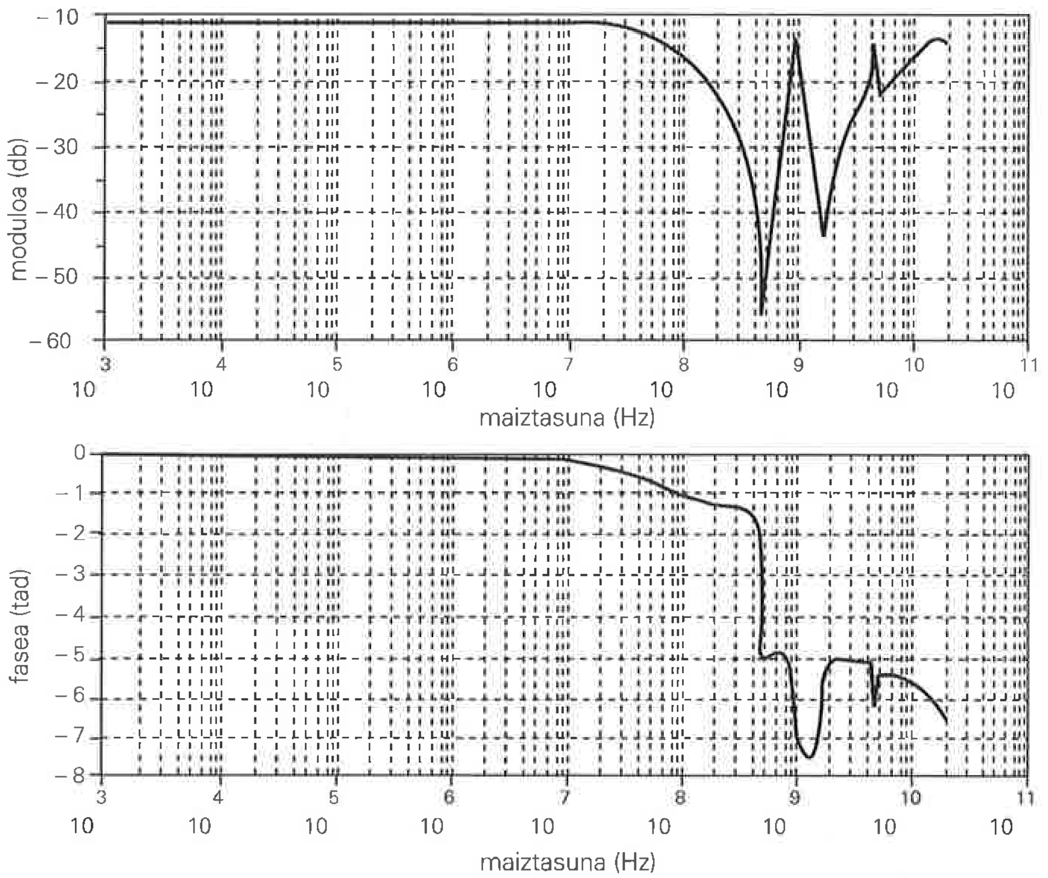
Maiztasun-eremuan egonkortasuna aztertzeko, orain arte Nyquist-en kriterioa izan da biderik erabilena, [7], [11]. Hau aplikatu ahal izateko, sistema linealizatuaren maiztasun-erantzuna $G(j\omega)$ lazo irekian lortu behar da, hau da, zirkuitua puntu batean «moztuz». Era sinplifikatuan, maiztasun-erantzunaren grafikak $(1 + G(j\omega))$ plano konplexuan jatorria inguratzen badu, sistema lineala ez-egonkorra da eta soluzioak ez-egonkortasunen bat aurkeztuko du: zatiketak, oszilazio askeak, kaosa...



17. irudia. Nyquist-en kriterioren sinplifikazioa: maiztasun-erantzuna plano konplexuan. Jatorria inguratzen da eta sistema ez-egonkorra izango litzateke.

Hala ere, aurreko metodoa Nyquist-en kriterioaren sinplifikazio bat da. Kriterio horrek $N = Z - P$ dela zehazten du, non N maiztasun-erantzunak jatorriaren inguruan ematen duen bira-kopurua, maiztasun-erantzuna jatorriaren inguruan plano konplexuan (zeinuarekin, noranzkoaren arabera), Z lazo itxiko polo ezegonkorren kopurua eta P lazo irekiko polo ezegonkorren kopurua diren hurrenez hurren. Orain dela gutxi, Nyquist-en kriterioa kontuan hartuta azterketa zehatza egiteko metodo bat agertu da baina korapilatsua da eta denbora asko behar da aurrera eramateko, [11].

Gure ikerketa-taldetik, beste azterketa mota bat lantzen ari da. Lazo irekian analisia egin beharrean, lazo itxian, hau da, zirkuitua den bezala erabiliz, lortzen da maiztasun-erantzuna. Sonda erabiliz, sarrera txikien aurrean zirkuituak aurkezten duen inpedantzia izango da oraingoan maiztasun-erantzuna. Lazo itxiko maiztasun-erantzuna lortzean azterketa egiteko beste bide bat jorratzen da. Lehenengo atalean esan dugunez, maiztasun-erantzuna eta transferentzi funtzioa aldagai-aldaketa baten bitartez lotuta daude. Beraz, lortutako datuekin transferentzi funtzioa ereduzta daiteke, eta TF horren poloak aztertuz soluzioaren egonkortasuna lortzen da.



18. irudia. Transferentzi funtzioaren identifikazioak zehatza izan behar du. Kasu honetan, TF-aren maiztasun-erantzuna eta jatorrizkoa oso parekoak dira. Eredua erabiliz, sistema ez-egonkorra dela ondorioztatzen da.

Metodoa edozein izanda ere, azterketa pausoka egin behar da, oraindik ez da lortu benetako soluzioa zuzenean aurkitzeko bidea. Lehenengo oinarrizko soluzioa aztertu behar da. Egonkorra bada, hor amaitzen da lana, baina ez-egonkorra bada, agerturiko soluzio berria zein den atera behar da. Zirkuitua soluzio horretara eramanez (sondaren metodoa erabiliz, adibidez) berriro ere egonkortasuna aztertu behar da. Soluzio egonkor bat agertu arte bide hori jarraituz, oszilazio askeak edo zatiketak aurki daitezke. Adibidez, Chua-ren zirkuituan soluzioa zatiketa zortziz bada, prozedura hauxe litzateke: hasteko oinarrizko soluzioa aztertu behar da. DC soluzioa ez-egonkorra suertatzen da eta oszilazio askea soluzio posible bezala agertzen da. Azken hau aztertuz ere, soluzioa ez-egonkorra da eta zatiketa biz izango da soluzio posiblea. Prozedura errepikatzen da zatiketa zortziz egonkorra agertu arte.

Galdera da nola identifikatu kaosa zirkuituan aurreko prozedura edo beste bat erabiliz. Erantzuna sinplea da: oraindik ez dago horretarako biderik maiztasun-eremuan. Guzti hau, gaur egun ari da garatzen, eta beraz, metodo eraginkorra ez da oraindik lortu (beharbada ez da aurkituko). Dena den, azkeneko bideari jarraituz lortutako lehenengo emaitzak itxaropentsuak dira. Erantzuna datozen urteetan izango dugu.

BILBLIOGRAFIA

[1] OGATA, K., 1987. *Dinámica de sistemas*. Prentice-Hall. Mexico.
[2] OGATA, K., 1980. *Modern control engineering*. Prentice-Hall. London.
[3] GUCKENHEIMER, J. and HOLMES, P., 1986. *Nonlinear oscillations, dinamical systems and bifurcations of vector fieds*. Springer-Verlag. New York.
[4] CARLSON, A.B., 1986. *Communication systems*. Irwin/McGraw-Hill. New York.
[5] SCHWEBER, W., 1991. *Electronic communication systems*. Prentice-Hall International. New Jersey.
[6] MAAS, S.A., 1997. *Nonlinear microwave circuits*. IEEE press. New York.
[7] RIZZOLI, V. and LIPPARINI, A., 1984. «General stability analysis of periodic steady-state regimes in nonlinear microwave circuits». *IEEE Trans on microwave theory and techniques*, **33**, 30-37.
[8] GENESIO, R. and TESI, A., 1992. «A harmonic balance approach for chaos prediction: Chua's circuit». *Int. J. of bifurcations and chaos*, **2**, 61-79.
[9] KENEDY, M.P., 1994. «Chaos in the colpitts oscillator». *IEEE Trans. on circuits and systems-I: fundamental theory and applications*, 771-774.
[10] SUÁREZ, A. and COLLANTES, J.M., 1998. «Chaos detection in microwave circuits using harmonic balance commercial simulators». *IEEE MTT-S digest*, **3**, 271-274.
[11] MONS, S., PÉREZ, M.A., QUÉRÉ, R. and OBREGÓN, J., 1999. *A unified approach for the linear and nonlinear stability analisys of microwave circuits using commercially available tools*.