

INDUSTRIA ELEKTRONIKAREN ETA AUTOMATIKAREN
INGENIARITZA GRADUA

GRADU AMAIERAKO LANA

***BALL & BEAM SISTEMA BATEN
KONTROLAGAILUAREN DISEINUA ETA
INPLEMENTAZIOA RASPBERRY PI BATEAN***

Ikaslea: Sesar, Gil, Markel

Zuzendaria: Casquero, Oyarzabal, Oskar

Ikasturtea: 2018-2019

Data: Bilbon, 2019ko otsailaren 2an

LABURPENA

Proiektu honetan, Ball & Beam sistema bat diseinatu eta eraiki da hutsetik abiatuta. Nahiz eta proiektuaren xede nagusia sistema honen diseinua eta kontrola gauzatzea izan den, Ingeniaritza Elektronika Industrial eta Automatiko graduan lortutako konpetentziei erabiliz, beste alor batzuetan sakondu nahi izan da.

Hiru dimentsiotako piezetatik hasita, seinale analogikoen eskuraketatik pasatuz, instrumentazio elektronikoaren seinalearen egokitzapenean, zirkuitu elektroniko digitalen erabileran, maila altuko lengoaiekin programazioan, erregulazio automatikoan eta automatismoen diseinuan lan egin da, azken urteotan ikasitakoari aplikazio zuzena eman nahi izan zaiolarik.

Memoria honetan, Ball & Beam sistemaren modelizazio matematikoa aurkituko da, bere TF-arekin eta planta errealekiko konparaketa batekin. Kontrolari erreparatuz, kontrolagailu bat diseinatu da sistema jarrai batentzako eta ondoren doitu egin da, erantzun denbora optimo batean egonkortu ahal izateko moduan, gainezarpen ahalik eta baxuena bilatuz eta errore txiki bat onartuz, irakurketa analogikoak emanda.

Gako-hitzak: Kontrola, Raspberry Pi, balantzina, Ball & Beam

RESUMEN

En este proyecto, se ha diseñado y fabricado un sistema Ball & Beam partiendo desde cero. Aunque el objetivo principal del proyecto sea el diseño y control del sistema anteriormente mencionado, se han intentado abarcar todas las especialidades, para poder así profundizar en todos los ámbitos que el grado de Ingeniería Técnica Industrial Electrónica y Automática nos ha proporcionado.

Comenzando por el diseño 3D de las piezas a prototipar, pasando por la adquisición de señales analógicas, la adaptación de señales con métodos de instrumentación electrónica, recurriendo a la electrónica digital, programando en lenguajes de alto nivel, aplicando los conceptos sobre regulación automática y automatismos, se han intentado aplicar los conocimientos adquiridos estos últimos años.

En esta memoria encontrará el desarrollo del modelo matemático del sistema Ball & Beam teórico, junto con su respectiva TF y contraste con la planta real. En lo que al control se refiere, se ha diseñado un controlador continuo con su posterior discretización, para conseguir estabilizar en un tiempo de respuesta óptimo y con el menor rebose posible, admitiendo un error mínimo dado por la lectura de la distancia analógica.

Palabras clave: Control, Raspberry Pi, balancín, Ball & Beam

ABSTRACT

For this project, a Ball & Beam system has been designed, assembled and produced from scratch. Although the aim of the project is to design and control previously mentioned system, it has tried to embrace as much specialities as can, in order to scope what the Industrial Technical Engineering in Electronics and Automatics degree has provided to the student.

Starting from the 3D design of the parts that have been printed, followed by the acquisition of analogic signals, signal adaptation using electronic instrumentation techniques, using digital electronics, programming in high level languages, using control, regulation and automatism concepts and trying to apply all the knowledge gotten these last years.

In this project you will find the development of the theoretical mathematical model of the Ball & Beam system, followed by its transfer function contrast with the actual real plant. Referring to the control made, a continuous controller has been designed, followed by his discrete version of it, in order to reach a optimal settling time with the minimum overshoot possible, accepting a minimal error due to the misread of the analogic distance.

Keywords: Control, Raspberry Pi, rocker, Ball & Beam

AURKIBIDEA

LABURPENA	i
RESUMEN	ii
ABSTRACT	iii
AURKIBIDEA.....	iv
IRUDIEN ZERRENDA	vi
TAULEN ZERRENDA.....	
AKRONIMOEN ZERRENDA.....	
A. SARRERA	1
B. TESTUINGURUA.....	3
C. HELBURUAK.....	4
D. ONURAK.....	5
E. BALDINTZEN DESKRIBAPENA	6
F. ALTERNATIBEN ANALISIA.....	7
- Flash ADC.....	9
- Sigma-Delta ADC	10
- Dual Slope ADC.....	10
- SAR ADC	11
G. PROPOSATUTAKO DISEINUA	14
1. RASPBERRY PI 3B+.....	14
2. MCP3008 ADC (Bihurgailu Analogiko Digitala).....	15
3. DISTANTZIA NEURTZEKO SHARP SENTSOREA (GP2Y0A21YK)	15
4. PWM-A ETA SERBOMOTOREA	20
5. SEINALE ANALOGIKOEN ESKURAKETAK	21
6. SEINALE ANALOGIKOEN BIHURKETA.....	23
7. KOMUNIKAZIO METODOAK ETA PROTOKOLOAK.....	24
8. KONTROLAGAILUAREN DISEINUA ETA IMPLEMENTAZIOA.....	26

8.1.	EREDUA.....	26
8.2.	ERAGINGAILUAREN MODELIZAZIOA.....	27
8.3.	SISTEMAREN MODELIZAZIOA.....	28
8.4.	KONTROLAGAILU JARRAITUAREN KALKULUA.....	29
8.5.	KONTROLAGAILUAREN DISKRETIZAZIOA.....	34
8.6.	LAGINKETA PERIODOAREN AUKERAKETA.....	37
8.7.	KONTROLAGAILUAREN INPLEMENTAZIOA.....	40
H.	PLANGINTZA.....	42
	PROIEKTUAREN DISEINUA.....	42
	ZEREGIN KRITIKOAK.....	47
	GANTT DIAGRAMA.....	48
	GANTT ZEREGIN KRITIKOAK.....	52
I.	ONDORIOAK.....	60
J.	BIBLIOGRAFIA.....	63
K.	ERANSKINAK I.....	I
1.	ESKEMA ELEKTRIKOA, KONEXIOAK ETA PCB-A.....	I
	ESKEMATIKOA.....	II
	FOOTPRINT PATH.....	III
2.	PROTOTIPATUTAKO 3 DIMENTSIOTAKO PIEZAK.....	IV
	ROCKER BASE.....	V
	ROCKER BASE END.....	VI
	ROCKER MOUNT 1/2.....	VII
	ROCKER MOUNT 2/2.....	VIII
	CIRCLE.....	IX
	ROCKER ROD.....	X
	ROCKER MOUNT END.....	XI
	ROCKER MOUNT LID.....	XII
3.	PLANTAREN MODELIZAZIO MATEMATIKOA.....	XIII
4.	PROGRAMAZIO KODEA PYTHON-EN.....	XXI

IRUDIEN ZERRENDA

Irudia 1 Ball&Beam maketa	1
Irudia 2 Zehaztasuna adierazten duen grafika. Erresoluzioaren eta laginketa denboraren arteko harremana.	8
Irudia 3 Lagin denbora adierazten duen grafika	8
Irudia 4 Bit erresoluzioa adierazten duen grafika	8
Irudia 5 Flash ADC bihurtailua	9
Irudia 6 ADC baten konparadorea.....	9
Irudia 7 Sigma-Delta ADC bihurtailuaren eskema.....	10
Irudia 8 Dual Slope ADC bihurtailua. Kondentsadorearen	10
Irudia 9 SAR ADC bihurtailuaren barne funtzionamendua.	11
Irudia 10 SAR ADC bihurtailu baten sarrera eta irteera-ren arteko erlazio adibidea.....	11
Irudia 11 ADC bihurtailu ezberdinek biltzen dituzten erresoluzio tartek.....	12
Irudia 12 Ball&Beam sistema. Alboko ikuspegia.....	14
Irudia 13 Raspberry Pi 3B+ aren goitiko bista	14
Irudia 14 Sharp sentsorearen irakurketa denbora. Datasheet-etik.....	15
Irudia 15 Sharp sentsorearen kurba karakterisitko hurbildua. Datasheet-etik.	16
Irudia 16 Distantzia ezberdinetarako jasotako tentsio dispertsio grafikoa.....	18
Irudia 17 Sentsorearen tentsioa eta distantzia erlazionatzen dituen dispertsioa. 5. mailako bi hurbilketa polinomiko biltzen ditu, urdinez distantzia luzeentzako eta laranja distantzia laburrentzako.....	18
Irudia 18 Hurbilketa lineala <i>Irudia 17</i> -k dituen ardatz erlazio berdinekin	19
Irudia 19 Hurbilketa esponentziala <i>Irudia 17</i> -k dituen ardatz erlazio berdinekin	19
Irudia 20 Hurbilketa logaritmikoa <i>Irudia 17</i> -k dituen ardatz erlazio berdinekin.	19
Irudia 21 2. Ordenako hurbilketa polinomikoa <i>Irudia 17</i> -k dituen ardatz erlazio berdinekin.....	19
Irudia 22 3. Ordenako hurbilketa polinomikoa <i>Irudia 17</i> -k dituen ardatz erlazio berdinekin.....	20
Irudia 23 4. Ordenako hurbilketa polinomikoa <i>Irudia 17</i> -k dituen ardatz erlazio berdinekin.....	20
Irudia 24 Serbomotrearen angelu posizioa periodo edo Duty Cycle ezberdinrentzako.....	20

Irudia 25	Sentsore baten irteera eta sarrera errepresentazioa	21
Irudia 26	SPI seriezko konexio adibidea	25
Irudia 27	Kontrol begizta sinplifikatua.	26
Irudia 28	<i>Duty Cycle</i> -a eta serbomotrearen angelua erlazionatzen duen dispertsio laginketa	27
Irudia 29	Planta identifikatzeko parametroen doiketa	28
Irudia 30	Plantaren erroen lekua begizta itxian	29
Irudia 31	Plantaren erantzuna begizta itxian eskaloi sarrera batekiko.....	30
Irudia 32	Kontrol begizta basikoa sistema jarraitua simulatzeko.	30
Irudia 33	pidTuner erremintarekin lortutako erantzuna.....	31
Irudia 34	Sarrera unitario batekiko erantzuna. Kontroladorearekin eta kontroladore gabe. BI-n	32
Irudia 35	Sistemaren erroen lekua kontrolagailuarekin. BI-n.....	32
Irudia 36	Lehenengo handipena (35.irudiarena)	33
Irudia 37	Kontrol begizta hibridoa. Sistema laburpena diskreturako	34
Irudia 38	Transferentzia funtzioaren Bode diagrama. Frekuentziaren analisisia	35
Irudia 39	Tustin edo hurbilketa trapezoidala simplifikazioa.....	36
Irudia 40	Sarrera unitario baten kontrolagailudun sistemaren erantzuna BI-an.	38
Irudia 41	Erroen lekua sistema diskretizaturako, kontrolagailuarekin. BI-an. Rlocus	38
Irudia 42	Lehenengo handipena (41.irudiarena)	39
Irudia 43	Errekurtso bakoitzak egindako lanaren konparaketa	46
Irudia 44	Errekurtso bakoitzaren kostua proiekturako, konparaketa	56
Irudia 45	Proiektua garatzen en heinean izango duen kostu pilatua	57
Irudia 46	Kontrol seinalea, iragaz gabe	60
Irudia 47	Sarrera unitario batekiko erantzuna, iragazkiarekin.....	60
Irudia 48	Kontrol seinalea, iragaztuta	60
Irudia 49	Simulink diagrama kontrolagailua bizkor inplementatzeko	61
Irudia 50	Eraikitako maketa	62
Irudia 51	Fabrikatu den PCB-a	I
Irudia 52	PCB-aren <i>board</i> ikuspegia	I
Irudia 53	Eskematikoa.....	II
Irudia 54	PCB-aren goiko bista. Fabrikaziorako	III
Irudia 55	PCB-aren Beheko bista. Fabrikaziorako prest.....	III
Irudia 56	Ball & Beam sistemaren simplifikazioa	IV
Irudia 57	Partikula baten mugimendu errotazionala.....	XIII

Irudia 58 Sistemaren angeluen izenak eta distantziak.....	XVIII
Irudia 59 Angeluen arteko erlazioa.....	XIX
Irudia 59 Fluxu diagrama	XXI

TAULEN ZERRENDA

Taula 1 Motor ezberdinen alternatiben analisia.....	7
Taula 2 Konparaketa baldintza.....	9
Taula 3 Laginketa abiadura eta prezioa ADC ezberdinentzako.....	12
Taula 4 ADC bihurtu ezberdinak alderatzen duen alternatiben analisisien taula.	13
Taula 5 Distantzia ezberdinetarako ADC-an jasotako irakurketa eta tentsioa..	17
Taula 6 DC -a eta angelu laginketa	28
Taula 7 Errekurtso/pertsona bakoitzak izango dituen lan orduak eta lan tarte periodoak	46
Taula 8 Zeregin kritikoak eta hauek betetzeko behar izango den denbora jasotzen duen taula. Errekurtsoak esleituta.....	47
Taula 9 Errekurtso bakoitzaren kostua. Euro-ordutan emanda.	56
Taula 10 Zeregin orokorren kostua.....	57
Taula 11 Material kostuen laburpena	58
Taula 12 Proiektuaren kostu totala.	58

AKRONIMOEN ZERRENDA

SE - Sistema Eragile

TF - Transferentzia Funtzioa

ADC - Analog Digital Converter

LSB - Less Significant Bit

MSB - Most significant Bit

REF - Reference

V - Voltage

IN - Sarrera

OUT - Irteera

DC - Duty Cycle

PWM - Pulse Wide Modulation

T_s - Sampling time

t_s - Ezarpen denbora

M_p - Gainezarpena

ITC - Information Transfer capacity

N - Number of bit

CS - Conversion Speed

Ksps - Kilo (/Mega) samples per second

KZ - Korrante zuzeneko

SAR - Successive Approximation Register

S/H - Sample and hold

MOSI - Master Output Slave Input

MISO - Master Input Slave Output

SS - Slave Select

CS - Chip select

CE - Chip Enable

SCK - serial clock

EK - Ekuazio Karakteristikoa

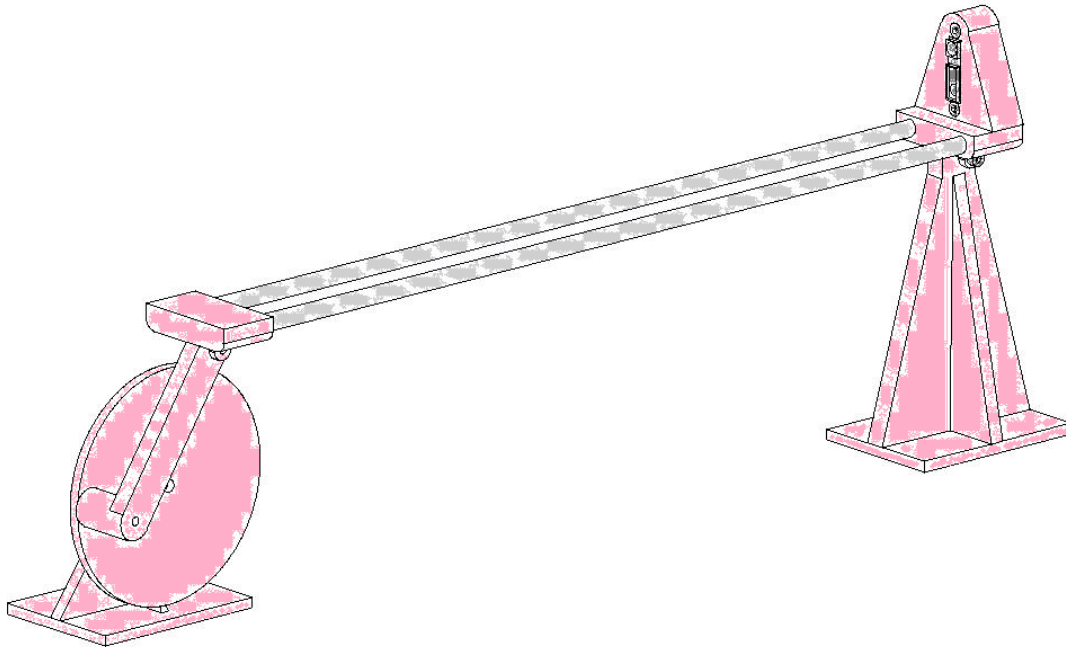
CLK - Erloju ertz

PCB - Printed Circuit Board

BI - Begizta Itxia

A.SARRERA

Ball and Beam sistema oso tresna zabaldua eta erabilgarria da, bai kontrol klasikoak zein kontrol aurreratuagoak garatzeko aukerak eskaintzen dituelako. Ez-linealtasunez betetako sistema honek ezaugarri paregabeak ditu egoera desorekatuak aztertzeko. Erronka bat da kontrol sistemetan hasiberrientzako planta fisiko honen modelo matematikoa ateratzea eta transferentzia funtzioa lortzea. Horrez gain, sistema txertatu batean implementatzeko gai izatearekin batera, sistemaren kontrol diskretizatua lortzeak erronka bat suposatzen du.



Irudia 1 Ball&Beam maketa

Lehen begiratuan sistema nahiko sinplea dirudi. Pilota bat habe baten gainean datza. Kontrolaren zailtasuna dago, pilotaren posizioa etengabe aldatuz doala habearen angeluaren arabera, eta edozein zentzutuan jauzi daitekeela grabitatearengatik. Beraz, kontrolaren funtsa, pilota, bezeroak aurre-erabakitako posizio kontsigna batera eramatean datza, habea alde batera edo bestera okertuz. Mugimendua motore bat erabiliz egingo da eta pilotaren posizioa sensore analogiko baten bidez lortuko da.

Memoria honetan, aurretik aipaturiko lan guztia egingo da, Ball and Beam sistema kontrolatzeko metodo ezberdinak aztertuz, eta Tustin eta Euler-ren hurbilketak erabiliz lortzen diren sistemaren erantzunaren ezberdintasunak aztertuz. Horretaz aparte, kontrolagailuak SE baten menpe ibiliko duenez, kontrolaren gain izango duen eragina aztertu, eta alde txarrak eta alde onak atzemango dira.

Idea honen motibazioa, azken boladan modan jarri izan diren Segway-ak edota Hoverboard-ak izan dira. Egunero gero eta normalagoa da honelako aparatuekin kaletik topo egitea, eta edonork izan du horrelako batetara igotzeko grina. Nahiz eta begi bistan Ball & Beam sistemak pendulu inbertitu batekin zerikusirik ez izan, Segway bat diseinatzeko aurrerapauso gisa har daiteke. Gainera, bi kasuetan bilatzen den sistemaren erantzuna antzekoa izanez, eta Ball & Beam garatzeko erosotasuna dela eta, azken hau egitea erabaki egin da.

B. TESTUINGURUA

Raspberry Pi-aren erabiltzaileak egunero gehiago eta gehiago dira. Zer da hain arrakastatsu bihurtu duena? Eskaintzen dituen malgutasuna eta moldakortasuna dira bere arrakastaren jabe. Raspberry-aren abantailen artean ondorengoak daude: makina bat programazio lengoia erabil daitezke, irteera eta sarrera interfaze asko dituen plaka merkea da, eta hainbat proiektu egiteko erabili daiteke, dibertimenduzko jokoetatik hasiz, segurtasun adimenezko kamera batetik pasatuz eta etxe domotika adimentsua diseinatzeko aukera eskainiz. Baina, azken finean, informatika eta elektronika ikasteko ordenagailu txikia besterik ez da.

Arduino ere oso ezaguna izanik, Ball & Beam sistema asko plataforma honekin garatuta daude, aproposena baita, alegia. Arduino, Raspberry-rekin alderaratu, denbora errealeko sistema bat da, inguruko eremuari erantzuten diona denbora determinista batean. Raspberryak, ordea, denbora errealekoa ez den Raspbian SE- darabil.

C. HELBURUAK

Proiektu honen helburu nagusia Ball & Beam sistema baten kontrola Raspberry Pi 3B+ batean egitea da. Honen harira, sistema eragile (SE) baten gainean dabilen programak zertan eragiten dion sistemaren funtzionamenduari aztertu behar da. Hori lortzeko hainbat azpi-helburu finkatu behar dira, eginkizuna hainbat pausutan egiten baita:

- Ball & Beam maketa bat sortu.
- Sentsore analogikoaren harrapaketa egin.
- Digitalizazio optimoa lortu.
- Serbomotorraren angelua kontrolatu.
- Plantaren eredu matematikoa burutu.
- Sistema jarraiaren Transferentzi Funtzioa (TF-a) lortu.
- Sistema jarraiaren diskretizazioa egin.
- Kontroladore jarraia diseinatu.
- Kontroladore diskretua diseinatzeko teknikak jarraitu.
- Laginketa periodoa aukeratu.
- Modelo teorikoa modelo errearekin alderatu.
- Kontroladorearen doiketa egin.
- PID balio hoberenak atera.
- Denbora errearen influentzia aztertu.
- Ondorio zentzudun batekin eman.

Memoria honetan ez dira kontuan hartuko bidetik izandako arazoak. Aldiz, jarraitu beharreko bidea azalduko da.

D.ONURAK

Proiektu honen gauzatzeak dakartzan onura nabarmenenak, egileak irabazitako jakituria eta esperientzia dira. Gainera, ingeniartzaren hainbat arlo eta gai jorratu direnez, gradu amaierako ikaslearen "Know-how"-a zabaldu da. Beste onuren artean, kontrol sistema konplexuak aztertu baino lehen aurre-egindako lana gisa har daiteke, funtsezko kontzeptu garrantzitsuak ondo finkatzeko balio duena.

Egindako lana, "Open Source" filosofia jarraitzen duenez, edozein erabiltzailek eraldatu edo optimizatu dezake egindako diseinua. Horrela, gizartearen hobekuntza eta garapena edonoren esku utziz, mundu guztiak gozatu dezakeen teknologiaz baliotzen da, eta pertsona bakoitzak hartutako konpromisoaren bidez, gizarte hobe batera heltzeko aurrerapauso bat lortzen da.

Memoria honen irakurleentzat, Ball & Beam sistema bat eraiki nahi izatekotan laguntza-gida bezala har daiteke, ikerketa lana asko murriztuz eta arazo teknikoak saihestuz. Gainera, bai eskolarako zein unibertsitaterako maketa berdina edo antzekoa fabrikatu nahi izatekotan, eskuragarri izango du interneten kodea zein 3D piezak. Horrela, etorkizunerako ikasle berrientzat tresna didaktikoa uzten da haien esku, horrek dakartzan onura guztiekin.

E. BALDINTZEN DESKRIBAPENA

Baldintzen deskribapenari dagokionez, proiektuaren betebeharrak eta norainokoak azaltzen dira. Proiektua, baldintza hauen arabera garatuko da.

- Sistema oreka estatikoan adierazterakoan eta motorra baldintza normaletan (0°) edo hasierako posizioan egonda, habeak biratzen duen ardatzaren inguruan eta bielaren ardatzik altuena, lurretik distantzia berdinerara egon behar dira.
- Habearen euste ardatz batetik bestera 460 mm egongo dira.
- Motorraren biraketa angelua $+90^\circ$ eta -90° tartean izatea besterik ez da behar, horiek izango baitira habearen inklinazio handiena eta txikiena, batik bat.
- Sistemak ez duenez aplikazio espezifikorik, eredu gisa eta kontrolagailua garatu ahal izateko, hurrengo xehetasunak aukeratu dira:
 - Habearen luzera mugatua denez, ezin da onartu gainezarpen oso handirik, beraz, sistemaren gainezarpena %8-a izatea bilatuko da
 - Erantzun denbora zehazteko ezarpen denbora (t_s) 2,5s-tan ezarri da.
- Kontrolagailua Raspberry Pi batean garatuko da, Python programazio lengoaian.
- Distantzia neurtzeko sentsoarea Sharp sentsoare analogikoa izango da, GP2Y0A21YK bat, hain zuzen ere.
- Bihurgailuak erresoluzio nahikoa izan behar du datuak era egokian irakurtzeko.

F. ALTERNATIBEN ANALISIA

Proiektua garatzerakoan makina bat bide ezberdin jarrai daitezke helburu berdinerara heltzeko. Horregatik atal honetan, erabili daitezkeen osagai ezberdinak, metodoak edo sistemak aukeratzeko jarraitutako prozedurak aitortuko dira.

Batzuetan, norbanako eskuetan ez dagoen arrazoiengatik aukera konkretu bat egin behar da. Beste askotan, arrazoi ekonomikoengatik aukeratuko ez liratekeen zer edo zer onartu behar da, unibertsitateak erabilgarri duen diruaren eta ekipoen ahalmenarekin bat zuzenean erlazionaturik dagoena.

Lehenik eta behin esan beharra dago, mikrokontrolagailuaren alternatiben analisia ez dela egin, proiektuaren helburuetariko bat Raspberry Pi erabiltzea delako. Ordea, hurrengo gailuen analisia egin da eta kasu bakoitzean proiektuan eragin gehien dituzten ezaugarriak aztertu dira.

Hagatxo mugiarazteko ondorengo motor motak baloratu dira (*Taula 1*):

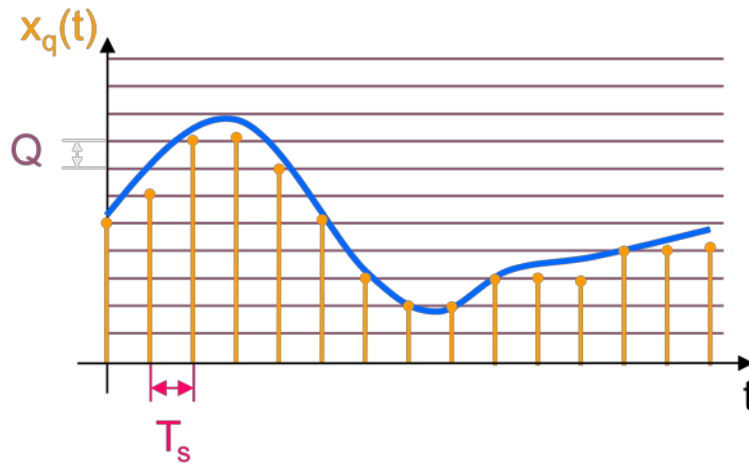
Taula 1 Motor ezberdinen alternatiben analisia

	Motor Mota	Prezioa	Bizkortasuna	Zehaztasuna	Kontrol Zailtasuna	Torquea	Guztira
Serbomotorea	Tower Pro SG90	9	4	8	7	6	6,8
Pausoz-pausoko Motorra	Nema 17	3	6	9	4	10	6,4
KZ motorra	Sourcingmap	4	7	3	6	6	5,2
Brushless motorra	DXW A2212	6	9	4	1	3	4,6

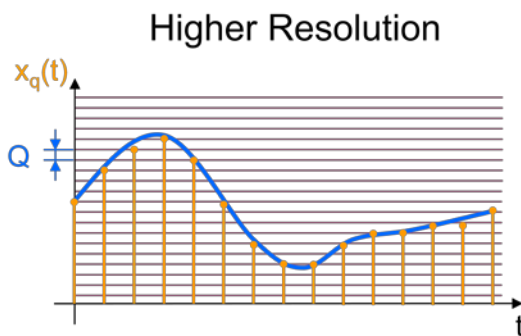
Serbomotorea kontrolik errazena izateaz gain, nahi den aplikaziorako aproposena dela eman du aurreko analisiak. Gainera, bere prezioa merkeena izanik eta mugi beharreko sistema oso arina ez denez aproposa egiten du erabiliko den aplikaziorako.

ADC-aren aukeraketa egiteko, seinale bat analogikotik digitalera eraldatzeko dauden metodo ezberdinak jarraitzen dituzten bihurtgailuak aintzat hartu dira. Honek, baldintzen deskribapenean zehaztutakoarekin bat egon behar du.

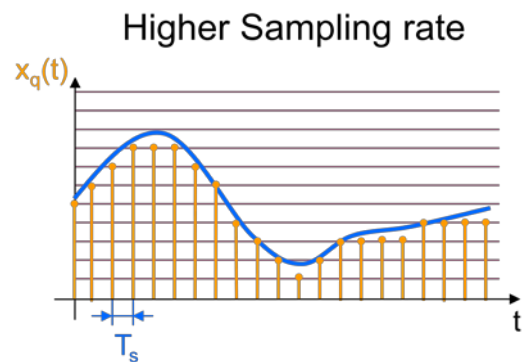
ADC-en ezaugarri garrantzitsuen zehaztasuna da. Zehaztasuna bi eratan eman daiteke, lagin denbora eta erresoluzio gisa. Bien artean konplimentatzen dira, ez dira elkar baztertzen. Lagin denbora ona izateak ez du kentzen erresoluzio onik ez izateak. Bien arteko erlazio bat ezartzen da eta bi propietate hauek era esanguratsuan izateak ADC hobea egiten du. Hobeto ulertzeko, hurrengo irudiak ikuskatzea eskatzen da (*Irudia 2-4*).



Irudia 2 Zehaztasuna adierazten duen grafika. Erresoluzioaren eta laginketa denboraren arteko harremana.



Irudia 4 Bit erresoluzioa adierazten duen grafika

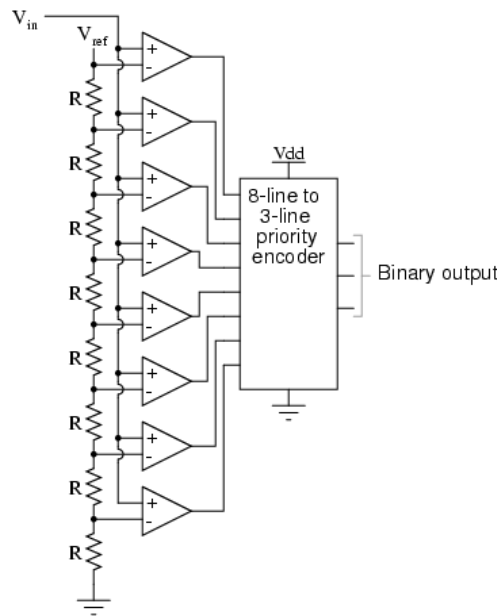


Irudia 3 Lagin denbora adierazten duen grafika

Seinale analogikoak digitalizatzeko hainbat metodo eta forma existitzen dira. Hemen aipatuko dira erabilienetarikoa:

- Flash ADC

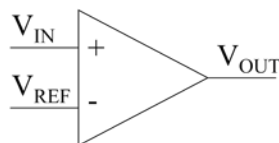
Bizkorrenetarikoa dira, horregatik hartu du "Flash" izenordez. Konparadore (*Irudia 6*) serie bat arduratzen da digitalizatzear. Funtzionamendua oso sinplea da, sarrera analogikoa konparadore bakoitzak duen erreferentziako tentsio batekin alderatzen da (*Irudia 5*), eta horren arabera irteera altua edo baxua ematen du (*Taula 2*), seinale analogikoa digitalizatuz.



Irudia 5 Flash ADC bihurtzailua

Taula 2 Konparaketa baldintza

Baldin eta...	Irteera
$V_{ANALOGIKOA} > V_{REF}$	Altua
$V_{ANALOGIKOA} < V_{REF}$	Baxua



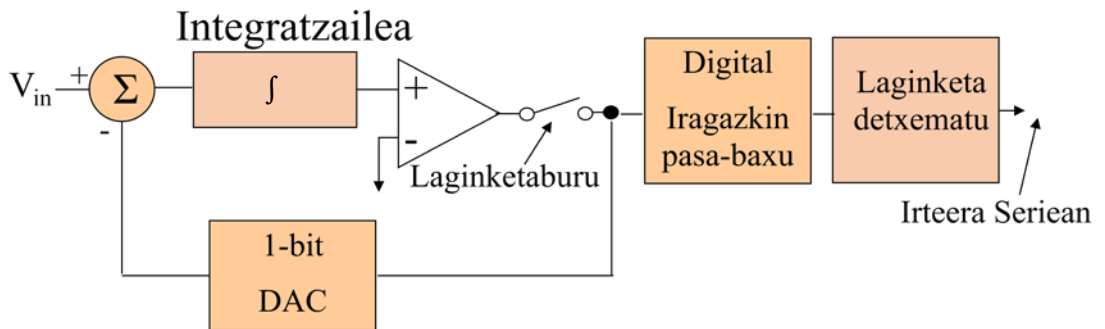
Irudia 6 ADC baten konparadorea

Bere alde ona oso bizkorra dela da, baina alde txarrak ere baditu. Pila bat konparadore behar dira. Adibide gisa, 8 biteko ADC bat egin nahi izan

ezkero, 255 konparadore behar dira. Erresoluzio txikiagoa dute, nahiko garestiak dira eta kontsumo altuak dakartzate.

- Sigma-Delta ADC

Seinale analogikoa integratzailean sartzen da eta honen irteera lur erreferentzia seinalearekin konparatzen da. Iteratzen jarraitzen du irteera serie erantzun bat emanaz. Irteeraren "1" kopurua sarrera tentsioaren proportzionala da.

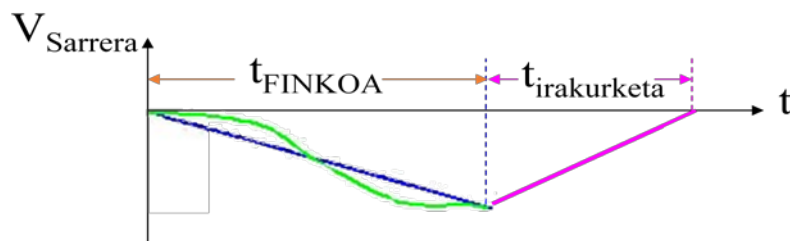


Irudia 7 Sigma-Delta ADC bihurgailuaren eskema

ADC mota honekin erresoluzio altuko bihurketa lortzen da kanpoko osagaien beharrik gabe. Ordea, ez da perfektua eta atsekabe gisa nahiko motela da bere gain laginketarengatik.

- Dual Slope ADC

Lagindutako seinaleak kondentsadore bat kargatzen du denbora finko batez. Denborarekiko integratzen da. Zarata bihurketatik ere integratzen da. Ondoren, bihurgailuak kondentsadorea deskargatzen du abiadura espezifikoko batean, kontagailu bat deskarga horrek zenbat irauten duen zenbatzen doan heinean. Deskarga denbora luzeagoak kontaketa handiagoa suposatzen du.

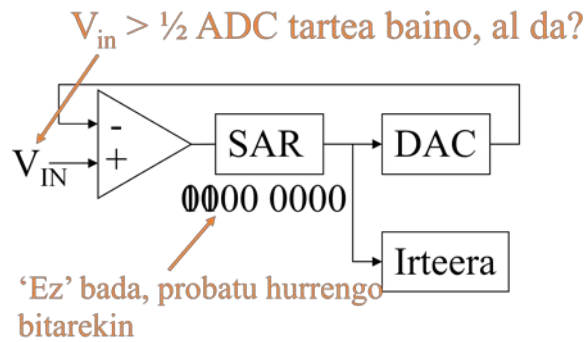


Irudia 8 Dual Slope ADC bihurgailua. Kondentsadorearen

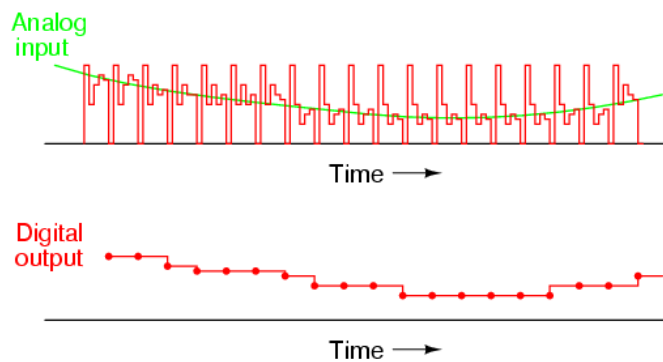
Metodo motela da gero, eta kanpoko osagai espezifikoak eta zehatzak behar dira. Sarrera seinalaren batz bestekoa egiten da. Immunitate handiagoa du zaratarekiko. Doitasun handia du.

- SAR ADC

MSB setatu egiten da. MSB analogikora bihurtzen da DAC baten bidez. Konparaketa egiten da sumatutako balioarekin eta sarrerako balio berriarekin. Hurrengo bita probatzen da.



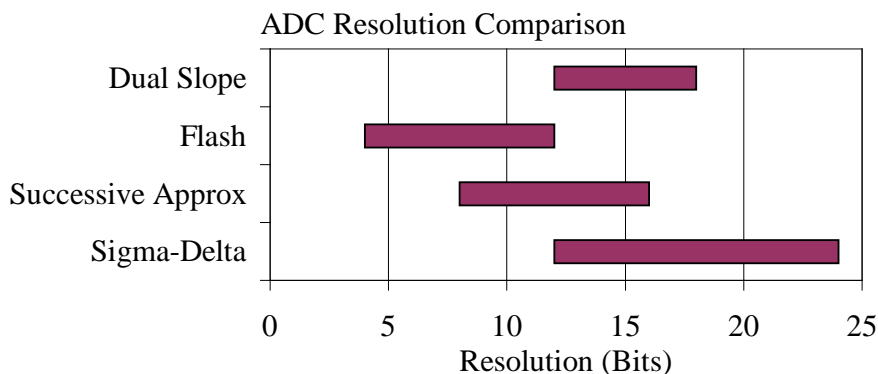
Irudia 9 SAR ADC bihurgailuaren barne funtzionamendua.



Irudia 10 SAR ADC bihurgailu baten sarrera eta irteera-ren arteko erlazio adibidea.

Oso abiadura bizkorretan funtzionatzeko gai da. Erresoluzio zenbat eta handiagoa izan orduan eta astiroago izango da bihurketa. Abiadura mugapen bat du, 5Mpsps-koa. Doiketa nahiko ona du beste bihurgailuekin konparatuz. Abiadura-prezio erlazio itzela.

Ondoren, aurretik aurre aurkeztutako ADC mota ezberdinak elkarren artean alderatuko dira, laburpen moduan, begirada batean argi gera dadin zeintzuk diren erresoluzio (*Irudia 11*), abiadura eta prezio handienak dituztenak (*Taula 3*) eta zeintzuk txikienak.



Irudia 11 ADC bihurtailu ezberdinek biltzen dituzten erresoluzio tartekak

Taula 3 Laginketa abiadura eta prezioa ADC ezberdinentzako

Type	Speed (relative)	Cost (relative)
Dual Slope	Motela	Bitartekoa
Flash	Oso Bizkorra	Altua
Successive Appox	Normala – Bizkorra	Baxua
Sigma-Delta	Motela	Baxua

Aukeraketa egiterakoan hauxe da baloratuko dena: Bihurketa egiteko bizkortasuna, zehaztasuna edo erresoluzioa, Raspberry-arekin konektatzeko malgutasuna (SPI, I2C, UART, paraleloan), informazio transferentzia kapazitatea edo ITC ($ITC = 2^N CS$ emanda).

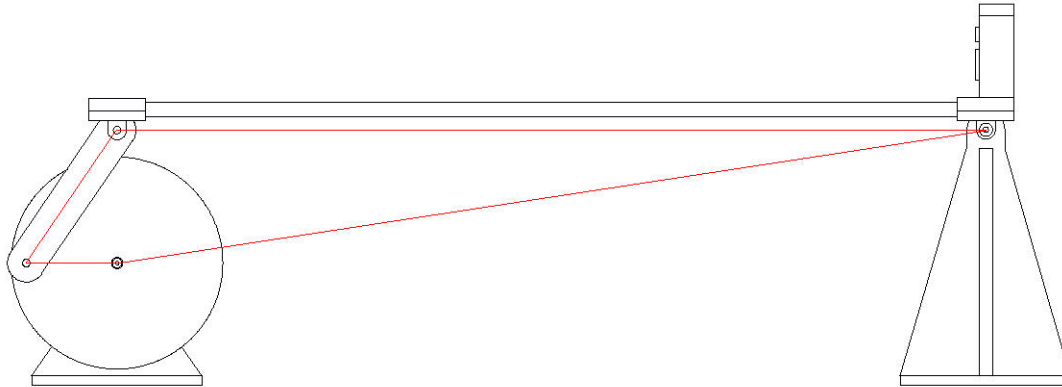
Adibidez TLC0820AC-rentzako (5€), 400ksps eta 8 bit duena, bere ITC = $0,1024 \cdot 10^8$ da.

Taula 4 ADC bihurtailu ezberdinak alderazten duen alternatiben analisisen taula.

	ADC Mota	Prezioa	Bizkortasuna	(Bit) Zehaztasuna	Raspberry -arentzako Malgutasuna	ITC	Guztira
Dual Slope	TC7109/A	5	5	10	4	6	6
SAR (Successive Approximation Register)	MCP3008	8	10	8	8	7	<u>8,2</u>
Flash or parallel	TLC0820AC	7	7	7	3	6	6

Azkenean MCP3008-a aukeratu egin da, errendimendu prezio erlazioa paregabearengatik. Nahiz eta bere familia bereko MCP3004-a baino 4 kanal gehiago izan, askoz ere zabalduago dago eta dagoeneko liburutegiak aurki daitezke interneten. TLC0820AC -arekin paraleloan seinale digitalak Raspberry-ra bidali daitezke baina ia-ia sarrera irteera guztiak beteko lirakeke.

G. PROPOSATUTAKO DISEINUA



Aurreko bista
Eskala: 1:2

Irudia 12 Ball&Beam sistema. Alboko ikuspegia

1. RASPBERRY PI 3B+

Kontrol legea eraikitzeko erabiliko den sistema digitala Raspberry Pi 3B+ bat izango da (*Irudia 13*). Bere ezaugarrien artean bere Broadcom BCM2837B0 SoC bat da 1.4GHz ko abiadurarekin eta 64 biteko 4 nukleoko ARM Cortex-A53 prozesadoreaz baliatuta, 512KB-teko caché memoriarekin. Bertan, GNU/Linux-en Raspbian deituriko SE bat ibiliko da, irekia eta doakoa dena. Txartel hau, ordenagailu pantaila batera konektatzeko HDMI irteera, audio portua, Ethernet konexioa, haririk gabeko WiFi konexioa, 4 USB portu (sagua eta teklatuarentzako, adibidez), pantaila eta kamera batentzako CSI portua, eta erabilera orokorrerako irteera/sarrera (GPIO, General Purpose Inputs and Outputs) digitalaz osatuta dago. Komunikazioen artean, SPI, I2C eta UART aurkitu ditzakegu. Elikadura micro Usb baten bidez egingo da.



Irudia 13 Raspberry Pi 3B+ aren goitiko bista

2. MCP3008 ADC (Bihurgailu Analogiko Digitala)

Raspberry Pi 3B+ -ak ez duenez ez irteera ez sarrera analogikorik, eta seinale analogikoak irakutzeko asmoa dagoenez, seinale analogiko horiek digitalizatzeko bihurgailu bat erabiliko da. Alternatibean analisisan aukeratutako ADC-a 10 bit duen MCP3008-a da. Integratu honen berezitasun nagusia da, 8 kanaleko eskuraketa egin dezakeela eta SPI bidez informazioa bidali. Gainera, modu diferentzian irakurketak egiteko aukera ematen du.

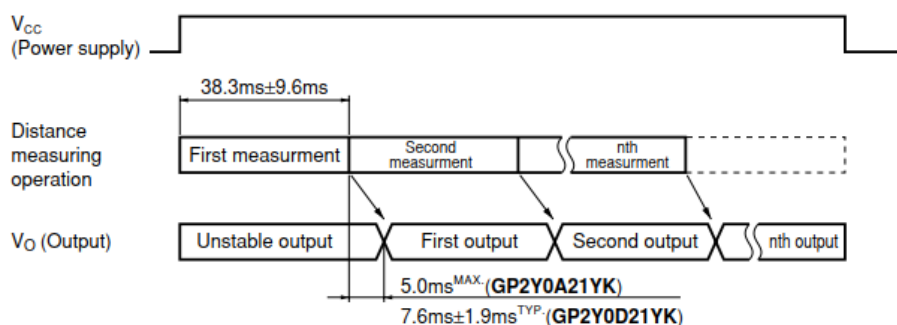
$$LSB_{tamaina} = \frac{V_{REF}}{2^n - 1} \quad (G.1)$$

3. DISTANTZIA NEURTZEKO SHARP SENTSOREA (GP2Y0A21YK)

Ball & Beam sistemak pilota baten kontrola egin behar duenez, pilotaren posizioa jakin behar du. Erabili daitezkeen metodo ezberdinen artean, argi izpi sentsoarea, irudi ikuskapena, ultra-uhinak, etab., argi izpi infragorrien bidez distantzia neurtzen duen sentsoarea aukeratu da. Elikadura iturria (V_{cc}), 0.3v-etatik 7v-etara egin daiteke, eta bere irteera (V_o), sarrerako tentsioaren $\pm 0.3v$ -ekoa izango da (Formula G.2).

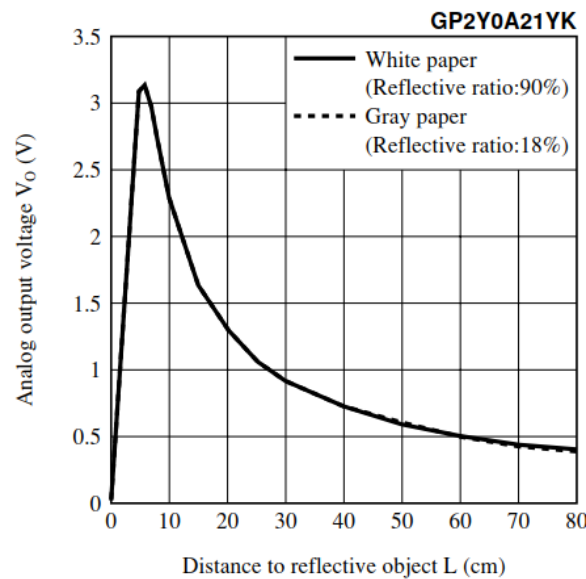
$$V_o = V_{cc} (\pm 0,3v) \quad (G.2)$$

Neurketa distantzia 10-80 zentimetroko tartean dago, eta irakurketa egoki batetik hurrengora beharko duen denbora maximoa 52,9 ms-koa izango da, ADC-ak konbertsioa egiteko behar duen denbora hartu gabe. Beraz, PID-aren laginketa aldia ezartzerako orduan, sentsoreak 60ms inguruko irakurketa denbora duela kontuan hartu beharko da, hots: $T_s \geq 60ms$



Irudia 14 Sharp sentsoarearen irakurketa denbora. Datasheet-etik.

Sentsoreak objektu argiak askoz ere hobeto detektatzen ditu objektu ilunak baino. Izan ere, paper txuri bat detektatzeko islapen indizea %90-ekoa da, ordea %18-koa da paper gris batekin. Hurrengo irudian ikusi daitekeen bezala, distantzia eta tentsioa erlazonaturik daude. Gainera, 7 cm inguru baino distantzia txikiagoak irakurtzen badira, arazoak egongo dira jakiteko kurba karakteristikoaren zein aldetan irakurtzen ari den.



Irudia 15 Sharp sentsorearen kurba karakterisitko hurbildua. Datasheet-etik.

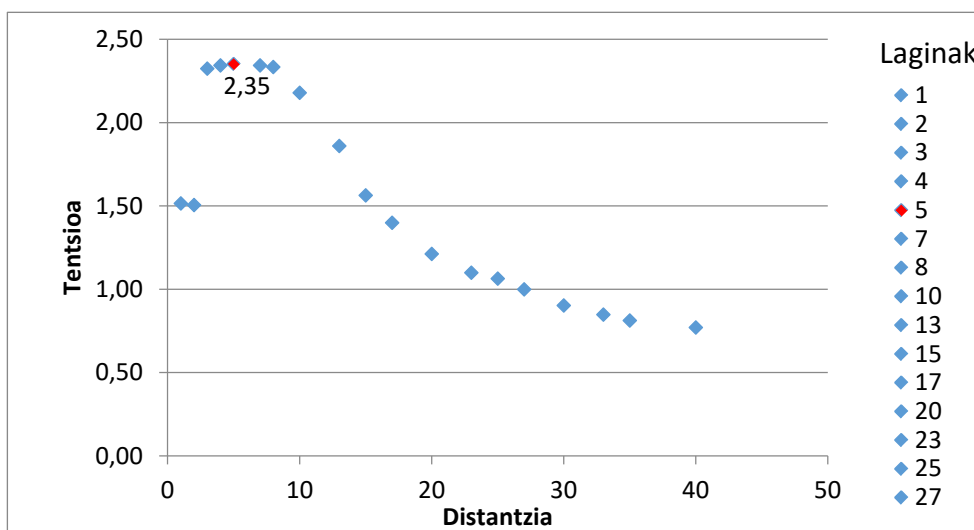
Sentsore analogikoaren kurba karakteristiko ateratzeko, aztertutako hurbilketa ezberdinen balioak erakusten dira. Konstantzia utzi nahi da, argi dagoela polinomikoa dela hurbilketarik optimoena.

Sentsore analogikoaren kalibraketa kurba egiteko, objektu zuzen, zabal eta finko bat ipini da distantzia zehatz batera. Ondoren, eranskinetan dauden konexio elektriko guztiak gauzatu daudenean, aurretik aipaturiko ADC-ak emandako 0-1023 tarteko balioak irakurri egin dira Raspberry-arekin, 10 lagin ateraz eta horien batz bestekoa eginez. Jarraian, sentsorearen aurrean ipini den objektua zentimetro batzuk mugitu da eta prozesua errepikatu da zenbait iterazio.

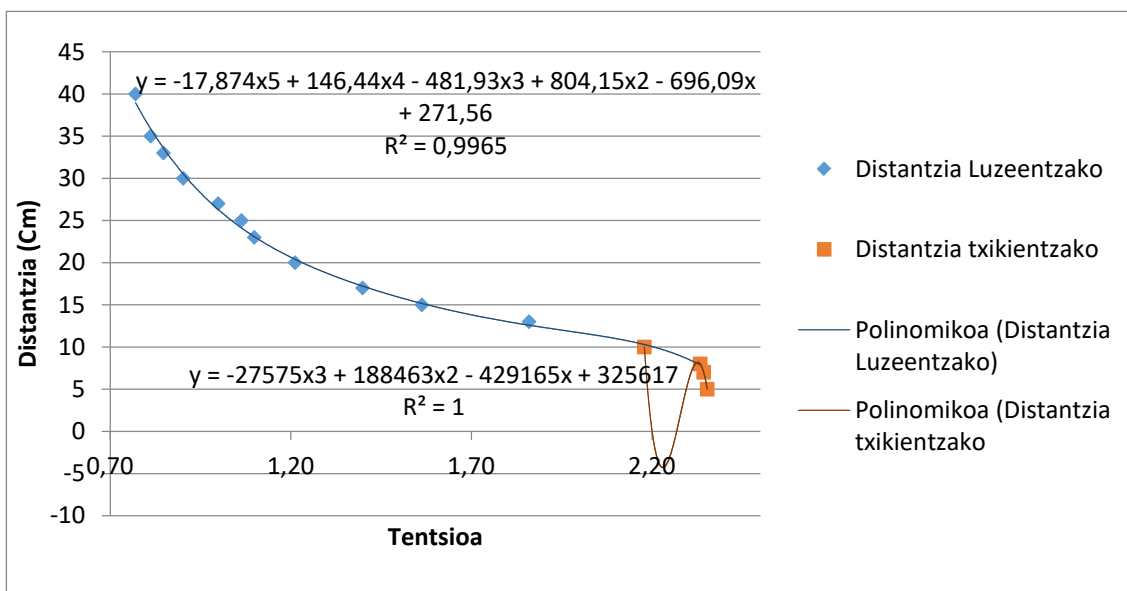
Taula 5 Distantzia ezberdinetarako ADC-an jasotako irakurketa eta tentsioa.

Distantzia (cm)	ADC-aren Irakurketa	tentsioa (V)
1	470	1,51
2	467	1,50
3	721	2,32
4	727	2,34
5	730	2,35
7	727	2,34
8	724	2,33
10	676	2,18
13	577	1,86
15	485	1,56
17	434	1,40
20	376	1,21
23	341	1,10
25	330	1,06
27	310	1,00
30	280	0,90
33	263	0,85
35	252	0,81
40	239	0,77

Amaieran lortutako emaitzekin *Taula 5* bete egin da, eta Excel programak eskaintzen dituen hurbilketei esker, 5.graduko hurbilketa polinomikoa egin da, ekuazio karakteristikoa lortuz *Irudia 17*. *Irudia 16* aztertzean ikus daiteke nola 7 zentimetrotara egindako 2.35v-ko irakurketa baino txikiagoko distantziak ez direla kontuan hartuko, zentzugabeko emaitzak lortuko lirerateke. Hala eta guztiz ere, distantzia txikiak neurtzerakoan, neurtutako balioa oso urrun dago distantzia errealitatearekin. Hori gertatzen da, ekuazio karakteristikoa (EK) ez delako puntu horretan gehiegi gerturatzen. Beraz, bi EK egin dira, bata distantzia luzeentzako *Formula G.3*, eta beste bat laburrentzako *Formula G.4*.



Irudia 16 Distantzia ezberdinetarako jasotako tentsio dispersio grafikoa.



Irudia 17 Sentsorearen tentsioa eta distantzia erlazionatzen dituen dispersioa. 5. mailako bi hurbilketa polinomiko biltzen ditu, urdinez distantzia luzeentzako eta laranja distantzia laburrentzako.

Distantzia luzeentzako EK:

$$\begin{aligned}
 y &= -17,874x^5 + 146,44x^4 - 481,93x^3 + 804,15x^2 - 696,09x + 271,56 & (G.3) \\
 R^2 &= 0,9965
 \end{aligned}$$

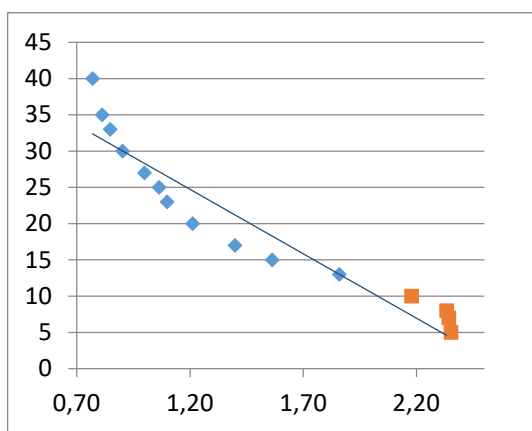
Distantzia laburrentzako EK:

$$\begin{aligned}
 y &= -27575x^3 + 188463x^2 - 429165x + 325617 & (G.4) \\
 R^2 &= 1
 \end{aligned}$$

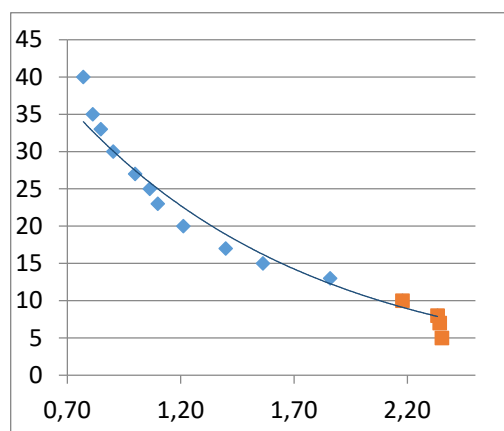
Programak 10 zentimetro baino distantzia luzeagoak detektatzen dituenean (edo 2,18v baino txikiagoko tentsioak), distantzia luzeentzako EK erabiliko du bere distantzia kalkulatzeko. Distantzia laburrentzako EK erabiliko du, 2,18v baino seinale handiagoa bada.

Hementxe uzten dira aztertutako beste hurbilketa mota ezberdinak:

Esponentziala

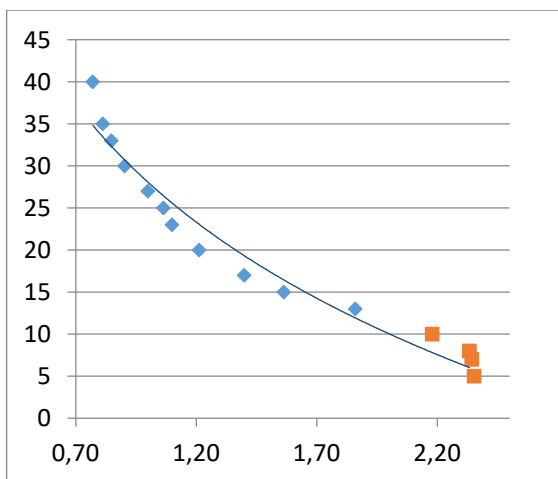


Irudia 18 Hurbilketa lineala *Irudia 17-k* dituen ardatz erlazio berdinekin



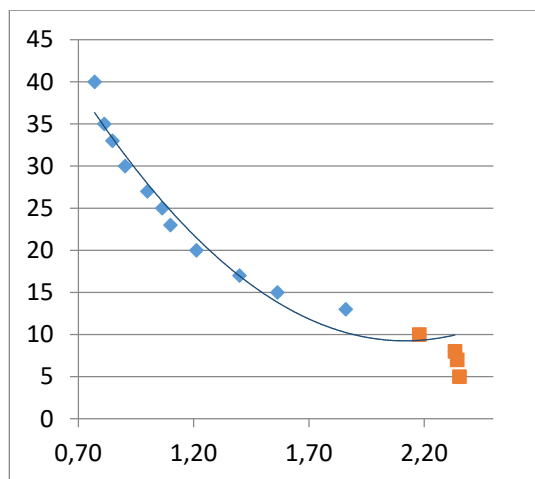
Irudia 19 Hurbilketa esponentziala *Irudia 17-k* dituen ardatz erlazio berdinekin

Logaritmikoa



Irudia 20 Hurbilketa logaritmikoa *Irudia 17-k* dituen ardatz erlazio berdinekin.

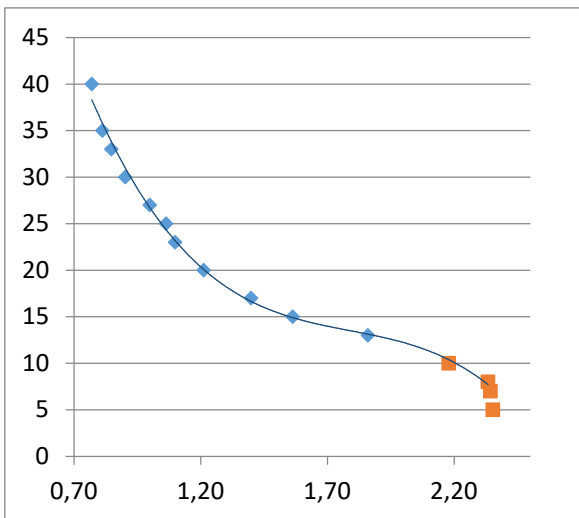
2. Ordenako Polinomikoa



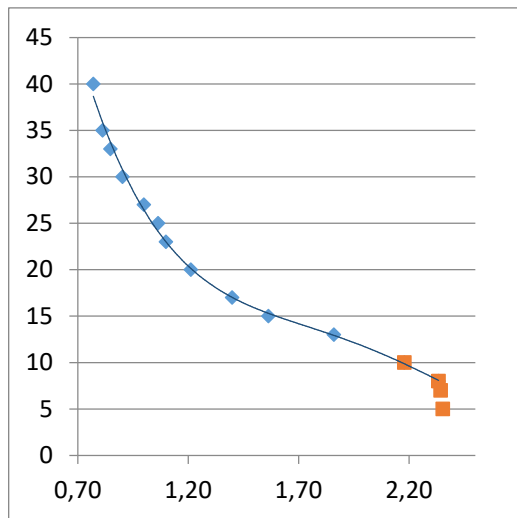
Irudia 21 2. Ordenako hurbilketa polinomikoa *Irudia 17-k* dituen ardatz erlazio berdinekin.

3. Ordenako Polinomikoa

4. Ordenako Polinomikoa



Irudia 22.3. Ordenako hurbilketa polinomikoa
Irudia 17-k dituen ardatz erlazio berdinekin.

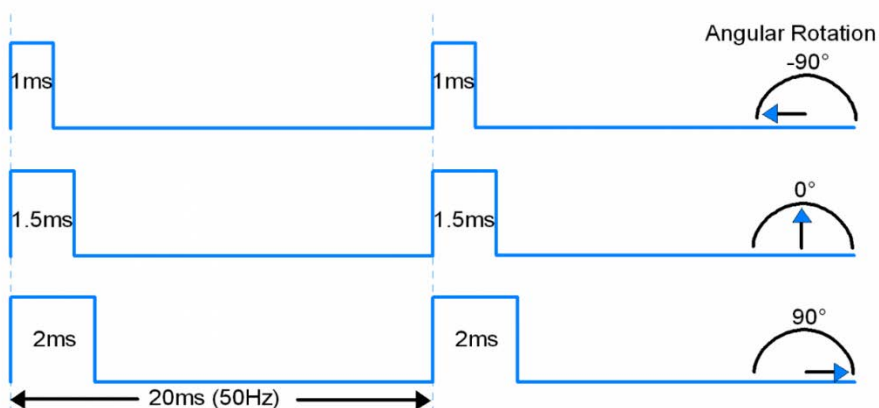


Irudia 23.4. Ordenako hurbilketa polinomikoa
Irudia 17-k dituen ardatz erlazio berdinekin.

4. PWM-A ETA SERBOMOTOREA

Serbomotore bat, -90° -etatik $+90^\circ$ -etara bira dezakeen motor bat da. Erabiltzaileak aurre-adierazitako posizio batera abiatuko da agindua eman bezain laster. Serbomotoreari posizioa adierazteko PWM seinale bat erabiltzen da. PWM-aren DC-a eta serbomotoreak hartuko duen posizioa erlaziozaturik daude.

Hurrengo irudian ikusi daitekeen bezala, PWM seinaleak 50Hz-etan funtzionatzen du, 1 milisegundoz balio altuan egonda, eta falta diren 19 milisegundo balio logiko baxuan egonda, serbomotorea bere posizio minimora joango da, hau da -90° -tara. Ordea, 2 milisegundoz altuan eta 18 milisegundoz baxuan badago, $+90^\circ$ -ko posizioa hartuko du. *Irudia 24*-an ikusten den bezala.



Irudia 24 Serbomotorearen angelu posizioa periodo edo Duty Cycle ezberdinetzako

5. SEINALE ANALOGIKOEN ESKURAKETAK

Seinale analogikoak eskuratzerakoan, hainbat alderdi hartu behar dira kontuan. Suposatuz sentsore jakin batek X aldagai bat neurtu eta Y erantzuna ematen duela (*Irudia 25*), sistema hau estatikoki karakterizatzeko modu bat bilatu behar da. Honi, kalibraketa kurba (*static transfer function*) deritzo, eta sarreraren aldagaiaren balioak, irteeraren aldagaiaren balioekin erlazionatzen du.



Irudia 25 Sentsore baten irteera eta sarrera errepresentazioa.

Erabili den sentsore analogikoaren informazio orrian, hurbilketa edo erreferentziatzeko kalibraketa kurba aurki daiteke (*Irudia 15*). Hurbilketa kurba hori eta sentsoreak errealitatean izango duen kurba (*Irudia 17*) ez da berdina izango. EK-a *Formula G.3* eta *Formula G.4*-k definituko dute.

Era berean, kurba karakteristikoa definitzen duen parametroen artean, irismena (*range*) eta tartea (*span*) aurki daitezke. Sistemaren sarrerarentzako onartutako balio bitarteari irismena deitzen zaio. "S" irismenaren muturren arteko diferentziari, ordea, tartea izango da.

$$S = X_{maximoa} - X_{minimoa} \quad (G.5)$$

Bi kontzeptu hauek ez nahasteko, termometro baten adibidea ipini da, non 34°C eta 42°C tarteko tenperaturak neurtzen dituen. Kasu honetan irismena ez da 0°C -tan hasten eta tartea 7°C -koa da.

Honi guztiari beste zenbait kontzeptu batzen zaizkio, errorea, zehaztasuna, doitasuna, errepikakortasuna, zona-hila, sentiberatasuna, histeresia eta linealtasuna besteak beste. Bere errore absolutua, sentsoreak praktikan ematen duen irakurketaren eta balore idealaren arteko diferentzia da. Doitasunaz hitz egiten denean, hartutako balio bereko lagin askoren errepikakortasunaz eta erreproduktzioaz hitz egiten da. Sarrera balio batentzat, irteera balio oso antzekoak izaten direnean sistema zehatza dela onartzen da. Hau guztiz egia izateko, irteerako balioa egiazkoa izan behar dela gehitu behar zaio.

Erabiliko den sentsoreak 10-80 zentimetroko irismena du eta neurketa tartea 70 zentimetro dira (*Formula G.5*). Sentsoreak distantzia finko bat irakurtzen duenean duen errepikakortasuna nahiko txarra da, horregatik, jasotako balioen batzaz bestekoa egingo da, zehaztasun falta hori hobetzeko asmoz.

Seinale analogikoak asko kaltetzen dituzten ezaugarri nagusia zarata da. Normalean bi motatako zarata aurki daitezke, barrutikoa eta kanpotikoa. Barne zarata, dispositibo elektronikoen berez sortzen duten desoreka da, agitazio termikoarengatik sortutakoa adibidez. Kanpo zarata, ordea, beste sistemek eragindako interferentzietatik du jatorria. Adibidez, sare elektrikoaren interferentziak edo motorrek sortutako dardarak. Horregatik garrantzitsua da erabiliko den sentsorea erreferentziazko lurrera ondo konektatuta egotea eta ADC bihurgailutik hurbil. Software bitartezko konpentsazioa egitea kontsideratuko da. Adibidez: leiho irristakorreko batzaz bestekoak, *low pass filter*, etab.

6. SEINALE ANALOGIKOEN BIHURKETA

Seinale analogiko batek edozein balio har dezake bere irismenaren barnean dagoen balio bat den bitartean. Hauxe garatuz, edozein bi balioen artean beti egongo da tarteko beste balore bat. Inplizituki esaten ari da, seinale analogiko batek erresoluzio infinitua duela (hala ez baldin bada ere). Mundu errealean, balio analogikoak ere finituak dira.

Aldiz, balio digital batek, bere irismenaren balore zehatz finitu bat adieraz dezake, eta balio analogikoekin alderatuz, ezinezkoa da beti bitarteko bi balioen arteko balore bat aurkitzea. Beraz, bere bereizmena finitua da.

ADC-ak mundu analogikoa eta mundu digitalaren arteko zubia eraikitzen du. Horregatik beharrezkoa da mundu erreala horren irudi digital ahalik eta zehatzena ateratzea. Hemendik aurrera, mikrokontrolagailua, PWM, kontrol legeak, etab. mundu digitalaren partaide izango dira.

ADC-ak eskuraketa egiterakoan bi eratan lan egin dezakete. Modu diferentzialean, edo lurrarekiko erreferentziatua. Era diferentzialean, zarata eragin gutxiago izaten du jasotako seinalean. Egia esan, alde bietatik jasotzen denez zarata, elkar baliogabetzen dira, seinale jatorria bakarrik utziz.

Erabiliko den ADC-a 10 bit ditu, baina bere bereizmena guztia aprobetxatzeko, elikatze tentsioa eta V_{REF} , eskuratuko den seinalearen tentsio maximoarekin bat egin behar du. *Irudia 15* berriro erreparatzen bada, atzeman daiteke harrapatu nahi den seinalearen tentsiorik altuena 3,3v ingurukoa dela. Beraz, MCP3008-aren V_{REF} sarrera eta elikadura 3,3v-etara konektatuko da. *Formula G.1* -ren bidez aztertu daiteke, nola ADC-ak detektatuko duen balio unitate bakarra zein tentsio baloreari egiten dion erreferentzia. Bihurgailutik irakurritako balioa erlazio horrekin zuzenean biderkatuz, posizioarekin erlazioatutako tentsioa atera daiteke.

$$\frac{3,3v}{2^{10} - 1} = 0,003226 v/pauso \quad (G.6)$$

Bihurgailuen beste ezaugarri oso garrantzitsua bihurketa denbora da, T_c . ADC-ak bihurketa agindua jasotzen duenetik, balio erabilgarri bat jasotzen den arte igarotako denbora bezala definitzen da. Bihurketa azkar bat bilatzen da beti, izan ere, bihurketa denbora, laginketa maiztasun maximoa definitzen du. Laginketa periodoa, bihurketa denbora baino handiagoa izan behar du beti.

$$f_s \leq \frac{1}{T_c} \quad (G.7)$$

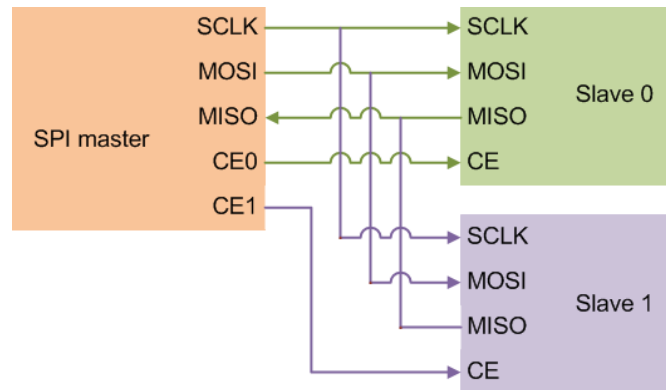
7. KOMUNIKAZIO METODOAK ETA PROTOKOLOAK

Irteerei dagokienez, seriean edo paraleloan egon daitezke. Komunikazio paraleloak askoz ere bizkorragoak dira, bere balio digitala zuzenean bidaltzen delako. Baina bere desabantailak ere baditu, bit bakoitzeko pin bat behar baita, mikrokontrolagailua txikiegia denean pin-ak faltan egon daitezkelarik. Arazoarentzako alternatiba serieko komunikazioa da. Seinale gutxi batzuei esker, I2C edo SPI komunikazio protokoloak erabiliz, informazioa berdin hel daiteke mikrokontrolagailura, protokoloak informazioa bidaltzeko hartzen duen denboraren atzerapena kontuan hartuz.

Proiektu honen garapenerako SPI komunikazio protokoloa erabiliko da. *Full-duplex* den komunikazio hau, maisu-morroiei motakoa da. RaspBerry-a maisu bezala jokatu du eta morroiei aginduak bidaliko dizkie, kasu honetarako MCP3008-a morroiei gisa lan egingo du. Maisuak erabiliko dituen 4 harilen bidez komunikazioa hasi behar du beti.

- *MOSI*: Maisuaren irteera, morroien sarrera.
- *MISO*: Maisuaren sarrera, morroien irteera.
- *SCK*: Erloju seinalea, maisuak sortutakoa bere menpean dituen morroiak sinkronizatzeko.
- \overline{SS} , \overline{CS} edo \overline{CE} : Morroia aukeratzeko seinalea. Morroi bakoitzak izango du bere seinale independentea, eta balio logiko baxua jasotzerakoan txipa aktibatuko da. Morroia aukeratzekoan *daisy chain* deituriko lehenetsun metodo bat ere existitzen da, \overline{SS} seinale bakar bat erabiliz, hainbat morroi kontrolatzea lortu dezakeena.

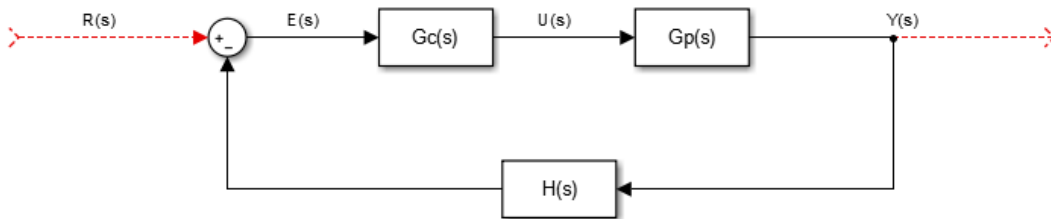
Erloju seinale bat duen heinean, komunikazio sinkrono bat dela kontsideratuko da. Serie protokoloen artean abiadura handiak jasan dezakeen protokolo bat da, baita hari gehien erabiltzen duenatarikoa ere.



Irudia 26 SPI seriezko konexio adibidea

8. KONTROLAGAILUAREN DISEINUA ETA IMPLEMENTAZIOA

Kontrolagailuaren PID diseinua Matlab/Simulink tresnaren bidez egingo da. Jarraitu beharreko lehenengo pausua, begizta kontrolaren parte diren sistemen eredua egitea da. Sistemaren dinamika kontuan izanda eta jarraitu nahi den kontrol estrategia argi edukiz, kontrol begizta egin da, eta kontrolagailu jarraitua diseinatu da baldintzen deskribapenean aipaturiko egonkortasun eta erantzun irizpideak jarraituz. Ondoren, kontrolagailua diskretizatu egin da. Bere egokitasuna egiaztatu ostean, diferentziazko ekuazioa kalkulatu egin da RaspberryPi-an inplementatzeko. Behin frogatua, planta teoriko eta planta errealaren arteko diferentziak direla eta, K_p , K_i , K_d aldagaiak ajustatu dira eta eginbeharreko doiketak aplikatu dira.



Irudia 27 Kontrol begizta sinplifikatua.

$G_c(s)$ - kontrolagailua

$G_p(s)$ - Planta

$H(s)$ - Berrelikadura sentsoarea

8.1. EREDUA

Sistemaren dinamika irudikatzen duen modelizazioa garatuko da. Horrez gain, eragingailuen modelizazioa ere egingo da. Horretarako bi metodo ezberdin jarraituko dira. Kaxa zuriko modelizazioa eta kaxa beltzeko modelizazioa. Ondoren azaltzen da zertan datza mota bakoitza:

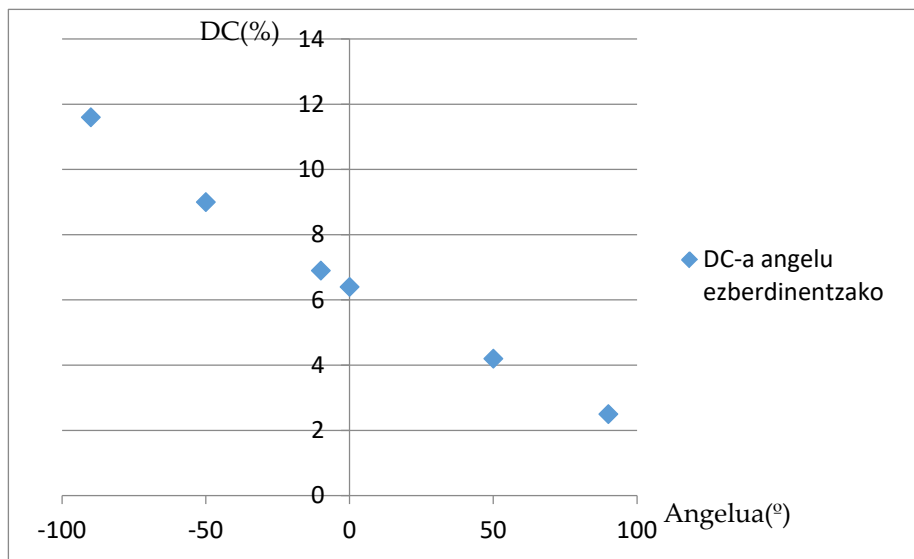
- Kaxa beltzeko modelaketa: modelizazio mota honetan, ezezaguna izaten da sistemaren barne dinamika. Horrenbestez, hauxe jakiteko metodo bakarra, sarrera irteeren arteko erlazioen bidez egiten da.

- Kaxa zuriko modelaketa: Kasu honetarako, sistemaren barne jokaeran eragiten dituzten lege fisikoak ezagunak izaten dira eta ekuazio diferentzialen bidez adieraz daitezke, adibidez.

Sistemaren planta, kaxa zuriko modelizazioaren bidez egingo da. Eragingailuarena ordea, kaxa beltzaren bidez egingo da.

8.2. ERAGINGAILUAREN MODELIZAZIOA

Erdi bideko elementuaren dinamika ezezaguna denez (serbomotorea), honek definitzen duen modelo bat bilatu nahi da, kaxa beltzaren metodoa erabiliz. Horretarako, *Irudia 28*-an ikusi daitekeen bezala, DC-a eta serbomotorearen irteera angelua erlazionatuko dira.



Irudia 28 Duty Cycle-a eta serbomotorearen angelua erlazionatzen duen dispersio laginketa

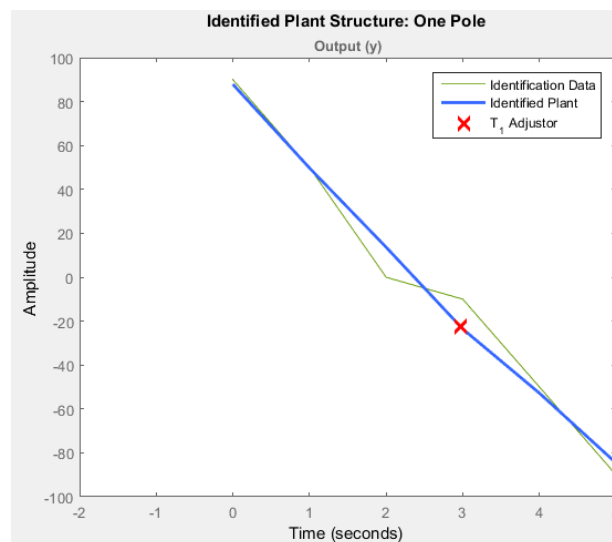
Matlab-ek eskaintzen duen planta identifikatzeko erremintarekin, PID Tuner barnean aurki daitekena (*Irudia 29*), planta berriaren TF lortu da (*Formula G.8*). *Identify new plant* botoian sakatuz eta *arbitrary input output*-en *Taula 6*-an agertzen diren balioak gehitzen eta parametroak aldatuz egin da.

$$G_{eragingailu}(s) = \frac{-18.24}{(0.0295s + 1)} \quad (G.8)$$

Irteera eta sarrera erlazionatzeko beste metodo bat, *Irudia 28*-an agertzen den grafikoaren ekuazio karakteristikoa ateratzea da. Programazio bidez gehitu daiteke oso erraz. Hori da beraz, egingo dena.

Taula 6 DC -a eta angelu laginketa

Serbomotorearen Angelua (°)	DC (%)
90	2,5
50	4,2
0	6,4
-10	6,9
-50	9
-90	11,6



Irudia 29 Planta identifikatzeko parametroen doiketa

8.3. SISTEMAREN MODELIZAZIOA

Eragingailuarekin ez-bezala, balantza sistemaren modelizazioa ekuazio fisikoetatik aterako da. Hau da, kutxa zuriaren metodoa erabiliz lortuko da.

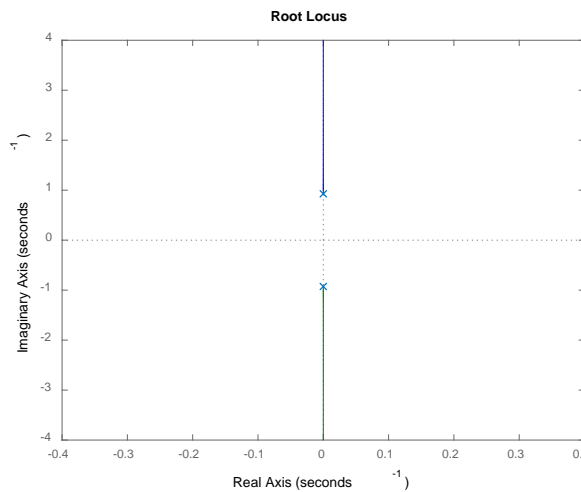
Sistema berez ez dago orekan. Oreka lortzeko beharrezkoa da serbomotorea 0º-tan egotea, bestela habean dagoen pilota, leku batera edo bestera joango da. Motorra gurpil batetara lotuta dagoenez berearekin egingo du bira, eta biraketa mugimendua biela hagatxo baten bidez habe nagusira bideratuko da, oinarri nagusiarekiko mugimendu birakaria sortuz.

Aztertzen ari den sistemak gehien bat mugimendu birakariak dituen, dinamikaren errotazio legeak dira hauek zuzenduko dituztenak. Eranskinetan aurki daiteke zein da plantaren TF eta bertara heltzeko jarraitutako pausuak Horregatik, honen inguruan informazio gehiago bilatu nahi ezker *K.3.PLANTAREN MODELIZAZIO MATEMATIKOA* abiatzea gomendatzen da.

8.4. KONTROLAGAILU JARRAITUAREN KALKULUA

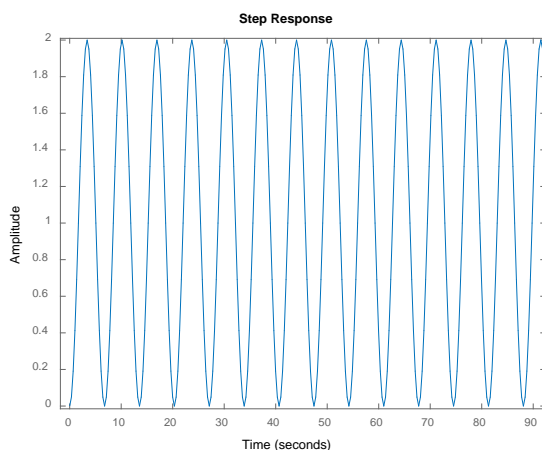
Planta fisikoa behin modelizatua eta eragingailuaren EK-a izanda, egin beharreko hurrengo pausua PID kontrolagailuaren ekuazioa lortzea da. Pausu hau garrantzi handiko betebeharra da sistemaren kontrolagailuaren jokaera zehaztuko baitu. Honi guztiari sentsorearen irabazi unitarioa gehitu egin zaio begiztari.

Lehenik eta behin sistemaren egonkortasuna aztertuko da, horretarako erroen lekua bilatu da begizta itxian.



Irudia 30 Plantaren erroen lekua begizta itxian

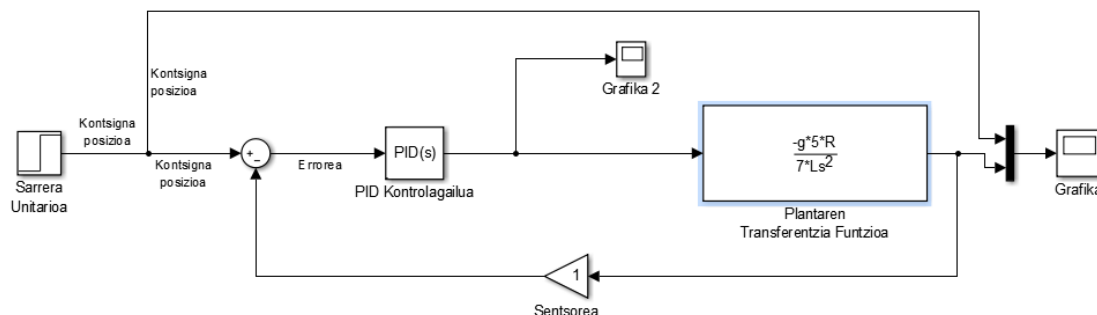
Irudia 30-n aztertu daitekeenez, sistema kritikoki egonkorra da bere poloetariko bik ardatz irudikarian daudelako. Sarrera unitario bat sartuz ezker eta sistemaren erantzuna aztertzean egiaztatu daiteke aurretik onartutakoa (*Irudia 31*)



Irudia 31 Plantaren erantzuna begizta itxian eskaloi sarrera batekiko.

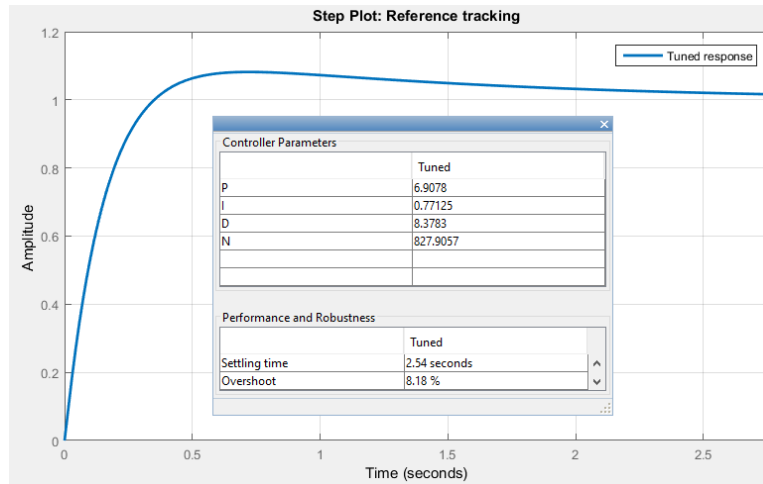
Sistemaren mugapenak direla eta, bere erantzun baldintzei gainezarpentxia eskatu behar zaio sistemari, izan ere, pilotak ez du izango mugitze espazio fisiko nahikorik gainezarpena handia bada. Ez da hain garrantzitsua izango ordea, erantzun hain bizkorra izatea, onartze muga baten barruan dagoen bitartean. Egonkortzerakoan errorea baldin badago, kontrolagailuaren alde integrala denbora iraunkorreko errorea zuzenduko du. Kontrolagailua beraz, baldintza hauek betetzeko diseinatu egon behar da.

Kontrolatu egingo den begizta basikoa aurkeztuko da ondoren, aurretik aipaturiko blokeak eta grafiko interesgarriak ateratzeko beste batzuk izango dituenak (*Irudia 32*).



Irudia 32 Kontrol begizta basikoa sistema jarraitua simulatzeko.

PID-aren balioak Matlab-ek eskaintzen duen pidTuner erremintarekin lortutako balioak dira. Hasierako balioak ez zutenez bat egiten aurretik ezarritako baldintzekin, eskuz egin dira azken parametroen doiketak, ondorengo balio hauek emanaz:



Irudia 33 pidTuner erremintarekin lortutako erantzuna.

Irudia 33-en ikusi daitekeen bezala, %8,18-ko gainezarpena eta 2,54s-ko egonkortze denbora lortuko da kontroladorearen hurrengo parametroekin:

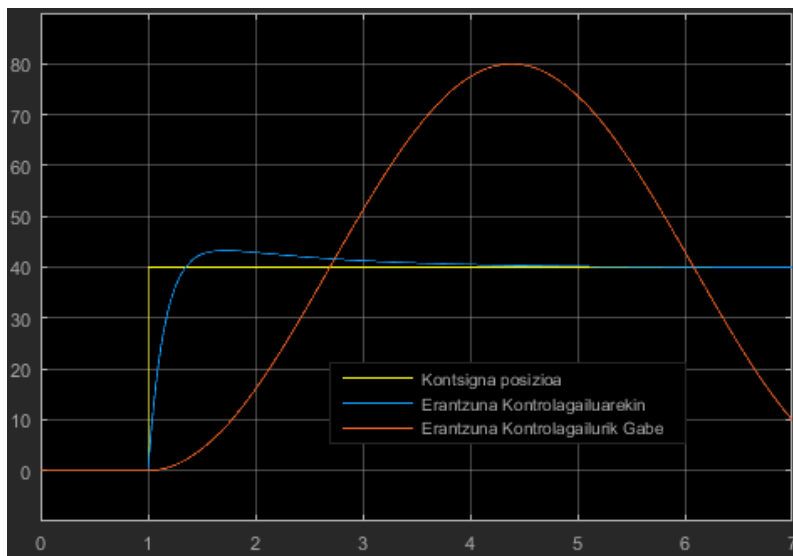
- $K_p = 6.9078$
- $K_i = 0.77125$
- $K_d = 8.3783$
- $N=827.9057$

N azken balio hori, kontrolagailuaren deribazioaren iragazketa koefizientetik dator. Koefiziente deribatiboaren eragozpen bat da, lan frekuentzia altuetan txarto funtzionatzen duena. Ball & Beam sisteman ez denez frekuentzia altuetan lan egingo, mesprezagarria da.

PID ekuazio orokorrean (Formula G.9) ordezkaturiko dira lorturiko K_p , K_i eta K_d balioak, kontroladorearen balioak lortuz (Formula G.10).

$$PID(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \quad (G.9)$$

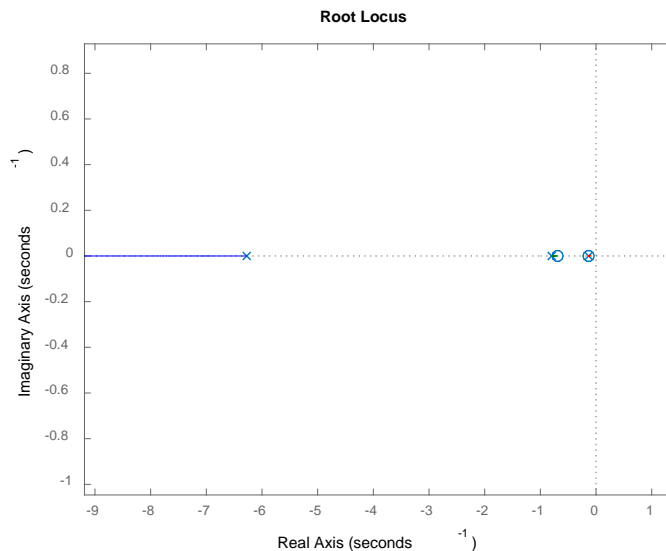
$$PID(s) = G_c(s) = 6.9078 + 0.77125 \frac{1}{s} + 8.3783s \quad (G.10)$$



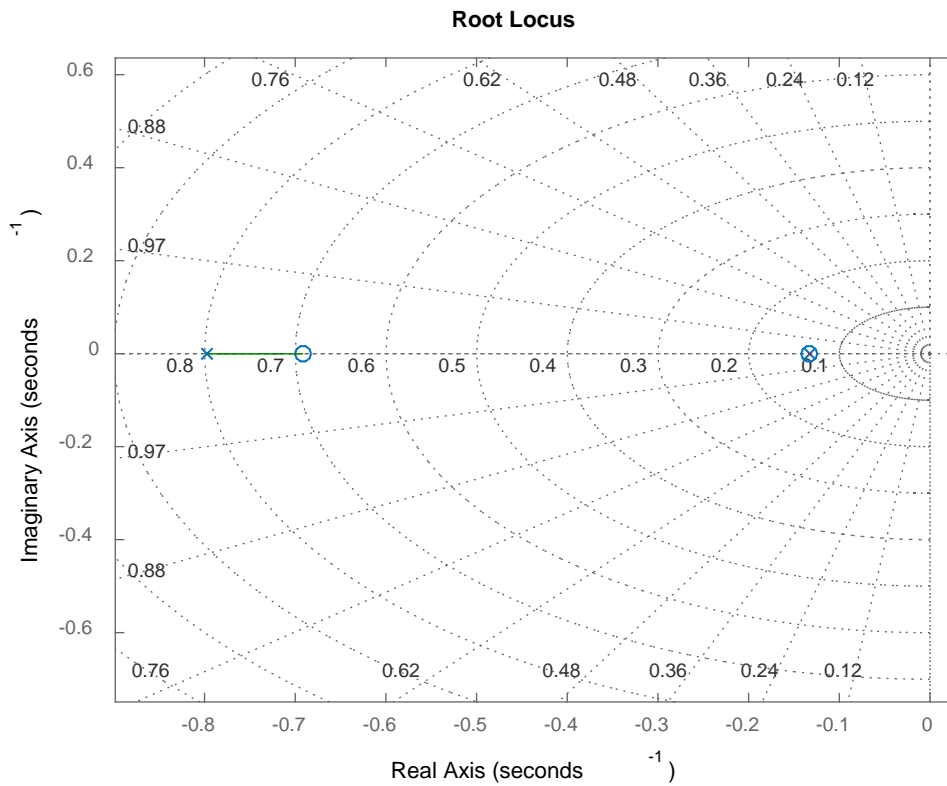
Irudia 34 Sarrera unitario batekiko erantzuna. Kontroladorearekin eta kontroladore gabe. BI-n

Sarrera unitario batekiko sistemaren erantzuna *Irudia 34*-n agertzen da. Urdinez, kontrolagailuarekin sistemak izango duen erantzuna, eta gorritz kontrolagailurik gabe. Hasieran finkatutako baldintzekin alderatuz, %0,18-tan gaindituko du gainezarpena. Sistemak, bilatzen zen ezarpen abiadura gaindituko du, baina onartu beharko da, sistema amortiguazio handiegirik ez bada nahi.

Nahi den erantzuna lortu ostean, sistemaren egonkortasuna aztertuko da. Horretarako sistemaren erroen lekua bilatu da (*Irudia 35*), baina oraingo honetan kontrolagailua ere aztertuz. Erroen lekua, K irabaztearen arabera grafiko bat da, zerotik infinitura doana. Grafiko honen bidez, sistemarengan duen K irabazte horren influentzia azter daiteke.



Irudia 35 Sistemaren erroen lekua kontrolagailuarekin. BI-n



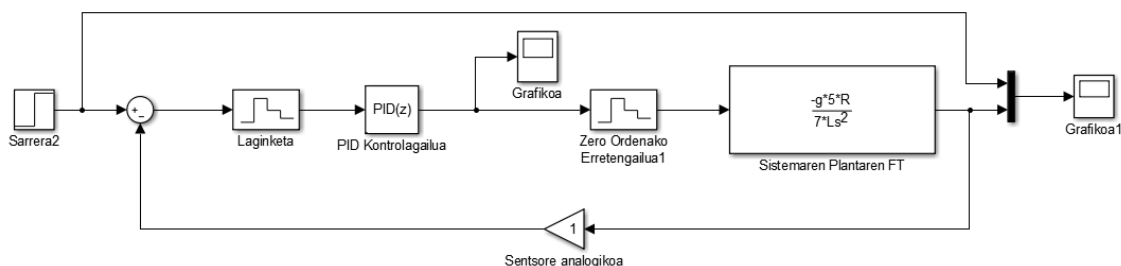
Irudia 36 Lehenengo handipena (35.irudiarena)

Ardatz irudikaria baino eskumatarago elementurik ez daudenez (*Irudia 35*), sistema egonkorra izango da K balio guztientzako.

Ardatz irudikaritik hurbil dauden beste polo eta zeroak, hain hurbil daude bata bestetik elkar ezeztatu daitezkeela. Horregatik mesprezagarriak direla esan daiteke. Beraz, polo dominanteena -6.3 inguruan dagoena izango da.

8.5. KONTROLAGAILUAREN DISKRETIZAZIOA

Kontrolagailua Raspberry Pi batean ibiliko denez, beharrezkoa da kontroladore diskretu bat diseinatzea ordenagailu honetan implementatu ahal izateko. Kontrol diskretua aztertzeko, lehenik eta behin zenbait blokeen definizioa ulertu behar da. *Irudia 37*-an agertzen den sistema hibridoak, bloke jarraituak eta bloke diskretuak biltzen ditu.



Irudia 37 Kontrol begizta hibridoa. Sistema laburpena diskreturako

Kontrolagailu digital bat implementatzerakoan zuzenean eragiten duten pausurik garrantzitsuenak, diskretizazio metodoa eta laginketa periodoa dira.

Laginketa periodo aproposa aukeratzeak, sistemaren kontrol digitalaren egonkortasunean eta sendotasunean eragina du, baita bere jokaeran ere. Sistema diskretuak, sistema jarraituak bezain ondo funtzionatu beharko du, aurretik zehaztutako beharrian eta baldintzekin bat egiten. Laginketa denbora egokia aukeratzea ezinbestekoa da. Denbora hau oso txikia bada, izan daiteke sistemari informazio berririk ez ematea eta alferrikako informazioa prozesatzen egon izana. Ordea, handiegia bada, baliteke sistema dinamikoaren portaera egokia eragozte.

Normalean laginketa denbora egoki bat aukeratzeko egiten dena, sistemaren denbora dominantea baino hamar aldiz handiagoa izatea da. Normalean denbora dominante hori polarik dominanteenak ezartzen du. Hauek, ardatz irudikariarekiko nahiko gertu izaten dira.

Irudia 27-n agertzen den bezala, *Formula G.10*-etik eta sistemaren modelizaziotik *Formula 0.42* (eranskinetan), begizta kontrolaren TF-a begizta itxian lortu da. $H(s)$ ganantzia unitarioa izanda:

$$GH(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s) \cdot G_p(s)}{1 + G_c(s) \cdot G_p(s) \cdot H(s)} \quad (G.11)$$

$$GH(s) = \frac{2320 s^2 + 1912 s + 213.5}{322 s^3 + 2320 s^2 + 1912 s + 213.5} \quad (G.12)$$

Poloak:

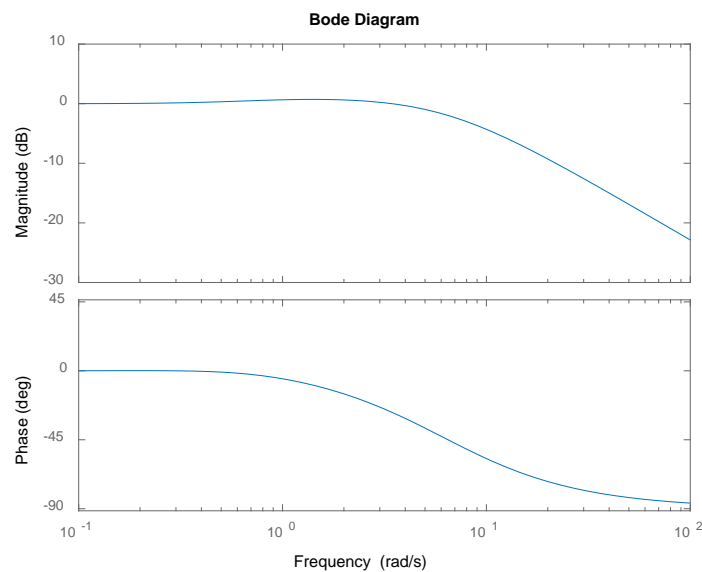
- $s_1 = -6.2737$
- $s_2 = -0.7973$
- $s_3 = -0.1326$

Zeroak:

- $z_1 = -0.6913$
- $z_2 = -0.1332$

Azkenik, ondoren uzten den TF-a deskomposatua lor daiteke:

$$GH(s) = \frac{(s + 0.6913)(s + 0.1332)}{(s + 6.2737)(s + 0.7973)(s + 0.1326)} \quad (G.13)$$



Irudia 38 Transferentzia funtzioaren Bode diagrama. Frekuentziaren analisisia

Formula G.9-ko kontrolagailua diskretizatzeke bi metodo nagusi daude, Tustin-en hurbilketa eta Euler-arena:

EULER

$$s = \frac{z - 1}{Tz} \quad (G.14)$$

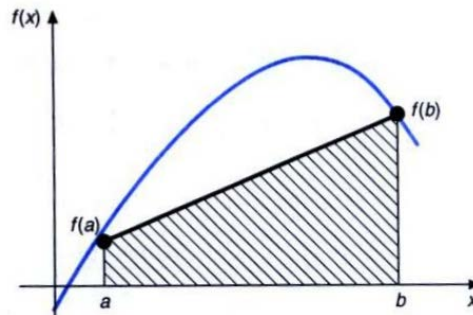
$$PID(z) = K_p + K_d \cdot \frac{z-1}{Tz} + K_i \frac{Tz}{(z-1)} \quad (G.15)$$

TUSTIN

$$s = \frac{2}{T} \cdot \frac{z-1}{z+1} \quad (G.16)$$

$$PID(z) = K_p + K_d \frac{2}{T} \cdot \frac{z-1}{z+1} + K_i \frac{T}{2} \cdot \frac{z+1}{z-1} \quad (G.17)$$

Tustin-en metodoa edo metodo trapezoidala, askoz ere zehatzagoa da Euler metodoa baino, izan ere, Euler metodoak, neurketa diskretu bakarria erabiltzen du hurrengo unean izango duen balioa estimatzeko. Ordea Tustin metodoaren bidez, bi neurketa diskreturekin batz bestekoa egiten du, horregatik errore txikiagoa du.



Irudia 39 Tustin edo hurbilketa trapezoidala simplifikazioa

Beraz, kontrolagailua diskretizatzeke Tustin-en metodoa erabiliko da, non *Formula G.17* garatuz honako hau lortzen den:

$$\begin{aligned}
 PID(z) &= \\
 &= \frac{(2 \cdot T \cdot K_p - 4 \cdot K_d + K_i \cdot T^2)z^{-2} + (-4 \cdot K_d + 2 \cdot T^2 \cdot K_i)z^{-1} + (-2 \cdot T \cdot K_p - 4 \cdot K_d + T^2 \cdot K_i)}{(2 \cdot T)z^{-2} + (-2 \cdot T)} \quad (G.18)
 \end{aligned}$$

Kontrolagailua diskretizatua lortzeko laginketa periodoa behar denez, aurrerago adieraziko da zein den PID-aren ekuazioa.

8.6. LAGINKETA PERIODOAREN AUKERAKETA

Irudian ikusi daitekeenez eta lehen aipatu den bezala, s_2 , s_3 poloak eta z_1 , z_2 zeroak, elkar ezeztatzen dira batik bat oso hurbil daudelako bata bestetik. Beraz, laginketa periodoa aukeratzeko geldituko den polo dominanteena s_1 izango da. Polo hau ardatz guztiz errealean dago. Sistemak denboran zehar izango duen jokaera polo honek emanda egongo da. Jokaera hori beraz, denbora dominantearen konstanteak definitzen du.

Sistemaren erantzuna nahiko motela denez, sistemaren diskretizazio abiadura bere denbora dominantearen konstantea baino 10 aldiz handiagoa izango da. Bere laginketa periodoa, sentsore analogikoa, bihurgailua edo Raspberry-ak definituko du. Hauetariko motelena izango da laginketa periodoa definituko duena, beste elementu guztiek abiadura bizkorrean lan egiteko kapazak badira, ez dute arazorik izango:

- Sentsore analogikoak 52,9 ms-ko atzerapena du distantzia neurtzen duenetik, datua ematen duen arte.
- Bihurgailuak, bere datasheet-aren arabera, gehien bat 200 ksps-tara hel daiteke 5v-rekin elikatu ezkerre, eta 75 ksps-tara 2.7v-ekin elikatuz. Bere laginketa maiztasuna datasheet-ean ageri den hurrengo formulak definitzen du.

$$f_{\text{laginketa}} = \frac{\text{CLK}}{18} \quad (\text{G.19})$$

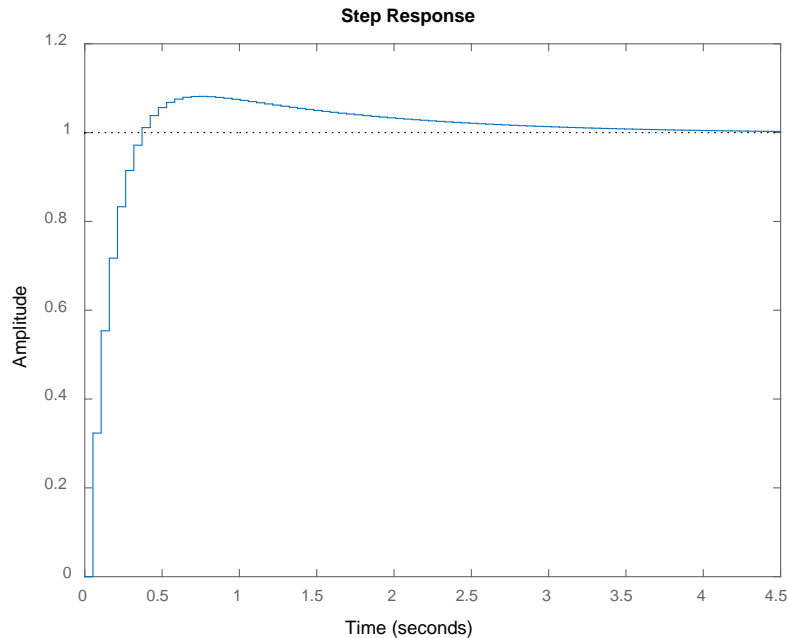
- Raspberry-ak SPI bidez 3 Byte jasotzeko $1.2\mu\text{s}$ behar ditu.

Argi eta garbi dagoenez, sentsore analogikoa izango da hauetariko motelena, eta laginketa abiadura definituko duena. $T_s = 0,0529\text{s}$ izango da.

Matlab-ek eskaintzen duen "c2d" bidez diskretizatuko da *Formula G.12* TF-a, aurretik aipaturiko T_s -rekin (ZOH):

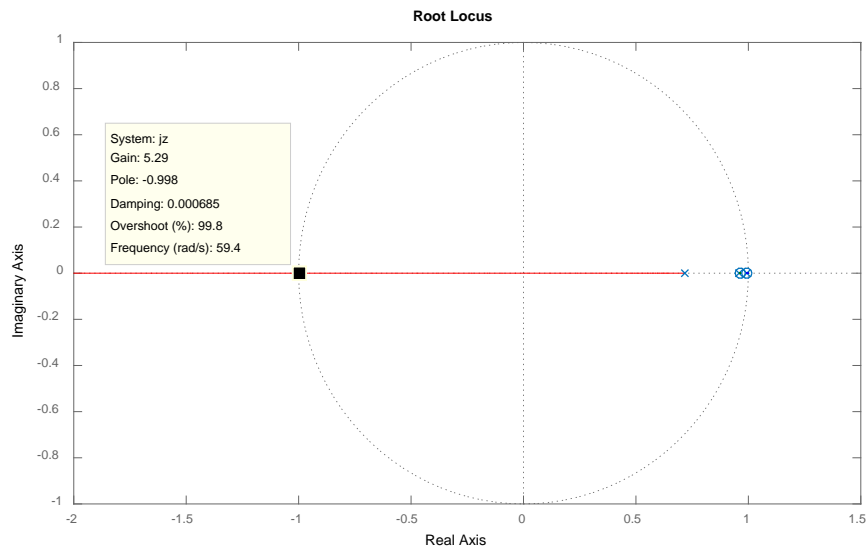
$$GH(z) = \frac{0.3233 z^2 - 0.6328 z + 0.3095}{z^3 - 2.669 z^2 - 2.353 z - 0.6831} \quad (\text{G.20})$$

Ondoren, sistema berriari sarrera unitario bati nola erantzungo dion aztertuko da. *Irudia 40*-en ikusi daitekeen bezala, erantzuna egonkorra da, eta guztiz egonkortzen denbora bat emango du.

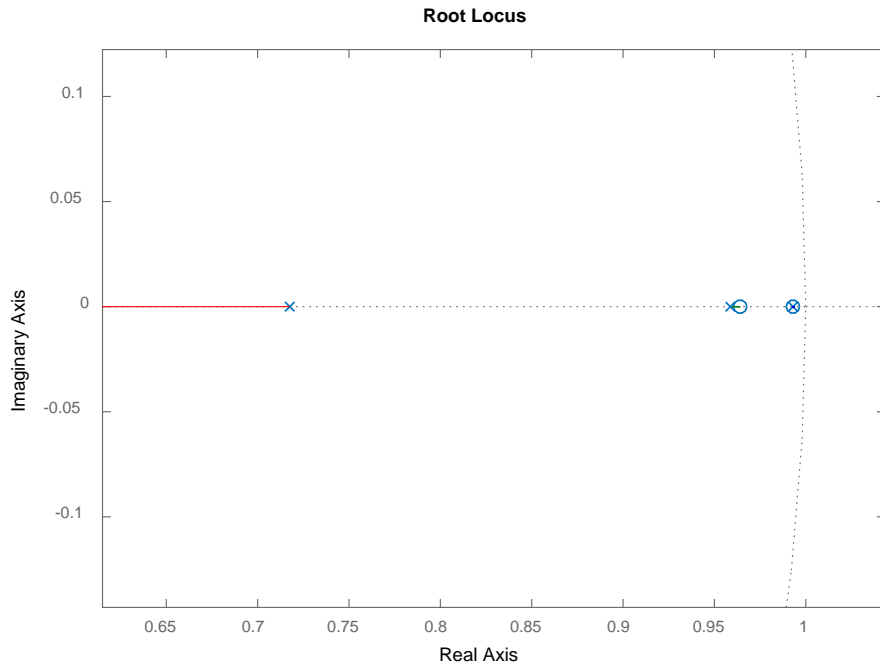


Irudia 40 Sarrera unitario baten kontrolagailudun sistemaren erantzuna BI-an.

Erroen lekua aztertuz (*Irudia 41*), lehen aipatu den bezala egonkorra izango da. Oraingo honetan sistema diskretu bat aztertzeagatik, egonkorra izateko, zirkulu unitarioaren barruan egon behar da. Hala denez, sistemak egonkorra izaten jarraituko du.



Irudia 41 Erroen lekua sistema diskretizaturako, kontrolagailuarekin. BI-an. Rlocus



Irudia 42 Lehenengo handipena (41.irudiarena)

Irudia 41-an aztertu daitekeen bezala, sistema diskreturako irabazia ezin izango da $K=5,29$ baino handiagoa izan, bestela, zirkulu unitariotik kanpo egongo litzateke. Beste modu batera esanda, ezegonkortuko lirateke.

8.7. KONTROLAGAILUAREN INPLEMENTAZIOA

Behin sistema egonkorra dela egiaztatu ostean aukeratutako laginketa periodoarekin, lehen mailako erretenedore bat erabilita, eginbeharreko azken pausua kontrolagailuaren diferentziazko ekuazioak lortzea da. Hau egitea beharrezkoa da Raspberry Pi-an inplementatu ahal izateko.

Lortutako irabazpenak eta laginketa denbora kontrolagailu diskretuan ordezkatzuz (*Formula G.18*)(TUSTIN) hurrengo ekuazioa lortzen da (*Formula G.21*):

- $K_p = 6.9078$
- $K_i = 0.77125$
- $K_d = 8.3783$
- $T_s = 0,0529s$

$$PID(z) = \frac{323.7 z^2 - 633.5 z + 309.9}{z^2 - 1} \quad (G.21)$$

PID-aren ekuazio orokorra honako hau izanda (*Formula G.22*):

$$PID(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{b_0 + b_1 \cdot z^{-1} + b_2 \cdot z^{-2}}{a_0 + a_1 \cdot z^{-1} + a_2 \cdot z^{-2}} \quad (G.22)$$

Garatuz:

$$\begin{aligned}
 U(z) \cdot (a_0 + a_1 \cdot z^{-1} + a_2 \cdot z^{-2}) &= \\
 = E(z) \cdot (b_0 + b_1 \cdot z^{-1} + b_2 \cdot z^{-2}) &
 \end{aligned} \quad (G.23)$$

$$\begin{aligned}
 a_0 \cdot U(z) &= -a_1 \cdot z^{-1} \cdot U(z) - a_2 \cdot z^{-2} \cdot U(z) + b_0 \cdot E(z) \\
 &+ b_1 \cdot z^{-1} \cdot E(z) + b_2 \cdot z^{-2} \cdot E(z)
 \end{aligned} \quad (G.24)$$

$$\begin{aligned}
 u(k) &= -\frac{a_1}{a_0} \cdot u(k-1) - \frac{a_2}{a_0} \cdot u(k-2) + \frac{b_0}{a_0} \cdot e(k) \\
 &+ \frac{b_1}{a_0} \cdot e(k-1) + \frac{b_2}{a_0} \cdot e(k-2)
 \end{aligned} \quad (G.25)$$

$$\frac{323.7 - 633.5 z^{-1} + 309.9 z^{-2}}{1 - z^{-2}} = \frac{b_0 + b_1 \cdot z^{-1} + b_2 \cdot z^{-2}}{a_0 + a_1 \cdot z^{-1} + a_2 \cdot z^{-2}} \quad (\text{G.26})$$

$$b_0 = 323.7$$

$$b_1 = -633.5$$

$$b_2 = 309.9$$

$$a_0 = 1$$

$$a_2 = 1$$

Hauxe izango da Raspberry Pi-an inplementatuko den ekuazioa. Kontuan hartu behar da, K_p , K_i edo K_d aldatu ezkerreko, diferentziazko ekuazio hau aldatu egingo dela:

$$\begin{aligned}
 u(k) = & -u(k-2) + 323.7 \cdot e(k) - 633.5 \cdot e(k-1) \\
 & + 309.9 \cdot e(k-2)
 \end{aligned} \quad (\text{G.27})$$

H.PLANGINTZA

Proiektu hau bezalako ekimen bat aurrera eramateko, eginbeharrak eta betekizunak antolatu behar dira, planifikazio zehatz bat eginez. Horrela, denbora tarte jakin batean egiteko posiblea den edo ez jakiteaz aparte, zeregin guztiak antolatuak egongo dira argi eta garbi, eta kritikoagoak diren horiek lehenago egiteko gai izatea bermatuko da.

Planifikazioa hainbat zereginetan banatu egin da, eta horiek hiru langile mota ezberdinei esleitu zaie. Hauxe egin da, badagoelako zereginak teknikari batek egin ditzakeenak, eta beste batzuk, bakarrik zuzendariak egin ditzakeenak.

Zereginen arteko aurrekariak Microsoft Project (MS Project) programan zehaztu dira. Bertan aurki daitezke zeregin bakoitzarentzako behar izango den denbora eta iraungo duen periodoa, baita errekurso esleipena ere bai.

PROIEKTUAREN DISEINUA

- Tutorearekin bilera: Lehenik eta behin, GRAL-a aukeratzeko eta proiektuaren norainokoak ezartzeko, ingeniaria zuzendariarekin elkartuko da. Bertan ingeniariak izan ditzakeen zalantza eta galdera argitzeko denbora gehitu egin da. Zuzendariaren eta Ingeniariaren beharra.
- Ideiaren Zehaztapena: Proiektua nola bideratuko den pentsatuko da. Erabiliko den estrategia. Jarraitu beharko diren pausuak eta eginbeharrak sumatu. Norainoko baliabideak behar diren. Konplexutasuna aztertu. Gradu amaierako lana onartu.
- Informazioa Bilatzea: Proiektuaren inguruko informazio orokorra bilatuko da. Sistemak behar izango dituen elementuak atzeman. Beste pertsona batzuk aurretik egindako lanak irakurri. Albisteak eta artikulatuak ikuskatu.
- Bibliografiaz Baliatu: Unibertsitateko liburutegian informazio eta liburu interesgarrien bilaketa. Interneten lagungarri izan daitekeen liburuxkak bilatu.

- Helburuen Zehaztapena: Ideia argi izanda, zer egin nahi den lan honekin zehaztuko da. Zer lortu behar den definitu.
- Planifikazioa gauzatzea: Microsoft Project (MS Project) aplikazioa erabiliz planifikazioaren gauzatzea. Data limiteak ezarri. Antolakuntza lana. Zeregin kritikoak definitu.
- Kontrol Lana: Proiektuaren mamia da. Kontrol egoki bat gauzatzeko egin beharreko zeregin orokorrak definitu dira. Naiz eta gutxi batzuk besterik ez aipatu, lan gehiago egin da horren inguruan, nahiko adarkatsua delako.
 - Plantaren diseinua modelizatu: Lege fisikoak erabiliz modelo errealaren informazioa ateratzea.
 - Modelo matematikoa atera: Lege fisiko horiekin funtzio transferentzia atera.
 - Matlab-en simulazioa egin: Matlab eta Simulink erabiliz hainbat simulazio jaurti.
 - Kontrolagailua diseinatu: PID kontrolagailuarentzat K_p , K_i , K_d irabazpenak ezarri.
 - Kontrolagailuarekin simulatu
 - Kontrolagailua diskretizatu: Tustin eta Euler-ren metodoak kontsideratuz, kontrolagailuaren diseinatzea. Sinplifikazio ezberdinak.
 - Planta errealaren eta idealaren ezberdintasunak: Bi plantak konparatu eta K_p , K_i , K_d irabazpenak doitu.

- Memoriaren Garapena: Proiektuaren denbora gehiena biltzen duena. Aurretik egindako lan guztia idatzi, azaldu eta jasota geratzeko erabilia. Ideiak idazten behar izandako denbora kontsideratu da.
 - Portada egin
 - Sarrera idatzi
 - Testuingurua egin
 - Helburuak
 - Proiektuaren onurak
 - Baldintzen deskribapena
 - Alternatiben analisia
 - Proposatutako diseinua
 - Aurrekontua
 - Laburpena
 - Ondorioak
 - Aurkibidea
 - Bibliografia
 - Irudien Zerrenda
 - Taulen Zerrenda
 - Akronimoen Zerrenda
 - Eranskinak

ELEMENTUEN AUKERAKETA

- ADC-aren Aukeraketa: ADC mota ezberdinak kontsideratu eta baldintzen analisia bete aurretik egin beharreko ikerketa eta erabakia.
- Motorraren Aukeraketa: motor mota ezberdinak kontsideratu eta baldintzen analisia bete aurretik egin beharreko ikerketa eta erabakia.

MAKETA MIHIZTATU

- Raspberryyaren SE-a instalatu: Raspberryy baten inguruko informazio sakonagoa bilatu. Zer den, nola funtzionatzen du, lan modua eta metodoa. SE-nola instalatu ikertu eta instalatzea.
- Raspberryy-ra ADC-a konektatu eta irakurri: Datasheet-aren informazioa aztertu eta liburutegien eta SPI protokoloaren bidez berarekin komunikatu.

- Raspberry-an sentsore analogikoa irakurri: Eskuraketa metodoak optimizatu, interferentziak ekiditeko informazioa bilatu. ADC-ra konektatu irakurketa zentsudunak egin eta irakurritako azken datuen batz bestekoa lortu. Datu bilketa.
- PWM seinalea sortu eta serbomotorea mugitu: PWM bat lortzeko modua ikertu. Seinalea egokitu serbomotorearentzako. Angelu kontrola. Datu bilketa.
- Aluminiozko tutuak moztu: Eskuz, distantzia neurtu eta xerra batekin tutuak moztu.
- 3D piezak mihiztatu: Behin hauek inprimatuak, tutak, 3D piezak, sentsore eta eragingailuak mihiztatu. Maketa erabilgarria lortu.
- PCB mihiztaketa Maketan: *Breadboard*-ean egindako muntai elektrikoa PCB batean bihurtu. PCB-a behin ekoiztua denean, konexioak ber-konektatu txukunago uzteko.
- Amaierako soldaketak, konponketak eta doitzeak. Akatsak eta hobetzeko teknikak erabili bukaera profesional bat emateko.
- Python-en programazioa egin: ADC-aren, PWM seinalearen eta distantzia sentsorearentzako programa idatzi. Lortutako PID kontrolagailu diskretuaren inplementazioa. Amaierako programa lortzea.

3D PIEZAK

- Piezak Diseinatu: 3D piezak diseinatu. Amaierako produktua egin. Muntai birtuala. Mihiztadura konprobatu. Akatsak konpondu.
- Piezen Planoak egin: Piezen planoak sortu. Akotazioak egin.
- Piezak inprimatu: Inprimagailua erabiliz, 3 dimentsiotako piezak inprimatu. '.stl' formatua lortu. 'G-code' fitxategiak sortu.

- Piezak lixatu: Eskuz lixa baten bidez oso estu mihizatzen diren piezak pixka bat lixatu askeago egoteko.

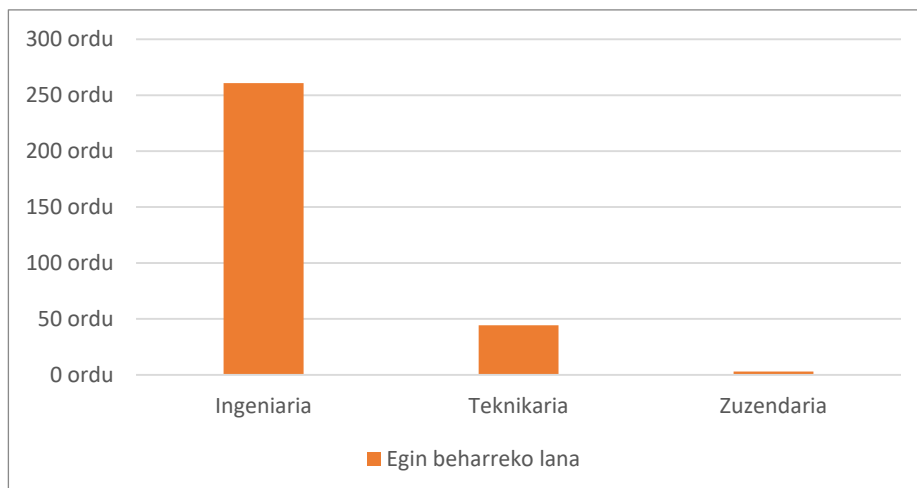
PCB

- PCB Diseinua: Paperez diseinua egin. Altium programara paperezko diseinua pasatu. Rutaketa egin. Fabrikaziorako inprimakiak lortu.
- PCB Fabrikazioa: Inprimakiak aztertu, zuzendu eta hobetu. Insolaketa egin. Atakatu. Ikuskatu. Kapaz aldatzen duten bideen zulaketak egin.
- PCB Soldaketa: Elementuen soldaketa egin. Konexio muturrak soldatu. 'via' edo bideak estainatu.

Lehen aipatu bezala, hiru ataletan banatuko dira zeregin guztiak. Amaieran errekurtsio bakoitzak izango dituen lan ordu kopurua hurrengo taulan eta *Irudia 43*-an aztertu daiteke. Argi geratzen da beraz, lan gehien egin beharko duena ingeniaria dela, teknikariak ondoren eta zuzendariak azkenik.

Taula 7 Errekurtsio/pertsona bakoitzak izango dituen lan orduak eta lan tarte periodoak

Arduradunaren izena	Hasiera	Amaiera	Lan denbora
Ingeniaria	Asteartea 18/12/18	Astelehena 11/02/19	260,83 ordu
Teknikaria	Asteartea 01/01/19	Osteguna 24/01/19	44,33 ordu
Zuzendaria	Asteartea 18/12/18	Asteartea 18/12/18	3 ordu



Irudia 43 Errekurtsio bakoitzak egindako lanaren konparaketa

ZEREGIN KRITIKOAK

Taula 8 Zeregin kritikoak eta hauek betetzeko behar izango den denbora jasotzen duen taula. Errekurtsoak esleituta.

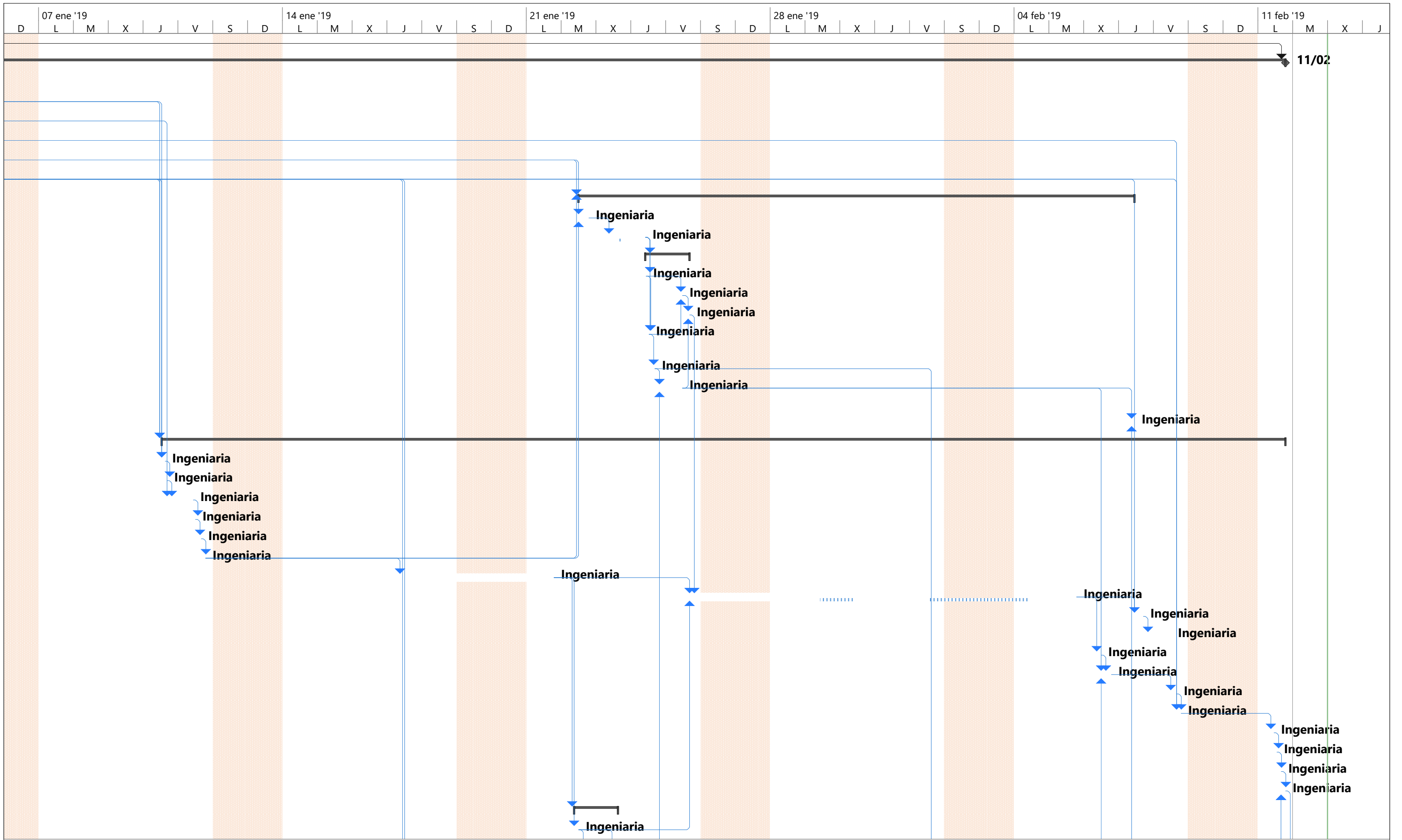
Ataza	Hasiera	Amaiera	lana	Arduradu
Proiektu Hasiera	Asteartea 18/12/18	Asteartea 18/12/18	0 ordu	Ingeniaria
Tutorearekin bilera	Asteartea 18/12/18	Asteartea 18/12/18	3 ordu	Zuzendaria
Idea Zehaztapena	Asteazkena 19/12/18	Osteguna 20/12/18	16 ordu	Ingeniaria
Informazio Bilatzea	Ostirala 21/12/18	Osteguna 27/12/18	24 ordu	Ingeniaria
Bibliografia Baliatu	Ostirala 28/12/18	Ostirala 28/12/18	5 ordu	Ingeniaria
Helburu zehaztapena	Ostirala 28/12/18	Ostirala 28/12/18	3 ordu	Ingeniaria
Planifikazio/Gantt	Astelehena 31/12/18	Astelehena 31/12/18	7 ordu	Ingeniaria
PCB diseinua	Astelehena 31/12/18	Asteartea 01/01/19	8 ordu	Ingeniaria
PCB Fabrikazioa	Asteartea 01/01/19	Asteazkena 02/01/19	3	Teknikaria

Lehentasun gehien dituzten zereginak, kritikoak deitzen dira. Hauek atzeratu ezkerro, proiektu osoaren lan planifikazioa atzeratuko da ere, horregatik ezinbestekoa izango da ezarritako denboran betetzea. Aurreko taulan ikusi daitezke zeintzuk diren zeregin kritikoenak. Gantt diagraman ere ikusi daitezke gorri zeintzuk diren lehenbailehen egin beharrekoak.

Id	Zereginaren izena	Iraupena	Hasiera	Amaiera	Aurrekariak	Errekurtsoa recursos	17 dic '18							24 dic '18							31 dic '18						
							L	M	X	J	V	S	D	L	M	X	J	V	S	D	L	M	X	J	V	S	
1	Proiektuaren Hasiera	0 días	mar 18/12/18	mar 18/12/18		1																					
2	Proiektuaren diseinua	37,38 días	mar 18/12/18	lun 11/02/19	1																						
3	Tutorearekin bilera	3 horas	mar 18/12/18	mar 18/12/18	1	1																					
4	Ideiaren Zehaztapena	2 días	mié 19/12/18	jue 20/12/18	3																						
5	Informazioa Bilatzea	3 días	vie 21/12/18	jue 27/12/18	4																						
6	Bibliografiaz Baliatu	5 horas	vie 28/12/18	vie 28/12/18	5																						
7	Helburuen zehaztapena	3 horas	vie 28/12/18	vie 28/12/18	6																						
8	Planifikazioa gauzatzea / Gantt diagrama	7 horas	lun 31/12/18	lun 31/12/18	7																						
9	Kontrol Lana	11,88 días	mar 22/01/19	jue 07/02/19	7;26																						
10	Plantaren diseinua modelizatu	5 horas	mar 22/01/19	mar 22/01/19	7;26																						
11	Plantaren modelo matematikoa atera	7 horas	mié 23/01/19	jue 24/01/19	10																						
12	Matlab-en simulazioa egin	1,56 días	jue 24/01/19	vie 25/01/19	11																						
13	Planta simulatu	30 mins	jue 24/01/19	jue 24/01/19	11																						
14	Kontrolagailua/PID plantarekin sim	1 hora	vie 25/01/19	vie 25/01/19	13;16																						
15	Kontrolagailu eta planta berria sim	1 hora	vie 25/01/19	vie 25/01/19	14;18																						
16	Kontrolagailua sistema jarraian diseinatu	2 horas	jue 24/01/19	jue 24/01/19	11;13																						
17	Kontrolagailua diskretizatu	2 horas	jue 24/01/19	jue 24/01/19	16																						
18	Planta errealearen modelo alderatu	3 horas	jue 24/01/19	vie 25/01/19	17;50																						
19	Kp, Ki, Kd baliorik optimoenak atera	2 horas	jue 07/02/19	jue 07/02/19	18;55																						
20	Memoriaren garapena	22,52 días	jue 10/01/19	lun 11/02/19	4;8																						
21	Portada egin	20 mins	jue 10/01/19	jue 10/01/19	4;8																						
22	Sarrera idatzi	1 hora	jue 10/01/19	jue 10/01/19	21																						
23	Testuingurua egin	4 horas	jue 10/01/19	vie 11/01/19	5;22																						
24	Helburuak ipini	1,5 horas	vie 11/01/19	vie 11/01/19	23																						
25	Proiektuaren onurak atera	2 horas	vie 11/01/19	vie 11/01/19	24																						
26	Baldintzen deskribapena garatu	3 horas	vie 11/01/19	vie 11/01/19	25																						
27	Alternatiben analisisa egin	3 días	jue 17/01/19	lun 21/01/19	26																						
28	Proposatutako diseinua idatzi	6 días	vie 25/01/19	mar 05/02/19	27;15;40																						
29	Plangintza zehaztu	4 horas	jue 07/02/19	jue 07/02/19	28;8																						
30	Aurrekontua egin	5 horas	jue 07/02/19	vie 08/02/19	29																						
31	Laburpena idatzi	3 horas	mié 06/02/19	mié 06/02/19	28																						
32	Ondorioak atera	5 horas	mié 06/02/19	mié 06/02/19	31;50;18																						
33	Aurkibidea egin	2 horas	vie 08/02/19	vie 08/02/19	32																						
34	Bibliografia idatzi	3 horas	vie 08/02/19	vie 08/02/19	6;33;8																						
35	Irudien Zerrenda	2 horas	lun 11/02/19	lun 11/02/19	34																						
36	Taulen Zerrenda	2 horas	lun 11/02/19	lun 11/02/19	35																						
37	Akronimoen Zerrenda	1 hora	lun 11/02/19	lun 11/02/19	36																						
38	Eranskinak gehitu	3 horas	lun 11/02/19	lun 11/02/19	37;55;60;64																						
39	Elementuen aukeraketa	1,52 días	mar 22/01/19	mié 23/01/19	27																						
40	ADC-aren Aukeraketa	3 horas	mar 22/01/19	mar 22/01/19	27																						

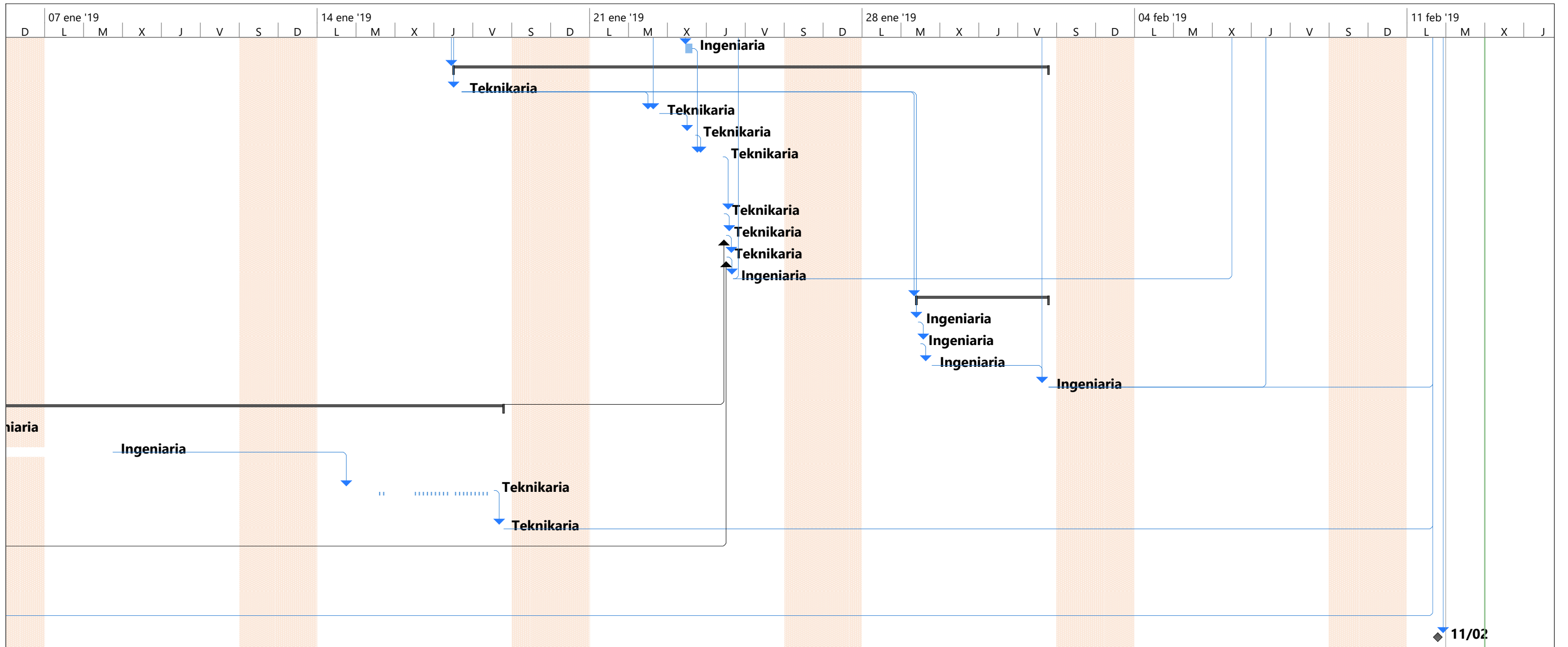
Proyecto: Markel Sesar GRAL
Fecha: mié 07/02/19

Tarea		Resumen del proyecto		Tarea manual		solo el comienzo		Fecha límite	
División		Tarea inactiva		solo duración		solo fin		Progreso	
Hito		Hito inactivo		Informe de resumen manual		Tareas externas		Progreso manual	
Resumen		Resumen inactivo		Resumen manual		Hito externo			



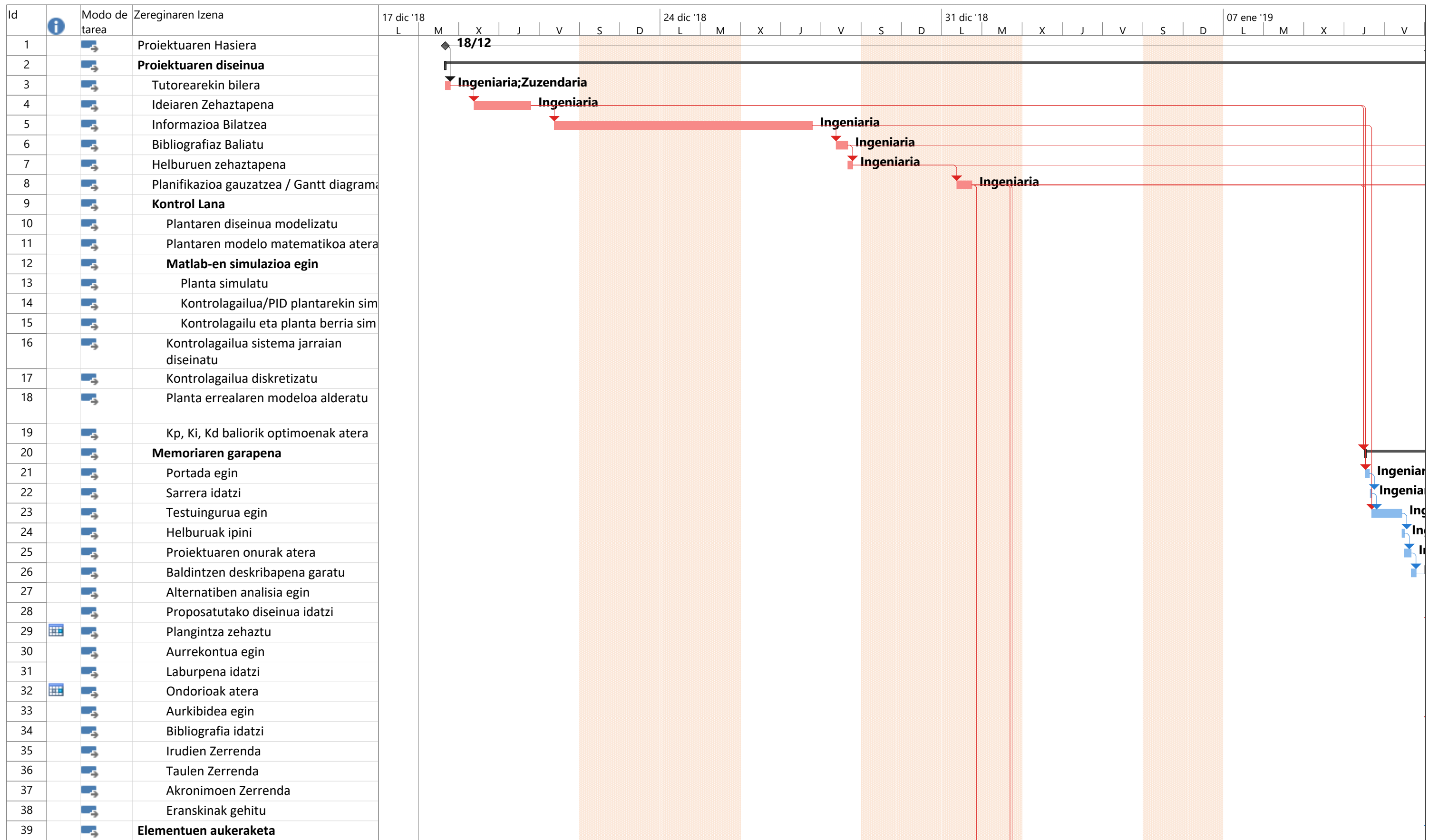
Proyecto: Markel Sesar GRAL
 Fecha: mié 07/02/19

Tarea	Resumen del proyecto		Tarea manual	■	solo el comienzo	┌	Fecha límite	↓
División	Tarea inactiva	⋯	solo duración	▨	solo fin	┐	Progreso	▬
Hito	Hito inactivo	◆	Informe de resumen manual	▬	Tareas externas	◆	Progreso manual	▬
Resumen	Resumen inactivo	┌	Resumen manual	┌	Hito externo	◆		

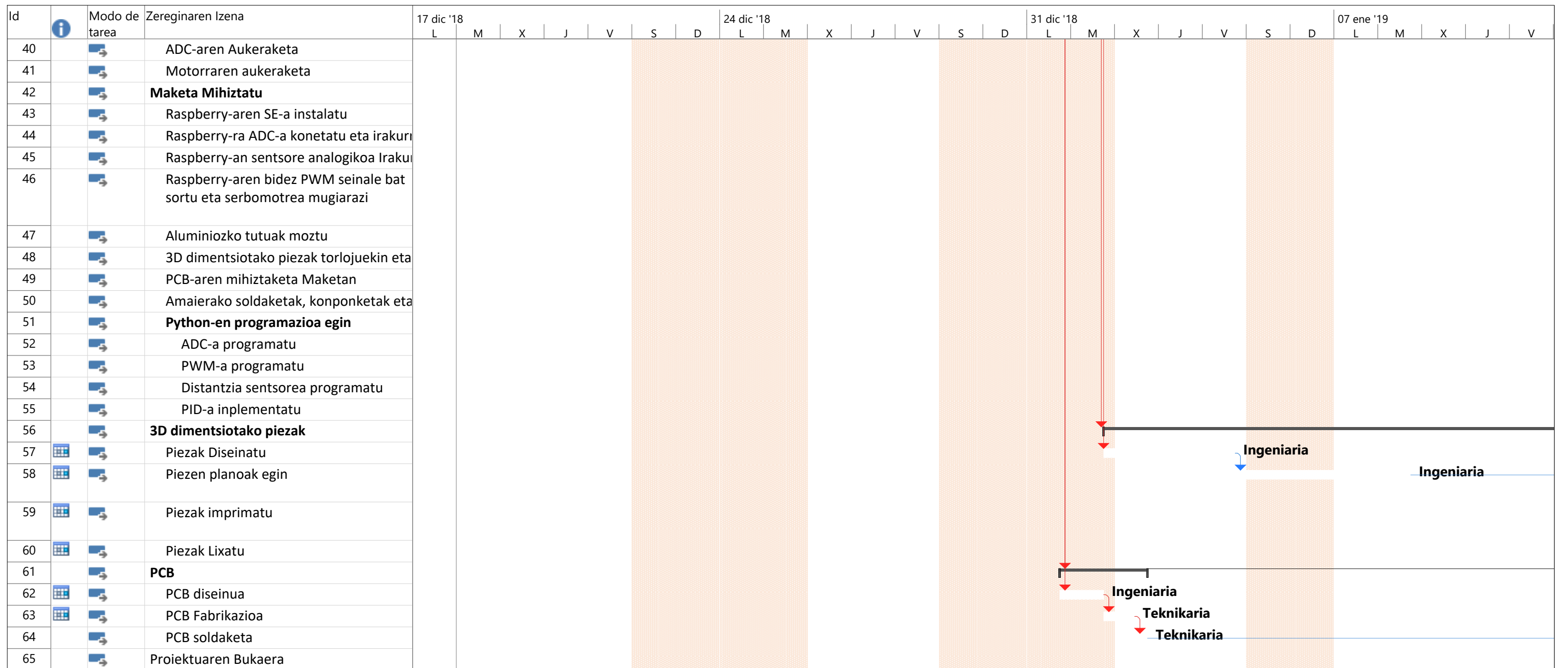


Proyecto: Markel Sesar GRAL
 Fecha: mié 07/02/19

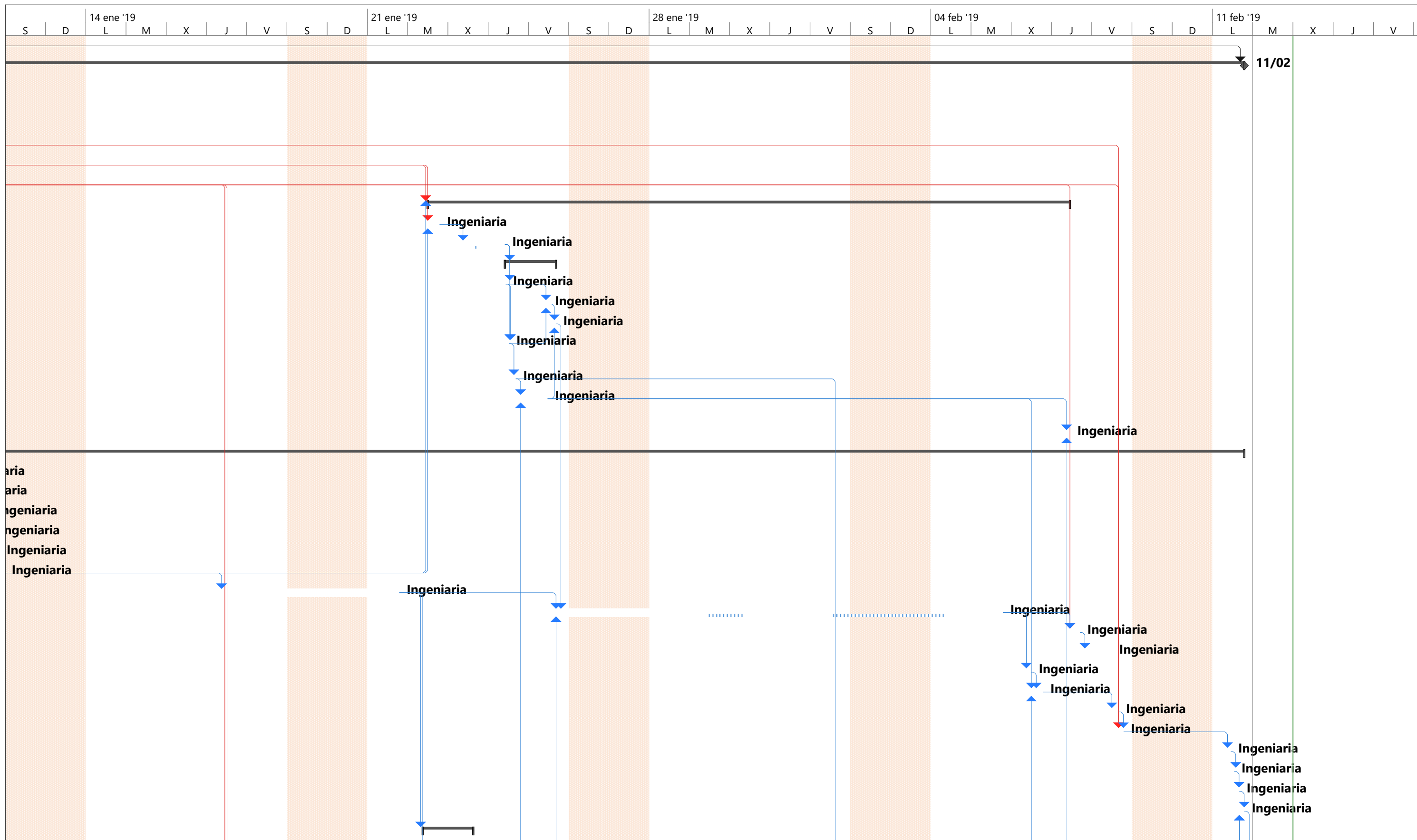
Tarea	Resumen del proyecto	Tarea manual	solo el comienzo	Fecha límite
División	Tarea inactiva	solo duración	solo fin	Progreso
Hito	Hito inactivo	Informe de resumen manual	Tareas externas	Progreso manual
Resumen	Resumen inactivo	Resumen manual	Hito externo	



Proyecto: Markel Sesar GRAL ZEREGIN KRITIKOAK Fecha: mié 07/02/19	Tarea		Tarea inactiva		Informe de resumen manual		Hito externo		Progreso manual	
	División		Hito inactivo		Resumen manual		Fecha límite			
	Hito		Resumen inactivo		solo el comienzo		Tareas críticas			
	Resumen		Tarea manual		solo fin		División crítica			
	Resumen del proyecto		solo duración		Tareas externas		Progreso			

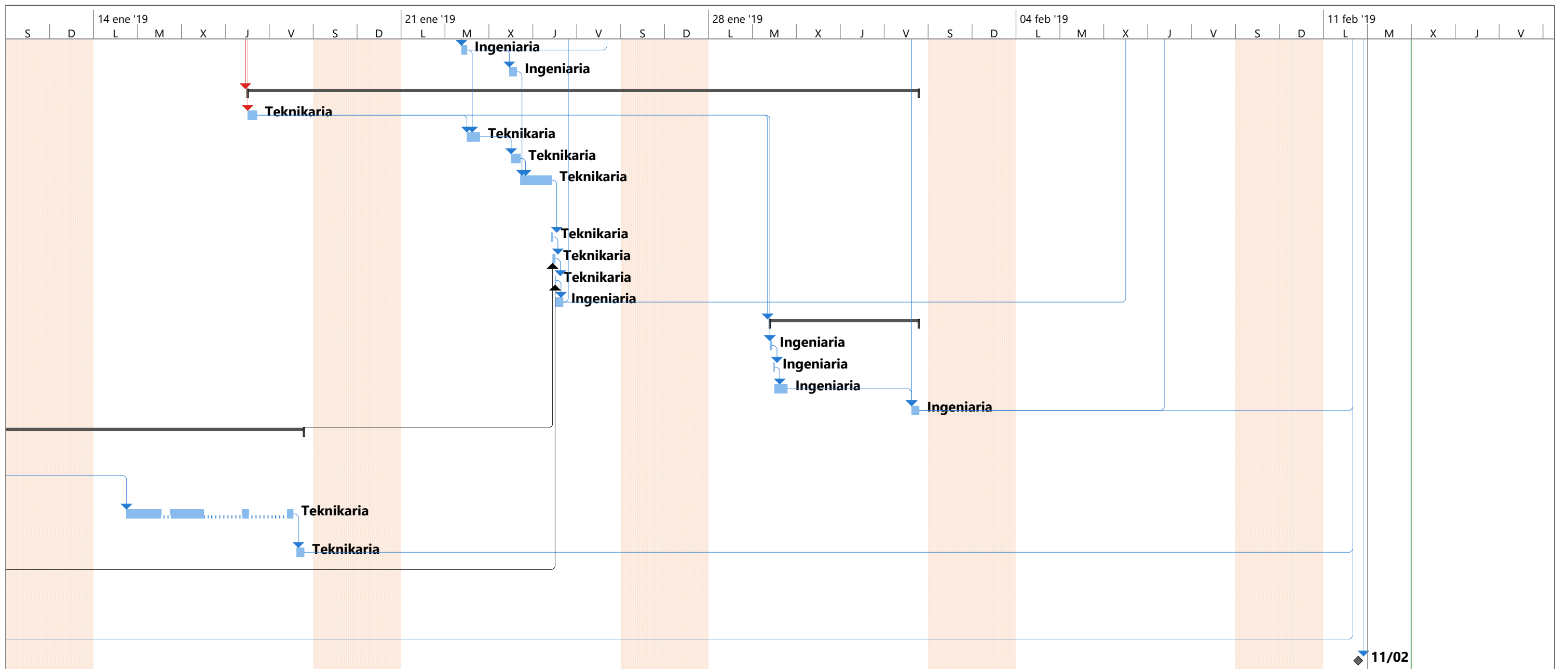


Proyecto: Markel Sesar GRAL ZEREGIN KRITIKOAK Fecha: mié 07/02/19	Tarea	Tarea inactiva	Informe de resumen manual	Hito externo	Progreso manual
	División	Hito inactivo	Resumen manual	Fecha límite	
	Hito	Resumen inactivo	solo el comienzo	Tareas críticas	
	Resumen	Tarea manual	solo fin	División crítica	
	Resumen del proyecto	solo duración	Tareas externas	Progreso	



Proyecto: Markel Sesar GRAL
 ZEREGIN KRITIKOAK
 Fecha: mié 07/02/19

Tarea	Tarea inactiva	Informe de resumen manual	Hito externo
División	Hito inactivo	Resumen manual	Fecha límite
Hito	Resumen inactivo	solo el comienzo	Tareas críticas
Resumen	Tarea manual	solo fin	División crítica
Resumen del proyecto	solo duración	Tareas externas	Progreso



Proyecto: Markel Sesar GRAL
 ZEREGIN KRITIKOAK
 Fecha: mié 07/02/19

Tarea		Tarea inactiva		Informe de resumen manual		Hito externo		Progreso manual	
División		Hito inactivo		Resumen manual		Fecha límite			
Hito		Resumen inactivo		solo el comienzo		Tareas críticas			
Resumen		Tarea manual		solo fin		División crítica			
Resumen del proyecto		solo duración		Tareas externas		Progreso			

AURREKONTUA

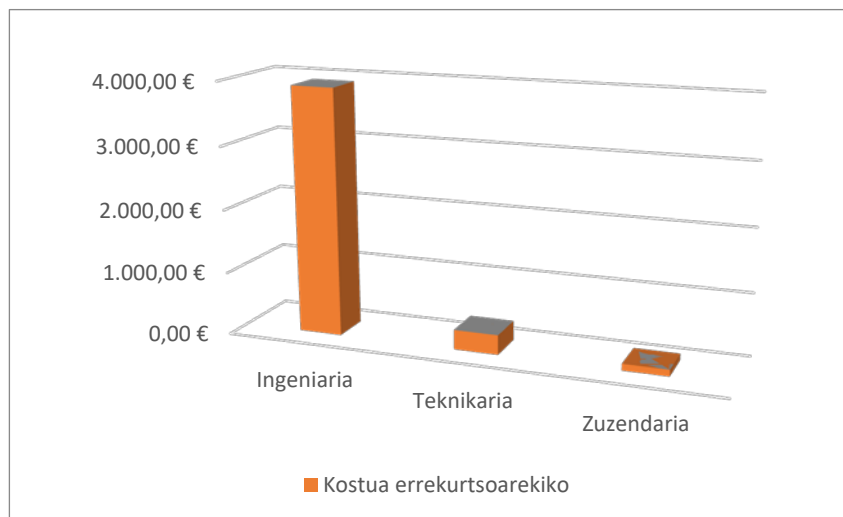
Aurrekontua kalkulatzeko, baliabide bakoitzari soldata bat ezarri zaio. Zuzendariak, ingeniariak eta teknikariak soldata finko ezberdinak izango dituzte. Gainera, aparteko orduak garestiago ordainduko dira.

Aparteko ordu horiek ordaindu behar ez izateko eta proiektuaren prezioa ahalik eta baxuena izateko, naiz eta luzeago iraungo duen proiektuak, ohiko lan orduekin lan egingo da bakarrik.

Taula 9 Errekurtso bakoitzaren kostua. Euro-ordutan emanda.

Errekurtsuaren izena	Ohiko lana	Ezohiko lana
Ingeniaria	15,00 €/ordu	30,00 €/ordu
Teknikaria	7,04 €/ordu	20,00 €/ordu
Zuzendaria	35,00 €/ordu	70,00 €/ordu

Aurreko Irudia eta oraingo taularekin, hurrengo irudiaren grafikoa atera daiteke, non lan egindako orduak, errekurtso bakoitzaren soldatarengatik biderkatu egin den. Logikoa denez, ingeniariak lan egindako denbora guztiagatik, teknikariak edo zuzendariak baino askoz ere diru gehiago jasoko du. Azken bi hauek, ordea, naiz eta zuzendariak oso denbora gutxiz lan egin, bere soldata altuarengatik, teknikariari ordaindu beharrekoaren hurbil dago.

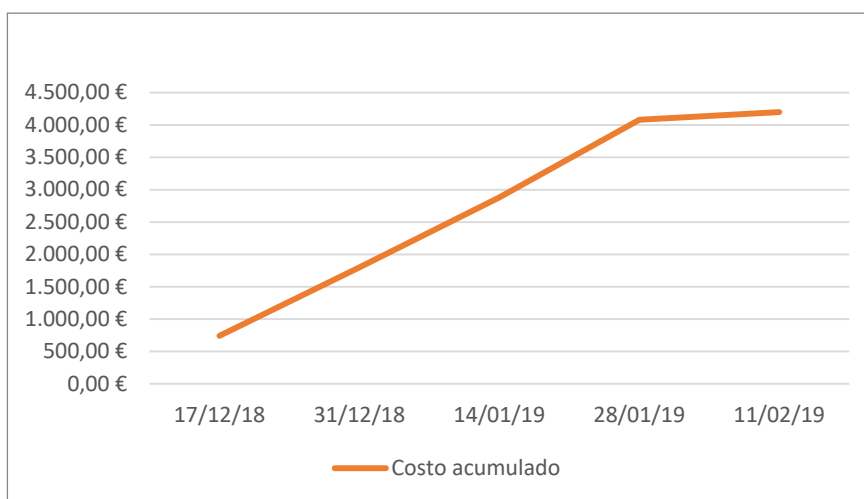


Irudia 44 Errekurtso bakoitzaren kostua proiekturako, konparaketa

Taula 10 Zeregin orokorren kostua

Proiektua	Kostua €
Elementuen aukeraketa	75,00 €
Maketa Mihiztatu	302,49 €
3D dimentsiotako piezak	<u>635,20 €</u>
PCB	176,32 €
GUZTIRA	4095,13 €

Taula 10-en laburpen moduan ikusi daitekeen bezala, hauxe izango litzateke atal bakoitza egiteak balioko lukeena. Kontuz ibili behar da zer kontsideratzen den eta zer ez. Adibidez, 3 dimentsiotako piezak inprimatzeko denbora kontsideratu da, baina teknikariak ez da egongo denbora guztian lan egiten. Inprimatzen ipini eta '.stl' eta G-kodea lortuko du. Horregatik, teknikariaren 1h lanaldi bakarrik kontsideratu da.



Irudia 45 Proiektua garatzen en heinean izango duen kostu pilatua

Irudian antzeman daiteke kostu pilatutako kurba. Beste modu batean esanda, proiektua aurrera doan heinean gastatutako diru kopurua.

Ondoren, material kostuak aztertuko dira *Taula 11*-an. Badira elementu batzuk balio hurbildua ipini direnentzako. Adibidez, termokola edo PCB bat eskuz fabrikatzea. Unitate bakarrarentzako oso garestia litzateke hori guztia erabiltzea, adibidez, elementu kimikoak errebelatzeko, kobrezko txartela, etab. Horregatik, batz besteko moduko bat kontsideratu da.

Taula 11 Material kostuen laburpena

Izena	Kopurua	Kostua	Totala
PLA	1	5€	5€
Aluminiozko tutua	1	2€	2€
Pilota	1	1€	1€
RaspberryPi 3B+	1	30€	30€
Torlojua	9	0,05€	0,45€
Azkoina	9	0,03€	0,27€
Serbomotorea	1	3,80€	3,80€
Sharp GP2Y0A21YK sensora	1	9,92€	9,92€
Konexio Kableak	2	3€	6€
PCB eskuz fabrikatzea (LED, erresistorea, plaka,...)	1	10€	10€
HDMI VGA bihurgailua	1	12€	12€
Protoboard	1	3€	3€
Arratoia eta teklatua	1	30€	30€
Zurezko taula	1	4€	4€
Termokola	1	2€	2€
Guztira			119,44€

Azkenik, proiektuaren kostu totala kalkulatu da *Taula 10* eta *Taula 11*-etik ateratako kostuarekin:

Taula 12 Proiektuaren kostu totala.

IZENA	KOSTUA €-tan
Errekurtso gizakien Guztira	4095,13
Errekurtso materialen Guztira	119,44
KOSTU TOTALA	4214,57

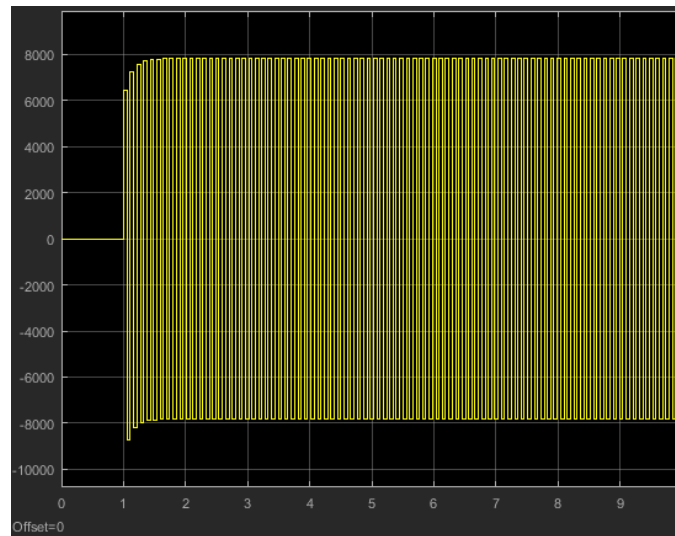
Proiektu honetako maketa asko ekoiztu beharko balira, ez zen berriro ingeniariaren lan guztia beharko, diseinua, helburuak, dokumentazioa, etab. definiturik egongo litzatekeelako. Hortaz, mihizadura lana, soldaketa, programazioa, materialak eta fabrikazioa geratuko litzateke besteak beste, teknikari trebe batek egin ditzakeenak. Lan hori egiteko beharrezkoa den denborari, ziklo denbora deritzo. Maketa bat ekoizten den bakoitzean ziklo denbora hori errepikatuko da. N unitate jakin bat ekoiztu nahi izan ezker, T_c ziklo denbora eta n_c ziklo lotea jakinda, beharko litzatekeen denbora kalkulatu ahal izango litzateke.

$$T_n = T_1 + \left[\text{Int} \left(\frac{n-L}{n_c} \right) T_c \right] + T' \quad (\text{H.1})$$

Naiz eta maketa bakar bat ekoizteko aurrekontua hain garestia izan, askoz ere merkeago izango da zenbat eta maketa gehiago ekoiztu. Amortizazio planak gauzatu daitezke horren inguruan.

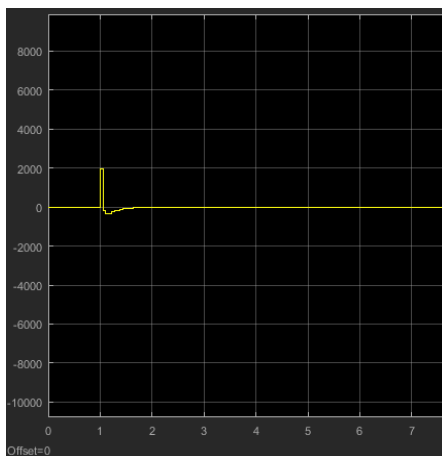
I. ONDORIOAK

Behin diseinatutako kontrolagailua egindako maketan probatu ostean, jasotako erantzunak ez dira izan espero zirenak. Serbomotorea etengabe mugitzen zen, eta ez mugitu beharko zen bezala hain zuzen ere. Jasotzen duen seinalearen zarata dela eta, etengabe dar-dar egiten zuen, inongo kontrol lanik egin ez bazitekeen bezala.

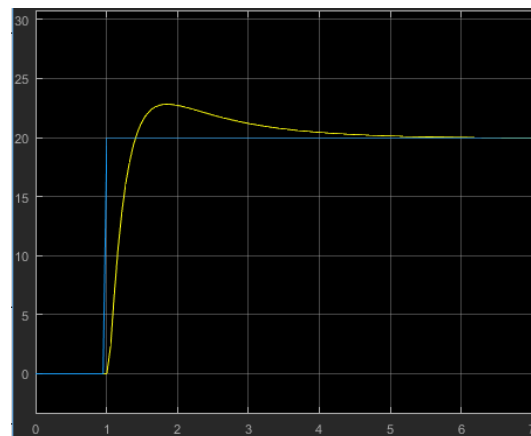


Irudia 46 Kontrol seinalea, iragaz gabe

Begizta itxiaren errorea nahiko ondo irakurtzen da, beraz, arazoa eragingailuaren eta kontrolagailuaren artean dago. Zarata hori ezeztatzeko iragazki digitala implementatu egin da. Aurreko *Irudia 46*-ko erantzunari iragazki digitala aplikatu ondoren, honako hau lortzen da (*Irudia 47*).

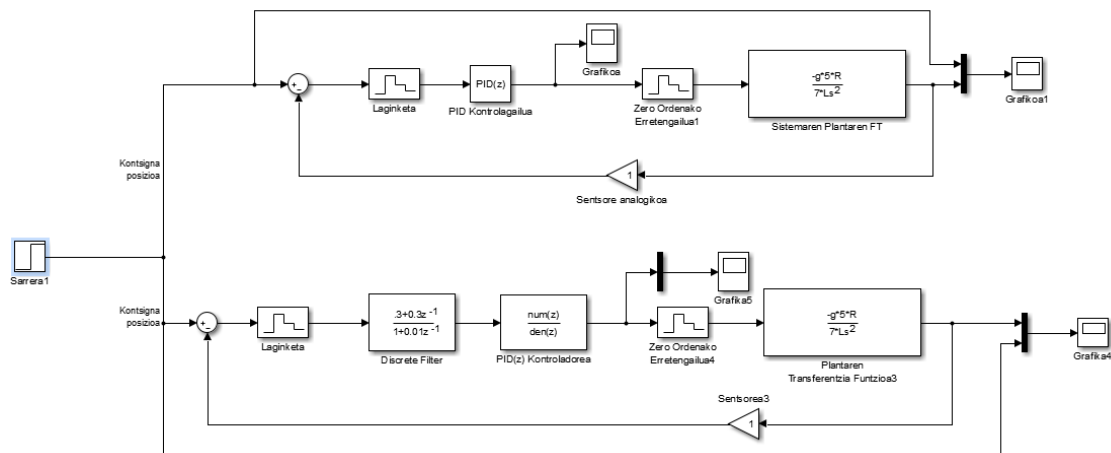


Irudia 48 Kontrol seinalea, iragaztuta



Irudia 47 Sarrera unitario batekiko erantzuna, iragazkiarekin.

Iragazki hau inplementatzeko Matlab-en bidez Script bat idatzi egin da Simulink sistema modelizatu batekin komunikatzen duena. Bertan PID diskretu baten K_p , K_i , K_d parametroak aldatuz (eskuz edo pidTune erabiliz), zuzenean Raspberry Pi-an inplementatu beharreko diferentziazko ekuazioa kalkulatu ditu. Horrela, parametro hauek aldatzen diren bakoitzean, ez dira kalkulu guztiak eskuz egin behar edota kode guztia berriro idatzi behar. Ondoren, parametro horiek Python programan kopiauz, badago prest programa probatzeko kontrolagailu berriarekin.



Irudia 49 Simulink diagrama kontrolagailua bizkor inplementatzeko

Hau egitearen arrazoa, K_p , K_i , K_d aldagaiak asko aldatu egin direnez doikuntza fin-fin bat egiteko, beharrezkoa zen. Informazio guztia, Simulink diagrama eta '.m' fitxategia eskuragarri dago GitHub biltegi digitalean. Erantzun nahiko ona ematen dituzten balioak ondorengoak izan daitezke:

$$K_p=6; K_i=3; K_d=12$$

Egindako modelizazio matematikoa ahal den eta zehatzen garatu da, oso lagungarria izanda kontrolagailuaren parametroak doitzeko. Nahiz eta hori egin, simulatutako erudian izango duen portaera eta errealitatean izango duena, ez dira inoiz berdinak izango, oso antzekoak diren arren.

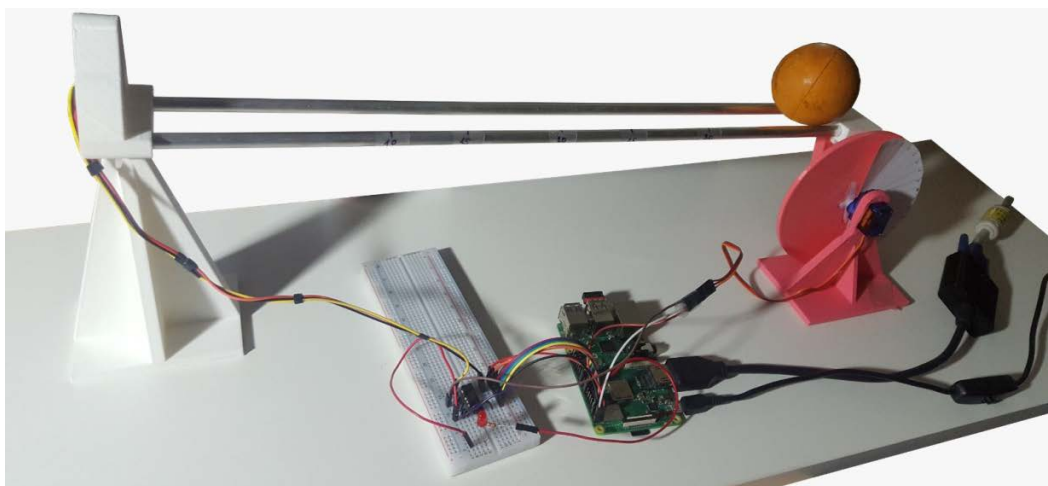
Simulazioak, eredu errealarekiko zenbat eta fidagarriagoa izan, errazagoa izango da modelo errealari balio izango zaizkion parametroak lortzea. Baina, helduko da momentu bat non simulazio gehiago egiteak ez duen eredu errealaren hobekuntzarik lortuko, haien artean dagoen ezberdintasun erroreagatik. Horregatik, noizbait, parametroen doiketak sistema errealean aldatzea merezi izango du, hainbeste simulaketa egin ordez.

Sistemaren funtzionamendu normalerako nabari den beste faktore bat pilota da. Eredu matematikoa ateratzerakoan ez da pilotaren marruskadura kontuan hartu, ezta simulaketetan ere. Gainera, tenis pilota baten neurrientzako diseinatuta dago Ball & Beam sistema, eta pilota mota honek marruskadura gehiago du. Egin diren hurrengo frogetetan fronteniseko pilota erabili da, askoz ere leunagoa dena, marruskadura koefiziente txikiagoarekin.

Honi guztiari, Raspberry Pi-aren atzerapenak gehitu behar zaizkio. SE batenez, ez da modu sekuentzialean programatutakoa exekutatzen ibiltzen, bidetik beste zereginei ere erantzun behar dituelako. Azken finean ordenagailu batenez, interneten bideo bat ikustera sartuz gero eta paraleloan kontroladorearen programa exekutatzen bada, ez du kontrola bertan bera utziko eta bideoa bakarrik erakutsiko. Horren ordez, eginkizun bakoitzari bere denbora gordeko dio (edo ez) eta dena "aldi berean" exekutatzen egongo da. Paraleloki, sistema eragilearen preferentzien bidez.

Esan beharra dago, Ball & Beam sistemak Raspberry Pi-an espero ziren baino erantzun hobekoak ematen dituela. Kontroladoreari eragozpena egiten dio, noski, eta honek ez du behar bezala funtzionatzen, baina gutxienez funtzionatzen jarraitzen du.

Zer edo zer aldatu egin behar izatekotan, serbomotorea izango litzateke. Merkegia zen agian erabilitakoa. Hobe serbomotore sendoago bat aukeratzen bada, edo bere biraketa ardatzean kojinetek bat gehitzen bazaio, bestela berehala askatasun gradu berriak lortuko ditu.



Irudia 50 Eraikitako maketa

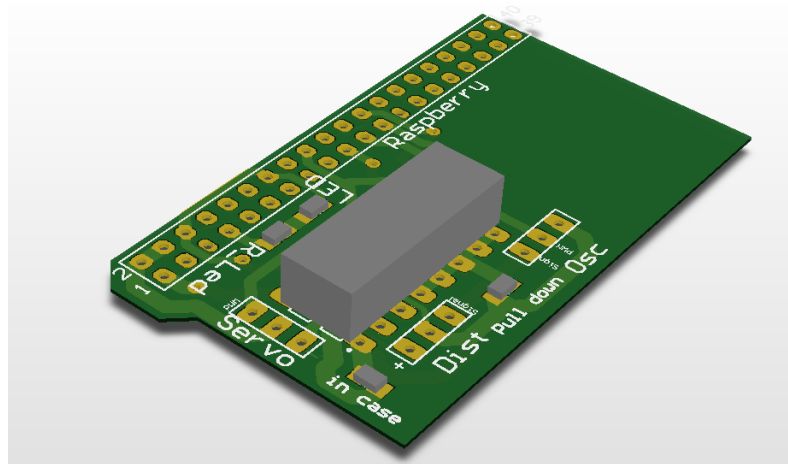
J. BIBLIOGRAFIA

- [1] Barambones Caramazana, Oscar. (2004). *Sistemas Digitales De Control*. Gipuzkoa: Servicio editorial de la Universidad del País Vasco.
- [2] Peter C. Norton, A. S.-J. (2005). *Beginning Python*. Indianapolis, Indiana: Wiley Publishing, Inc.
- [3] Garcia, M. A. (2014). *Instrumentación electrónica*. Asturias: Ediciones Paraninfo, S.A.
- [4] Prof. Bill Messne, P. D. (1 de 09 de 1996). *Control Tutorials for MATLAB and Simulink (CTMS)*. Obtenido de Tufts University and University of Michigan: <http://ctms.engin.umich.edu>
- [5] Casquero Oyarzabal, O., & Sainz de Murieta, J. (2017). *Ball and Beam control Zientzia Astea 2017*. Obtenido de Github Oskar Casquero: <https://github.com/kaskero/Ball-and-Beam-control--Zientzia-Astea-2017->
- [6] Croston, B. (16 de Noviembre de 2018). *RPi.GPIO 0.6.5*. Obtenido de pip install RPi.GPIO:
- [7] Python Software Foundation. (2001-2019). *Python 3.7.2 documentation*. Obtenido de Python: <https://docs.python.org/3/>
- [8] Ogata, K (2010). *Ingeniería de control moderna*. 5ª edición. Edición Pearson Educación.

K. ERANSKINAK I:

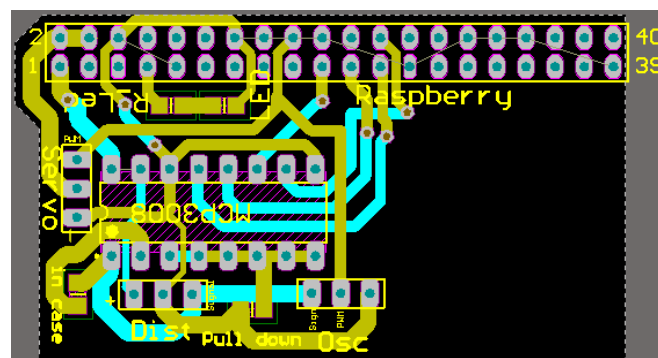
1. ESKEMA ELEKTRIKOA, KONEXIOAK ETA PCB-A

Ondoren, Ball & Beam sistema eraikitzeko jarraitutako pausuak azalduko dira. Lehenik eta behin, Irudia -ren konexio elektrikoak orri baten gainean egin dira eta ondoren, paperezko oinarri hau jarraitzen, *protoboard* baten egin da kableatzea. Behin beharrezkoak diren doiketa guztiak burutu ostean, PCB-aren diseinua *Altium* diseinu programa batean sartu egin da eta elementu bakoitzari esleituta duen *footprint*-a gehitu zaio.

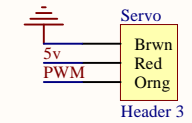
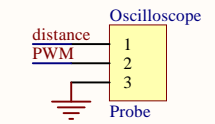
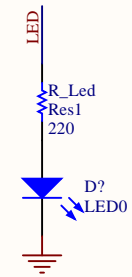
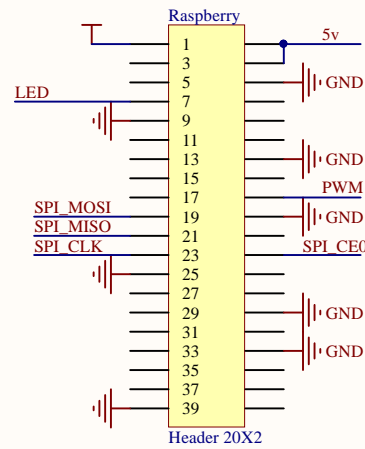
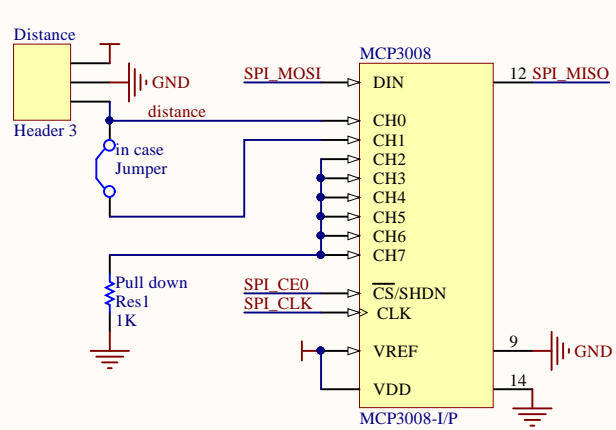


Irudia 51 Fabrikatu den PCB-a

PCB-a eskuz fabrikatu nahi izan denez, soldaketarako erraza izango den diseinua egin da, izan ere, fabrikatzera bidali eta eskuz fabrikatzearen arteko ezberdintasun handia dago. Fabrikatzera bidaltzen denean zuloen bidea eroalea da, eta ez da hala gertatzen pertsona-banako PCB-a ekoiztean, ezaugarri hori eskuz egin behar da alanbretxo bat soldatuz.

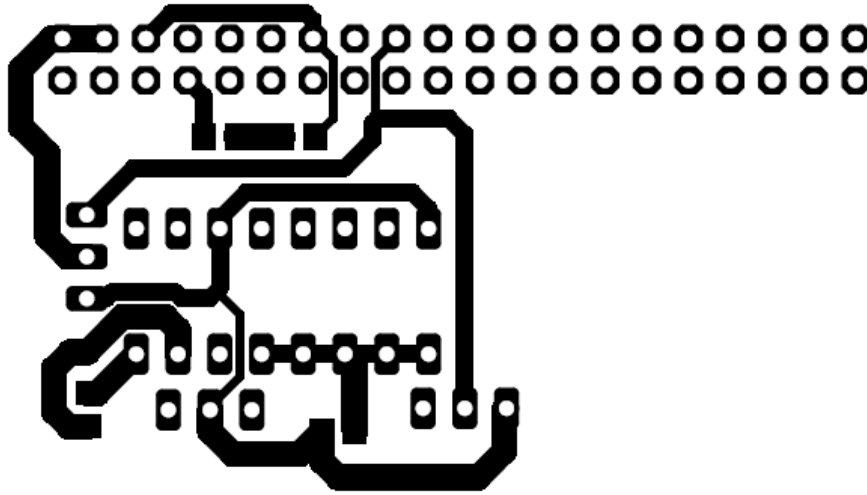


Irudia 52 PCB-aren board ikuspegia

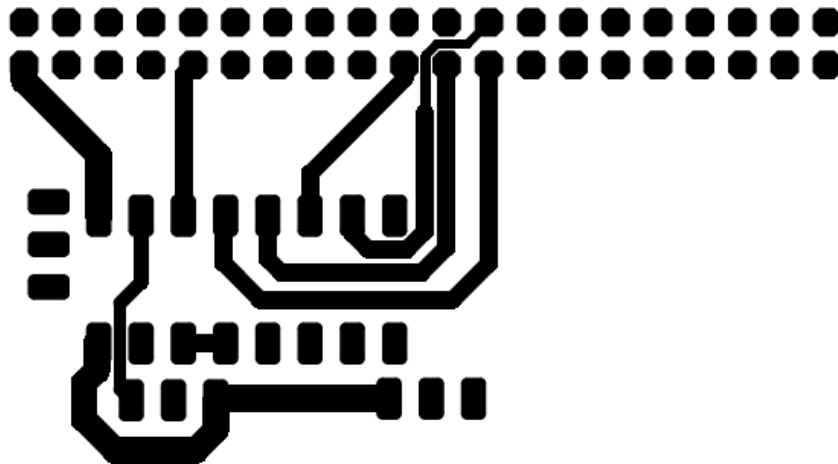


Title Ball & Beam, Gradu Amaierako Lana, Shield for Raspberry Pi 3B+		
Size A4	Number 1	Revision V1.1
Date: 12/02/2019	Sheet 1 of 1	
File: C:\Users\...\Shield.SchDoc	Drawn By: Markel Sesar Gil	

FOOTPRINT PATH



Irudia 54 PCB-aren goiko bista. Fabrikaziorako

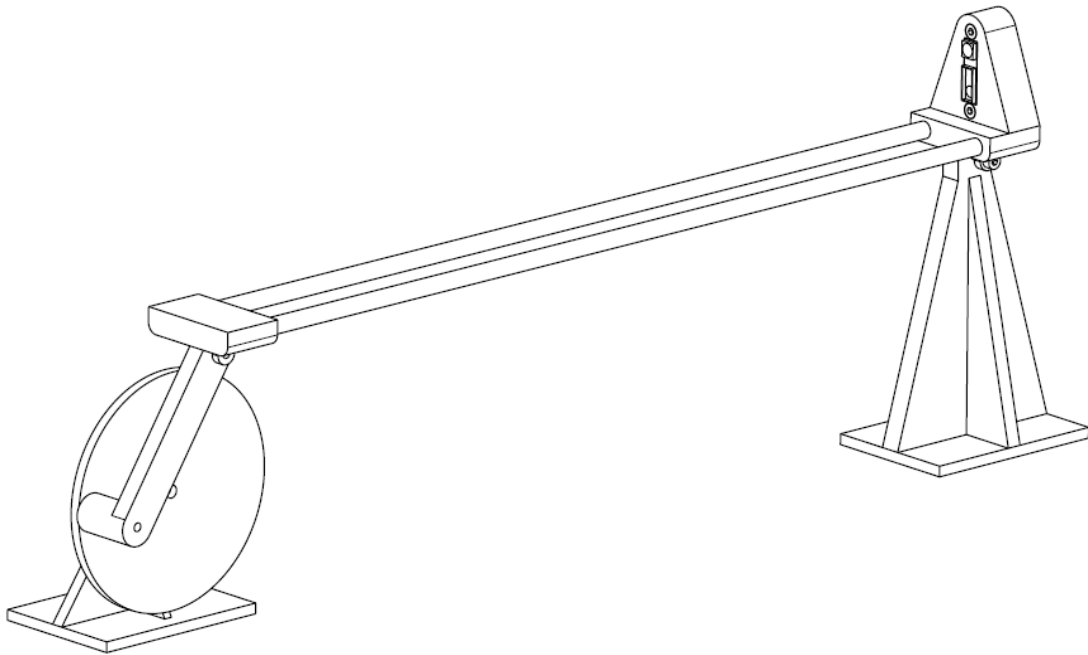


Irudia 55 PCB-aren Beheko bista. Fabrikazorako prest.

Kontuz ibili behar da orientazioarekin. Baliteke ispilu formatuan inprimatu behar izatea.

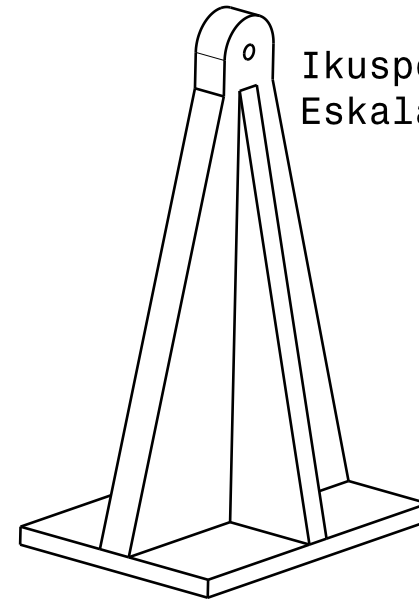
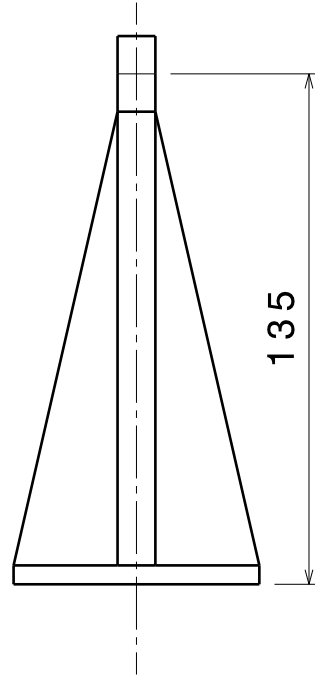
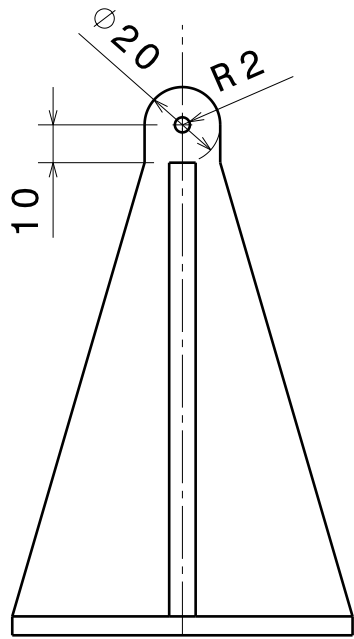
2. PROTOTIPATUTAKO 3 DIMENTSIOTAKO PIEZAK

Eranskinen atal honetan Ball & Beam sistema eraikitzeko behar izan diren 3 dimentsiotako piezen diseinua eta planoak aurkezten dira.

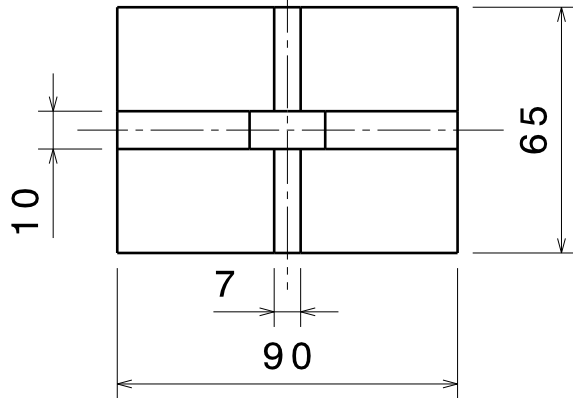


Ikuspegi isometrikoa
Eskala: 1:2

Irudia 56 Ball & Beam sistemaren simplifikazioa



Ikuspegi Isometrikoa
Eskala: 1:2



<p>This drawing is licensed under Creative Commons Attribution -NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)</p>		<h1>Ball & Beam System</h1>			
DRAWN BY MARKEL SESAR		DATE 08/02/2019		<h2>Rocker Base</h2>	
DESIGNED BY MARKEL SESAR		DATE 20/10/2018			
		SIZE A4	DRAWING NUMBER 01		REV 1
		SCALE 1:2	WEIGHT (kg) XXX	SHEET 1 / 1	

D

C

B

A

4

4

3

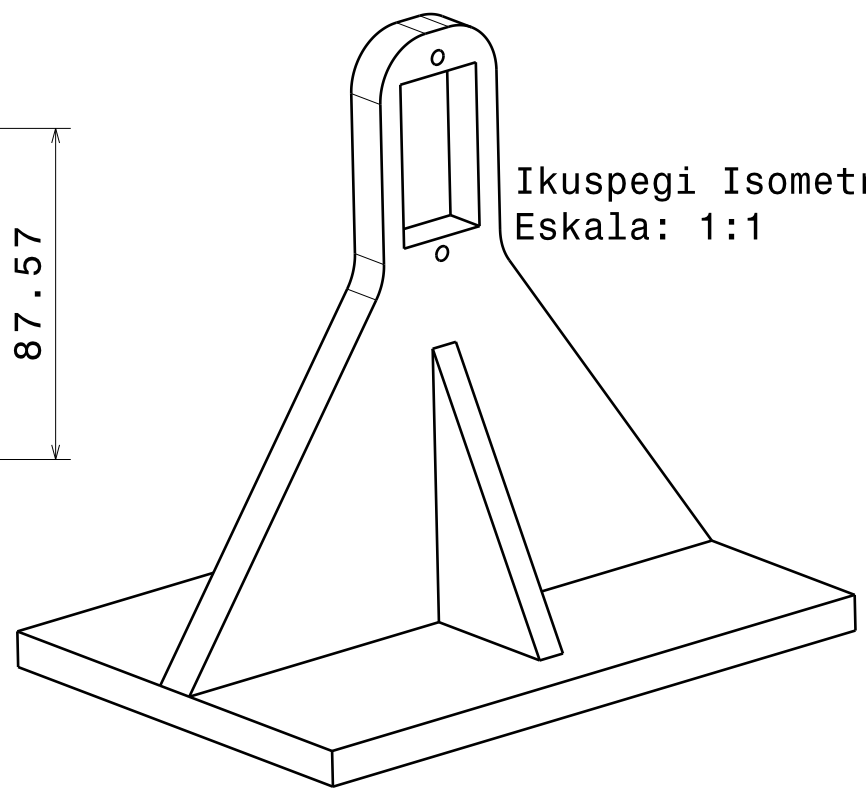
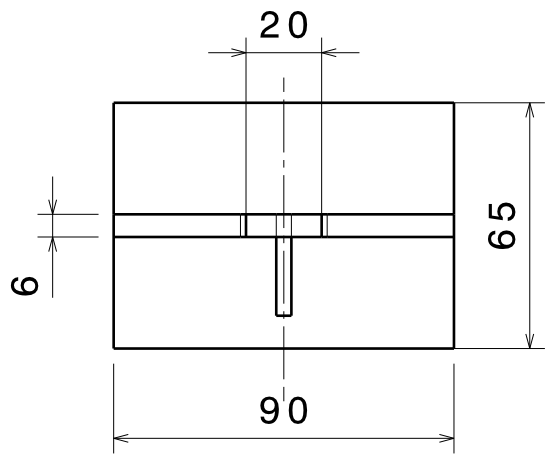
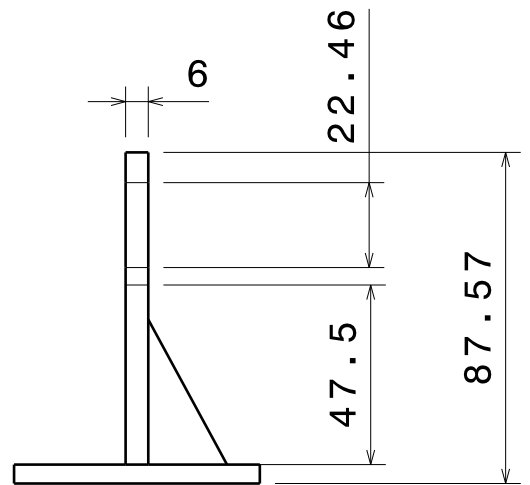
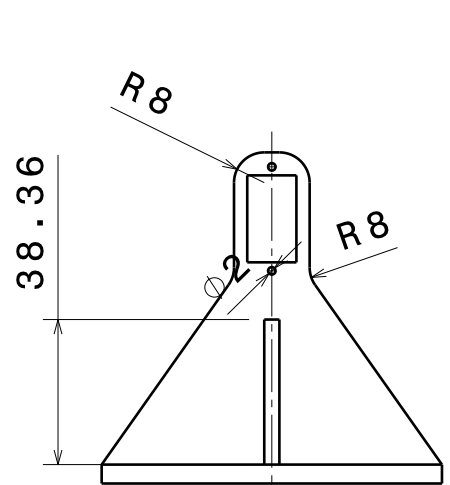
3

2

2

1

1



Ikuspegi Isometrikoa
Eskala: 1:1

<p>This drawing is licensed under Creative Commons Attribution -NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)</p>	
DRAWN BY MARKEL SESAR	DATE 08/02/2019
DESIGNED BY MARKEL SESAR	DATE 20/10/2018

<h1>Ball & Beam System</h1>			
DRAWING TITLE			
Rocker Base End			
SIZE A4	DRAWING NUMBER 02		REV 1
SCALE 1:2	WEIGHT (kg) XXX	SHEET 1/1	

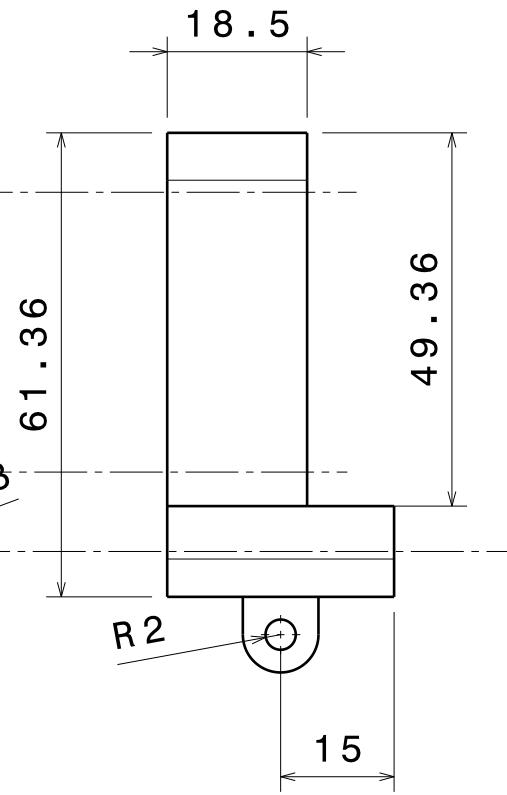
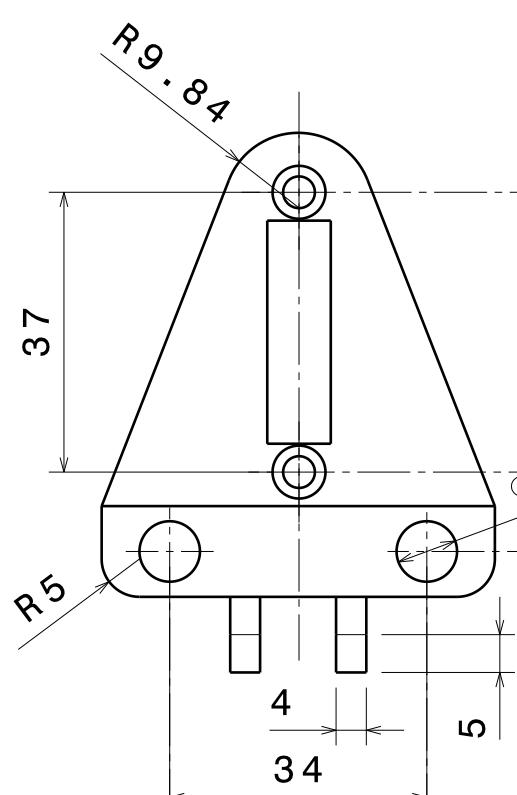
D

A

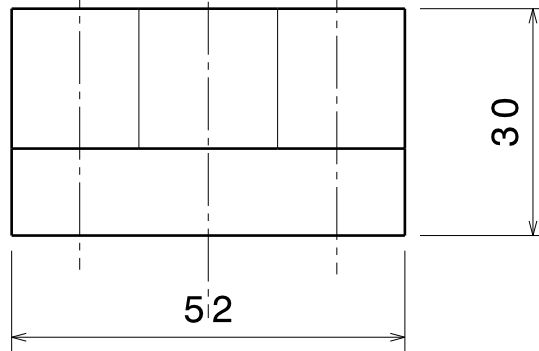
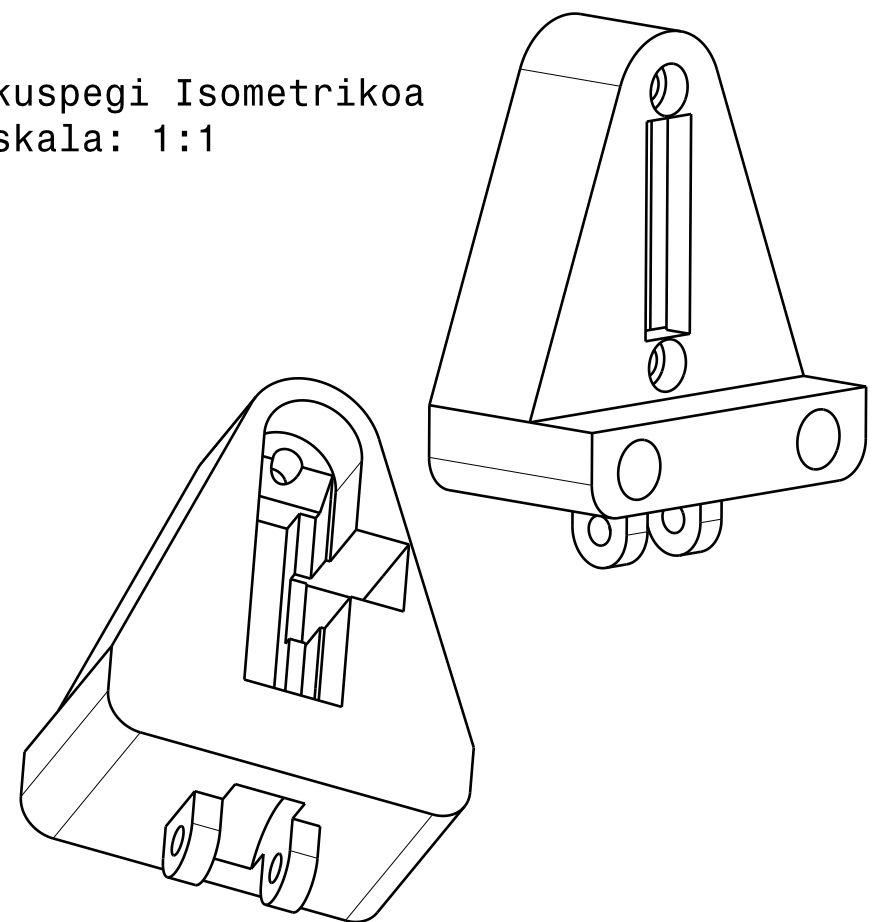
D C B A

4
3
2
1

4
3
2
1



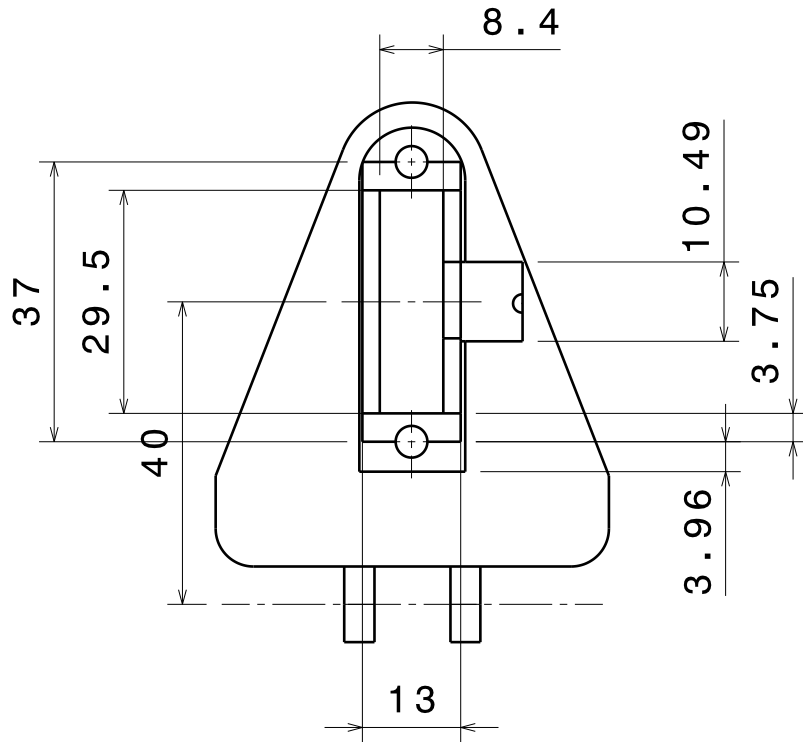
Ikuspegi Isometrikoa
Eskala: 1:1



<p>This drawing is licensed under Creative Commons Attribution -NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)</p>	
DRAWN BY MARKEL SESAR	DATE 08/02/2019
DESIGNED BY MARKEL SESAR	DATE 20/10/2018

Ball & Beam System			
DRAWING TITLE			
Rocker Mount			
SIZE A4	DRAWING NUMBER 03		REV 1
SCALE 1:1	WEIGHT (kg) XXX	SHEET 1/2	

D C B A



This drawing is licensed under
Creative Commons Attribution
-NonCommercial-ShareAlike 4.0
International (CC BY-NC-SA 4.0)

Ball & Beam System

DRAWING TITLE

Rocker Mount

DRAWN BY
MARKEL SESAR

DATE
08/02/2019

DESIGNED BY

DATE
20/10/2018

SIZE
A4

DRAWING NUMBER

03

REV

1

MARKEL SESAR

SCALE

1:1

WEIGHT (kg)

XXX

SHEET

2/2

D

C

B

A

4

4

3

3

2

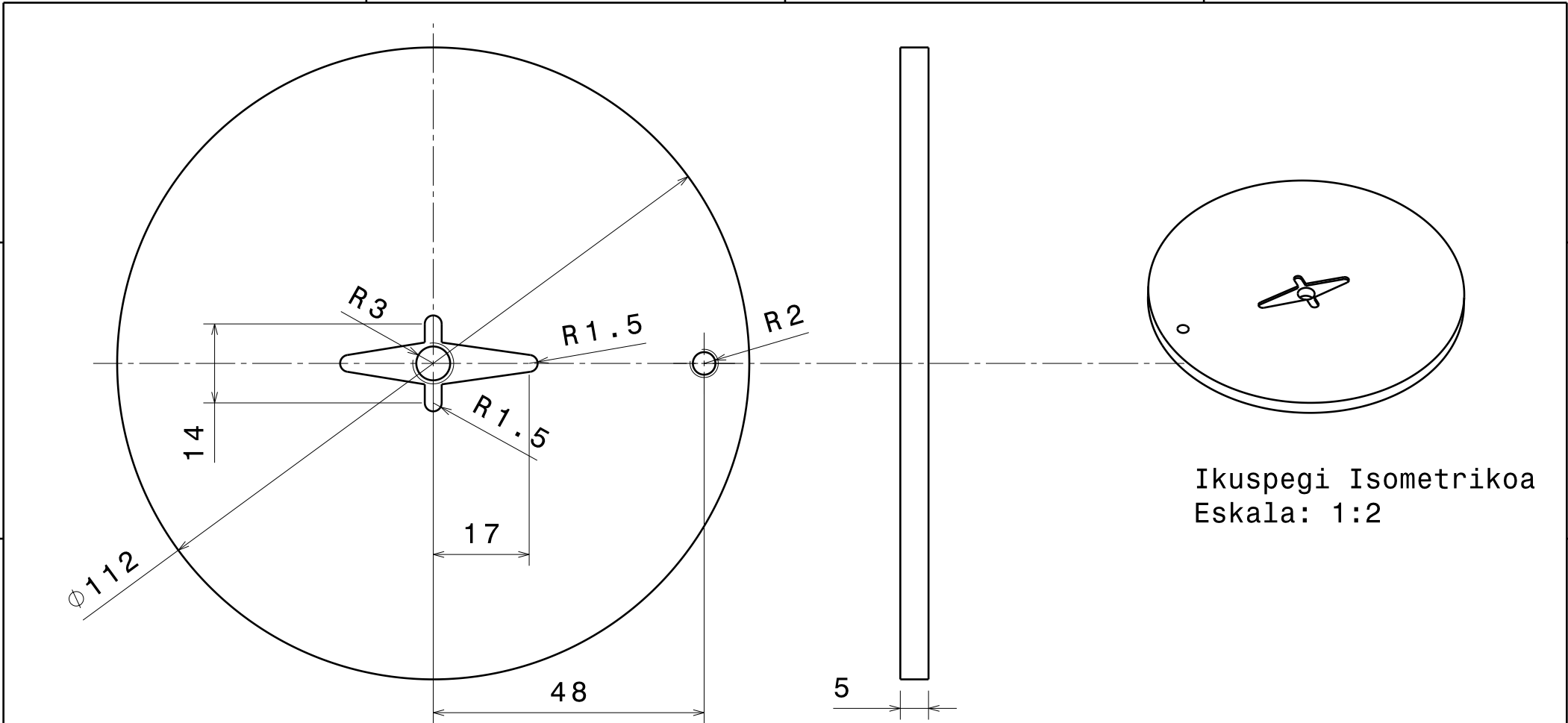
2

1

1

D

A



<p>This drawing is licensed under Creative Commons Attribution -NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)</p>	
DRAWN BY MARKEL SESAR	DATE 08/02/2019
DESIGNED BY MARKEL SESAR	DATE 20/10/2018

Ball & Beam System			
DRAWING TITLE			
Circle			
SIZE A4	DRAWING NUMBER 04		REV 1
SCALE 1:1	WEIGHT (kg) XXX	SHEET 1/1	

D

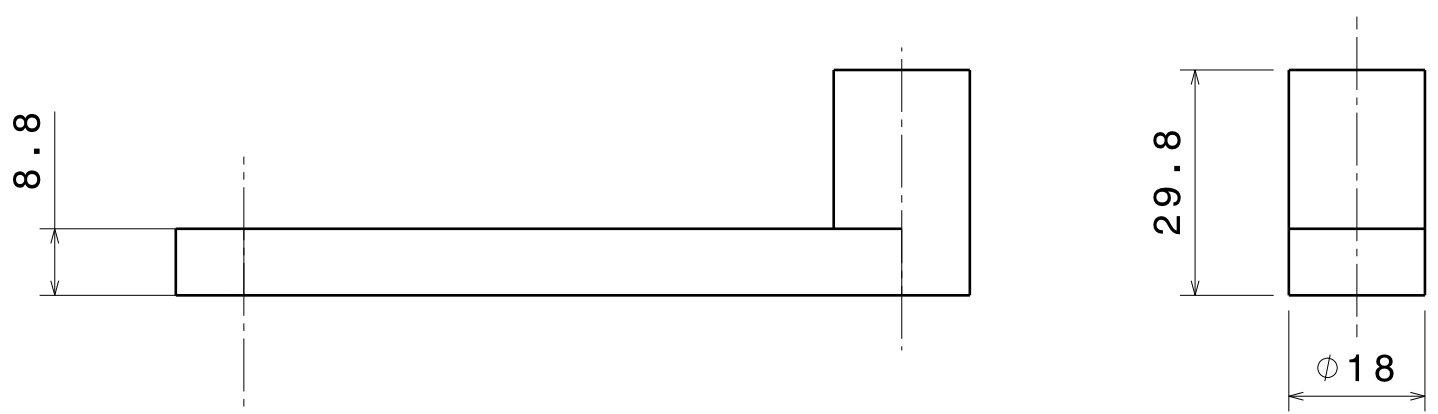
C

B

A

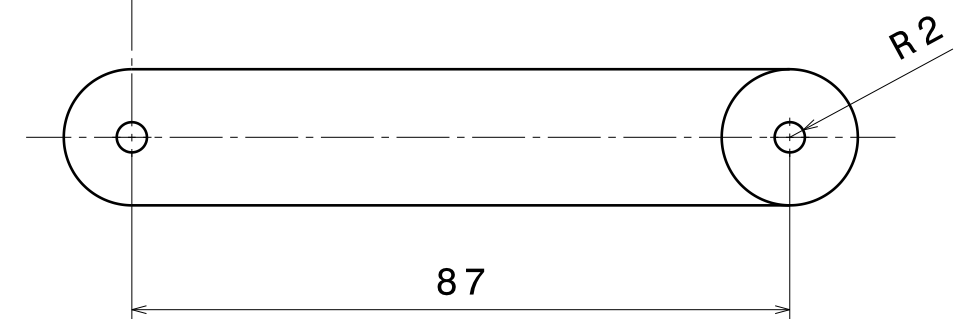
4

4



3

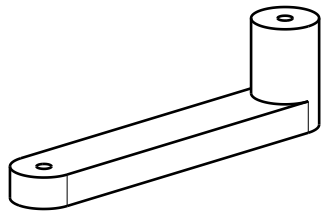
3



2

2

Ikuspegi Isometrikoa
Eskala: 1:2



<p>This drawing is licensed under Creative Commons Attribution -NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)</p>		<h1>Ball & Beam System</h1>					
DRAWN BY		DATE		<h2>Rocker Rod</h2>			
MARKEL SESAR		08/02/2019					
DESIGNED BY		DATE		SIZE	DRAWING NUMBER	REV	
MARKEL SESAR		20/10/2018		A4	05	1	
		SCALE	1:1	WEIGHT (kg)	XXX	SHEET	1/1

1

1

D

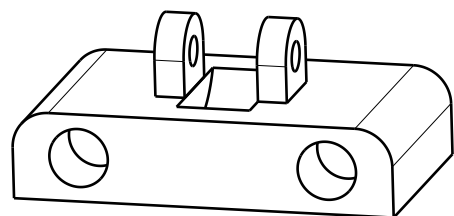
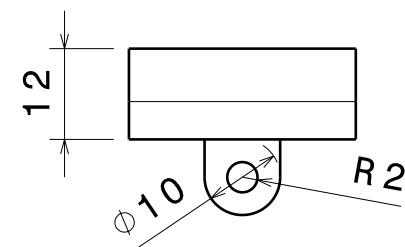
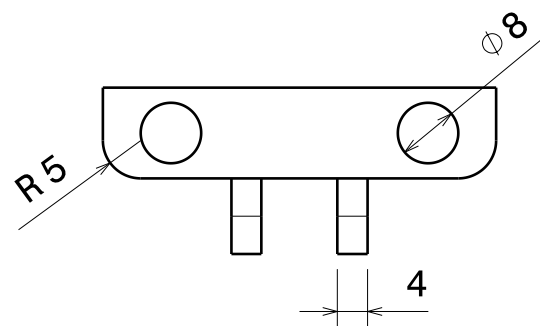
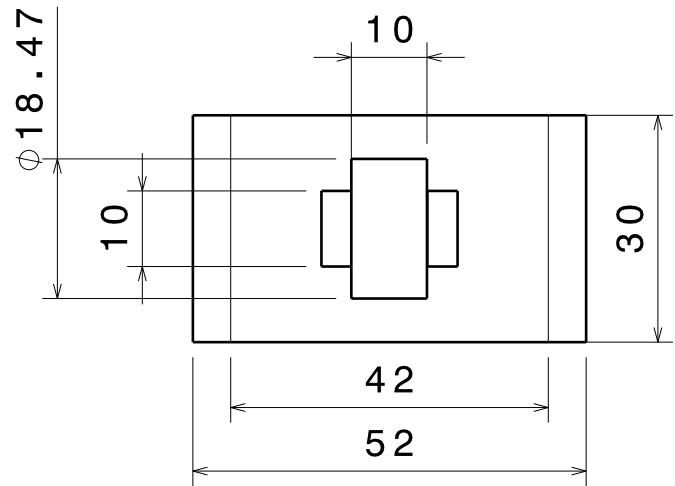
A

D

C

B

A



Ikuspegi Isometrikoa
Eskala: 1:1

<p>This drawing is licensed under Creative Commons Attribution -NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)</p>	
DRAWN BY MARKEL SESAR	DATE 08/02/2019
DESIGNED BY MARKEL SESAR	DATE 20/10/2018

<h1>Ball & Beam System</h1>			
DRAWING TITLE			
<h2>Rocker Mount End</h2>			
SIZE A4	DRAWING NUMBER 06		REV 1
SCALE 1:1	WEIGHT (kg) XXX	SHEET 1/1	

D

A

4

4

3

3

2

2

1

1

D

C

B

A

4

4

3

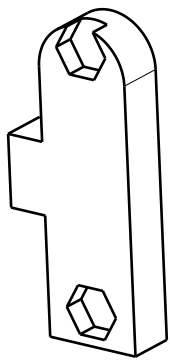
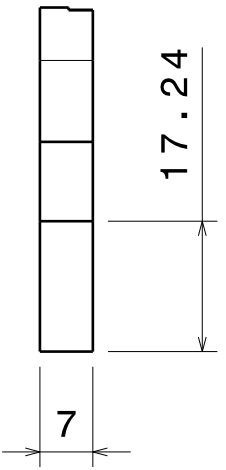
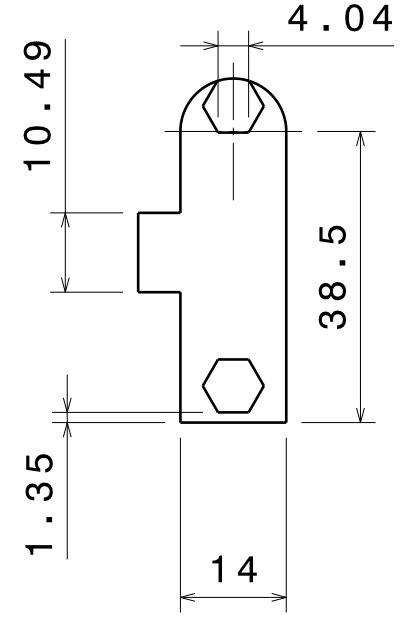
3

2

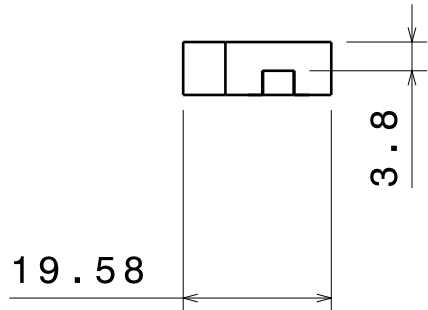
2

1

1



Ikuspegi Isometrikoa
Eskala: 1:1



<p>This drawing is licensed under Creative Commons Attribution -NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)</p>	
DRAWN BY MARKEL SESAR	DATE 08/02/2019
DESIGNED BY MARKEL SESAR	DATE 20/10/2018

<h1>Ball & Beam System</h1>			
DRAWING TITLE			
<h2>Rocker Mount Lid</h2>			
SIZE A4	DRAWING NUMBER 07		REV 1
SCALE 1:1	WEIGHT (kg) XXX	SHEET 1/1	

D

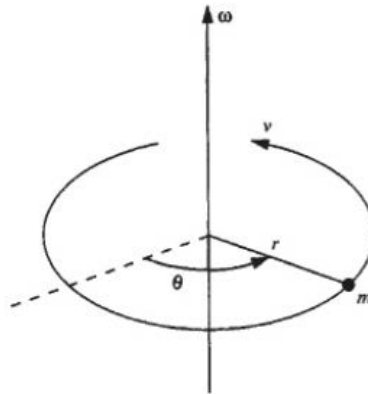
A

3. PLANTAREN MODELIZAZIO MATEMATIKOA

Lehenik eta behin gure plantaren modelo matematiko baliokidea atera behar dugu. Hori, Newtonen akzio erreakzio legeekin kalkulatu daiteke. Sistema estatiko baterako nahikoa izango litzateke formulazio simple horrekin, baina *ball and beam* sistema dinamikoarentzat, modelaziorik egokiena Lagrangeren mugimendu ekuazioak izango dira. Funtzean, energiaren kontzertazioaren printzipioan oinarrituta dago eta askoz ere zehatzagoa da. Energia totala beraz energia zinetiko totalaren eta energia potentzialaren arteko kenketa izango da.

Oinarri fisikoak, indar zentripeta:

$$F_{zent} = \frac{mv^2}{r} = m\omega^2 r = m\dot{\theta}^2 r \quad (0.1)$$



Irudia 57 Partikula baten mugimendu errotazionala

Mugimendu zuzenen energia zinetikoa kalkulatzeko:

$$K = \frac{1}{2}mv^2 \quad (0.2)$$

Errotazio energia zinetikoa hurrengo formularen bidez adieraziko da:

$$K_{errotazio} = \frac{1}{2}I\omega^2 \quad (0.3)$$

Jakinda, inertzia momentua honako hau dela:

$$I = \int_{vol} \rho(r)r^2 dr \quad (0.4)$$

m masa puntuala denean:

$$I = mr^2 \quad (0.5)$$

Horregatik:

$$K_{errotazio} = \frac{1}{2}mr^2\dot{\theta}^2 \quad (0.6)$$

Grabitazio inguru g batean, h altuera jakin batetara dagoen m masa baten energia potentziala hurrengo formularen bidez ezaguna da.

$$P = mgh \quad (0.7)$$

Kontserbazio sistema batentzako *Lagrange-ren mugimendu ekuazioa* honela definituta dago:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = \tau \quad (0.8)$$

Lagrangiarra energia zinetiko guztien eta energia potentzial guztien arteko diferentzia da.

$$L = K - P \quad (0.9)$$

Aztertutako sisteman, hainbat elementuk hartzen dute parte. Adibidez, hagatxo biartikulatua, gurpila, motorra, pilota eta habe luzea (pilotaren ibilbidea definituko duena). Habe luzearen ertz bat puntu finko batetara helduta dagoenez, azken bi elementu hauek (pilota eta habe) izango dira pilotaren jokaera definituko dutenak. Sistema aztertuz, pilota errodamenduan dago habearekiko. Horregatik, habearen energia zinetikoa (errotazio mugimendua) eta potentziala kalkulatu da, eta sistemari pilotaren energia zinetikoa (translazioa, errotazioa, eta habearekiko duen errotazio erlatiboa) eta potentziala gehituko zaio.

$$K_{pilota} = \frac{1}{2} m_p v^2 + \frac{1}{2} J_p \dot{\alpha}^2 = \frac{1}{2} m_p \dot{x}^2 + \frac{1}{2} J_p \left(\frac{\dot{x}}{R} \right)^2 \quad (0.10)$$

$$K_{habea} = \frac{1}{2} J_h \dot{\alpha}^2 \quad (0.11)$$

$$K_{totala} = K_{pilota} + K_{pilota \text{ habearekiko}} + K_{habea} \quad (0.12)$$

Pilotak habearekiko duen energia zinetikoa kalkulatzeko, steinerren formula erabiliz definituko da.

$$K_{pilota \text{ habearekiko}} = \frac{1}{2} (J_p + m_p x^2) \dot{\alpha}^2 \quad \text{Non, } J_h = J_p + m_p x^2 \quad (0.13)$$

$$K_{totala} = \frac{1}{2} m_p \dot{x}^2 + \frac{1}{2} J_p \left(\frac{\dot{x}}{R} \right)^2 + \frac{1}{2} (J_p + m_p x^2) \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} J_h \dot{\alpha}^2 \quad (0.14)$$

ENERGIA POTENTZIALA

$$P_{pilota} = m_p g x \sin \alpha \quad (0.15)$$

$$P_{habea} = m_h g \frac{l}{2} \sin \alpha \quad (0.16)$$

$$P_{totala} = P_{pilota} + P_{habea} = x m_p g \sin \alpha + \frac{l}{2} m_h g \sin \alpha \quad (0.17)$$

Ekuazio Lagrange-tarra honako hau izango da:

$$\begin{aligned}
 L = & \frac{1}{2} m_p \dot{x}^2 + \frac{1}{2} J_p \left(\frac{\dot{x}}{R} \right)^2 + \frac{1}{2} (J_p + m_p x^2) \dot{\alpha}^2 \\
 & + \frac{1}{2} J_h \dot{\alpha}^2 - \left(x m_p g \sin \alpha + \frac{l}{2} m_h g \sin \alpha \right)
 \end{aligned} \tag{0.18}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}} \\ \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (J_p + m_p x^2) \dot{\alpha} + J_h \dot{\alpha} \\ m_p \dot{x} + J_p \frac{\dot{x}}{R^2} \end{bmatrix} \tag{0.19}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} &= \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}} \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_p \ddot{\alpha} + m_p x^2 \ddot{\alpha} + 2 m_p x \dot{x} \dot{\alpha} + J_h \ddot{\alpha} \\ m_p \ddot{x} + J_p \frac{\ddot{x}}{R^2} \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} (J_p + m_p x^2 + J_h) \ddot{\alpha} + 2 m_p x \dot{x} \dot{\alpha} \\ \left(m_p + \frac{J_p}{R^2} \right) \ddot{x} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{0.20}$$

$$\frac{\partial L}{\partial q} \left(\left(\frac{1}{2} J_p \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} m_p x^2 \dot{\alpha}^2 \right) - \left(x m_p g \sin \alpha + \frac{l}{2} m_h g \sin \alpha \right) \right) \tag{0.21}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial L}{\partial q} &= \left[\begin{array}{c} -\left(xm_p g \sin \alpha + \frac{l}{2} m_h g \sin \alpha\right) \\ \frac{1}{2} (J_p + m_p x^2) \dot{\alpha}^2 - xm_p g \sin \alpha \end{array} \right] = \\
 &= m_p x \dot{\alpha}^2 - xm_p g \cos \alpha - m_p g \sin \alpha - \frac{l}{2} m_h g \cos \alpha = \\
 &= m_p x \dot{\alpha}^2 - m_p g \sin \alpha - \left(\frac{l}{2} m_h g + xm_p g\right) \cos \alpha = \\
 &= \left[\begin{array}{c} -\left(xm_p g \sin \alpha + \frac{l}{2} m_h g \sin \alpha\right) \\ m_p x \dot{\alpha}^2 - m_p g \sin \alpha \end{array} \right] =
 \end{aligned}
 \tag{0.22}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} &= \left(m_p + \frac{J_p}{R^2}\right) \ddot{x} + (J_p + m_p x^2 + J_h) \ddot{\alpha} + 2m_p x \dot{x} \dot{\alpha} \\
 &\quad - m_p x \dot{\alpha}^2 + xm_p g \cos \alpha + m_p g \sin \alpha + \frac{l}{2} m_h g \cos \alpha
 \end{aligned}
 \tag{0.23}$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}} - \frac{\partial L}{\partial \alpha} = \tau
 \tag{0.24}$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial L}{\partial x} = 0
 \tag{0.25}$$

$$\begin{bmatrix} \tau \\ 0 \end{bmatrix} =$$

$$= \left[\begin{array}{c} (J_p + m_p x^2 + J_h) \ddot{\alpha} + 2m_p x \dot{x} \dot{\alpha} \\ \left(m_p + \frac{J_p}{R^2}\right) \ddot{x} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} -\left(xm_p g \sin \alpha + \frac{l}{2} m_h g \sin \alpha\right) \\ m_p x \dot{\alpha}^2 - m_p g \sin \alpha \end{array} \right]
 \tag{0.26}$$

Hauxe izanda, sistema modelagarria da askatasun gradu bakarrarekin. Beste era batetara esanda, ez da behar torkea erlazionatu beharrik inklinazio angelua eta pilotaren distantzia dagoeneko erlazionatu dezakegulako.

$$\left(m_p + \frac{J_p}{R^2}\right) \ddot{x} + m_p g \text{Sen } \alpha - m_p x \dot{\alpha}^2 = 0 \quad (0.27)$$

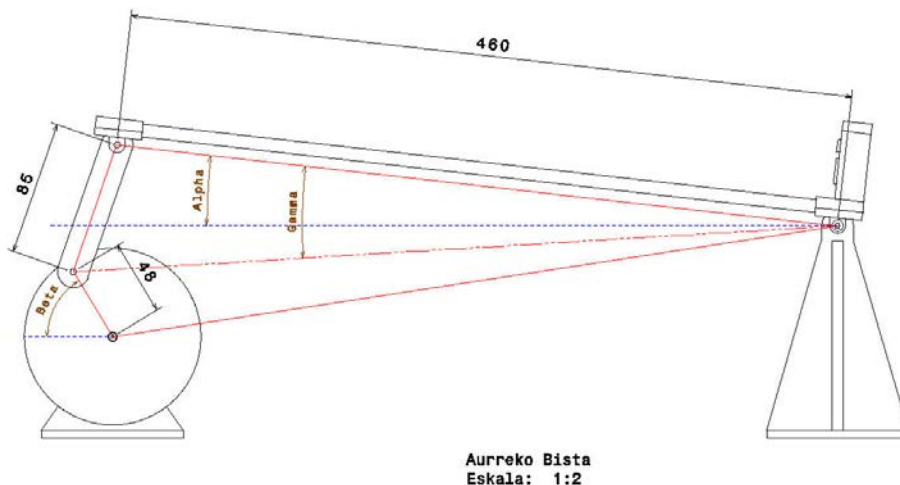
$$(J_p + m_p x^2 + J_h) \ddot{\alpha} + 2m_p x \dot{x} \dot{\alpha} + \left(x m_p g \text{Sin } \alpha + \frac{l}{2} m_h g \text{Sin } \alpha\right) = \tau \quad (0.28)$$

$$\left(m_p + \frac{J_p}{R^2}\right) \ddot{x} + m_p g \text{Sen } \alpha - m_p x \dot{\alpha}^2 = 0 \quad (0.29)$$

Habearen $\text{Sen } \alpha$ balio angelua hain txikia izango da zeinetan α gisa hartuko da. Era beran, abiadura angeluarra angelu oso txiki horren menpe dagoenez, gutxietsiko da. Beraz, hurbilketa ekuazio lineala horrela geratuko da:

$$\left(m_p + \frac{J_p}{R^2}\right) \ddot{x} = -m_p g \alpha \quad (0.30)$$

Orain, habearen eta motorraren arteko biraketa angelua erlazionatzea falta da. Beheko irudiko β angelua θ angelua bezala adierazita dago ekuazioetan.



Irudia 58 Sistemaren angeluen izenak eta distantziak

$$I = \sqrt{(L_0 + R \cos\beta)^2 + (h_0 + R \sin\beta)^2} \quad (0.31)$$

Cosinuaren teoremak definitzen duen moduan;

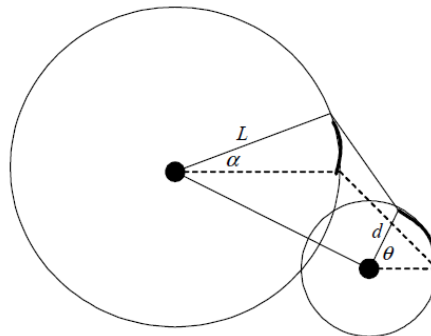
$$A = \arccos\left(\frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc}\right) \quad (0.32)$$

$$\gamma = \arccos\left(\frac{I^2 + L^2 - M^2}{2IL}\right) \quad (0.33)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{h_0 - R \sin\beta}{L_0 + R \cos\beta}\right) \quad (0.34)$$

$$\gamma = \varphi + \alpha \quad (0.35)$$

Angeluak erlazionatzeko beste metodo bat, radianen bidez izan daiteke.



Irudia 59 Angeluen arteko erlazioa

$$\alpha L = \theta R \rightarrow \alpha = \frac{\theta R}{L} \quad (0.36)$$

Formulak ordezkatzan:

$$\left(m_p + \frac{J_p}{R^2}\right) \ddot{x} = -m_p g \frac{\theta R}{L} \quad (0.37)$$

Laplace aplikatuz:

$$\left(m_p + \frac{J_p}{R^2}\right)X(s)s^2 = -m_p g \frac{R}{L} \theta(s) \quad (0.38)$$

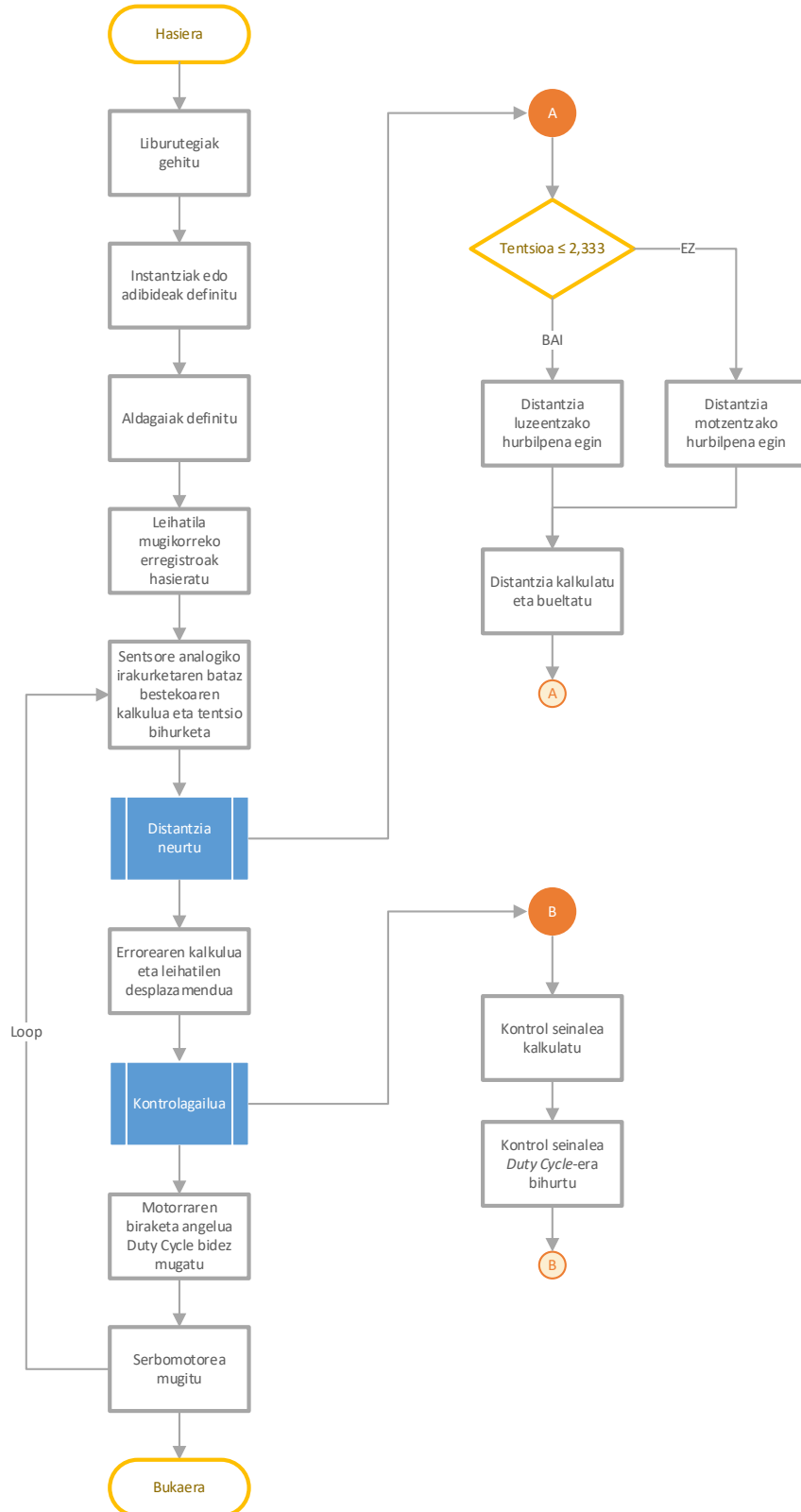
$$\text{Pilotaren inertzia} = J_p = \frac{2}{5} m_p R^2 \quad (0.39)$$

$$\left(m_p + \frac{2m_p}{5}\right)X(s)s^2 = -m_p g \frac{R}{L} \theta(s) \quad (0.40)$$

$$\left(\frac{7m_p}{5}\right)X(s)s^2 = -m_p g \frac{R}{L} \theta(s) \quad (0.41)$$

$$\text{TF} = \frac{X(s)}{\theta(s)} = Gp(s) = -g \frac{5R}{7Ls^2} \quad (0.42)$$

4. PROGRAMAZIO KODEA PYTHON-EN



Irudia 60 Fluxu diagrama

Ondoren, eguneratutako programa kodea aurki daiteke GitHub biltegi digitalean. Hemen esteka:

<https://github.com/mresar/>