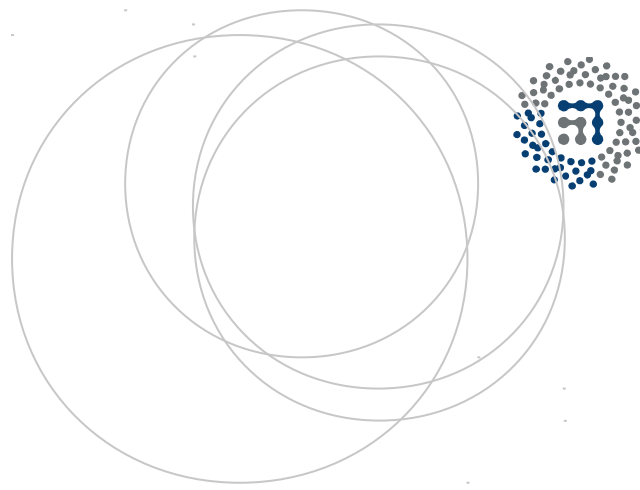


eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea



ZTF-FCT

Zientzia eta Teknologia Fakultatea
Facultad de Ciencia y Tecnología



Gradu Amaierako Lana / Trabajo Fin de Grado
Ingeniaritza Elektronikoko Gradua / Grado en Ingeniería Electrónica

Hardware merkearen bidezko euriaren neurketa seinale akustikoak erabiliz: bideragarritasun-azterketa

Egilea/Autor/a:
Unai Saralegui Vallejo
Zuzendaria/Director/a:
Josu Jugo García
Jon Sáenz Agirre

Gaien Aurkibidea

1	Sarrera	4
2	Proiektuaren aurkezpena	5
2.1	Oinarri Teorikoa	5
2.2	Proposatutako metodoaren oinarria	8
2.3	Hasierako eztabaida	12
3	Sistemaren garapena eta azterketa	13
3.1	Ultrasoinuaren sorrera	15
3.1.1	NE555 oszilatzailearen bidezko seinalea	15
3.1.2	Software bidezko seinalea	16
3.2	Ultrasoinuak jasotzea	19
3.3	Datuak jasotzea	21
3.3.1	NI 6221 txartelaren bidezko laginketa	21
3.3.2	MCP3008 bidezko laginketa	23
3.4	Seinale biderkaketa	26
4	Neurketen azterketa	31
4.1	Sistemaren zehaztasunaren estimazioa	32
5	Proiektuaren jarraipena eta ondorioak	36
A	Neurketak	38

Kapitulua 1

Sarrera

Lan honen helburu nagusia uraren zikloaren neurketan lagunduko duen sistema merke baten bideragarritasuna aztertzea da. Horretarako hardware eta tresneria merkean oinarritutako prototipo bat diseinatu eta muntatu da, sistemaren bideragarritasuna aztertzeko.

Proiektuaren atzean ziklo hidrológicoaren azterketa dago, teoriaren atalean azaltzen den moduan oso zaila da ziklo osoa ixtea. Oso zaila da lurrunketaren neurketa egitea, eta hau estimatzeko magnitude honekin erlazionatutako beste magnitude batzuk erabiltzen dira. Hori dela eta azken magnitude hauen neurketa zenbat eta zehatzagoak izan orduan eta hobe izango da lurrunketaren estimazioa.

Proiektuan zehar lurrunketarekin erlazionatua dagoen prezipitazioaren neurketa sistema fidagarri, merke eta ez inbaditzaile baten diseinua eta hasierako azterketa burutu da. Sistemaren diseinurako ezagunak diren elementu sinpleak erabili dira, helburua izatez sistemaren bideragarritasuna aztertzea da eta.

Erabilitako materialaren artean Raspberry Pi bat dago zeina oso interesgarria den mota honetako proiektuetarako, prezio merke batean ezaugarri interesgarriak eskaintzen dituelako. Raspberry Pi-a sistema kontrolatzeko eta datuak jasotzeko erabilia izan da. Proiektuan zehar tresna honen programazioa eta erabilpena aztertu da eta sistema honen funtzionamendua ikasteko baliagarria izan da.

Lan honen bigarren kapituluaren meteorologiari dagokion teoria aztertuko da eta lurrunketa neurtzearen zailtasuna azalduko da, baita honen erlazioa aurretik aipatutako beste magnitudeekin. Era berean, egindako neurketen oinarri teorikoa eta sistema muntatzeko aukeratutako osagaien eztabaida azaltzen da.

Hirugarren kapituluaren muntatutako sistema aurkezten da eta hau muntatzeko jarraitutako pausuak azaltzen dira. Atal honetan ere sistemaren muntaketa eta diseinu prozesuan aurkitutako limitazioak azaltzen dira baita hauek nola konpondu diren ere. Sistemaren azterketaz gain datuen jasotzea nola burutu den aztertzen da atal honetan.

Laugarren kapituluaren sistemaren fidagarritasuna eta egokitasuna aztertzeko jasotako datuen analisia egiten da.

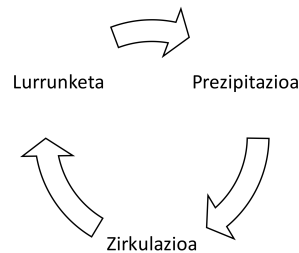
Azkenik, azken kapituluaren ondorioak aztertzen dira eta proiektuaren jarraipenerako hainbat bide proposatzen dira.

Kapitulua 2

Proiektuaren aurkezpena

2.1 Oinarri Teorikoa

Muntatuko den sistemari izatea ematen dion teorian murgildu aurretik beharrezkoa da uraren lurrunketaren atzean dagoen fisika azaltzea. Lehenik eta behin, lurraren ziklo hidrologikoaren nondik norakoak azaldu behar dira. Ziklo hau bi zatitan banatzen da, batetik alde lurterra eta bestetik eguratsekoa (2.1 irudian laburtzen da uraren ibilibidea).



Irudia 2.1: Uraren zikloa.

Aurretik aipatutako uraren zikloko zati lurterrean, eurtik hasita lurruntzerako bidea jasotzen da, eguratsekoan aldiz, atmosferan ematen den uraren garraioa jasotzen da, forma gaseosoan gehienbat. Bi zati hauen arteko lotura lurrunketa eta euriaren bidez dago emanda. Sarreran azaldu den bezala ziklo hidrologikoa itxi ahal izateko beharrezkoak dira hainbat magnitude ezagutzea, jarraian magnitude hauen izatea eta hauen arteko erlazioa aztertzen da.

Atmosferako ur lurrunaren kantitatearen estimazioa jarraian azaltzen den 2.1 balantze ekuazioaren bidez ematen da [1].

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (qv) + \frac{\partial q\omega}{\partial P} = s(q) + D \quad (2.1)$$

Aurreko ekuazioko $s(q)$ terminoak airearen masa unitate bakoitzeko ur lurrunaren sorrera edo deuseztapena islatzen du, hau fase aldatetekin erlazionatua egonik. Bestalde, $D = -\alpha \vec{\nabla} \cdot \vec{J}_q^D$ terminoak mugetako difusio molekularrak hartzen ditu kontuan.

Atmosferan ur lurruna sortu eta galtzeko bide ohikoenak lurrunketa eta kondentsazioa dira. Horrenbestez $s(q) = e - c$ da, non e eta c airearen masa unitateko lurrunketa eta kondentsazio ratioak diren hurrenez hurren.

Ur lurrunarekin gertatzen den antzera egoera kondentsatuko (solido zein likido) urak, q_c , ere badu bere balantze ekuazioa. Hodeietako formakuntza ratioa $s(q_c) = -s(q)$ bidez emanda dagoela jakinik 2.2 ekuazioko adierazpena lortzen da egoera kondentsatuko balantza ekuaziorako.

$$\frac{\partial q_c}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (q_c v) + \frac{\partial q_c \omega_c}{\partial P} = -s(q) = -(e - c) \quad (2.2)$$

Aurreko adierazpenean ω_c ur tanta zein elur maluten edo kazkabarraren abiadura bertikalak da eta $q_c \omega_c$ kondentsatutako uraren garraio bertikalak. Ikusitako 2.1 eta 2.2 ekuazioak batuz ur kopuru totalaren balantze ekuazioa lortzen da (ikus 2.3 ekuazioa).

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (qv) + \frac{\partial q\omega}{\partial P} + \frac{\partial q_c}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (q_c v) + \frac{\partial q_c \omega_c}{\partial P} = D \quad (2.3)$$

Ekuazio honen presioarekiko integrazio bertikalak, lurrazalean hasita eta atmosferaren goi muga bitartean, atmosferako ur guztiarentzako balantze ekuazioa ematen du (ikus 2.4 ekuazioa).

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{Q} + \frac{\partial W_c}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{Q}_c + P = E \quad (2.4)$$

Orokorrean $\frac{\partial W}{\partial t} \gg \frac{\partial W_c}{\partial t}$ eta $\vec{\nabla} \cdot \vec{Q} \gg \vec{\nabla} \cdot \vec{Q}_c$ betetzen da. Hori horrela izanik, honela geratzen da 2.4 ekuazioa denboran bataz-bestekoa eginda:

$$\frac{\partial \overline{W}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \overline{\vec{Q}} = \overline{E} - \overline{P} \quad (2.5)$$

Azken ekuazio hau da uraren zikloa aztertzeke erabiltzen dena, eta bertan ikusten da aurretik aipatu den lurrunketak beste magnitudeekin betetzen duen erlazioa. Aurreko 2.5 ekuazioan agertzen den W aldagaiak lurrazaletik atmosferaren goi mugara azalera unitateko ur lurrin kantitatea neurtzen du, 2.6 ekuazioan azaltzen den moduan.

$$W = \int_0^{P_s} q \frac{dP}{g} \quad (2.6)$$

Aurreko 2.6 ekuazioko q terminoa hezetasan espezifikoa da. W terminoak atmosfera-zutabe unitarioan dagoen ur lurrin guztia kondentsatuko balitz lortuko litzatekeen ur likidoa adierazten du, eta ur prezipitakorra izenez ezagutzen da.

\vec{Q} magnitudea ur lurrinaren garraio horizontala presioarekiko integratuz lor daiteke jarraian azaltzen den adierazpenari jarraituz.

$$\vec{Q} = \int_0^{P_s} q \vec{v} \frac{dP}{g} \quad (2.7)$$

Ura hainbat egoeretan azaltzen da ziklo klimatikoan, hortaz energia termodinamikoa-ren zirkulazio garrantzitsua ematen da, batez ere fase aldatetean, hortaz lurrunketan. Adibidez, kondentsazio eta izozteak bero kantitate nabaria igortzen dute, zeina lurrunketa eta likidotzeak behar duten energiaren antzekoa den. Aipatu behar da Lurra planeta guztian hau ez dela era berean gertatzen, gune geografiko batzuetan lurrunketa eta euriaren aldea nabarmena da, lurrundutako ur kantitatea euriaren bidez jasotakoa baino txikiagoa da, adibidez gune tropikaletan; kontrako kasua ere gertatzen da gune polarretan. Planeta osokoa hartzen bada kontuan aurretik aipatu den bezala neurtutako prezipitazio kopurua lurrundutakoa baino handiagoa da. Honek guztiak argi uzten du benetan zaila

dela kantitate biak neurtzea [1].

Aurretik aipatutako fase trantsizioetan emandako energia igorpen eta xurgatzeak eguratseko urteko energiaren %50era iristen dira [2]. Hori dela eta prezipitazio eta lurrunketen neurketa zehatza oso beharrezkoa da, bai alde teorikotik baita praktikotik ere (nekazaritza, ur-hornidura etab.).

Prezipitazio eta lurrunketen neurketa hain garrantzitsua izanik ere, oraindik ez da guztiz ebatzitako problema aurretik aipatu den bezala. Kasu gehienetan lurrunketa eta euriaren arteko aldearen kalkulua hondarren bidez egiten da. Aurretik aipatutako uraren zikloarean azterketarako aztertzen den 2.5 ekuazioa eraldatuz eta aipatutako hondarrak (ε) kontuan hartuz honako adierazpena lortzen da lurrunketaren kantitatearen estimaziorako:

$$E \approx \frac{\partial W}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{Q} + P + \varepsilon \quad (2.8)$$

Hondar hauek normalean ez dira nuloak izaten, hauek era egokian minimizatu ahal izateko ezinbestekoa da euri bidez eroritako ur kantitatearen neurketa zehatzak burutzea. Euriaren neurketan egiten diren erroreak minimizatzean, eroritako eta lurrundutako ur kantitatearen aldea hobeto finkatu ahalko da euriaren zikloa hobeto itxiz.

Lurrunketaren estimazioan ikusitako lehen bi terminoak datu meteorologikoetatik eskuratzen dira (sateliteak, globoak, etab.). P kantitatea aldiz, prezipitatutako ura da. Eskuratutako datu meteorologikoak egokiak izanik plubiometroen bidezko prezipitazioen neurketa hobetzea ezinbestekoa da hondarrak minimizatu eta horrekin lurrunketaren estimazio hobea egiteko.

Neurketa zehatzak egiteko helburuarekin hainbat tresna eta metodo desberdin izan dira erabiliak. Plubiometroak dira prezipitazioa neurtzeko tresna ohikoenak. Hauen funtzionamendu zein diseinua nahiko sinplea da, funtsean pareta bertikalak eta goiko aldean irekiera bat duten tresnak dira, zilindro baten antzera. Normalean plubiometroaren barneko masa zein bolumena neurtzen da prezipitazioaren neurketa izateko. Aipatu behar da tresna hauen kokapenak ere garrantzia duela, izan ere elurra iris daitekeen altuera maximoa baino gorago ipini behar dira neuketan arazorik ez egoteko, munduko 100 herrialde baino gehiagotan altuera hau metro erdi eta metro eta erdi artekoa da [3].

Prezipitazioen neurketa oso sentikorra da inguruarekin baita haizearekin ere, hori dela eta plubiometroek hainbat akats iturri dituzte. Plubiometroek alde mugikorrek dituzte, eta prezipitazioaren intentsitatea oso txikia denean, gerta daiteke parte mugikorrek mugiarazteko nahiko indarrak ez izatea eta horrenbestez neurketarik ez egitea. Bestetik, sarreran egon daitezkeen turbulenziek ur tanta txikiak desbidera ditzakete, eta ondorioz neurtuak ez izan. Gerta daiteke ere sarrera-azalera gurutzatu eta gero, eta neurketa egin aurretik tanta hori lurruntzea eta horrenbestez ez neurtzea. Neurketa galera hauek neurketaren %30 izatera iritsi ahal dira [3]. Aipatutako errore hauek kontuan hartzen dira euri kantitatea kalkulatzeko garaian, faktore hauek direla eta gerta daitezkeen galerak egindako neurketara batuz.

Jarraian ikus daitezkeen 2.9 erlazioaren bidez ur kantitatearen neurketan eman daitezkeen erroreak konpentsatzen dira, nahiz eta batzuetan egokitzapen hauek errorea handitu dezaketen. Plubiometroen akats iturriak aztertzen dituzten hainbat iturri dago, hala ere ideia nagusia 2.9 ekuazioan islatzen da [3][4][5]. Bertan k haizearen efektua konpentsatzen

duen faktorea da, P_g neurtutako ur kantitatea da, ΔP_1 faktoreak plubiometroaren horretan gera daitezkeen tanten bolumena, ΔP_2 -k ontzian gera daitezkeen tanten bolumena eta ΔP_3 faktoreak neurketa egin aurretik gerta daitezkeen dira hurrenez hurren.

$$P_k = k(P_g + \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3) \quad (2.9)$$

Plubiometroez gain azken urteetan beste tresneria mota bat garatu da, disdrometro izenekoa. Gailu hauek jasotako ura neurtu ordez ur tanten abiadura eta neurriak neurtzen dituzte. Tresneria honen lehen bertsioetan ur tanten momentu lineala neurtzen zen (Joss–Waldvogel-en disdrometroa). Gaur egun, laser bidezko neurketak egiten dituzten muntaiak garatu dira, eta tresna hauen fidagarritasuna haundiagoa bada ere nahiko garestiak dira.

Badaude gaur egun proiektu honetan proposatzen den moduko tresneria merkea garatzeko hainbat ekimen, batez ere garapenean dauden herrialdeetan erabiltzeko. Adibidez Trans-African Meteorological Observatory (TAHMO)-ren proiektuetako bat Afrika osoan estazio meteorologikoak zabaltzea da, horretarako seinale akustikoen bidezko disdrometro bat garatzea helburu izanik [6]. Honelako sistemak ere heziketan erabiltzen dira Raspberry Pi Weather Station (Oracle) adibide moduan.

2.2 Proposatutako metodoaren oinarria

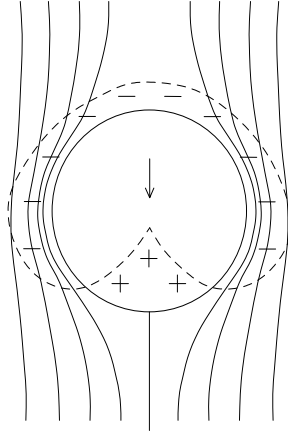
Euri kantitatea neurtzeko alternatiba bat garatzeko beharrezkoa da euriaren edota euri tanten fisika aztertzea neurketak egiteko erabil daitezkeen metodoak zehazteko. Literaturan oinarrituz, ur tanta baten forma, tamainua eta abiadura erlazionatu ahal dira oinarri aerodinamikoak eta konstanteak aintzat hartuz [7].

Ur tanta bat airearekiko mugimendurik jasan ezean forma esferikoa da gainazal tentsioa dela eta. Baina, euri tantek deformazioak jasaten dituzte presio diferentziak direla eta. r erradioko tanta batek jasandako presioa, presio atmosferikoa baino handiagoa izango da $2T/r$ faktoreaz, non T gainazal tentsioa den zeinak diferentzia hau sortzen duen.

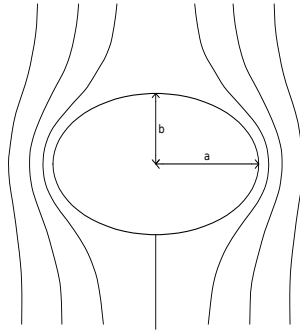
Ur tanta jakin bat airean zehar erortzean presio desberdinak agertuko dira bere gainazalean, tantaren goi mugan eta aldeetan presio defizita agertuko da, eta behe aldean berriz, gehiegizko presioa egongo da (ikus 2.2 irudia). Hau dela eta tanta deformatu egingo da forma esferikoa galduz [8][9].

Muga abiadura zenbat eta handiagoa izan, aldeetako presio defizita orduan eta handiagoa da eta horren eraginez, eta barne presioa gainazal tentsioaren bidez mantentzeko, tantak deformazioa jasaten du, plano bertikaleko zehar sekzioa txikituz, hau da, bere burua zabalduz eta forma elipsoidala definituz (ikus 2.3 irudia) [7][9].

Esan bezala abiadurak ur tantaren berezko forma esferikoa deformatuko du eta hori horrela izanik, abiaduraren eta formaren arteko erlazio bat finkatzea posible bada, eta horrekin abiadura eta erradioa erlazionatuz, Doppler efektuaren bidezko uraren abiaduraren neurketa nahikoa izango litzateke eroritako ur bolumena kalkulatzeko. Ideia hau sakonki aztertua izan da bibliografian [7][10][11][12] eta, matematikoki frogatzen denez, badaude hurbilketa nahiko egokiak.



Irudia 2.2: Euri tanta agertzen diren presio diferentziak.



Irudia 2.3: Deformatutako euri tanta ($a > b$).

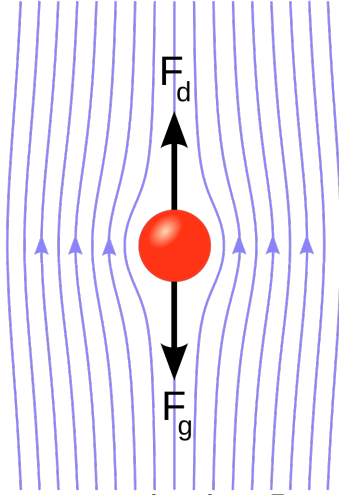
Hainbat lan egin badira ere, 1965 urtera bitarteko azterketek C_D , arrastre koefizientea, eta $C_D R^2$ erlazionatzen zituzten muga abiadura lortzeko. H. R. Pruppacher eta E. H. Steinberger-ek frogatu zuten 1968an adierazpen experimental eta teoriko guzti horiek ez zirela egokiak[13]. Pruppacher-ek berak, K. V. Beard-ekin lankidetzan, adierazpen berri eta egokiago bat proposatu zuten muga abiadura eta erradioa erlazionatzeko [10].

Abiadura eta tantaren dimentsioak erlazionatzeko ur tantaren berezko hainbat propietate hartu behar dira kontuan: arrastre koefizientea, Reynolds zenbakia, dentsitatea, biskositatea etab.

Lehenik eta behin, nahiz eta aurretik ikusi dugun tanta deformatu egiten dela forma esferikoa galduz, hurbilketa moduan ur tanta esferikoa dela kontsideratzen da. Aire ingurune biskosoa dela medio arraste indar bat agertuko da 2.4 irudian ikusten den moduan. Arraste indarra, objektu bat eta fluido baten arteko abiadura erlatiboaren aurkako noranzkoan agertzen den eta abiaduraren menpekoea den indarra da. Arraste indarra, F_d , aurretik aipatu diren tantaren eta inguruaren hainbat propietatek zehaztua da[14].

$$F_d = C_d \frac{\rho_m}{2} (v^2 A) \quad (2.10)$$

C_d esfera baten arraste-koefizientea izango da (0.47 inguru), ρ_m ingurunearen (airearen) biskositatea, v muga abiadura (V_∞) eta A esferaren zeharkako sekzioa, πa^2 (a erradioa



Irudia 2.4: Grabitateraren eraginezko indarra, F_g , eta arraste indarra, F_d .

izanik) dira. Arraste-koefizientea zenbaki adimentsional bat da zeinak arrasteak sortzen dituen efektuak karakterizatzen dituen. Koefiziente hau esperimentalki kalkulatu da haize tuneletan.

Tantaren dinamika aztertzeko komenigarria da Reynolds zenbakia (ikus 2.11 adierazpena) zehaztea, zeinak dentsitatea, biskositatea eta abiadura erlazionatzen dituen (L tantaren zehar sekzioaren luzera da, hau da diametroa, eta μ ingurunearen biskositate dinamiko).

$$R = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (2.11)$$

Aurreko 2.11 adierazpena 2.10 adierazpenean ordezkatzuz honela geratzen da arraste indarra.

$$F_d = \frac{C_d R}{24} (6\pi a V_\infty \mu) \quad (2.12)$$

Stokes-es legetik frogatzen denez muga abiaduran esfera batek jasaten duen indar grabitatorioa honakoa da (ikus 2.13 adierazpena), non ρ_p esferaren eta ρ_f ingurunearen masa dentsitateak diren.

$$F_g = \frac{C_d R}{24} (6\pi a V_\infty \mu) \quad (2.13)$$

Muga abiaduran esferak ez du azeleraziorik jasango, hau da, grabitatearen eraginezko indarra eta arraste indarra orekatuta egongo dira. Hortaz, 2.12 eta 2.13 adierazpenak berdinduz muga abiaduraren honako adierazpena lortzen da.

$$V_\infty = \frac{16}{3} \frac{(\rho_p - \rho_f) g a^2}{\mu C_d R} \quad (2.14)$$

Adierazpen hauek Stokes-en fluxuarentzako ($R \ll 1$) garatu eta adierazpen orokorrekin erlazionatu ahal dira. Hori eginez esferaren erradioaren kubo eta abiadura F_g/F_s arraste ezdimentsionalarekin erlazionatu ahal dira. K. V. Beard eta H. R. Prupacher-ek esperimentalki aztertu zuten erlazio hau F_g/F_s ur tantentzako faktorea lortuz, eta 2.15 adierazpena proposatuz [10].

$$V_{\infty} = \frac{R\mu}{2\rho_f a} \quad (2.15)$$

Hortaz posible da ur tanta baten muga abiadura eta tanta baten erradioaren inbertsoa erlazionatzea. Horrenbestez euriaren abiadura neurtzeko gai izanik, bidea irekia izango da tanten bolumena eta hortaz eroritako euri kantitatea neurtzeko.

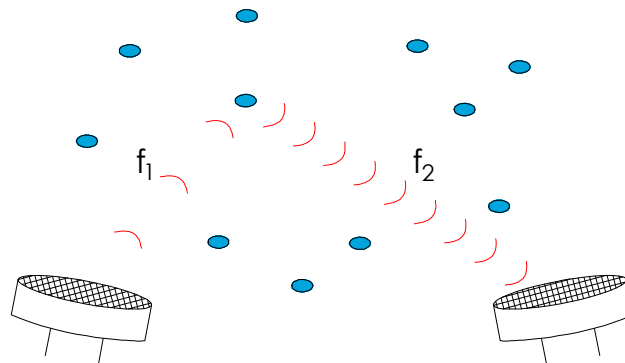
Abiadura neurtzeko metodorik simple eta egokiena Doppler efektuaren bidezko neurketa da. Ezaguna denez, maiztasun jakin bateko seinaleen bidez objektuen abiadurak kalkulatu ahal dira. Fenomeno honetan oinarritzen dira adibidez autoen abiadura kontrolako sistemak. Neurketa hauen funtsa maiztasun aldaketan datza. Seinale jakin bateko oztopo bati aurre egitean seinalearen islapena gertatuko da, baina oztopoa mugimenduan badago, islatutako seinalea ez da bere horretan mantenduko, jatorrizko seinalearen maiztasuna aldatuko da Doppler efektuari (2.16 ekuazioa) jarraituz.

$$f' = f \left(\frac{v \pm v_o}{v \mp v_s} \right) \quad (2.16)$$

2.16 ekuazioan v soinuaren abiadura da, v_o behatzailearen abiadura da eta v_s soinuaren igorlearen abiadura da. Aurreko ekuazioko \pm zeinuak era honetan zehazten dira; batetik, iturria behatzailetik urruntzen ari bada izendatzailean $v + v_s$ izango da eta aldiz, gerturatzen ari bada $v - v_s$. Bestetik, behatzailea hartzailetik urruntzen ari bada, zenbakitzailean $v - v_o$ izango da eta kontrako kasuan gerturatzen ari bada $v + v_o$.

Behin teoria ezaguna izanik erabiliko den ingurua, hau da, argia ala soinu uhinak erabiliko diren aukeratu behar da. Proiektu honetan soinu uhinak erabili dira, ultrasoinuak hain zuzen, hauen erabilpena justifikatzeko hainbat faktore hartu dira kontuan. Hasteko sistema merke bat garatzearen helburua kontuan hartu behar da. Bestetik, helburua euri tantak banan bana aztertzea ez denez, ez da argiaren zehaztasuna behar, nahikoa da soinu uhinekin. Azkenik, Doppler efektuaren bidezko neurketak egiteko garrantzitsua da iturriaren maiztasunaren egonkortasuna mantentzea eta argia erabiltzen bada egonkortasun hori mantentzea zaila da laserra ez bada erabiltzen behintzat, eta honek prozesua garestituko luke.

Doppler efektuaz baliatzeko eta horrela ur tanten abiadura kalkulatu ahal izateko, ultrasoinu igorle bat eta hartzaile bat erabiliko dira. Ultrasoinuak bidali eta gero, espero da ur tantetan islatzea eta islapen hori hartzailean jasotzea 2.5 irudian ikusten den moduan.



Irudia 2.5: Euri tanten abiaduraren neurketaren funtsa.

2.5 irudian ikusten den bezala f_1 maiztasuneko seinalea bidaliko da eta f_2 maiztasuneko beste seinale bat jasoko da. Irudian ageri dena aztertuz, ikusten da Doppler efektua birritan gertatzen dela. Lehenik, igorlea seinale bidaltzailea izango da, geldirik egongo dena, eta hartzailea euri tanta izango da, mugimenduan dagoena. Bigarren kasuan igorlea euri tanta izango da, mugimenduan dagoena, eta hartzailea seinale hartzailea izango da, geldirik dagoena. Hori horrela izanik eta zeinuen esanahia kontuan hartuz bi adierazpen ditugu (2.17 eta 2.18) 2.16 adierazpenetik abiatuz (v soinuaren abiadura da airean).

$$f_{tanta} = f_{bidali} \left(\frac{v_{soinu} - v_{tanta}}{v_{soinu}} \right) \quad (2.17)$$

$$f_{jaso} = f_{tanta} \left(\frac{v_{soinu}}{v_{soinu} + v_{tanta}} \right) \quad (2.18)$$

2.17 eta 2.18 ekuazioei jarraituz eta f_{bidali} eta f_{jaso} ezagunak izanik euri tantaren abiadura ezagutu ahal da 2.19 ekuazioa erabiliz.

$$v_{tanta} = \frac{f_{bidali} - f_{jaso}}{f_{bidali} + f_{jaso}} v_{soinu} \quad (2.19)$$

Azken erlazio honek tanta baten abiadura emango du, eta abiadura hau aurretik ikusitako 2.15 adierazenezkin erlazionatzean, neurtuko den bolumena zehaztu ahal da.

2.3 Hasierako eztabaida

Teoria aztertua izanik eta Doppler efektuaren bidezko neurketak egiteko gai izanik bidea irekita dago proiektuaren helburua betetzeko. Izan ere, ikusi den bezala, euri tanten muga abiadura ezaguna bada posible da hauen bolumena zuzenki kalkulatzeko.

Proiektuaren helburu garrantzitsu bat sistema merke bat gauzatzea denez uneoro kontuan izan behar da faktore hau. Hori kontuan izanik Doppler efektuaren bidezko neurketak egiteko ultrasoinu igorle eta hartzaile pare merke bat (gertutasun sentsoreetan erabiltzen diren modukoak) erabiltzea proposatu da. Arazoa da agian tresna hauek ez direla gai maiztasun aldaketa, Δf , neurtzeko. Proiektu honetan sentsore hauen baliagarritasuna aztertuko da hauekin egindako neurketak onargarriak diren ikusteko.

Aipatu beharra dago egindako bilaketa bibliografikoan ez dela inon agertu dokumenturik azaldutako fenomeno fisikoan oinarritzen denik. Hori dela eta metodo aitzindari honen balizkotasuna aztertu beharra dago honen aplikapen praktikoaren aurretik.

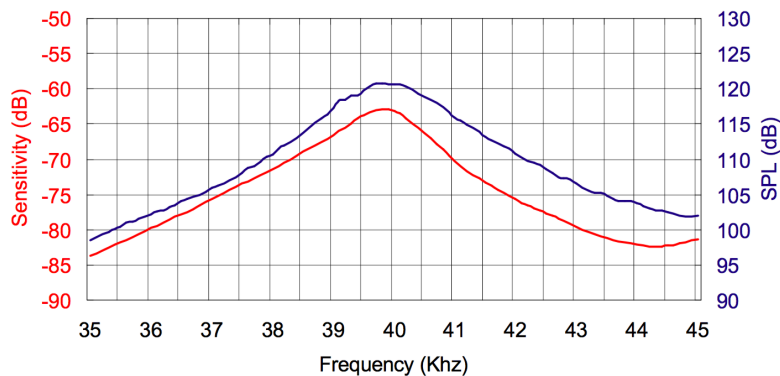
Kapitulua 3

Sistemaren garapena eta azterketa

Teoriaren atalean azaldu den bezala, euri tanten abiadura neurtzeko Doppler efektua aplikatu nahi da. Efektu honen bidez jatorrizko seinale baten maiztasuna aldatzen da, maiztasun berria seinalea jaso eta bidaltzen dituzten sistemen elkarren arteko abiaduraren menpekoea izanik. Efektu hau neurtzeko maiztasun jakin bateko seinaleak bidaltzen dituen sistema garatu behar da, aldi berean maiztasun berria jasoko duen bigarren sistema bat ere garatu behar delarik.

Helburua betetzeko teorian edozein maiztasuneko seinale erabili ahal da, kasu honetan ultrasoinuak erabili dira. Ultrasoinuen maiztasun tartea handia da 20 kHz inguruan hasita GHz-etara iritsiz. Muntatutako sisteman finkatu den maiztasuna erabili diren sentsoere eta transduktoreen bidez dago mugatua. Erabilitako transduktorea 400ST120, ultrasoinu igorlea, izan da eta seinalea jasotzeko bere bikotea den 400SR120, ultrasoinu hartzailea erabili da. Ultrasoinu igorle eta hartzaile pare hau nahiko erabilia da gaur egun, batez ere Arduino eta antzeko sistemetan erabiltzen diren distantzia sentsoreetan, hori dela eta hauen funtzionamendua ona da eta erabilpen ugaria dela eta nahiko merkeak dira (igorle eta hartzaile pareak 10€ inguru).

Sentsoere eta transduktore bikote hauek ez dute ultrasoinuen tarte osoan lan egiten, euren maiztasun zentrala (40 ± 1) kHz inguruan kokatzen da [15]. Datu orriak kontsultatuz ikusten da lan gunea maiztasun zentralean kokatuta ± 2 kHz-ekoa dela (ikus 3.1 irudia).



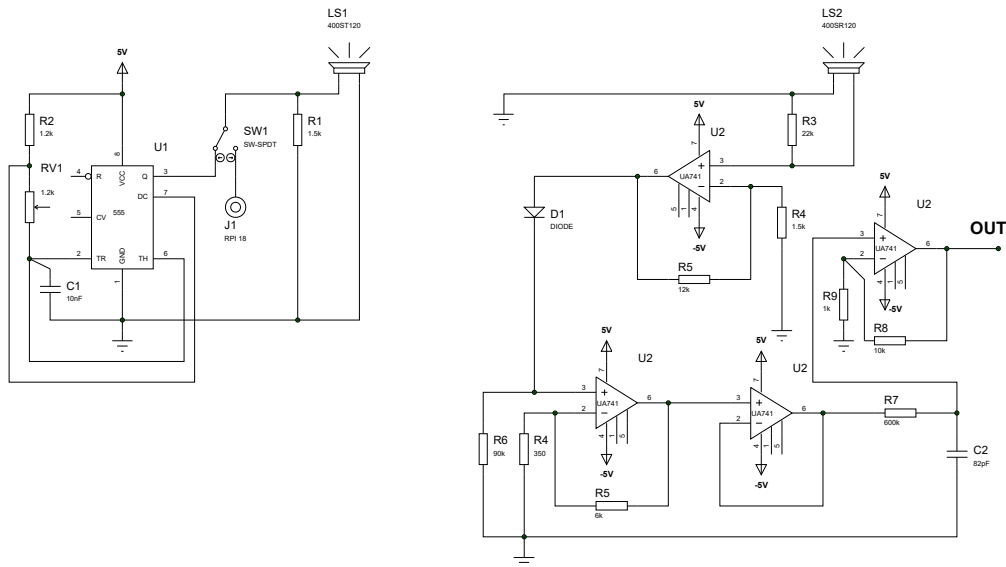
Irudia 3.1: 400ST/R120-ren sentikortasuna maiztasunean [15].

Literaturan aztertua izan denez, euri tanten abiadura asko jota $|v_{max}| = 15 \text{ m/s}$ -koa

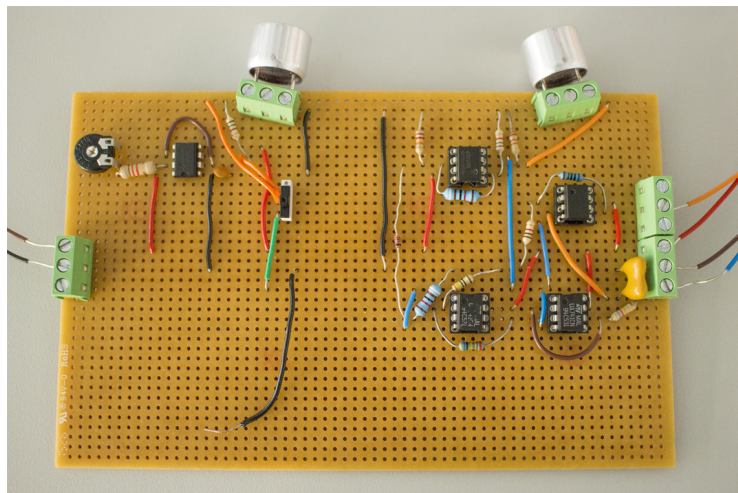
da (negatiboa gerturaten dagoelako) [7][11], balio hori 2.19 adierazpenean ordezkatur, eta soinuaren abiadura airean 20°C -tan 343 m/s -koa dela jakinik, jaso ahalko litzakeen $f_{max} \approx 42.5\text{ kHz}$ -koa da, zeina sentsore eta transduttore parearen maiztasun tartearren-tzako onargarria den.

Muntatu den sistemak erabili diren transduttore eta sentsoreen mugak kontuan har-tzen ditu, baita erabiliko den hardware-ak, Raspberry Pi, dituenak, aurrerago azalduko den moduan. Garatu den prototipoa 3.3 irudian jasotzen da. Irudiaren ezker aldean ultra-soinua eratzeko erabilitako muntaia agertzen da zeina 555 osziladore baten bidez burutu den, aurrerago azalduko den moduan. Eskuin aldean berriz, ultrasoinuak jasotzen dituen sentsorea ageri da, baita jasotako seinalea egokitzeko beharrezkoa izan den zirkuiteria.

Seinale egokitzapenari dagokionez amplifikazio etapa bat eta seinale biderkadura etapa bat ageri dira zeinarekin jasotako seinalearen maiztasun baxuagoko osagaia lortuko den, aurrerago azalduko den bezala.



Irudia 3.2: Ultrasoinuak bidali eta jasotzeko muntatutako sistemaren eskematikoa.



Irudia 3.3: Ultrasoinuak bidali eta jasotzeko muntatu den sistema.

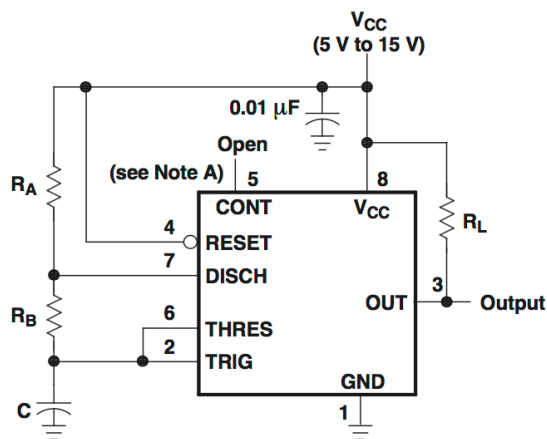
Zirkuituen bi irudietan muntatutako sistema agertzen da, ez da bertan irudikatzen jasotako seinaleen laginketa egiteko erabilitako konfigurazioa. Laginketa sistema honetan Raspberry Pi 2 Model B bat eta MCP3008 ADC bat erabili dira kapitulo honen bukaeran azalduko de moduan.

3.1 Ultrasoinuaren sorrera

Ultrasoinuak eratzeko bi bide jarraitu dira, batetik ohikoa den egoera astableko 555 osziladorearen bidezko muntaketa egin da; bestetik, proiektuan zehar Raspberry Pi-a erabiliko denez, RPi-arekin software bidez kontrolaturiko seinalea sortu da.

3.1.1 NE555 oszilatzailearen bidezko seinalea

Maiztasun jakin bateko seinaleak sortzeko NE555 osziladore baten bidezko muntaketa egitea da modurik errazena. Hori horrela izanik, hau izan da proiektu honen abiapuntua. Horretarako astable moduan lan egiten duen oszilatzailea behar da, muntai hau NE555-aren datu orrietatik zuzenenean lortu ahal delarik [16]. Modu astablean lan egiten duen muntaia 3.4 irudian jasotzen da.



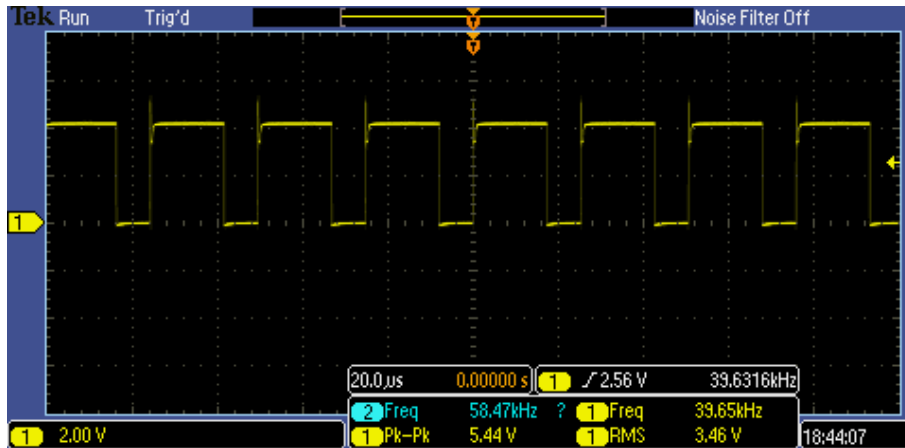
Irudia 3.4: Egoera astablean lan egiten duen NE555a [16].

Konfigurazio honen seinalearen maiztasuna R_A eta R_B erresistentzien eta C kondensadorearen bidez finkatu ahal da 3.1 adierazpenaren bitartez [16].

$$f \approx \frac{1.44}{(R_A + 2R_B)C} \quad (3.1)$$

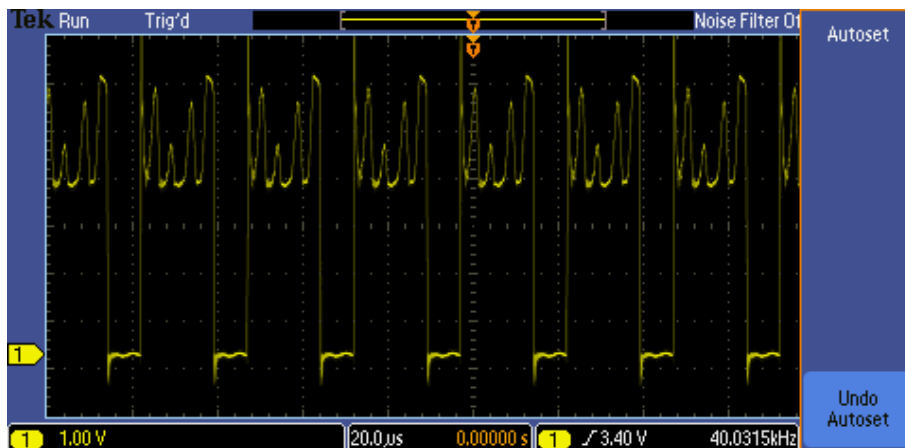
Aurretik hainbatetan aipatu den bezala, erabiliko diren igorle eta hartzailearen funtzionamendu egokiena 40 kHz-tako maiztasunean ematen denez, hori da seinaleari finkatuko zaion maiztasuna. Maiztasun hori lortzeko honako balioak finkatu dira erresistentzia eta kondensadorerako: $R_A = R_B = 1.2 \text{ k}\Omega$ eta $C = 0.01 \text{ }\mu\text{F}$. Ohikoa denez, erresistentzien balioak ez dira justu teorikoak, eta aldaketak izan ditzakete tenperaturaren eraginez adibidez. Hau kontuan izanik, R_A erresistentzia ipini ordez potentziometro bat kokatu da horrela maiztasuna erraz doitzeko aukera izango delarik.

Oszilatzailearen egoera astableko muntaia egiteko RPi-ko 5V-eko irteera eta lurra erabili dira. Reset sarrera zuzenean elikadurara konektatu da seinalea uneoro izateko. Posible da sarrera hau RPi-aren pin baten bidez kontrolatzea seinalea abiarazi edo geldiarazteko. Azkenik 555-etik irteten den seinalea 400ST120 [15] igorlerra konektatu da eta horrela $40kHz$ -tako maiztasuneko ultrasoinua bidaltzea lortu da.



Irudia 3.5: NE555-etik jasotako irteera.

555aren irteera zuzenean 400ST120 igorlerra konektatzean, behatu da seinalea distorsionatzen dela goi harmonikoak agertuz (ikus 3.6 irudia). Zirkuituan gertatzen diren seinale aldaketak aztertuz behatu da inpedantzien akoplamendu arazo bat zegoela. Arazoa konpontzeko erresistentzia bat ipini da transduttorearekin paraleloan.

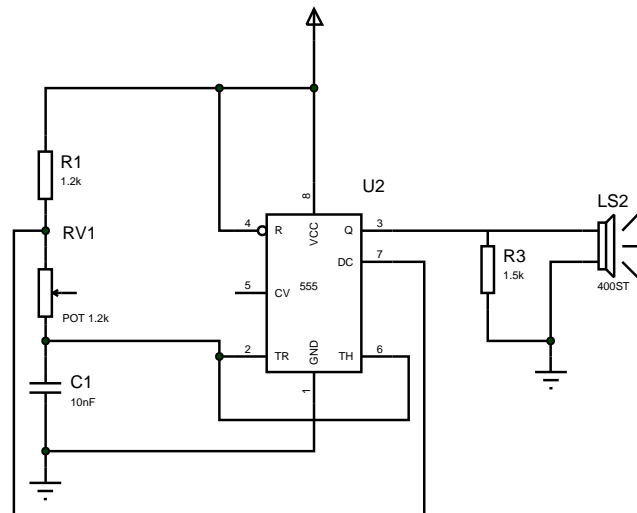


Irudia 3.6: Seinale distorsionatua igorlerra konektatu ostean.

Egoera astableko osziladorearen egitura eta gertatutako arazoak konpontzeko egindako konponketak 3.7 irudiko zirkuitoan ikusi ahal dira.

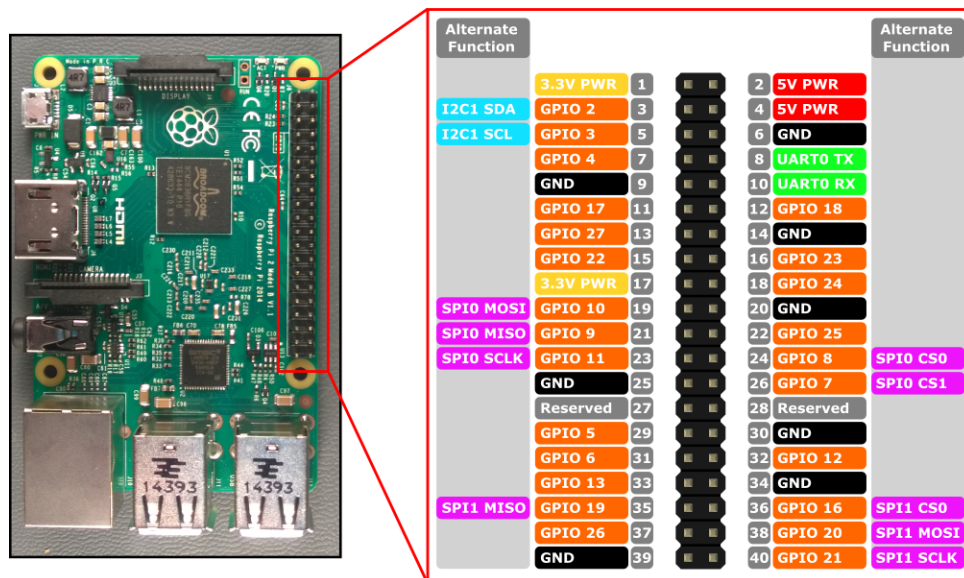
3.1.2 Software bidezko seinalea

Aurretik aipatu den moduan ultrasoinuak sortzeko erabili den bigarren metodoa software bidezkoa izan da. Kasu honetan, Raspberry Pi-a erabili da zuzenean finkatutako



Irudia 3.7: Ultrasoinuak bidaltzeko muntatutako zirkuitua.

maiztasun bateko seinalea lortzeko. Raspberry Pi-aren erlojuak 19.2MHz-tako abiadura du [17], hortaz posible da teoriarik 40 kHz-tako maiztasuneko seinalea lortzea bere pin-etako bat programatuz. Raspberry Pi-aren bigarren modeloak 40 GPIO (General Purpose Input/Output) ditu (ikus 3.8 irudia), eta hauetako batzuk programatu ahal dira bai sarre-ra zein irteera moduan lan egiteko. Pin hauetan, programatu ahal diren pinetaz aparte, elikadura pinak daude, 5V eta 3.3V-ko bina elikadura eta 8 lur konexio.



Irudia 3.8: Raspberry Pi 2-aren sarrera eta irteera pinen konfigurazioa.

Seinale hau sortzeko modurik sinpleena wiringpi2 deituriko liburutegia erabiltzea da [18]. Liburutegi honek RPiaren pinak konfiguratzea ahalbidetzen du, normalean erabiltzen den RPi.GPIO liburutegiarekin alderatuz funtzio aurreratuagoak eskainiz.

Behar den seinalea sortzeko aipatutako wiringpi2 liburutegiko modulo bat erabili da, zeinak software bidezko pulsu zabalaren bidezko modulazioa (PWM, *pulse-width modulation*) egiten duen. Honakoa da 40kHz-tako seinalea sortzeko idatzi behar den kodea

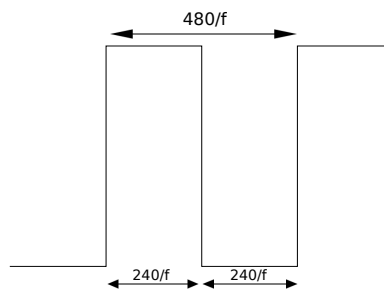
Python lengoia erabiliz.

```
1 import wiringpi2 as wiringpi
2 def seinaleaSortu():
3     """Funtzio honek 40kHz-ko seinalea sortuko du"""
4     wiringpi.wiringPiSetupGpio()
5     wiringpi.pinMode(18,2)
6     wiringpi.pwmSetClock(240)
7     wiringpi.pwmSetRange(1024)
8     wiringpi.pwmWrite(18, 500)
9 seinaleaSortu()
```

Kode honetan lehenik wiringpi2 liburutegia kargatzen da, ondoren funtzio bat defini-tzen da zeinak $40kHz$ -tako seinalea sortuko duen. Funtzio honetan lehenik **wiringPi-SetupGpio()** funtzioa erabiltzen da, RPi-ko Pin-ak aurreko 3.8 irudiko izen berdinekin mantentzeko, ondoren **pinMode()** funtzioaren bidez 18 pin-a irteera bezala ezartzen da, 2 horrek esan nahi du PWM moduan erabiliko dela pin hori (18 pin-a da funtzio honetarako erabili ahal den bakarra). Jarraian erlojua eta irismena zehazten dira eta azkenik seinalea abiarazten da 18 pinean ziklo erdian (500/1000) **pwmWrite()** funtzioaren bidez.

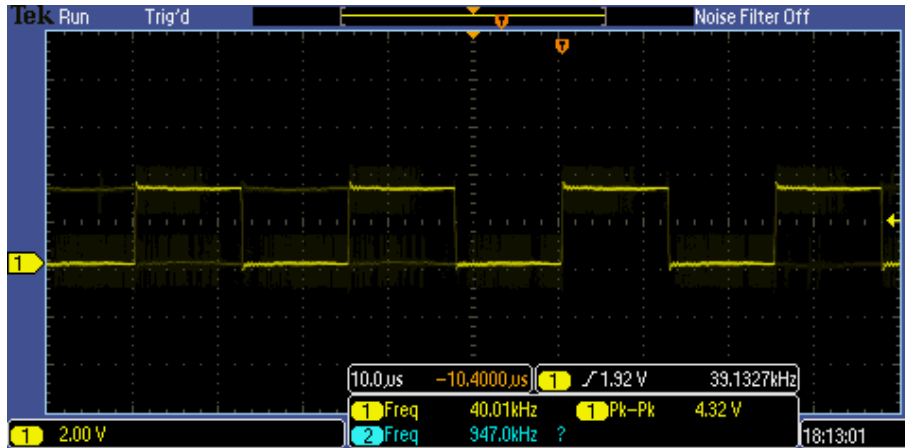
Nahi den seinalearen maiztasuna **pwmSetClock()** funtzioaren bidez zehazten da. Funtzio horri argumentu moduan emandako zenbakia RPi-aren berezko erloju maiztasunarekin erlazionatuko da nahi den maiztasuna lortzeko, 3.2 adierazpenean agertzen den moduan. Erlojua zehaztean, finkatzen da zein maiztasunean lan egingo duen erloju berriak; hau da, zenbatekoa izango den pultsu seinale berrien distantzia. Pultsuen arteko distantzia eta funtzioari emandako balioa nola erlazionatzen diren 3.9 irudian jasotzen da.

$$f = \frac{f_{RPi}}{clock \cdot 2} = \frac{19.2MHz}{240 \cdot 2} = 40kHz \quad (3.2)$$



Irudia 3.9: Pultsuen arteko erlazioa sartutako balioarekin.

Ultrasoinuak sortzeko metodo hau sinpleagoa da 555-arekin egindako muntaiarekin alderatuz, kasu honetan ez delako beharrezkoa osagai elektronikoak erabiltzea RPi-a eta igorlea salbu. Hala ere metodo honek badu limitazio garrantzitsu bat: sortzen duen seinalearen potentzia nahiko baxua da, eta ondorioz seinale honek irismen txikia du, hori dela eta aukera hau erabiltzekotan sortutako seinale honen potentzia anplifikatu beharko litzateke. Raspberry Pi-a eta wiringpi liburutegia erabiliz lortu den seinalea 3.10 irudian jasotzen da.

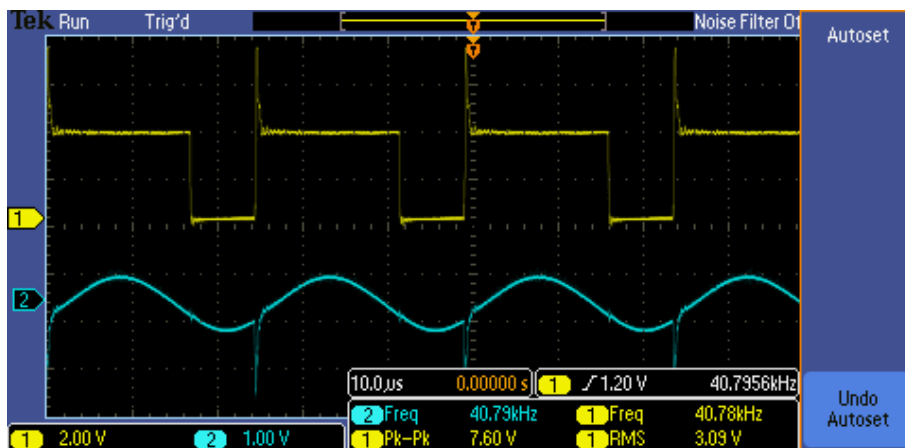


Irudia 3.10: Raspberry Pi-a eta wiringpi liburutegia erabiliz sortutako seinalea.

3.2 Ultrasoinuak jasotzea

Aipatu den bezala software bidez sortutako seinalearen potentzia eta ondorioz irismena ez da nahikoa, hori dela eta, ultrasoinuen jasotzearen azterketa 555-arekin sortutako seinalearekin egin da.

Ultrasoinuak jasotzeko, erabilitako igorlearen hartzaile bikotea, 400SR120 [15], erabili da. Hartzaileak jasotzen duen seinalea nahiko garbia da. 555-arekin sortutako seinalea karrotua bada ere, igorleak ez du modu horretan lan egiten eta forma sinusoidaleko seinalea bidaltzen du, hori izanik jasotzen dena (ikus 3.11 irudia). Jasotako seinalean (urdina) ikusten da nola 555-eko seinalean agertzen den pikotxoak akoplatzen den. Zirkuitua aztertuta ikusi da perturbazio hori lurraren bidez akoplatzen dela. Hori horrela izanik, ultrasoinu igorle eta hartzailearen arteko elikadura eta lurrak banatu dira.



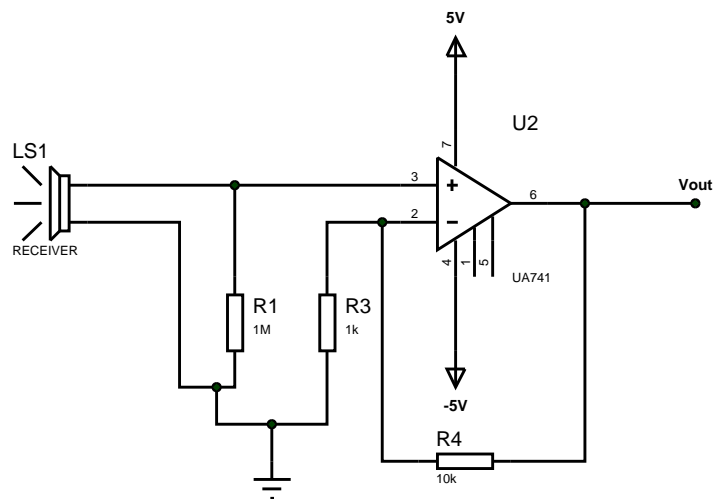
Irudia 3.11: Bidalitako seinalea (horia) eta jasotakoa (urdina) 0.3 metrora.

Ohikoa eta beharrezkoa den bezala, jasotako seinalea egokitu behar da. Alde batetik hartzaileak berak iragazketa ona egiten duela ikusi da. Hori horrela izanik ez da seinalea aparte iragazi. Bestetik, espero bezala jasotako seinalearen tentsioa oso txikia da, norabide guztietan ematen den dispersioa dela eta. Seinalea aztertu ahal izateko behar den tentsioa jasotakoa baino nahiko handiagoa izan behar da; RPi-ak 0 eta 5V arteko sarre-

rak onartzen ditu eta bere zehaztasuna 5/1024-koa da. Kontuan izan behar da muntai hau prototipo bat besterik ez dela eta benetan muntatuko den sistemak potentzia handiagoa izango duela, hortaz erabili den egokitzapena ez da justu sistema horretan erabiliko dena. Hala ere, lan honetan garatzen denaren moduko egitura jarraituko du.

Jasotako tentsioa baxua denez, lehen pausoa seinale hori amplifikatzea da eta seinalea amplifikatzeko UA741 amplifikadore operazionala erabili da. Aurretik aipatu bezala zirkuitu osoaren elikadurak eta lurrak ez dira berdinak akoplamendu arazoak saihesteko. Ultrasoinu hartzaileerako RPi-tik kanpoko elikadura erabili da, zeinak 5V, -5V eta lur konexioak eskaintzen dituen.

Seinalearen egokitzapena burutzeko, amplifikadore ez inbertsore moduan konektatutako Opamp bat erabili da, zeinak jasotako boltaiaren balioa handituko duen seinalearen prozesaketa aurrera eramateko. Seinalea jaso eta egokitzeko erabili den muntaia 3.12 irudiko zirkuituan jasotzen da.

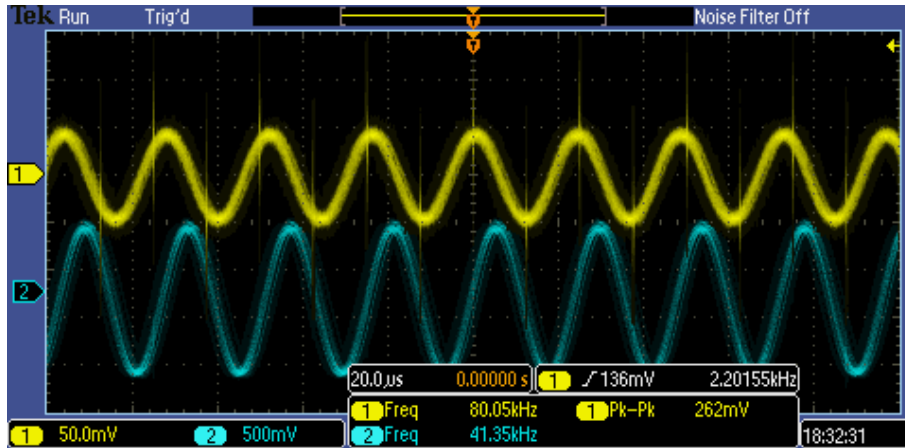


Irudia 3.12: Hartzaileak jasotako seinalea amplifikatzeko erabilitako zirkuitua.

Aurretik aipatu den 3.12 irudiko zirkuituan ikusten den moduan, hartzailearekin paraleloan erresistentzia bat ipini da. Hau ipini gabe arazoak egon dira, izan ere erabilitako hartzailearen filtroa hain da ona $40kHz$ inguruan, non ua741-ak ikusten duen DC-ko osagaia zirkuitu ireki baten modukoa den. Hartzailearekin paraleloan erresistentzia ipinita arazo hau konpondu da.

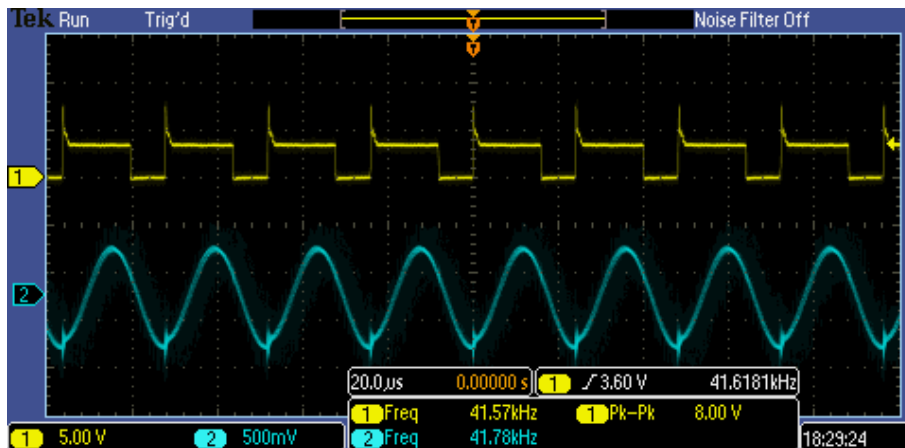
Jasotako seinalearen eta amplifikatutakoaren aldea 3.13 irudian ikus daiteke. Bertan ikusten da amplifikazioarekin ez dela kalitate askorik galdu; hortaz jasotako seinalean ez da ez-linealtasun handirik sartu Opamp-en eraginez.

Bidalitako seinalea eta amplifikatu ostean lortutakoa 3.14 irudian ikus daitezke. Ikusten da nola seinalearen maiztasuna ez den aldatzen. Amaieran lortzen den seinalea nahiko garbia da eta handia tentsioan. Hortaz seinalearen egokitzapena egokia da. Kontuan izan behar da azterketa honetan ultrasoinu igorlea eta hartzailea aurrez-aurre ipini direla eta horregatik jasotako osagaia benetako aplikazioan jasoko dena baina handiagoa da, izan ere, benetako aplikazioan seinalearen parte handi bat galduko da islapena puntu askoren



Irudia 3.13: Hartzailleak jasotako seinalea (urdina) eta honen amplifikazioa (horia).

arteana banatuko da eta.



Irudia 3.14: Bidalitako seinalea (horia) eta jasotakoa amplifikatu ostean (urdina).

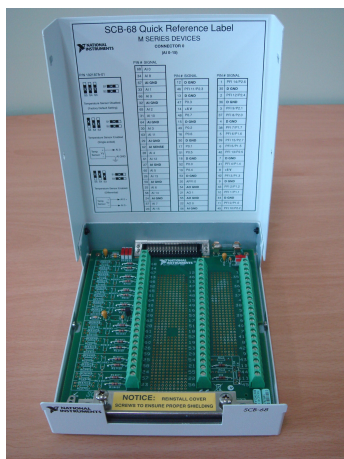
3.3 Datuak jasotzea

Behin seinaleak bidali eta jasotzeko gai izanik eta jasotako seinalea egokitua izanik, honen azterketa automatizatu ahal izateko seinalea mundu analogikotik digitalera pasa beharra dago, hori egiteko seinalea lagindu behar izanik. Seinalea mundu digitalean landu ahal izateko bi bide jarraitu dira, horietan lehena NI 6221 txartela [19] erabiltzea izan da, zeinaren ezaugarriak nahiko profesionalak diren. Bigarrenik, benetako sisteman erabili nahi den Raspberry Pi-aren bidezko laginketa burutu da; hau lortzeko MCP3008 konbertsore analogiko digitala [20] erabili da.

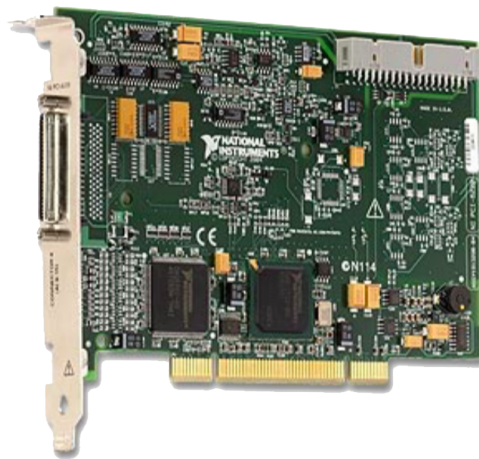
3.3.1 NI 6221 txartelaren bidezko laginketa

Seinale analogikoaren laginketa egiteko aztertu den lehen metodoa NI 6221 txartela eta Labview software-a erabiltzea izan da, txartel hau SCB-68 konektorearen [21] bidez konektatzen da zirkuituko seinalera. Konektore honen prezioa 380€-koa da eta NI 6221

ADC-arena 750€-koa. Nahiz eta erabilitako tresneriarekin alderatuta osagai hauek nahikotxo garestiagoak izan, ez dira sistema garestia eskaintzen dituzten prestakuntzetarako; hala ere metodo honek baditu mugapen batzuk zeintzuk ez diren interesgarriak benetako sisteman muntatzeko. Limitazio handiena da metodo honekin aparteko ordenagailu bat behar dela, zeinak gainera LabView software-a izan behar duen instalatua garapena egiteko atal honetan gutxienez, bide honetatik jarraitzea erabakiko balitz aplikazio bat garatu ahal litzateke. Hau egia bada ere, sistema profesionalago hau erabiltzea lagungarria izango da gero RPi-a eta MCP3008 ADC-arekin jasotako datuak onargarriak diren ikusteko.



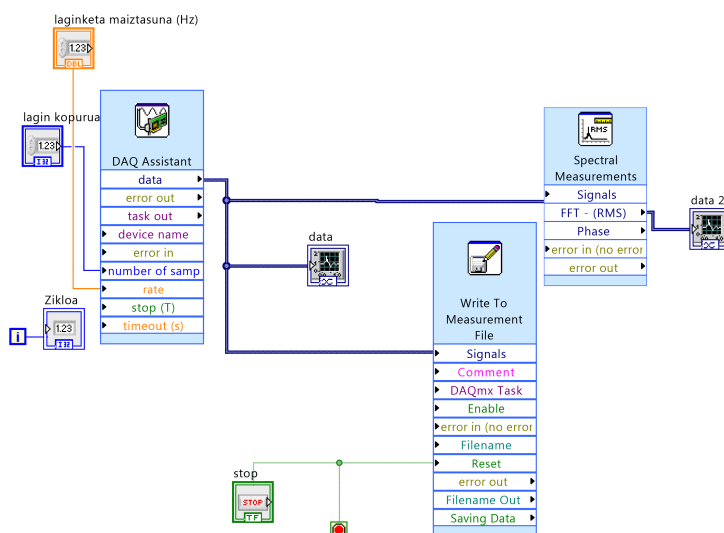
(a) a



(b) b

Irudia 3.15: National Instruments-en SCB-68 konektorea (a) eta NI 6221 ADC-a (b).

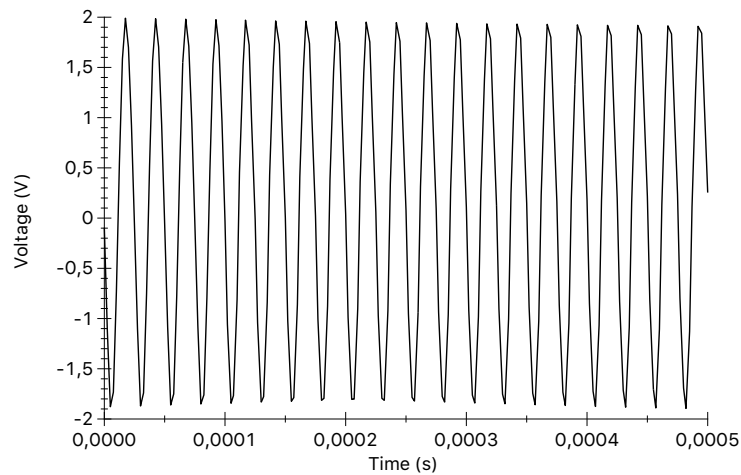
Aipatutako SCB-68 [21] konektorea ordenagailu batera konektatuta dago eta LabVIEW softwarearen bidez kontrolatu ahal da datuak jasotzeko beste funtzio batzuen artean. Horretarako LabVIEW software-an datuak etengabe jasotzeko eskema osatu da (ikus 3.16 irudia).



Irudia 3.16: Labview softwarean egindako eskema (Ziklo infinitu batean errepikatzen da).

3.16 irudian ikusten da laginketa egiteko konfigurazioa, laginketa hori grafika batera eramateaz gain, jasotako datuak modu bisual batean aztertzeke, datu fitxategi batean gordetzen da, laginketan jasotzen diren balioak gero aztertu ahal izateko.

Sistema honekin lortutako laginketa oso garbia izan da, eta seinalea berreskuratu da arazorik gabe (ikus 3.17 irudia), gero hau manipulatu ahal delarik. Ohikoa denez, laginketa fidagarri bat egiteko lagindu nahi den seinalearen maiztasuna baino hamar aldiz handiagoa den lagintze maiztasuna aukeratu da, $\omega_{lagin} = 10\omega_0$ (non ω_0 seinalearen maiztasuna den).

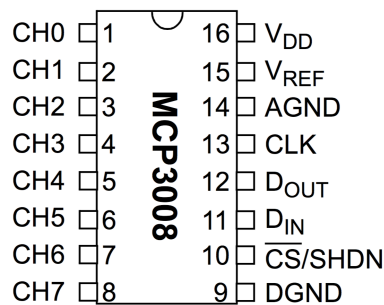


Irudia 3.17: SCB-68 bidezko laginketa 400kHz-ko lagintze maiztasunarekin.

Ikusi denez, sistema honekin laginketa zehatzak egitea nahiko erraza da, eta jasotako informazioaren azterketa modu erraz batean egin daiteke. Hala ere, aurretik esan bezala, benetako sistemarako aurretik aipatu den beste sistema erabiltzea da egokiena, atal honetan aztertutakoa erreferentzia bezala mantenduz.

3.3.2 MCP3008 bidezko laginketa

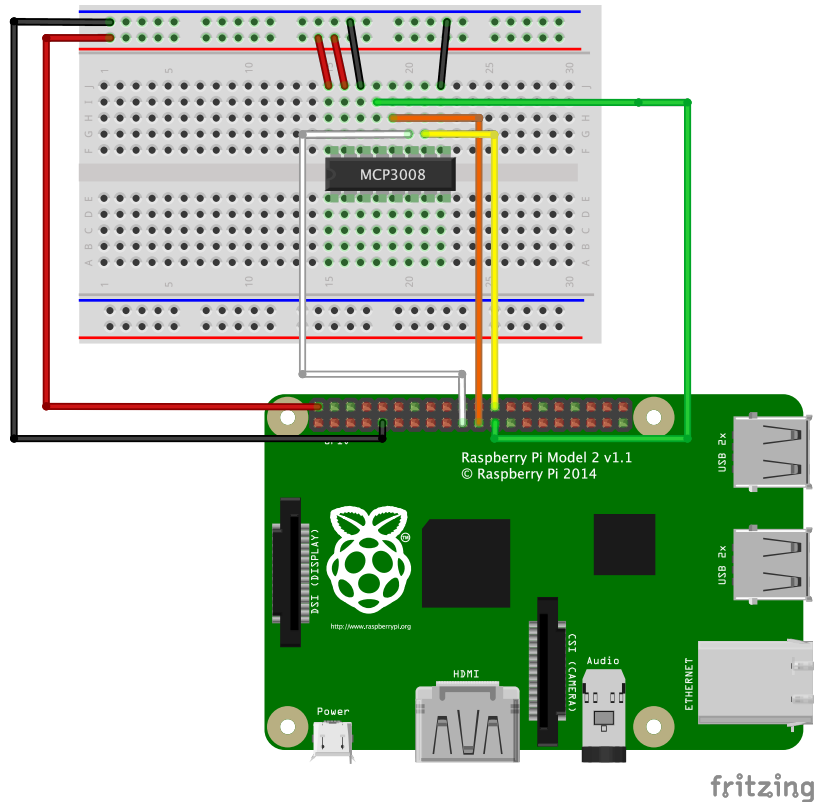
Benetako sisteman erabili nahi den lagintze metodoa aztertzen da atal honetan. Metodo honetan beharrezkoak dira Raspberry Pi bat eta mundu analogikotik digitalerako konbertsioa egingo duen MCP3008 ADCa.



Irudia 3.18: MCP3008-aren konezioak.

MCP3008 konbertsore analogiko digitalaren eredu eskematikoa 3.18 irudian ikus dai-

teke. Ezkerraldeko pin-etan sarrera kanalak daude eta sarrera horietan seinale bat sar daiteke bere irakurketa egiteko. Eskubiko aldean agertzen diren konexioak, elikadura eta lurratz gain, erreferentzia balioa zehazteko (V_{REF}) eta RPi-aren SPI(Serial Peripheral Interface[22])-rako konexioa egiteko balio dute, 3.19 irudiaren ikusten den moduan.



Irudia 3.19: MCP3008 ADC-aren RPi-rako konexioa.

MCP3008 ADCa eta Raspberry Pi-aren arteko konexioa 3.19 irudian ikusten da. Bertan agertzen dira elikadura zein erreferentzia ($V_{CC} = 5\text{ V}$) konexioak, lur konexioak eta SPI bezeroa eraikitzeko beharrezkoak diren MISO (Master Input Slave Output), MOSI (Master Output Slave Input) eta SCLK (Erloju) lerroak.

Behin ADC-aren konexioak amaiturik RPi-an programa bat idaztea beharrezkoa da datuen jasotzea kontrolatu ahal izateko. Ultrasoinu seinalea sortzerakoan bezala, Python programazio lengoia erabili da. Programa honetan *spidev* moduloa erabili da. Modulo honek MCP3008-rako konexioa egiten laguntzen digu finkatutako denbora tartean laginketa egiteko. Jasotako datuak behar bezala manipulatu, une bakoitzeko sarrerako tentsioa jaso ahal da.

RPi-ak irakurriko duen balioa 0 eta 1023 artekoa izango da. Tentsio nuloa edo negatiboa jasotakoan irakurketa 0 izango da eta 1023 irakurketa izango da sartutako tentsioa erreferentzia tentsioaren, V_{REF} , berdina edo handiago bada.

Honakoa da SPI konexioa burutu eta datuak jasotzeko idatzitako programa:


```

1 import spidev
import time
3 import RPi.GPIO as GPIO

5 spi=spidev.SpiDev() #spidev moduloa ireki
spi.open(0,0) #SPI lerroa definitu bezeroarekin komunikatzeko (CE0)
7 #maiztasun posibleak RPi-rentzako (Hz-tan)
#7629 , 15200 , 30500 , 61000 , 122000 , 244000 , 390000
9 #7800000, 15600000 , 31200000 , 62500000 , 125000000
spi.max_speed_hz=3900000 #Datuak jasotzeko maiztasuna ezarri

11 def readadc(adcnun, spi):
13     """adcnun 0 eta 7 bitarteko balioa izan behar da, balio horien
arteaz ez badago -1
    bueltatuko da. Funtzioak ematen duen balioa 0 eta 1023 artean egongo
    da"""
15     try:
17         if (adcnun<0 or adcnun>7):
                return -1
                r=spi.xfer([1,8+adcnun << 4,0])
19         adcout=((r[1] & 3) <<8) +r[2]
                return adcout
21     except KeyboardInterrupt:
                print("Bukatu da datuak hartzeaz")

23 def datuakHartu(fitxategia):
25     try:
                denb=0
                denbo=[]
27                 voltage=[]
                t0=time.time()
29                 for i in range(10000):
31                     voltage.append(readadc(0, spi))
33                     denbo.append(time.time()-t0)
                except KeyboardInterrupt:
35                     pass
                finally:
37                     print("Bukatu da datuak hartzeaz")
39                     datuakGorde(voltage, denbo, fitxategia)
41                     fitxategia.close()

43 def datuakGorde(voltage, denb, fitxategia):
45     normalizatu=5.0/1023.0
47     for i in range(len(voltage)):
                print >> fitxategia, "{0} \t {1}".format(denb[i], voltage[i]*
                normalizatu)

45 print("Datuak hartzen hasiko da")
fitx=open("data.dat", "w")
datuakHartu(fitxategia=fitx)

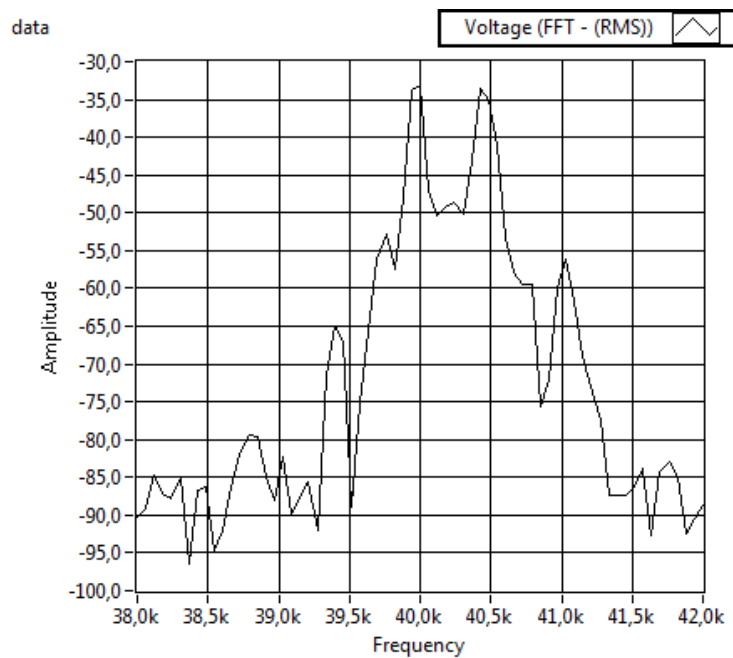
```

Hainbat saiakera egin dira seinalearen laginketa lortzeko, RPi-aren eta ADCaren el-karrizketa konexioa abiadura aldatuz [23], eta hala ere konbertsore honekin ezin izan da laginketa burutu 40 kHz inguruko seinaleekin, nahiz eta konexio maiztasuna ahal den handiena erabili. Ez da posible datasheet-ean agertzen den 200ksps abiadura hori lortzea; badirudi ADC eta RPi-aren elkarrizketak hori mugatzen duela. Maiztasun desberdineko seinaleak probatuz ikusi da 2 kHz ingurura iristean lagindutakoa eta jatorrizko seinalearen antzekotasuna galtzen dela.

MCP3008 ADC-aren bidezko laginketaren mugapenak kontutan hartuta, seinale biderkaketa burutuko duen azpiatal bat gehitu zaio zirkuituari zeinarekin neurtu beharreko maiztasuna txikitu egingo den hurrengo atalean azaltzen den bezala.

3.4 Seinale biderkaketa

Erabilitako MCP3008 ADC-ak kHz gutxi batzuetako seinaleak ondo lagintzen dituzenez, jasotako seinalea gune horretara eramaten bada posible litzateke teoriar laginketa hori egitea.

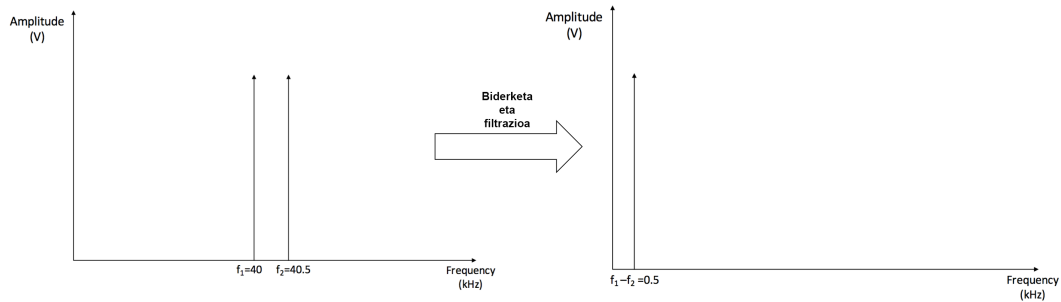


Irudia 3.20: 40kHz eta 40.5kHz-ko maiztasunak ageri dira lagindutako seinalaren FFTa eginda (Amplitudea dB-tan).

LabVIEW bidezko laginketan ikusi da nola jasotako seinalean Doppler efektuaren eraginezko maiztasun berria agertzen dela eta, horrez gain, jatorrizko seinalearen eragina ere nabaritzen da 3.20 irudian ikusten den moduan. Bertan 40kHz-ko seinale bat bidali da eta 40.5kHz-tan agertzen den osagaia Doppler efektuak eragindakoa da; ikusten denez bi osagaiak jasotzen dira.

Jasotako seinalean bi maiztasunak, bidalitakoa eta Doppler efektuaren eraginez eragindakoa, agertzen direla ikusita, maiztasun eremuko bi osagai horiek nahastu ahal dira seinale biderkatzaile baten bidez. Seinale biderkatzaile bat erabiltzen bada eta honen ondoren behe paseko filtro bat ezartzen bada, bi maiztasunen arteko kenketaren maiztasuna duen seinale bat lortu ahal da, hori MCP3008 ADC merkearekin lagindu ahal delarik.

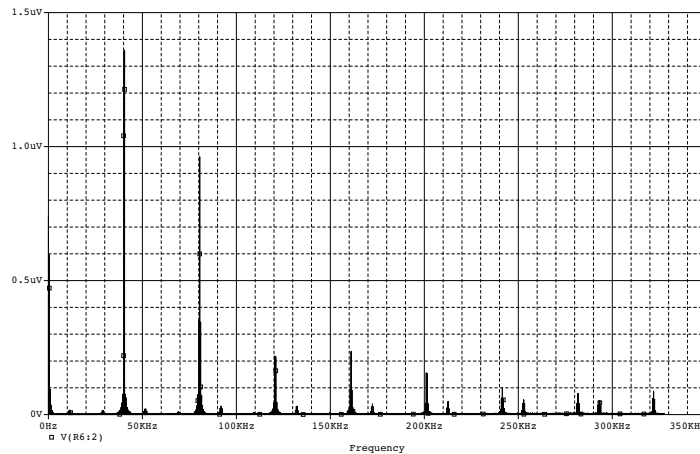
Nahasgailuak seinaleak maiztasun batetik bestera desplazatzeko erabili ahal diren sistema ez linealak dira. Seinaleak ez dira batzen baizik eta denbora eremuan biderkatzen dira. Nahasgailuaren sarreran bi maiztasun desberdineko seinale ezartzean nahasgailuak irteera bezala beste maiztasun bateko seinale bat emango du nahi den moduan iragazi eta gero (ikus 3.21 irudia).



Irudia 3.21: 40kHz eta 40.5kHz-ko maiztasuneko seinaleen biderkadura eta behe paseko iragazki baten ostean esperotako irteera.

Demagun $v_1 = V_1 \cos(\omega_1 t)$ eta $v_2 = V_2 \cos(\omega_2 t)$ seinaleak biderkatzen direla. Orokorrean nahasgailuak $v_m = K(V + v_1 + v_2)^m$ seinalea emango digu irteeran ($V = 0$ edo $V = V_{cc}$ delarik), non m faktorea erabilitako sistemaren menpekota den. Kasu honetan nahasgailu bezala diodo bat erabili da eta bere $m=2$ da. Irteera horrelakoa izanik, orokorrean $|\pm m f_1 \pm n f_2|$ maiztasunak agertzen dituen seinale bat espero da.

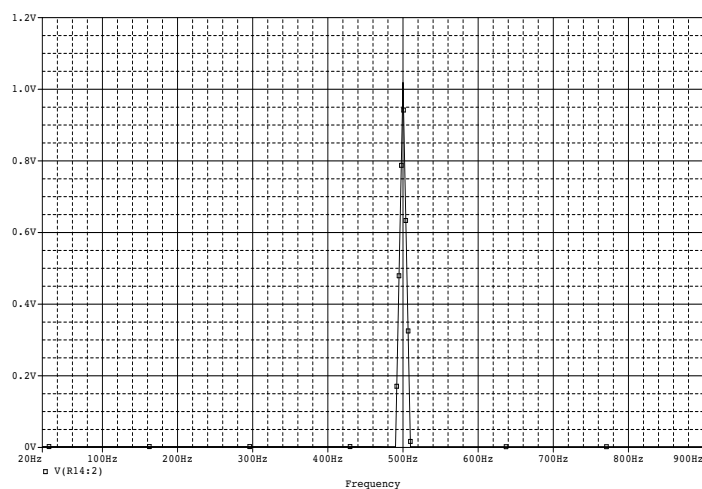
Jaso diren seinaleak aztertuta, simulazio bat burutu da teoria egiaztatzeko. Simulazioan $f_1 = 40kHz$ eta $f_2 = 40.5kHz$ seinaleak nahastu dira, eta ikusi da nola maiztasun eremuko hainbat puntuetan zentratuta agertzen den maiztasun espektroa (ikus 3.22 irudia).



Irudia 3.22: 40kHz eta 40.5kHz-ko maiztasuneko seinaleen nahasketaren espektroa.

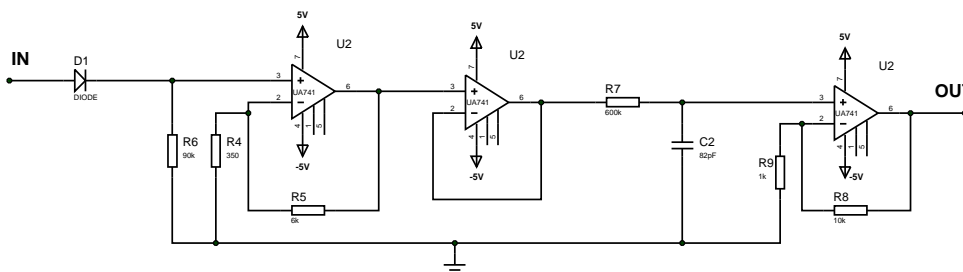
Teoriak esan bezala hainbat maiztasun agertzen dira espektroan. ADC merkearen bidezko laginketarako behe maiztasunetan agertzen den informazioa behar dugu. Hori lortzeko behe paseko filtraketa egin daiteke RC zirkuitu baten bidez. Behe paseko banda zabalera mugatu daiteke erabilitako erresistentzia eta kondentsadorearen balioen bidez, izan ere $\omega_c = 1/RC$ da. Kasu honetan banda zabalera txikia nahi denez, $RC = 5 \cdot 10^{-5}$ erabiliz 3 kHz inguruko banda zabalera lortzen da.

Filtraketaren simulazioa eginda ikusi da nola, espero bezala, maiztasun handietako eraginak behera egin duen nabarmen eta maiztasun baxuetako osagaia bakarrik geratu den 3.23 irudian ikusten den bezala.



Irudia 3.23: Biderkatutako seinalearen espektroa behe paseko filtraketa aplikatu ostean.

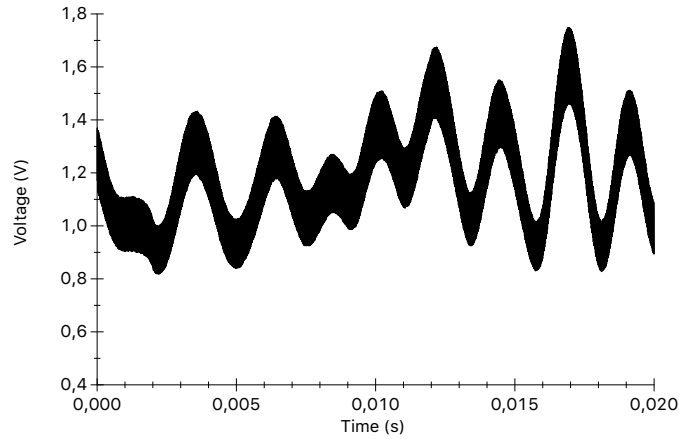
Seinale biderkaketa eta filtroa egiteko, diodo bat eta RC zirkuitu bat soilik gehitu behar zaizkio zirkuituari tentsio jarraitzaie batez gain. Seinale biderkaketa eta filtraketa egiteko gehitu beharreko elementuak 3.24 irudian jasotzen dira. Aipatu behar da diodoaren irteeran jasotzen den seinalea nahiko txikia dela eta filtraketa egiteko hau amplifikatu dela, nahiz eta jakin Opamp-a elementu ez lineala izanik honek beste osagai batzuk agertarazi ahal dituela. Gauza bera gertaten da behe maiztasuneko filtraketa egin eta gero; seinalea nahiko txikia da eta hortaz hau ere amplifikatu egin da azken etapan.



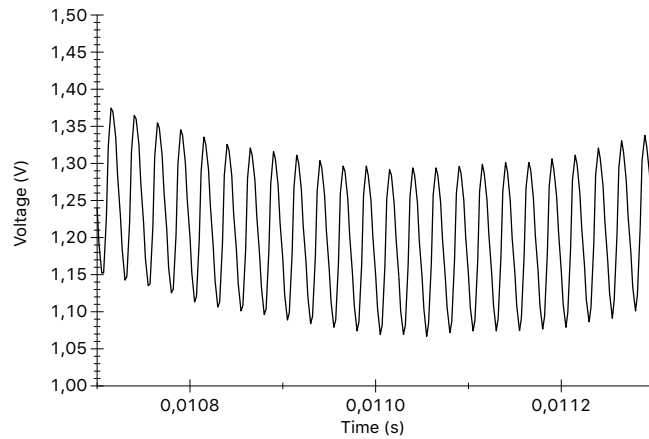
Irudia 3.24: Seinale biderkaketa eta filtrazioa egiteko zirkuitu zatia.

Jasotako seinalean bi maiztasun osagai nagusi espero dira. Batetik, 40kHz-tako maiztasun sekundario bat eta hasierako bi maiztasun nagusiei dagokien kenketaren balioa duen osagai nagusi bat. Adibide moduan, objektu bat erortzen uztean 3.25 irudiko seinalea jasotzen da, non maiztasun oso handia ez duen seinale bat ikusi ahal den. Era berean 3.26 irudian denbora tarte txikiago batean jasotakoa irudikatzen da eta argi ikusten da maiztasun sekundario bat agertzen dela zeina jatorrizko 40 kHz-ko maiztasunari dagokion.

Argi ikusten denez 3.25 irudian, offset tentsio bat dugu. Azken helburua laginketa Raspberry Pi-aren bidez egitea denez, komenigarria zaigu offset hau, RPi-ak soilik tentsio positiboak lagintzeko gai da eta. Balio guztiak positiboak izanik Raspberry Pi-aren bidez egindako laginketak datu guztiak jaso ahalko ditu eta ez du seinale erdia galduko, horrenbestez offset tentsio honek arazo hori konpontzen du.

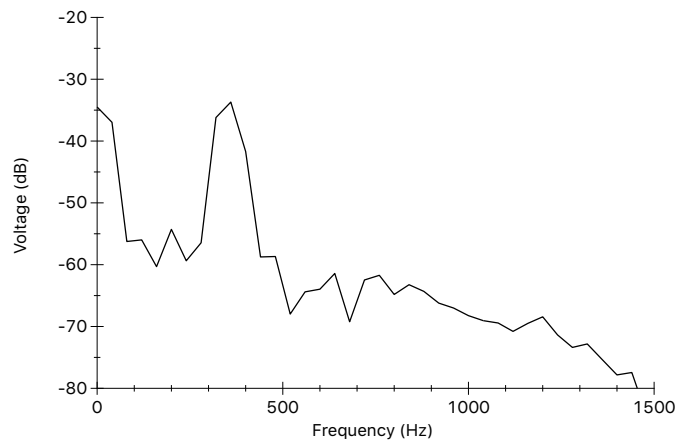


Irudia 3.25: *Seinale biderketa egin eta gero jasotzen den seinalea.*



Irudia 3.26: *Seinale biderketa egin eta gero ere 40kHz-ko maiztasuna ageri da.*

Seinale biderkaketa eta filtraketa egin eta gero, espero da maiztasun baxuko seinale bat jasotzea. Jasotako seinalearen FFT-a (Fast Fourier Transform) eginda objektu bat erortzen uztean 3.27 irudiko espektroa jasotzen da. Argi ikusten da seinale baxuko osagai nagusi bat jasotzen dela, eta gainera, jasotako balioa espero daitekeen balioarekin bat dator. Hurrengo kapituluan aztertuko den bezala 300-600 Hz inguruko datuak espero dira fase honetan.



Irudia 3.27: *Seinale biderketa egin eta gero erantzuna maiztasun eremuan.*

Azken biderkaketa eta iragazketa etapa honekin muntatua dago euriaren abiadura neurtzeko erabiliko den prototipoa. Hurrengo kapituloan aztertuko da datuen eskuratzea eta jasotako datuak bat datozen esperotako balio teorioekin.

Kapitulua 4

Neurketen azterketa

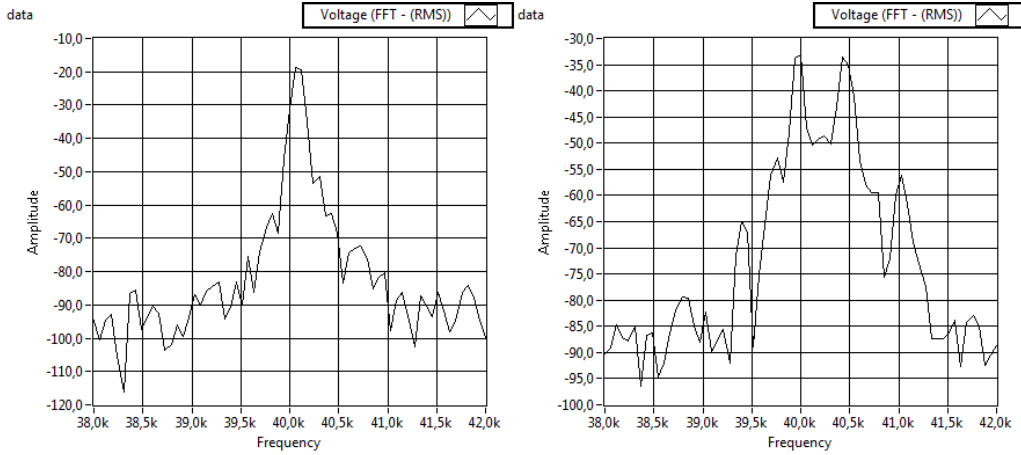
Diseinatu eta muntatutako sistemaren bideragarritasuna aztertzeko euriaren erorketa simulatuko duen sistema bat muntatu da. Probak egiteko muntatutako sistema 4.1 irudian ikus daiteke. Ontziaren barnean zirkuitu detektatzailea dago zeina kanpotik elikatua den eta, aldi berean jasotako seinalea eskuratzen da laginketa egiteko.



Irudia 4.1: Probak egin eta sistema testatzeko erabilitako muntaia.

Muntatutako prototipoa nahiko oinarritzkoa da eta ez du uraren aurkako babesik; horrenbestez ez da ura erabili neurketak egiteko. Ura edota likidorik erabili ezin denez uraren errefrakzio indize antzekoa duen material bat erabili da, garbantzua eta dilistak hain zuzen. Garbantzua tanta lodien antza dute, dilistak aldiz tanta txikiagoen forma txapalagoa dute, teoriaraz aztertu den moduan. Hauek 4.1 irudian ikusten den inbututik erortzen utzi dira jasotako maiztasunaren balioak onargarriak diren ikusteko.

Garbantzuekin burututako lehen azterketetan begi bistakoa izan da maiztasun eremuan osagai berri baten agerpena, zeina Doppler efektuak eragindakoa den (ikus 4.2 irudia).



Irudia 4.2: Jasotako seinalea ezer jaurti gabe (eskuina) eta jasotako seinalea garbantzua bat botatzean (ezkerra) (Amplitudea dB-tan).

Aipatutako 4.2 irudian ikus daitekeen bezala bigarren maiztasun bat jaso da. Neur-tzen dena baliagarria dela zihurtatzeko, oinarritzko dinamika ekuazioak planteatzen dira jarraian. Lehen konfigurazio honetan inbututik detekzio gunerako distantzia 25 cm ingurukoa da, eta hortaz garbantzua detekzio gunera iristeko behar duen denbora hurrengo ekuazioen bidez lor daiteke (arraste indarra arbuiauz desplazamendua txikia da eta):

$$s = s_0 + v_0 t - \frac{1}{2} g t^2 = -\frac{1}{2} g t^2 \quad (4.1)$$

$$t = \sqrt{\frac{2|s|}{g}} = 0.225 \text{ s} \quad (4.2)$$

Higiduraren ekuazio orokorrak jarraituz garbantzua detekzio gunera iristeko 0.225s-ko denbora behar duela lortzen da (ikus 4.1 eta 4.2 ekuazioak). Hori horrela izanik, une horretan espero den abiadura 4.3 ekuazioan adierazten da.

$$v = v_0 - g t = -\sqrt{2sg} = -2.21 \text{ m/s} \quad (4.3)$$

Teoriaren atalean ikusitako 2.19 adierazpenean bidali eta jasotako maiztasunak ordezkatzeko badira, neurtutako abiadura $v_D \approx -2.11 \text{ m/s}$ -koa da. Kontuan izanik inbutua eta detekzio gunearen arteko distantzia hurbildua dela eta ez dela kontuan hartzen garbantzua gaineko airearen arrastearen eragina, esan daiteke jasotako datua onargarria dela.

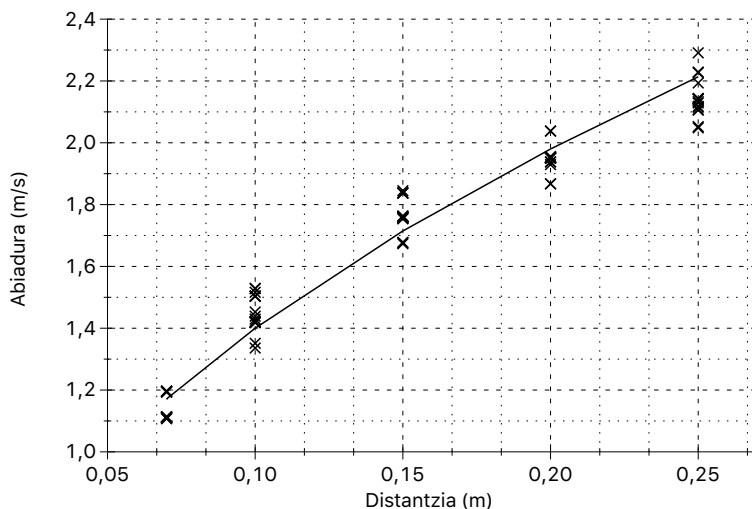
4.1 Sistemaren zehaztasunaren estimazioa

Neurketen baliozkotasuna aztertzeke inbutu eta detekzio gunearen arteko 5 distantzia ezberdin finkatu dira eta distantzia hauetako bakoitzean 16 neurketa burutu dira neurketa erroreak minimizatzeko. Jasotako datuen baliozkotasuna aztertzeke bi azterketa egin dira. Batean Doppler efektuaren bidezko abiaduraren estimazioa eta higidura ekuazioetatik lortutakoa alderatzen dira; eta bigarren azterketan jasotako maiztasun diferentzia eta teorikoki lortu beharrekoa (aurrerago azalduko da) alderatzen dira.

Distantzia (m)	α (graduak)	β (graduak)	Maiztasun Diferentzia (Hz)	Abiadura Doppler (m/s)
0.07	6.9	6.9	267.5	1.14
0.1	7.6	7.6	323.75	1.36
0.15	9.3	9.3	421.25	1.76
0.2	11.8	11.8	460	1.95
0.25	16.1	16.1	503.75	2.15

Taula 4.1: Egindako neurketen batzbesteko balioak.

Aurreko tauletan jasotako datuen batz-besteko balioak jasotzen dira (jasotako datuen taula osoa A eraskinean aurki daiteke). Aurretik aipatu den bezala, sistemaren egokitasuna aztertzeko lehen azterketa Doppler efektuaren bidez lortutako abiadura eta higidura ekuazioetatik lortzen dena alderatzea da.



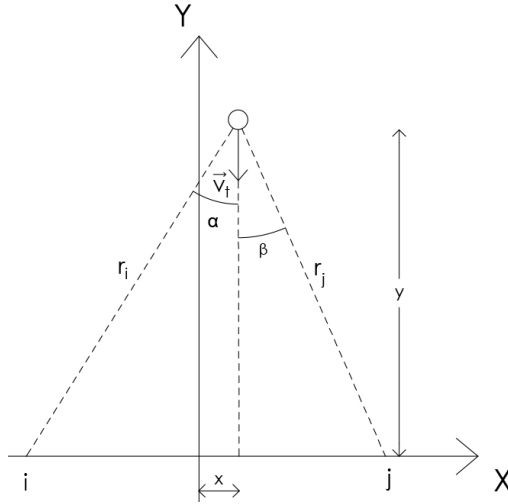
Irudia 4.3: Neurtutako balioak (X bidez adierazita) eta higidura ekuazioak ebatziz teorikoki izan beharrekoa (lerroa).

Aurreko 4.3 irudian ikusten den moduan jasotako balioak nahiko ondo egokitzen dira balio teorikoarekin eta hortaz lehen azterketa honetatik ateratzen den ondorioa, sistema egokia dela da. Hala ere, bigarren azterketaren bidez ondorio hau konprobatu behar da.

Bigarren azterketa honetan, maiztasun diferentziaren balioa ezaguna izanik, eta jarraian frogatzen den jaso beharreko maiztasun diferentzia teorikoa lortuz eta hauek alderatuz neurketen egokitasuna aztertzeko bigarren metodo bat lortzen da. Honekin guztiz konprobatu ahalko da sistema egokia den.

Zirkuituaren azterketan ikusitako 3.3 irudia aintzat hartuz eta neurketak egiteko erabili den sistema aztertuz, 4.4 irudiko eredu eskematikoa lortzen da neurketetarako. Bertan x ardatzeko i posizioan ultrasoinu igorlea dago kokatua eta j posizioan kokatzen da ultrasoinu hartzailea.

Aurretik ikusitako Doppler efektuaren ekuazioak aplikatuz, bidali eta jasotako maizta-



Irudia 4.4: Seinalea jasotzearen egitura espaziala.

sunen arteko diferentziarako adierazpena lortu ahal da (non v_i eta v_j tantaren abiadurak diren iturritik eta hartzailetik ikusita hurrenez hurren).

$$f_j = \frac{v_s}{v_s - v_j} f_t = \frac{v_s}{v_s - v_j} \frac{v_s + v_i}{v_s} f_i \quad (4.4)$$

$$f_j = \frac{v_s + v_i}{v_s - v_j} f_i \quad (4.5)$$

$$\Delta f = f_j - f_i = \frac{v_i + v_j}{v_s - v_j} f_i \quad (4.6)$$

Abiaduren erlazioak r_i eta r_j distantzien denborarekiko deribatuak izango dira, eta hauek zuzenean daude erlazionatuta α eta β angeluekin, jarraian azaltzen den bezala.

$$v_i = \frac{dr_i}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\sqrt{\left(\frac{d}{2} + x\right)^2 + y^2} \right) = \frac{y}{\sqrt{\left(\frac{d}{2} + x\right)^2 + y^2}} \frac{dy}{dt} = v_t \cos \alpha \quad (4.7)$$

$$v_j = \frac{dr_j}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\sqrt{\left(\frac{d}{2} - x\right)^2 + y^2} \right) = \frac{y}{\sqrt{\left(\frac{d}{2} - x\right)^2 + y^2}} \frac{dy}{dt} = v_t \cos \beta \quad (4.8)$$

Azken bi erlazio hauek kontuan hartuz eta 4.6 ekuazioan ordezkaturik, honela geratzen da maiztasun diferentzia, Δf .

$$\Delta f = \frac{v_t \cos \alpha + v_t \cos \beta}{v_s - v_t \cos \beta} f_i \quad (4.9)$$

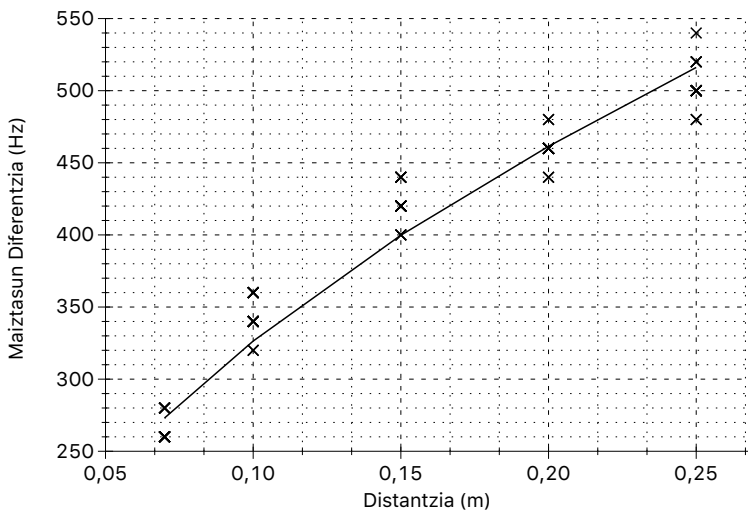
Airearen abiadura $v_s = 343 \text{ m/s}$ -koa denez eta tanten muga abiadura gehienez 15 m/s -koa izango denez [11], $v_s \gg v_t$ hurbilketa kontuan hartuz honako moduan geratzen da 4.9 ekuazioa:

$$\Delta f \approx \frac{\cos \alpha + \cos \beta}{v_s} v_t f_i \quad (4.10)$$

Frogapen honen bidez ikusten da altuera bakoitzerako α eta β finkatzen badira eta higidura ekuazioen bidezko tantaren abiaduraren estimazioarekin maiztasun diferentziarentzako balio teorikoa lortu ahal dela, zeina jasotako balioekin alderatu ahal den azken

hauen egokitasuna aztertzeke.

Hurrengo grafikan dagoeneko jasotako datuak (ikus A.1 eta A.3 taulak) eta 4.10 ekuazioko adierazpenarekin lortutako balioak alderatuz, neurketen egokitasuna aztertzen da.



Irudia 4.5: Neurtutako balioak (X bidez adierazita) eta 4.10 ekuazioko funtzioa (lerroa).

Doppler bidez kalkulaturako abiaduraren kasuarekin gertatu den bezala, kasu honetan ere balio teorikoak eta jasotako balioak bat datoz 4.5 irudiko grafikan ikusten den bezala. Argi dago balio guztiak ez datozela bat balio teorikoarekin, hori azaltzeko neurketetan eragina duten hainbat faktore hartu behar dira kontuan. Batetik angeluen balioa dago, zaila baita neurketak egiteko dilista zein garbantzua modu guztiz bertikalean jaurtitzea. Bestetik, dilista zein garbantzuen artean gerta daitezkeen talkak kontuan hartu behar dira hauek abiadura eragina dute eta. Hauetaz gain beste hainbat faktoreek eragina izan dezakete, adibidez: zarata elektronikoa, airearen temperatura eta soinuaren abiaduraren arteko erlazioa etab. Erlazio hauek lan honen jarraipenean landuko dira. Hau guztia egia bada ere, jasotako datuak onargarriak dira, eta hortaz muntatutako sistema egokia da euri tanten abiadura neurtzeko egindako bideragarritasun azterketaren arabera. Lan hau bideragarritasun azterketa bat izanik, lortutako emaitzek pauso gehiago ematera eta sistema guztiz garatzera bultzatzen dute. Sistemaren garapenarekin jarraitzeko hainbat ideia proposatzen dira hurrengo kapituluan.

Kapitulua 5

Proiektuaren jarraipena eta ondorioak

Lan honetan seinale akustikoen bidezko disdrometro baten diseinua landu da, zeinak ultrasoinuen bidezko Doppler efektua erabiltzen duen neurketak egiteko. Lanaren izaera bideragarritasun azterketa izanik, helburu nagusia teorikoki ezaguna dena neurtzeko gai izatearen azterketan oinarritu da. Orokorrean Doppler efektuak eragindako maiztasun aldaketa neurtua izan da, gainera, neurtutako maiztasun aldaketa bat dator esperotakoarekin, hortaz bideragarritasun azterketaren emaitza positiboa da eta honek sistemaren garapenarekin jarraitzea ahalbidetzen du.

Sistema honen prototipo bat diseinatu bada ere sistema osoa ez dago amaitua. Diseinatutako prototipoa oinarritzat hartuz, honen datuen jasotzea era automatikoa egiteko automatizazioa diseinatu behar da.

Eraikitako sistema prototipo bat izanik, hainbat limitazio ditu nahiz eta konprobatu den bezala jasotzen diren datuak onargarriak izan. Limitazioei dagokienez, argi dago erabilitako elektronika nahiko sinplea izan dela garrantzitsuena bideragarritasuna aztertzea izan delako. Hortaz, benetako sistema muntatzerako garaian elektronika hau oinarritzat hartuta zirkuitua fintzea beharrezkotzat jotzen da.

Zirkuituarekin jarraituz, behatu da neurketen azterketa egiteko muntaia dela eta ultrasoinuek egitura bezala erabili den tripodean errebotatu egiten dutela eta horregatik jasotzen dela seinaleen nahasketa. Proiektuan zehar ikusi denez funtzio hau interesgarria da neurketak egiteko. Benetako sistemak seinaleen nahasketa hau izateko, seinale biderketa egin aurretik bidalitako eta jasotako seinaleen batuketa egitea proposatzen da.

Zirkuituarekin amaitzeko, sistemaren erabilpena euriaren neurketa egitea izango denez, argi dago muntatzen den sistemak urarekiko babesia izan behar duela urak zirkuituaren funtzionamenduan eraginik ez izateko.

Raspberry Pi-a edo antzeko gailu bat erabiltzea garrantzitsua da sistemaren kostu totala jaisteko, helburuetako bat sistema merke bat eratzea baita. Hala ere ikusi da gailu hau apur bat limitatua dela seinale baten laginketa egiteko; izatez gailu hauek ez daude funtzio honetarako diseinatuak eta ulergarria da. Arazoa datu jasotze bat eskatzen denean, hau egiten eta jasotzen den bitartean RPi-aren 30 erloju pausu inguru pasatzen direla da. Denbora hori hala ere onargarria da laginketa egiteko, baina denbora hori progra-

maren exekuzioan gertatzen den denborarekin gehitzean datu jasotze baterako behar den denbora handitzen doa eta, gainera, denbora hori aldakorra izan ahal da. Hau dena ikusita proposatzen den konponbidea RPi eta ADC-aren artean buffer moduan lan egingo duen beste gailu bat gehitzea da. Horrela ADC eta RPi-aren artean gertatzen den transmisio inbutua ezabatzeko. Horrela buffer-ak hainbat datu gordeko lituzke, eta bertatik RPi-ra noizean behin soilik pasako lirateke datuak, datu transmisioa hobetuz.

Raspberry Pi-arekin jarraituz, prototipoaren lehen azterketan uneoro RPi-ra bertara egon gara konektatuta kodearen idazketa eta kontrola egin ahal izateko. Hala ere, benetako erabilpenean datu konkretu batzuk bakarrik izango dira beharrezkoak. Hori dela eta, datu horiek eskuratzeko modu errazago bat diseinatu beharra dago, adibidez web zerbitzari bat sortuz, zeinean orduro, egunero edo finkatutako denbora tarte batean datuak eguneratzen joango diren.

Proiektuarekin jarraitzeko ideiarekin gradu amaierako lan honetan diseinatutako zirkuitaria, neurketa zein garatutako kode informatikoa eskuragarri utziko da interesa duen norbaitek sistema honen garapenarekin jarraitzeko aukera izan dezan.

Eranskina A

Neurketak

Distantzia (m)	Bidalitako Maiztasuna (Hz)	Jasotako Maiztasuna (Hz)	Maiztasun Diferentzia (Hz)	Abiadura Doppler (m/s)
0.07	39580	39840	260	1.11
0.07	39560	39820	260	1.11
0.07	39580	39840	260	1.11
0.07	39640	39920	280	1.20
0.07	39680	39960	280	1.20
0.07	39640	39900	260	1.11
0.07	39680	39940	260	1.11
0.07	39640	39900	260	1.11
0.07	39680	39960	280	1.20
0.07	39680	39940	260	1.11
0.07	39700	39960	260	1.11
0.07	39640	39920	280	1.20
0.07	39720	40000	280	1.19
0.07	39720	39980	260	1.11
0.07	39760	40040	280	1.19
0.07	39800	40060	260	1.11
0.1	40260	40600	340	1.43
0.1	40180	40540	360	1.52
0.1	40100	40420	320	1.35
0.1	40000	40340	340	1.44
0.1	39840	40200	360	1.53
0.1	40520	40860	340	1.42
0.1	39880	40240	360	1.53
0.1	40540	40900	360	1.50
0.1	40460	40800	340	1.42
0.1	40560	40900	340	1.42
0.1	40520	40880	360	1.50
0.1	39620	39960	340	1.45
0.1	40560	40880	320	1.34

Taula A.1: Egindako probetan erorketa altuera, bidali eta jasotako maiztasunak, maiztasun diferentzia eta 2.19 ekuazioaren bidez kalkulaturako abiadura.

Distantzia (m)	Bidalitako Maiztasuna (Hz)	Jasotako Maiztasuna (Hz)	Maiztasun Diferentzia (Hz)	Abiadura Doppler (m/s)
0.1	40500	40860	360	1.50
0.1	40560	40900	340	1.42
0.1	40600	40940	340	1.42
0.15	40500	40920	420	1.75
0.15	40500	40940	440	1.84
0.15	40460	40900	440	1.84
0.15	40360	40780	420	1.76
0.15	40320	40760	440	1.85
0.15	40320	40720	400	1.68
0.15	40320	40740	420	1.76
0.15	40280	40700	420	1.76
0.15	40360	40780	420	1.76
0.15	40360	40760	400	1.68
0.15	40360	40780	420	1.76
0.15	40400	40820	420	1.76
0.15	40420	40840	420	1.76
0.15	40440	40840	400	1.67
0.15	40460	40880	420	1.76
0.15	40500	40940	440	1.84
0.2	39800	40280	480	2.04
0.2	40300	40760	460	1.93
0.2	40120	40580	460	1.94
0.2	39800	40260	460	1.95
0.2	39840	40300	460	1.95
0.2	40120	40580	460	1.94
0.2	39840	40300	460	1.95
0.2	39860	40320	460	1.95
0.2	39860	40320	460	1.95
0.2	39840	40300	460	1.95
0.2	39760	40220	460	1.96
0.2	39880	40340	460	1.95
0.2	39820	40280	460	1.95
0.2	39840	40280	440	1.87
0.2	39800	40280	480	2.04
0.2	39840	40280	440	1.87

Taula A.2: A.1 taularen jarraipena.

Distantzia (m)	Bidalitako Maiztasuna (Hz)	Jasotako Maiztasuna (Hz)	Maiztasun Diferentzia (Hz)	Abiadura Doppler (m/s)
0.25	40080	40580	500	2.11
0.25	40040	40560	520	2.19
0.25	39800	40340	540	2.29
0.25	39440	39960	520	2.23
0.25	40120	40620	500	2.11
0.25	39940	40440	500	2.11
0.25	39440	39940	500	2.14
0.25	39600	40080	480	2.05
0.25	39880	40380	500	2.12
0.25	39520	40000	480	2.05
0.25	39600	40100	500	2.13
0.25	39400	39920	520	2.23
0.25	39680	40180	500	2.13
0.25	39400	39900	500	2.14
0.25	39440	39940	500	2.14
0.25	39440	39940	500	2.14

Taula A.3: A.1 taularen jarraipena.

Bibliografia

- [1] J.P. Peixoto and A.H. Oort. *The Physics of Climate*. Springer-Verlag GmbH, 1992.
- [2] Kevin E. Trenberth, John T. Fasullo, and Jeffrey Kiehl. Earth's global energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(3):311–323, 2015/07/24 2009.
- [3] World Meteorological Organization. Guide to meteorological instruments and methods of observation, 1983.
- [4] L.C. Sieck, S.J. Burges, and M. Steiner. Challenges in obtaining reliable measurements of point rainfall. *Water Resorucer Research*, 2007.
- [5] O. Bonacci. The influence of errors in precipitation measurements on the accuracy of the evaporation measurements performed by a class a evaporation pan. *Theoretical and Applied Climatology*, 43(4):181–183, 1991.
- [6] Trans-African Meteorological Organization. About tahmo.
- [7] A. F. Spilhaus. Raindrop size, shape and falling speed. *Journal of Meteorology*, 5(3):108–110, 2015/07/24 1948.
- [8] H.E. Edgerton and J.R. Killian. *Flash!: Seeing the unseen by ultra high-speed photography*. C.T. Branford Co., 1954.
- [9] Chiji Magono. On the shape of water drops falling in stagnant air. *Journal of Meteorology*, 11(1):77–79, 1954.
- [10] K. V. Beard and H. R. Pruppacher. A determination of the terminal velocity and drag of small water drops by means of a wind tunnel. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 26(5):1066–1072, 2015/07/24 1969.
- [11] G. B. Foote and P. S. Du Toit. Terminal velocity of raindrops aloft. *Journal of Applied Meteorology*, 8(2):249–253, 1969.
- [12] Ross Gunn and Gilbert D. Kinzer. The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air. *Journal of Meteorology*, 6(4):243–248, 1949.
- [13] H. R. Pruppacher and E. H. Steinberger. An experimental determination of the drag on a sphere at low reynolds numbers. *Journal of Applied Physics*, 39(9):4129–4132, 1968.
- [14] R.L. Mott. *Applied Fluid Mechanics*. Radcliffe Biography. Merrill Publishing Company, 1990.
- [15] Midas Components Ltd. Air ultrasonic ceramic transducers. 400st/r120 (datasheet).

- [16] Texas Instruments. *xx555 Precision Timers (Datasheet)*, September 2014.
- [17] Raspberry Pi Foundation. Raspberry pi 2 model b (datasheet).
- [18] Wiring pi reference (<http://wiringpi.com/reference/>).
- [19] National Instruments. Low-cost m series multifunction data acquisition - 16-bit, 250 ks/s, up to 80 analog inputs. 2014.
- [20] Microchip Technology Inc. *MCP3004/3008 A/D Converters with SPI Serial Interface (Datasheet)*, September 2008.
- [21] National Instruments. Scb-68 user manual for advanced functions. March 2009.
- [22] J. Russell and R. Cohn. *Serial Peripheral Interface Bus*. Book on Demand, 2012.
- [23] Raspberry Pi Foundation. Spi.
- [24] L. C. Sieck, S. J. Burges, and M. Steiner. Challenges in obtaining reliable measurements of point rainfall. *Water Resources Research*, 43, June 2007.
- [25] A.S. Sedra and K.C. Smith. *Microelectronic Circuits*. Number v. 1 in Microelectronic Circuits. Oxford University Press, 1998.
- [26] Python 2.7 documentation (<https://docs.python.org/2/>).
- [27] Texas Instruments. Handbook of operational amplifier applications. October 2001.
- [28] muRata Manufacturing. Ultrasonic sensors ma40 series (datasheet). 2014.
- [29] Texas Instruments. *LM741 Operational Amplifier (Datasheet)*, October 2015.
- [30] Labcenter Electronics. *Intelligent Schematic Input System (ISIS): User Manual*, November 2002.
- [31] Ali Tokay, Anton Kruger, and Witold F. Krajewski. Comparison of drop size distribution measurements by impact and optical disdrometers. *Journal of Applied Meteorology*, 40(11):2083–2097, 2015/07/24 2001.