

Bihotzaren Fisika: Elektrokardiograma

Beñat Berasategui Migueliz

1 Helburua

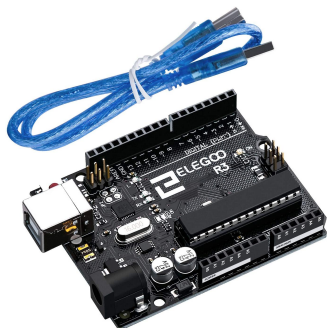
Graduan zehar egiten ditugun praktiketan sistema *artifizialak* aztertu ohi ditugu, plastikoa, metal eta kristalezkoak. Praktika honetan aldiz, giza bihotza izango dugu aztergai, eta horretarako **elektrokardiogramak** (EKG) izango dira gure baliabide nagusia. Medikuntzan garrantzia handikoak dira hauek, informazioan aberatsak izateaz gain, azkarra, merkeak eta minik gabekoak baitira.

Hasiera batean ustekabekoak izan daitezkeen elektrostatika, mekanika eta elektronikako kontzeptuak agertuko zaizkigu, eta datuen analisirako teknika ezberdinak lantzeko aukera emango digu praktika honek [1][2].

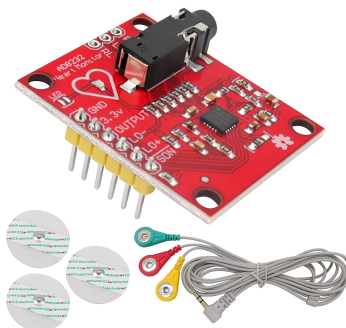
Saiakuntza honetan proposatzen dena aberasgarria izan daiteke bai fisika baita medikuntzako ikasleentzat ere, eta oso interesgarria izango litzateke bi graduetako ikasleek batera egitea, kasu honetan bien ezagutzak osagarriak baitira.

2 Tresneria eta Aurrekontua

Elektrokardiografoa izango da funtsezko tresna. Sistema sinple batekin ere gauza asko egin daitezke, ez da inbertsio handirik egin behar. Nik Elegoo Uno R3 plaka (19.49€) eta AD8232 EKG sentsorea (11.99€) erabili ditut, 31.48€ guztira. Ordenagailu bat ere beharrezkoa izango da, neurketak hartu eta prozesatzeko.



(a) Elegoo Uno R3 plaka [3].

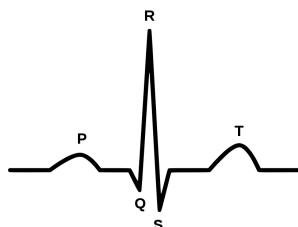


(b) AD8232 EKG sentsorea [4].

1. irudia: Elektrokardiografoaren osagaiak.

Bihotza elektrikoki aktibatutako punpa mekanikoa da. Bere taupada-markatzaile naturala **nodulu sinusala** da¹, eskuineko aurikulan dagoen eta bulkada elektrikoak sortzen dituen zelula espezializatuen multzoa. Bihotzeko zelulen mintzetan sortzen diren boltajeak aldatuz transmititzen dira bulkada horiek, sodio, potasio eta kaltzioa bezalako ioien elkartrukea dela medio.

Pausaguenean, zelulen mintzak negatiboki kargatuta daude. **Despolarizazio** deituriko prozesuaren bidez, mintza positiboki kargatzen da. Aurkako prozesuak, **birpolarizazioak**, karga negatiboa itzultzen die. Kargen mugimendu hau, bulkada elektrikoaren transmisioa, momentu dipolarrak erabiliz ereduza daiteke. Bektore erresultanteari lotutako potentzial-diferentzia neurgarria da, eta hori da hain zuzen ere elektrokardiogrametan denboraren funtzioan irudikatzen dena.



Elektrokardiograma klinikoetan **12 deribazio** aztertzen dira, elektrodoen posizio ezberdinetarako lortutako 12 *proiektzio*. Bihotzaren gune ezberdinak esploratzeko aukera ematen du horrek, bakoitzean agertzen den informazioak gainontzekoena osatzen baitu. Guk azterketa sinpleagoa egingo dugu, deribazio bakarra kontsideratuz.

Behatu beharreko portaera 2. irudikoa da: P uhinak aurikulen despolarizazioa adierazten du, QRS konplexuak bentrikuluen despolarizazioa eta azkenik, T uhinak, bentrikuluen birpolarizazioa [5]. Eredu honetatik aldentzen den edozerrek aztertutako bihotzaren berezitasunen berri emango digu. Hori bai, askotan gainontzeko giharren eragina zein bestelako interferentzia elektrikoak kontuan hartzeko modukoak dira, geroagoko adibideetan ikusiko dugunez.

Saiakuntza honen lehenengo zatian, lortutako elektrokardiogramak bere horretan aztertuko ditugu, ahal den neurrian ikusitakoa *pazientearen* ezaugarriekin erlazionatuz. Bigarren zatian **arnas arritmia sinusalean**² zentratuko gara, arnasketak bihotzaren erritmoan duen eraginean, hain zuzen ere. Bihotzak irakaskuntzan hain ohikoak diren malguki edo RLC-ak bezalako osziladore bortxatuen antzeko portaera erakusten duela baieztatzea izango da zati honen helburua.

¹Honek sortutako bihotzaren funtzionamendu normalari **erritmo sinusal** esaten zaio.

²Ingelesez *Respiratory Sinus Arrhythmia* (RSA).

4 Eragiketa-metodoa

Lehenik eta behin, neurketa-sistema prestatu behar dugu. Plakaren eta sentsorearen arteko konexioak egin ondoren, pazienteari elektrodoak jarriko dizkiogu [6].

Datuak bildu eta prozesatzeko, garrantzia handia izango dute C++ eta Python erabiliz sortutako hainbat programek. GitHub-eko errepositorio batean [7] daude eskuragarri, egindako neurketa eta grafikoekin³ batera.

4.1 Elektrokardiograma baten azterketa

Pazientea etzanda egonda lortuko dugunaren adibide bat 3. irudikoa da. Zarata apur bat duen arren, ongi bereizten dira **Oinarri Teorikoa** atalean deskribatutako uhinak. EKG hori aztertzeke lehenengo pausua bihotzaren maiztasuna (B) tarte fisiologikoan dagoen ikustea da: $60 - 100$ taupada/min⁴. Bihotzaren maiztasuna R uhinen arteko denbora tarteak emango digu, RR distantzia deituko dugunak. RR -ren balioak taupadaz-taupada nola aldatzen diren ikusita, arritmia dagoen aztertuko dugu.

Benetan interesgarria den adibide bat 4. irudikoa da, nire amonari egindakoa. Erritmoa ez da sinusala, irregularra izateaz gain ez delako P uhinik agertzen. **Fibrilazio aurikularra** deitzen zaio arritmia honi, eta munduan ohikoena da. Hori kontrolatzeko **digoxina** hartzen du, bihotzaren erritmoa jaisten duen farmakoa. Sustantzia horren eraginez agertzen da T uhinaren aurreko sakonunea, **kubeta digitalikoa** [8].

4.2 Arnasketaren eragina bihotzaren erritmoan

Atal honetan, EKG-a bera baino, RR tarteak denboran zehar dituen aldaketak interesatuko zaizkigu. Garrantzitsuenak bi denbora-eskala ezberdinetan gertatzen dira.

Denbora tarte laburrean (gehienez 6s-ko periodoak) arnasketaren aldaketek dute eraginik handiena. Arnasa hartzean B erritmoa handitzen da, eta botatzean, txikitzen. 10s baino periodo handiagoko aldaketak (*Mayer-en uhinak*) nerbio sistema autonomoak baldintzatzen ditu hein handi batean, eta pazienteak zutik dagoenean dira nabarmenen.

4.2.1 Arnasketaren eragina: etzanda edo zutik

Lortuko dugun erantzuna ezberdina izango da pazienteak etzanda edo zutik egonda. Bi posiziotan egingo ditugu neurketak, arnasketaren eragina aztertzeke komenigarriena

³Grafikoak eranskinean ere bilduta daude, azalpena erraztuko dutelakoan.

⁴ $B < 60$ tp/min baldin bada, *bradikardia sinusalaz* hitz egiten da eta $B > 100$ tp/min bada, *takikardia sinusalaz*.

pazientea zutik egotea dela ondorioztatzeko (8. irudia).

4.2.2 Aldizkako arnasketari erantzuna

5a irudiko eredua jarraituz arnastu behar du pazienteak: arnasa azkar hartu, 10 taupadaz eutsi, azkar bota eta beste 10 taupadaz eutsi. RR -ren neurketek argi utziko dute bihotzaren erantzunak sarrerako *seinalearekin* erlazio estua duela (6a irudia).

Fourierren transformatu diskretua kalkulatzeko oso argigarria da. Sarrerako 0.05 Hz eta 0.15 Hz-ko harmonikoak (5b) erantzunean agertzen dira. Horrez gain, 0.1 Hz-ko gai berri bat agertzen da, sistemaren izaera ez linealaren berri ematen diguna (6b).

4.2.3 Analisi espektrala

Beste bi neurketa sorta egingo ditugu, bat etzanda eta bestea zutik, 12 ziklo minutuko (0.2 Hz) erritmoan arnastuz (10f). Fourierren transformatua kalkulatu aztertuko dugu bihotzaren erantzuna (7a eta 7b). Ikusi bi kasuetan 0.2 Hz-tan agertzen den gailurra. Horrez gain, gogoratu zutik egonik Mayer-en uhinek duten eragina: 0.08 Hz inguruko gailurrean ikusten da, 7b irudian.

4.2.4 Sistema bortxatuaren erresonantzia

Beste bost neurketa egingo ditugu, maiztasun ezberdinetan arnastuz: minutuko 4, 5, 6, 8 eta 10 aldiz (10a, 10b, 10c, 10d eta 10e). Datu horiekin kasu bakoitzeko RSA -ren anplitudea kalkulatu dugu, ondoz ondoko maximo eta minimoen arteko distantziaren erdia hartuz. Sorta bakoitzeko balioen batezbestekoak maiztasunaren menpe irudikatuko ditugu azkenik, 9. irudian bezala. Arnasketa minutuko 5 aldiz (~ 0.08 Hz) gertatzen denean, **erresonantzia** dugu.

5 Erroreen tratamendua

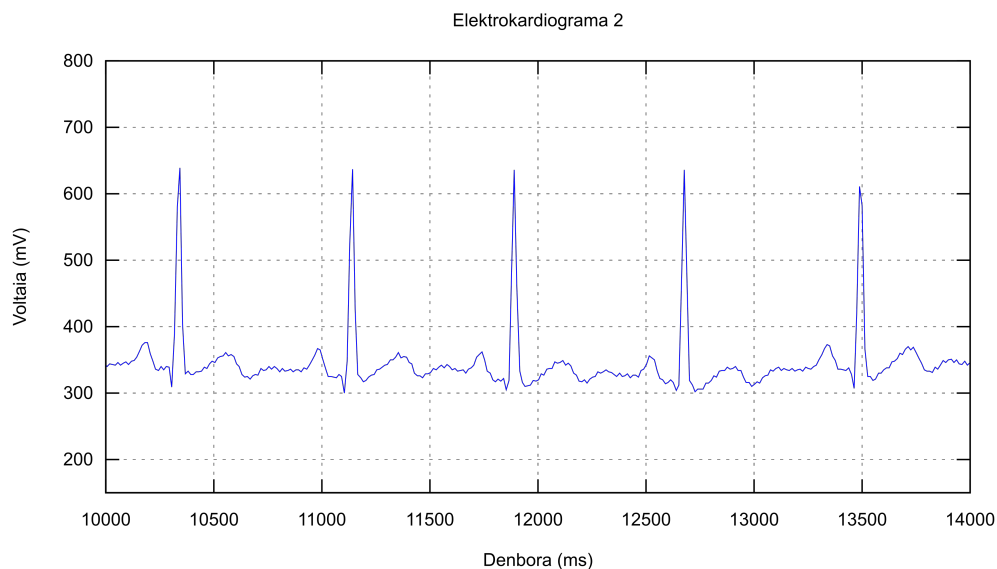
Saiakuntza honetan zenbakizko balioek baino, azterketa kualitatiboak du garrantzi handien. Hala ere, komenigarria da erroreei buruzko hausnarketa egitea.

Sentsorearen tresna erroreak $\Delta t = 10ms$ eta $\Delta V = 1mV$ dira. Hori dela eta, $\Delta RR = 20ms$ -koa izango da. Erritmo ezberdinetan arnastean ere, lor daitekeen zehaztasuna mugatuta dago, gu geu baikara hori ahal bezala kontrolatu behar dugunak.

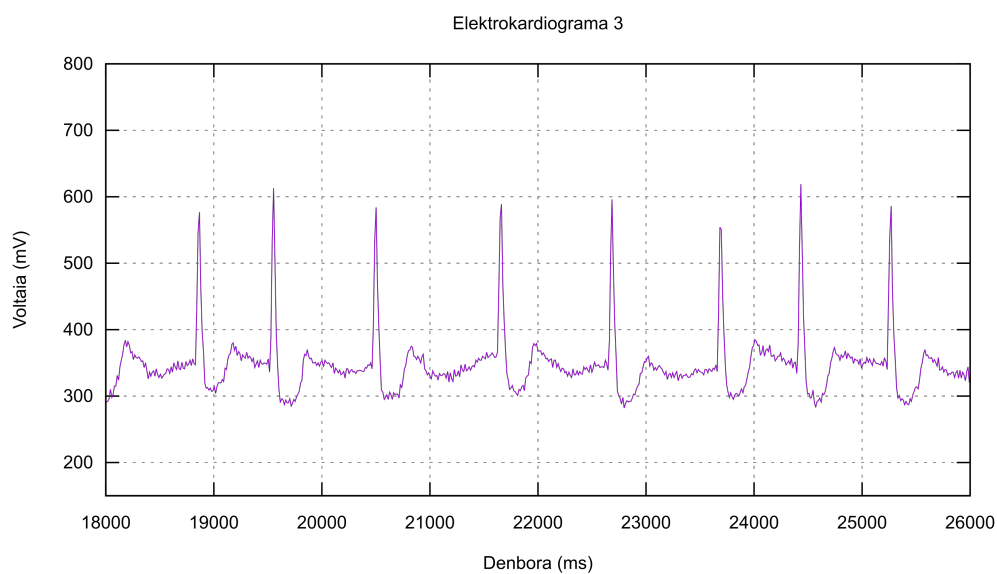
Aipatzekoa da aurreko guztiek Fourierren Transformatuan eragina izango dutela. Hala ere, guri kurba hauen joera bakarrik interesatzen zaigu, eta horregatik ez dugu errore hau sakonki aztertuko.

Bukatzeko, erresonantzia kalkulatu dugunean, RSA -ren anplitudearen hainbat balioen batezbestekoa egin dugu. Kalkulu horiek behar den moduan egitekotan, errore koadratikoa kontsideratu beharko da.

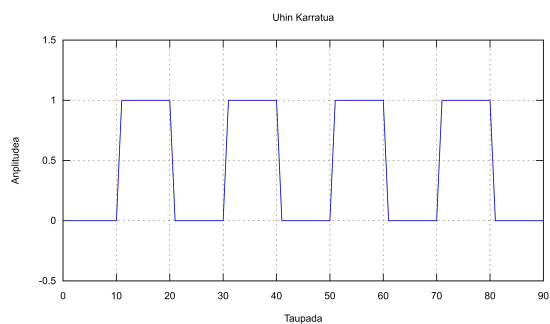
Eranskina: Irudiak



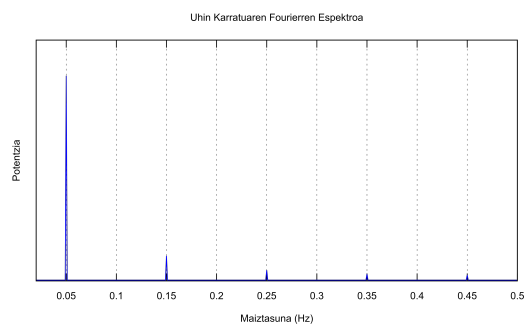
- 3. irudia:** Nire elektrokardiograma. Taupadak periodikoki gertatzen dira, erritmoa sinusala da. Uhin guztiak ongi bereizten dira.



- 4. irudia:** Nire amonaren elektrokardiograma. Taupadak irregularrak dira eta ez da P uhinik agertzen. Fibrilazio aurikular deituriko arritmiaren ezaugarriak dira hauek. Digoxinaren ondoriozko beheraldia agertzen da ST segmentuan.

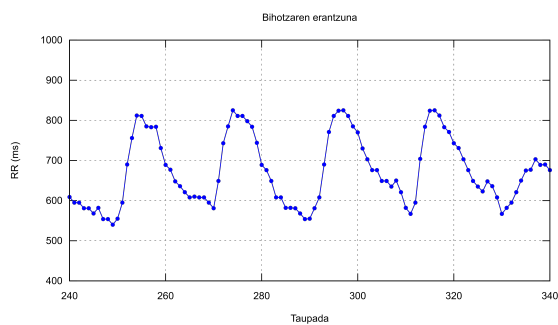


(a) Denboraren eremuan.

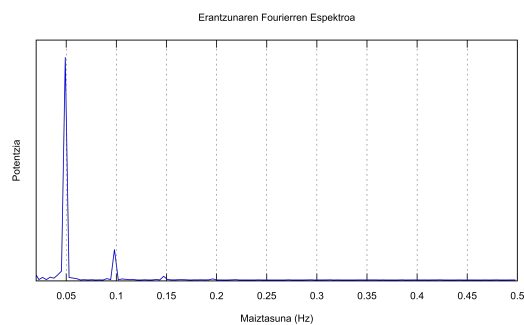


(b) Maiztasunen eremuan.

5. irudia: Aldizkako arnasketa: sarrerako *seinalea*.

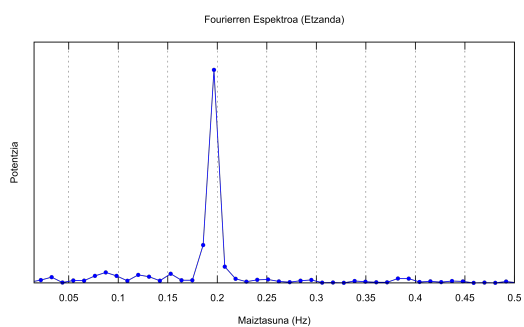


(a) Denboraren eremuan.

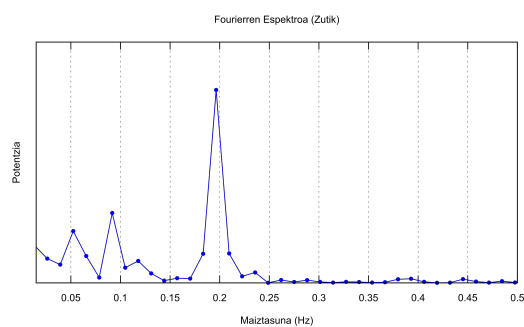


(b) Maiztasunen eremuan.

6. irudia: Aldizkako arnasketa: bihotzaren erantzuna.

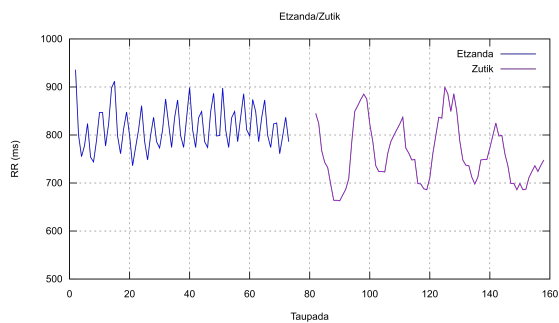


(a) Etzanda.

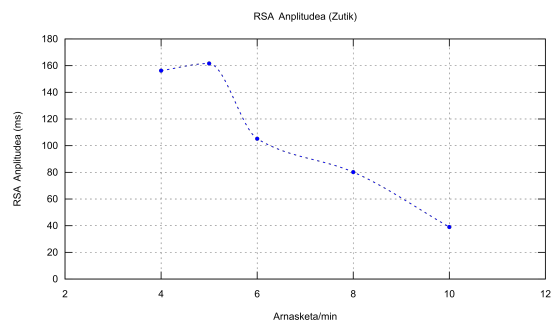


(b) Zutik.

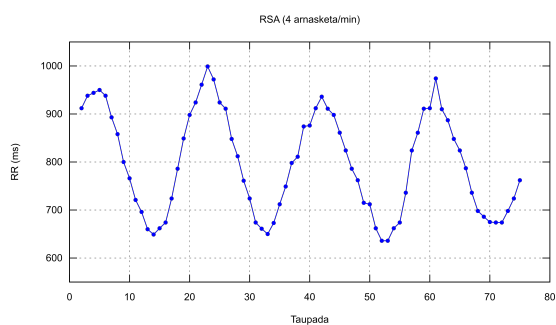
7. irudia: 0.2 Hz-ko arnasketa: bihotzaren erantzuna.



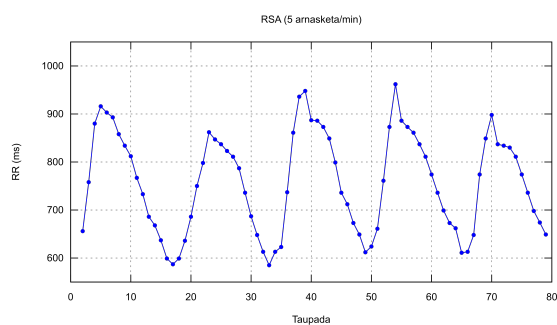
8. irudia: Etzanda/zutik.



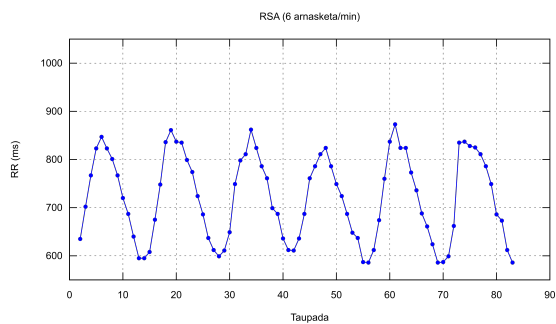
9. irudia: Erresonantzia.



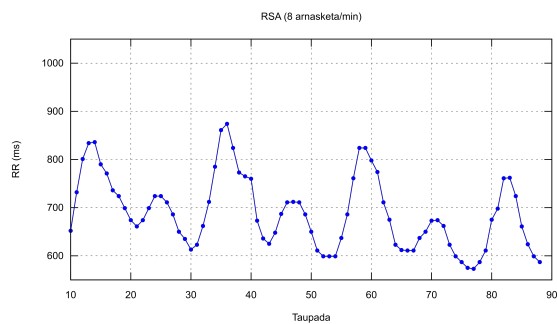
(a) 4 arnasketa/min.



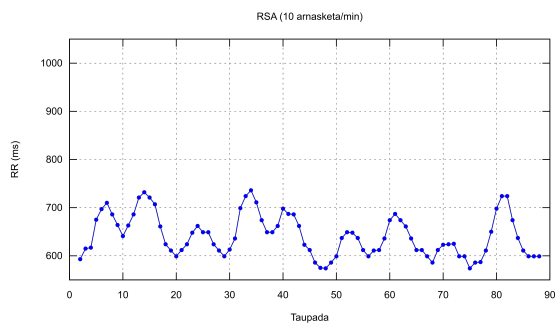
(b) 5 arnasketa/min.



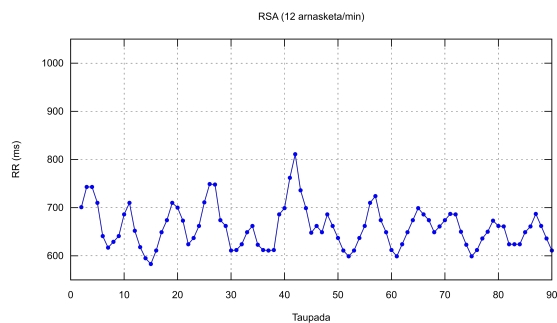
(c) 6 arnasketa/min.



(d) 8 arnasketa/min.



(e) 10 arnasketa/min.



(f) 12 arnasketa/min.

10. irudia: Arnas arritmia sinusala (RSA) hainbat maiztasunetan.

Erreferentziak

- [1] P. B. Siegel et al. “Putting your heart into physics”. In: *American Journal of Physics* 72 (2004). URL: <http://dx.doi.org/10.1119/1.1615567>.
- [2] C. Hirshfeld Crouch and J. W. Hirshfeld. “Teaching the electrical origins of the electrocardiogram: An introductory physics laboratory for life science students”. In: *American Journal of Physics* 88 (2020). URL: <https://doi.org/10.1119/10.0001039>.
- [3] Amazon.es. *ELEGOO UNO R3 Tarjeta Placa con Cable USB y Microcontrolador*. URL: https://www.amazon.es/dp/B01M7ZB2B4/ref=cm_sw_em_r_mt_dp_5M3ZX0Y0KWZGZ22DP2F1?_encoding=UTF8&psc=1. (kontsulta-data: 2022/04/20).
- [4] Amazon.es. *Módulo ECG ICQUANZX AD8232*. URL: https://www.amazon.es/dp/B088R8VZ74/ref=cm_sw_em_r_mt_dp_A7SG69P3YH28CFAX49E8?_encoding=UTF8&psc=1. (kontsulta-data: 2022/04/20).
- [5] A. Bayés de Luna. *Fundamentos de Electrocardiografía*. Editorial Científico-Médica, 1986.
- [6] How2electronics. *ECG Graph Monitoring with AD8232 ECG Sensor and Arduino*. URL: <https://how2electronics.com/ecg-monitoring-with-ad8232-ecg-sensor-arduino/>. (kontsulta-data: 2022/04/11).
- [7] B. Berasategui Migueliz. *TEIII-Elektrokardiograma*. 2022. URL: <https://github.com/BeBerasategi/TEIII-Elektrokardiograma>.
- [8] R. D. Jenkis and S. J. Gerred. *ECG en ejemplos*. 2nd ed. Elsevier, 2006.