

Gradu Amaierako Lana  
Ingeniaritza Elektronikoko Gradua

# Elektronika inprimatuan oinarritutako RLC zirkuituen diseinua eta fabrikazioa

Egilea:

Alexander Ugena Fernandez

Zuzendariak:

Iñigo Arredondo López de Guereñu

Jose Manuel Gonzalez Perez

# Gaien Aurkibidea

<b>1</b>	<b>Helburuak</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Sarrera</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Dielektrikoen karakterizazioa</b>	<b>4</b>
3.1	Material dielektrikoak	4
3.2	Erresonadoreak	4
3.2.1	Eraztun erresonadorea	7
3.2.2	T erresonadorea	8
3.3	Eraztun erresonadore bidezko karakterizazioa	9
3.3.1	Diseinua	9
3.3.2	Eredu teorikoa	10
3.3.3	Eredu esperimentalak	13
3.4	T bikoitzeko erresonadore bidezko karakterizazioa	15
3.5	Serigrafia bidez eraikitako erresonadorea	18
<b>4</b>	<b>Inpresio bidezko RLC zirkuitua</b>	<b>20</b>
4.1	Elektronika inprimatua	20
4.1.1	Inprimazio teknikak	21
4.1.1.1	Serigrafia	21
4.1.1.2	Inkjet printing	22
4.1.2	Materialak	23
4.1.3	Abantaila eta desabantailak	23
4.2	RLC zirkuitua	24
4.3	Elementuen analisia	26
4.3.1	Kondentsadoreak	26
4.3.1.1	Inprimatutako kondentsadoreak	28
4.3.1.2	Analisi esperimentalak	29
4.3.2	Harilak	36
4.3.2.1	Inprimatutako harilak	37
4.3.2.2	Analisi esperimentalak	37
4.3.3	Erresistentziak	40
4.3.3.1	Analisi esperimentalak	40
4.4	Diseinu eta fabrikazioa	41
<b>5</b>	<b>Ondorioak eta etorkizunerako proposamenak</b>	<b>45</b>

# 1 Helburuak

Gradu amaierako lan honek bi helburu nagusi ditu. Alde batetik helburu teknikoak daude, eta, bestetik, helburu transbertsalak. Azken hauek Tecnalía enpresan landu egingo dira.

Lehen helburu teknikoa erresonadore bat diseinatzea da materialak ezaugarritu ahal izateko. Horrela, nahiz eta kasu honetan material estandarrek erabiliko diren, edozein material maiztasun baxu edo altuetan ezaugarritzeko metodoa edukiko da. Erresonadoreen diseinu egoki bat egiteko hauei buruzko jakintza teorikoa izan behar da. Erresonadoreen diseinuen froga simulazio eta neurketa esperimentalen bidez egingo da.

Hurrengo helburua, osagai pasiboak elektronikak inprimatuaren bidez fabrikatzea da. Osagai hauek ezaugarritzeko teknologia berri honen alde teorikoa ezagutu behar da eta zer eragin duen osagai pasiboetan. Horretarako azterketa teoriko, fabrikazio eta analisi esperimentalak egingo dira.

Azkenik, RLC zirkuitu erresonante bat fabrikatu eta frogatu egingo da elektronikak inprimatua erabiliz. Horrela, elektronikak inprimatuaren bidez sentsore moduan erabiltzeko RLC zirkuituak fabrika daitezkeela frogatuko da.

Helburu transbertzalei dagokienez, Tecnalían ezagutu eta bere lan egiteko modua barneratu egingo dira. Hala nola enpresa baten barnetik egoera errealean ikusi, hau da, talde lana, komunikazioa eta ematen diren arazoak aurre ateratzen ikasi batik bat.

# 2 Sarrera

Gradu amaierako lan honen helburua nagusia elektronikak inprimatua aztertzea da. Elektronika inprimatua fabrikazio-metodo zahar bat erabiltzeko modu berri bat da. Testua paperean inprimatu beharrean, tinta eroaleak, erdieroaleak edo dielektrikoak inprima daitezke egitura elektrikoa sortzeko egokia den edozein substratuan. Teknologia hau oraindik garatzen ari da, nahiz eta lehen aplikazioak dagoeneko komertzializatzen hasi diren [1].

Elektronika inprimatua etorkizunean oso erabilia izango dela aurreikusten da, honen merkatua 2011ean silizioan oinarritutako teknologiaren bikoitza izanik urte horretan [2]. 2020an IDTechEx enpresak egindako txostenaren arabera, elektronikak inprimatuaren merkatua (material organiko, ez-organiko eta konposatuak barne) \$41.2 bilioitik \$74 bilioira igaroko da 2030ean [3]. Aplikazio potentzialak eroale moduan erabiltzea, logika eta memoria erabilerak, OLED teknologia organikoan, bateriak, eguzki-panel fotovoltaetan, irrati-maiztasun bidezko identifikazio antenak (RFID) eta sentsoreak dira beste batzuen artean. Arrazoi guzti hauek direla eta, teknologia honen garrantzia eta gorakada onartu beharra dago.

Ingeniari moduan garrantzitsua da autonomoak izateko baliabideak garatzea, are gehiago RF moduko arlo batean. Askotan sentsore edo iragazki bat fabrikatu nahi denean, dielektriko komertzialak erabiltzen badira fabrikatzaileak ezaugarrituta ditu. Hala ere, komertzialak ez diren dielektikroen permitibitatea ezagutu nahi denean, komenigarria da karakterizazio-teknika espezifikoak erabiltzea haien propietate fisikoak zehaztasunez definitzeko.

Nahiz eta karakterizazio-teknika ezberdin egon, teknologia planarretan oinarritutako *microstrip* transmisio lerroetan (TEM) oinarritutako egitura erresonanteak erabili dira. Teknika hauek alde teorikotik sakonki aztertu dira eta simulazio elektromagnetiko (EM) eta sareen analizatzaile bektorial (VNA) erabiliz neurketa esperimental bidez frogatu dira. Bai simulazioan, bai laborategian egindako neurketetan, eskuragarri zeuden irrati-maiztasun (RF) material estandarizatu batzuen  $\epsilon_r$  zehaztu da *scattering* [S] parametroetatik abiatuta. Ondoren, lortutako permitibitate erlatiboa fabrikatzaileak emandakoarekin alderatu da.

Memoriaren antolaketari dagokionez, bi ataletan banatu da. 3. atalean, materialen karakterizazioaren inguru azterketa eta frogak burutu dira T eta eraztun erresonadoreak erabiliz. CST programa erabiliz simulazioak egin dira, eta ondoren, fabrikazio metodo ezberdinak erabiliz, VNA bidez neurketa esperimentalak burutu dira. 4. atalean, elektronika inprimatua teorikoki eta praktikoki aztertu dira. Baita RLC zirkuitu eta bere elementuen azterketa egin da, bukaeran zirkuitu honen diseinu eta fabrikazioa burutu ahal izateko.

## 3 Dielektrikoen karakterizazioa

Material dielektrikoak karakterizatzeko erresonadoreak erabili ohi dira, batez ere teknologia planarreko *microstrip* transmisio lerroak erabiliz sortutako eraztun eta T erresonadoreak. Atal honetan erresonadore hauek ulertzeko eta diseinatzeko beharrezkoak diren oinarriak bildu dira. Baita ere, hauen emaitzetatik abiatuz material dielektrikoen karakterizazioa posiblea dela aztertu da alde teoriko zein esperimentaletik.

Jarraitutako prozesuan eraztun erresonadorearen inguruko azterketa egin da, lehenik CST Studio Suite [4] programan diseinatu eta simulatuz, ondoren, fisikoki fabrikatutako erresonadorearekin alderatzeko. Azkenik, eraztun erresonadorearekin lorturiko emaitzak T erresonadore bat erabiliz lorturiko emaitzekin alderatu dira.

### 3.1 Material dielektrikoak

Material dielektrikoak eroankortasun elektriko oso baxua duten materialak dira, hau da, isolatzaileak dira, baina eremu elektriko baten menpean beraien barnean dipolo elektrikoak eratzeko ahalmena izan behar du [5]. Material dielektrikoen portaera hobeto ereduatzeko eremu elektromagnetiko baten menpean daudenean bi parametro garrantzitsu daude:  $\epsilon_r$  permitibitate erlatiboa eta  $\tan\delta$  galera tangentea.

Permitibitate erlatiboa edo konstante dielektrikoa konstante fisiko bat da, eta isolatzaileak eremu elektriko baten menpean energia elektrikoa metatzeko duen gaitasuna neurtzen du. Hutseko permitibitatearekin,  $\epsilon_0$ , duen erlazio gisa adierazten da (3.1).

$$\epsilon_r(\omega) = \frac{\epsilon(\omega)}{\epsilon_0} \quad (3.1)$$

Beste aldetik, disipazio faktorea material dielektriko batek berez duen energia elektromagnetikoaren galera kuantifikatzen du. Oro har, galera-tangentearen arabera parametrizatzen da. Galera-tangentea galera-erreakzioren eta galerarik gabeko erreakzioren arteko erlazioa bezala definitzen da (3.2).

$$\tan\delta = \frac{\omega\epsilon'' + \sigma}{\omega\epsilon'} \quad (3.2)$$

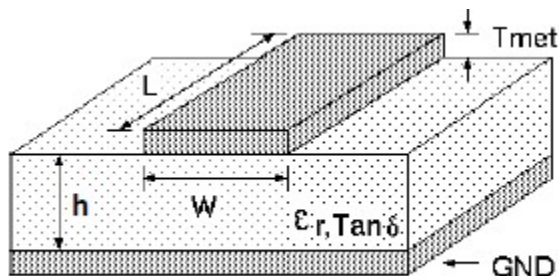
Bi parametro hauek maiztasunarekiko dependenteak dira; hortaz, hauen estimazioa egiteko seinale periodikoak erabiltzen dituzten teknika ezberdinak erabiltzen dira.

### 3.2 Erresonadoreak

Aztertuko den printzipioa erresonantzia da. Definizioz, erresonantzia, zirkuitu elektrikoetarako dagokienez, maiztasun jakin batean gertatzen den fenomeno da; zirkuituko elementuen inpedantziak edo admitantziak elkarren artean deuseztatzen direnean. Inpedantzia ( $Z$ ) zirkuitu bat korrante bati tentsio bat aplikatzen zaionean eragiten dion oposizioa da. Inpedantziak

erresistentzien kontzeptua korrante alternoko zirkuituetara hedatzen du, eta magnitude eta fasea ditu. Admitantzia inpedantziaren alderantzizkoa da; hau da, zirkuituak korrontearo pasatzen uzten dion erraztasuna da.

Erresonantzia aztertzeko akabanatze-parametroak erabiliko dira, S parametroek sare elektriko linealen portaera elektrikoa deskribatzen dute seinale elektrikoek egoera geldikorrean estimuluak ezartzen dituztenean.  $S_{11}$  eta  $S_{12}$  erabiliko dira zirkuituak bi atakakoak eta el-karkariak direnez gero.



1 Irudia: *Microstrip baten egitura bidimentsionala [6]. Parametro geometrikoak: W linearen zabalera, h dielektrikoaren lodiera eta Tmet (edo t) eroalearen lodiera. Substratuaren parametroak:  $\epsilon_r$  materialaren konstante dielektriko erlatiboa eta  $\tan\delta$  materialaren galera.*

Erresonadoreak 1 irudian ikus daitekeen *microstrip* transmisio lerroa teknologia planarra erabiliz sortuko dira. Teknologia honetan, zirkuitua eratzen da geruza dielektriko moduan karakterizatu nahi den materiala jarritz. Aukeratutako zirkuituak T eta eraztun erresonadoreak izan dira, erabilienak baitira. Zirkuitu hauetatik [S] parametroak neurtzen dira, eta, horietatik, material dielektrikoa karakterizatzen duten  $\tan\delta$  galera tangentea eta  $\epsilon_r$  permitibitate erlatiboa lortzen dira.

Teknika planarrean, *microstrip* transmisio lerroen  $\epsilon_e$  permitibitate eraginkorra eta  $Z_0$  inpedantzia karakteristikoa parametroak definitu daitezke material dielektrikoaren  $h$  eta  $\epsilon_r$  ezaguturik. Hauek E. Hammerstad proposatutako ekuazioak (3.3 - 3.6) [7] eta Hammerstad & Jensen 3.7 ekuazioa erabiliz lor daitezke  $Z_0$  inpedantzia karakteristikoa finkatuz.

**E. Hammerstad:** Erik Hammerstad hurrengo ekuazioak proposatu zituen  $0.05 \leq w/h \leq 20$  eta  $\epsilon_r \leq 16$  kasuetarako. Ekuazio hauek %99-eko zehaztasuna dute [8]. Ekuazio hauek  $w$  definitzeko erabiltzen dira.

Alde batetik,  $\epsilon_e$  kalkulatzeko:

- $w/h \geq 1$ :

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 12\frac{h}{w}}} \quad (3.3)$$

- $w/h < 1$ :

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \cdot \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + 12\frac{h}{w}}} + 0.04 \left(1 - \frac{w}{h}\right)^2 \right] \quad (3.4)$$

Bestetik,  $Z_0$  kalkulatzeko:

- $w/h > 1$ :

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_e}} \cdot \left[ \frac{w}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left( \frac{w}{h} + 1.444 \right) \right]^{-1} \quad (3.5)$$

- $w/h \leq 1$ :

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_e}} \cdot \ln \left( \frac{8h}{w} + \frac{w}{4h} \right) \quad (3.6)$$

**E. Hammerstad & O. Jensen:** Ekuazio hauek  $\varepsilon_e$  kalkulatzeko erabiltzen dira %0.2-ko zehaztasunarekin  $\varepsilon_r < 128$  eta  $0.01 \leq w/h \leq 100$  baldintzak betetzen dituzten materialentzat [9]. Konturatu permitibitate eraginkorra material osoaren permitibitate erlatibo indibidualen batez bestekoa dela.

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10}{u}\right)^{-a \cdot b} \quad (3.7)$$

non,

$$a = 1 + \frac{1}{49} \ln \left( \frac{u^4 + (u/52)^2}{u^4 + 0.432} \right) + \frac{1}{18.7} \ln \left( 1 + \left( \frac{w}{18.1} \right)^3 \right) \quad (3.8a)$$

$$b = 0.564 \left( \frac{\varepsilon_r - 0.9}{\varepsilon_r + 3} \right)^{0.053} \quad (3.8b)$$

$$u = w/h \quad (3.8c)$$

Behin *microstrip-linearen* parametroak finkatuta daudela,  $v_p$  hedapen-abiadura duen TEM bat bezala har daiteke, kontuan izanik material dielektrikoetan  $\mu_r = 1$  dela. Konturatu  $\varepsilon_r$  erabili beharrean  $\varepsilon_e$  erabiltzen dela; izan ere, permitibitate eraginkorra ( $1 < \varepsilon_e < \varepsilon_r$ ) erresonadorearen portaera zehatzago deskribatzen du.

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_e}} \quad \text{non } c \equiv \text{argiaren abiadura} \quad (3.9)$$

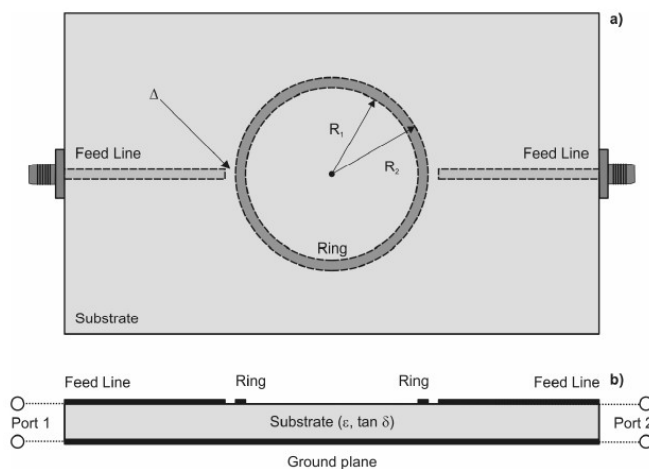
Maiztasuna eta hedapen-abiaduraren arteko erlazioa 3.10 ekuazioak ematen du. Bertan 3.9 ordezkaturik hedatzen diren uhinen uhin-luzera lor daiteke maiztasunaren arabera 3.11 ekuazioan ikus daitekeenez.

$$\lambda f = v_p \quad (3.10)$$

$$\lambda = \frac{c}{f \sqrt{\varepsilon_e}} \quad (3.11)$$

### 3.2.1 Eraztun erresonadorea

Eraztun erresonadorearen estruktura 2. irudian ikus daitekeena da: bi ataka transmisio lerroen bidez konektatzen dira erdiko eraztunari. Transmisio lerroen eta eraztunaren artean *gap* izendatu den tarte txiki bat dagoela. Honek eragin txiki bat izan dezake erresonadoreen erresonantzia-maiztasunetan, baina, neurri handi batean, S parametroen punta-anplitudeengan izango du eragina [10]. Efektu horiek *gap* bakoitza seriean dauden bi kondentsadore moduan modelizatzen badira uler daitezke; hauek  $C_p$  kondentsadore parasito eta  $C_g$  *gap* kapazitantzia izanik [11]. Beste alde batetik, eraztunaren diametroa linearen zabalerarekiko behar bezain handia bada kurbadura-efektuak arbuigarriak izan daitezke.



2 Irudia: Eraztun erresonadore baten diagrama. a) Goitik ikusita. b) Albotik ikusita.

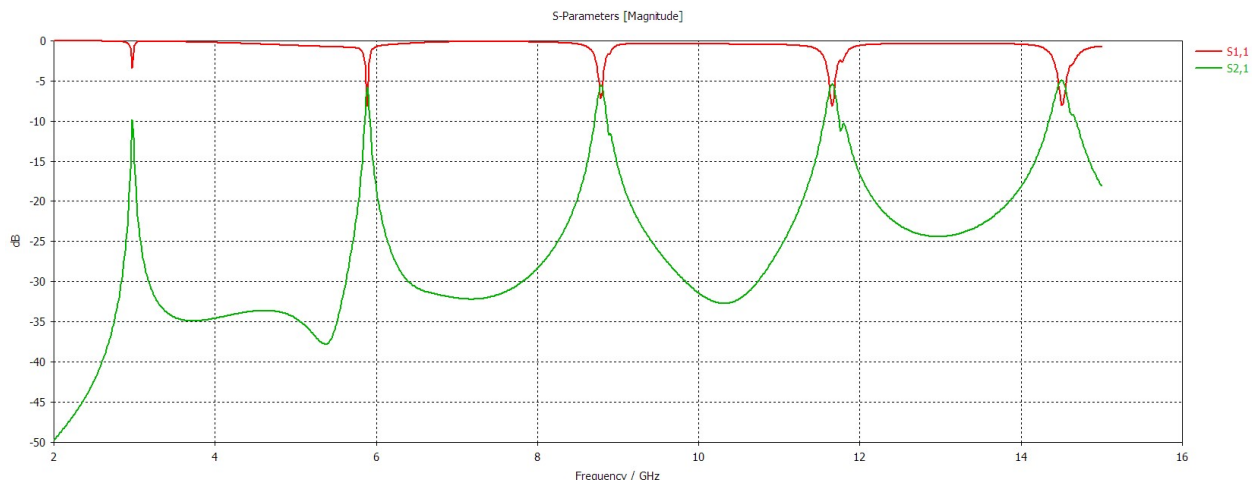
Erresonadorearen batez besteko erradioa, hau da, eraztunaren erdiko zirkunferentziaren erradioa, transmisio-linearen uhin-luzeraren multiploaren berdina izango da. 3.12 ekuazioan  $r$  eraztunaren batez besteko erradioa,  $n$  modua eta  $\lambda$  linearen uhin-luzera dira. 3.11 ekuazioa 3.12-ean ordezkatzuz, eraztunaren erradioa lor daiteke erresonantzia maiztasunaren funtzio 3.13 ekuazioan ikus daitekeenez.

$$2\pi r = n\lambda \quad , \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.12)$$

$$r = \frac{nc}{2\pi f_r \sqrt{\epsilon_e}} \quad ; \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.13)$$

3. irudian simulatutako eraztun erresonadore baten S parametroen moduluen espektroa dago. Ikus daitekenez, erresonantzia  $\lambda$ -ren multiploetan gertatzen da esan bezala, minimoak  $S_{11}$  parametroari dagozkiozlarik eta maximoak  $S_{21}$  parametroari. Konturatu  $S_{22} = S_{11}$  eta  $S_{12} = S_{21}$  izango direla.





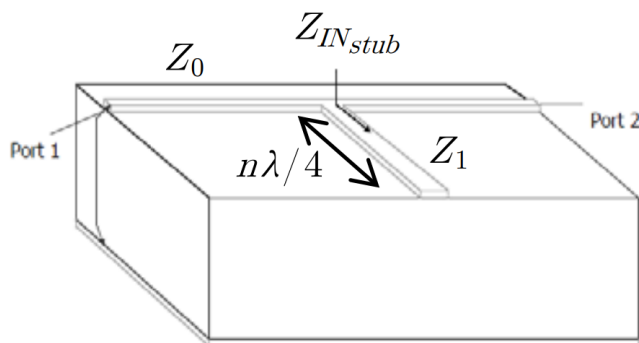
3 Irudia: Erastun erresonadore baten  $S_{11}$  eta  $S_{21}$  parametroen moduluen espektroen adibidea.

### 3.2.2 T erresonadorea

T erresonadorearen funtzionamendua erastun erresonadorearena baino xumeagoa da. Izatez, 4 irudian ikus daitekeenez, bi atakako transmisio lerro batek zirkuitu irekian bukatutako *stub* bat du konektatuta paraleloki [12]. *Stub* honek erresonatu egiten du  $\lambda/4$ -ren multiplo osoekin,  $\lambda$  transmisio lerroetatik hedatzen den uhinaren uhin-luzera izanik. Egitura honetan, *stub*-aren sarrera inpedantzia 3.14 ekuazioak ematen du:

$$Z_{in}^{stub} = Z_1 \frac{Z_L + jZ_1 \tan \beta l}{Z_1 + jZ_L \tan \beta l} \quad (3.14)$$

non  $Z_1$  *stub*-aren inpedantzia karakteristikoa den,  $Z_L$  kargaren inpedantzia,  $l$  luzera-elektroa eta  $\beta = 2\pi/\lambda$ .



4 Irudia: T erresonadorearen diagrama.

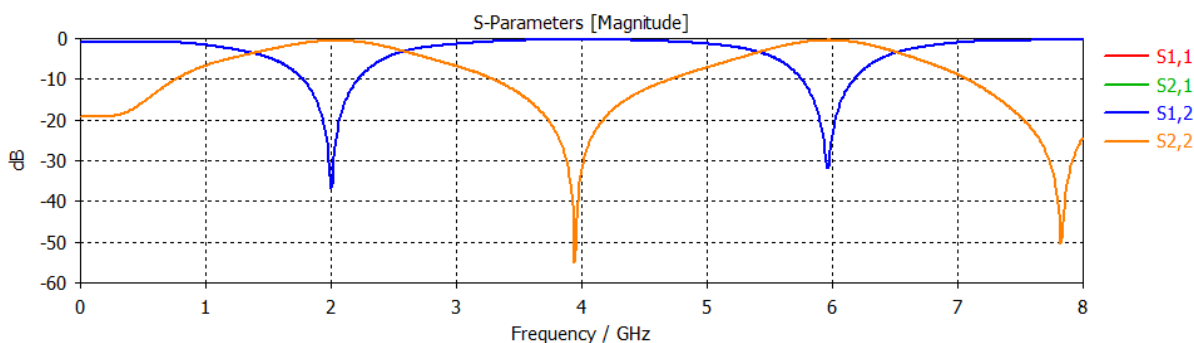
Bi kasu daude erresonantzia emateko,  $n$  bakoitia edo bikoitia denean. Bakoitia denean,  $l = (2n - 1)\frac{\lambda}{4}$  izango da; eta, ondorioz,  $Z_{in}^{stub} = \frac{Z_L^2}{Z_1}$ .  $Z_L \rightarrow \infty$  denez,  $Z_{in}^{stub} = 0$  lortzen da; hau da, zirkuitu laburra dago. Honek 1. atakatik sartzen den potentzia osoa *stub*-ean islatzen

dela suposatzen du; eta, eraginez, ez zaio potentziarik transmitituko 2. atakari. Orduan,  $|S_{11}| = 1$  eta  $|S_{21}| = 0$ . Bikoitia denean ordea,  $l = 2n\frac{\lambda}{4} = n\frac{\lambda}{2}$  da eta  $Z_{in}^{stub} = Z_L \rightarrow \infty$  izango denez, zirkuitu irekia dago. Ondorioz, potentzia osoa transmititu egingo da 1. atakatik 2.-era. Beraz,  $|S_{11}| = 0$  eta  $|S_{21}| = 1$ . Hortaz, *stub*-aren luzera 3.15 edo 3.16 ekuazioek emango dute erresonantzia baldintzaren arabera.

$$|S_{11}| = 1 \quad \rightarrow \quad l = \frac{nc}{2f\sqrt{\epsilon_e}} \quad ; \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.15)$$

$$|S_{21}| = 1 \quad \rightarrow \quad l = \frac{(2n-1)c}{4f\sqrt{\epsilon_e}} \quad ; \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.16)$$

Hau oso erraz identifika daiteke  $S_{11}$  eta  $S_{21}$  parametroen moduluaren espektroa behatzen bada. Bertan,  $\lambda/4$ -ren multiplo bakoitiei dagozkien minimoak  $S_{21}$ -ean gertatzen dira, eta multiplo bikoitiei dagozkienak  $S_{11}$ -ean, 5 irudian ikus daitekeen bezala.



5 Irudia: *Simulatutako T erresonadore baten  $S_{11}$  eta  $S_{21}$  parametroen moduluen espektroen adibidea [13].*

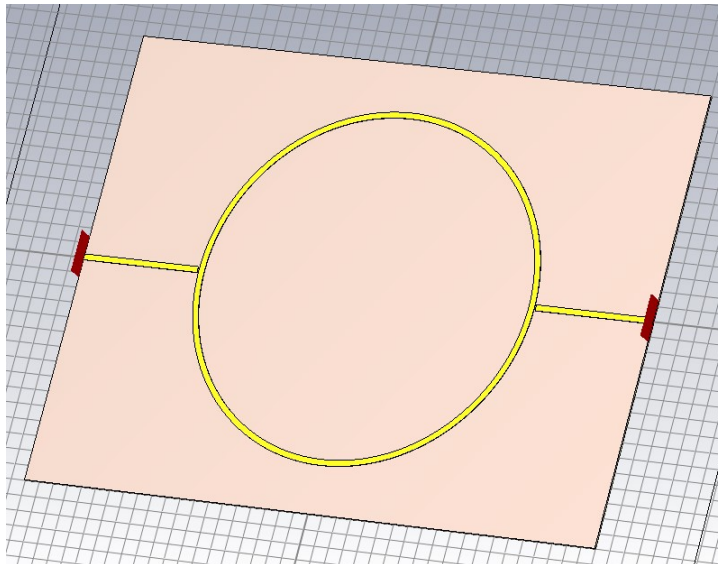
## 3.3 Eratzun erresonadore bidezko karakterizazioa

Eratzun erresonadorea oso baliagarria da material dielektrikoaren karakterizazioa burutzeko. S parametroetatik abiatuz, 3.13 eta Hammerstad & Jensen (3.7) ekuazioak erabiliz permitibitate erlatiboa kalkula daiteke zehaztasun handiz. Bestetik, diseinatutako eratzun erresonadorearekin lortutako  $\tan\delta$ -ren zehaztasuna baxua denez [13], balio hau ez da kalkulatu metodo hau erabiltzean.

### 3.3.1 Diseinua

Erresonadoreen diseinua burutzeko CST Studio Suite EM-rako 3D simulazio eta analisisirako programa eta MATLAB [14] zenbakizko konputazioko softwarea erabili dira. Lehenengo pausoa, materialen propietatek ezagututa, MATLAB-en diseinurako idatzitako kodearen bidez erresonadoreen dimentsioak kalkulatu dira. Hurrengo pausoa gure erresonadorea CST

programan eraikitzea da. Kontuan izan behar da ikasle lizentzia erabiltzen ari garela. Hori dela eta, 3D egitura sortzerako orduan 80000 edo 1000000 sare-gelaxka izan ditzake gehienez sare-motaren arabera. Hala ere, hau ez litzateke zertan arazoa izan beharko eginiko diseinuak burutzeko.



6 Irudia: Erastun erresonadore bat CST-n diseinatua RT/Duroid 5880 materialean 0.127mm-ko lodierarentzat.

Behin erresonadorea CST-n sortuta dagoela, 6 irudian ikus daitekeen bezela, simulazioarekin jarraitzen da. Horretarako CST-k maiztasun eremuan simulatzeko ematen duen aukera erabiliko da, honek metodo konputazional elektromagnetiko ezberdinak erabiltzen ditu. Simulazioan lortutako datuetatik S parametroak dute interesa. Izan ere, hauek erabiliko dira permitibitatea kalkulatzeko MATLAB-en bidez.

### 3.3.2 Eredu teorikoa

Karakterizaziorako erabiliko den metodoa baieztatuzko Javier Carnererok bere gradu amaierako lanean erabilitako metodoa jarraituko dugu [13]. Bertan material komertzialak, 1 taulan ikus daitezkeenak, karakterizatuko dira simulazio bidez.

Eroale moduan  $\sigma = 5.8 \cdot 10^7$  S/m eroankortasun eta  $t = 35\mu\text{m}$ -ko lodiera duen kobrea erabili da. Dielektriko bakoitzaren lodiera (h) ezaguna da aldez aurretik; izan ere, emandako espezifikazioak lodiera konkretu baterako izan ohi dira. Lodiera hauekin,  $Z_0 = 50\Omega$ -ko inpedantzia izan dezaten Hammerstad (3.3-3.6) ekuazioak erabiliz *microstrip* transmizio lerroen zabalera ( $W$ ) kalkulatu da. Erresonadore guztiak erresonantzia maiztasuna 3GHz-tan izan dezaten diseinatu dira.

Materiala	RT/Duroid 5880			Arlon AD600	Arlon AD1000
$\varepsilon_r^{teoriko}$	2.2 (1MHz); 2.20±0.02 (10GHz)			6.15 (1MHz, 200MHz)	10.2 (10GHz)
$\tan\delta$	0.0004 (1MHz); 0.0009 (10GHz)			0.003 (1MHz)	0.0023 (10GHz)
<b>h(mm)</b>	0.127	0.254	0.787	0.6	1.27
<b>W(mm)</b> (50Ω)	0.39463	0.78915	2.4451	0.88545	1.27
<b>r(mm)</b> (3GHz)	11.5929	11.5929	11.5929	7.57	6.085

1 Taula: *Material dielektriko komertzialen propietateak eta erresonadoreen dimentsioak.*

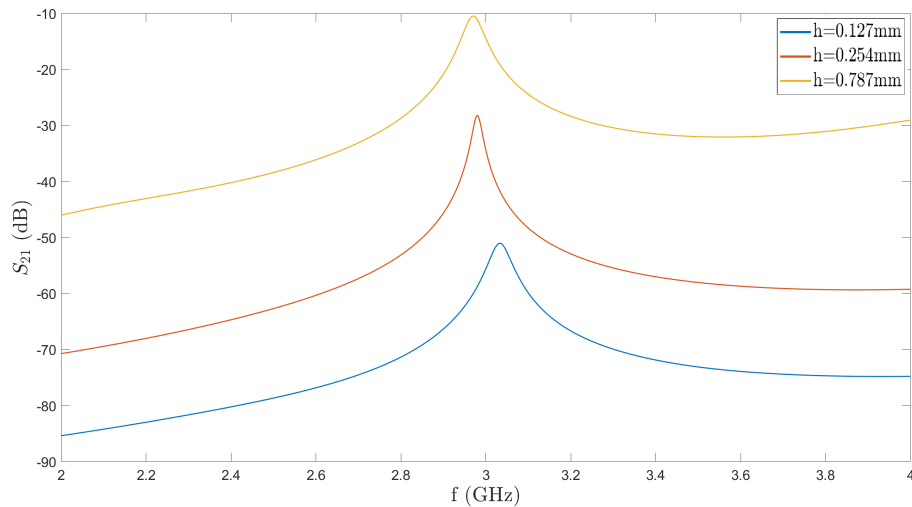
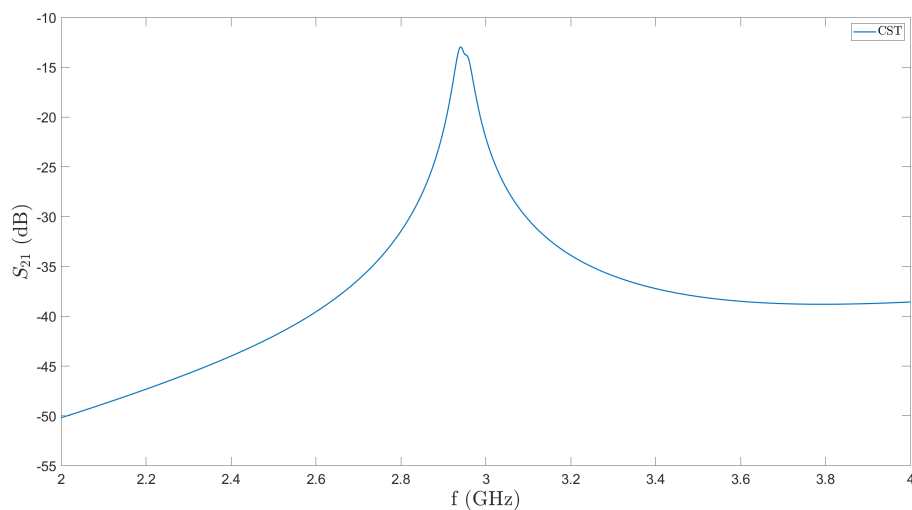
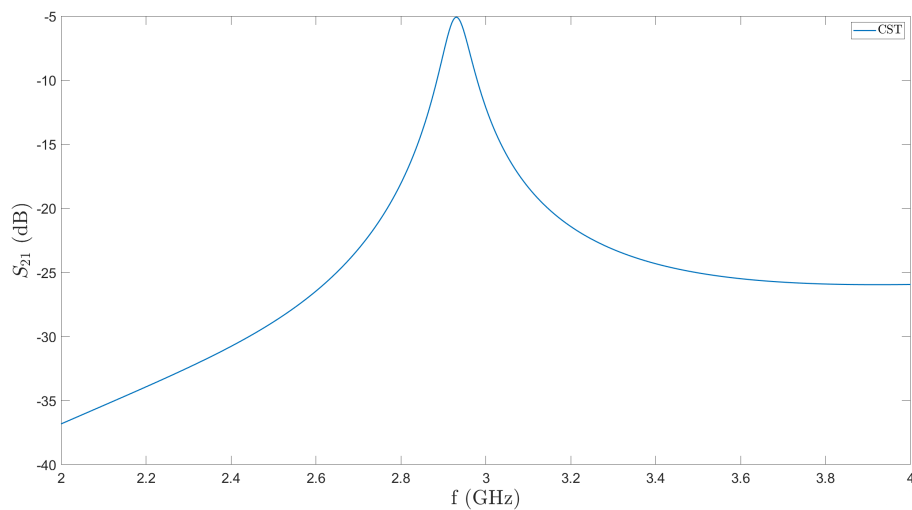
Guztira sei erresonadore diseinatu dira, bat lodiera eta material bakoitzeko. Erresonadore hauen dimentsioak 1 taulan ageri dira, r erastunaren erdiko erradioa izanik; hau da, 2 irudiaren arabera  $R_1 = r - \frac{W}{2}$  eta  $R_2 = r + \frac{W}{2}$  izango dira erastunaren erradioak. Behin erresonadoreak CST-n simulatuta izanda,  $S_{21}$  parametroak erabiliz permitibitatea kalkulatu da Hammerstad & Jensen ekuazioen bidez. Lorturiko  $S_{21}$  parametroak 7 irudietan ikus daitezke material bakoitzarentzat.

Irudiak aztertzean, begietsi daiteke erresonadore guztiak  $3.0 \pm 0.1GHz$  inguru dutela erresonantzia; beraz, erresonantziaren aldetik diseinua egokia dela esan daiteke. Beste aldetik, permitibitate erlatiboa aztertzeke, MATLAB-en idatzitako kodea erabili [15] da honen kalkulurako eta emaitzak 2. taulan bateratu dira. Lorturiko permitibitate erlatiboak teoriketatik hurbil daude, errore handiena %5.13-koa izanik Arlon AD1000-ren kasuan eta txikiena %1.58-koa RT/Duroid-aren kasuan  $h = 0.254mm$  lodierarako.

Material	RT/Duroid 5880			Arlon AD600	Arlon AD1000
$\varepsilon_r^{teoriko}$	2.2			6.15	10.2
<b>h(mm)</b>	0.127	0.254	0.787	0.6	1.27
$f_r(GHz)$	3.03	2.98	2.97	2.94	2.93
$\varepsilon_r$	2.1491	2.2348	2.2525	6.4263	10.7235
$\Delta\varepsilon_r$ (%)	2.31	1.58	2.39	4.49	5.13

2 Taula: *Material komertzialetan simulazio bidez lorturiko emaitzak.*

Lorturiko emaitzen erroreak onargarritzat hartu daitezke %10-ren azpitik daudenez gero, esan daiteke materialen karakterizaziorako erastun erresonadorearen metodoa ona dela alde teorikotik [16]. Behin hau finkatuta, hurrengo pausoa karakterizazio metodoa espermentalki baliagarria dela frogatzea izango da.

(a) *RT/Duroid 5800. Lodiera ezberdinak.*(b) *Arlon AD600*(c) *Arlon AD1000*

7 Irudia: *CST-ko erresonadoreen simulazioen  $S_{21}$  parametroak.*

### 3.3.3 Ereduekperimentalak

Ereduek teorikoa balioztatuta, eratzun erresonadore erreal bat diseinatuko da laborategiko materialentzat; hauek 3 taulan ditugu beraien propietateekin. Propietateak fabrikatzaileak emandako *datasheetetik* [17] atera dira. Taula berean kasu bakoitzerako kalkulaturako *microstrip* transmizio lerroen zabalera ikus daiteke. Eroale moduan xaflek dakarten  $35\mu\text{m}$ -ko lodierako kobrea erabili da. Erabilitako xaflek sandwich egitura jarraitzen dute: eroalea geruza bat behean eta goian eta dielektrikoa erdian. Laborategiko mugak direla eta, erresonadore bakarria egitea erabaki da Arlon 25N materialean 600MHz-ko erresonantzia maiztasunarentzat. Kalkuluen arabera erresonadore honen erradioa  $r = 48.6005\text{mm}$ -koa izan behar da.

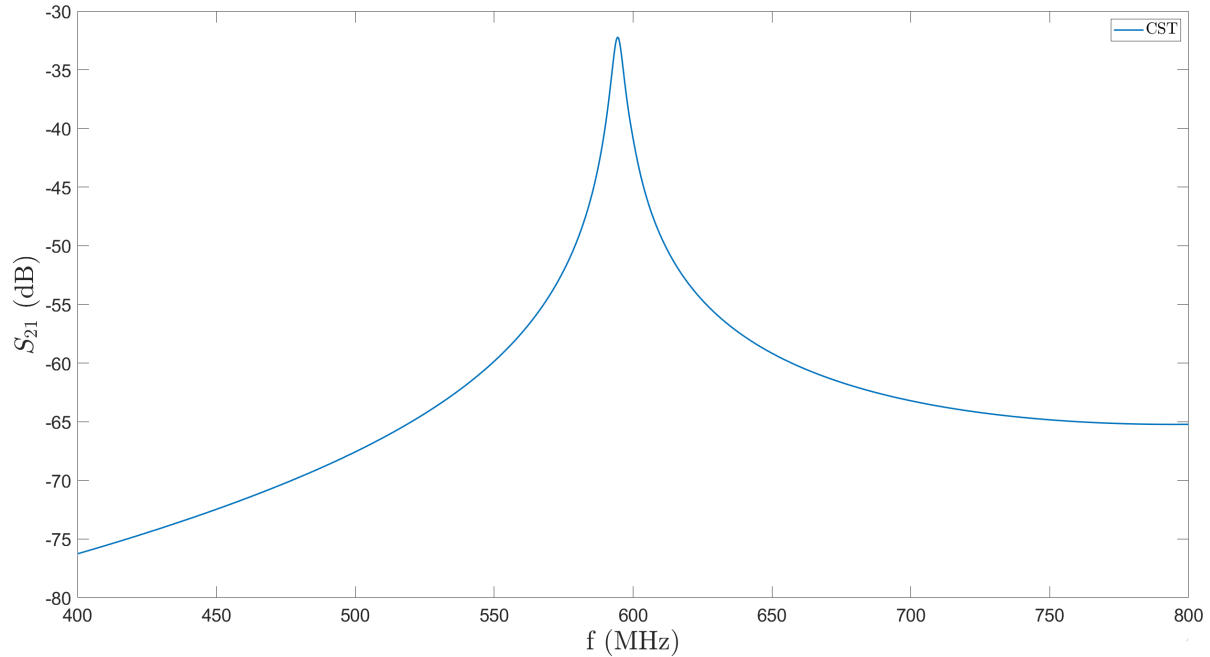
Materiala	Arlon 25N	FR4	
$\epsilon_r^{\text{teoriko}}$	3.38	4.7	
$\tan\delta$	0.0025	0.014	
<b>h(mm)</b>	0.762	0.8	1.6
<b>W(mm)</b> (50Ω)	1.7789	1.4659	2.9317

3 Taula: *Laborategiko material dielektrikoen propietateak eta microstrip transmizio lerroen zabalera.*

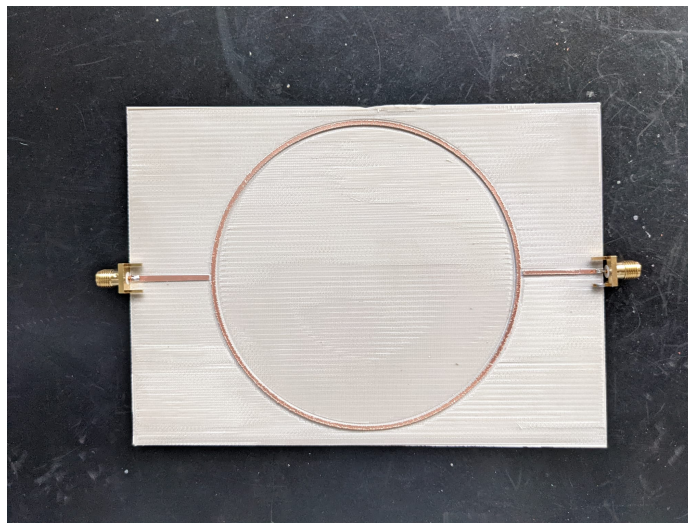
Lehenengo, erresonadorea CST-n diseinatu eta simulatuko da eginiko kalkuluak egokiak direla baieztatzeko. 8 irudian lortutako  $S_{21}$  parametroak ditugu; bertan, ikus daiteke erresonantzia 600MHz oso hurbil dagoela. Aldi berean, permitibitate erlatiboa kalkulatu bada, *datasheeteko* balioetik %2.3 aldentzen den balioa lortzen dela ikus daiteke 4. taulan. Ondorioz, eginiko diseinu teorikoa egokia dela onartzen da eta erresonadorea esperimentalki frogatzea igaro daiteke.

Erresonadorea eraikitzeke CircuitCAM programa erabili da; honek, CST-n diseinatutako eratzun erresonadorea eraikitzea ahalbidetzen du eta. Erabilitako makinak xaflaren kobrezko goiko alde garbitzen doa barauts ezberdinak erabiliz, kasu honetan, 9 irudiko egiturako xafla lortu arte. Aipatu beharra dago diseinua implementatzeko erabilitako makinak duen zehaztasuna ez dela hoberena, eta, adibidez, lortutako erradioa  $r \approx 49.595\text{mm}$ -koa izan da. Are gehiago, *microstrip* transmizio lerroaren zabalera neurtzen bada;  $1.256\text{mm}$ -ko zabalera du toki estuenean eta  $1.773\text{mm}$ -koa zabalenean. Zehaztasun falta honek eragina izango du emaitzan aurrerago ikusiko denez.

Erresonadorea eraikita dagoela neurketak egin dira VNA bat erabiliz. VNA  $50\Omega$  inpedantziarako kalibratu da erresonadorera konektatu baino lehen. Lortutako emaitza 10 irudian dugu, bertan ikus daiteke 640MHz inguru erresonantzia dagoela, zarata dezente izan arren. Lorturiko erresonantzia teorikoarekin konparatuz urrundu egin dela ikusten da. Bestetik, permitibitate erlatiboa kalkulatu, 4. taulan ikus daitekeenez, *datasheetean* [18] ematen diguten datutik %13 urruntzen da.



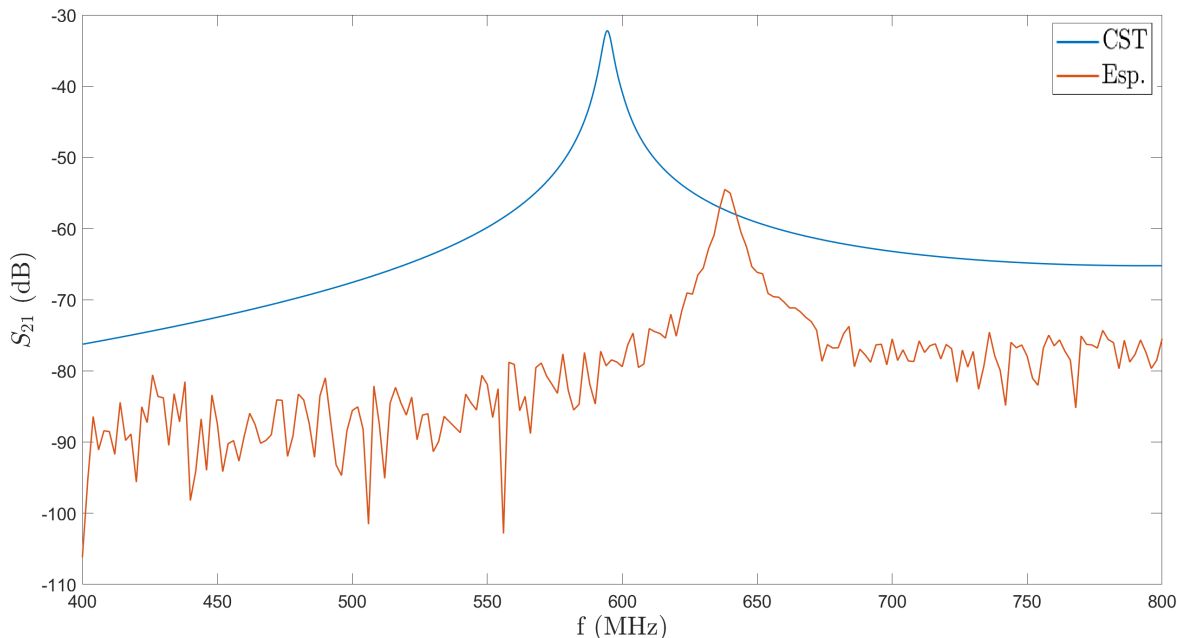
8 Irudia:  $S_{21}$  parametroak Arlon 25N materialean simulatutako eratzun erresonadorearentzat.



9 Irudia: EHU-ko laborategian eraikitako eratzun erresonadorea Arlon 25N materialean 600MHz-rako.

Materiala	Arlon 25N (CST)	Arlon 25N (Esp.)
$\epsilon_r^{teoriko}$	3.38	
$f_r$ (MHz)	594	638
$\epsilon_r$	3.4577	2.9376
$\Delta\epsilon_r$ (%)	2.3	13.09

4 Taula: Arlon 25N materialean T erresonadorearen bidez lorturiko emaitzak.



10 Irudia:  $S_{21}$  parametroak Arlon 25N materialean diseinatutako eraztun erresonadorearentzat.

Kasu esperimentala ondo aztertzen bada, eta kontuan izaten bada erresonadorea eraikitzeo instrumentazioaren zehaztasun falta lorturiko emaitza ulergarriagoa da. Orduan, ondoriozta daiteke, errorearen handiagotze hau ez dela karakterizazio metodoarengaitik, baizik eta erresonadorea eraikitzeo erabilitako prozesuaren zehaztasun falta dela eta.

### 3.4 T bikoitzeko erresonadore bidezko karakterizazioa

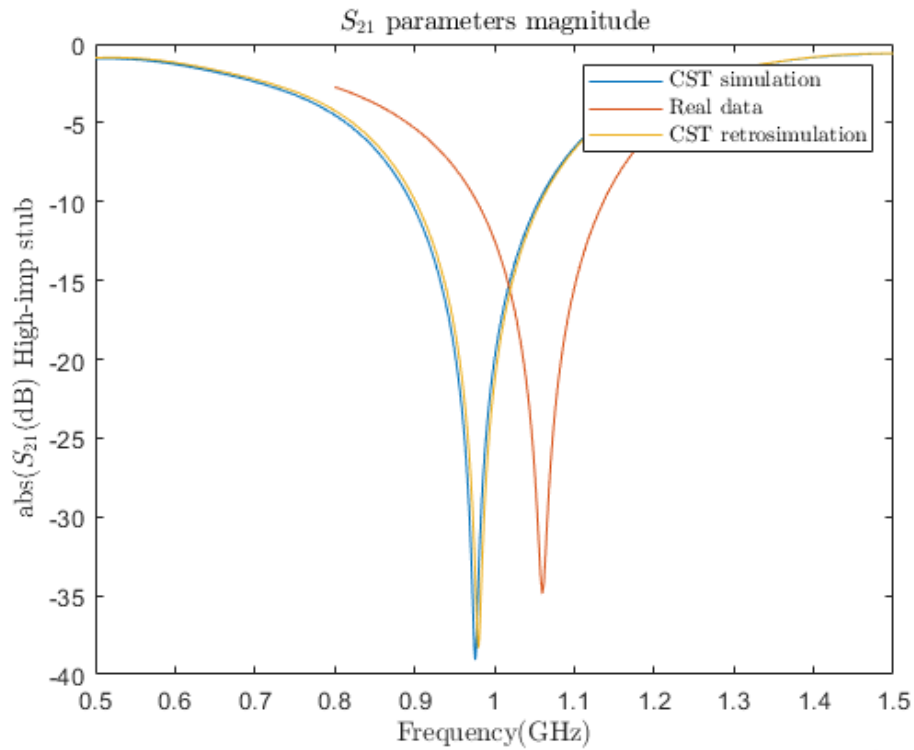
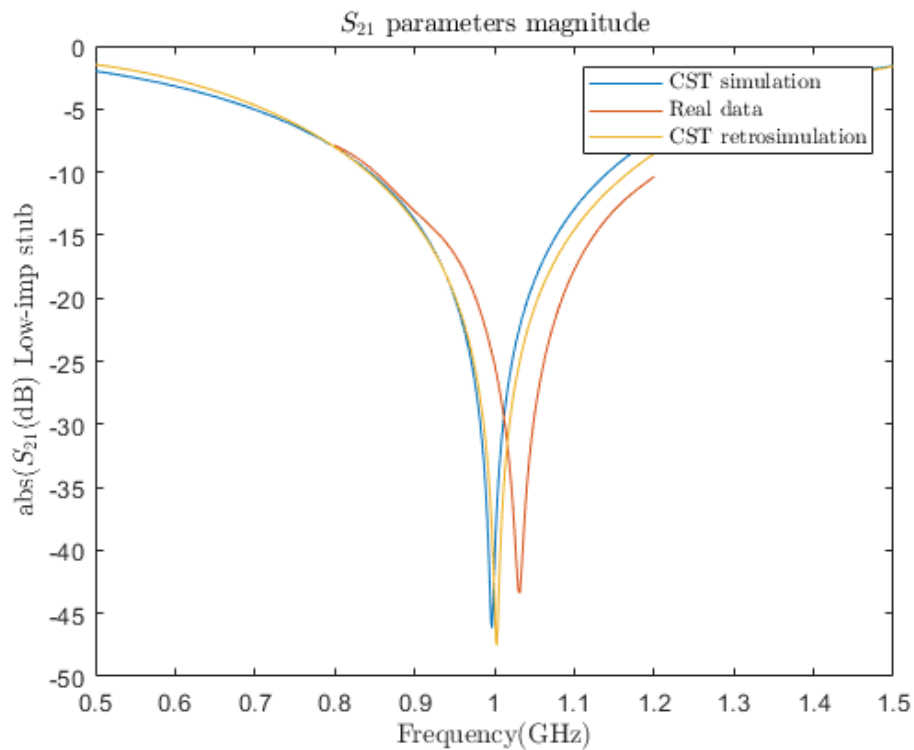
Materialen karakterizaziorako beste metodo bat T bikoitzeko erresonadorea da; honek bi T erresonadore independentek osatzen dute 11 irudian ikus daitekenez. Erresonadore hauek ez dute zertan gainazal berdinean egon independenteak direnez gero. Dimentsio ezberdinak dituztenez permitibitatea eta galera-tangentea kalkulatzeko ahalbidetzen dute. Hala ere, eraztun erresonadorearen emaitzekin konparatzeko permitibitate erlatiboa kalkulatu da soilik.

Erresonadorearen dimentsioak kalkulatzeko eraztun erresonadorearen metodo berdina jarraitzen da  $w$ -aren kalkulurako, hau da, zirkuituak  $50\Omega$ -ko inpedantzia izan dezan. Beste aldetik, inpedantzia altuko eta baxuko stubentzat  $50\sqrt{2}\Omega$  eta  $50/\sqrt{2}\Omega$  inpedantziak hartzen dira batik bat; izan ere, hauek dira RF zirkuituetan erabiltzen diren ohiko balioak [13]. Stuben luzeera kalkulatzeko Hammerstad & Jensen eta 3.16 ekuazioak erabiltzen dira,  $f = f_r$  ezarritako erresonantzia maiztasuna izanik eta  $l = L$ .

Eraztun erresonadorearen diseinu eta fabrikazioan zentratu denez, Arlon 25N materialean Miren Hayet tecnaliakolankideak 1GHz-ko erresonantzia-maiztasunerako diseinatu eta fabrikatutako T bikoitzeko erresonadorearekin lortutako datuak erabiliko ditugu. Erresonadore





(a) *Inpedantzia altuko stuba.*(b) *Inpedantzia baxuko stuba.*

12 Irudia:  $S_{21}$  parametroak Arlon 25N materialean 1GHz-tan diseinatutako T bikoitzeko erresonadorearentzat.

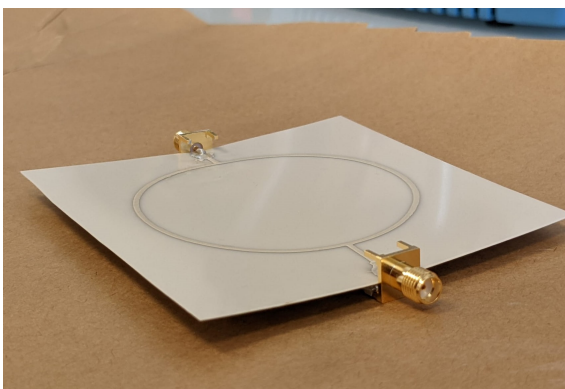
Materiala	Arlon 25N (CST)		Arlon 25N (Esp.)	
$\varepsilon_r^{teoriko}$	3.38			
Stubaren inpedantzia	Altua	Baxua	Altua	Baxua
$f_r$ (GHz)	0.976	0.997	1.060	1.032
$\varepsilon_r$	3.5212	3.3636	2.9011	3.1158
$\Delta\varepsilon_r$ (%)	4.18	0.48	14.17	7.82

6 Taula: Arlon 25N materialean diseinatutako  $T$  bikoitzeko erresonadorearen emaitzak.

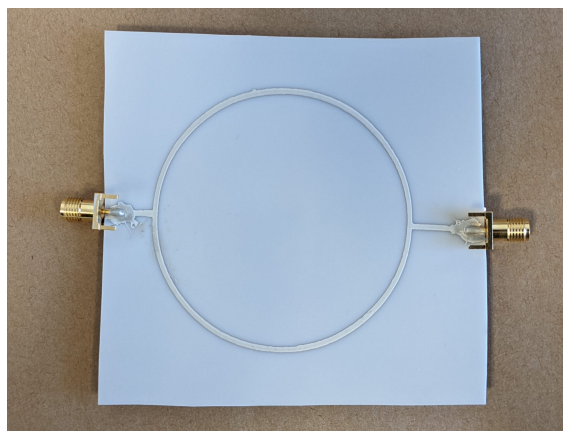
### 3.5 Serigrafia bidez eraikitako erresonadorea

Aurreko erresonadoreekin ikusi denez, errore handiegia lortzen da karakterizazio metodoa ontzat hartzeko. Horregatik, erresonadoreak eraikitzeko beste metodo bat erabili da errore handitzea fabrikazio teknikari dagokiola baieztatzeko. Erabilitako teknika serigrafia bidezko inprimazioa izan da. Teknika honetan zilarrezko tinta erabiliz PET material dielektrikoaren gainean erresonadorea inprimatu egiten da binilozko pantaila bat erabiliz. 13 irudian ikus daitekeen eraztun erresonadorea lortzen da. Ondoren, PET gainazalaren beste aldetik metalizazioa egiten da serigrafiaz bidez *microstrip* teknologia ahalbidetzeko. PET materialaren propietateak eta *microstrip* erresonadorearen dimentsioak 7 taulan daude.

14 grafikoko emaitzak aztertzen badira (8. taula), alde batetik, erresonantzia diseinatutako  $1GHz$ -tan eman dela esan daiteke fabrikatutako erresonadorea  $1.02GHz$ -tan erresonatu duenez gero. Bestetik, permitibitate erlatiboaren kasuan, lorturiko balioa ontzat har daiteke; izan ere, lorturiko errore handiena, eredu experimentalaren kasuan, %7 baino baxuagokoa da. Ikus daitekeenez, dB difentzia handia dago bi grafikoen artean, hau konektoreekin neurketak egiteko egon diren arazoengaitik gertatu dela uste da.



(a) Albo batetik ikusita.



(b) Goitik ikusita.

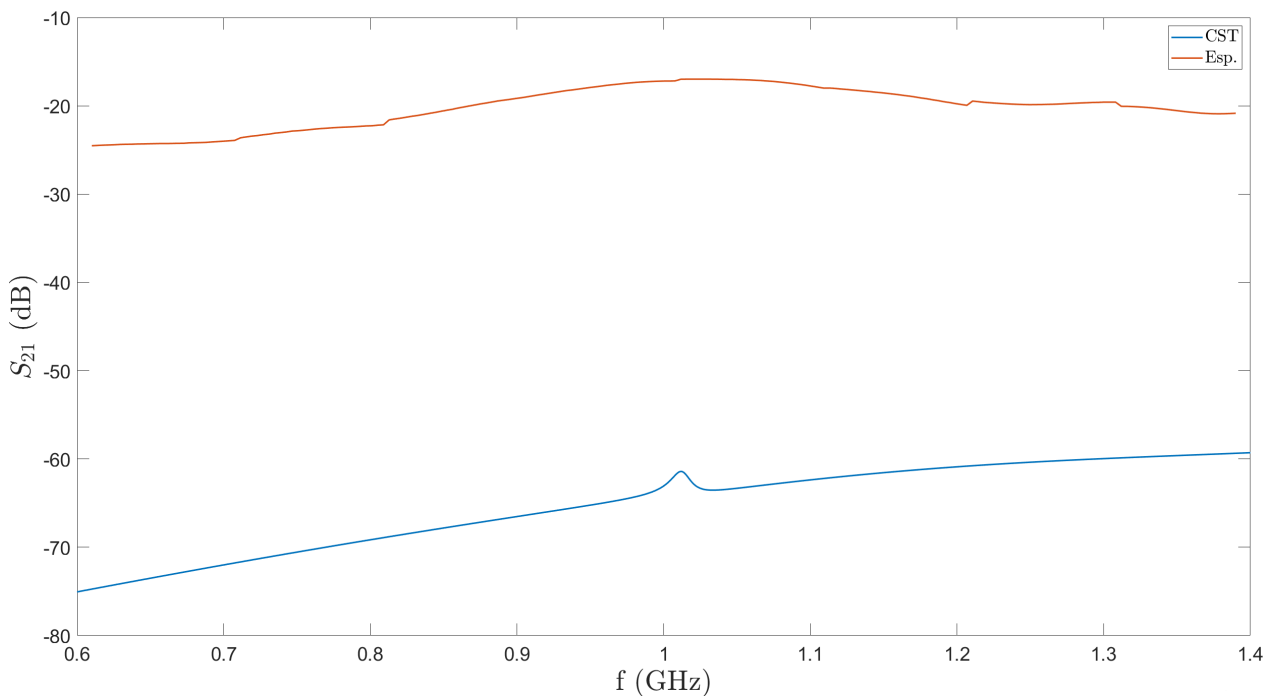
13 Irudia: PET materialean  $1GHz$ -tan erresonatzeko fabrikatutako eraztun erresonadorea.

Konturatu beharra dago, oraingoan ez dela simulazio eta eredu experimentalaren arteko errore

Materiala	PET
$\epsilon_r^{teoriko}$	2.9
$\tan\delta$	0.005
h(mm)	0.35
w(mm) (50 $\Omega$ )	0.90789
r(mm) (1GHz)	31.4088

7 Taula: PET materialaren propietateak eta eraztun erresonadorearen dimentsioak.

handitzea gertatu. Hau inpresio teknikak duten zehastasunagaitik gertatzen da; izan ere, serigrafia bidez eredu teorikoa zehaztasun handiagoz fabrikatzea lortzen baida. Ondorioz, emaitza esperimentalak ez da hainbeste aldentzen teorikotik eta, materialaren karakterizazioa egiterakoan %10 baino baxuagoko errorea lortzen da.

14 Irudia:  $S_{21}$  parametroak PET materialean 1GHz-tan diseinatutako eraztun erresonadorearentzat.

Materiala	PET	
	Simulazioa	Esperimentalak
$f_r(GHz)$	1.012	1.02
$\epsilon_r$	2.75	2.70
$\Delta\epsilon_r(\%)$	5.17	6.90

8 Taula: PET materialean diseinatutako eraztun erresonadorearen emaitzak.

## 4 Inpresio bidezko RLC zirkuitua

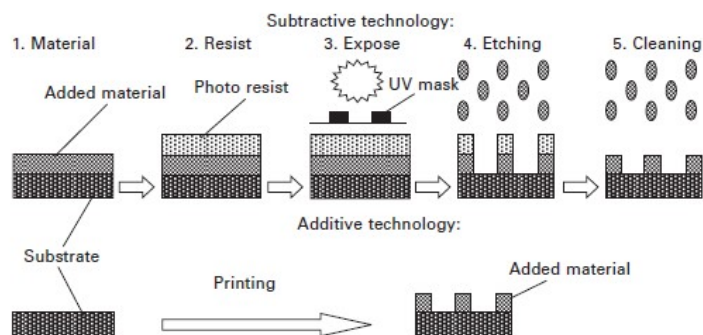
Behin material dielektrikoen karakterizazio burututa inpresio bidez RLC zirkuitu erresonante bat diseinatu eta fabrikatu da PET materialean. Zirkuitua fabrikatzeko inpresio teknika ezberdinak aztertuko dira, halaber, hauen bidez lorturiko RLC elementuen analisia da.

Kontuan izan behar da, inprimazio bidez 2D zirkuitu bat lortzen dela tinta ezberdinak erabiliz. Honek elementu elektrikoak geometria ezberdina izatera behartzen du 3D zirkuituetako elementuekin konparatuz. Geometria berriak eta hauek burutzeko existitzen diren metodo ezberdinak aztertu dira.

### 4.1 Elektronika inprimatua

Inprimaketa tradizionalerako eta material berriak inprimatzeko, metodo eta mekanismo berdinak erabiltzen dira. Fabrikazio-metodoak bi kategoriatan banatu daitezke: inpresio analogikoa eta digitala. Inprimaketa analogikoa eskala handiko fabrikaziora egokitutako metodoak ditu: flexografia, grabatua eta serigrafia, batik bat. Inprimaketa digitala ukipen gabeko metodoa da, azalera neurritzko zimurtasuna eta tanta bakoitzaren kokapen zehatza ahalbidetzen dituena [19].

Inprimatze-teknika bakoitzak bere abantailak ditu, baina guztien faktore komuna prozesuak gehigarriak direla da. Honek hurrengoa esan nahi du: elektrikoki funtzionalak diren materialak substratuari gehitzen zaizkiola. Produktu elektronikoen ohiko fabrikazioak, hala nola fotolitografiak, substratutik urrun grabatutako materialak dituen prozesu bat erabiltzen du. Honek prozesuari etapak gehitzea dakar, 15 irudian ikus daitekeenez; baita behar den material kopurua handiagoa izatea ere [20]. Batuketateknologiari esker, gailu elektronikoak ekoizteko sistema teknologiko osoa alda daiteke, diseinu- eta fabrikazio-faseak, materialen aniztasuna eta gailuen egitura eta arkitektura barne.



15 Irudia: Teknologia gehigarri eta kengarrien prozesuaren etapak [19].

## 4.1.1 Inprimazio teknikak

Hainbat teknika ezberdin egon arren, serigrafia eta inkjet tekniketarik jarriko da arreta hauek izan baitira erabili direnak.

### 4.1.1.1 Serigrafia

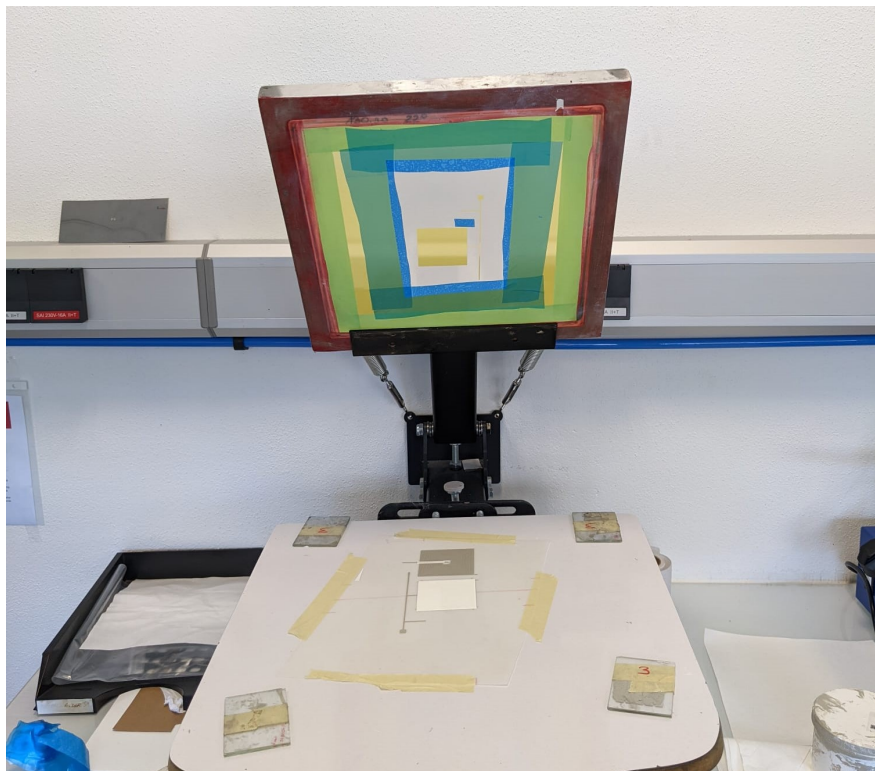
Serigrafia pantaila bat erabiliz tinta substratu batera transferitzen duen inprimazio teknika da. Erabilitako pantaila marko batek tenkatuta duen sare batek osatzen du 16 irudian ikus daitekeen bezala. Pantaila ezberdinak daude igarotzen uzten duten tinta kopuruaren arabera. Kopurua sarearen "tarteek" finkatuko dute.



16 Irudia: *Serigrafian erabiltzen diren pantaila mota bat.*

Inprimazio prozesua pantailako eremuak estaltzean datza. Material bat erabiliz, biniloa normalean, inprimatu nahi den irudiaren negatiboa eratzen da, hau da, biniloan irudia da hutsik dagoena (17 irudia). Horrela, biniloa pantailan ipintzerakoan, honek tinta pantailatik igaroarazi egiten denean ostopatu egingo du eta substratuan irudia inprimatuta geldituko da soilik; 47(c) irudian ikus daitekeen moduan.

Serigrafia prozesua eskuz edo automatikoki egin daiteke makinen bitartez. Inpresio metodoa errepikakorra denez, behin lehen ereduak lortuta, eskuz kasu gehienetan, inpresioa automatizatu egiten da nahi beste aldiz errepikatu ahal izateko.

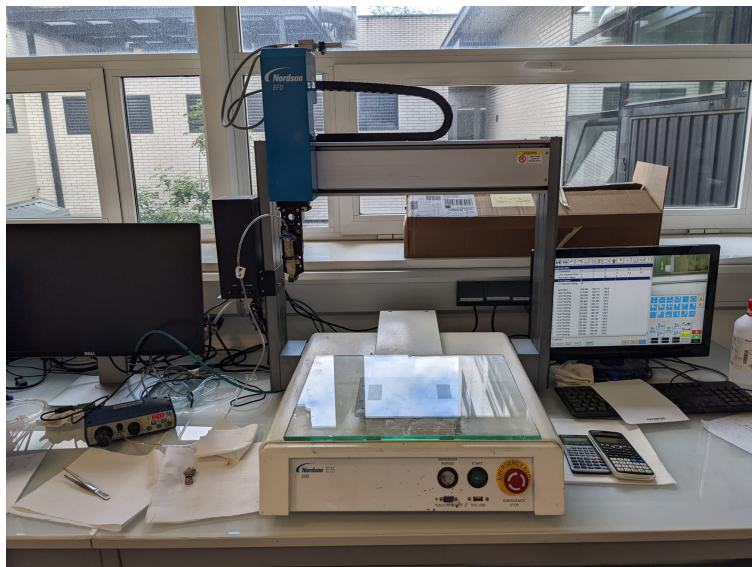


17 Irudia: *Tecnaliako serigrafia egiteko pantaila eta substratua prestaturik.*

#### 4.1.1.2 Inkjet printing

Inkjet fabrikazio-prozesuaren oinarriak sinpleak dira, tinta eroaleak, erdieroaleak edo dielektrikoak substratu batean inprimatu egiten dira. Tinta-mota bat aldi berean inprimatzen da, geruza-forma bat jarraituz, eta haren gainean beste tinta-mota bateko geruza bat inprimatzen da. Azkenean, geruza horiek egitura elektriko bat sortzen dute. Egitura sinpleena interkonexioa izan daiteke, baina osagai pasiboak edo aktiboak ere izan daitezke ikusiko denez.

Tecnalian Nordson E5 inkjet makina erabili da. Bertan egindako diseinuaren .dxf artxiboa inportatu behar da makinak interpretatu ahal dezan. Behin diseinua dugula, makinan hiru gauza konfiguratu daitezke: punta, presioa eta abiadura. Puntak inprimatuko den linearen zabalera definituko du, presioak isuritako tanten dentsitatea eta abiadura diseinuaren definitzio maila. Diseinu berdina konfigurazio ezberdinekin inprimatzen bada emaitza ezberdinak lortuko dira.



18 Irudia: *Tecnaliako Nordson E5 inkjet makina.*

### 4.1.2 Materialak

Elektronika inprimatuaren oinarria tintak inprimatzen diren substratua da. Esan bezala, teknologiaren abantailak bat substratua, funtsean, edozein gauza izan daitekeela da, paperetik gorputz azalera. Hala ere, praktikan, espero den kalitatea ez da lortzen gainazal guztietan, batez ere maiztasun altuetan lan egiten denean; eta, horregaitik erabiltzen dira plastiko mota asko. Substratu erabilienak poliimida (Pi), polietileno tereftalatoa (PET) edo polietileno naftalatoa (PEN) dira. Substratua material zurruna izan daiteke, silizioa edo beira, esaterako, baina normalean teknologiaren helburuetako bat mekanikoki malguak diren egiturak sortzea da; edozein modutan, malgutasuna nahi ez den aplikazioetan erabili daiteke.

Hala ere, elektronika inprimatuko elementu garrantzitsuenak tintak dira, hauen propietate fisikoak direla eta. Erronka egitura funtzionalak sortzeko tinten konbinazio optimoa aurkitzean dago, tinten inprimagarritasuna kontuan hartu behar baita. Tintek hainbat material izaten dituzte, eta, honek izango duen funtzioaren arabera, tintaren zati "adierazgarriena" polimero organiko eroale edo erresistentea edo tinta eroale nanometaliko ez-organikoa izan daiteke. Nanopartikuletako metala zilarra izan ohi da, baina urrezko edo kobrezko nanopartikulak ere erabil daitezke. Kontuan izan behar da azken hauekin lan egitea konplexuagoa dela delikatuagoak diren heinean.

### 4.1.3 Abantaila eta desabantailak

Zenbait arrazoiengatik elektronika inprimatua interesa irabazten ari da. Lehenik eta behin, substratu mota askotan aplika daiteke inprimatze-prozesua, eta hiru dimentsiotan inprima daiteke. Hau dela eta, gailu elektronikoak ekoizteko sistema osoa aldatuko dute, diseinu- eta fabrikazio-faseak, materialen hautaketa, egitura eta gailuen arkitektura barne. Bigarrenik, elektronika inprimatuak ekonomia hobea eskaintzen die elektronika fabrikatzaileei. Izan ere,



inprimazioan ez bezala, elektronikak tradizionala masako produkzioaren eskalan bakarrik da merkea. Bereziki, inkjet inpresioak neurri egindako bolumen txikiko produktuen ekoizpen malgu eta merkea eskain dezake. Hirugarren eta azkenik, inprimaketak lan egiteko modu berriak eskaintzen ditu. Inkjet teknologiak norberekoko fabrikazioa ahalbidetzen du, eskala txikiko mikrofabrikei aplikatu ahal zaiena, kostu finko txikiekin.

Elektronika inprimatuaren desabantaila nagusienetakoa teknika hauekin sortu daitezkeen aplikazioen errendimendu elektrikoa ez dagoela silizioan oinarritutako elektronikaren maila berean [21]. Baina kontuan izan behar da teknologia garatu ahala, errendimendua hobetu egingo dela. Errendimenduz gain, egituren fidagarritasuna ez da beti handiena izaten, eta, horrek, aplikazioen iraupena laburra izatea izan dezake ondorio bezala. Hala ere, aplikazio batzuetarako, ez da bizitza erabilgarri luzerik behar; izan ere, elektronikak inprimatua bizi erabilera laburreko produktu askotan erabiliko da; baina beste aplikazio batzuetan desabantaila izan daiteke. Horregatik, bizi iraupena bermatzea etorkizunerako helburu bat izan behar da.

## 4.2 RLC zirkuitua

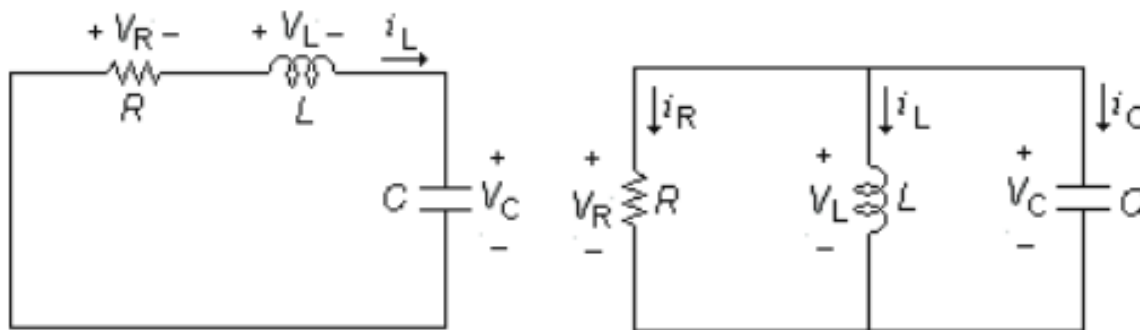
Behin elektronikak inprimatuan oinarritutako teknologia ezaguturik, honetaz baliatuz RLC zirkuitu baten diseinua eta fabrikazioa burutu egin da. Hasierako asmoa RF-rako zirkuitu bat egitea zen; baina Tecnanian analisia burutzeko *AgilentE4980A 20Hz-2MHz* LCR doitasun neurgailua izan da eskuragarri. Beraz, maiztasun eremu horretan lan egiteko zirkuitu bat egitea erabaki da. Hala ere, RLC-aren analisia egiterakoan, kontuan izan da RF-n gertatu daitezkeen ez idealtasunak eta fenomenoak.

RLC zirkuitua bat erresistentzia batez, haril batez eta kapazitate batez osatutako zirkuitu lineal bat da. Zirkuituak osziladore harmoniko bat sortzen du korronterako, eta LC zirkuitu baten antzera erresonatzen du. Erresistentziaren sarrerak oszilazioen gainbehera handitu egiten du. Bi RLC zirkuitu mota daude hiru osagaien arteko konexioaren arabera: seriean edo paraleloan (19 irudia). Zirkuituaren portaera bigarren mailako ekuazio diferentzial baten bidez deskriba daiteke, 4.1; non  $I(t)$  zirkuitu osoaren intentsitatea den eta RC edo RL zirkuituek lehengo ordeneko zirkuitu gisa jokatzeko duten. Zirkuitua seriean konektatuta dagoenean parametroak  $\alpha = \frac{R}{2L}$  eta  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  izango dira, eta paraleloan  $\alpha = \frac{1}{2RC}$  soilik aldatzen da.

$$\frac{d^2}{dt^2}I(t) + 2\alpha \frac{d}{dt}I(t) + \omega_0^2 I(t) = 0 \quad (4.1)$$

RLC zirkuituek aplikazio asko dituzte osziladore moduan, baina aplikaziorik ohikoena iragazki bezala erabiltzea da. Ezaugarri garrantzitsuenetakoa maiztasun jakin batera erresonantzeko ahalmena,  $f_0$  erresonantzia-maiztasunean. Nahiz eta erresonantzia fenomeno aurreko atalean azaldu, RLC zirkuituen kasuan energia bi modutan metatzen delako gertatzen da erresonantzia: alde batetik, eremu elektriko batean kondentsadorea kargatu ahala, eta, bestetik, eremu magnetiko batean, korrontea induktorean zehar dabilen heinean. Energia hori batetik bestera transferi daiteke zirkuituan barrena, eta hori oszilakorra izan daiteke.

Erresonantzia-maiztasuna zirkuituak inpedantzia minimoa duen maiztasunari deritzo, zirkuitua seriean konektatuta dagoenean. Era berean, inpedantzia guztiz erreala, hau da, guztiz



(a) Elementuak serian konektatuta.

(b) Elementuak paraleloan konektatuta.

19 Irudia: RLC zirkuituaren diagramak serian eta paraleloan.

erresistiboa, den maiztasuna da. Izan ere, induktorearen eta kondentsadorearen inpedantziak erresonantzia-maiztasunean berdinak dira, baina kontrako zeinukoak; eta, ondorioz, baliogabetu egiten dira beraien artean. Zirkuitu paraleloetan ordea, zirkuituek inpedantzia maximo bat izango dute erresonantzian. Erresonantzia maiztasuna edozein RLC zirkuiturentzat 4.2 ekuazioak ematen du, LC zirkuituentzako berbera dena. Izan ere, zirkuitu hauetan erresonantzia-maiztasun berdina da. Erresistentziak maiztasun horretan lortzen den balioa definituko du. Beste aldetik, erresistentziaren balioak oszilazioen indargetze-faktorean izango du eragina (4.3).

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{non} \quad \omega_0 = 2\pi f_0 \quad (4.2)$$

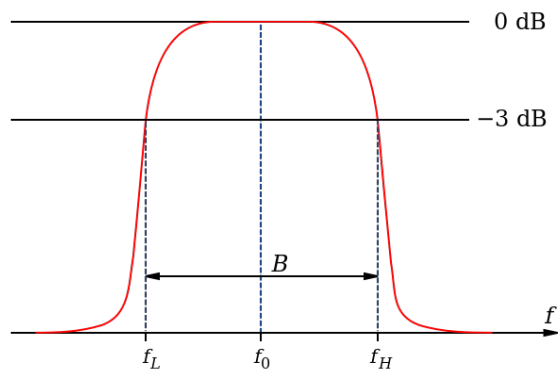
$$\zeta = \frac{\alpha}{\omega_0} \quad (4.3)$$

RLC zirkuituetan garrantzitsuak diren beste bi propietate, beraien artean erlazionatuta daudenak, banda-zabalera ( $BW$ ) eta kalitate faktorea ( $Q$ ) dira. Erresonantzia efektua iragazteko erabil daiteke; erresonantziaren inguruko inpedantzia-aldaketa azkarra erresonantzia-maiztasunetik hurbil dauden seinaleak pasatzeko edo blokeatzeko erabil daiteke. Iragazkien diseinuko funtsezko parametro bat banda-zabalera da. Banda-zabalera ebaki-maiztasunen artean neurtzen da; maiztasun horiek zirkuitutik pasatutako potentzia maximoa erdira jaisten denean (hau da, -3dB) edo inpedantzia maximoa %70.7 jaistean ematen dira. Banda-zabalera 20 irudian ikus daiteke.

$$BW = f_H - f_L \quad (4.4)$$

$Q$  faktorea erresonadoreak karakterizatzeko erabiltzen den neurri orokorra da. Kalitate faktorea banda-zabalerarekin lotuta dago; kalitate txikiko zirkuituak banda zabalekoak dira eta kalitate handiko zirkuituak banda estukoak. Izan ere,  $Q$  banda-zabalera frakzionalaren alderantzizkoa da (4.5). Zirkuitu erresonante batentzat 4.6 eta 4.7 ekuazioak erabil daitezke  $Q$  kalkulatzeko, serie eta paraleloan konektatutako zirkuituentzat batik bat.

$$Q = \frac{f_0}{BW} \quad (4.5)$$



20 Irudia: Banda-paseko iragazki baten magnitudearekiko erantzuna -3dB-ko banda zabalera irudikatuz.

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (4.6)$$

$$Q = R \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (4.7)$$

## 4.3 Elementuen analisia

Elektronika inprimatua erabiliz RLC zirkuitu bat fabrikatzeko lehenik elementuen analisia egin behar da. Kontuan izan behar da, nahiz eta analisia ezin izan den RF-n burutu ikuspegi horrekin egin dela azterketa. Mikrouhin-zirkuituetan erabilitako elementuak osagai pasiboa dira, eta hauen tamainak, edozein dimentsiotan, funtzionamendu-uhinaren luzera baino askoz txikiagoa da[22].

Atal honetan kondentsadore ( $C$ ), haril ( $L$ ) eta erresistentzien ( $R$ ) deskribapen laburra, oinarrizko funtzio eta analisiak burutuko dira. Denbora mugapenak direla medio, gehienbat kondentsadoreen azterketa eta analisia izan da sakonki egin dena. Harilen kasuan, egindako azterketa ez da sakonegia izan, baina Miren Hayet doktoregaiaren laguntzaz analisi esperimentalak burutzea lortu da. Erresistentziak ez direnez elementu erreaktiboak ez da azterketa ezta analisi sakonik egin behar izan kasu honetarako; nahiz eta beste arlo batzuetan posible izango litzatekeen, adibidez, erabilitako tinta motetan.

### 4.3.1 Kondentsadoreak

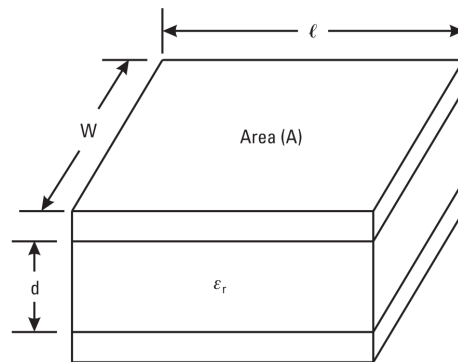
Kondentsadorea energia metatzen duen elementu elektronikoa da. Kapazitatea eremu elektriko batean bi elektrodoren artean energia metatzeko ahalmena bezala definitzen da, plaken artean tentsio-diferentzia dagoenean. 4.8 ekuazio bidez kalkula daiteke, non  $Q$  elektrodo bakoitzeko karga totala coulombetan eta  $V$  bi eroaleen arteko potentziala.

$$C = \frac{Q}{V} \quad (4.8)$$

Oinarrizko kondentsadore bat aztertzen bada, 21 irudia, ikus daiteke A azalerako bi plaka paralelok, elektrodo deiturikoak, osatzen dutela eta beraien tartean isolatzaile bat edo  $d$  lodierako eta  $\varepsilon_r$  permitibate erlatiboko dielektriko bat dutela. Gauss-en legeak plaka bakoitzeko karga totala kalkulatzeko ahalbidetzen du 4.9 ekuazioaren bidez, non  $E_x = V/d$  aplikaturiko tentsioagaitik sortutako eremu elektrikoa den. 4.8 eta 4.9 ekuazioak erlazionatuz, 4.10 lortzen da.

$$Q = \oint_s \varepsilon E_x \cdot ds = \varepsilon E_x A \quad \text{non} \quad \varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (4.9)$$

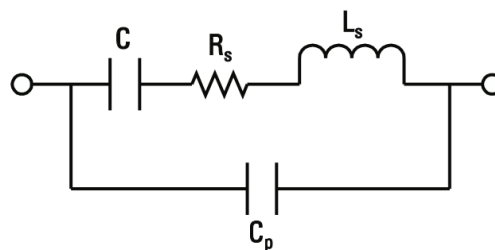
$$C = \varepsilon \frac{A}{d} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} \quad (4.10)$$



21 Irudia: Plaka paraleloko kondentsadorea.

Txip motako kondentsadoreen kasuan, kapazitantziaren balio izendatua  $1\text{MHz}$ -tan neurtzen da, eta RF-n ohiko aplikazioetan erabiltzen diren maiztasunak askoz handiagoak dira. Kondentsadoreak ez idealtasunak direla eta, seriean haril ( $L_s$ ) eta erresistentzia ( $R_s$ ) parasitoak egongo dira eta paraleloki kondentsadore bat ( $C_p$ ) 22 irudian ikus daitekeenez. Ondorioz, inpedantzia 4.11 ekuazioak ematen du.

$$Z_c = \frac{1}{j\omega C_p + (R_s + j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C})^{-1}} \quad (4.11)$$



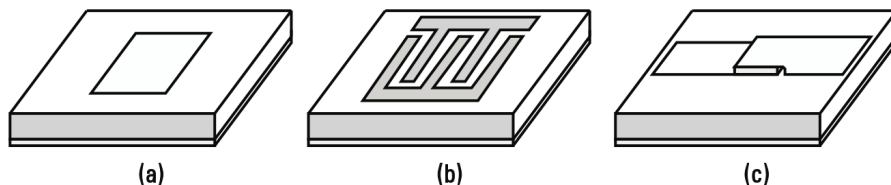
22 Irudia: Plaka paraleloko kondentsadore baten zirkuitu baliokidea

Kondentsadoreetan garrantzitsua den beste faktore bat kalitate-faktorea da. Honek kondentsadoreak energia metatzeko duen ahalmena neurtzen du, eta,  $C$  eta  $R_s$ -ren konbinazioen bidez, 4.12 ekuazioak definitzen du.

$$Q = \frac{1}{\omega C R_s} = \frac{1}{2\pi f C R_s} \quad (4.12)$$

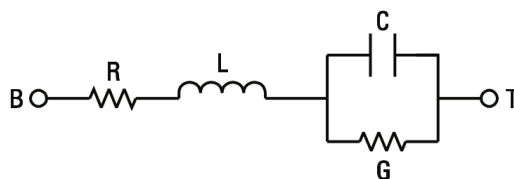
### 4.3.1.1 Inprimatutako kondentsadoreak

Elektronika inprimatuaren aldetik, kondentsadoreak hiru kategoriatan sailkatu daitezke: microstrip, interdigitalak eta *metal – insulator – metal* (MIM). Geometria interdigitalak kapazitate-balio ertainainak behar direnean erabili ohi dira. MIM geometriakoak kapa anitzeko prozesu baten bidez fabrikatu egiten dira, eta azalera unitate bakoitzeko kapazitate-balio handiena ematen dute, bi elektrodoen artean oso geruza mehea partekatzen baitute.

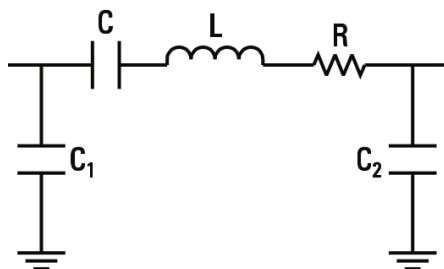


23 Irudia: Kondentsadore inprimatuen geometriak: a) microstrip, b) interdigitala eta c) MIM.

Elektronika inprimatuan gehien erabiltzen diren kondentsadoreak MIM geometriakoak direnez, hauetan zentratuko da analisia. Zirkuitu baliokidea 24 irudian ikus daiteke. Bertan  $R_s$  eta  $L_s$  erresistentzia eta harila daude seriean kanpoko elementuak.  $C$  kapazitatearekiko paralelo  $G$  erresistentzia dago korrante galera dela eta. Kontuan izan behar da RF-rako, aurreko atalean azaldutako *microstrip* teknologia erabiltzen bada, 25 irudiko zirkuitu baliokidea kontuan izan behar dela.  $C_1$  eta  $C_2$  kondentsadore parasito agertuko dira lurrarekiko konexioa egiterakoan.



24 Irudia: MIM kondentsadorearen zirkuitu baliokidea. B beheko kontaktua da eta T goikoa.

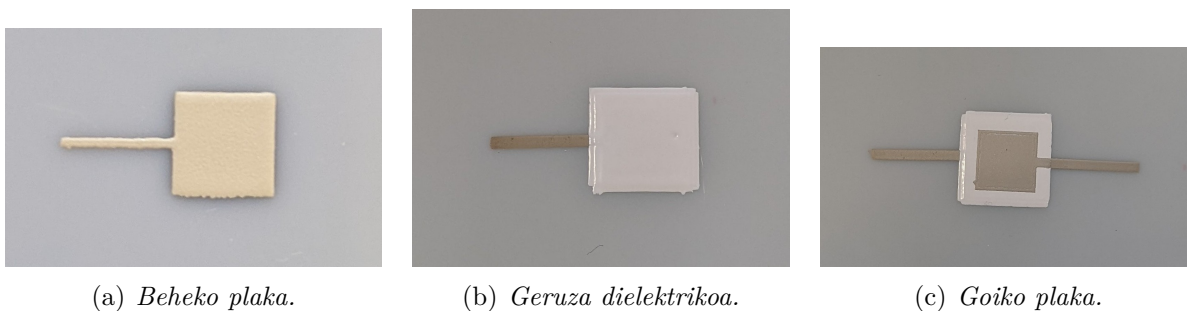


25 Irudia: *Microstrip MIM kondentsadorearen zirkuitu baliokidea.*

### 4.3.1.2 Analisi esperimentalak

Tecnalian egindako MIM kondentsadoreak fabrikatzeko serigrafia erabiltzea erabaki da teknika honen erraztasun eta erosotasunagatik. Plakak eratzeko *Chimet* fabrikatzailearen zilarrezko tinta eroalea erabili da eta tartea betetzeko *AppliedInkSolutions*-en BT-101 barium titanate dielektrikoa erabili da. Irudiak inprimatzeko erabilitako pantailarekin  $20\mu\text{m}$  inguruko geruza lortzen da.

Inprimatze prozesuak hiru etapa ditu. Lehenengo beheko plaka bere kontaktuarekin inprimatzen da PET substratuaren gainean zilarrean 26(a) irudian bezala eta  $115^\circ\text{C}$ -tan lehortzen uzten da 15 minutuz. Ondoren, geruza dielektrikoa eratu behar da. Horretarako, fabrikatzailearen datasheeta aztertuz, gutxienez bi geruza ipini behar direla esaten da, funtzionamendu egokia bermatzeko hiru edo lau erabiltzea erabaki da, eta inpresio bakoitzaren artean bario titanatoa 9 minutuz  $130^\circ\text{C}$ -tan utzi da lehortzen. Arreta izan behar da beheko plaka osorik estaltzeko zirkuitulaburrik gertatu ez dadin. Bigarren pauso honen emaitza 26(b) irudian ikus daiteke. Azkenik, goiko plaka inprimatu eta lehortu behar da (9 minutu  $115^\circ\text{C}$ ). Inpresioa beheko plakarekin guztiz alineatuta egon behar da kondentsadoreak azalera efektibo guztia izan dezan. 26(c) irudian MIM kondentsadorea bukatuta ikus daiteke.



(a) *Beheko plaka.*

(b) *Geruza dielektrikoa.*

(c) *Goiko plaka.*

26 Irudia: *MIM kondentsadorea fabrikatzeko pausoak.*

Kondentsadoreen analisia burutzeko, 27 irudian ikusten diren sei PET laginetan bost tamaina ezberdineko kondentsadoreak inprimatu dira. Beraien tamainak  $8\times 8\text{mm}^2$ -tik  $16\times 16\text{mm}^2$ -ra doaz linealki. 1, 2 eta 4 laginak dielektrikoko hiru geruza dituzte, besteek, lau. Irudia aztertzen bada, ikus daiteke nola hainbat kondentsadore batera inprimatzerakoan alineazio

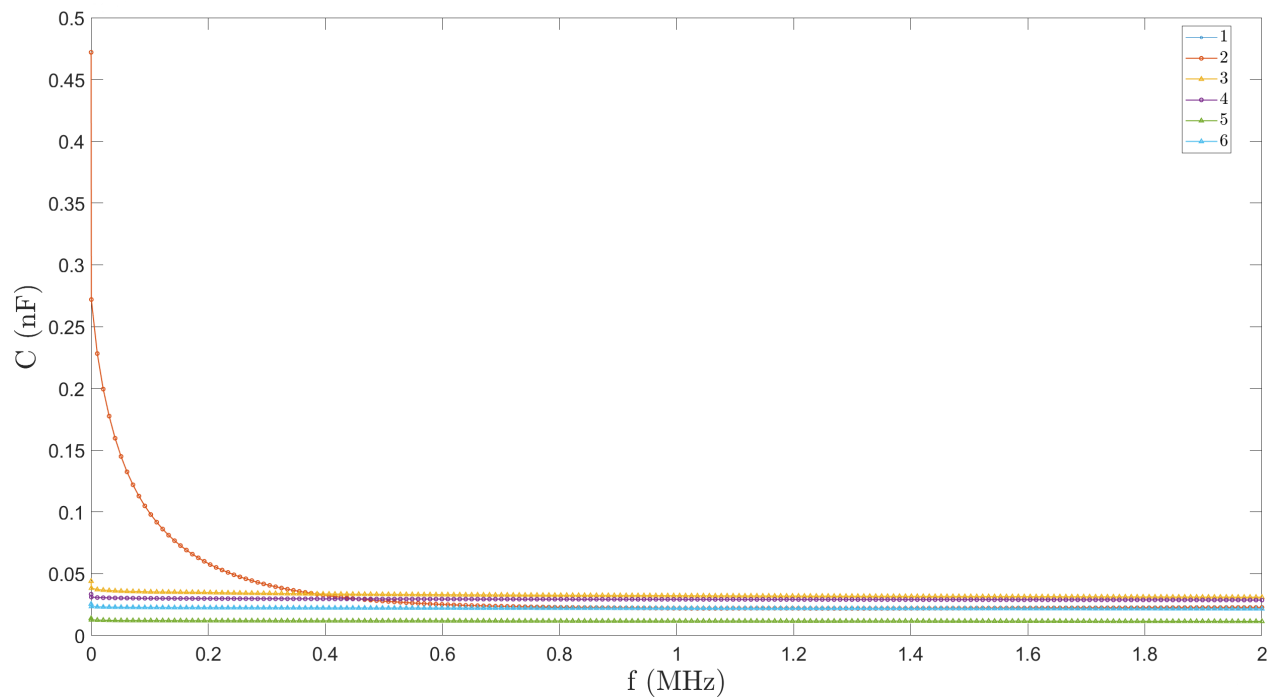
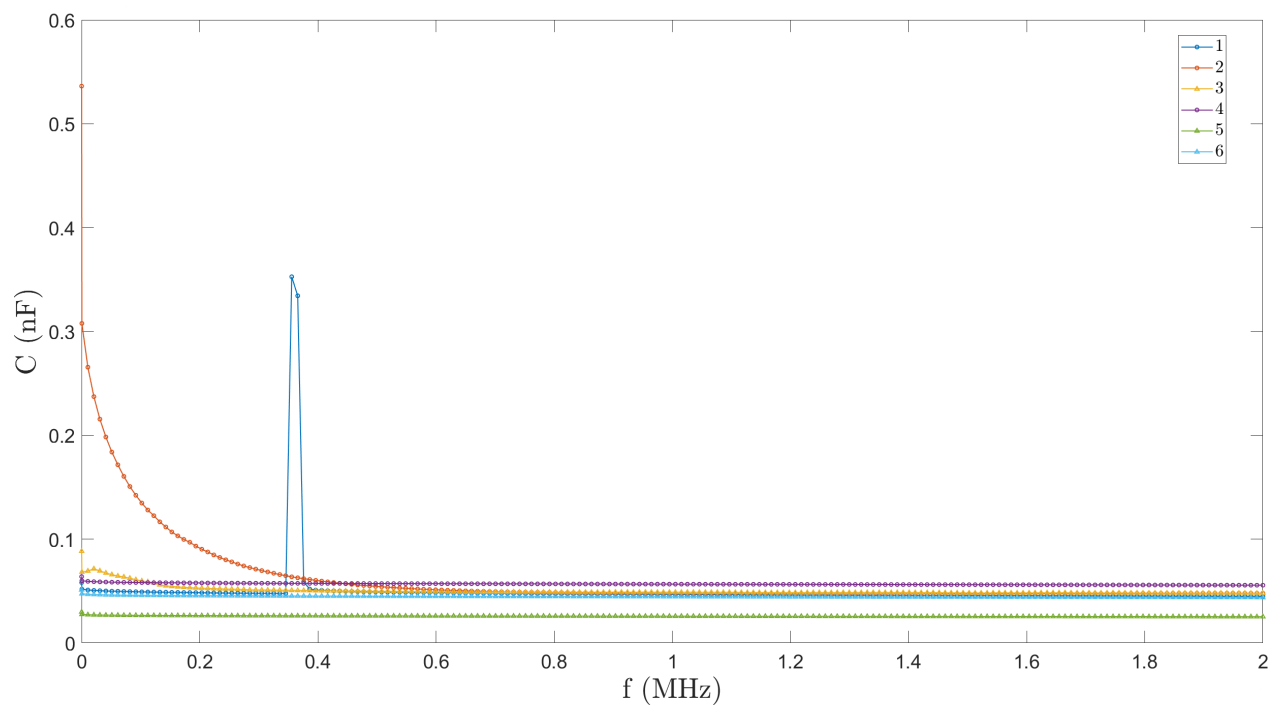
kasu guztietan mantentzea zaila izan den. LCR neurgailua erabiliz kondentsadore guztien kapazitateak eta kalite-faktoreak neurtu dira, 28-32 eta 33-37 irudietan ikus daitezkeenak. 9 taulan balioak 1MHz-tan batu dira.



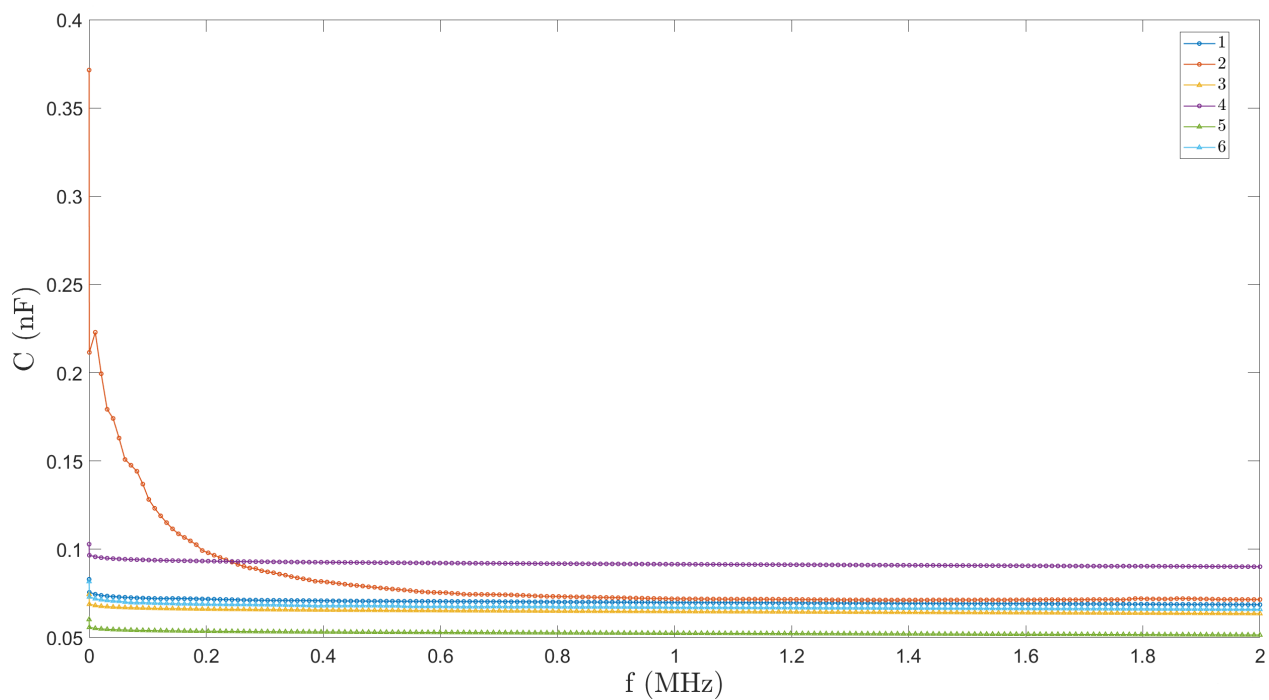
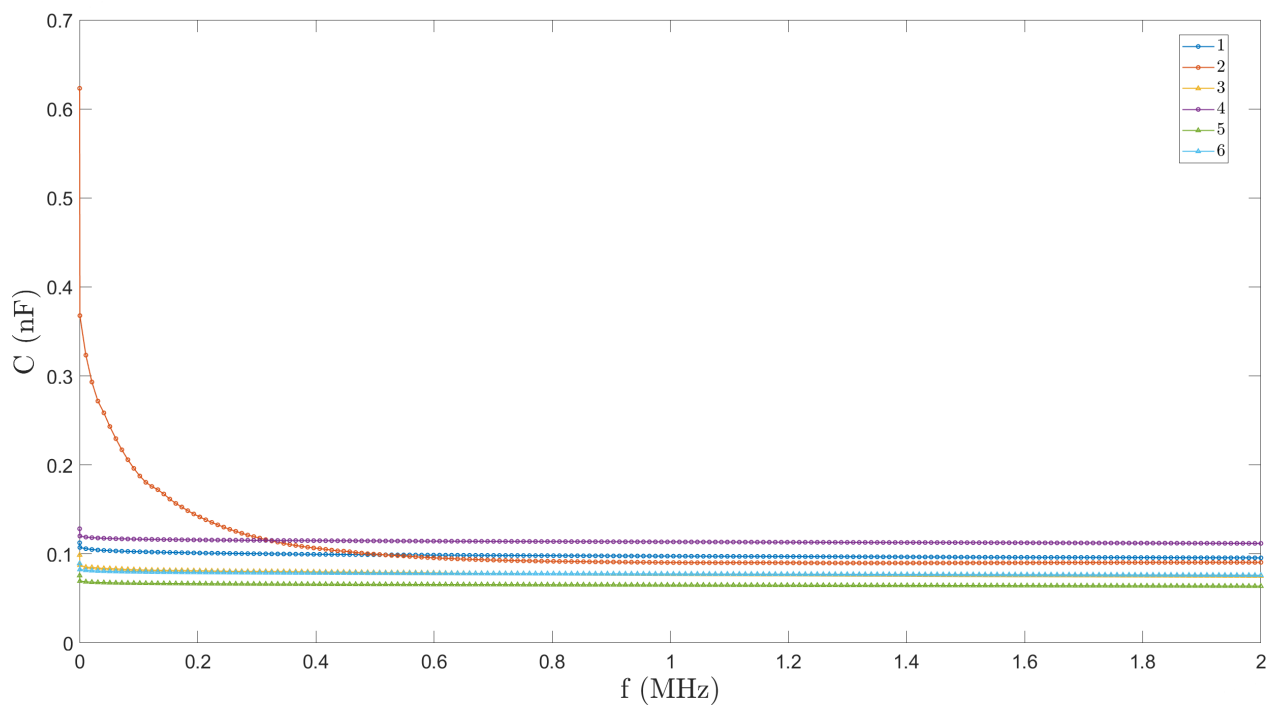
27 Irudia: Dimentsio ezberdineko kondentsadoreen 6 lagin. Goitik behera mm<sup>2</sup>-tan: 16x16, 12x12, 14x14, 12x12, 10x10 eta 8x8. 1, 2 eta 4 laginak dielektrikoaren 3 kapa eta 3, 5 eta 6 laginak 4 kapa.

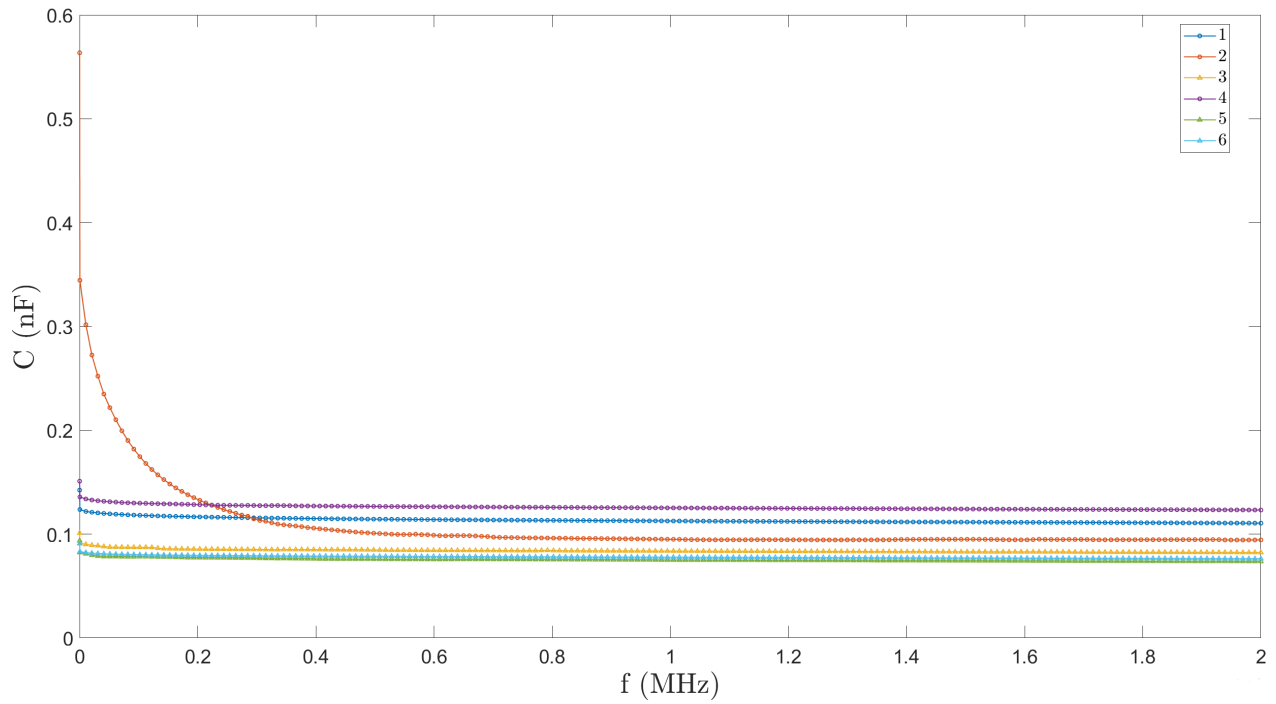
Lagina (1MHz)	1		2		3		4		5		6		B.B.	
	C (pF)	Q	C (pF)	Q	C (pF)	Q	C (pF)	Q	C (pF)	Q	C (pF)	Q	3 geruza C (pF)	4 geruza C (pF)
8x8mm <sup>2</sup>	21.8	60.85	22.0	1.24	32.2	18.12	29.3	63.34	11.7	57.26	22.0	60.06	24.4	22.0
10x10mm <sup>2</sup>	46.6	22.18	47.5	2.33	48.9	21.32	56.6	67.34	25.8	59.63	44.6	62.53	50.2	39.8
12x12mm <sup>2</sup>	69.8	54.48	71.9	4.07	64.7	60.61	91.5	68.41	52.4	60.42	67.1	54.78	77.7	61.4
14x14mm <sup>2</sup>	97.5	37.25	90.3	3.66	77.2	24.01	113.6	65.35	65.1	55.47	77.5	59.08	100.5	73.3
16x16mm <sup>2</sup>	112.7	38.64	95.0	4.56	83.7	53.95	125.3	47.64	75.0	51.81	77.7	54.57	111.0	78.8

9 Taula: Kondentsadoreen laginen balioak 1MHz-tan eta beraien batez besteko kapazitatea geruzarekiko.

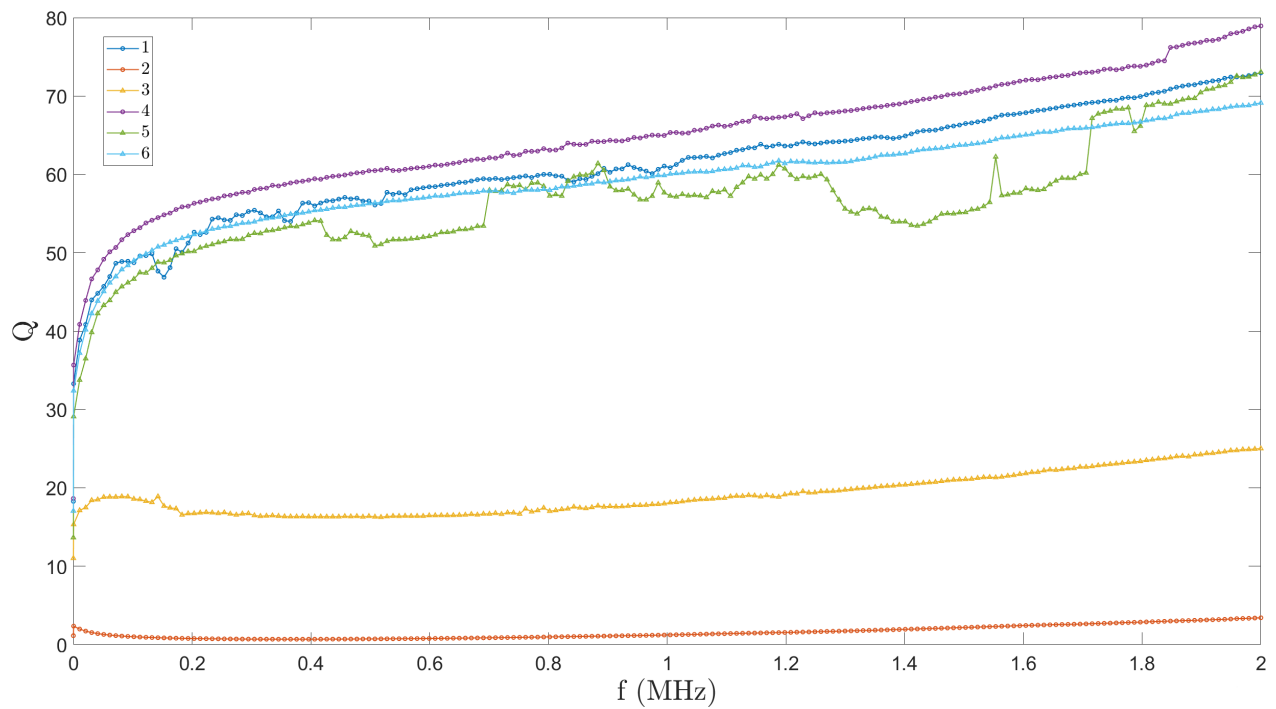
28 Irudia:  $8 \times 8 \text{ mm}^2$ -ko kondentsadoreen  $C$  kapazitatea.29 Irudia:  $10 \times 10 \text{ mm}^2$ -ko kondentsadoreen  $C$  kapazitatea.



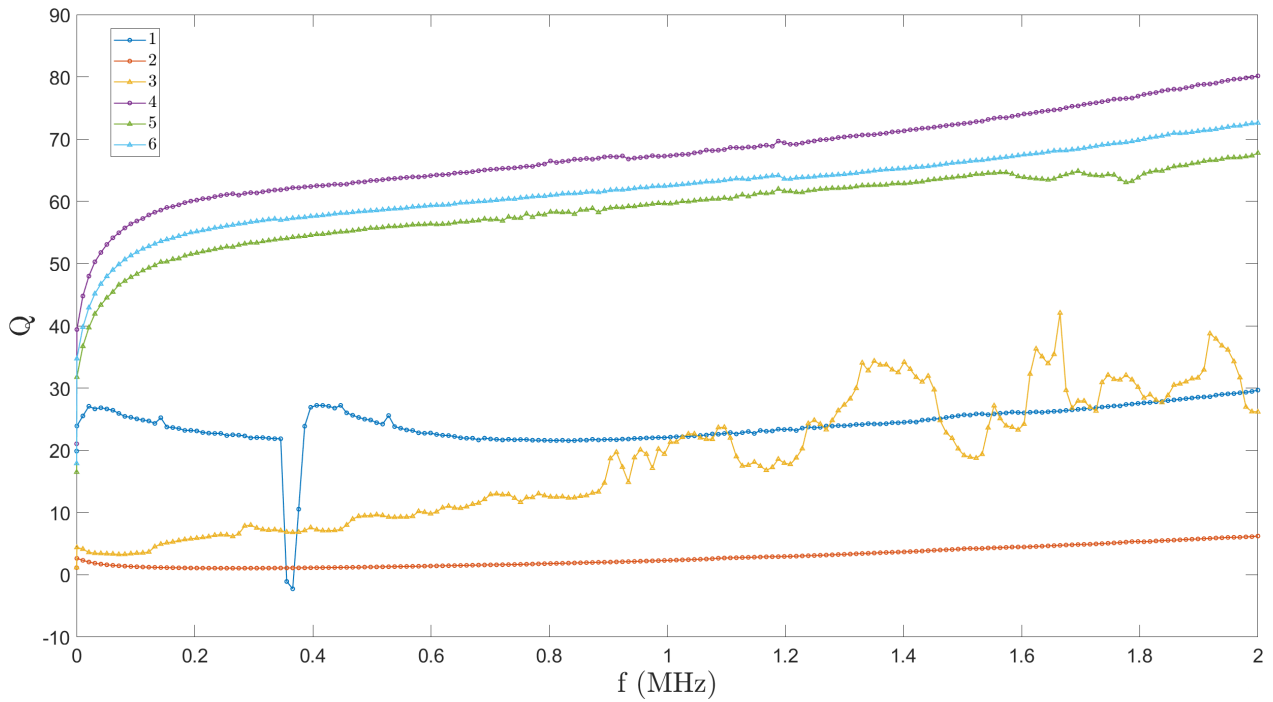
30 Irudia:  $12 \times 12 \text{ mm}^2$ -ko kondentsadoreen  $C$  kapazitatea.31 Irudia:  $14 \times 14 \text{ mm}^2$ -ko kondentsadoreen  $C$  kapazitatea.



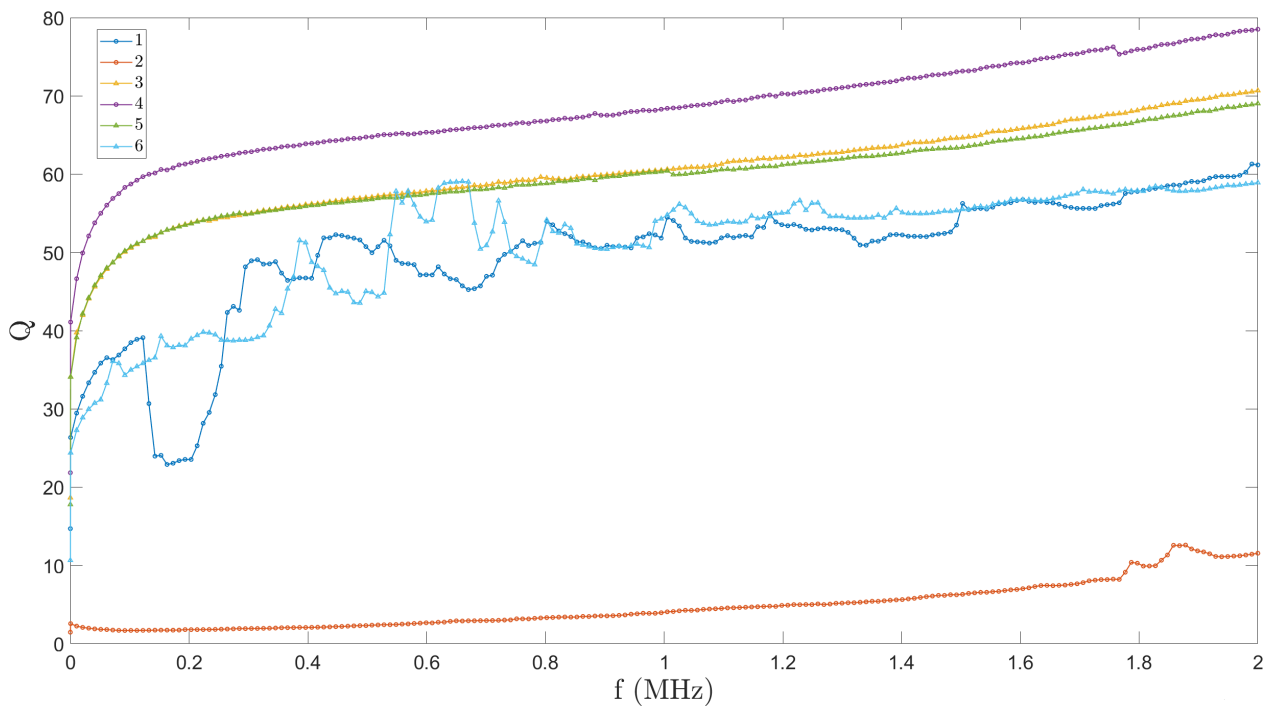
32 Irudia:  $16 \times 16 \text{mm}^2$ -ko kondentsadoreen  $C$  kapazitatea.



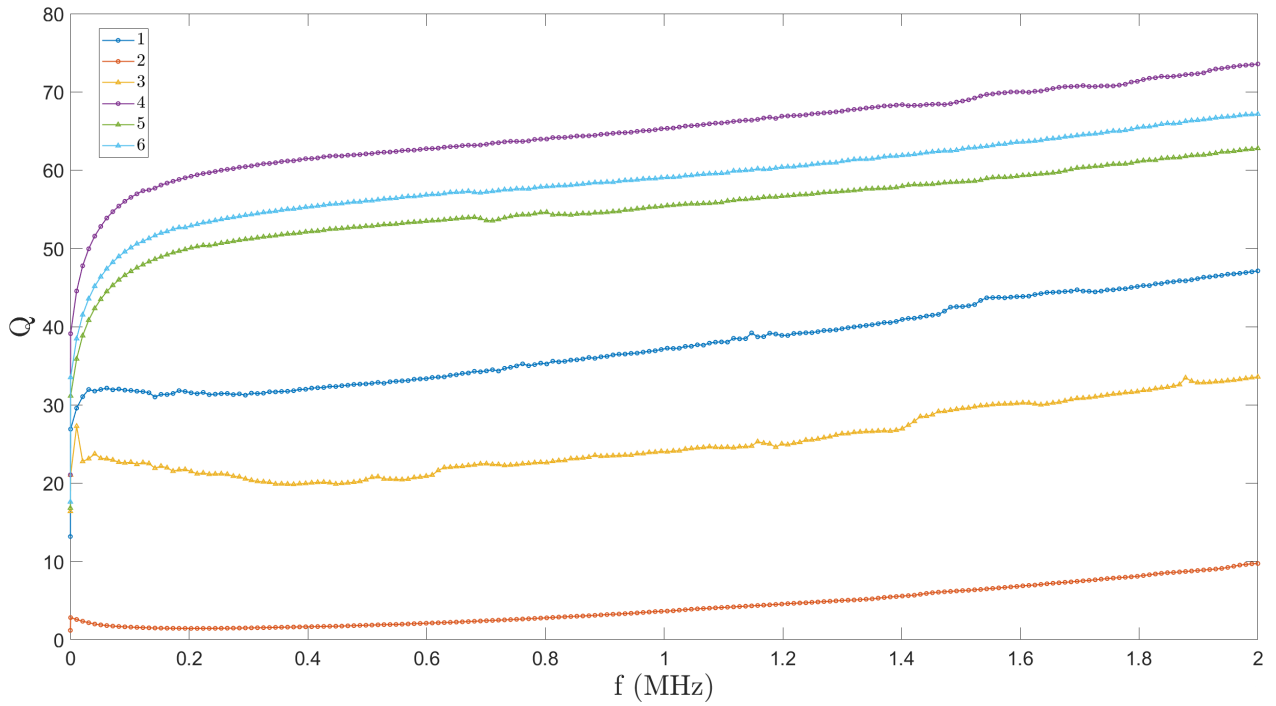
33 Irudia:  $8 \times 8 \text{mm}^2$ -ko kondentsadoreen  $Q$  kapazitatea.



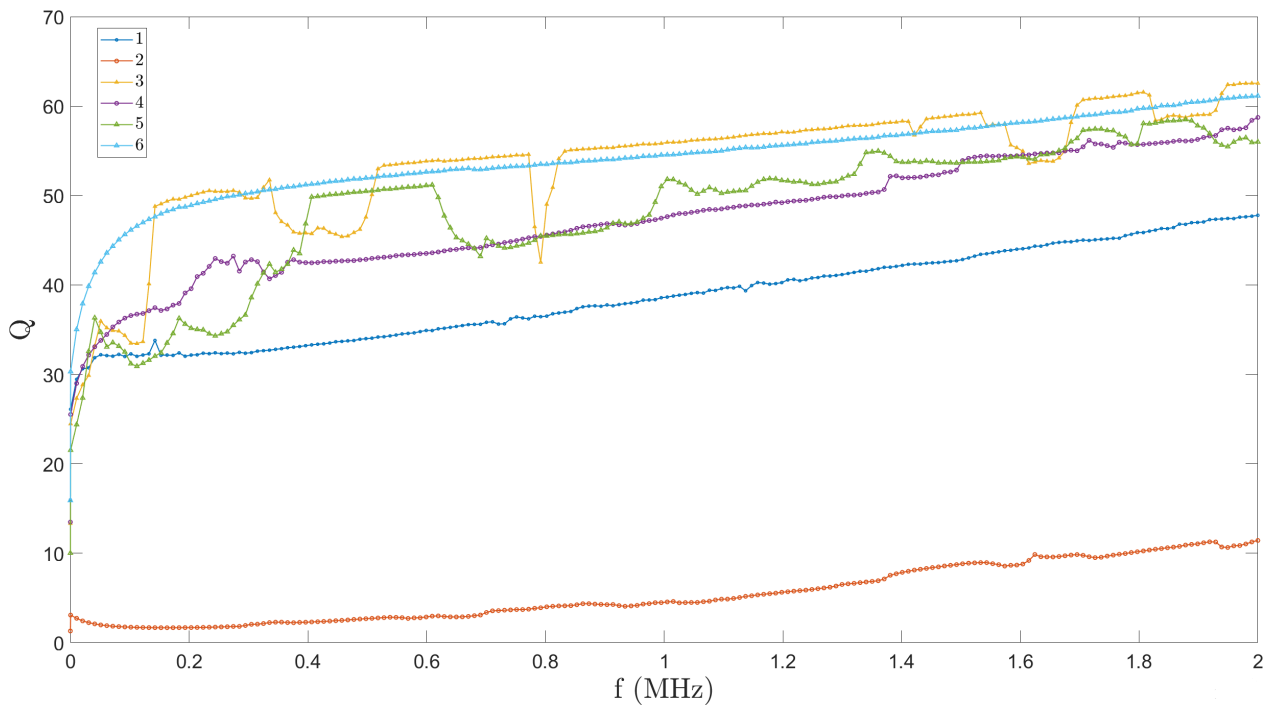
34 Irudia:  $10 \times 10 \text{mm}^2$ -ko kondentsadoreen  $Q$  kapazitatea.



35 Irudia:  $12 \times 12 \text{mm}^2$ -ko kondentsadoreen  $Q$  kapazitatea.

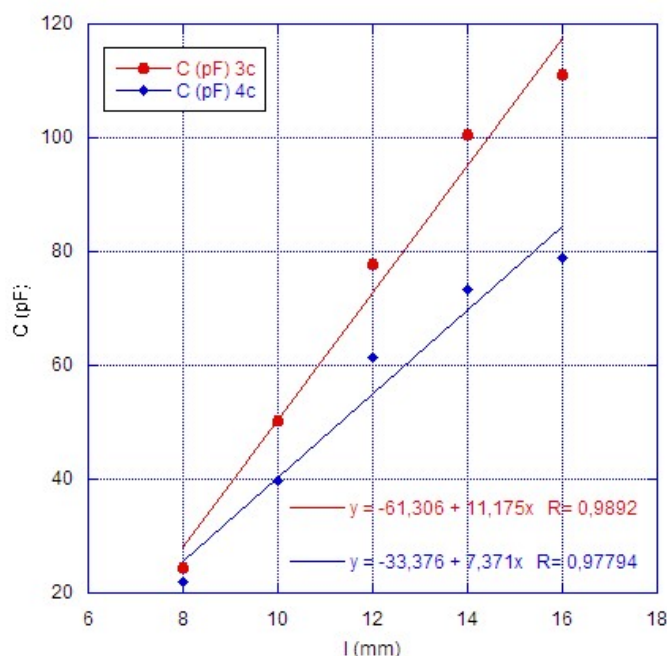


36 Irudia:  $14 \times 14 \text{mm}^2$ -ko kondentsadoreen  $Q$  kapazitatea.



37 Irudia:  $16 \times 16 \text{mm}^2$ -ko kondentsadoreen  $Q$  kapazitatea.

Emaitzak aztertzen badira, kondentsadoreen kapazitatea azalerarekin handitu egiten da eta dielektrikoaren lodierarekin jaitsi egiten da 4.10 ekuazioarekin bat etorritik. Maiztasunarekiko aldaketak aztertzen badira, handitzean kapazitateak behera egiten du, eta kalitate-faktoreak gora. Espero bezala, orokorrean, dielektriko geruza gutxiago duten kondentsadoreek kapazitate handiagoa dute. Beste aldetik, kalitate-faktorea kondentsadorearen fabrikazio prozesuak definituko du. 27 irudia eta ?? irudiak aztertuz, geruzak hobeto dituzten kondentsadoreek kalitate faktore altuagoa definituta dute. Hau da, alineazio on bat eta tinta eroalearen kapa homogeno on batek kalitate-faktore altu bat izango dute. Azkenik, 38 irudian kapazitatea dimentsioarekiko irudikatu da, horrela estimazio bat egin daiteke edozein kondentsadore karraturen kapazitatea kalkukatu ahal izateko.



38 Irudia: Kondentsadoreen kapazitatea dimentsioarekiko dielektriko 3 (gorri) eta 4 (urdin) geruzentzan.

## 4.3.2 Harilak

Haril bat zirkuitu elektrikoetako elementu pasibo bat da. Bere funtzioa, autoinduktantzia fenomenoaz baliatuz, energia biltzea da eremu magnetiko bezala. Hau neurtzeko induktantzia  $L$  erabiltzen da. Induktantziaren  $\phi$  fluxu magnetikoaren bidez definitzen da 4.13 ekuazioaren bidez, non  $I$  harilean zeharreko korrante elektrikoa den eta  $B$  eremu magnetikoaren dentsitatea.

$$L = \frac{1}{I} \oint_s B \cdot ds = \frac{\phi}{I} \quad (4.13)$$

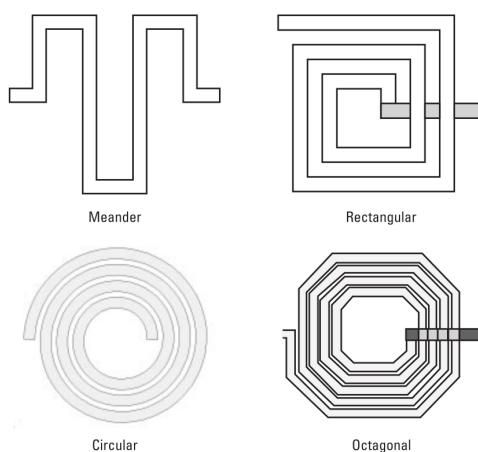
Kalitate-faktorea kalkulatzeko 4.14 ekuazio dugu, non  $R_s$  harilaren ez idealtasunek seriean

sortutako erresistentzia den [23].

$$Q = 2\pi f \frac{L}{R_s} \quad (4.14)$$

### 4.3.2.1 Inprimatutako harilak

Inprimatutako harilak bi edo hiru dimentsioko estructuretan sailkatu daitezke. Bi dimentsio-tako haril inprimatuak lau geometria izan ditzakete 39 irudian erakusten direnak: meandroa, errektangularra, zirkularra edo hainbat alboko geometria (hexagonala,oktogonala,...). Bakoitzak bere abantaila eta desabantailak ditu. Elektrikoki joera hoberen duena zirkularra da, baina bere diseinua konplexuena da. Aukeratutako geometria errektangularra izan da erabilena bere diseinua erraza delako.



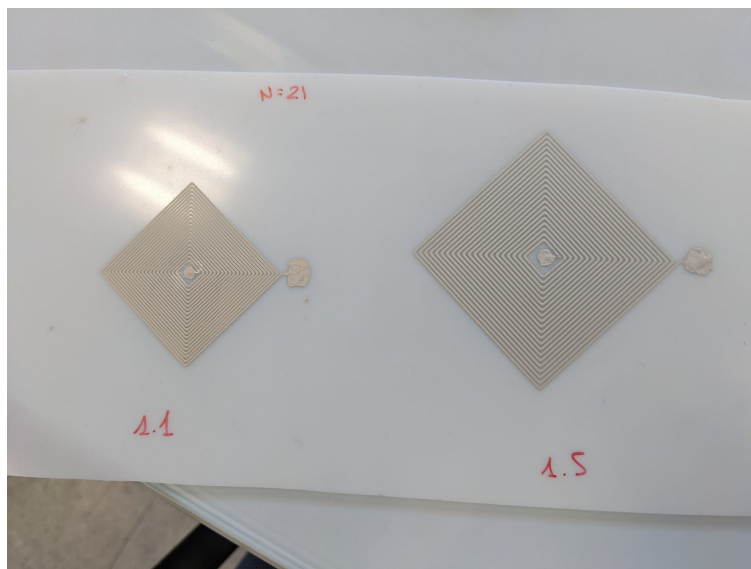
39 Irudia: *Bi dimentsioko harilen geometriak [19]*

### 4.3.2.2 Analisi esperimentalala

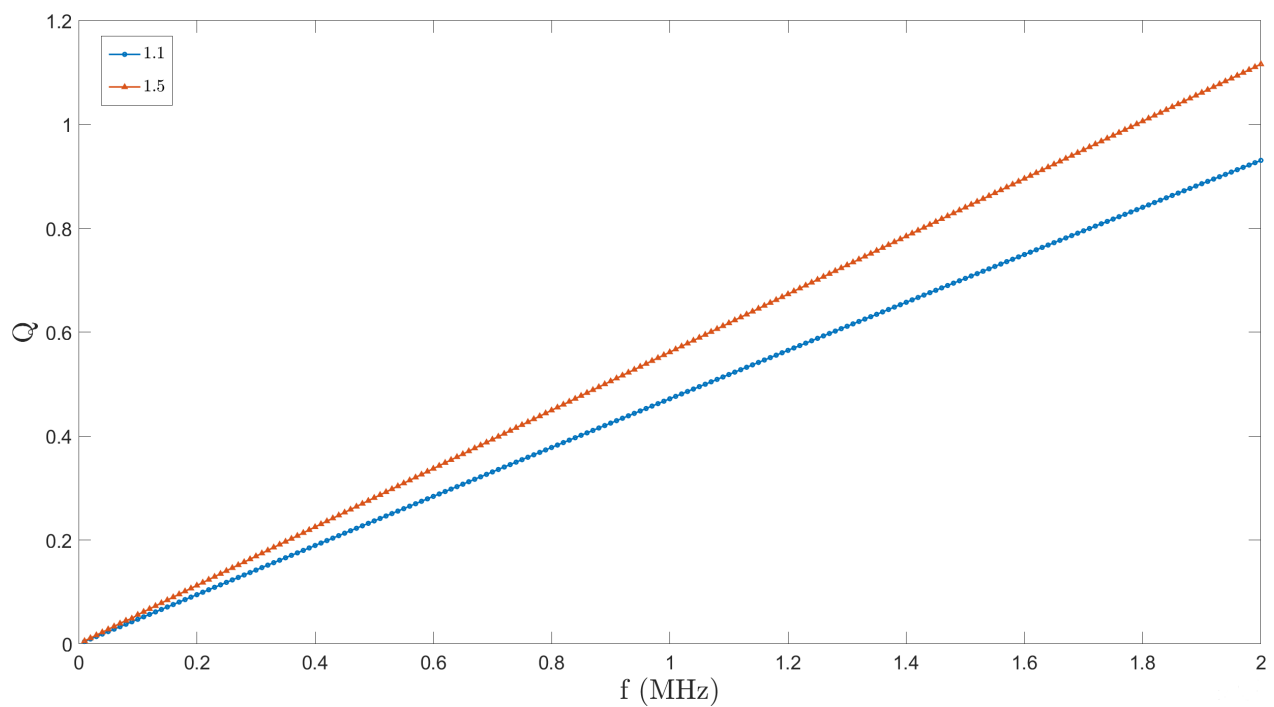
Analisi esperimentalala burutzeko 21 birako bi haril errektangular eraiki dira inkjet inpresio teknologiaren bidez. Bertan  $0.33mm$ -ko punta eta zilar tinta eroalea erabili dira *gap* ezberdineko bi haril eraikitzeke. Kontuan izan behar da, nahiz eta  $0.33mm$ -ko punta erabili lortutako linea zerbait lodiagoa izango dela difusioa dela eta. Diseinatutako harilak lineen arteko *gap*-a  $0.1mm$  eta  $0.5mm$  izateko diseinatu dira.

Hainbat saiakera egin ostean, inkjet makina metodoa ongi kalibratuta egon dadin 40 irudiko harilak lortu dira. Haril hauen kalitate-faktore eta induktantziaren balioak maiztasunarekiko 41 eta 42 irudietan ikus daitezke. Emaitzak aztertzen badira, ikus daiteke bi harilen induktantziak antzekoak direla.  $1MHz$ -tan  $L(gap = 0.1mm) = 47.87\mu H$  eta  $L(gap = 0.5mm) = 51.25\mu H$  dugu, ia induktantzia berdina. Aztertutako maiztasun-eremuan ikusten da nola induktantzia esponentzial jauzten den, baina kontuan izan behar da harilen analisi egoki bat egiteko maiztasun-muga altuagoa behar dela. Beste alde batetik, maiztasun baxuetan altuetan baino induktantzia balio altuagoak ditugu. Kalitate-faktorearen kasuan,

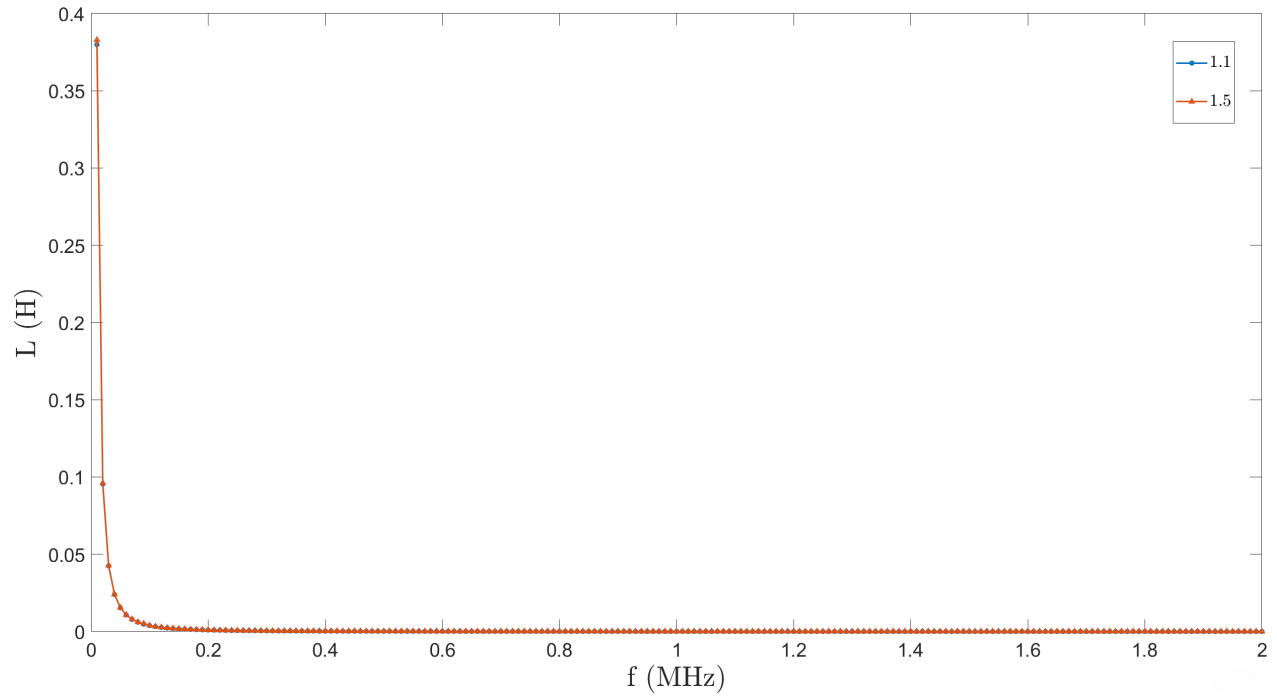
maiztasunarekin igo egiten da espero bezala, eta *gap* handiagoa duen harilaren kasuan kalitate faktore hobe dugu,  $1\text{MHz}$ -tan  $0.56$  eta  $0.47$  balioak izanik.



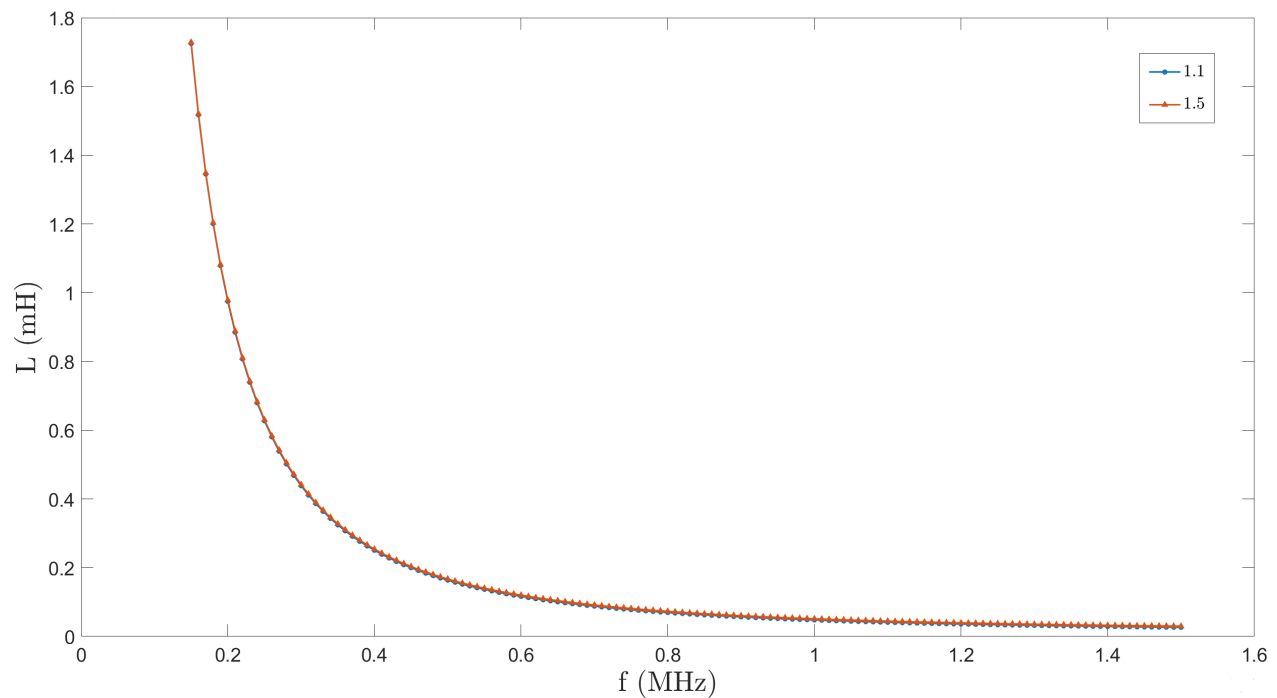
40 Irudia: 21 birako harialak.  $0.1\text{mm}$  (ezker) eta  $0.5\text{mm}$ -ko (eskuma) *gap*-a.



41 Irudia: Harilen kalitate-faktorea.



(a) 20Hz-2MHz.

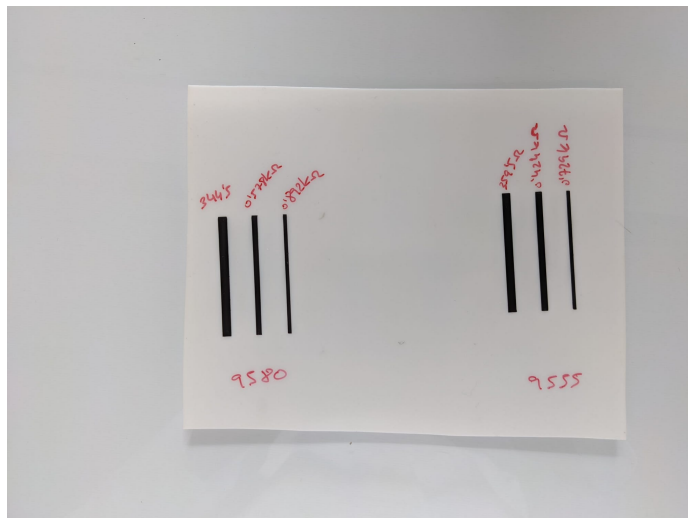


(b) 150kHz-1.5MHz.

42 Irudia: *Harilen inductantzia maiztasunarekiko.*







44 Irudia: Fabrikatutako erresistentziak.

## 4.4 Diseinu eta fabrikazioa

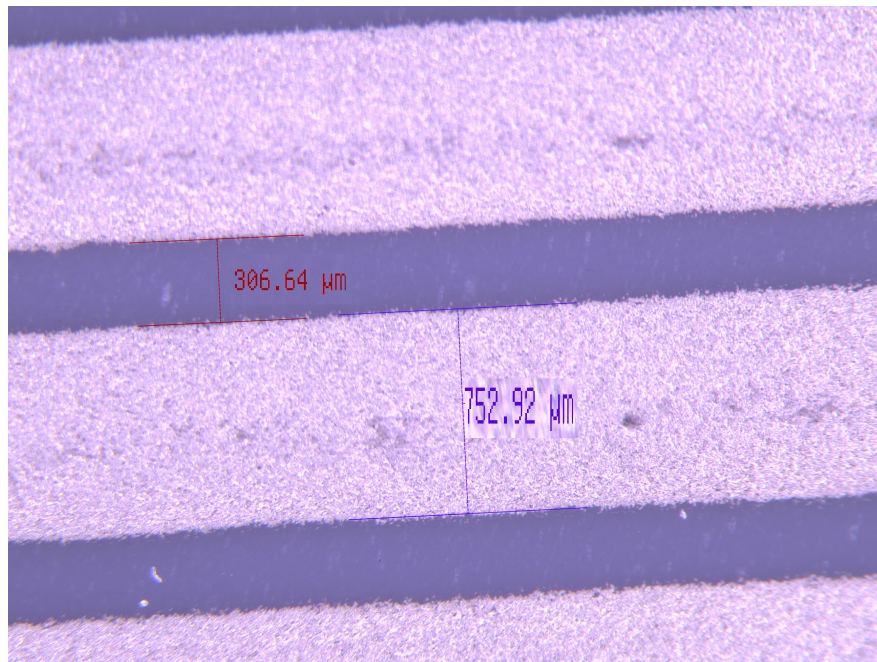
RLC zirkuitu bat osatzen duten elementuen azterketa egin ostean, paraleloan konektaturiko RLC zirkuitu erresonante bat fabrikatzea erabaki da. Horretarako, teknika ezberdinak erabiliko direnez eta alineazioa mantentzea posiblea ez denez PET substratua ez delako finko uzten posizio batean, elementuz elementuko fabrikazioa egingo da. Elementuak eraikitzeke erabiliko diren prozesu eta materialak aurreko ataletan aipatutakoak izango dira: PET substratua, zilarrezko tinta eroalea, barrio titanato dielektrikoa eta Bectron GP9580 karbonoa.

Fabrikatu egin den lehenengo elementua inkjet bidezko harila izan da. Diseinutako harilak hogeita bost bira ditu eta  $w = 0.33\text{mm}$  eta  $0.5\text{mm}$ -ko *gap*-a. Induktantzia  $50\mu\text{H}$  baino zerbait handiagoa izatea espero da, 3.3.2.2 ataleako harilak baino 4 bira gehio dituzenez gero. Lorturiko harilaren lineen eta *gap*-aren zabalera zehaztasunez ezagutzeko mikroskopioz neurtu da. 45 irudian ikus daitekeenez lorturiko  $w = 752.92\mu\text{m}$ -koa izan da eta  $\text{gap} = 306.64\mu\text{m}$ -koa. Analisisian komentatutako zabalera handitzea difusioa dela eta frogatu dela.

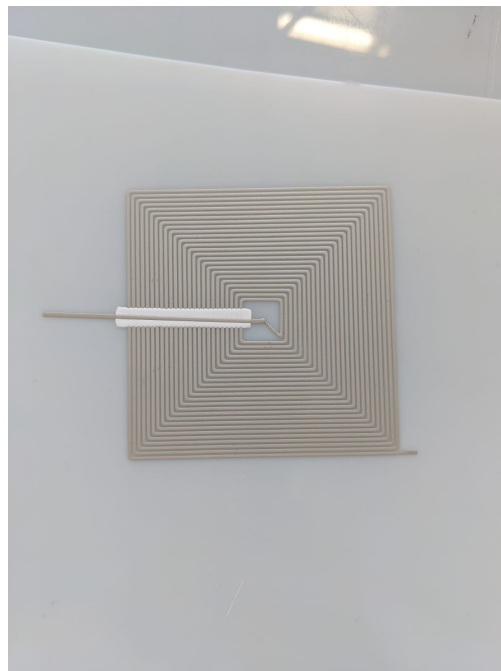
Kasu honetan harilaren zentroko kontaktua kanpora atera behar da zirkutuarekin kontaktua egin ahal izateko. Horretarako, isolatzaile moduan, barrio titanato dielektrikoa erabili da; modu honetan, dielektrikoaren gainetik zirkuituaren zilarrezko pista zentroraino sartu ahal egingo da zirkuitulaburrik egin gabe. Serigrafia bidez dielektriko 4 geruza inprimatu dira isolatzaile funtzioa bermatu dadin eta dimentsioak  $30 \times 4\text{mm}^2$  izan dira  $1\text{mm}$ -ko pista erositazunez sar dadin 46 irudian ikus daitekeen bezala. Kontuan izan behar da pista-dielektriko berri hau egiteak kondentsadore txikiak sortzea ekarriko duela era distributiboan, eta baliteke hauek eragina izatea harilean. Harilaren induktantzia eta kalitate-faktorea neurtu dira LCR neurgailuarekin  $1\text{MHz}$ -tan balioak  $55\mu\text{H}$  eta  $0.8$  izanik.

Hurrengo pausoa, kondentsadorea inprimatu egin da. Zirkuitua  $1\text{MHz}$ -tan erresonatzea nahi denez,  $50 \times 50\text{mm}^2$ -ko kondentsadorea fabrikatzea erabaki da dielektrikoarentzat 3 geruza inprimatuz. Izan ere, 38 irudiko ekuazio erabiltzen bada,  $500\text{pF}$  inguruko kapazitateko

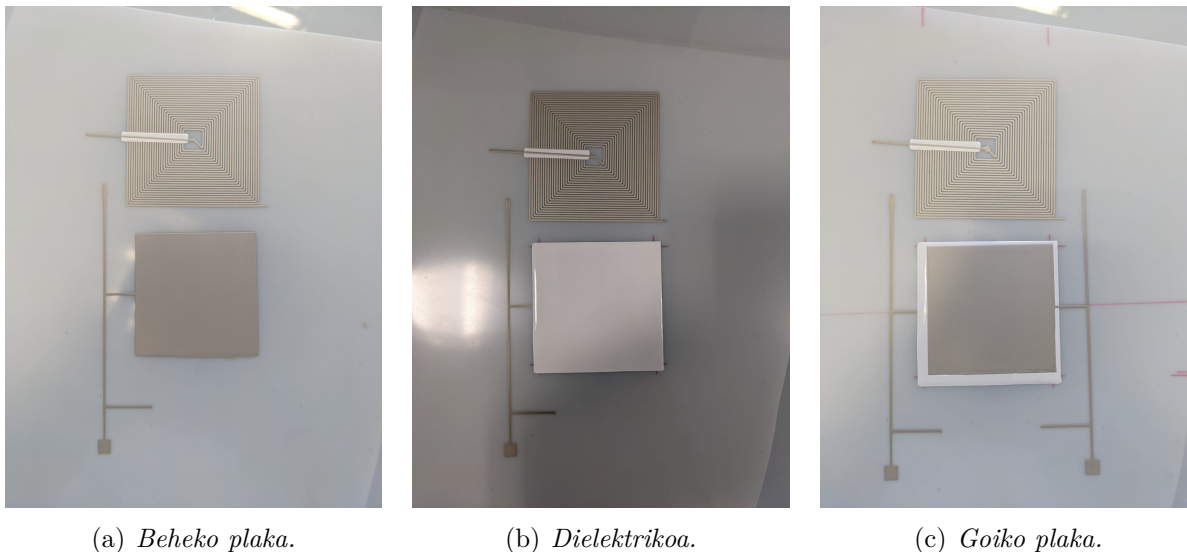
kondentsadorea lortuko da eta, 4.2 ekuazioa jarraituz, zirkuituaren erresonantzia-maiztasuna  $960kHz$  inguru izan da teorikoki. 47 irudietan kondentsadorearen inpresio prozesua dago. Bertan RLC zirkuituaren pista ikus daiteke.



45 Irudia: *Harilaren w eta gap-a mikroskopioz neurtuta.*



46 Irudia: *RLC zirkuituaren harila.*



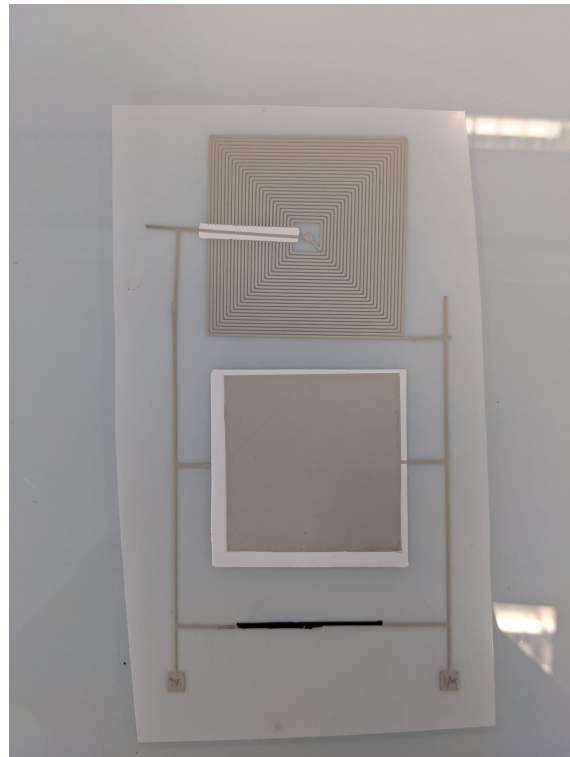
47 Irudia: *RLC zirkuituko kondentsadorearen fabrikazio prozesua.*

Kontuan izan behar da kondentsadorearen dimentsioak analisis fabrikatutakoak baino askoz handiagoak direla. Ondorioz, inpresioa ondo atera dadin erabilitako pantaila hutsune handiagoak dituen beste bategatik aldatu da. Aldaketa hau inprimazioan tintaren homogeneotasuna mantentzeko egiten da. Hala ere, dielektrikoa inprimatzerakoan, homogeneotasun hau ez dela guztiz mantendu ikusi da. Kondentsadorearen  $1MHz$ -tan neurtuz hurrengo balioak lortu dira:  $C = 1.37nF$  eta  $Q = 26.1$ . Lortutako kapazitatea esperotakoa baino askoz handiagoa da. Hau aipatutako dielektrikoaren homogeneotasun faltagaitik izan daiteke. Izan ere, arazo horrek dielektrikoaren lodiera jaitsi dezake eta, 4.10 ekuazioak erakusten duenez,  $d$  txikitzen bada  $C$  handitu egiten da.

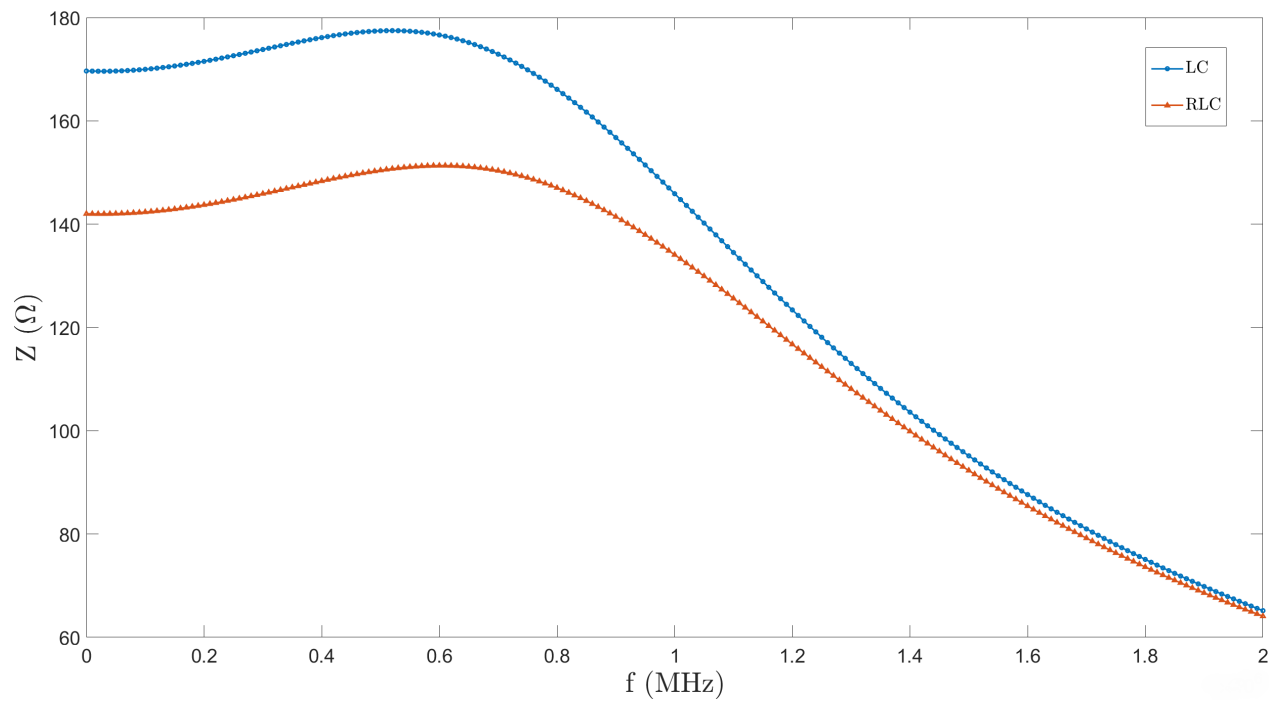
Azkenik, erresistentzia fabrikatu baino lehenago, pisten bidez haril eta kondentsadorea konektatu dira (48(a) irudia) LC zirkuitu bat eratuz. Kontuan izanda kapazitate berria, erresonantzia-maiztasun teorikoa  $f_{0_{teo}} = 580kHz$  izango da. Ondoren,  $42 \times 2mm^2$  dimentsioetako karbonozko erresistentzia inprimatu da 48(b) irudian ikusten den RLC zirkuitua osatuz. LC eta RLC zirkuituen inpedantzia maiztasunarekiko 49 irudian ikus daite.

Grafikoak aztertuz, LC zirkuituan lorturiko inpedantzia maximoa  $177.47\Omega$ -koa da  $f_{0_{LC}} = 520kHz$ -ko erresonantzia-maiztasunean. Erresistentzia gehituz, teoriak dioenez, inpedantzia maximoa jaitsi egiten da  $151.34\Omega$ -tara  $f_{0_{RLC}} = 600kHz$ -ko erresonantzia-maiztasunean. Erresonantzia-maiztasunak bi kasuetan diseinatzerakoan esperotako  $560kHz$ -etatik daude.

Beste aldetik, banda-zabalera aztertzen bada, behe-paseko iragazki baten itxura dute bi grafikoek;  $f_{H_{LC}} = 1.19MHz$  eta  $f_{H_{RLC}} = 1.32MHz$  izanik ebaki-maiztasunak LC eta RLC zirkuituentzat [24]. Ondorioz, zirkuituen kalitate-faktoreak, 4.5 ekuazioak erabiliz,  $Q_{LC} = 0.437$  eta  $Q_{RLC} = 0.454$  dira. Zentzuzkoa da  $Q$  balio baxua izatea, erresonantzia-gailur handirik ez dagoelako.

(a) *LC zirkuitua.*(b) *RLC zirkuitua.*

48 Irudia: *Inpresio bidez eraikitako zirkuitua.*



49 Irudia: *Inpresio bidez fabrikatutako RLC zirkuitua.*

## 5 Ondorioak eta etorkizunerako proposamenak

Lan honetan bi helburu garatu dira. Alde batetik, materialen karakterizazioarako metodoa frogatu eta bereganatzea, eta, bestetik, elektronika inprimatu bidez RLC zirkuitu bat diseinatu eta fabrikatzea.

Materialen karakterizazio egiterako orduan, material dielektrikoetan zentratu denez, hauek definitzen dituzten propietate fisikoak aztertu dira, lortutako emaitzak ulertzeko. Teknologia planarrean onarritutako *microstrip* transmisio lerroetan oinarritutako erresonadoreak erabili direnez hauek diseinatzeko metodoa ikasi eta ulertu da, hala nola hauen analisia egiten ikasi da. Simulazio EM-rako CST programa erabiltzen ikasi da, edozer fabrikatu baino aurretik bere portaera aurreikusteko balio duena beste aplikazio batzuen artean.

Material dielektrikoen karakterizazioen inguruan, metodo erresonanteak frogatu dira material komertzial ezberdinetarako, simulazio zein esperimientalki. Baita ikusi da fabrikazio metodoak eragina izan dezakeela bukaerako emaitza esperimientalean.

Tecnalian inpresio funtzionaleko taldean elektronika inprimatuaren inguruan lan egin da. Bertan serigrafia zein inkjet inprimazio teknikak landu dira emaitza onak lortuz tinta eroale, dielektriko eta organikoekin.

Hasiera batean ipinitako helburua, RLC zirkuitu bat fabrikatu eta frogatzea, lortu egin da. Horretarako, elementu ezberdinak aztertu dira inpresio elektronikoaren ikuspuntutik. Gehien sakondu den elementua kondentsadorea izan da, bukaeran dimentsioan oinarritutako diseinuen kapazitatearen estimazioa egitea lortu da.

Fabrikatutako zirkuitua  $560kHz$  erresonantzia-maiztasuna izan dezan paraleloan konektatutako RLC zirkuitu izan da. Elementuka eraiki denez, LC eta RLC zirkuituen arteko emaitzak neurtu ahal izan dira. Lortutako erresonantzia-maiztasunak bateragarriak dira diseinatutakoarekin  $520kHz$  eta  $600kHz$  direnez gero. Frogatu egin da, paraleloan konektatutako LC zirkuitu erresonanteak inpedantzia maximoa dutela eta hau jaitsi egiten dela erresistentzia sartzean. Eraikitako zirkuituaren maiztasunarekiko erantzuna behe-paseko iragazki batena izan da ebaki-maiztasunak  $1.19MHz$  eta  $1.32MHz$ -koak izan dira LC eta RLC zirkuituentzat. Beraz, RLC iragazki funtzional bat lortu da fabrikatzea inpresio elektronikoa erabiliz.

Nahiz eta helburuak bete diren, lan honek duda eta bide berriak zabaltzen ditu. Haste-ko, elektronika inprimatuaren inguruan egin den azterketa behe-maiztasunean izan da baliabide mugapenak direla eta. Oso interesgarria izango litzateke azterketa guzti hau goi-maiztasunean egitea bertan gertatzen diren fenomeno eta ez idealtasunak aztertu ahal izateko. Beste alde batetik, lan honetan kondentsadoreetan zentratu dugu analisia, haril eta erresistentzien inguruko analisia egitea inpresio elektrikoaren ikuspuntutik elementu hauek hobeto ulertzea ekarriko luke.

Esan bezala, RLC zirkuitu funtzional bat eraiki da, honek RLC zirkuituen ezberdinen portaera aztertzeko ibilbidea irekitzen du. Sentsore edo iragazkia mota ezberdinak landu daitezke,

hauen bideragarritasuna aztertuz eta posible bada praktikan ipiniz.

VNA-rekin neurketak egiterako orduan, arazoak egon dira PET-ean ipinitako konektoreak finko egotearekin eta substratua ez deformatzerekin. Arazo hau konpontzea garrantzizkoa dela uste da, izan ere, elementu zurrun eta ez-zurrunen arteko konexio sendo eta egokiak lortzea garrantzitsua da etorkizun batean teknologia hau beste batzuekin inplementatu ahal izateko.

Bukatzeko, esperientzia pertsonalaren aldetik, lan hau oso aberasgarria izan dela esan daiteke. Alde batetik, RF-ko eremuan lan egin da, honek suposatzen dituen arazoak ikusiz eta beraiekin lan eginez. Graduan zehar ikasitako hainbat fenomeno eta materialen propietateak esperimentalki bizi izan dira; honek, kontzeptu hauek hobeto ulertzea eta barneratzea izan du ondorio bezala. Beste aldetik, Tecnalia bezalako toki batean lan egiteak, laborategi batean lan egiteak zer suposatzen duen erakutsi eta elektronikaren alde teoriko zein praktikoak nola elkarzen diren erakutsi dit. Baita ere, nola zientzia alor anitzeko kontzeptua den; izan ere, elektronika egiterako orduan ezin dira alde batera utzi kimika edo fisika, adibidez. Irakaspen guzti hauek ez litzatezke posible izango nire tutore eta lankideak gabe; horregatik, eskerrak eman nahi dizkiet.

# Erreferentziak

- [1] Paul Calvert. Inkjet printing for materials and devices. *Chemistry of Materials*, 13(10):3299–3305, 2001.
- [2] Raghu Das & Dr Xiaoxi He. Printed, organic & flexible electronics forecasts, players & opportunities 2011–2021, 2011. IDTechEx.
- [3] Raghu Das & Dr Xiaoxi He. Printed, organic & flexible electronics forecasts, players & opportunities 2020–2030, 2020. IDTechEx.
- [4] [CST Studio Suite](#).
- [5] D.J. Griffiths. *Introduction to Electrodynamics*. Cambridge University Press, 4th edition, 2017.
- [6] Joaquín Portilla. Sistemas de alta frecuencia. apuntes., 2020. EHU/UPV.
- [7] D.M. Pozar. *Microwave engineering*. John Wiley & sons, 2011.
- [8] Erik O. Hammerstad. Equations for microstrip circuit design. In *1975 5th European Microwave Conference*, pages 268–272, 1975.
- [9] E. Hammerstad and O. Jensen. Accurate models for microstrip computer-aided design. In *1980 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, pages 407–409, 1980.
- [10] Isaac Waldron. *Ring resonator method for dielectric permittivity measurement of FOAMs*. PhD thesis, Worcester Polytechnic Institute, 2006.
- [11] Cheng-Cheh Yu and Kai Chang. Transmission-line analysis of a capacitively coupled microstrip-ring resonator. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 45(11):2018–2024, Nov. 1997.
- [12] A. R. Fulford & S. M. Wentworth. Conductor and dielectric-property extraction using microstrip tee resonators. *Microwave and Optical Technology Letters*, 47(1):14–16, Mar. 2005.
- [13] Javier Carnerero Cano. Caracterización de materiales para sensores de radiofrecuencia, 2015. Universidad Carlos III de Madrid.
- [14] [MATLAB](#).
- [15] [Github biltegia](#).
- [16] Anne Helmenstine. Sources of error in science experiments, 2016. [sciencenotes.org](#).
- [17] Fr4 [datasheet](#).
- [18] Arlon 25n [datasheet](#).
- [19] M. Keskinen. End-of-life options for printed electronics. In Vanessa Goodship and Ab Stevels, editors, *Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Hand-*



- book*, Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, pages 352–364. Woodhead Publishing, 2012.
- [20] Garret McKerricher, Jose Gonzalez Perez, and Atif Shamim. Fully inkjet printed rf inductors and capacitors using polymer dielectric and silver conductive ink with through vias. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 62(3):1002–1009, 2015.
- [21] Jani Miettinen, Ville Pekkanen, Kimmo Kaija, Pauliina Mansikkamäki, Juha Mäntysalo, Matti Mäntysalo, Juha Niittynen, Jussi Pekkanen, Taavi Saviavuk, and Risto Rönkkä. Inkjet printed system-in-package design and manufacturing. *Microelectron. J.*, 39(12):1740–1750, dec 2008.
- [22] I.J. Bahl. *Lumped Elements for RF and Microwave Circuits*. Artech House, 2003.
- [23] Getinet Ashebir, Serges Zambou, Ulrich Männl, Rhyme Setshedi, Margit Härting, and David T. Britton. Fully screen printed lrc resonant circuit. *Microelectronic Engineering*, 162:6–11, 2016.
- [24] H.F. Castro, V. Correia, E. Sowade, K.Y. Mitra, J.G. Rocha, R.R. Baumann, and S. Lanceros-Méndez. All-inkjet-printed low-pass filters with adjustable cutoff frequency consisting of resistors, inductors and transistors for sensor applications. *Organic Electronics*, 38:205–212, 2016.