



IKER  
GAZTE  
NAZIOARTEKO  
IKERKETA EUSKARAZ

## V. IKERGAZTE

NAZIOARTEKO IKERKETA EUSKARAZ

2023ko maiatzaren 17, 18 eta 19a  
Donostia, Euskal Herria

ANTOLATZAILEA:  
Udako Euskal Unibertsitatea (UEU)



Aitortu-PartekatuBerdin 3.0

## INGENIARITZA ETA ARKITEKTURA

**Beira-zuntz bidez indartutako  
polimero konpositeen  
permitibitate elektrikoaren  
karakterizazioa T erresonadoreen  
bitartez,**

*Miren Hayet Otero,  
Leire Bilbao Alba,  
Izaskun Bustero Martinez de Zuazo  
eta Jose Manuel Gonzalez Perez*

115-122 or.

<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.v.03.15>

ANTOLATZAILEA:



BABESLEAK:



LAGUNTZAILEAK:



# Beira-zuntz bidez indartutako polimero konpositeen permitibitate elektrikoaren karakterizazioa T erresonadoreen bitartez

Miren Hayet Otero<sup>1,2</sup>, Leire Bilbao Alba<sup>2</sup>, Izaskun Bustero Martinez de Zuazo<sup>2</sup>,  
Jose Manuel Gonzalez Perez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> EHU, Sarriena Auzoa, 48940 Leioa, Bizkaia

<sup>2</sup> Tecnalia, Mikeletegi Pasealekua 2, 20009 Donostia, Gipuzkoa.

miren.hayet@ehu.eus

## Laburpena

Lan honek beira-zuntz bidez indartutako polimero konpositeen permitibitate erlatiboa karakterizatzeko jarraitutako prozedura deskribatzen du. Konpositeak infusio bidez fabrikatu ondoren, inprimatze teknika funtzionalen bitartez irrati-maiztasunetan dielektrikoak karakterizatzea ahalbidetzen duten T erresonadoreak inprimatu dira serigrafia teknika eta zilarrezko tinta eroalea erabiliz. Irrati-uhinen aurrean erresonadore horien erantzuna aztertu da, eta 400MHz-1GHz maiztasunetarako permitibitate erlatiboa 4.50-4.81 artean kokatu da. Modu horretan, konposite hauek hari gabeko sentsoreak txertatzeko balioak direla erakusten da.

**Hitz gakoak:** Konpositea, Inprimatze funtzionala, Irrati-maiztasuna, Permitibitatea

## Abstract

*This work reports the procedure followed to characterize the relative permittivity of composite polymers reinforced with glass fiber. Once the composites were manufactured by infusion, T resonators, which allow dielectric characterization at radio-frequencies, have been screen-printed using a silver conductive ink. The response of these resonators to radiofrequency waves has been analyzed and the relative permittivity has been estimated to be between 4.50-4.81 for 400 MHz-1GHz frequencies. This way, these composites may be valid for wireless applications such as embedded sensors.*

**Keywords:** Composite, Functional printing, Radio-Frequency, Permittivity

## 1 Sarrera eta motibazioa

Konpositeak maila makroskopikoan konbinatzen diren eta elkarren artean disolbagarriak ez diren bi osagai edo gehiagok osatutako egitura-materiala dira (Sharma, 2021). Osagai bat errefortzua izaten da, eta hura txertatzen den beste osagaiari matrizea deritzo. Zuntzez indartutako polimero konpositeak geroz eta esanguratsuegoak dira industrian (Böger et al., 2010). Haien sendotasun/pisu erlazio bikaina dela eta, oso erabilgarriak dira hainbat industria aplikaziotarako, mugikortasun sektorea barne (Friedrich eta Almajid, 2013). Etengabeko garapen prozesuan, konposite material multifuntzionalen beharra agertu da hainbat zereginetara bideratuta, besteak beste, konposite beraren egituraren edozein deformazio edota hondatze antzematea, ingurumen-sentsoreak edo seinaleztapenerako argiak.

Babes eza dela eta, funtzio horiek integratzeko gailuak azalean kokatzea ez da irtenbide egokia: funtzionalitate horiek konposite barruan txertatzea ezinbestekoa da. Aldiz, pieza fisikoak txertatzeak materialaren erresistentzia eta zurruntasuna kolokan jartzen dituzten etenuneak sor ditzake, materialaren egitura propietateen kalitatea txikituz. Hortaz, konposite multifuntzionalen diseinuak erronka berri bat plazaratu du: funtzio gehigarriak eranstea hasierako egitura-funtzioak mantentzen diren bitartean (Xiao et al., 2016).

Inprimatze teknika funtzionalen bitartez konpositearen berezko atal diren hainbat zirkuitu elektronikoko sortzea posiblea izan da egitura-propietateak arriskuan jarri gabe, zirkuituak ondoren konpositeak egiteko erabiltzen diren zuntzetan inprimatuz (Pa et al., 2015; Pérez-Márquez et al., 2023). Zehazki inpresio teknika funtzionalen bidez inprimatutako hariarik gabeko sentsoreak bereziki interesgarriak dira, ez baitute kable eta energia-iturriren beharrik.

Aldiz, haririk gabeko komunikazioak zirkuitutik igaroko diren uhinek maiztasun jakin batzuk edukitzea dakar: irrati-uhinak behar dira, eta haiekin lan egiterakoan ez dira ohiko kobrezko kableak erabiltzen, desiragarriak ez diren efektuak agertzen baitira. Haien ordez transmisio-lerroak, planarrak batik-bat, erabiltzen dira: irrati-uhinen energia transmititzeko gai diren egitura geometriko zehatzak. Oro har, bi eroale eta haiek banatzen dituen dielektriko (isolatzaile) batek osatzen dituzte, eta, kokatzen diren moduaren arabera, hainbat transmisio-lerro mota sor daitezke. Era berean, eroale eta dielektriko horien propietateek transmisio-lerroaren ezaugarriak baldintzatuko dituzte.

Matrizea polimeroa den eta errefortzua zuntzak diren konpositeen kasuan beira-zuntza errefortzu erabilienetako bat da, besteak beste propietate mekaniko, kostu txiki eta erresistentzia termikoa dela eta (Ning et al., 2013). Gainera, karbono-zuntz bidez indartutako konpositeak ez bezala, isolatzaile elektrikoak dira: irrati-uhinen transmisiorako beharrezkoa den isolatzaile modura erabili daitezke. Hortaz, beira-zuntzen bidez indartutako polimeroak hari gabeko sentsoreak integratzeko konposite erabilgarriak izan daitezke. Besteak beste, konpositeen deformazioa neurtzeko tentsio-galgak (Groo et al., 2021) eta haize-hari gabeko sentsoreak (Hartwig et al., 2016) integratu dira.

Sentsoreen diseinu egokirako konpositearen propietate elektrikoak ezagutzea ezinbestekoa izango da, izan ere, konpositea bera etorkizuneko sentsorean uhinen transmisioa ahalbidetuko duen dielektrikoa izango da. Zehazki, beira-zuntzez indartutako polimero konpositeen  $\epsilon_r$  permitibitate elektriko erlatiboa ezagutzea izango da lan honen helburua, portaera elektrikoak deskribatzen duen parametro garrantzitsuenetako bat izanik uhinen hedapena baldintzatuko baitu. Hau da, permitibitate elektriko uhin-maiztasuneko gailu elektronikoen diseinuan kontuan hartu beharreko propietate giltzarria da. Helburu horretarako T erresonadorea erabiliko da, maiztasun jakin batzuk dituzten uhinertako permitibitate elektriko neurtzeko sentsorea, alegia.

## 2 Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Material dielektrikoen permitibitatea neurtzeko hainbat teknika daude, Venkatesh eta Raghavan autoreek (2005) eta Bussey autoreak (1967) burututako berrikuspenetan ikusi daitekeen modura. Horiertako batzuk irrati-maiztasunetan hainbat materialen propietate elektrikoak ezagutzeko erabili dira, besteak beste, ur-disoluzioak (Chretiennot et al., 2012) karakterizatzeko, produktu jangarrietan kontaminazioa detektatzeko (Shaji eta Akhtar, 2013) edota petrolio-olioak karakterizatzeko (Kulkarni eta Joshi, 2015).

Beira-zuntz bidez indartutako polimero konpositeen permitibitate erlatiboari dagokionez, gutxi dira haren inguruko informazioa ematen duten ikerketak. Chin et al. autoreek (2006) aurrera eramandako ikerketan permitibitate erlatiboa 4.9-5.0 artean kokatu dute. Beste ikerketa batzuek 4.18-4.26 tartean dagoela diote (Beziuk et al., 2019, 2021). Hala ere, kontuan eduki behar da beira-zuntz bidez indartutako polimero konpositeak sortzeko hainbat zuntz eta polimero erabili daitezkeela. Hortaz, konposite batetik bestera permitibitate erlatiboa aldatzea ez da harrizkoa. Horregatik garrantzitsua da etorkizunean sortuko diren sentsoreak txertatuko dituzten konpositeak karakterizatzea, aurrerantzean erabiliko diren materialak kontsideratuz.

## 3 Ikerketaren muina

Eremu elektriko bat material bati zuzentzerakoan, materialak energiaren zati bat islatu egiten du, beste bat haren azalean zehar transmititu egiten da, eta azken horren zati bat xurgatu egiten du. Material baten propietate dielektrikoek banaketa hori nola gertatzen den definitzen dute, eta haien deskriptore nagusietako bat  $\epsilon$  permitibitate elektriko da.  $\epsilon_r$  permitibitate erlatiboaren bidez kuantifikatzen da, haien arteko erlazioa hurrengo izanik

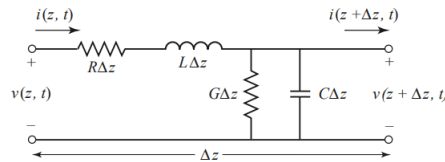
$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (1)$$

non  $\epsilon_0 \approx 8.8541878128 \cdot 10^{-12} F/m$  hutsaren permitibitatea den (NIST, 2019). Orokorrean material jakin baten permitibitatea ez da konstantea: tenperatura eta hezetasunaren arabera izan daiteke, besteak beste. Horretaz gain, aplikatutako eremu elektrikoaren maiztasunaren arabera ere izaten da. Hau da, transmisio-lerroetatik igaroko den irrati-uhinaren maiztasunaren arabera dielektrikoaren portaera ezberdina izango da, eta ondorioz maiztasun horri dagokion permitibitatea ezagutu behar da. Kasu honetan, beira-zuntzetan oinarritutako konpositeen karakterizazioa egiteko T erresonadoreak erabili dira.

### 3.1 T erresonadoreak

Irrati-uhinekin lan egiterako orduan transmisio-lerroen teoria erabiltzen da: transmisio-lerroen dimentsioak  $\lambda$  uhin-luzerarekin konparagarriak dira, eta ondorioz tentsio eta korronteen magnitude eta faseak lerroen puntu bakoitzeko balio ezberdin bat eduki dezakete. Transmisio-lerro bat 1 irudian azaltzen den bi eroaleen eskemaren bitartez adierazi daiteke, non  $R$  luzera unitateko eroaleen erresistentzia elektrikoa ( $\Omega/m$ ),  $L$  luzera unitateko eroaleen inductantzia (H/m),  $G$  eroaleen arteko luzera unitateko konduktantzia (S/m) eta  $C$  eroaleen arteko luzera unitateko kapazitantzia (F/m) diren.

#### 1. Irudia: Transmisio-lerro baten zirkuitu baliokidea (Pozar, 2011).



Zirkuituan zeharreko tentsio eta korronte uhinak 2 eta 3 ekuazioen bidez kalkulatu daitezke (Pozar, 2011)

$$v(z, t) = |V_0^+ \cos(\omega t - \beta z + \Phi_v^+) e^{-\alpha z} + |V_0^- \cos(\omega t + \beta z + \Phi_v^-) e^{+\alpha z} \quad (2)$$

$$i(z, t) = |I_0^+ \cos(\omega t - \beta z + \Phi_i^+) e^{-\alpha z} + |I_0^- \cos(\omega t + \beta z + \Phi_i^-) e^{+\alpha z} \quad (3)$$

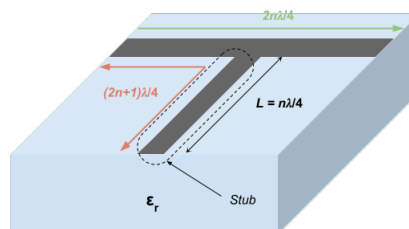
non:

- $e^{-\alpha z}$  eta  $e^{+\alpha z}$  terminoek  $+z$  eta  $-z$  noranzkoan uhinen hedapena adierazten dute, hurrenez hurren.
- $\omega = 2\pi f$  maiztasun angeluarra (rad/s) da.
- $\beta = \text{Im}(\sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)})$  propagazio konstantearen zati irudikaria da
- $\alpha = \text{Re}(\sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)})$  propagazio konstantearen zati erreala da.
- $\Phi_v^\pm$   $V_0^\pm$  tentsio konplexuaren fasea da.
- $\Phi_i^\pm$   $I_0^\pm$  korrante konplexuaren fasea da.

Ekuazio horren esanahia hurrengoa da: transmisio-lerroaren hainbat puntutan uhin-islapenak gertatuko dira, eta helburua uhina alde batetik bestera igarotzea izan arren, bi aldetara, hau da,  $z$  noranzko positiboan eta negatiboan hedatzen diren uhinak agertuko dira. Fenomeno horrek, ordea, hainbat aplikazio ditu, horien artean dielektrikoak maiztasun jakinetan karakterizatzeko T erresonadoreak.

T erresonadorea, 2 irudian erakusten den moduan, T letraren itxura duen 2-portuko transmisio-lerroa da, zirkuitu irekian bukatzen den stub paralelo bat duena.

#### 2. Irudia: T erresonadorea.





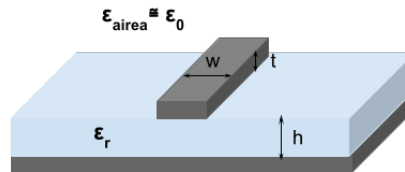
Stub-a transmisio-lerro nagusira mutur bakarra konektatuta duen transmisio-lerroa da, mutur askea zirkuitulaburra edo zirkuitu irekia izanik, eta uhin-luzera jakin baten laurdenaren multiploak neurtzea ahalbidetzen du (Fulford eta Wentworth, 2005): stub-aren luzera  $\frac{\lambda}{4}$ -ren multiplo bakoitia denean  $\lambda$  uhin-luzerako uhina stub-era igaroko da lerro zuzena jarraitu beharrean eta bertan islatu ondoren hasierako puntura iritsiko da. Aldiz, multiplo bikoitien kasuan stub-a ikusezin bihurtuko da eta uhin zehatz hori transmisio-lerroan zehar hedatuko da. Hortaz, hurrengo erlazio hauek ezartzea posiblea izango da

$$L = n \frac{\lambda}{4} = n \frac{c}{4r_r \sqrt{\epsilon_e}} \rightarrow \epsilon_e = \left( \frac{nc}{4Lf_r} \right)^2 \quad (4)$$

non  $c$  hutseko argiaren abiadura,  $f_r$  erresonantzia maiztasuna eta  $\epsilon_e$  permitibitate efektiboa diren. 3.3 atalean azalduko den moduan, irrati-maiztasunetan neurketak egiteko erabiltzen diren gailuetan uhinen hedapenaren informazioa maiztasunarekiko lortzen da, eta horregatik kalkuluak egiteko orduan  $\lambda$ -rekin lan egin beharrean  $f$  maiztasunarekin lan egiten da, zehazki uhin-luzera jakinak neurtzean agertzen diren erresonantziei dagokien  $f_r$ -rekin.

Bestalde, aipatu den moduan, transmisio-lerroak diseinatzeko orduan, hau da, irrati-uhinen hedapena ahalbidetuko duten zirkuituak osatzeko orduan, eroaleak eta haiek banatzen dituen dielektrikoa kokatzeko hainbat modu daude. Horietako bat *microstrip* izenez ezagutzen da, eta 3 irudiak erakusten duen moduan, eroale-dielektriko-eroale geruzetaz osatua dago. Kasu horretan, uhinen hedapenari eragiten diona ez da soilik eroaleen artean kokatzen den dielektrikoa izango, aireak ere eragingo baitio. Horregatik  $\epsilon_e$  permitibitate efektiboa hartzen da kontuan, airearen efektua aintzat hartzen duena.

### 3. Irudia: Microstrip motako transmisio-lerroa.



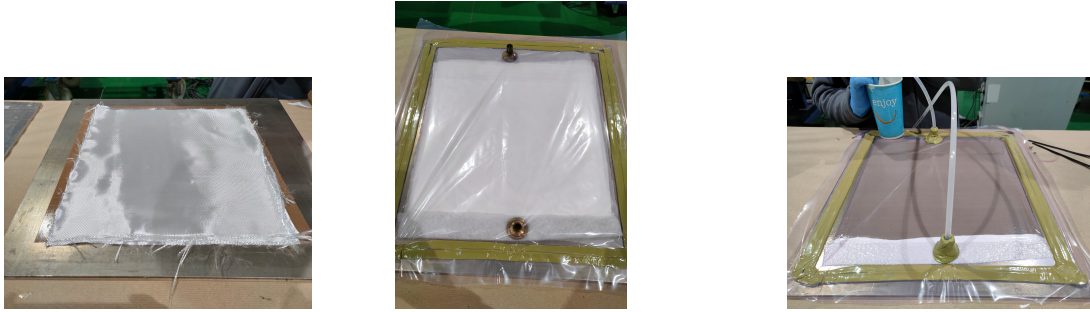
Hainbat hurbilketa aurki daitezke  $\epsilon_e$  eta  $\epsilon_r$ -ren arteko erlazioa estimatzeko, horien artean Hammerstad eta Jensen autoreek (1980) eta Fulford eta Wentworth autoreek (2005) proposatutakoak zehatzenak izanik. Erlazio horiek transmisio-lerroaren dimentsioen arabekoak izango dira, batez ere  $w$  eta  $h$ -ren eragina nabarmena izango delarik.

### 3.2 Fabrikazioa

T erresonadoreak konpositearen gainean tinta bidezko serigrafia erabiliz inprimatu dira. Hortaz, fabrikazioak bi atal nagusi eduki ditu. Lehenik eta behin konpositearen fabrikazioa, eta ondoren diseinu zehatzen inprimatzea.

Zuntz bidez indartutako konpositeak egiteko hainbat prozedura jarraitu daitezke, konpositea osatzen duten osagaien arabera. Kasu honetan erretxina erabili da polimero moduan eta beira-zuntzak izan dira errefortzua. Lortu nahi den lodieraren arabera beira-zuntz oihalki edota geruza kopuru zehatza jartzen da bata bestearen gainean erretxinarekiko desmoldekatzailea den plaka baten gainean. Ondoren, poltsa zigilatzaile batekin inguratzen da. Poltsa horri alde batetik huts-ponpa konektatzen zaio, eta bestetik erretxina hornitzaile bat. Horrela, hutsaren laguntzarekin erretxina poltsa osoan zehar zabaltzen da zuntzak inpregnatuz. Azkenik, hornitzailea poltsatik baztertzen da eta huts-ponpa deskonektatzen da, eta poltsaren hutsa mantenduz labera sartzen da konpositea eratu dadin. 4 irudian beira-zuntzak, huts-poltsa eta erretxina poltsan zehar zabaltzen erakusten dira.

#### 4. Irudia: Konpositeak fabrikatzeko prozedura.



Behin konpositea edukita, diseinuak serigrafia bidez inprimatu dira. Horretarako diseinuaren marrazkia duen txantilo zehatza zuntzez osatutako pantaila porotsu batera atxikitzen da, pantailaren azpian konpositea egonik eta gainean tinta. Espatula bat erabiliz tinta zabaltzen da pantailan zehar presioa eginez, eta txantiloak libre uzten dituen zatietatik tinta igarotzen da, diseinua konpositean agertuz. Zehazki zilarrezko tinta eroalea erabili da kasu honetan.

### 3.3 Neurketa

Irrati-maiztasunetan errazagoa da potentziak neurtzea korrante eta tentsioak neurtzea baino, eta helburu horretarako *Vector Network Analyzer (VNA)* izeneko gailuak erabiltzen dira. Neurtu edota karakterizatu nahi den zirkuitura maiztasun ezberdinetako potentzia-uhinak igortzen dituzte, erantzuna jasotzeko gai izanik. Erantzun hori dispersio parametro edo *S*-parametroen bidez kuantifikatzen da:

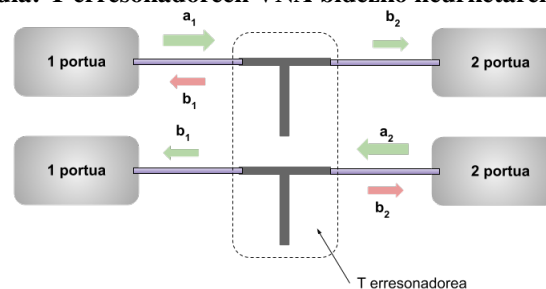
$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \quad (5)$$

*S* matrize horretan

- $S_{ii} = \frac{b_i}{a_i}$  islapen koefizienteak *i* portuak igorritako  $a_i$  potentzia uhinaren zein zati jasotzen den *i* portuan -  $b_i$  - adierazten du.
- $S_{ij} = \frac{b_j}{a_i}$  islapen koefizienteak *i* portuak igorritako  $a_i$  potentzia uhinaren zein zati jasotzen den *j* portuan -  $b_j$  - adierazten du.

Neurketa, hortaz, 5 irudiko eskeman erakusten denaren modukoa izango da. T erresonadorearen oinarriak kontuan hartuz, *S*-parametroetan hainbat erresonantzia ikusi behar dira. Zehazki,  $\frac{\lambda}{4}$ -ren multiplo bakoitiei dagokien maiztasunetan uhinak idealki guztiz islatuko dira,  $S_{12}$  eta  $S_{21}$ -n balio minimoak emango direlarik. Alderantziz,  $\frac{\lambda}{4}$ -ren multiplo bikoitiei dagokien maiztasunetan transmisio osoa gertatuko da,  $S_{11}$  eta  $S_{22}$ -n minimoak agertuz.

#### 5. Irudia: T erresonadorearen VNA bidezko neurketaren eskema.



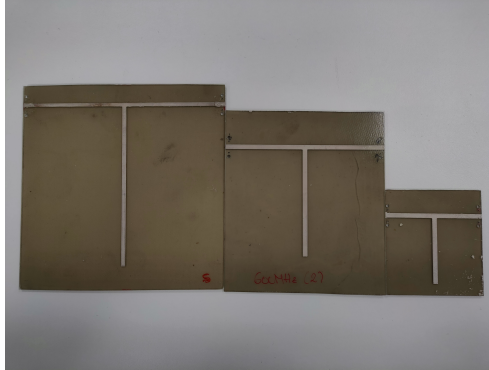
### 3.4 Diseinua eta emaitzak

Konpositetarako erabiltzen diren beira zuntzen permitibitate erlatiboa 6.2 ingurukoa da (Mirotznik et al., 2011), eta erretxinarena 3.6 ingurukoa ezaugarri orrien arabera (ToolBox, 2010), hortaz, konpositearena tartean egongo da.

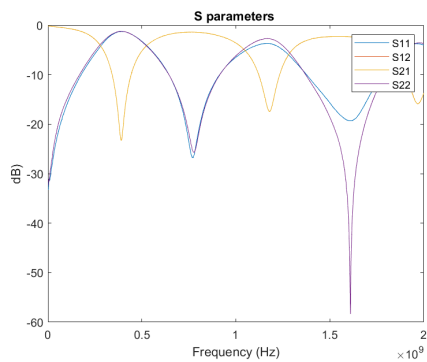
Hala ere, balio zehatza ezezaguna izanik, itsu-itsuan  $h=2.5\text{mm}$ -ko konposite lagin batean  $L=80\text{mm}$ -ko T erresonadore bat inprimatu da, permitibitatearen balioaren zantzu bat izateko. Bertatik balioa  $\epsilon_r \approx 4.45$  dela estimatu da.

Ondoren,  $h \approx 1.4\text{mm}$ -ko konposite berri bat fabrikatu da, eta 6 irudian erakusten diren hiru diseinu inprimatu dira  $L=41\text{mm}$ ,  $68.2\text{mm}$  eta  $101.9\text{mm}$  luzerakoak, 400MHz, 600MHz eta 1GHz-tan konpositea karakterizatzeko asmoz. Neurtutako S-parametroak 7, 8 eta 9 irudietan erakusten dira.

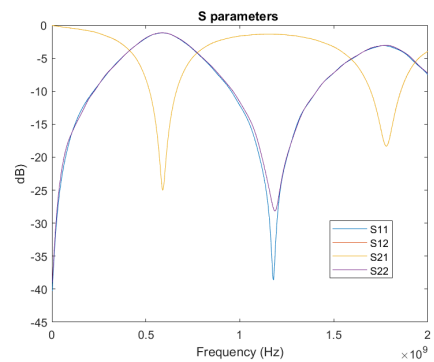
**6. Irudia: Ezkerretik eskubira: 400MHz, 600MHz eta 1GHz-ko erresonadoreak.**



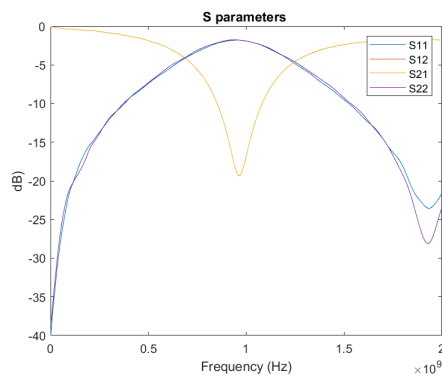
**7. Irudia: 400MHz-ko T erresonadorean neurtutako S-parametroak.**



**8. Irudia: 600MHz-ko T erresonadorean neurtutako S-parametroak.**



**9. Irudia: 1GHz-ko T erresonadorean neurtutako S-parametroak.**



$S_{12}$ -ren lehen erresonantziatik abiatuz, beira-zuntz bidez indartutako polimero konpositeen permitibitate erlatiboa

$\varepsilon_r \in [4.50, 4.81]$  dagoela iradokitzen dute 1 taulan erakusten diren emaitzek.

**1. Taula: T erresonadoretatik lortutako emaitzak.**

$f$	400MHz	600MHz	1GHz	
$f_r (MHz)$	389.612	589.412	965.036	
$\varepsilon_e$	3.5568	3.4763	3.5881	
$\varepsilon_r$	Hammerstad-Jensen	4.81	4.58	4.74
	Fulford	4.75	4.50	4.60

Aipatu bezala permitibitateak maiztasunarekiko menpekotasuna eduki arren, maiztasun batetik bestera dagoen desberdintasunaren atzean hainbat arrazoi egon daitezke. Alde batetik kontuan eduki behar da konpositea fabrikatzeko jarraitzen den prozeduraren bidez ezin dela  $h$  lodiera guztiz kontrolatu. Hau da, konposite bat fabrikatzean gerta daiteke lodiera ezberdina izatea haren puntu ezberdinetan. Hortaz, estimazioak egiteko  $h = 1.4\text{mm}$  kontsideratu den arren, balio hori aldakorra izan daiteke. Bestalde, kontuan hartu behar da serigrafia eskuzko prozesu bat dela: zaila da bi inprimaketa berdin egitea, eta inprimatutako tinta-kopurua diseinu batetik bestera alda daiteke.

#### 4 Ondorioak

Beira-zuntz bidez indartutako polimero konpositeen propietate elektrikoak ezagutzeko lehen pausoa izan da lan honen helburua. Konposite horien permitibitatea  $\varepsilon_r \in [4.50, 4.81]$  tartean kokatzea posiblea izan da, etorkizuneko diseinuetara begira hartuko diren erabakiak baldintzatuko dituelarik. Fabrikazio prozesuaren ezaugarriak direla eta emaitzak ez dira eztabaidaekin, baina nahikoak dira abiapuntu eta balio orientagarri gisa.

#### 5 Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Tinta bidez inprimatutako eta konpositeetan txertatutako hari gabeko sentsoak sortzea izanik helburua, hainbat dira egiteke daudenak. Konpositeen permitibitateari dagokionez, lortutako emaitza hauetatik abiatuta azterketa gehiago egitea posiblea da, lagin gehiago sortuz. Hala ere, batez ere konpositeen fabrikazioa lan artetsua den heinean, lagin kopurua mugatua dago. Permitibitateaz gain badaude beste propietate elektriko batzuk, eta horiek neurtzea ere interesgarria izan liteke, etorkizuneko diseinuak hainbeste baldintzatuko ez dituzten arren.

Karakterizazioa alde batera utzita, hurrengo pausua sentso horiek osatzen dituzten osagaien analisia egi-tea izango da. Izan ere, tinta bidez inprimatutako osagaien inguruko hainbat ikerketa aurkitu daitezken arren, gutxi dira horiek konpositeetan txertatzearen efektu eta ondorioen inguruko azterketak.

#### Erreferentziak

- Alahnomi, R. A., Zakaria, Z., Yussof, Z. M., Althuwayb, A. A., Alhegazi, A., Alsariera, H., & Rahman, N. A. (2021). Review of recent microwave planar resonator-based sensors: Techniques of complex permittivity extraction, applications, open challenges and future research directions. *Sensors*, 21(7):2267.
- Beziuk, G., Baum, T., Ghorbani, K., & Nicholson, K. (2021). Investigation of a composite embedded rf passive devices. In *2021 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, 79–81. IEEE.
- Beziuk, G., Baum, T. C., Ghorbani, K., & Nicholson, K. J. (2019). Rf signal multiplexer embedded into multi-functional composite structure. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 67(12):4935–4943.
- Böger, L., Sumfleth, J., Hedemann, H., & Schulte, K. (2010). Improvement of fatigue life by incorporation of nanoparticles in glass fibre reinforced epoxy. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(10):1419–1424.
- Bussey, H. (1967). Measurement of rf properties of materials a survey. *Proceedings of the IEEE*, 55(6):1046–1053.
- Chin, W. S. et al. (2006). Binary mixture rule for predicting the dielectric properties of unidirectional e-glass/epoxy composite. *Composite structures*, 74(2):153–162.

- Chretiennot, T., Dubuc, D., & Grenier, K. (2012). A microwave and microfluidic planar resonator for efficient and accurate complex permittivity characterization of aqueous solutions. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 61(2):972–978.
- Friedrich, K. & Almajid, A. A. (2013). Manufacturing aspects of advanced polymer composites for automotive applications. *Applied Composite Materials*, 20:107–128.
- Fulford, A. R. & Wentworth, S. M. (2005). Conductor and dielectric-property extraction using microstrip tee resonators. *Microwave and Optical Technology Letters*, 47(1):14–16.
- Groo, L., Nasser, J., Inman, D. J., & Sodano, H. A. (2021). Transfer printed laser induced graphene strain gauges for embedded sensing in fiberglass composites. *Composites Part B: Engineering*, 219:108932.
- Hammerstad, E. & Jensen, O. (1980). Accurate models for microstrip computer-aided design. In *1980 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 407–409. IEEE.
- Hartwig, M., Gaitzsch, M., Großmann, T., Heinrich, M., Kroll, L., Gessner, T., & Baumann, R. (2016). Investigation on an inkjet printed passive sensor for wireless ice detection on wind rotor blades. *Journal of Imaging Science and Technology*, 60(4):40402–1.
- Kulkarni, S. & Joshi, M. S. (2015). Design and analysis of shielded vertically stacked ring resonator as complex permittivity sensor for petroleum oils. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 63(8):2411–2417.
- Mirotnik, M. S., Yarlagadda, S., McCauley, R., & Pa, P. (2011). Broadband electromagnetic modeling of woven fabric composites. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 60(1):158–169.
- Ning, N., Zhang, W., Yan, J., Xu, F., Wang, T., Su, H., Tang, C., & Fu, Q. (2013). Largely enhanced crystallization of semi-crystalline polymer on the surface of glass fiber by using graphene oxide as a modifier. *Polymer*, 54(1):303–309.
- NIST (2019). 2018 CODATA value: vacuum electric permittivity.
- Pa, P., McCauley, R., Larimore, Z., Mills, M., Yarlagadda, S., & Mirotnik, M. S. (2015). High frequency characterization of conductive inks embedded within a structural composite. *Smart Materials and Structures*, 24(6):065010.
- Pozar, D. M. (2011). *Microwave engineering*. John Wiley & Sons, 4 edition.
- Pérez-Márquez, A., Maudes, J., Bilbao, L., Vaquero, C., Villaverde, H., Adarraga, O., Bustero, I., Obieta, I., & Gayoso, J. (2023). Mechanical properties analysis of continuous fiber composites with embedded printed electronics. *Materiales Compuestos*.
- Sairajan, K., Aglietti, G., & Mani, K. (2016). A review of multifunctional structure technology for aerospace applications. *Acta astronautica*, 120:30–42.
- Shaji, M. & Akhtar, M. J. (2013). Microwave coplanar sensor system for detecting contamination in food products. In *IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference*, 1–4.
- Sharma, S. (2021). *Composite Materials: Mechanics, Manufacturing and Modeling*. CRC Press.
- ToolBox, E. (2010). Relative permittivity - the dielectric constant. [https://www.engineeringtoolbox.com/relative-permittivity-d\\_1660.html](https://www.engineeringtoolbox.com/relative-permittivity-d_1660.html).
- Venkatesh, M. & Raghavan, G. (2005). An overview of dielectric properties measuring techniques. *Canadian biosystems engineering*, 47(7):15–30.
- Xiao, Y., Qiao, W., Fukuda, H., & Hatta, H. (2016). The effect of embedded devices on structural integrity of composite laminates. *Composite Structures*, 153:21–29.

## 6 Eskerrak eta oharrak

Lan hau doktoretza tesi baten barruan kokatzen da, horren hasiera izanik. Aurrera eramateko ezinbestekoak izan dira bai EHU-UPV unibertsitateak bai Tecnalia ikerkuntza zentroak eskainitako baliabideak, eta baita ere tutore eta hainbat langileen laguntza.