

eman ta zabal zazu



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

ZIENTZIA  
ETA TEKNOLOGIA  
FAKULTATEA  
FACULTAD  
DE CIENCIA  
Y TECNOLOGÍA



Gradu amaierako lana  
Ingeniaritza Elektronikoko gradua

## Korrosioa monitorizatzeko sensore baten garapena

Egilea:

Mireia Sainz Menchón

Zuzendariak:

Javier Alonso Valdesueiro eta

Estibaliz Asua Uriarte

© 2021, Mireia Sainz Menchón

Leioa, 2021eko ekainaren 17a

# Gaien Aurkibidea

<b>1</b>	<b>Sarrera</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Sistema osoaren diseinua</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Sentsorearen diseinu eta garapena</b>	<b>5</b>
3.1	Erabilitako teknikak . . . . .	5
3.1.1	Perfilometria mekanikoa . . . . .	5
3.1.2	Fotolitografia . . . . .	6
3.1.3	Elektrodeposizioa . . . . .	8
3.2	Sentsorearen garapena . . . . .	9
3.3	Sentsoreen karakterizazioa . . . . .	12
<b>4</b>	<b>NFC bidezko komunikazioa</b>	<b>15</b>
4.1	Antenaren garapen eta adaptazioa . . . . .	15
4.2	Sistemaren implementazio eta frogapena . . . . .	18
4.2.1	LM75A temperatura sentsorea . . . . .	19
4.2.2	ATTiny85-aren programazioa . . . . .	19
4.2.3	Zirkuituaren diseinua . . . . .	21
4.2.4	Komunikazioaren frogapena . . . . .	24
<b>5</b>	<b>Sentsorearen seinalearen egokitzapen etapa</b>	<b>25</b>
5.1	Metodoaren deskribapena . . . . .	25
5.2	Erresistentzia aldaketa txikiak irakurtzeko moldaketa . . . . .	27
5.3	Mikrokontrolagailuaren programaketa eta frogapena . . . . .	30
5.4	Egokitzen etaparen diseinua . . . . .	32
5.5	Egokitze etaparen frogapena korrosio sentsorearekin . . . . .	34
<b>6</b>	<b>Proposatzen den konponketa</b>	<b>35</b>
<b>7</b>	<b>Ondorioak eta etorkizunerako proposatzen den norabidea</b>	<b>38</b>
<b>A</b>	<b>Elektrodeposizioaren azterketa</b>	<b>40</b>
A.1	Geruzaren lodieraren elektrodeposizioaren iraupenarekiko menpekotasuna . . . . .	40
A.2	Geruzaren lodieraren korrante-dentsitatearekiko menpekotasuna . . . . .	41
A.3	Geruzaren morfologiaren menpekotasuna depositaturiko geruzaren azal- raren menpe . . . . .	42
<b>8</b>	<b>Bibliografia</b>	<b>43</b>

# 1 Sarrera

Korrosioa material batek ingurumen kondizioen ondorioz pairatzen duen narridura-prozesua da. Apurkako prozesua da eta erreakzio kimiko eta elektrokimikoen bidez garatzen da. Korrosioak material mota ugari eragin diezaike: material zeramikoetan eta polimeroetan ageri da, adibidez; baina, metal eta aleazioetan eragiten ditu ondorio bortitzenak. Hezetasunaren ondorio den burdinaren herdoiltzea korrosioaren adibide aipagarriena da.

Korrosioari aurre egiteak eragiten dituen galera ekonomikoa mundu mailako arazoa da: NACE International-ek 2016ean argitaratutako ikerketaren arabera, 2013an munduan korrosioari aurre egiteko erabilitako diru kopurua 2.3 trilioi dolar izan zen, horrek urte hortako barne-produktu gordin globalaren %3.4-a osatzen du [1]. AEB-en kasuan, Federal Highway Administration-ek (FHWA) eginiko ikerketaren arabera, korrosioak eragindako diru gastua AEB-ko barne-produktu gordinaren %3.1 izan zen 1998ean [2]. Txinaren kasuan, ordea, 2015ean korrosioak eragindako diru galera herrialdeko barne-produktu gordinaren %3.4-koa izan zela estimatu da [3]. Antzeko ikerketak egin dira beste herrialde batzuen egoerak kontuan harturik, eta nahiz eta ikerketen prozedura eta emaitzak berdinak ez izan, ikerketa guztiek herrialdeetan korrosioak eragindako kostuak herrialdeen barne-produktu gordinaren %1 eta %5-aren artean kokatzen dela adierazten dute [3].

Kostu ekonomiko izugarriak sortzeaz gain, korrosioaren kudeaketa txarrak hainbat ezbehar ekologikoren erruduna ere izan da. Horren adibidea da Erika petrolio-ontziaren ondoratzea Frantziako kostan 1999ean. Istripu horretan 19000 tona petrolio isuri ziren itsasora, 1998 urtean globalki isuritako petrolio kantitate osoa bezain bestekoa izan zen isuria. Ondoratze hori korrosioak eraginda izan zen [4].

Korrosioak era askotan eragiten duenez gizartean, ezin dira beti korrosioa eta horren ondorioak guztiz deuseztatu. Egin daitekeena, ordea, prebentzio-teknologiak garatu eta aplikatzea da, korrosioaren eraginak arindu ditzaketan teknologiekin batera. Prebentzio-neurrien garapenak ez du soilik kostu ekonomikoen beherapena bermatzen, gizartea eta ingurugiroa ere babesten ditu.

Korrosioaren eragin bortitzenak pairatzen dituen metaletako bat altzairua da. Altzairua eta horren aleazioak oso erabiliak dira itsas inguruko aplikazioetan haien prezio baxua eta eskaintzen dituzten propietate mekaniko bikainegatik. Itsas ura, ordea, hainbat materialen kasuan, naturan aurkitu daitekeen elektrolito korrosiboenetarikoa da. Itsas uraren korrosio-ahalmena hainbat parametroren arabera da: disolbaturiko oxigeno kopurua, temperatura, gazitasuna, emariaren abiadura edota aktibitate biologikoa, esaterako [5]. Itsas uraren izaera hori dela eta, itsas inguruko altzairuaren erabilera asko zailtzen da, altzairuak korrosioaren aurkako erresistentzia oso baxua baitu. Itsas inguruan erabiltzen den altzairua erraz herdoiltzen da, eta modu horretan, metalak bere propietate mekaniko karakteristikoak galtzen ditu.

Arazo horri aurre egiteko estaldurak dira konponbide eraginkor eta ohikoenak: haien bidez altzairua kanpo ingurugiro kaltegarritik isolatu egiten da. Estaldura moten artean zinka oso erabilia da korrosiaren aurka ematen duen babes eraginkorra dela eta [6, 7]. Zink estaldurak sortzeko moduetako bat galvanizazioa da; *hot-dip* galvanizazio bidez, esaterako, zink estaldura eraginkor eta ekonomikoak eratu ahal dira [8].

Hala ere, zink-estalduradun altzairuak korrosioaren aurrean altzairu soila baino jarrrera hobea badu ere, ez ditu korrosioaren eraginak guztiz saihesten. Egia da denbora gehiago behar duela kalteak azaleratzeko, baina jarraitzen du lehenago edo beranduago ondatzen [6, 7]. Hori dela eta, estaldura horien inguruan ikertu eta informazioa garatzea oso garrantzitsua da, baita haien korrosio prozesuaren jarraipena egitea ere.

Materialen korrosioa monitorizatzea eta horren eraginak saihesteak gizartean garrantzia handia duenez, korrosio maila neurtzeko gai diren hainbat sensore eta detektzio-teknika garatu dira azken urteotan.

Erabilitako metodo ohikoena laginen masa-galeraren jarraipena egitea da. Korrosioak eragindako metal-lagin mehen masa-galera kuartzo-kristal mikrobalantza bidez monitorizatu izan da [9, 10]. Baina metodo honek ez du kontuan hartzen laginak pairatu ditzakeen beste masa-aldaketa batzuk: laginaren gainean hautsa pilatu daiteke edota laginak hezetasuna absorbitu dezake.

Tresna eta metodo optikoen erabilera ere hedatua da korrosioa monitorizatzean. Zuntz optikoen bidezko detektzio-sistemak dira horren adibide [11, 12].

Test ultrasonikoen ere badaukate haien lekua korrosioa monitorizatzeko moduen artean. Teknika horien abantaila nagusia laginaren egoera aldatzen ez dutela da, ez dira teknika inbaditzaileak. Uhin akustiko bat laginean zehar bidaltzen da, eta gainazaletik edo barne inhomogeneotasunetatik datozen islapenak jasotzen dira. Islapen horiek laginaren korrosioaren inguruko informazioa ematen dute [13].

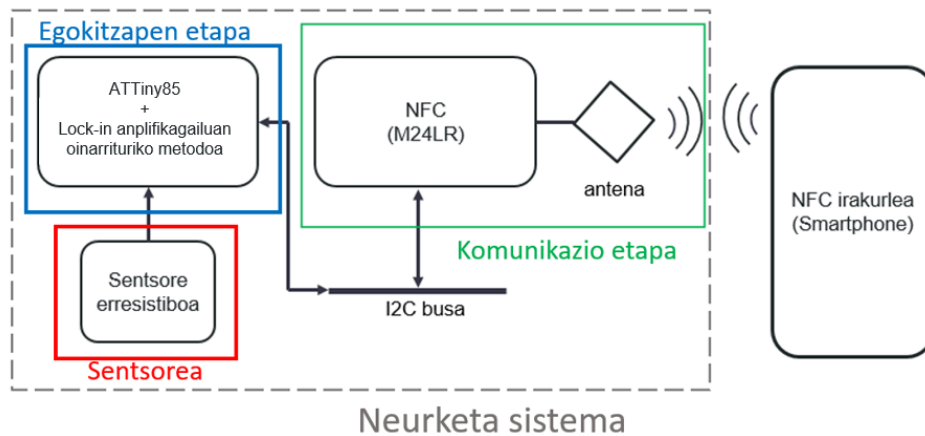
Metodo erresistikorrak korrosioa monitorizatzeko metodo erabilienak dira [14]. Metal-zko sensore baten erresistentzia hazkuntza neurtu ohi da, korrosioak sensore horretan eragin eta bere diametroa txikitzen baitu, erresistentzia handituz. Metodo hau ia edozein inguru edo kondizioetan erabili daiteke, eta, gainera, metal-galeraren neurketa ahalbidetzen du.

Lan honen helburu nagusia zink geruza batean oinarritutako korrosio-sensore erresistikor bat garatzea da. Sensorea erresistikorra izanik, erresistentzia aldaketa neurtuko duen egokitzapen etapa garatzea, eta neurketa mugikor baten bitartez irakurtzen ahalbidetuko duen komunikazio etapa diseinatzea ere izango dira helburu.

Memoriaren antolaketari dagokionez, 2. atalean lan honetan garatuko den sistema aurkeztu eta horren deskribapena emango da. Jarraian, 3. atalean korrosio-sensoreaz hitz egingo da, horretarako erabili diren teknikak azaldu eta sensorea garatzeko emandako pausoak aurkeztuko dira. Horren ostean, garatutako sensore ezberdinen karakterizazioa egingo da. Komunikazio etapa 4. atalean landuko da, NFC teknologia aurkeztu, inplementatu eta frogatu egingo da. 5. atalean egokitzapen etapa azalduko da, erabilitako metodoa deskribatu, metodoa inplementatu eta etapa frogatuko da. Frogapenean lorturiko emaitzen ondorioz, egokitzapen etapa birplanteatu behar izan da, eta etaparen diseinu berria 6. atalean proposatu eta bi etapak biltzen dituen zirkuitua aurkeztuko da. Lan honen ondorioak eta etorkizunerako planteatzen den norabidea 7. atalean bildu dira. Azkenik, elektrodeposizioaren azterketa laburra egin da, A atalaren ikus daitekeena.

## 2 Sistema osoaren diseinua

Sarreran esan bezala, lan honen helburua korrosio-sentsore erresistikor bat diseinatzea da, konkretuki zink geruza batez osaturikoa. Sentsorea erresistikorra izanik, erresistentzia aldaketa neurtzeko egokitzapen etapa eta neurketa mugikor batera transmititzeko komunikazio etapa ere gehituko zaizkio (ikus 1. irudia). Gainera, sentsorea, egokitzapen etapa eta komunikazio etapa substratu flexiblean jartzeko aukera ere aztertuko da.



Irudia 1: Sentsorearen erresistentzia aldaketa neurtzeko eta datuak eskuratzeko erabiliko den sistemaren eskema.

Sentsorea kanal edo pista luze batez osaturik egongo da, eta erresistentzia aldaketa neurtu ahal izateko terminalak egongo dira pistaren muturretan. Pista bi materialez osaturik egongo da, oinarria kobrezkoa izango da, eta horren gainean zinka depositatuko da. Korrosioa dela eta, zink geruza mehetzen joango da, bukaeran kobrea soilik utziz. Modu horretan, korrosioak sentsorean erresistentzia aldaketa bat eragingo du, zink geruza mehetu edo desagertzean erresistentzia aldatuko baita. Bestetik, aipaturiko kobre eta zinkeko pista substratu baten gainean egongo da.

Behin sentsorea garatuta, sentsorearen erresistentzia-aldaketa detektatu, neurtu eta komunikatuko duten etapen diseinua egin da. Etapa horiek bi dira: lehenengoak sentsorearen erresistentzia-aldaketa neurtu eta digitalizatu behar du, horretarako miliohm-ak neurtzeko gai den zirkuitua inplementatu da [15] erreferentzian dagoen sistema oinarritzat hartuta. Bigarren etapak neurketaren *smartphone* bidezko irakurketa ahalbidetzen du NFC teknologia erabiliz. Aipaturiko bi zati horiek banandurik garatu dira horien funtzionamendua ziurtatzeko, eta, ondoren, biak batu dira sentsorean aplikatu ahal izateko.

Erresistentzia-aldaketa neurtzeko beharrezkoa den etapa ATTiny85 [16] mikrokontrolagailuan oinarrituko da, modu errazean programatu daitekeena Arduino bat erabiliz. Erabiliko den metodoa lock-in amplifikagailu digitaletan oinarritzen den metodoa izango da [15]. Mikrokontrolagailuak, diseinatuko den zirkuitu egokitzailearekin batera, erresistentzia aldaketa detektatzeaz gain, komunikazio etapari informazioa transmitituko dio. Bestela esanda, nahiz eta mikrokontrolagailua egokitze etaparen oinarria izan, komunikazio etaparen ere funtzio garrantzitsua izango du, egokitze etaparen bitartez lorturiko informazioa komunikazio etapari pasako baitio.

Sentsorearen neurketa sistematik atera ahal izateko eremu-hurbileko batera gabeko komunikazioa (NFC, *Near field communication*) erabiliko da. NFC sistemek aurkezten duten abantaila nagusienak pila edo bateriarik behar ez izatea eta *smartphone* baten bidez datuen irakurketa egin ahal izatea dira. Hau inplementatzeko M24LR64E-R mikrotxipa erabiliko da, aurretik aipaturiko ATtiny85 mikrokontrolagailuarekin I2C busaren bidez komunikatzen dena.

Hurrengo ataletan sistemaren parte bakoitza nola garatu den azalduko da.

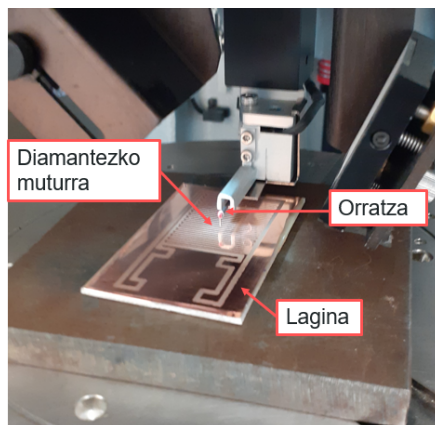
## 3 Sentsorearen diseinu eta garapena

Atal honetan sentsore erresistiboa nola diseinatu eta garatu den azalduko da. Horretarako, lehendabizi, erabilitako teknikak azalduko dira, ondoren sentsorearen garapenaz hitz egin ahal izateko. Garatutako sentsore ezberdinak aurkeztu eta karakterizatu ere egingo dira.

### 3.1 Erabilitako teknikak

Sentsorea garatzeko erabili diren prozedura edota tresnak perfilometria mekanikoa, polimero fotoerresistikorren bidezko fotolitografia eta elektrodeposizioa dira. Sentsorearen garapenaz hitz egin aurretik horien azalpena hurrengo lerroetan emango da.

#### 3.1.1 Perfilometria mekanikoa



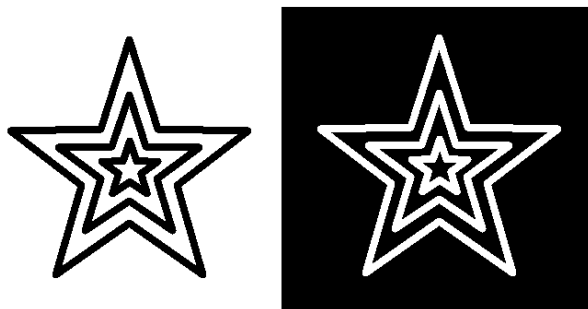
Irudia 2: Dektak150 perfilometroaren bitartez lagin baten kobre geruzaren lodieraren neurketaren argazkia.

Teknika honen bidez gainazal baten perfil topografikoaren zenbait ezaugarri azter daitezke, hala nola zimurtasuna, laginaren gainazalean agertzen diren zimur eta zuloen sakonera edo gainazal mehe baten lodiera. Perfilometroaren elementu garrantzitsuenak diamantezko muturra duen orratz bat da, aztertu nahi den gainazalean zehar linealki desplazatzen dena. Desplazamenduan zehar muturrak izandako aldatuta bertikalak neurketa-sistema batek detektatzen ditu eta perfilometroak desplazamenduaren neurria ematen du. Lan honetan Dektak150 perfilometroa erabili da sentsorea osatzen duten kobre eta zink geruzen lodiera neurtzeko (ikus 2. irudia).

### 3.1.2 Fotolitografia

Fotolitografia industria elektronikoa zirkuitu inprimatuak eta gailu erdieroaleak sortzeko erabiltzen den tekniketako bat da. Zirkuitu inprimatuak garatzerakoan, fotolitografia substratu ez-eroale batez eta gainazal eroale batez osaturiko xafletan aplikatu ohi da, eta sortu nahi den zirkuituaren diseinua substratuaren gaineko material eroalera transferitzen du. Lan honetan erabili den teknika polimero fotoerresistikorren bidezko fotolitografia izan da [17]. Teknika hori erabiltzea erabaki da bere erraztasunarengatik, material espezializaturik behar ez delako eta teknika merkea delako (polimero fotoerresistikorraz osatutako geruza itsaskorra 15 €/m<sup>2</sup>-an saltzen da, gutxi gorabehera).

Polimero fotoerresistikorra argi ultramorearekin argitzean gogortu egiten da. Aipaturiko xafletan gainazalean itsatsita badago, gogortzean material eroalea babestu eta isolatu egiten du. Polimeroaren ezaugarri hori da fotolitografiaren gakoa, zeren eta xafleta azido edo substantzia korrosibo batean murgiltzen bada, polimeroak babesten ez duen material eroalea desegingo da; eta babesturik dagoena, ordea, substratuaren gainean mantenduko da. Egileak polimeroaren zein zati gogortu aukeratu dezake maskara bat erabiliz, maskarak argi ultramorearen pasatzen utziko du polimeroa gogortu nahi den lekuan, eta polimeroa bigun mantendu nahi den lekuan ez du argirik pasatzen utziko. Hori horrela izanik, transferitu nahi den diseinuaren irudi negatiboa duen maskara erabilita, egileak nahi duen diseinua materialera transferitzeko gai izango da (ikus 3. irudia).



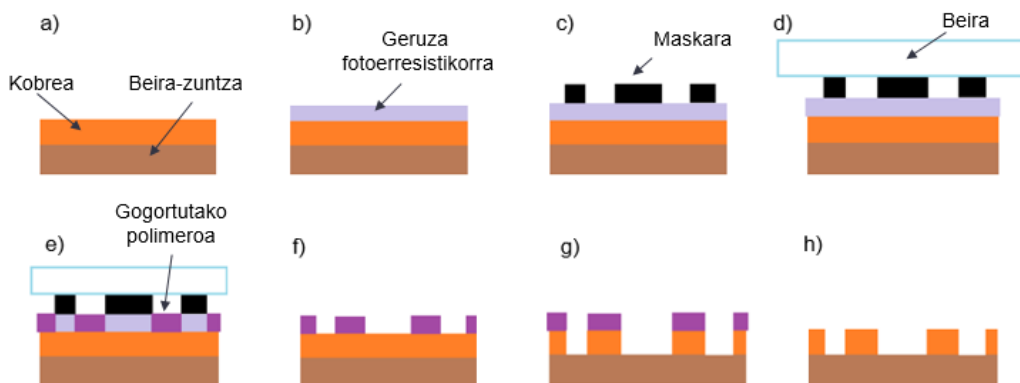
Irudia 3: Ezkerrean marrazki baten irudi positiboa ageri da, eskubian, ordea, irudi negatiboa. Fotolitografiaren bitartez gainazal eroalera ezkerreko irudia transferitu nahiko balitz, erabili beharreko maskara eskubiko irudia izango litzateke.

Sentsorea sortzeko kobrez estalitako beira-zuntz xafalak erabili dira, kobre geruzaren lodiera 35  $\mu\text{m}$  izanik. Kasu honetan, substratua beira-zuntza izan da, eta horren gainean kobrezko zirkuitua sortu ahal izan da. Aplikatutako fotolitografia 8 pausutan banatu daiteke:

1. Kobre-gainazala eskuz lixatzen da P80, P500, P1200 eta P2500 motako lixak erabiliz. Horrek kobre-gainazalaren lodiera mehetzeaz gain, gainazala leundu ere egiten du. Gainazala geroz eta leunagoa izan, orduan eta hobeto itsatsiko zaio geruza fotoerresistikorra. Gainera, kobre-gainazala etanolez eta azetonaz garbitu da gainazalean egon daitezkeen zikinkeria eta koipeak kentzeko.
2. Kobre-gainazalaren gainean polimero fotoerresistikorraz osaturiko geruza itsaskorra egokitzen da (ikus 4b irudia). Eraitzen egokitasuna bermatzeko, kobre-gainazala

eta geruza fotoerresistikorraren artean zimur edota burbuilarik ez egotea oso garrantzitsua da. Hori dela eta, kobre gainazala eta geruza fotoerresistikorraren arteko itsaspena hobetzeko asmoz, aire beroa aplikatzen zaio muntaiari.

3. Sentsorearen diseinuaren irudi negatiboa azetato-paper gardenean inprimatzen da maskara bat sortzeko asmoz. Maskara hori geruza fotoerresistikorraren gainean egokitzen da (ikus 4c irudia).
4. Maskara eta geruzaren artean airerik ez dagoela bermatzeko beirazko zati baten kontra presionatzen da muntaia, eta zinta isaskorraz finkatu eta tinkatzen da (ikus 4d irudia).
5. Argi ultramore sorgailu bat erabiliz muntaia 2.5 minutuz argitzen da. Eguzki argipean 20 minutuz utziz gero emaitza antzekoak lortzen dira.
6. Muntairi argi ultramorea aplikatu ondoren, argia jaso duen polimero zatia gogortu egiten da; argirik jaso ez duen polimeroak, ordea, bere baitan jarraitzen du (ikus 4e irudia, bertan more ilunaz adierazitako zatiak gogortutako polimeroa dira, eta more argiz adierazitakoak bigun mantendu den polimeroa dira). Xafla %1.25 bolumen-konzentrazioko sodio karbonato ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) disoluzioan sartuz, gogortu ez den polimeroa desagitzen da, gogortutako polimeroa soilik utziz kobreak gainean (ikus 4f irudia).
7. Xafla kloruro ferroso ( $\text{FeCl}_2$ ) %33 bolumen-konzentraziko disoluzioan murgildu eta polimeroaz babesturik ez dagoen kobrea desagitzen da (ikus 4g irudia).
8. Gogorturiko polimeroa kobre gainazaletik kentzeko %5-eko bolumen-konzentrazioa duen  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  disoluzioan murgiltzen da xafla eta diseinua kobre gainazalera transferitzea lortzen da (ikus 4h irudia).



Irudia 4: Polimero fotoerresistibo bidezko fotolitografia prozesuaren eskema: laginaren hasierako egoera (a), geruza fotoerresistikorraren egokitzapena (b), maskara eta beiraren egokitzapena (c eta d), argi ultramore aplikatu osteko egoera (e), xafla %1.25 bolumen-konzentrazioko  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  disoluzioan murgildu osteko egoera (f), xafla %33 bolumen-konzentrazioko  $\text{FeCl}_2$  disoluzioan murgildu osteko egoera (g) eta bukaerako emaitza (h).



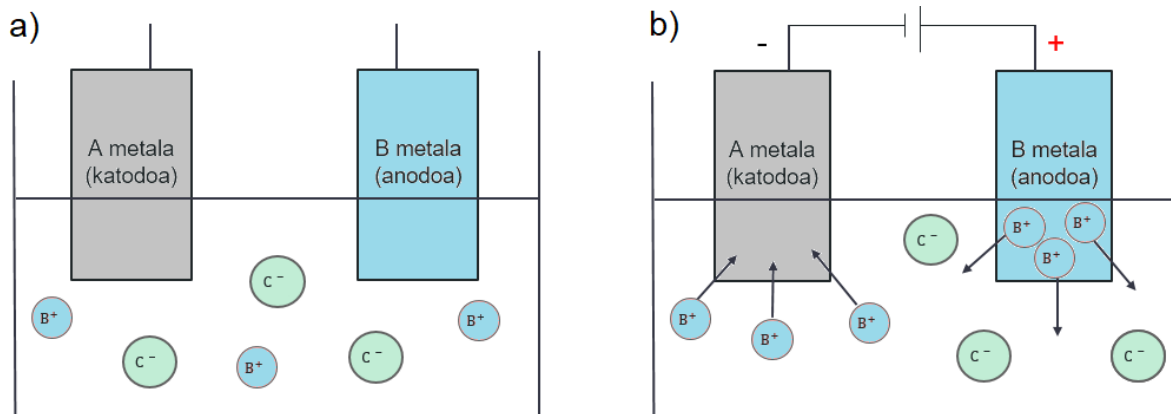
Prozesuan erabilitako disoluzioak prestatzeko, solutu moduan konposatuaren ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$  edo  $\text{FeCl}_2$ ) disoluzio saturatua erabili da, eta urerekin nahasi da behar den bolumen-konzentrazioa lortzeko.

### 3.1.3 Elektrodeposizioa

Elektrodeposizioa tratamendu elektrokimikoa da, horren bidez disoluzio batean dauden katioi metalikoak gorputz eroale baten gainazalean depositatzen dira. Modu horretan, ioiek estaldura bat sortzen dute aipaturiko objektuaren gainean.

Elektrodeposizioa egiteko erabiliko den gelaxka elektrokimikoa hiru elementu nagusi ditu: disoluzio elektrolitikoa (estalduraren osagai izango den metalaren katioiak dituena), katodo bat (metalez estali nahi den objektua) eta anodo bat (estalduraren osagai izango den metalaren lagin bat). Anodoa eta katodoa disoluzioan murgiltzen dira, 5a irudian hasierkao konfigurazioaren eskema ageri da, kasu honetan A metala katodoa eta B metala anodoa dira. Horiek disoluzio elektrolitiko batean murgildurik daude non B metalaren katioiak topatzen diren (BC konposatu baten ionizaziotik etorriak).

Erreakzioaren eragilea katodotik anodora doan korrante elektriko bat da. Korrante elektriko hori sortzeko tentsio-iturri bat erabiltzen da. Katodoa tentsio-iturriaren terminal negatibora konektaturik dago; anodoa, berriz, terminal positibora. Korrante horren ondorioz disoluzioan dauden katioiak katodora itsasten dira estaldura bat osatuz. Horretaz gain, anodoko metal atomoak ionizatu egiten dira eta disoluziora igarotzen dira (ikus 5b irudia). Horri esker, disoluzioaren konzentrazioa konstante mantentzen da.



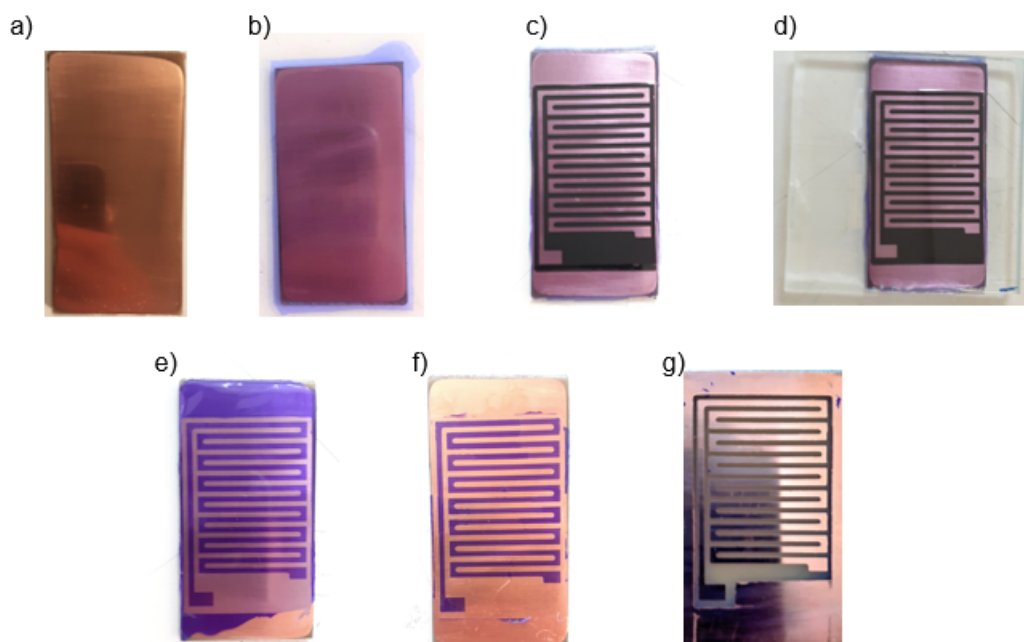
Irudia 5: Gelaxka elektrokimikoaren eskema tentsio-iturrira konektatu baino lehen (a) eta ondoren (b).

## 3.2 Sentsorearen garapena

Atal honetan, sentsorea garatzeko prozesuaz hitz egingo da. Horretarako, egindako diseinu guztietatik bat aukeratu eta nola sortu den azalduko da, beste guztiak garatzeko prozedura berdina izanik. Hala ere, esanguratsua da diseinu ezberdinak egin direla esatea, sentsorearen ezaugarri ezberdinak aztertzen joan garen heinean.

Sentsorea garatzeko 3.1 atalean azaldutako teknikak erabili dira: lehenik fotolitografia egin da, eta, ondoren, elektrodeposizioa. Perfilometria mekanikoa garapen osoan zehar erabili da sentsorea osatzen duten kobre eta zink geruzen lodiera neurtu ahal izateko.

Lehenik eta behin, kobre laginak moztu eta prestatu egin dira fotolitografia egiteko. 3.1.2 atalean azaldutako pausuak jarraitu dira (ikus 6. irudia).

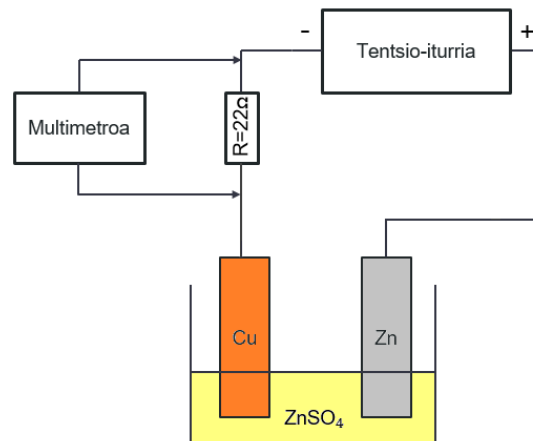


Irudia 6: Polimero fotoerresistiboen bidezko fotolitografia prozesuaren argazkiak: laginaren hasierako egoera (a), geruza fotoerresistikorraren egokitzapena (b), maskara eta beiraren egokitzapena (c eta d), argi ultramorea aplikatu osteko egoera (e), xafra %1.25 konzentrazioko  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  disoluzioan murgildu osteko egoera (f) eta bukaerako emaitza (g).

Ondoren, lagina elektrodeposizioa egiteko prestatu da. Horretarako, fotolitografiaz eginiko zirkuituaren terminal batean kable bat soldatu da, lagina tentsio-iturriaren terminal negatibora konektatu ahal izateko. Bestetik, zinkez estaltzea interesatzen ez zaigun zonaldea Kaptonez estali da. Printzipioz, zonalde hori kobrezko zirkuituarekin kontaktuan ez dagoenez, ez litzateke zink geruzarik sortu beharko bertan, baina badaezpada Kaptonez estaltzea erabaki da (ikus 8. irudia). Kaptona poliimina polimeroz osaturiko mintza da, tenperatura tarte zabalean egonkor mantentzen dena eta elektrikoki neutroa dena. Lagina prestatzeko Kaptonezko zinta itsaskorra erabili da.

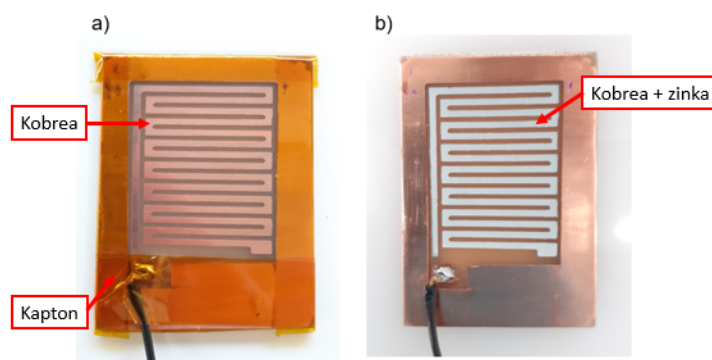
Zink sulfato ( $\text{ZnSO}_4$ ) 1 M disoluzioan zink (anodo) eta kobre (katodo) laginak murgildu dira. Dimensio bereko bi lagin murgildu dira disoluzioan, eta bi laginen artean

1 cm-ko distantzia utzi da. Tentsio-iturriaren terminal negatiboari  $22 \Omega$ -eko erresistentzia bat konektatu zaio, eta erresistentzia hori kobre laginera konektatu da (ikus 7. irudia). Erresistentziaren borneetan erortzen den tentsioa multimetroy bidez neurtu da, hori eta erresistentziaren balioa ezagututa sistematik igarotzen den korronea jakin daiteke. Tentsio-iturriaren borne positibora zink lagina konektatu da.



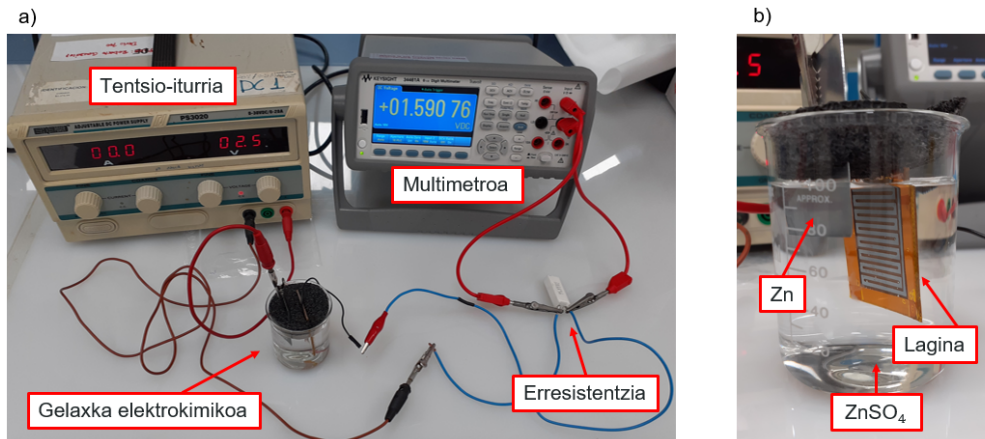
Irudia 7: Elektrodeposizioa egiteko erabilitako konfiguraketa.

Kobrearen gainean depositatzen den zink gainazalaren lodiera eta topografia hainbat parametroren arabera da: erreakzioaren iraupena, igarotzen den korrone kopurua, murgiltzen den kobre gainazala eta abar. Parametro horiek zink gainazalaren lodieran nola eragiten duten aztertu da, azterketa eta horren emaitzak A apendizean aurkitu daitezke.



Irudia 8: Elektrodeposizioa egiteko laginaren prestakuntza (a) eta laginaren egoera elektrodeposizioa egin ondoren (b).

Lagina gelaxka elektrokimikoan egokitu eta elektrodeposizio prozesua hasi da. Erabiltako muntaia 9. irudian ikus daiteke. Prozesuak 25 minutu iraun du eta  $0.02 \text{ A/cm}^2$ -ko korrante dentsitatea erabili da. Korrante-dentsitate hori depositatu nahi den gainazalarekiko emanda dago. Elektrodeposizioaren emaitza 8. irudian ikus daiteke. Zirkuitu erresistikorraren definizioa ona da, ez dago zirkuitulaburrik zirkuitu erresistikorra eta zirkuitua inguratzen duen kobreakin artean. Bestetik, begibistaz zink geruza homogenea dela ikusten da, eta ez da inperfekzio nabaririk ikusten. Zirkuitu honen karakterizazioa hurrengo atalean egingo da.



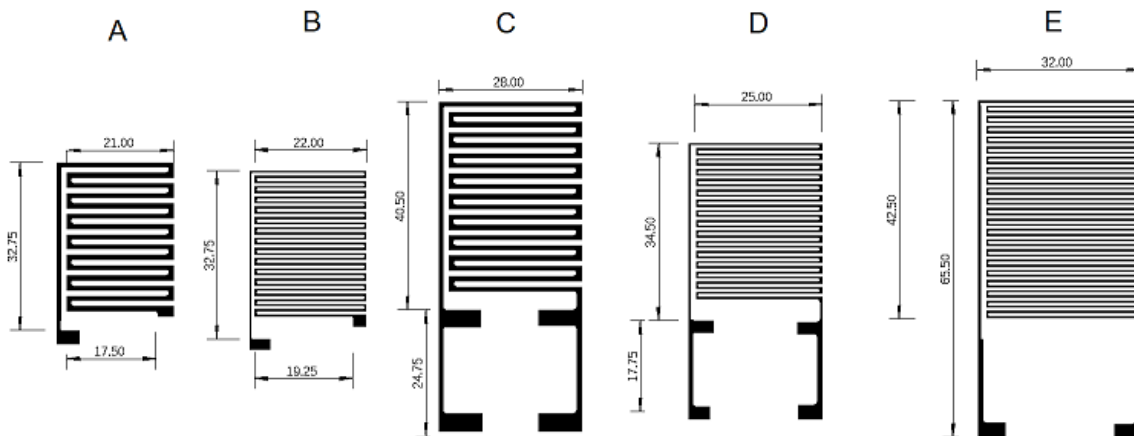
Irudia 9: Elektrodeposizioa egiteko konfiguraketaren argazkia (a) eta gelaxka-elektrokimikoaren gertuko argazkia (b).

### 3.3 Sentsoreen karakterizazioa

Aurreko atalean esan bezala, prozedura berdina errepikatuz, ezaugarri ezberdinetako sentsoreak garatzen joan dira. Horren helburua zink geruza desagertzen doan heinen, neur-tzen den erresistentzia aldaketa handiena duen sentsorea garatzea izan da. Erresistentzia aldaketa hori sentsorearen hainbat ezaugarriren menpekoa da, hala nola pista-ren luzera, kobre gainazalaren lodiera eta zink gainazalaren lodiera. Zink gainazalaren lodiera elek-trodeposizioaren zenbait parametro aldatuz kontrolatu daiteke, eta esan bezala, hori A apendizean aztertu da.

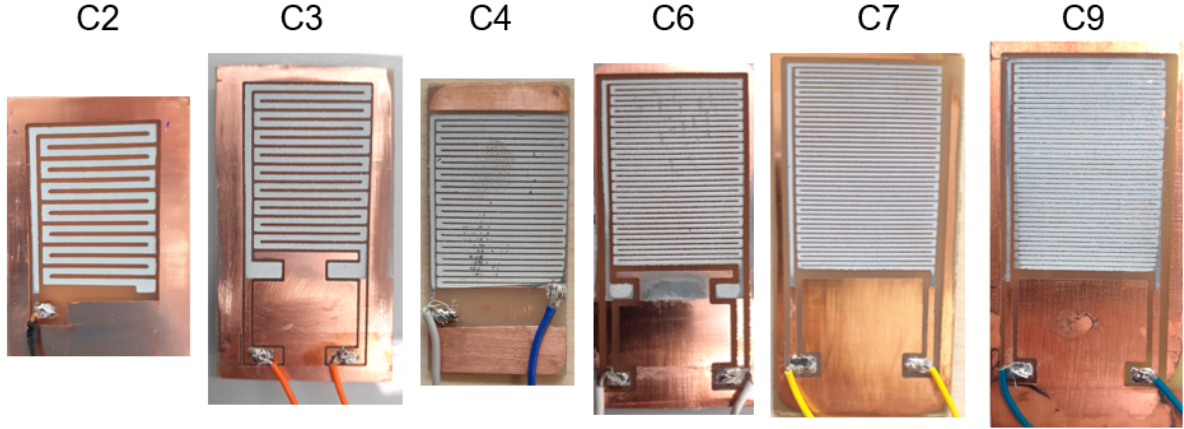
Lehenik, 10. irudiko A eta B diseinuak sortu dira. A diseinuak 1 mm lodi eta 36 cm luze den pista du; B diseinuan, ordea, pista 0.5 mm lodi eta 68 cm luze da. Bestetik, terminalen asimetriaren zergatia zinkaren gaineko soldadura-frogak egitea izan da, ikus-teko ea zink geruzaren gainean terminalak jarri zitezkeen. Aipaturiko diseinuen eboluzioa dira C eta D diseinuak, horietan zirkuituak handitu dira (pista luzatu dira, C diseinua 64 cm luze da eta D diseinua 91 cm luze) eta terminalak zirkuitutik aldentu dira. Zirkuitu horietan bi terminal pare egin dira, berriro ere, soldadura-frogak egiteko.

Azkenik, erresistentzia aldaketa handienak 0.5 mm-ko lodierako pista duten diseinue-kin lortu direla ikusirik, E diseinua garatu da, aurrekoak baino pista luzeagoa duena (140 cm luze). Horretaz gain, terminal pare bakarra jarri zaio, zinkaren gainean soldatzea zaila dela ikusi baita; hortaz, kobrezko terminalak soilik utzi dira. Sentsore guztiak 11. irudian ikus daitezke eta haien ezaugarriak 1. taulan bildu dira.



Irudia 10: Sentsorea egiteko erabilitako diseinu ezberdinak, neurriak milimetrotan emanda daude.

Ikus daitekenez, C4 eta C6 sentsoreen gainazalean imperfekzioak ageri dira, fotolitografia ondoren gelditzen diren kobre gainazalaren irregulartasunen ondorio. Irregulartasun horiek direla eta, elektrodeposizioa egitean argazkian ageri diren imperfekzioak sortzen dira. Dena dela, imperfekzio hauek ez dituzte amaierako sentsorearen propietateak asko aldatzen.



Irudia 11: Garatutako sentsoreak.

Sentsorearen izena	Diseinua	Pistaren luzera (cm)	Pistaren lodiera ( $\mu\text{m}$ )	Cu geruzaren lodiera (nm)	Zn geruzaren lodiera (nm)
C2	A	36	1100	21260	13840
C3	C	64	1040	23350	20360
C4	B	68	610	27580	15150
C6	D	91	560	18260	21870
C7	E	140	660	16760	26810
C9	E	140	710	11490	28120

Taula 1: Garatutako sentsore ezberdinen ezaugarriak.

Horretaz gain, sentsorearen erresistentzia neurtu da Kelvin-en metodoa erabiliz [18]. Erresistentzia elektrodeposizioa egin baino lehen eta ondoren neurtu da. 2. taulan erresistentzia balio horiek eta erresistentziaren balioaren aldaketak bildu dira.

Sentsorearen erresistentzia hurrengo moduan adierazi daiteke:

$$R_{\text{sentsore}} = R_{\text{Cu}} // R_{\text{Zn}} \quad (1)$$

non  $R_{\text{Cu}}$  eta  $R_{\text{Zn}}$  kobre eta zinkeko geruzek osatzen dituzten zirkuituen erresistentziak diren. Horiek, teorikoki, hurrengo moduan lortu daitezke:

$$R_{\text{Cu,Zn}} = \rho_{\text{Cu,Zn}} \frac{L_{\text{Cu,Zn}}}{l_{\text{Cu,Zn}} \cdot h_{\text{Cu,Zn}}} \quad (2)$$

non  $\rho$  metalaren erresistibitatea,  $L$  pistaren luzera,  $l$  pistaren lodiera eta  $h$  pistaren altuera diren.

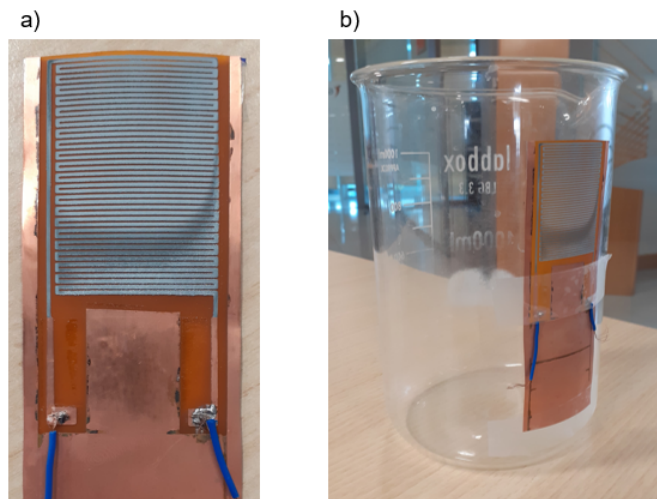
C2 sentsorean ez da erresistentzia neurketarik egin sentsore hori lehenengo froga moduan erabili baita, fotolitografia eta elektrodeposizio tekniken baliogarratasuna frogatzeko. Argi ikus daiteke 1. eta 2. tauletan nola sentsorearen pista luzeagoa eta kobrezko geruzaren meheagoa duten sentsorekin erresistentzia-aldaketa handiagoak lortzen direla.

Sentsorearen izena	$R_{Cu}(\Omega)$	$R_{Cu+Zn}(\Omega)$	$\Delta R(\Omega)$
C2	x	x	x
C3	0.414	0.364	0.050
C4	0.683	0.638	0.045
C6	1.335	1.111	0.224
C7	2.218	1.917	0.301
C9	2.240	2.849	0.609

Taula 2: Sentsore ezberdinen erresistentzien balioak.

Aurrerantzean erresistentzia-aldaketa gehiago handitu nahiko balitz, kobre gainazal estuagoa lortzeko teknikaren bat erabili beharko litzateke, hala nola, pulidora elektrikoa.

Azkenik, Kaptozezko gainazal flexible baten gainean E diseinua erabiliz sentsore bat egin ahal izan da. Modu horretan frogatu daiteke sentsorea gainazal flexible baten gainean garatzea posiblea dela (ikus 12. irudia).



Irudia 12: Gainazal flexible baten gainean garatutako sentsorearen argazkia (a) eta sentsorea gainazal tubular baten gainean itsatsia (b).

## 4 NFC bidezko komunikazioa

Neurketaren informazioa mugikor baten bidez irakurtzeko NFC (*Near Field Communication*) bidezko komunikazioa erabili da. Teknologia hori, erabiltzaileari eskaintzen dizkion erraztasunengatik inplementatu da, ohiko *smartphone* mugikorrek NFC irakurgailu bat baitute.

NFC teknologia oso presente dago gure bizitzan, eta gure egunerokoa errazten duten geroz eta erabilera gehiago sortzen ari dira, ordainketa sistema inalambrikoak dira horren adibide argiena [19]. Teknologia hori irismen laburreko komunikazio inalambrikoa inplementatzeko erabiltzen da, 4 cm baino distantzia gutxiagora egon behar baitute gailuek bata bestearengatik. 13.56 MHz-etan egiten du lan, bere transferentzia tasa 424 kbit/s-koa da eta ez du gailuen arteko aurretiko parekatzerik behar, hortaz, bat-bateko komunikazioan erabiltzen da [20].

Etapak hiru atal izango ditu. Alde batetik, komunikazioa hasiko duen *smartphone* bat behar da, eta, bestetik, NFC etiketa baten bidez datuak jaso eta bidaltzen dira. Etiketa hori antena bat izango da, 13.56 MHz-etan erresonatuko duena. Azkenik, M24LR64E-R mikrotxipa erabiltzen da datu transferentzia bermatzeko. Txip honek, I2C busaren bitartez datuak jaso eta bere memoria internoan gordetzen ditu. Txipak aipaturiko antena konektaturik duenez, mugikorra antenara hurbiltzean, txipak bere memorian gordetako datuak mugikorrera bidaltzen ditu.

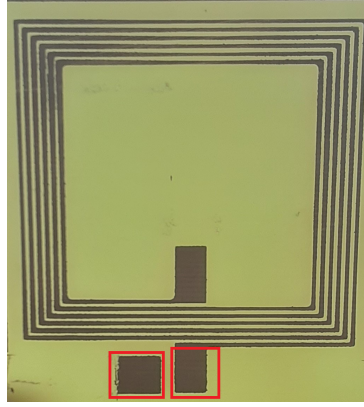
Horretaz gain, NFC teknologiak mugikorrek sorturiko eremu magnetikoaren energia aprobetxatzea ahalbidetzen du. Uhin elektromagnetikoak antenara iristen direnean, antenak AC tentsioa sortzen du bere borneetan, eta M24LR64E-R mikrotxipak ACko tentsio hori DCko tentsio bihurtzen du. Eremu magnetikoak etiketarekin informazio trukea egiteko beharrezko energia baino gehiago eskaintzen badu, soberako energia M24LR64E-R mikrotxipak jaso eta bertatik tentsio-diferentzia bat sortzeko gai da, elikadura moduan erabili daitekeena. Horri *energy harvesting* deritzo. M24LR64E-R txiparen kasuan, *energy harvesting* bitartez sortzen duen tentsioa pin batetik ateratzen du, bertara zirkuituaren elementuak konektatu eta horiek elikatu ahal izateko.

### 4.1 Antenaren garapen eta adaptazioa

NFC komunikazioa bermatzeko beharrezkoa den antena [21] erreferentzian aurkitu daitekeen diseinutik abiatuta sortu da. Antena 50 mm x 50 mm dimentsioko karratua izango da, horrek 6 begizta izango dituen 0.6 mm lodi direnak. Antena sortzeko diseinua EAGLE programa erabiliz egin da [22] eta 3.1.2. atalean azaldutako fotolitografia erabili da FR4 PCB batean antena sortzeko (ikus 13. irudia).

NFC dispositiboekin komunikatzeko eta potentzia transferentzia maximoa izateko antenak 13.56 MHz-tara era eraginkorrean erresonatu behar du. Hori bermatzeko antenaren inpediantzia neurtu da sare-analizatzaile bat erabiliz. Erabili den antena ate bakarrekoa da, eta sare-analizatzailea erabiliz, S11 parametroaren balioa neurtu da, horrek antenaren





Irudia 13: Garatutako antenaren argazkia. Gorritz markaturiko ezkerreko terminala antenaren barneko terminalarekin kable batez lotu da. Gorritz markaturiko bi terminalen artean jarriko dira antena adaptatzeko beharrezkoak diren kondentsadoreak.

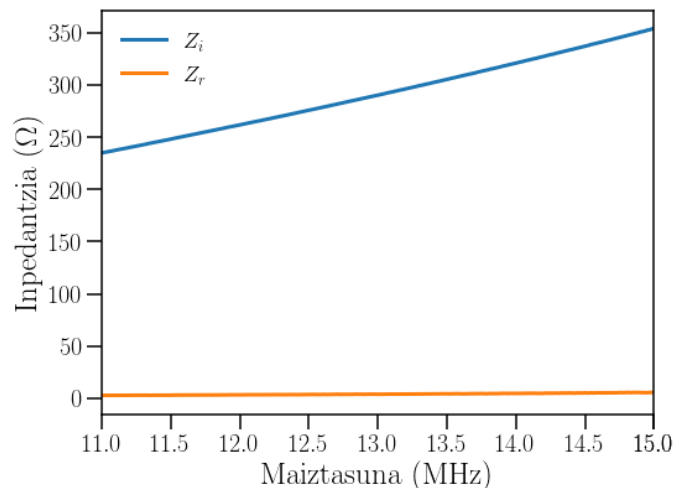
sarrera eta irteerako potentzia uhinen arteko erlazioa ematen baitu:

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \quad (3)$$

non  $a_1$  antenaren sarrerako potentzia-uhina den eta  $b_1$  irteerako potentzia-uhina. Sarrerako eta irteerako potentzia-uhinak antenara iritsi eta islatzen den tentsio uhinarekin erlazionatzen dira, hurrenez hurren.  $S_{11}$  parametroak duen balioa jakitea interesgarria da  $S_{11}$  parametrotik antenaren inpedantzia hurrengo moduan lortu ahal baitaiteke:

$$Z_{antena} = Z_0 \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \quad (4)$$

non kasu honetan  $Z_0 = 50 \Omega$  den. Analizatzailea erabiliz antenak 11.5 - 15.5 MHz maiztasun-tartean erakusten duen inpedantzia lortu da, aipaturiko maiztasun tartean antenaren inpedantziaren zati erreala eta irudikaria 14. irudian irudikatu dira.



Irudia 14: Adaptatutako gabeko antenaren inpedantziaren zati erreala (laranjaz) eta zati irudikaria (urdinez) 11-15 MHz maiztasun tartean.

Antenak 13.56 MHz-tan era eraginkorrean erresonatu eta potentzia transferentzia maximizatzeko maiztasun horretan inpedantziaren zati irudikaria desagertu behar da, eta

argi ikusten da 14. irudian hori ez dela betetzen. Maiztasun horretan lortu den inpedantziaren balioa zehazki  $Z_{antena} = 4.35 + 306.75j$  da.

Inpedantzia konplexua dela ikus daiteke, eta horregatik antena kondentsadoreak erabiliz egokitu beharko da. Antenaren inpedantzia kontuan hartzeaz gain ( $Z_{antena}$ ), komunikazio etapan ATTiny85 mikrokontrolagailua erabiliko denez, horren inpedantzia kontuan hartuko da kalkuluetan ( $Z_{ATTiny85}$ ) [21]. Inpedantzia totalaren ( $Z_{Total}$ ) balioa kalkulatu eta hori egokitzeko  $Z_{Egokitu}$ -ren balioa aukeratuko da, kondentsadoreen bidez inplementatuko dena.

Inpedantziak paraleloan daudela kontsideratuz, hurrengoa betetzen da:

$$\frac{1}{Z_{Total}} = \frac{1}{Z_{antena}} + \frac{1}{Z_{ATTiny85}} + \frac{1}{Z_{Egokitu}} \quad (5)$$

non  $Z_{ATTiny85} = j\omega C_{ATTiny85}$  den,  $C_{ATTiny85} = 27$  pF izanda [16], eta  $Z_{Egokitu} = j\omega C_{Egokitu}$  izango den. Aurreko adierazpena garatuz hurrengoa lortzen da:

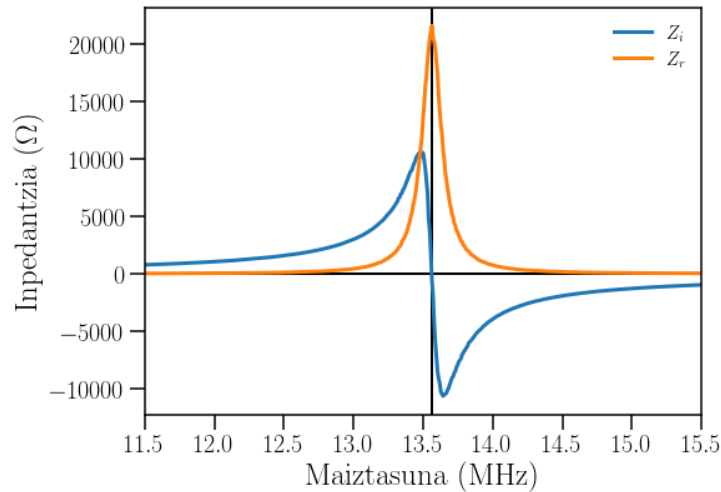
$$Z_{Total} = \frac{A[R - j(\omega A(C_{ATTiny85} + C_{Egokitu}) - \omega L_{Antena})]}{R^2 + [\omega A(C_{ATTiny85} + C_{Egokitu}) - \omega L_{Antena}]^2} \quad (6)$$

non  $A = R^2 + \omega^2 L_{antena}^2$  izendatu den adierazpena sinplifikatzeko.  $Z_{Total}$  erreala izateko:

$$A(C_{ATTiny85} + C_{Egokitu}) - L_{Antena} = 0 \longrightarrow C_{Egokitu} = \frac{L_{Antena}}{R^2 + \omega^2 L_{Antena}^2} - C_{ATTiny85} \quad (7)$$

Balioak ordezkaturik  $C_{Egokitu} \approx 11$  pF-ko balioa lortzen da. Kondentsadoreak 13. irudian gorritz markaturiko terminalen artean soldatu dira.

Egokituriko antena sare analizatzailearekin aztertuz 15. irudian ikus daitezkeen inpedantzia balioak lortu dira. Oraingoan argi dago antenak erresonatu behar duen maiztasunean (13.56 MHz) inpedantziaren zati irukaria desagertu egiten dela, eta zati erreala maximo batera iristen dela.



Irudia 15: Adaptatutako antenaren inpedantziaren zati erreala (laranjaz) eta zati irudikaria (urdinez) 11.5-15.5 MHz maiztasun tartean. 13.56 MHz-etan zati irudikaria 0 inguruko balioak hartu eta zati erreala maximo batera iristen da.

## 4.2 Sistemaren implementazio eta frogapena

NFC bidezko komunikazioa frogatzeko tenperatura sentore bat erabili da, LM75A tenperatura sentorea zehazki. Horretaz gain, sentorean tenperatura neurketa egin eta datuak M24LR64E-R mikrotxipari bidaltzeko, aurretik aipatu bezala, ATTiny85 mikrokontrolagailua erabili da.

Jarraituko den prozesuaren fluxu-diagrama 16. irudian ikus daiteke. Mugikorra antenara gerturatzean, energia transmititzen zaio M24LR64E-R txipari, eta honek, energia hori erabiliz, tentsio-aldaketa bat sortzen du. Tentsio hori elikadura-tentsio moduan erabiltzen da LM75A sentorea eta ATTiny85 mikrokontrolagailua piztu eta funtzionazteko. Behin piztuta, mikrokontrolagailuak LM75A sentoreren neurketaren datuak jaso eta I2C bidez M24LR64E-R mikrotxiparen memorian idazten ditu. Azkenik, mugikorrak antenaren bidez M24LR64E-R mikrotxiparen memoriaren irakurketa egin, eta bertan gordetako tenperatu neurketaren balioa jasoko da.



Irudia 16: NFT teknologia implementatzeko diseinatutako zirkuituaren fluxu-diagrama.

### 4.2.1 LM75A temperatura sentsorea

LM75A sentsoreari dagokionez, sentsore honek ADC bat (*Analog to Digital Converter*) integraturik du, hortaz, gai da temperatura neurketak egin eta bere kabuz digitalizatzeko. Sentsore hau [+125°C, -55 °C] temperatura tartea neurtzeko gai da. Temperatura neurketa 9 bitetan gordetzen du, bit altuenak temperaturaren zeinua adierazten du eta ondorengo 8 bitek temperaturaren balioa gordetzen dute. Sentsore hau  $\pm 2$  °C-ko zehaztasunarekin irakurtzen ditu [-25°C, 100 °C] tarteko temperaturak eta  $\pm 3$  °C-ko zehaztasunarekin [-55°C, -25 °C] eta [100 °C, 125 °C] tarteetako temperaturak. Piztuta dagoen bitartean sentsoreak behin eta berriro neurtzen du temperatura eta neurketaren bi byteak bere memoriako 00 erregistroan gordetzen ditu (ikus 17. irudia). Erregistro honen edukia I2C busaren bidez transmititzeko gai ere bada.

D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
MSB	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	LSB	X	X	X	X	X	X	X

Irudia 17: LM75A sentsorearen 00 erregistroa. MSB zeinuaren bita da, eta D14-D7 bitek temperaturaren magnitudea gordetzen dute birako osagarri formatuan. D6-D0 bitak ez daude zehazturik.

### 4.2.2 ATTiny85-aren programazioa

ATTiny85 mikrokontrolagailua Arduino bat erabiliz programatu daiteke modu errazean. Arduinoa programatzaile bezala konfiguratu behar da, eta, horretarako, Arduinoa ordenagailura konektatu, eta Arduino IDE-a ireki ondoren, "ArduinoISP" deituriko adibide-programa ejekutatatu behar da. ATTiny85 mikrokontrolagailua programatzeko euskarria ere gehitu behar zaio Arduino IDE-ari, hori nola egin [23] erreferentzian ikus daiteke. Behin esandakoa eginda, Arduino IDE-an idazten den programa mikrokontrolagailuan kargatu ahal izango da.

Programaren helburua LM75A temperatura sentsorearen neurketa irakurri eta M24RL64E-R mikrotxiparen memorian gordetzea da. Horretarako, kodeak hainbat parte ditu: LM75A sentsorearen neurketa irakurriko duen funtzioa, datuaren adierazpena egokituko duen funtzioa eta datua M24RL64E-R mikrotxipera bidaliko duen programa zatia.

Mikrokontrolagailua LM75A sentsorearekin komunikatzeko "TinyWireM.h" libreria erabili da, horren bidez ATTiny85a I2C busaren master moduan konfiguratzeko da. Temperaturaren neurketa egiteko erabili den funtzioa [24] erreferentzian aurkitu daitekeen kodea modifikatuz lortu da. Funtzioak (`i2c_sensor_read_byte()`, 19. irudia) temperatura sentsorearen irakurketa egiten du eta emaitza float datu moduan itzultzen du. Lehendabizi, mikrokontrolagailuak LM75A sentsorearekin komunikazioa abiarazten du, eta temperatura gordeta dagoen erregistroaren helbidea bidaltzen dio. Sentsoreari erregistro baten helbidea bidaltzen zaionean, honek erregistro horretan gordetako byteak bidaltzen ditu bueltan mikrokontrolagailuak informazio eskari bat egiten dionean. Hortaz, kasu honetan, sentsoreak temperatura gordetzen duen erregistroaren bi byteak I2C bidez bidaltzen dizkio mikrokontrolagailuari.

Informazio hori egokitu eta float bihurtzeko, jasotzen den lehen byte-a neurketaren byte altuena denez, hori aldagai batean gorde eta 8 bit desplazatzen da. Hori eta gero, neurketaren 2. bytea jasotzen da, eta OR logiko bat eginez aldagaian gordetakoarekin konbinatzen da. Prozesu honen pausuak 18. irudian bildu dira.

	<b>dato</b> aldagaia (int modukoa)
1. Hasiera	00000000 00000000
2. Lehenengo bytea jaso eta byte baxuenean gorde	00000000 <b>0111 1101</b>
3. Lehenengo bytea bere lekura desplazatu (kodean "<<8" operaziaren bidez egiten da)	<b>0111 1101</b> 00000000
4. Bigarren bytea gorde byte baxuenean (kodean " " operazioaren bidez egiten da, OR logikoa )	<b>0111 1101</b> 0000 0000

Irudia 18: LM75A sentsoreak bidalitako bi bytak **dato** aldagaian gordetzeko prozesuaren eskema.

Ondoren, tenperaturaren neurketa float moduan gordetzen da eta datua egokitu egite da tenperaturaren balioa lortzeko, horretarako datua kalibrazioaren balioarekin biderkatzen da (0.125 °C). Azken balio hori da funtzioak itzultzen duena.

```
float i2c_sensor_read_byte(void) {
    int dato;
    float temperatura;
    unsigned long cronometro_i2c;
    TinyWireM.beginTransmission(DIRECCION_LM75);
    TinyWireM.send(TEMPERATURA_ACTUAL_LM75);
    TinyWireM.endTransmission();
    TinyWireM.requestFrom(DIRECCION_LM75, 2);
    while (TinyWireM.available() < 2 && (unsigned long) (millis() - cronometro_i2c) > TIMEOUT_I2C);
    if (TinyWireM.available() == 2) {
        dato = (TinyWireM.read() << 8) | TinyWireM.read();
        temperatura = (float) dato / 32 / 8;
    }
    TinyWireM.endTransmission();
    return temperatura;
}
```

Irudia 19: Temperatura neurketa irakurtzen duen funtzioa.

Bigarren funtzio batek float moduan lortu den temperatura string bihurtzen du (Float-ToString(), ikus 20. irudia). Temperatura neurketa string moduan gordetzea komenigarria da, gero neurketa modu errazagoan bidali ahal zaiolako M24LR64E-R txipari. Horretarako, lehendabizi, tenperaturaren zati osoa string moduan gordetzen du, ondoren puntu dezimala gehitzen dio, eta, azkenik, zati dezimala.

```
String FloatToString (float temp){
    int dato;
    dato = int(temp);
    String bufstr = String(dato);
    bufstr += '.';
    float v;
    v = temp-dato;
    dato = int(v*100);
    bufstr +=String(dato);
    return(bufstr);
}
```

Irudia 20: Float moduan dagoen balioa string bihurtzen duen funtzioa.

Programa nagusiak aipaturiko bi funtzioak erabiliz, lehendabizi, tenperatura irakurketa egiten du, eta, ondoren, balioa string bihurtzen du (ikus 21. irudia). Hori eta gero, array batean gordetzen dira tenperatura gordetzen duen string-aren lau karaktereak. Array honetan gorderiko karaktereak M24LR64E-R txiparen memorian banaka idazten dira. M24LR64E-R txiparen memorian datuak idazteko "M24LR.h" libreriaaren funtzioak erabili dira.

```
void loop()
{
    int temp = i2c_sensor_read_byte();
    String t = FloatToString(temp);
    byte datas[4];
    datas[0] =t[0];
    datas[1] = t[1];
    datas[2] = t[2];
    datas[3] = t[3];
    m24lr.write_page(6, (byte *)datas, 4);
    delay(100);
}
```

Irudia 21: Tenperatura neurraketa jaso, string bihurtu eta M24LR64E-R mikrotxipari bidaltzeko programa nagusia.

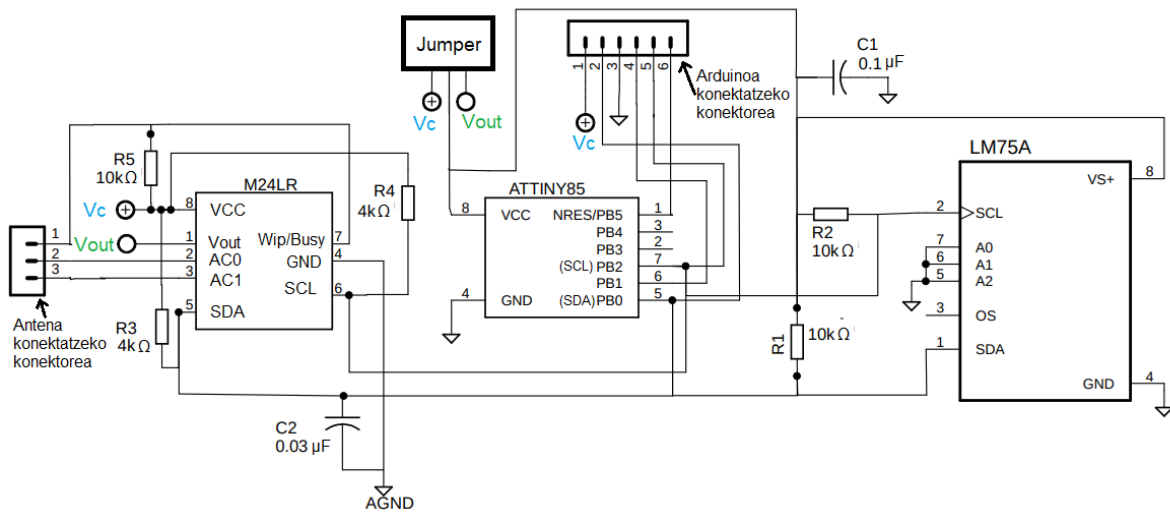
### 4.2.3 Zirkuituaren diseinua

NFC komunikazioa inplementatzeko zirkuituaren eskematikoa 22a irudian ikus daiteke, eta bere diseinu superfiziala 22b irudian. Eskematikoa eta diseinua EAGLE [22] programa erabiliz egin dira. ATTiny85-a Arduinoa erabiliz programatu behar denez, Arduinoari konektatzeko konektorea gehitu da zirkuituan. ATTiny85-a programatzeko Arduinoarekin egin beharreko konexioak 23. irudian ikus daitezke. Mikrokontrolagailua programatu bitartean horrek Arduinoaren elikadurara konektaturik egon behar du (Vc), zirkuituaren funtzionamendu bitartean, ordea, *energy harvesting* bidez lortzen den elikadurara konektatua egon behar du (Vout). Hori dela eta, jumper bat gehitu da diseinuan. Programatu bitartean ATTiny85-a Arduinoaren bidez elikatuko da, eta funtzionamendu bitartean

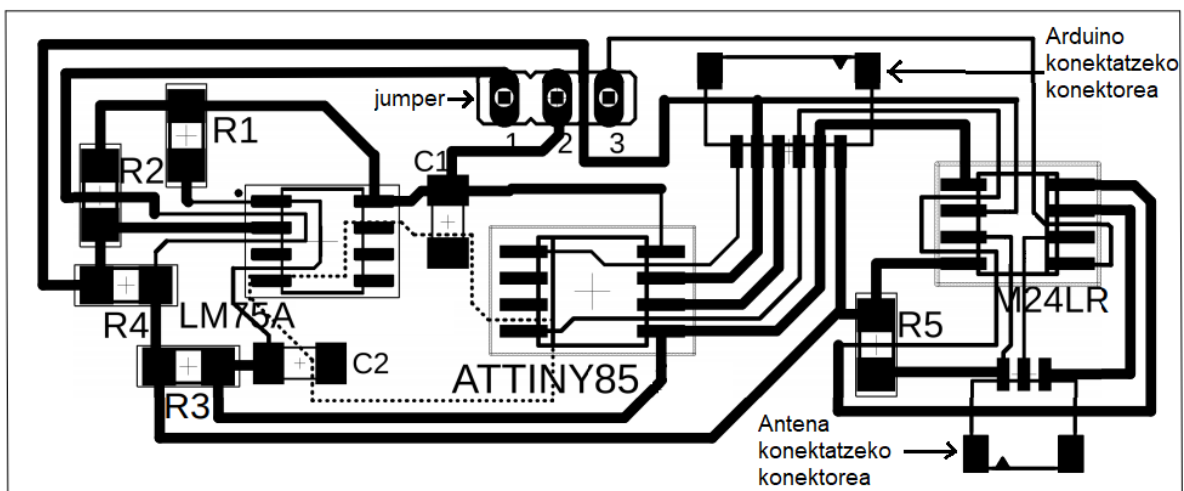
*energy harversting* bidez. VCC pina mikrokontrolagailuaren elikadura pina da, GND lurrera konektatu beharreko pina da eta PB2/SCL eta PB0/SDA pinen bidez txipa I2C busera konektatzen da.

M24LR64E-R txipari dagokionez, VCC pinetik elikatzen da eta GND pinera konektatzen zaio lurra. Garatutako antena konektatzeko konektore bat ere gehitu da, M24LR64E-R txiparen AC0 eta AC1 pinetara konektatu dena. SDA eta SCL pinetik I2C busera konektatzen dute, Vout pinetik lortzen da *energy harversting* bidez lorturiko tentsioa eta Wip/Busy pinak txiparen egoera ematen duen irteera digital bat da.

LM75A sensoreari dagokionez, VS+ izango da bere elikadura pina eta GND lurrera konektatu beharreko pina. Berriro ere, SCL eta SDA pinen bidez konektatuko da I2C busera eta A0-A2 pinetik sensorearen I2C buseko helbidea konfiguratzeko balio dute.

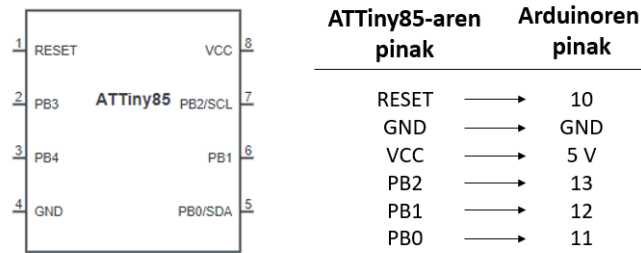


(a) Zirkuituaren eskematikoa.



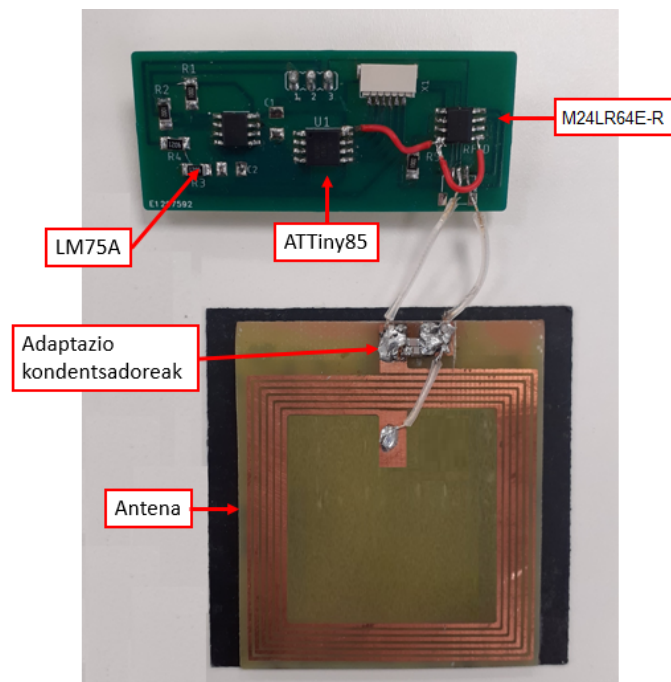
(b) Zirkuituaren diseinu superfiziala.

Irudia 22: Komunikazio etapa inplementatzeko diseinaturiko zirkuitua.



Irudia 23: ATTiny85 mikrotxiparen pinen eskema eta hori programatzeko Arduinoarekin egin beharreko konexioen taula.

Esan bezala, gailuak I2C busaren bidez konektatu dira. Zirkuituaren diseinuan ikus daitezkeen erresistentzia eta kondentsadoreak I2C busa egokitzeko balio dute, nahiz eta ikusi den kondentsadoreak ez direla beharrezkoak. Azkenik, elementuak PCBan soldatu dira, muntai osoaren argazkia 24. irudian ikus daiteke, elementu garrantzitsuenak adierazi direlarik.



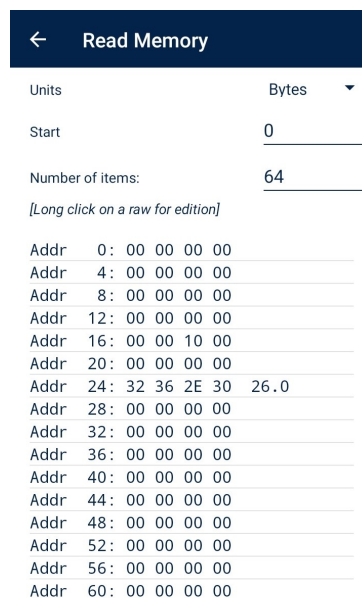
Irudia 24: Irudiaren goikaldean NFC komunikazioa frogatzeko diseinaturiko zirkuitua ageri da, eta, horren azpian, adaptaturiko antena.



#### 4.2.4 Komunikazioaren frogapena

Mugikorrarekin antenaren bitartez irakurketa egitean, M24LR64E-R mikrotxiparen memoria ikus daiteke, eta bertan tenperaturaren neurketa ageri da (ikus 25. irudia). Erabili den mugikor aplikazioa ST25 NFC Tap da, aurretiazko konfiguraziorik egin behar izan gabe. Aplikazioaren bitartez mikrotxiparen memoriako zenbat byte irakurri daitezkeen aukeratu daiteke, adibidez, 25. irudian mikrotxiparen memoriaren lehen 64 byteak ageri dira. Egindako neurketa 24-28 bytetan gorde dela ikus daiteke.

*Energy harvesting*-aren bidez lortu daitezkeen tentsioari dagokionez, tentsioa ez da konstante mantentzen, eta, multimetrotan erabiliz, 3.3 V-eko maximora iristen dela ikusi da. Gainera, M24LR64E-R txiparen espezifikazioetan begiraturik [25], ikus daiteke txip hau *energy harvesting*-aren bidez gehienez 6 mA-eko korronea emateko gai dela. Espezifikazio horiek kontuan hartzeak izango dira egokitze etapa diseinatu eta frogatzerako orduan.



← Read Memory	
Units	Bytes ▾
Start	0
Number of items:	64
<i>[Long click on a row for edition]</i>	
Addr 0:	00 00 00 00
Addr 4:	00 00 00 00
Addr 8:	00 00 00 00
Addr 12:	00 00 00 00
Addr 16:	00 00 10 00
Addr 20:	00 00 00 00
Addr 24:	32 36 2E 30 26.0
Addr 28:	00 00 00 00
Addr 32:	00 00 00 00
Addr 36:	00 00 00 00
Addr 40:	00 00 00 00
Addr 44:	00 00 00 00
Addr 48:	00 00 00 00
Addr 52:	00 00 00 00
Addr 56:	00 00 00 00
Addr 60:	00 00 00 00

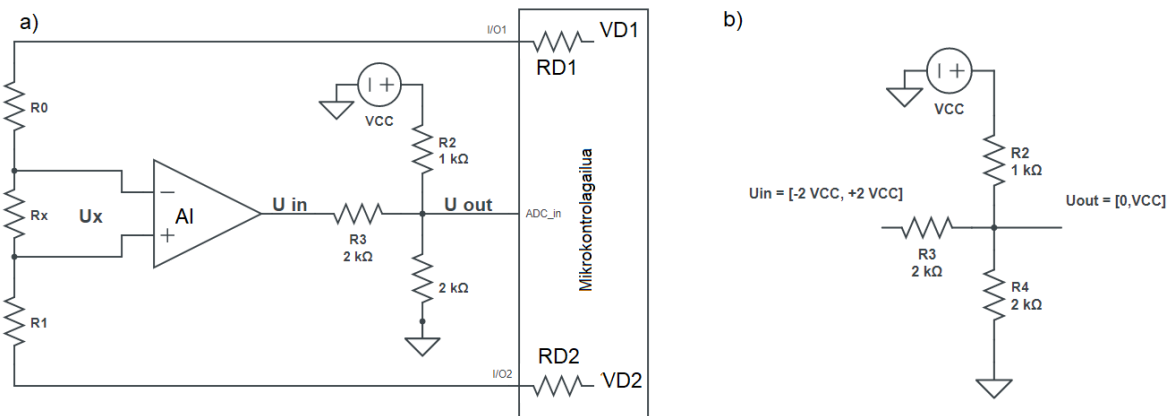
Irudia 25: M24LR64E-R mikrotxiparen memoriaren irakurketa, 64 byte irakurri dira. Ikus daiteke nola eginiko tenperatura neurketa 24-28 bytetan gorde den (26.0 °C).

## 5 Sentsorearen seinalearen egokitzapen etapa

Egokitzapen etaparen bidez bereizmen ahalik eta handiena izatea eta neurtutako balioa mikrokontrolagailu batean gorde nahi da. Horretaz gain, sentsorearen erresistentzia aldaketa ahalik eta txikienak neurtzea bilatzen da, eta etapak ahalik eta gutxien kontsumitu behar du. Azken puntu hori oso garrantzitsua da, zeren eta NFC bidez lorturiko elikadurarekin egokitzapen etapa funtzionatzea bilatzen da.

### 5.1 Metodoaren deskribapena

Erresistentzia aldaketa txikiak neurtzeko [15] erreferentzian erabiltzen den metodoa inplementatuko da: sub-miliohm ordenako erresistentzia aldaketak neurtzeko mikrokontrolagailu batean oinarrituriko lock-in amplifikagailua. Lock-in amplifikagailuak (LIA) oso seinale ahulak detektatzeko erabili ohi dira, zarata baino ahulagoak diren seinaleak detektatzea ahalbidetzen baitute. Erabiliko den metodoa LIA digitalen funtzionamenduan oinarritzen da eta erabiltzen den hardwarearen eskema 26a irudian ikus daiteke [15]. Eskema honetan  $R_x$  neurtu nahi den erresistentzia ezezaguna da, miliohmeko magnitude ordenekoa.  $R_0$  eta  $R_1$  erresistentziak  $R_x$ -ren zeharreko korronea limitatzeko kokatu dira.  $R_0$ - $R_x$ - $R_1$  erresistentzia kateko borneak mikrokontrolagailu baten bi irteera digitaletara konektatzen dira (I/O1 eta I/O2), irteera horiek piztu (1-ean jarri) edo itzaltzea (0-an jarri) guk kontrolatu dezakegu.  $R_{OH}$  eta  $R_{OL}$  mikrokontrolagailuaren irteera digitalen inpedantziak dira, irteera digitalek 1 edo 0 balioak hartzen dituztenean, hurrenez hurren. Era antzekoan,  $V_{OH}$  eta  $V_{OL}$  mikrokontrolagailuaren irteera digitalen tentsioak dira irteerek 1 balioa dutenean eta 0 balioa dutenean, hurrenez hurren. Hau da, esaterako, I/O1 irteera digitala pizten badugu,  $VD1 = V_{OH}$  eta  $RD1 = R_{OH}$  izango dira, irteera itzaltzen badugu, ordea,  $VD1 = V_{OL}$  eta  $RD1 = R_{OL}$  izango dira.



Irudia 26: Sub-miliohm ordenako erresistentzia aldaketak neurtzeko [15] erreferentzian aurkeztutako zirkuituaren eskematikoa (a), eta zirkuituan seinale bipolarra seinale unipolarra bihurtzeko erabiltzen den erresistentzia-egitura (b).

$R_x$  erresistentziaren borneetara konektaturik amplifikagailu instrumentazional (AI) bat dago, eta honen irteera 26b irudian ikus daitekeen erresistentzia egiturari konektaturik dago. Sarrera analogikoak seinalea digitalizatuko du, eta, sarrera analogikoa unipolarra izan behar denez, beharrezkoa da aipaturiko erresistentzia egitura erabiliz seinale bipola-

rra unipolarra bihurtzea. Azkenik, erresistentzia egituraren irteera mikrokontrolagailuaren sarrera analogiko bat erabiliz irakurtzen da.

AIak  $R_x$  zeharreko tentsio erorketa anplifikatzen du eta  $R_2$ - $R_4$  erresistentziek seinale bipolarra seinale unipolarra bihurtzeko egitura osatzen dute (ikus 26b irudia), horrela:

$$U_{out} = \frac{VCC}{2} + \frac{U_{in}}{4} \quad (8)$$

non  $U_{in}$  AIaren irteerako seinalea den.

I/O1 pina 1-ean eta I/O2 pina 0-an jarritz,  $R_x$ -ren zehar korrante bat pasarazi eta AIak irteera positiboa izango du,  $R_2 - R_4$  erresistentzia egituratik igaro ondoren, sarrera analogikoak horren irakurketa egingo du (s1). Irteera digitalen balioak inbertituz,  $R_x$  erresistentziaren zeharreko korrantearen zentzua inbertitu egiten da, AIaren irteerako seinalea aldatuz, kasu honetan negatiboa izango dena.  $R_2$ - $R_4$  erresistentzia egiturari esker seinale negatibo hori positibo bihurtu eta mikrokontrolagailuaren sarrera analogikoaren bidez irakurriko da (s2). s1 eta s2 irakurketak magnitudez ezberdinak dira, eta horien arteko aldea ( $s = s1 - s2$ )  $R_x$  erresistentziaren balioarekin erlazionaturik dago, hurrengo lerroetan ikusiko den moduan. Mikrokontrolagailuaren bidez s1 eta s2-ren balioak irakurri, gorde, eta  $s = s1 - s2$  eragiketa egiten da. Jarraituko den prozesuaren inguruko detaile eta azalpen zehatzagoak [15] erreferentzian aurkitu daitezke.

I/O1 = 1 eta I/O2 = 0 eginez;  $VD1 = V_{OH}$ ,  $VD2 = V_{OL}$ ,  $RD1 = R_{OH}$  eta  $RD2 = R_{OL}$  izango dira.  $R_x$  erresistentzia zehar erortzen den tentsioa ondorengo hau da ( $R_0 = R_1$ ):

$$U_x^+ = \frac{R_x}{R_{OH} + 2R_0 + R_{OL}} \cdot (V_{OH} - V_{OL}) \quad (9)$$

AIaren anplifikazioa  $A_{NM}^+$  izanik:

$$U_{in}^+ = \frac{A_{NM}^+(V_{OH} - V_{OL})}{R_{OH} + 2R_0 + R_{OL}} \cdot R_x \quad (10)$$

eta hortik:

$$U_{out}^+ = \frac{VCC}{2} + \frac{U_{in}^+}{4} = \frac{VCC}{2} + \frac{A_{NM}^+(V_{OH} - V_{OL})}{4(R_{OH} + 2R_0 + R_{OL})} \cdot R_x \quad (11)$$

I/O1 = 0 eta I/O2 = 1 eginez,  $VD1 = V_{OL}$ ,  $VD2 = V_{OH}$ ,  $RD1 = R_{OL}$  eta  $RD2 = R_{OH}$  izango dira, korrantearen noranzkoa inbertitu eta ondorengoa da lortzen dena:

$$U_{out}^- = \frac{VCC}{2} - \frac{U_{in}^-}{4} = \frac{VCC}{2} - \frac{A_{NM}^-(V_{OH} - V_{OL})}{4(R_{OH} + 2R_0 + R_{OL})} \cdot R_x \quad (12)$$

$U_{out}^+$  eta  $U_{out}^-$  balioak mikrokontrolagailuaren sarrera analogiko bat erabiliz irakurtzen dira, ondoren digitalizatuak izateko. n biteko eta  $U_{ref}$  erreferentzia tentsiodun ADC bat erabiliz gero,  $U_{out}^+$  eta  $U_{out}^-$  tentsioei digitalizatzean hurrengo balioak ematen zaizkie:

$$s1 = \frac{U_{out}^+}{U_{ref}} \cdot 2^n \quad (13)$$

$$s2 = \frac{U_{out}^-}{U_{ref}} \cdot 2^n \quad (14)$$

Orduan,  $s=s1-s2$  balioa hurrengoa da:

$$s = s1 - s2 = \frac{(V_{OH} - V_{OL}) \cdot (A_{NM}^+ + A_{NM}^-) \cdot R_x}{4(R_{OH} + 2R_O + R_{OL}) \cdot U_{ref}} \cdot 2^n \quad (15)$$

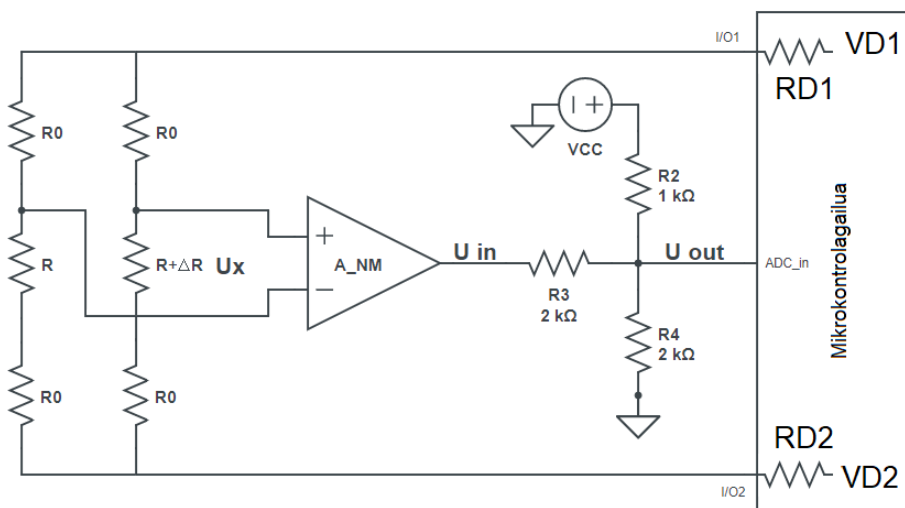
eta hemendik  $R_x$ -ren balioa askatuz:

$$R_x = \frac{4(R_{OH} + 2R_O + R_{OL}) \cdot U_{ref}}{(V_{OH} - V_{OL}) \cdot (A_{NM}^+ + A_{NM}^-)} \cdot \frac{s}{2^n} \quad (16)$$

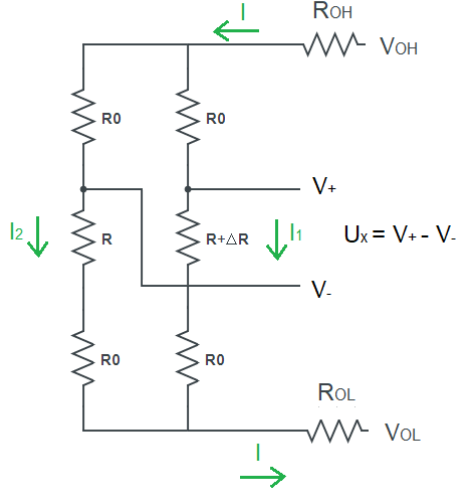
Ohartu  $R_x$  egindako neurketaren menpekota ( $s$ ) eta sarrera analogikoaren ADCaren bit kopuruaren ( $n$ ) menpekota dela.

## 5.2 Erresistentzia aldaketa txikiak irakurtzeko moldaketa

Lan honetan, sentsorearen erresistentziaren balioa neurtu beharrean, erresistentzia horren aldaketa neurtuko denez ( $\Delta R$ ), 26 irudian irudikatutako konfigurazioa moldatu behar da (ikus 27. irudia). Horretarako Wheatstonen zubi bat implementatu da zirkuituan, sentsorearen hasierako erresistentziaren balioko erresistentzia ( $R$ ) kokatuko da zubiaren adar batean, eta, bestean, sentsorea ( $R + \Delta R$ ). Adarretan  $R_0$  erresistentziak korrontearen balioa mugatzeko kokatu dira. Aurretik azaldutakotik aldatzen dena  $U_x$ -ren adierazpena da. Hori kalkulatzeko 28. irudiko zirkuitua askatu behar da.



Irudia 27: Sentsorearen erresistentzia aldaketa neurtzeko implementatuko den zirkuitua.



Irudia 28:  $U_x$ -ren adierazpena lortzeko ebatzi behar izan den zirkuitua.

Zirkuitu horretatik hurrengo ekuazioak lortzen dira ( $I/O1 = 1$  eta  $I/O2 = 0$  eginez):

$$I = I_1 + I_2 \quad (17)$$

$$V_{OL} + IR_{OL} + I_1(2R_0 + R + \Delta R) + IR_{OH} = V_{OH} \quad (18)$$

$$V_{OL} + IR_{OL} + I_1(2R_0 + R) + IR_{OH} = V_{OH} \quad (19)$$

(18) - (19) eginez, hurrengoak lortzen da:

$$I_1 = I_2 \cdot \alpha, \quad \text{non} \quad \alpha = \frac{2R_0 + R}{2R_0 + R + \Delta R} \quad (20)$$

eta 17. adierazpenean ordezkatzuz:

$$I_1 = I \frac{\alpha}{\alpha + 1} \quad I_2 = I \frac{1}{\alpha + 1} \quad (21)$$

$I_1$ -en adierazpena 18. adierazpenean ordezkatzuz  $I$ -rentzat hurrengoak lortzen da:

$$I = \frac{V_{OH} - V_{OL}}{R_{OL} + R_{OH}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{2R_0 + R}{(\alpha + 1)(R_{OL} + R_{OH})}} \quad (22)$$

$V_+$  eta  $V_-$ -ren adierazpenak hurrengoak dira:

$$V_+ = IR_{OL} + I_1(R_0 + R + \Delta R) + V_{OL} \quad (23)$$

$$V_- = IR_{OL} + I_2(R_0 + R) + V_{OL} \quad (24)$$

$U_x = V_+ - V_-$  izanik eta 21. adierazpena erabiliz:

$$U_x^+ = V_+ - V_- = I \frac{\alpha}{\alpha + 1} (R_0 + R + \Delta R) - I \frac{1}{1 + \alpha} (R_0 + R) \quad (25)$$

22. adierazpena erabiliz eta garatuz hurrengo lortzen da:

$$U_x^+ = V_+ - V_- = \frac{(V_{OH} - V_{OL})R_0\Delta R}{(4R_0 + 2R + \Delta R)(R_{OL} + R_{OH}) + (2R_0 + R)(2R_0 + R + \Delta R)} \quad (26)$$

Azkenik,  $4R_0 \gg 2R + \Delta R$ ,  $2R_0 \gg R$  eta  $2R_0 \gg R + \Delta R$  dela kontsideratuz hurrengo adierazpen hurbildua lortu daiteke:

$$U_x^+ = V_+ - V_- = \frac{(V_{OH} - V_{OL})\Delta R}{4(R_0 + R_{OL} + R_{OH})} \quad (27)$$

Era antzekoan  $U_x^-$  lortuz, mikrokontrolagailuak irakurtzen duen seinale digitalizatua ( $s = s_1 - s_2$ ) hurrengo adierazpenak ematen du:

$$s = \frac{(V_{OH} - V_{OL})(A_{NM}^+ + A_{NM}^-)}{16(R_{OH} + R_{OL} + R_0)U_{ref}} \cdot \Delta R \cdot 2^n \quad (28)$$

eta  $\Delta R$  askatuz:

$$\Delta R = \frac{16(R_{OH} + R_{OL} + R_0)U_{ref}}{(V_{OH} - V_{OL})(A_{NM}^+ + A_{NM}^-)} \cdot \frac{s}{2^n} \quad (29)$$

Beraz,  $\Delta R$   $s$  neurketaren menpe eta sarrera analogikoaren ADCaren bit kopuruaren menpe dago berriro ere. Hurrengo azpiatalean azaldutako metodo honen inplementazioaz hitz egingo da, baina hori baino lehen, lortu daitekeen bereizmenaren estimazioa egingo da. Kontuan hartuz erabiliko den mikrokontrolagailua ATTiny85-a izango dela [16], eta erabiliko den instrumentazio anplifikagailua INA128-a izango dela [26], erabilitako parametroak 3. taulan bildu dira. Datu horiek 29. adierazpenean ordeztatuz hurrengo lortzen da:

$$\Delta R = 181.64 \mu\Omega \cdot s \quad (30)$$

Hau da, teorikoki, bereizmena  $181.64 \mu\Omega$ -ko izango da. Esan beharra dago, 29. adierazpeneko aldagaiei balioak ematean hurbilpen asko egin direla. Argi dago, adibidez, ATTiny85-aren irteera digitala 1-ean jartzean, ez duela zehazki 3.3 V-eko tentsioa eman.  $R_{OH}$  eta  $R_{OL}$ -ren balioak lortzeko irteera digitalek ematen duten tentsioa eta korrante maximoaren arteko zatiketa egin da. Eman dezaketen korrante maximoa 40 mA dela onartu da, hori baita datasheetak dioena [16]. Baina, baliteke, aplikazioan korrante eta tentsio horien balioak baxuagoa izatea. Horretaz gain,  $A_{NM}^+$  eta  $A_{NM}^-$ -ren balioak INA128 eman ditzakeen handienak aukeratu dira.

Parametroa	Balioa
$V_{OH}$	3.3 V
$V_{OL}$	0 V
$R_{OH}$	$\frac{V_{OH}}{I_{OH}} = \frac{3.3V}{40mA} = 82.5\Omega$
$R_{OL}$	$\frac{V_{OL}}{I_{OL}} = 0$
$A_{NM}^+$	10000
$A_{NM}^-$	10000
$R_0$	150 $\Omega$
$U_{ref}$	3.3 V
n	10

Taula 3: 29. adierazpenaren parametroak ordezkatzeko erabilitako balioak.

### 5.3 Mikrokontrolagailuaren programaketa eta frogapena

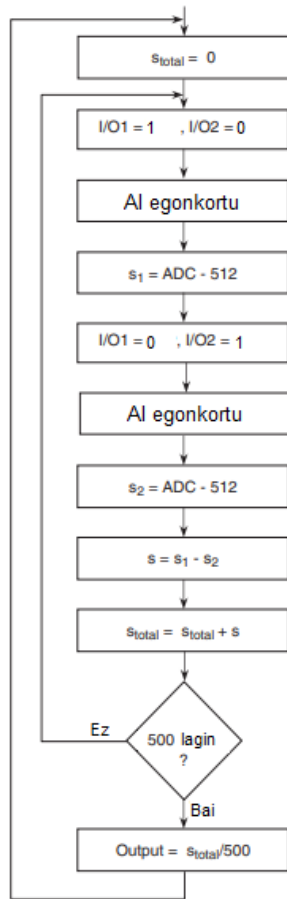
ATTiny85-ean kargatutako programa 29. irudian ikus daiteke. Honek 30. irudiko fluxu diagrama jarraitzen du, programaren komentarioetan irakurri ahal dira emandako pausuak. Programa horren bidez s balioa lortzen da, eta, ondoren, 30 adierazpena aplikatzen da. Lorturiko emaitzak bisualizatzeko, I2C busaren bidez bidaltzen zaio eginiko neurketa Arduinoari, kasu honetan, ATTiny85-a slave moduan konfiguratu da, Arduinoa masterra izanik. Behin datua jasota, Arduinoak Arduino IDE-aren puerto serietik inprimatzen du zenbakia, eta modu horretan, ordenagailuaren pantailan agertzen da.

```

void loop() {
  int aux = 0; //aldagai auxiliarra kalukuluak egiteko
  int N = 500; //neurketa egingo den aldi kopurua
  delay(500);
  for (int j = 0; j <= N - 1; j++) { //Neurketa N aldiz egingo da
    digitalWrite(4, HIGH); //I/O1 = 1, I/O2 = 0
    digitalWrite(1, LOW);
    delay(5); //INA128 egonkortu arte itxaron
    int dVal = analogRead(A3) - 512; //s2 irakurri
    digitalWrite(1, LOW); //I/O-ak 0-an jarri
    digitalWrite(4, LOW);
    delay(5); //INA128 egonkortu arte itxaron
    digitalWrite(4, LOW); //I/O1 = 0, I/O2 = 1
    digitalWrite(1, HIGH);
    delay(5); //INA128 egonkortu arte itxaron
    int iVal = (512 - (analogRead(A3) - 512)) - 512; //s1 irakurri
    digitalWrite(1, LOW); //switching off digital outputs
    digitalWrite(4, LOW); //I/O-ak 0-an jarri
    delay(5);
    aux += abs((-dVal + iVal)); //aldagai auxiliarrera s balioa gehitu
  }
  //binary structure for serial comm.
  hi.floatingPoint = aux / 500.0; // Bataz-bestekoa egin eta float moduan gorde
}

```

Irudia 29: Erresistentzia aldaketaren neurketa burutzeko erabilitako programa nagusia.

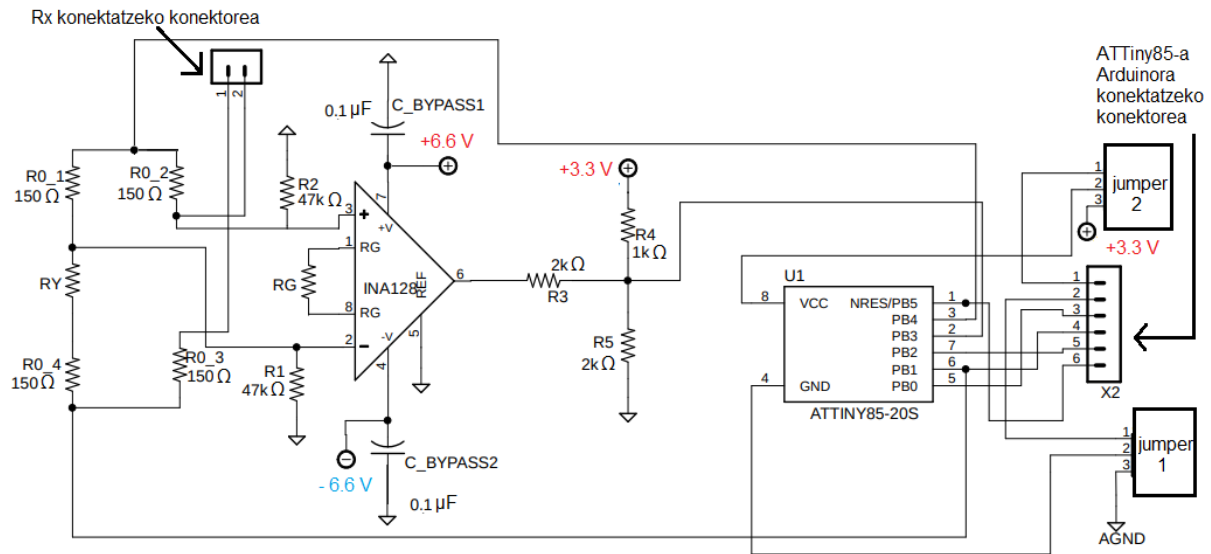


Irudia 30: Sub-miliohm ordenako erresistentzia aldaketak neurtzeko erabiltzen den prozesuaren fluxu-diagrama.



## 5.4 Egokitzen etaparen diseinua

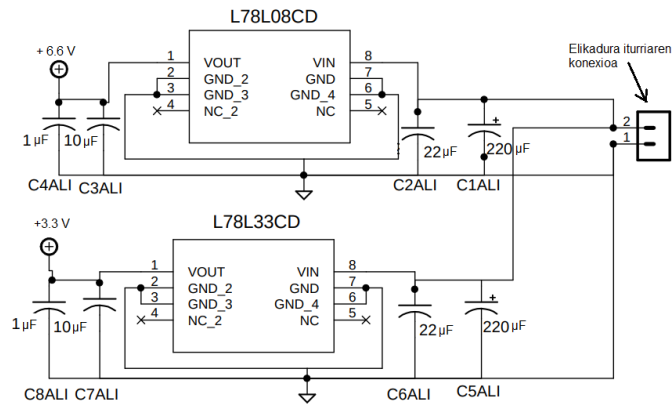
Aipaturiko metodoa inplemetatzeko 31. irudian ikusi daitekeen zirkuitua erabili da.  $R_x$  sentsorea izango da, eta  $R_y$  sentsorearen hasierako erresistentziaren balioa duen erresistentzia izango da, Wheatstoneen zubia orekatzeko erabiliko dena.  $R_x$  erresistentzia konektatzeko konektorea eta ATTiny85-a Arduinoaren bitartez programatzeko konektorea gehitu dira diseinuan. ATTiny85-a programatu bitartean Arduinoaren elikadurara eta GND sinalera konektatua egon behar denez, baina gero NFC bidez lorturiko elikadura-erkin elikatu behar denez, oraingoan ere jumperrak gehitu dira.



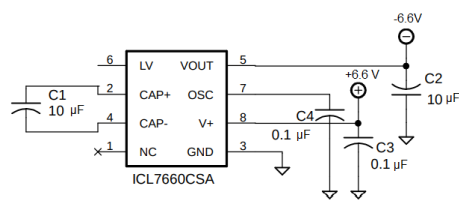
Irudia 31: Seinalearen egokitzapen etapa inplementatzeko zirkuituaren eskematikoa.

Elikadurei dagokienez, hiru elikadura mota behar dira zirkuituak funtzionatzeko: 3.3 V, 6.6 V eta -6.6 V. 3.3 V-eko elikadura  $R_3 - R_5$  erresistentzia-egituran erabiltzen da eta 6.6 V eta -6.6 V-eko elikadurak INA128 amplifikagailua elikatzeko beharrezkoak dira. Horiek elikadura iturri bat, tentsio erreguladoreak eta CC-CC bihurtgailu bat erabiliz lortu dira, elikadura iturri bakarretik aipaturiko hiru tentsioak lortu ahal izateko. Erregulatzailen funtzionamendua bermatzeko 32. irudian agertzen diren kondentsadoreak jarri behar dira sarrera eta irtera seinaleen eta lurraren artean. Aukeratutako tentsio erregulatzaileak L78L08CD (6.6 V lortzeko) eta L78L33CD (3.3 V lortzeko) izan dira.

Azkenik, INA128 amplifikatzaile instrumentala elikatzeko beharrezko -6.6 V-ak CC-CC bihurtgailu batetik lortu dira. Zirkuitu integratu horrek sarrerako tentsio positibo bat jasota, irteeran sarrerako tentsioaren balio absolutu berdineko tentsio negatiboa ematen du. Aukeratutako CC-CC bihurtgailua ICL7660CSA izenekoa izan da. Berrito ere, horren funtzionamendu egokia bermatzeko gailuaren datasheetak gomendatzen dituen kondentsadoreak gehitu dira diseinuan (ikus 33. irudia).

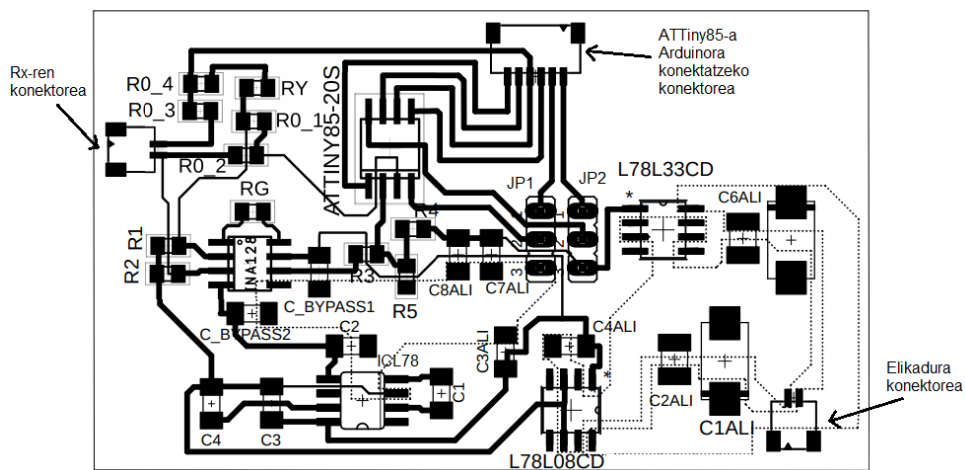


Irudia 32: Tentsio erreguladoreak erabiltzeko beharrezkoak diren konexioen eskematikoa.



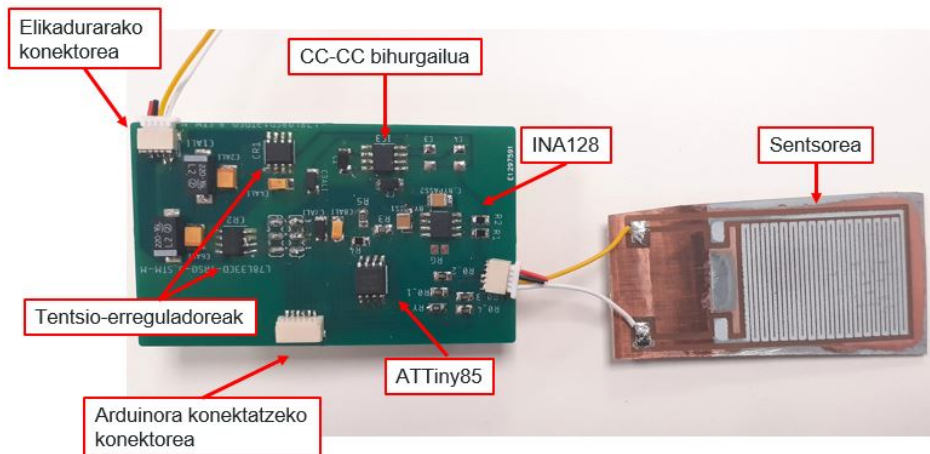
Irudia 33: CC-CC bihurtzailea erabiltzeko beharrezko konexioen eskematikoa.

Elementu guztiakin diseinu superfiziala garatu da EAGLE programa erabiliz (ikus 34. irudia), eta, ondoren, zirkuitua PCB batean inprimatzera bidali da.



Irudia 34: Egokitze etapa inplementatzeko eginiko diseinu superfiziala.

Zirkuitua montatu eta sentsorea konektatu zaio (ikus 35. irudia).



Irudia 35: Diseinaturiko zirkuitua sentsore bati konektatuta.

## 5.5 Egokitze etaparen frogapena korrosio sentsorearekin



Irudia 36: C7 sentsorearen argazkia HCl-a aplikatu ondoren.

Zirkuitua frogatzeko C7 sentsorea erabili da. C7 sentsorea konektoreari bi kable bidez konektatu behar zaionez, sentsorea eta kableen erresistentzia neurtu da froga egin baino lehen, eta hori  $R=1.982 \Omega$ -koa izan da, beraz, zubiaren beste adarrean  $R_y=2\pm 0.02 \Omega$ -ko erresistentzia erabili da. Hortaz, hasiera batetik erresistentzia aldaketa bat neurtu beharko litzateke,  $R_y$  erresistentzia eta sentsorearen erresistentzia ez baitira berdinak. Zirkuitua elikadura-iturrira konektatu eta lorturiko neurketak  $\Delta R=0.045 \Omega$ -koa dela adierazten du. Kontuan harturik  $R_y$  erresistentziaren tolerantzia eta sentsorearen erresistentziaren balioa, esan genezake eginiko neurketak zentzua duela, magnitude ordena, behintzat, egokia baita.

Froga aurreratuagoak egiteko, etapari egokitutako sentsorean korrosioaren eraginak simulatu dira azido klorhidriko disoluzioa erabiliz. HCl disoluzioa erabili da (%10 bolumen-konzentrazioan) eta horri 0.035 g hexametileno tetramina gehitu zaio. Horren bidez kobreak gaineko zinka desegitea lortzen da kobrea erasotu gabe.

Disoluzioa sentsorean aplikatu da, eta neurketak egin ondoren,  $\Delta R$  balioa txikitzen dela ikusi da. Horrek zentzua du, sentsorearen zink geruza mehetzen doan heinean sentsorearen erresistentzia hazten baita. Sentsorearen erresistentzia haziz gero,  $R_y$  erresistentziaren balioa izatera gerturatzen da,  $\Delta R$  txikituz. Hala ere, espero zena baino erresistentzia aldaketa txikiagoak neurtu dira. 36. irudian ikus daiteke HCl-ak sentsorean

eragindako zink geruzaren desagertzea nabaria dela,  $\Delta R$ , ordea, hasieran  $\Delta R = 0.0450 \Omega$  izatetik,  $\Delta R = 0.0447 \Omega$  izatera igaro da. Baliteke honen arrazioa 3. taulan bildutako parametroak aukeratzekoan eginiko hurbilketa izatea.

Horretaz gain, kontuan izan etapa frogatzeko elikadura-iturri bat erabili dela. Etapa honen diseinua moldatu beharko litzateke *energy harvesting*-aren bitartez lorturiko elikadurarekin neurketak egin ahal izateko. Neurketak egin bitartean zirkuituak momentu puntual batzuetan 20 mA-eko korrante-kontsumoa izatera iristen dela ikusi da. Hori diseinaturiko NFC etaparekin ez dela bateragarria konturatu gara, M24LR64E-R mikrotxipak gehienez 6 mA-eko korrantea eman baitezake. Gainera, aurkeztutako zirkuituan behar dugun 6.6 V-eko elikadura ere ezin da lortu diseinaturiko komunikazio etapa erabiliz. Hortaz, egokitzapen etapa egiteko beste proposamen bat behar da, hurrengo atalean azalduko dena.

## 6 Proposatzen den konponketa

Aurreko atalean azalduko zirkuituak gehiegi kontsumitzen duenez, atal honetan zirkuitu sinpleago baten diseinua proposatuko da. Sinplifikazio honen bidez zirkuituaren elementu kopurua gutxitzea bilatzen da, hau da, zirkuitu integratu gutxiago erabiltzea, horrek zirkuituaren kontsumoa jeitsiko baitu. Horretaz gain, zirkuitu berri honetan ez da +6.6 elikadura beharko, oraingoan, tentsio bakarrarekin elikatuko da zirkuitua, NFC zirkuituak *energy harvesting* bidez emango duena.

Wheatstonen zubia mantendu da, eta bi adarren arteko tentsio aldaketa INA128 anplifikagailu instrumentala anplifikatuko da oraingoan ere, horren bi irteera digitalen bidez elikatuko da Wheatstone zubia,  $I/O1 = 1$  eta  $I/O2 = 0$  mantenduko direlarik denbora osoan ( $V1 = V_{OH}$ ,  $V2 = V_{OL}$ ,  $R1 = R_{OH}$  eta  $R2 = R_{OL}$  izango dira). Orain, ordea, INA128-ren irteera ( $U_{in}$ ) izango da ATTiny85-aren sarrera analogiko baten bidez irakurritako dena (ikus 37. irudia). Kasu honetan dugun zubia kontuan hartuz, ATTiny85-ak irakurritako balio hori  $\Delta R$  erresistentzia aldaketarekin hurrengo moduan erlazionatuko du:

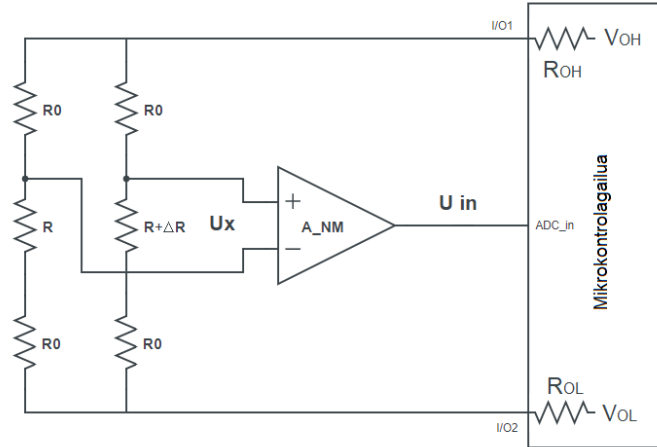
$$U_{in} \approx \frac{V_{CC} A_{NM}^+ \cdot \Delta R}{2R_0 + R} \quad (31)$$

Tentsio hori  $U_{ref}$  erreferentzia-tentsioa eta  $n$  bitekin kodifikatuko bada, digitalizatzean honako balio hau izango du:

$$N = \frac{V_{CC} A_{NM}^+ \cdot \Delta R}{2R_0 + R} \cdot \frac{2^n}{U_{ref}} \quad (32)$$

Hortaz,  $\Delta R$  ondorengoa da:

$$\Delta R = \frac{(2R_0 + R)U_{ref}}{V_{CC} A_{NM}^+} \cdot \frac{N}{2^n} \quad (33)$$



Irudia 37: Seinalearen egokitzapen etaparako proposatzen den zirkuituaren eskema.

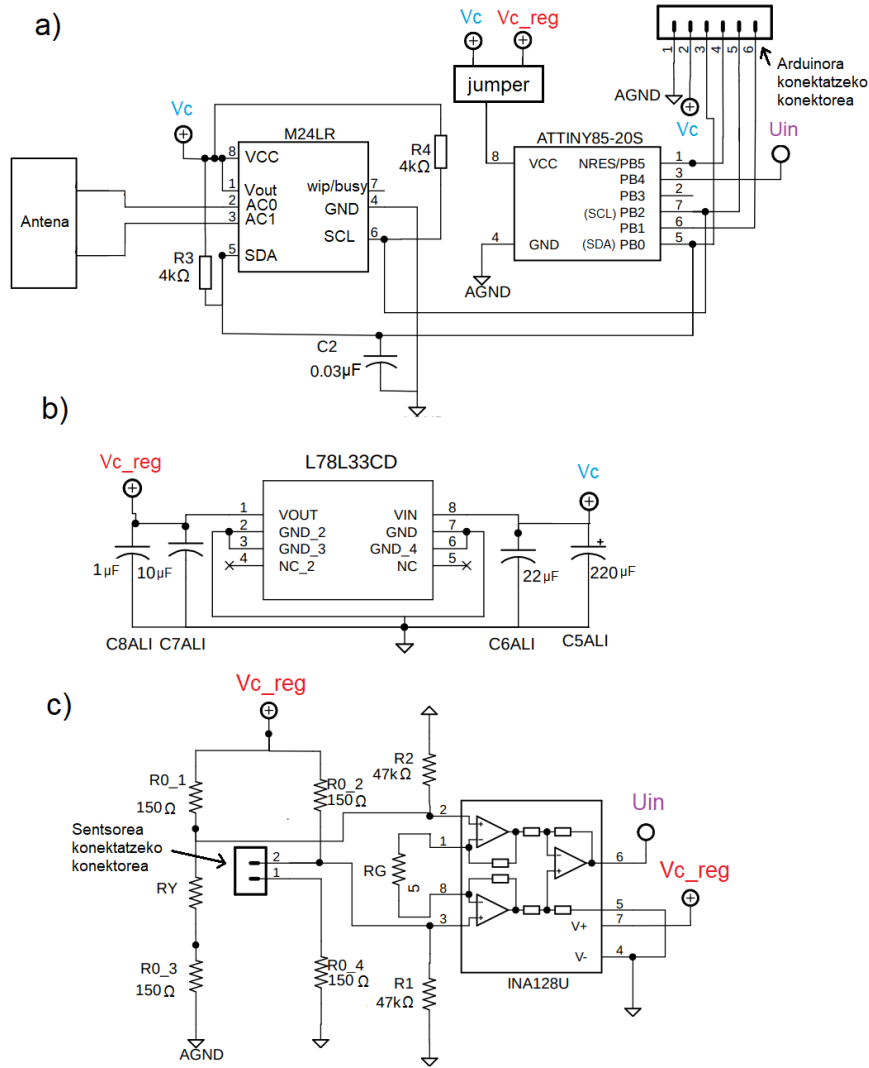
Proposatutako zirkuitu honen bidez neurtuko litzateken bereizmena estimatuko da orain. Sensorean neurtuko den erresistentzia aldaketa maximoa  $0.2 \Omega$  dela suposatuz,  $U_x$ -ren balio maximoa  $2.2 \text{ mV}$  izango da. INA128 amplifikagailua  $3.3 \text{ V}$  erabiliz elikatuko dela suposatuz (*energy harvesting* bitartez lortu den elikadura-tentsio maximoa), lortu daitekeen amplifikazio maximoa  $A_{NM}^+ = \frac{3.3\text{V}}{0.0022\text{V}} = 1500$ -koa da, hortik aurrera INA128-aren irteera saturatzen baita. Hortaz, 1. taulako parametroen balioak erabiliz,  $R = 2 \Omega$  aukeratuz eta kalkulaturako  $A_{NM}^+$  balioa erabiliz hurrengoa lortzen da:

$$\Delta R = 197 \mu\Omega \cdot N \quad (34)$$

Teorikoki detektatuko litzateken erresistentzia aldaketa hori lock-in amplifikagailu digitalean oinarrituriko metodoak emandakoaren magnitude ordena berdinekoa da, eta, gainera, zirkuituan elementu gutxiago behar izan dira. Berrero ere, kontuan hartzekoa da 33. adierazpeneko parametroak aukeratzeko unean eginiko hurbilketek eginiko estimazioan izan dezaketen eragina. Esaterako, *energy harvesting*-aren bidez lortzen den elikatze-tentsioa ( $V_{CC}$ ) ez da  $3.3 \text{ V}$ -ekoa izango, hori baino baxuagoa izango da.

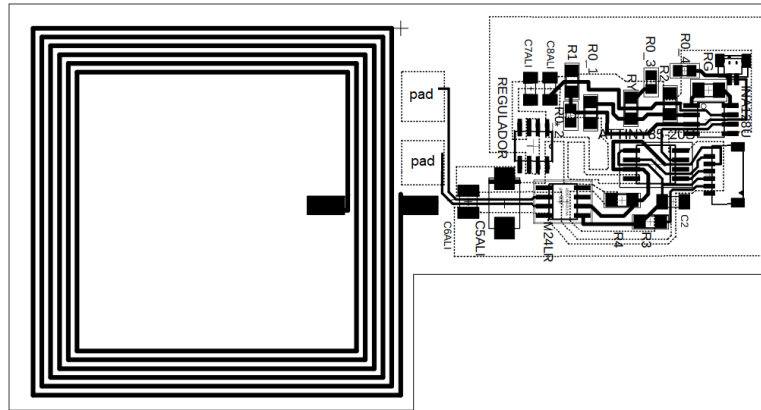
Amaitzeko, atal honetan proposatutako zirkuitua eta komunikazio etapa elkartuz lorturiko zirkuituaren eskematikoa diseinatu da 38. irudian. Alde batetik, komunikazio etapari dagokion zatia 38a irudian ageri da. Hori 4. atalean azaldutako zirkuituan oinarritzen da, baina bi desberdintasun ditu. M24LR64E-R zirkuituaren VCC eta Vout pinak elkar konektatu dira, horrek txiparen funtzionamendua hobetzen duela ikusi baita. Gainera, tentsio erregulatzailerik bat gehitu da zirkuituan (ikus 38b irudia). Erregulatzailerik *energy harvesting* bidez lorturiko elikadura erregulatzeko erabiliko da, elikadura ahalik eta konstanteen mantentzea komeni baita. ATTiny85-aren elikadura aukeratzeko jumper bat erabili da oraingoan ere. Konturatu ere, Arduinoak ematen duen tentsioa eta *energy harvesting*-a bidez lortzen den tentsioa nodo berdinari dagozkio (Vc), baina, Arduinoa ATTiny85-a programatzeko soilik erabiliko da, bitarte horretan zirkuitua ez da funtzionamenduan egongo, hortaz, nahiz eta bi tentsioak nodo berdinari egokitzen zaizkion, zirkuituaren erabilpenaren bi fase ezberdinei dagozkie: programazioa eta funtzionamendua.

Azkenik, egokitzapen etapari dagokion zirkuitua 38c irudian ikus daiteke. Hori atal honetan proposaturiko zirkuitua da, tentsio erregulatzaileak emandago  $V_c$  reg tentsioarekin elikatu da etapa hau eta bere irteera ( $U_{in}$ ) ATTiny85-aren sarrera analogiko batera konektaturik dago.



Irudia 38: Erresistentzia aldaketaren neurketa burutzeko erabilitako programa nagusia.

Zirkuitu honen diseinu superfiziala ere egin da EAGLE programa erabiliz (ikus 39. irudia). Oraingoan, antena zirkuituarekin batera gehitu da diseinuan. Diseinuan antenaren bi terminalak konektatzeko bi pad gehitu dira, horien artean antena egokitzeko beharrezkoak diren kondentsadoreak jarriko dira. Azkenik, diseinua PCB flexible batean inprimitzera bidali da.



Irudia 39: Erresistentzia aldaketaren neurketa burutzeko erabilitako programa nagusia.

## 7 Ondorioak eta etorkizunerako proposatzen den norabidea

Lan honen bitartez korrosioa monitorizatzeko gai den sentsore-erresistikorra garatu da. Hori egiteko teknikan trebatzeaz gain, teknika horiek sentsorea garatzeko egokiak direla frogatu da. Sentsore ezberdinak diseinatu dira, eta erresistentzia aldaketa handienak sentsoreen pista luzatuz, kobrezko geruzaren lodiera mehetuz eta zinkeko geruzaren lodiera handituz lortu dira.

Sentsorearekin batera, neurketa egin eta komunikatuko duten etapen diseinua egin da. NFC teknologia erabiliz, neurketa mugikor batekin irakurtzea ahalbidetzeaz gain, *energy harvesting*-a erabiliz neurketa-sistema elikatzeo aukera dagoela ikusi da. Etapa hau diseinatzeaz gain, bere funtzionamendua tenperatura sentsore batekin frogatu ahal izan da eta funtzionamendua egokia dela baieztatu da.

Seinalearen egokitzapen etapari dagokionez, nahiz eta hasiera batean lock-in amplifikailu digitalean oinarrituriko metodoa aplikatzeko saiakera egin den, horrek *energy harvesting*-ak eman zezakeen elikadura baino gehiago behar zuela ikusi da. Ondorioz, etapa honentzat beste diseinu bat proposatu da, zirkuitua sinplifikatu duena sentsibilitatea mantenduz. Azken proposamen hori ezin izan da frogatu, ez baita denborarik egon zirkuitua inprimatzeko, baina etorkizunean egingo da.

Bestetik, sentsorea gainazal flexiblean sortzeko aukera dagoela frogatzeaz gain, zirkuituen diseinu guztiak superfizialki garatu dira. Hots, egokitze eta komunikazio etapak gainazal flexible baten gainean inprimatu ahal dira. Modu horretan, sistema guztia garatu daiteke gainazal flexiblean, kaptonean esaterako.

Lan honek, ordea, baditu hobetzeko gakoak, etorkizunean landu beharko direnak sistemaren funtzionamendua optimizatzeko:

- Sentsoreari dagokionez, lan honetan kobreak gainean depositatu da zinka, eta kobreak zinkak baino erresistibitate nahiko baxuagoa duenez, horrek sentsorearen erresistentzia totala txikitu eta zinkaren erresistentziazatik aldatu du. Erresistentzia aldaketa handitzea bilatzen da ordea. Hori egiteko, kobre gainazalaren lodiera

txikitzeo pulidora elektriko baten erabilpena kontsideratuko da. Bestetik, kontsideragarria da kobrea ez den beste metal baten gainean depositatzea zinka. Metal horrek zinkak baino erresistibitate altuagoa balu, sentsorearen erresistentzia zink geruzaren erresistentzia izatera hurbilduko litzateke (bi metalen erresistentziak paraleloan egongo balira bezala jokatzan dute), eta sentsorearen erresistentzia totala handituko litzateke.

- Sistema osoari dagokionez, 6. atalean aurkeztutako zirkuitua muntatu eta frogatu beharko litzateke. Zirkuituaren elikadura etaparekin arazorik egonez gero, horren planteamendu berria egin beharko litzateke. Zirkuituak funtzionatuz gero, sentsorea kalibratu beharko litzateke.

Bukatzeko, azken lerro hauen bitartez, lan hau egin bitarteko esperientziaz hitz egin nahiko nuke. Proiektu honetan parte hartu izanari esker, etorkizunean guztiz erabilgarriak izango zaizkidan teknikak eta ezagutzak ikasteaz gain, giro ezin hobean lanean aritzeko aukera izan dut. Nire zuzendari eta lankideei esker, elektronikak barne hartzen dituen hainbat gai landu ditut, era oso praktiko eta hezigarrian. Horrek, zalantzarik gabe, aurrerantzean jarraituko dudan bide zientifikoan eragin esanguratsua izango du, eta bide horri ekiteko erraminta eta baliabide hobeezinak eman dizkit.



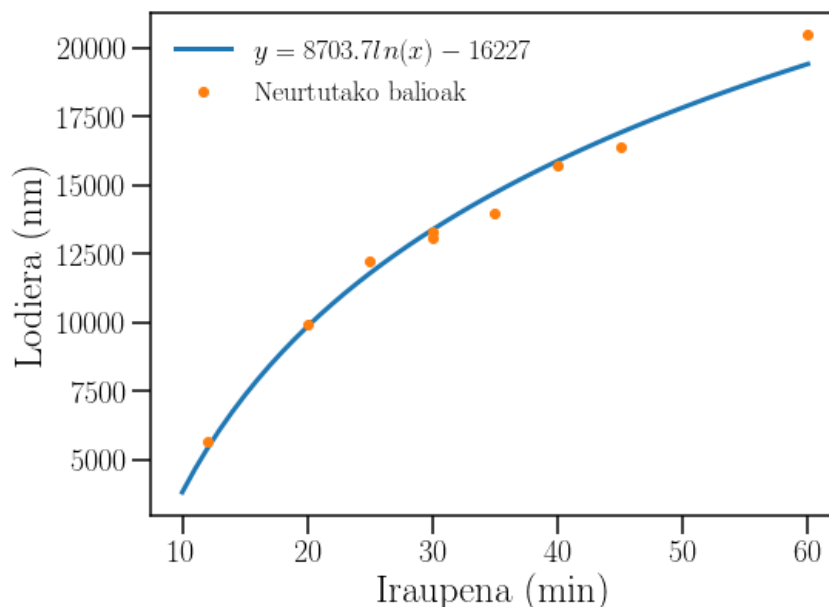
## A Elektrodeposizioaren azterketa

Esan bezala, lan honetan elektrodeposizioa kobrearen gainean zink geruza bat depositatzeko erabili da. Sentsorearen diseinu optimoa ziurtatzeko depositaturiko zink geruzaren lodiera kontrolpean izatea ezinbestekoa da, eta horretarako egin da azterketa hau. Azterketa honen helburu nagusia depositaturiko zink geruzaren lodieran eragina duten faktore eta parametroak ezagutu, eta, nahi den zink geruza sortzeko parametro horiek nola erabili ikastea da. Hori egiteko hiru azterketa mota egin dira:

- Geruzaren lodieraren elektrodeposizioaren iraupenarekiko menpekotasuna.
- Geruzaren lodieraren korrante-dentsitatearekiko menpekotasuna. Aipatzen den korrante-dentsitate hau depositatu nahi den gainazalarekiko zenbat korrante erabili den adierazten du.
- Geruzaren topografiaren menpekotasuna depositaturiko geruzaren azalerarekiko. Kasu honetan ez da geruzaren lodiera aztertu, baizik eta geruzaren gainazalaren egokitasuna: homogeneoa izatea.

### A.1 Geruzaren lodieraren elektrodeposizioaren iraupenarekiko menpekotasuna

Korrante-dentsitatea  $0.04 \text{ A/cm}^2$ -an finkaturik, laginaren  $1 \text{ cm}^2$ -ko azalera murgildu da  $\text{ZnSO}_4$  1 M disoluzioan. Iraupen ezberdineko elektrodeposizioak egin dira, eta, ondoren, laginen zink geruzen lodiera perfilometro mekanikoa erabiliz neurtu dira. Lorturiko emaitzak 40. irudiko grafikan ageri dira.



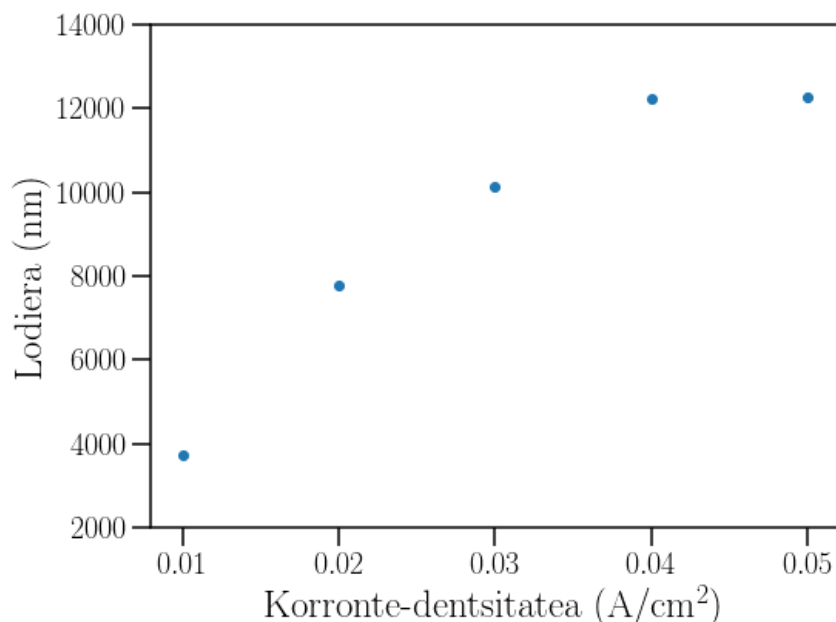
Irudia 40: Iraupen ezberdineko elektrodeposizioen bidez lorturiko zink geruzaren lodieraren karakterizazioa.  $R^2 = 0.9827$  da erregresio logaritmikoaren determinazio koefizientearen balioa.

Zink gainazalaren lodiera elektrodeposizioaren iraupenarekin era logaritmikoan hazten dala ikus daiteke. Horretaz gain, ez da inhomogeneotasunik ikusi laginen zink gainazalarekin. Konturatu azterketa hau  $I = 0.04 \text{ A/cm}^2$  deneko kasurako soilik egin dela, lanean

zehar  $I = 0.02 \text{ A/cm}^2$ -ko korrante-dentsitatea erabili da, aurrerago ikusiko den moduan, korrante-dentsitate hori erabiliz zink geruza homogenea lortzen baita. Kasu horretan, zink geruzaren lodierak erreakzioarekiko haziera logaritmikoa dela suposatu da ere. Berriro ere, azpimarragarria da azterketa honen helburua elektrodeposizioaren jokaeraren ideia bat egitea soilik dela, ez bere jokaera sakonki ikertzea.

## A.2 Geruzaren lodieraren korrante-dentsitatearekiko menpekotasuna

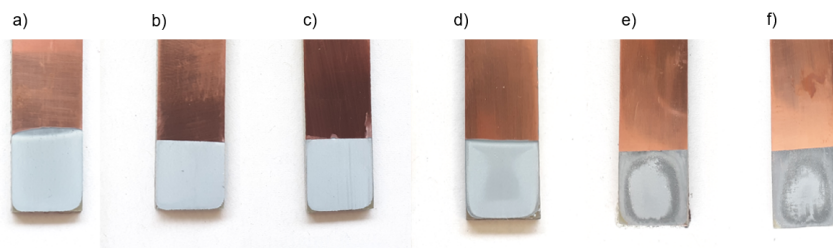
Kasu honetan, elektrodeposizioaren iraupena 25 minututan finkatu eta laginaren  $1 \text{ cm}^2$ -ko azalera murgildu da  $\text{ZnSO}_4$  1 M disoluzioan. Murgildutako lagin-azalerarekiko korrante dentsitate ezberdinak erabiliz zenbait elektrodeposizio egin dira. Laginen zink geruzaren lodiera perfilometro mekanikoaren bidez neurtu eta lorturiko emaitzak grafikatu dira (ikus 41. irudia).



Irudia 41: Korrante-dentsitate ezberdinetarako eginiko elektrodeposizioen zink geruzaren lodierak.

Gainazala korrante-dentsitatea handitzearekin batera loditzen dela ikus daiteke.  $I = 0,05 \text{ A/cm}^2$ -tik aurrera ezin izan da lodiera neurtu perfilometro mekanikoa erabiliz, zink gainazalak ezhomogeneotasun handia erakusten baitzuen (ikus 42. irudia). Irudi horretan argi ikusten da nola  $I = 0,04 \text{ A/cm}^2$ -tik aurrera ezhomogeneotasun nabariak agertzen hasten diren, batez ere laginen ertzetan.

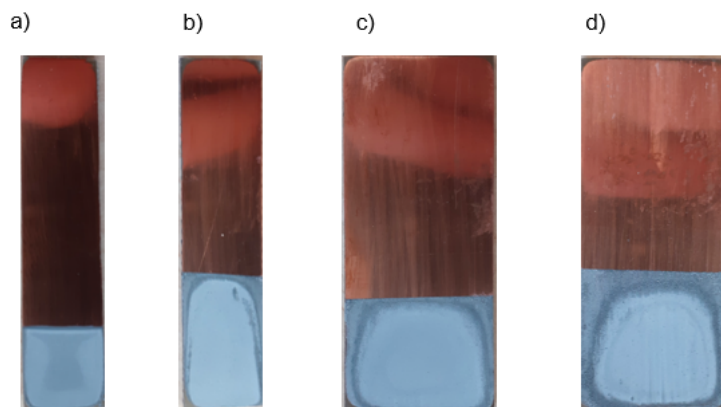
Joera hori bat dator [27] erreferentzian aurkitu daitekeenarekin. Nurhaswani Alias eta kideek deposizio optimoena  $I = 0,02 \text{ A/cm}^2$ -tan lortzen dela diote, zinka era hexagonalean kristalizatzen delako, geruzaren homogeneotasuna bermatuz.  $I = 0,04 \text{ A/cm}^2$  baino korrante-dentsitate handiagoetarako, ordea, zink pikorrak sortzen dira, eta ondorioz, irregulartasunak. Hori hala izanik, lan honetan elektrodeposizioak egitean  $I = 0,02 \text{ A/cm}^2$ -ko korrante dentsitatea erabiltzea erabaki da.



Irudia 42: Geruzaren lodieren korrante-dentsitatearekiko menpekotasuna aztertzeke erabilgaitako laginak, erabilgaitako korrante-dentsitateak honako hauek dira:  $0.1 \text{ A/cm}^2$  (a),  $0.2 \text{ A/cm}^2$  (b),  $0.3 \text{ A/cm}^2$  (c),  $0.4 \text{ A/cm}^2$  (d),  $0.5 \text{ A/cm}^2$  (e) eta  $0.6 \text{ A/cm}^2$  (f).

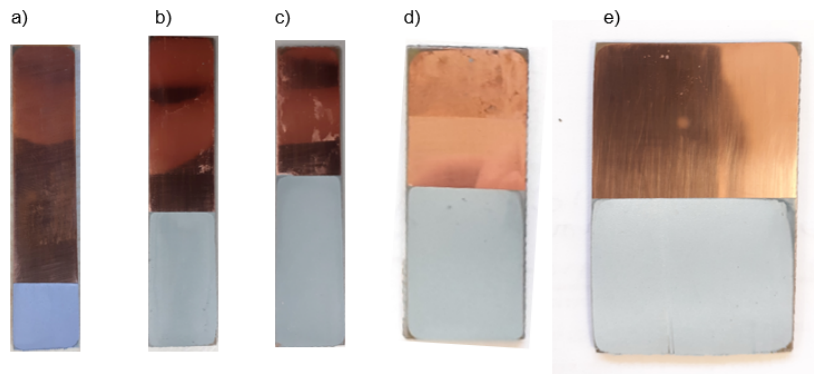
### A.3 Geruzaren morfologiaren menpekotasuna depositaturiko geruzaren azaleraren menpe

$I = 0,04 \text{ A/cm}^2$ -ko korrante-dentsitatea manteduz, 25 minutuko elektrodeposizioak egin dira laginen gainazal-azalera desberdinetarako. Froga hau oso garrantzitsua da sentso-rearen garapenerako, azalera ezberdinetako deposizioak egin behar izan baitira eta horien homogeneotasuna bermatzea garrantzitsua izan da. Argi ikus daiteke 43. irudian nola azalera handituz gero, zink geruzan irregulartasun nabariak agertzen diren. Hori dela eta, sentso-rea garatzeko  $I = 0,04 \text{ A/cm}^2$ -ko korrante-dentsitatea ez erabiltzea erabaki da, sentso-rea osatuko duen zink geruzak ahalik eta homogeneoena izan behar baitu.



Irudia 43: Geruzaren egoeraren menpekotasuna depositaturiko geruzaren azalerekiko aztertzeke erabilgaitako laginak, azalera honako hauek dira:  $1 \text{ cm}^2$  (a),  $2 \text{ cm}^2$  (b),  $3 \text{ cm}^2$  (c) eta  $4 \text{ cm}^2$  (d).

Lehenago aipaturikoa berriro eginez, baina oraingoan  $I = 0,02 \text{ A/cm}^2$ -ko korrante-dentsitatea erabiliz, 44. irudian ikus daitezkeen emaitzak lortzen dira. Nahiz eta laginen ertzetan irregulartasun txikiak ageri diren, zink geruzak homogeneoak dela ikus daiteke, eta  $I = 0,04 \text{ A/cm}^2$ -ko korrante-dentsitatea erabiliz lorturiko emaitzekin parekatuz, hobekuntza nabaria da homogeneotasunari dagokionez.



Irudia 44: Geruzaren egoeraren menpekotasuna depositutako geruzaren azalerarekiko aztertzeko erabilitako laginak, azalera honako hauek dira:  $1 \text{ cm}^2$  (a),  $2 \text{ cm}^2$  (b),  $3 \text{ cm}^2$  (c),  $5 \text{ cm}^2$  (d) eta  $8 \text{ cm}^2$ .

## 8 Bibliografia

### Erreferentziak

- [1] G Koch, J Varney, N Thompson, O Moghissi, M Gould, and J Payer. International measures of prevention, application, and economics of corrosion technologies study. *NACE International*, page 216, 2016.
- [2] GH Koch, MPH Brongers, NG Thompson, YP Virmani, and JH Payer. Corrosion cost and preventive strategies in the united states. Technical report, 2002.
- [3] B Hou, X Li, X Ma, C Du, D Zhang, M Zheng, W Xu, D Lu, and F Ma. The cost of corrosion in china. *NPJ Materials Degradation*, 1(1):1–10, 2017.
- [4] PR Roberge. *Corrosion inspection and monitoring*, volume 2. John Wiley & Sons, 2007.
- [5] HA Porte. The effect of environment on the corrosion of metals in sea water-a literature survey. 1967.
- [6] MS Idora, MM Rahman, M Ismail, and WB Nik. Effect of zinc coating thickness on corrosion performance of mild steel in atmospheric and seawater environment. In *Applied Mechanics and Materials*, volume 554, pages 213–217. Trans Tech Publ, 2014.
- [7] S Prifiharni, L Nuraini, G Priyotomo, H Gunawan, and I Purawiardi. Corrosion performance of steel and galvanized steel in karangsang and limbangan sea water environment. In *AIP Conference Proceedings*, volume 1964, page 020038. AIP Publishing LLC, 2018.
- [8] SMA Shibli, AC Jayalekshmi, and R Remya. Electrochemical and structural characterization of the mixed oxides-reinforced hot-dip zinc coating. *Surface and Coatings Technology*, 201(16-17):7560–7565, 2007.
- [9] J Forsberg, LC Duda, A Olsson, T Schmitt, J Andersson, J Nordgren, J Hedberg, C Leygraf, T Aastrup, D Wallinder, et al. System for in situ studies of atmospheric

- corrosion of metal films using soft X-ray spectroscopy and quartz crystal microbalance. *Review of Scientific Instruments*, 78(8):083110, 2007.
- [10] S Zakipour and C Leygraf. Quartz crystal microbalance applied to studies of atmospheric corrosion of metals. *British corrosion journal*, 27(4):295–298, 1992.
- [11] D Inaudi and B Glisic. Long-range pipeline monitoring by distributed fiber optic sensing. *Journal of pressure vessel technology*, 132(1), 2010.
- [12] SZ Yan and LS Chyan. Performance enhancement of BOTDR fiber optic sensor for oil and gas pipeline monitoring. *Optical Fiber Technology*, 16(2):100–109, 2010.
- [13] V Marcantonio, D Monarca, A Colantoni, and M Cecchini. Ultrasonic waves for materials evaluation in fatigue, thermal and corrosion damage: a review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 120:32–42, 2019.
- [14] AF Denzine and MS Reading. A critical comparison of corrosion monitoring techniques used in industrial applications. In *Corrosion97*. OnePetro, 1997.
- [15] LE Bengtsson. A microcontroller-based lock-in amplifier for sub-milliohm resistance measurements. *Review of Scientific Instruments*, 83(7):075103, 2012.
- [16] Atmel Corporation. Attiny25/45/85 automotive datasheet. [https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7598\\_Automotive-Microcontrollers-ATtiny25-45-85\\_Datasheet.pdf](https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7598_Automotive-Microcontrollers-ATtiny25-45-85_Datasheet.pdf), 2016.
- [17] NCTU. Chapter 3: dry film photo-resist. <https://ir.nctu.edu.tw/bitstream/11536/74691/7/851507.pdf>.
- [18] TR Kuphaldt and All About Circuits Community. Kelvin (4-wire) resistance measurement. <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/direct-current/chpt-8/kelvin-resistance-measurement>.
- [19] H Du. NFC technology: Today and tomorrow. *International Journal of Future Computer and Communication*, 2(4):351, 2013.
- [20] NFC forum. <https://nfc-forum.org/>. Accessed: 2021-04-26.
- [21] M Boada, A Lazaro, R Villarino, and D Girbau. Battery-less soil moisture measurement system based on a NFC device with energy harvesting capability. *IEEE Sensors Journal*, 18(13):5541–5549, 2018.
- [22] Autodesk. Eagle pcb design and electrical schematic software. <https://www.autodesk.com/products/eagle/overview?term=1-YEAR#what-is-eagle->.
- [23] A Ganesan. Programming ATtiny85 with Arduino Uno. <https://create.arduino.cc/projecthub/arjun/programming-attiny85-with-arduino-uno-afb829>.
- [24] A Solleiro Saura. Sensor de temperatura integrado en etiqueta NFC con recolección de energía. Master’s thesis, Universitat Rovira i Virgili, 2017.
- [25] ST Microelectronics. *M24LR64E-R datasheet*, 2017.
- [26] Texas instruments. *INA128 datasheet*, 2019.

- [27] N Alias and AA Mohamad. Morphology study of electrodeposited zinc from zinc sulfate solutions as anode for zinc-air and zinc-carbon batteries. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 27(1):43–48, 2015.