

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

AC magnetometro multierresonanteen automatizazioaren azterketa

Egilea/Autor/a:
Eneko Mutiloa Rodríguez
Zuzendariak/Directores/as:
Fernando Plazaola
Eneko Garayo

Laburpena

Ikuspuntu medikotik, hipertermia hitzak gorputzaren ehun zein organo edo organismo osoaren tenperatura ohikoa baino handiagoa deneko egoera klinikoari egiten dio erreferentzia. Onkologiaren ikuspuntutik aldiz, minbizia dagoen tokian beroketan oinarritutako minbiziaren aurkako tratamenduak adierazten ditu. Tratamendu horiek ondo planifikatzeko eta zeluletan gertatzen diren beroketa mekanismoak ondo ulertzeko berebizikoa da xurgapen tasa espezifikoa, *SAR*-a. Izan ere, nanopartikulek eremu magnetikotik xurgatutako potentzia (*Specific Absorption Rate*) honek adierazten du.

Lan honetan nanopartikulen *SAR*-aren neurketa egiteko erabiltzen den *EM05* aplikagailu elektromagnetiko multierresonantea aztertu da, eta honen automatizazioa egiteko era ezberdinak aztertu dira. Horretarako, aplikagailu elektromagnetikoaren funtzionamenduak finkatutako baldintzak betetzen dituzten elementu elektronikoak bilatu eta aztertu dira. Elementu elektronikoz ezberdin horiek aplikagailuaren funtzionamenduan duten eragina aztertzeke graduan zehar hainbat irakasgaitan ikasitako *PSpice* programa erabili da.

Behin gailu elektroniko egokiak bilatuta eta aztertuta, hauekin automatizazioa era ezberdinetara nola egin daitekeen eztabaidatu da. Zehazki, irakurri/idatzi txartelak, Raspberry Pi-a eta Arduinoa erabiltzeko aukerak aztertu dira.

Lan honen lehenengo kapituluan hipertermia magnetikoaren eta *EM05* aplikagailu magnetiko multierresonantearen arteko lotura aztertu da. Bigarrenean eta hirugarrenean aplikagailu elektromagnetikoaren azterketa eta automatizazioa egin ahal izateko beharrezkoak diren elementu elektronikoaren azterketa egin da. Eta azkenik, laugarren kapituluan, automatizazioan erabiliko diren elementu elektronikoak finkatuta, automatizazioa nola egin daitekeen aztertu da.

Aurkibidea

1	Sarrera: Hiterpermia Magnetikoa eta EM05 Aplikagailu Elektromagnetikoa	5
2	EM05 aplikagailu elektromagnetiko multierresonantea	9
2.1	EM05-aren deskribapena	9
2.2	Etengailuen Korronteen Hasierako Identifikazioa	14
2.3	Etengailuek Jasandako Korronteen Kalkulua	19
3	Etengailu Elektronikoak	23
3.1	Etengailuen Ezaugarriak	23
3.2	Potentzia Mosfet-ak	24
3.3	Tiristoreak	30
3.4	IGBT	33
3.5	Egoera Solidoko Erreleak	36
4	Aplikadore Elektromagnetikoaren Automatizazioa	37
4.1	Automatizaziora sarrera	37
4.2	LabView eta irakurri/idatzi txartela	38
4.3	Raspberry Pi	40
4.4	Arduino	42
5	Ondorioak	43
	Bibliografia	45

Kapitulua 1

Sarrera: Hipertermia Magnetikoa eta EM05 Aplikagailu Elektromagnetikoa

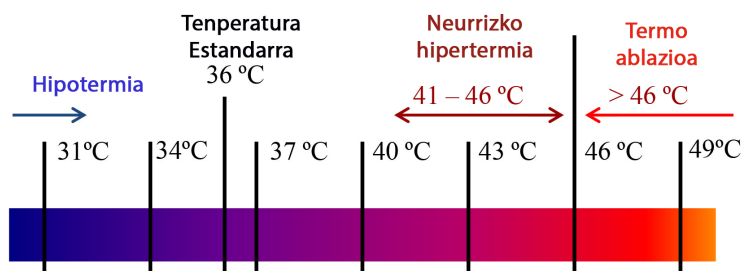
Medikuntzaren arloan, hipertermia hitzak gorputzaren ehun zein organo edo organismo osoan temperatura ohikoa baino handiagoa (36°C gizakion gorputzean) deneko egoera klinikoari egiten dio erreferentzia. Onkologian, aldiz, hipertermiak minbizia dagoen tokian bero sorreran oinarritutako tratamenduak adierazten ditu. Horrela, temperatura igoera horrek minbizi-ehunen fisiologia aldatu eta minbizidun zelulak hilarazten ditu [1].

Hipertermia berotzen den gunearen arabera sailkatu daiteke: hipertermia lokala, ingurune hipertermia eta gorputz osoko hipertermia. Hipertermia lokalean tumorea bakarrik berotzen da eta ingurune hipertermian aldiz, ingurune zabalago bat berotzen da (organo bat adibidez). Gorputz osoko hipertermian berriz, organismo osoa berotzen da.

Bestalde, hipertermia tratamenduak minbizidun eskualde batean gertatzen den temperatura igoeraren arabera ere sailkatu daitezke. Neurrizko hipertermian (hipertermia moderatua izenez ere ezaguna dena), minbizi-ehunen temperatura 41°C eta 46°C tartean egoten da (ikus 1.1 irudia). Zelula mailan, hipertermia moderatuak proteinen desnaturalizazioa [2], tolestea eta agregazioa eragin dezake; era berean, DNA-ren apurketa ere eragin dezake [3], honela zelulen heriotza gertatu daitekeelarik. Orokorrean, ez dago zelula osasuntsuen eta minbizidun zelulen arteko ezberdintasunik sentsibilitate termikoari dagokionez. Aldiz, tumore baten barnean aurkitu daitezkeen ingurumen faktoreek, oxigenazio eta pH baxuak adibidez, minbizidun zelulak hipertermia moderatuarekiko sentikorragoak bihurtu ditzakete. Hau dela eta, zelula hauek arinago hilko dira.

Minbizidun zeluletan eragina areagotzeko hipertermia tratamendua erradioterapia eta kimioterapia bezalako tratamenduekin konbinatu daiteke. Erradioterapiaren kasuan, erradiazioak DNA-n induzitutako kalteak erreparatzeko zelulek duten gaitasunarekin interferitzen du hipertermia dela eta [4]; kalteak erreparatzeko gaitasun hori txikitu denez, zelulen heriotza-tasa handitu egiten da. *In vivo* ikerkuntzek erakutsi dute erradioterapiaren ondorioak 1.2 eta 5 bitarteko faktore batekin hobetu daitezkeela hipertermiarekin batera erabiliz [5][6]. Bestalde, hipertermiak kimioterapiaren eragina hobetzen du; be-roak odolaren jariora eta ondorioz medikamentuen absortzioa handitzen baititu. Gainera,

botika batzuen dinamika indartu egiten da beroa dela eta.



Irudia 1.1: Ehunen temperatura ezberdinen arabera sailkatutako hipertermia mota ezberdinak.

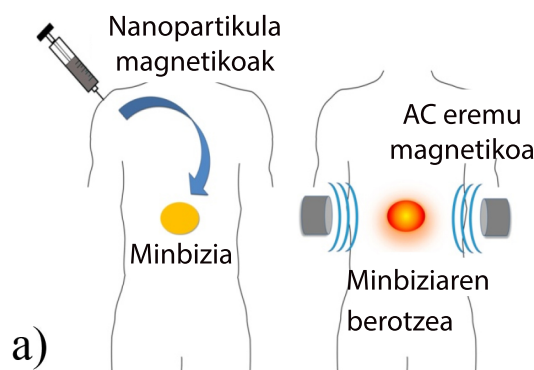
1.1 irudian ikus daitekeenez, minbizi-ehunen tenperatura asko igotzen bada ($>46^{\circ}\text{C}$), terapiari ablazio termikoa izena ematen zaio. Hipertermia mota honek gauzatzen dituen eraginak hipertermia moderatuak gauzatzen dituenetatik guztiz ezberdinak dira. Izan ere, ablazio termikoan zelulen heriotza kiskaltzearen edo koagulazioaren ondorioz (tenperaturaren arabera) ematen da. Heriotza eraginkorragoa da, baina material nekrotikoen bat-bateko askapenak bigarren mailako ondorioak eta hanturazko erantzun kritikoa sortu ditzake. Horregatik, bero hori minbizi-ehunetara guztiz mugatuta eduki behar da, ehun osasuntsuak ez kaltetzeko.

Aurreko mendearen erdialdera partikula magnetiko mikrometrikokoak proposatu ziren hipertermian erabiltzeko. Partikula hauek kanpoko RF eremu elektromagnetiko batek xurgatuko lukete energia. Bero iturri makroskopikoekin ez bezala, ez da kirurgiarik behar partikulak intereseko ehunean kokatzeko: kateter baten bidez injektatu daitezke zuzenean. Gainera, tenperaturaren homogeneitate handiagoa espero da bero iturri makroskopikoekin alderatuta.

Dena dela, XX. mendearen amaierara arte hipertermia ez zen zientzialarien interesa sustatzen hasi. 1990. hamarkadan Jordan-ek eta bere taldekideek nanopartikulek gizakiek jasan dezaketen eremu magnetiko oszilakorren pean energia asko xurgatzen dutela behatu zuten [7]. Tumorean kokatutako nanopartikulek bero iturri modura jokatzaren dute, kanpotik aplikatutako eremu magnetiko aldakorrek aktibatuta (ikus 1.2 a irudia).

Abantaila ugari ditu nanopartikula magnetikoak hipertermia magnetikorako erabiltzeak. Hasteko, beraien absortzio ratio handiak (gizakiek jasan dezaketen AC eremu magnetikoen mugen azpitik) energiaren jalkitzea eta tenperatura igoera tumoreen ingurura mugatzea ahalbidetzen du, ehun osasuntsuak inolako ondoriorik jasan gabe utziz. Are gehiago, gizakiek jasan dezaketen eremu magnetiko oszilakorrak sakon sartu daitezke giza gorputzaren barnean, honela tumore sakonen tratamendua ahalbidetuz, RF hipertermian edo hipertermia foto-termikoan ez bezala.

Bigarrenez, nanopartikulak zelulak ($1-10\mu\text{m}$) baino txikiagoak dira, baina birusekin, proteinekkin eta biomolekulekin konparagarriak. Beraz, odol jarioan zehar mugitzeko, mintz-biologikoak zeharkatzeko eta biomolekulekin elkarrekintzak izateko gai dira. Gainera, beraien izaera magnetikoari esker, nanopartikulen gorputzaren barneko kokapena kanpo eremu magnetikoen gradiente estatikoen bidez kontrolatu daiteke.



Irudia 1.2: Hipertermia magnetikoaren tratamendua adierazten duen diagrama.

Nanopartikula magnetikoak erabiltzearen beste abantaila bat zuzenean aukeratutako tumorean hipertermia eta kimioterapia tratamenduak konbinatzeko aukera da. Botikak minbizi-zeluletara eramateko nanopartikulak erabiltzearen ideia 70. hamarkadan sortu zen. Botikak estekatzaile kimiko ezberdinen bidez itsatsi daitezke nanopartikuletan. Ondoren, nanopartikulak tumorearen ondoan kokatuta daudenean, kanpo eremuen bidez berotu daitezke. Horrela, xurgatutako energia dela eta, botika eta nanopartikularen arteko lokailua puskatutakoan botika zuzenean tumorean askatzen da.

Bestalde, AC eremu magnetikoak erabiltzeak hipertermia tratamenduan segurtasun murrizketak ditu. Giza gorputzak jasan dezakeen RF eremu magnetikoaren intentsitatea, Faraday-ren indukzio legetik [8] ondorioztatu daiteke eta berarekin lotuta dagoen eremu elektrikoak (\vec{E}) mugatzen du. Ehun biologikoek eroankortasun jakin bat dutenez, eremu elektriko hauek *Eddy* korranteak sortu ditzakete. *Eddy* korrante horiek [8] $H_{app} \cdot f$ -ren araberrakoak dira. Hots, $H_{app} \cdot f$ adierazpenak finkatzen du limitea.

Balio honen limite esperimental bat Brezovich-ek finkatu zuen. Berak, 30 cm-ko diametroa duen zirkunferentzia baten kasuan pertsona batek inolako minik jasan gabe ordu bat egon daitekeela frogatu zuen, $H_{app} \cdot f < 4.85 \times 10^8 \text{ Hz} \cdot \text{A} \cdot \text{m}^{-1}$ den bitartean [9]. Gorputzaren gune txikiagoetarako, bularreko minbizia edo tamaina, R , txikiagoa duten animaliekin egindako esperimentuetan limite hau handitu egin daiteke. Esate baterako, gutxi gora-behera 7cm-ko diametroa duen ($R=3.5 \text{ cm}$) laborategi arratoi batentzako, $H_{app} \cdot f$ magnitudeak ez du $2 \times 10^{10} \text{ Hz} \cdot \text{A} \cdot \text{m}^{-1}$ limitea gainditu behar.

Beraz, nanopartikula lagin bat hipertermia tratamendu batekin bateragarria den edo ez jakiteko lagin horrek baldintza jakin batzuetan, aplikatutako eremu magnetikoaren maiztasuna eta intentistatea, duen xurgapen tasa espezifikoa SAR -a ezagutu behar da. Izan ere, nanopartikulen SAR -a oso txikia bada zelulak ez dira berotzen eta SAR -a oso handia bada, aldiz, hiltzerako punturaino berotzen dira. *EM05* aplikagailu elektromagnetikoa xede hori betetzeko, nanopartikulen SAR -a ezagutzea, erabiltzen da egun fakultatean. Aplikagailu honi esker, aplikatutako eremu magnetikoaren maiztasuna eta intentsitatea nahi diren moduan aldatu daitezke neurketak egiteko [10].

EM05 aplikagailu elektromagnetikoa hipertermia magnetikoan erabiliko diren nanopartikula magnetikoek AC eremu magnetiko batetik zenbateko energia xurgatzen duten jakiteko erabiltzen da, nanopartikula hauek hipertermia tratamendu batekin bateraga-

rriak diren jakiteko. Xurgatutako energia honi *SAR*, *Specific Absortion Rate*, deritzo eta berebizikoa da hipertermia tratamenduetan.

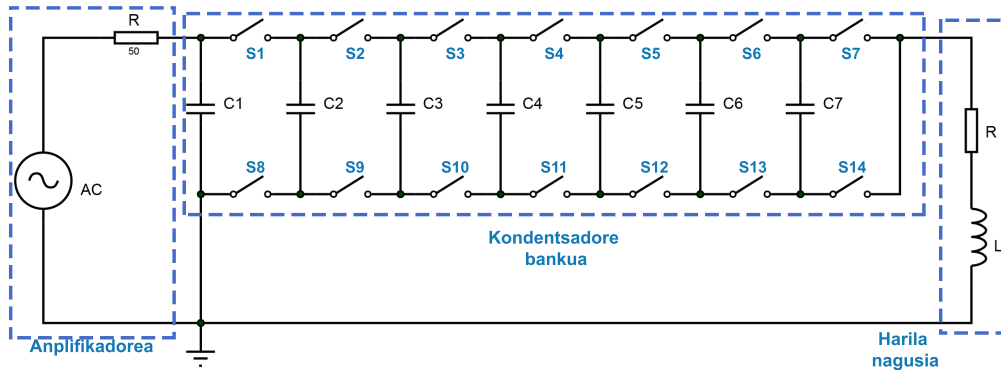
EM05 aplikagailu elektromagnetikoa *LabView* programaren bidez kontrolatzen da ia guztiz. Kontrol honen bidez laginaren tenperatura zenbatekoa den kontrolatzen da, eta horren arabera hurrengo neurketa noiz egingo den ere kontrolatzen da; maiztasun jakin batean zenbat neurketa egingo diren ere kontrolatu ahal da, eremu magnetikoaren zenbat intentsitate ezberdin erabiliko diren adieraziz programaren bidez. Aldiz, maiztasun ezberdinetan neurketak egin nahi badira, *EM05*-ak duen kondentsadore bankuan (ikus [2.1](#) irudia) dauden kondentsadoreen arteko loturak eskuz aldatu behar dira. Beraz, lan honen helburua neurketak erabat automatizatzeko mekanismo bat nola egin daitekeen aztertzea da.

Kapitulua 2

EM05 aplikagailu elektromagnetiko multierresonantea

2.1 *EM05*-aren deskribapena

Nanopartikula lagin bat hipertermia tratamendu batekin bateragarria den jakiteko, nanopartikulek xurgatutako energia neurtzeko (*SAR*), *EM05* aplikagailu elektromagnetikoa erabiltzen da [10], zeinak AC magnetometro bat ere baduen. Gailu hau 1140*LA Broadband Power Amplifier* [11] potentzia amplifikadore batez, *LCC* zirkuitu erresonante batez eta harila nagusi batez osatuta dago (ikus 2.1 irudia). 1140*LABroadband* amplifikadorea 1000 W-ko potentzia eskuragarria emateko gai da (P_{av}).

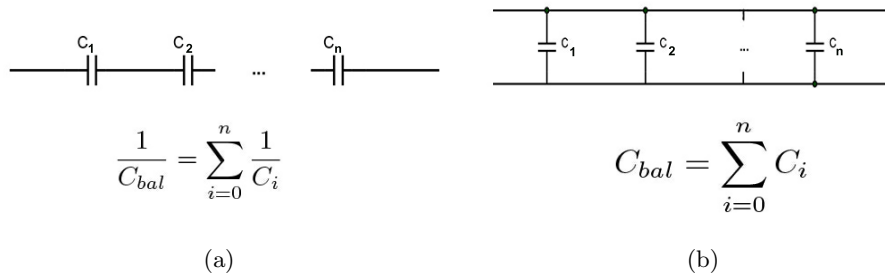


Irudia 2.1: *EM05* aplikagailu elektromagnetioaren eskema.

EM05-aren *LCC* zirkuitu erresonantea harila nagusia eta kondentsadore bankuaz osatuta dago. Kondentsadore bankua 100 nF-ko CHH6010M [12] zazpi kondentsadorez osatuta dago. CHH6010M kondentsadoreak korrante eta tentsio altuak jasan ditzakete: 250 A_{RMS} eta 700 V_{RMS} dira kondentsadore hauen maximoak hurrenez hurren. Zirkuituan beraiek duten ekarpen erresistikorra arbuigarria denez, zati hau eskematikotik kendu da [12].

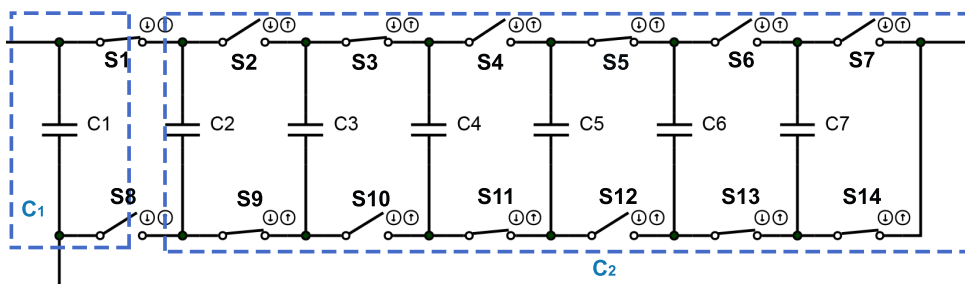
Kondentsadore banku hau ulertzeko pentsa daiteke kondentsadore bankua paraleloan kokatutako bi kondentsadorez osatuta dagoela, zeintzuk kondentsadore bankua osatzen duten kondentsadoreen baliokideak diren. Kondentsadore baliokide hauek seriean (ikus 2.2 (a) irudia) edo paraleloan (ikus 2.2 (b) irudia) batutako kondentsadorez osatuta egon-

go dira (ikus 2.3 eta 2.4 irudiak). Kondentsadore baliokide hauen baliokide ezberdinak dira, kondentsadore bankuko kondentsadoreak konektatzen diren moduaren arabera.

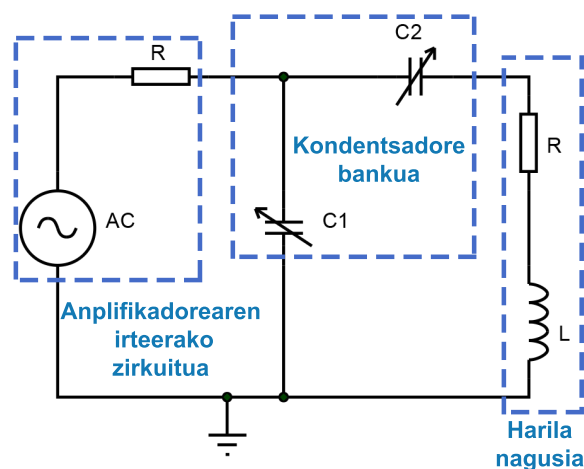


Irudia 2.2: Kondentsadoreak seriean eta paraleloan, beraien kondentsadore baliokidearen adierazpenarekin.

Kondentsadore baliokideen balio ezberdinak lortzeko, CHH6010 kondentsadoreen arteko etengailuak (S_1, S_2, \dots, S_{14}) era ezberdinetara konektatu daitezke (ikus 2.5 irudia), konfigurazio hauetako bakoitzean *EM05*-aren erresonantzia maiztasuna aldatu egiten delarik (ikus 2.1 taula).



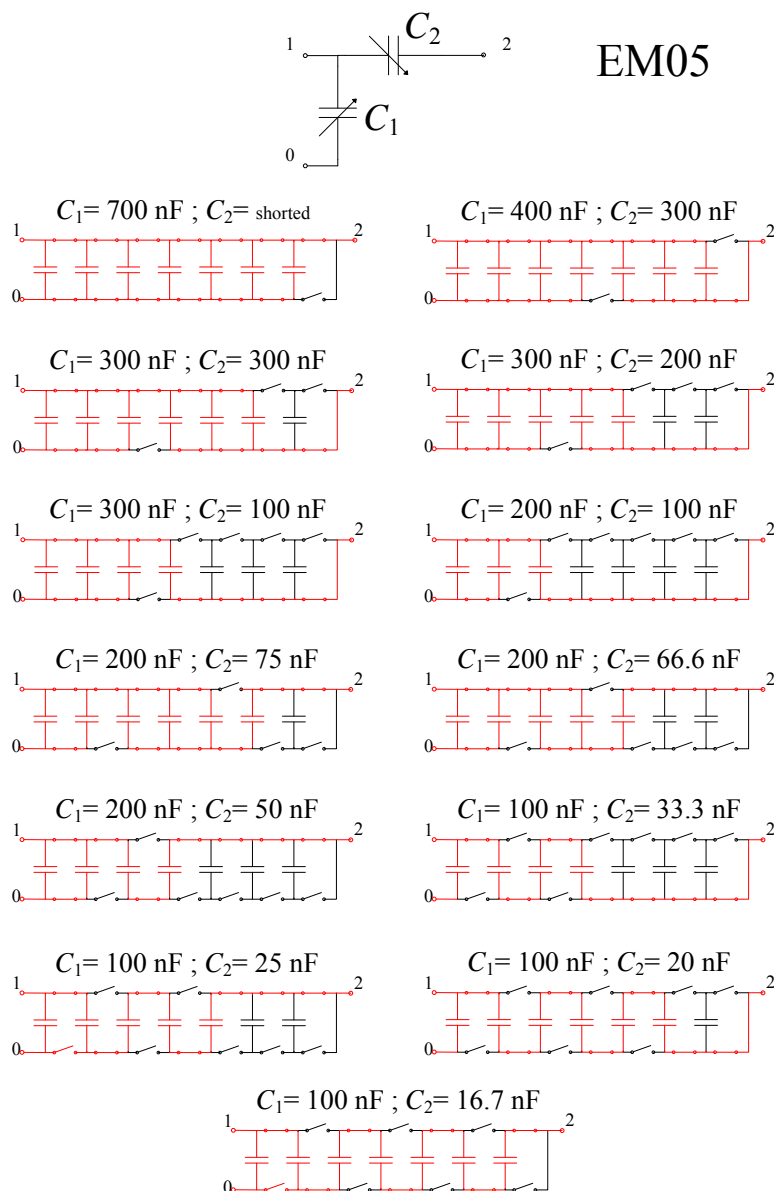
Irudia 2.3: *EM05*-aren kondentsadore bankuaren konfigurazioetako batean C_1 eta C_2 kondentsadore baliokideak. Kasu honetan C_1 kondentsadore bakar batez osatuta dago (C_1) eta C_2 , aldiz, seriean konektatutako bost kondentsadoretz (C_2, C_3, C_4, C_5 eta C_6 kondentsadoreak hain zuzen).



Irudia 2.4: *EM05* aplikagailuaren kondentsadore bankuaren kondentsadoreak era ezberdinetan lotuz lortzen den zirkuitu baliokidea.

LCC erresonantzia zirkuituaz gain, *EM05*-aren beste osagaietako bat potentzia anpli-

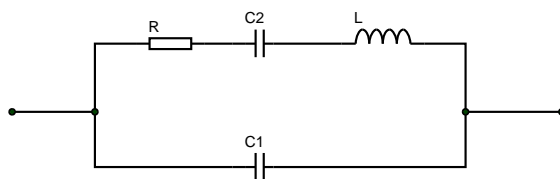
fikadorea da. Potentzia anplifikadore honek [11] 1000 W-ko potentzia eskuragarria du, baina potentzia hau guztia ez da erresonantzia zirkuituak jasotzen duen potentzia. Hau da, potentzia transferentzia ez da totala. Hau honela, maiztasun ezberdinetan kargaren potentziaren eta anplifikadorearen potentzia eskuragarriaren arteko erlazioa 2.1 taulan ikus daiteke [10].



Irudia 2.5: EM05 aplikagailuaren kondentsadore bankuaren konfigurazio ezberdinak eta kondentsadore baliokideen balioak.

2.5 irudiko lehenengo eskematikoan agertzen den $C_2 = \text{Shorted}$ adierazpenak esan nahi du C_2 kondentsadore baliokiderik ez dagoela. Esan den bezala, kondentsadore bankuaren konfigurazioa aldatuz gero EM05-aren erresonantzia maiztasuna aldatu egiten da. Izan ere, kondentsadore bankua 2.6 irudian agertzen den eskematikoaren berdina da.

2.6 irudiko kondentsadore bankuaren erresonantzia maiztasuna ondorengo moduan



Irudia 2.6: Kondentsadore bankuaren eskematikoa.

kalkulatu daiteke, $X_1 = -1/C_1\omega$ eta $X_2 = L\omega - 1/C_2\omega$ izanik. Hasteko eskematikoan paraleloan dauden bi inpedantziak zenbatekoak diren kalkulatu da:

$$Z_{up} = R + jX_2 \quad (2.1)$$

$$Z_{down} = jX_1 \quad (2.2)$$

Beraz, inpedantzia baliokidea, hauen bien paraleloa dena:

$$Z_{bal} = \frac{X_1^2 R}{R^2 + (X_1 + X_2)^2} + jX_1 \frac{R^2 + X_2(X_1 + X_2)}{R^2 + (X_1 + X_2)^2} \quad (2.3)$$

2.3 ekuazioko alde erreala inpedantziaren zati erresistikorra da, eta alde irudikaria inpedantziaren erreaktantzia. Erresonantzia maiztasunean, erreaktantzia nulua denez honakoa da askatu beharreko ekuazioa:

$$R^2 + X_2(X_1 + X_2) = 0 \quad (2.4)$$

hemen X_1 eta X_2 ordezkatuz gero:

$$R^2 + \left(L\omega_r - \frac{1}{\omega_r C_2} \right) \left(L\omega_r - \frac{1}{\omega_r} \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2} \right) = 0 \quad (2.5)$$

jakinda $C_s = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$ dela eta $\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$ dela, terminoak berrantolatzen badira:

$$L^2 \omega_r^4 + \omega_r^2 \left(-\frac{L}{C_s} - \frac{L}{C_2} + R^2 \right) + \frac{1}{C_2 C_s} = 0 \quad (2.6)$$

C_s ordezkatuz gero ω_r honela geratzen da:

$$\omega_r^2 = \frac{\frac{L}{C_1} + \frac{2L}{C_2} \pm \frac{L}{C_1}}{2L^2} \quad (2.7)$$

ω_r -ren bigarren soluzioa 2.6 irudiko goiko adarraren erresonantzia maiztasuna da. Hau da RLC zirkuitu baten erresonantzia maiztasuna. Beraz, interesgarria den soluzioa lehenengoa da: $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_s}}$, zeina kondentsadore bankuaren erresonantzia maiztasuna izango den.

Maiztasun erresonantzia honetan, 2.3 ekuazioa ebaluatuz gero 2.8 ekuazioan dagoena lortzen da hurbilketa batzuen ostean. Ekuazioa garatuz gero erresonantzia maiztasun

horretan, $(C_1 + C_2 - C_1 C_2 \omega_r^2 L)^2 / C_2^2$ gai bat agertzen da. Ezaguna da $C_x \sim 10^{-9} F$ direla eta $L \sim 10^{-9} H$ dela [12], beraz, gai hau arbuigarria da eta 2.3 ekuazioa erresonantzia maiztasunean honela geratzen da:

$$Z_{bal} \approx \frac{1}{C_1^2 R 4 \pi^2 f_r^2} = \frac{LC_2}{C_1 R (C_1 + C_2)} \quad (2.8)$$

Konfigurazioa	C_1	C_2	f (MHz)	P_l/P_{av}
1	700	Zirkuitu laburtua	0.149	0.87
2	400	300	0.302	1
3	300	300	0.323	0.94
4	300	200	0.360	0.98
5	300	100	0.455	0.96
6	200	100	0.481	0.98
7	200	75	0.531	1
8	200	66	0.554	0.99
9	200	50	0.618	0.95
10	100	33	0.783	0.97
11	100	25	0.869	1
12	100	20	0.960	0.98
13	100	16	1.030	0.95

Taula 2.1: EM05-aren konfigurazio ezberdinen erresonantzia maiztasuna, eta beraietan dagoen potentzia transferentzia.

Azkenik, EM05 aplikagailu elektromagnetikoak harila nagusia du. Harila hau, seriean konektatutako induktore eta erresistentzia baten bidez ordezkatu daiteke. Induktoreak $L = 0.74 \mu H$ -ko induktantzia du eta bere erresistentzia maiztasunarekin aldakorra da. Induktorearen balioa kalkulatzeko elementu finituen metodoa erabiltzen duen FEMM (*Finite Element Method Magnetic*) [13] programa erabili da. Aplikagailu elektromagnetikoak maiztasun ezberdinetan eduki dezakeenez erresonantzia, beharrezkoa da erresistentzia horren balioa ezagutzea maiztasun horietan guztietan.

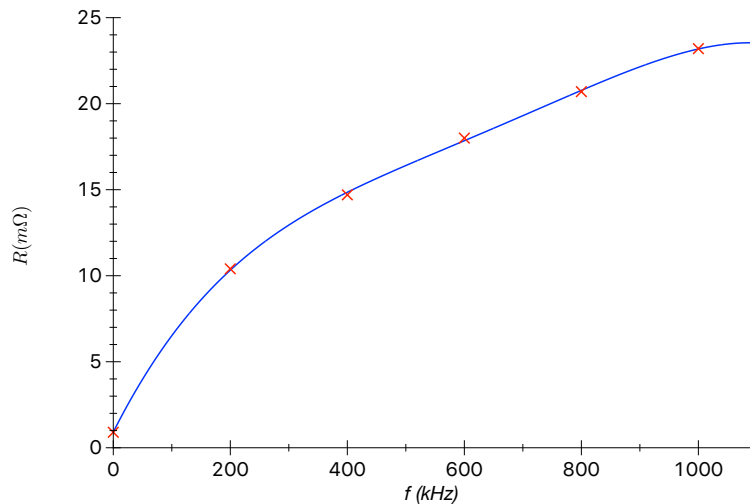
Horretarako, erresistentziaren balio ezberdinak kalkulatu dira maiztasun ezberdinetan (ikus 2.2 taula) eta ondoren, 4. mailako polinomio bat erabiliz, puntu horien doiketa egin da 2.7 irudian ikus daitekeen moduan. 2.2 taulako balioak kalkulatzeko FEMM programa erabili da, zeinak elementu finituen metodoa erabiltzen duen.

f (kHz)	R_{harila}^{esp} (mΩ)
DC	0.9
200	10.4
400	14.7
600	18
800	20.7
1000	23.2

Taula 2.2: Harilaren ereduko erresistentziaren balioak neurtutako maiztasun ezberdinetan.

2.2 taulako puntuak 4. mailako polinomio batekin (2.9) doituz gero, 2.3 taulako erresistentziaren balioak lortzen dira EM05-aren konfigurazio ezberdinetarako.

$$R = -4.947910^{-11} f^4 + 1.292810^{-7} f^3 - 0.00012476 f^2 + 0.067224 f + 0.91508 \quad (2.9)$$



Irudia 2.7: Harilaren neurtutako erresistentziaren puntuak eta 4. mailako polinomioarekin egindako doiketa.

$f(kHz)$	$R_{harila}(m\Omega)$
149	9.01
302	14.43
323	15.01
360	15.97
455	18.07
481	18.55
531	19.40
554	19.75
618	20.56
783	21.43
869	20.91
960	19.27
1030	17.04

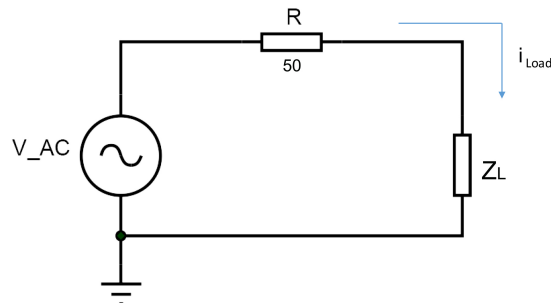
Taula 2.3: Harilaren ereduko erresistentziaren balio doituak maiztasun ezberdinetan.

2.2 Etengailuen Korronteen Hasierako Identifikazioa

EM05-aren kondentsadore bankutik zirkulatuko diren korronteak oso handiak izango dira. Izan ere, aurreko atalean ikusi denez, *EM05*-aren sarreran potentzia amplifikadore bat dago eta honek, $P = VI$ denez, korronte handi bat sortuko du, zeina hipertermia tratamenduetan beharrezkoa den eremu magnetikoa sortzeko erabiltzen den. Hori dela eta, etengailuak edozein elementu elektronikorengatik ordezkatu baino lehen, beraiek jasaten duten korrontea zenbatekoa den jakitea beharrezkoa da etengailu elektronikoko berria erre ez dadin.

Korronte horiek zenbatekoak diren jakiteko, *EM05*-aren simulazioa egin da *PSpice* programarekin [14]. Simulazio hau gailuaren erresonantzia maiztasun guztientzako egin da, bakoitzak bere kondentsadore bankuaren konfigurazioa izanda, maiztasun guztietan etengailuetatik igaroko den korrontea ez delako berdina izango. Hori dela eta, simulazio guztiak burutakoan erresonantzia maiztasun bakoitzean zein etengailuk jasaten duen korronte gehien begiratu behar da.

Dena dela, simulazioa egin ahal izateko, potentzia anplifikadoreak zirkuituaren sarreran zenbateko tentsio diferentzia ezarten duen jakitea beharrezkoa da, gero *AC* [14] simulazioa egin ahal izateko. Horretarako, *EM05*-aren zirkuitu baliokide bat (ikus 2.8 irudia) eta konfigurazio bakoitzean anplifikadorearen eta zirkuituaren arteko potentzia transferentzia erabili dira.



Irudia 2.8: *EM05*-aren zirkuitu baliokidearen eskema.

2.8 irudian ikus daiteke kargaren inpedantzia erabili dela (ikus 2.4 taula), tentsio diferentzia hori zenbatekoa den jakiteko.

$$i_{load}^2 = \frac{P_{av}}{Z_{Load} + 50} \quad (2.10)$$

$$V_{load} = \sqrt{P(Z_{Load} + 50)} \quad (2.11)$$

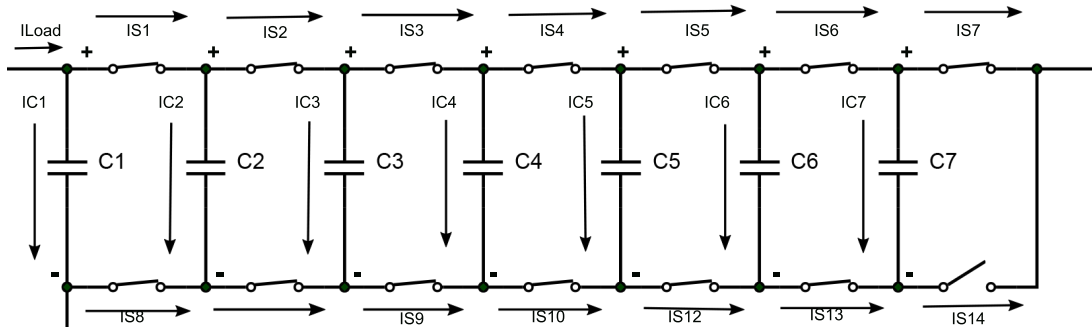
Hau honela, *EM05*-aren konfigurazio bakoitzerako honakoak dira lortu diren sarrerako tentsio diferentziak:

f (MHz)	P_l/P_{av}	$ Z_L (\Omega)$	$V_{load}(V)$
0.149	0.87	100.90	362.33
0.302	1	54.37	323.07
0.323	0.94	81.88	352.09
0.360	0.98	59.08	326.96
0.455	0.96	33.29	282.77
0.481	0.98	64.38	334.80
0.531	1	48.82	314.53
0.554	0.99	42.66	302.87
0.618	0.95	32.35	279.70
0.783	0.97	70.52	341.92
0.869	1	47.41	312.11
0.960	0.98	37.98	293.64
1.030	0.95	31.12	277.61

Taula 2.4: *EM05*-aren konfigurazio ezberdinen erresonantzia maiztasuna, eta beraietan dagoen potentzia transferentzia. Anplifikadoreak eman dezakeen potentzia, $P_{av} = 1000W$ da.

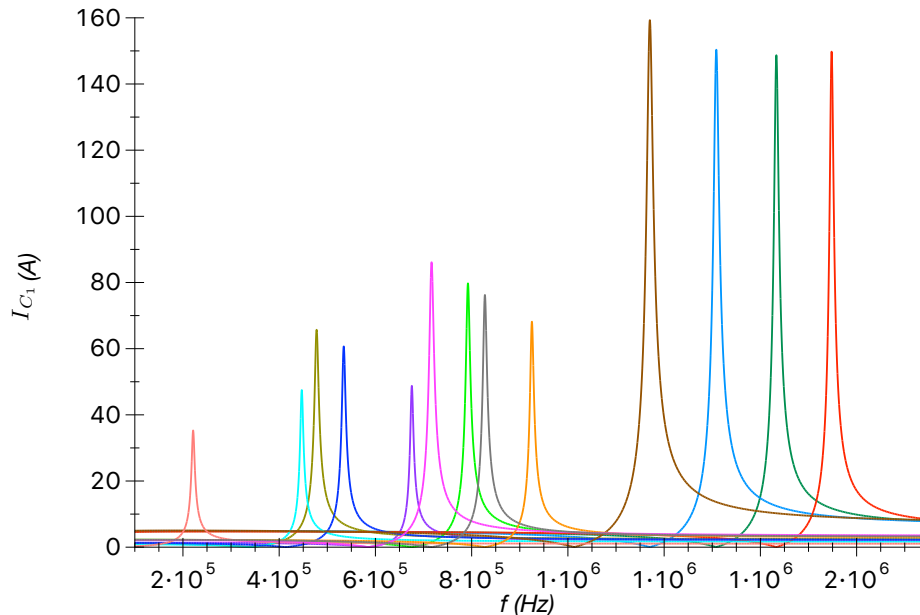
2.4 taulako tentsioa ezagututa, *PSpice*-en *AC* simulazioak egin dira. Simulazio haue-tan *PSpice*-k ez du uzten etengailuetan anperimetririk jartzen, baina beste era batera jakin daiteke zenbateko korronea pasatzen den kondentsadoreetatik. Beraz, konfigurazio bakoitzean, kondentsadore bakoitzetik zenbateko korronea pasatzen den jakinda, eta *Kirchhoff*-en legeak aplikatuta, etengailu bakoitzetik zenbateko korronea igarotzen den jakin daiteke. Honen adibide bat ikusteko, 2.9 irudian 149kHz-ko konfigurazioa irudikatu da. Bertan, kondentsadoreetatik igarotzen diren korronteen noranzkoak, kondentsadoreen

nodoen arteko tentsio diferentzia begiratuta ondorioztatu dira.



Irudia 2.9: *EM05*-aren kondentsadore bankuaren 149kHz-ko konfigurazioaren eskema eta bertatik igarotzen diren korronteak.

Kondentsadore bakoitzaren korrontea *AC* simulaziotik lortu da, eta 2.6 taulan bildu dira korronteen balioak. *AC* simulazioa egindakoan ikusi da *EM05*-arentzako erabili den eredua, 2.1 irudian agertzen dena, ez dela egokia. Izan ere, lortu diren zirkuituaren erresonantzia maiztasunak, *EM05* aplikagailu elektromagnetikoa sare aztertzailearekin (*Network Analyzer*) aztertzean lortzen diren erresonantzia maiztasunak (2.4 taulan agertzen direnak) baino handiagoak dira. Hau ikusteko, C_1 kondentsadoretik pasatzen den korrontea irudikatu da 2.10 irudian (C_1 kondentsadorea bakarrik irudikatu da, kondentsadore denetan erresonantzia maiztasuna berdina izango delako, eta aldatuko den gauza bakarra intentsitatearen magnitudea delako).



Irudia 2.10: *AC* simulazioetatik lortutako datuak. C_1 kondentsadoretik pasatzen den korronteen balioa eta zein maiztasunean duen *EM05* aplikagailuak erresonantzia konfigurazio bakoitzean. Irudiko lehenengo kurba lehenengo konfigurazioari dagokio, bigarren kurba bigarrenari etab.

2.10 irudian erresonantzia maiztasun baxuena duen kurba lehenengo konfigurazioari dagokio ($C_1 = 700 \text{ nF}$ eta $C_2 = \text{Shorted}$); bigarren kurba bigarren konfigurazioari, hirugarren kurba hirugarren konfigurazioari etab. Irudian ikus daitezkeen bezala, konfigurazio

bakoitzari (erresonantzia maiztasun bakoitzari) kolore bat egokitu zaio eta kolore hau mantenduko da lan guztian zehar konfigurazio horretarako. Konfigurazio bakoitzaren erresonantzia maiztasuna 2.10 iruditik lortu da eta hauek denak 2.5 taulan jaso dira.

Konfigurazioa	f (kHz)
1	221,2
2	446,9
3	477,9
4	534,2
5	675,7
6	716,7
7	792,4
8	827,6
9	925,2
10	1170,3
11	1308,4
12	1433,3
13	1548,1

Taula 2.5: Zirkuituaren erresonantzia maiztasuna konfigurazio bakoitzean.

2.9 irudiko konfigurazioan, honakoak dira etengailu bakoitzak jasan beharreko korronteak, kontuan izanik kondentsadore bakoitzetik igarotzen den korrontea dela ezaguna dena simulazioari esker (ikus 2.6 taula):

$$i_{S1} = i_{Load} - i_{C1} \quad (2.12)$$

$$i_{Sj} = i_{S_{j-1}} - i_{Cj}, \forall j \in [2, 7] \quad (2.13)$$

$$i_{Sj} = i_{S_{j-1}} + i_{C_{j-7}}, \forall j \in [9, 12] \quad (2.14)$$

$$i_{S13} = i_{C7} \quad (2.15)$$

$$i_{S14} = 0 \quad (2.16)$$

Goiko ekuazioetan ikus daiteke i_{S8} ez dagoela inplizituki askatuta, baina i_{S9} ezagutu-ta i_{S8} zenbatekoa den jakin daiteke. 13 konfigurazioekin prozedura berdina errepikatuta konfigurazio bakoitzean etengailu bakoitzetik zenbateko korrontea pasatzen den kalkulatu da. Etengailuetatik igarotzen diren korronte hauek 2.7 taulan ikus daitezke.

2.7 taulan ikus daiteke, kapituluaren hasieran aipatu bezala, etengailuetatik igarotzen den korrontearen balioak handiak direla, $|I_{max}| = 317.48A$ izanik korronterik handiena.

Aurretik esandakoaren arabera, 2.2 atal honetan lortu diren korronteen balioak ez dira benetan etengailuetatik pasatzen diren korronteen benetako balioak, lortu diren *EM05*-aren erresonantzia maiztasunak neurketak egitean lortzen diren erresonantzia maiztasunak baino maiztasun handiagoak direlako. Honekin guztiarekin ondorioztatu daiteke, zirkuituaren eskematikoan zerbait ez dela kontsideratu.

Konf.	$I_{Load}(A)$	$I_{C_1}(A)$	$I_{C_2}(A)$	$I_{C_3}(A)$	$I_{C_4}(A)$	$I_{C_5}(A)$	$I_{C_6}(A)$	$I_{C_7}(A)$
1	2.401	32.275	35.275	35.275	35.275	35.275	35.275	35.275
2	3.095	47.499	47.499	47.499	47.499	63.303	63.303	63.303
3	2.670	65.701	65.701	65.701	65.680	65.680	65.680	0.000
4	2.997	60.673	60.673	60.673	90.974	90.974	0.000	0.000
5	3.395	48.759	48.759	48.759	146.710	0.000	0.000	0.000
6	2.927	86.126	86.126	172.170	0.000	0.000	0.000	0.000
7	3.181	79.730	79.730	53.123	53.123	53.123	159.370	0.000
8	3.269	77.229	77.229	76.182	76.182	152.360	0.000	0.000
9	3.396	68.170	68.170	136.220	136.220	0.000	0.000	0.000
10	2.837	159.290	159.230	159.230	159.230	0.000	0.000	0.000
11	3.204	150.360	150.290	150.290	150.290	150.290	0.000	0.000
12	3.337	148.690	148.630	148.630	148.630	148.630	148.630	0.000
13	3.422	149.770	149.700	149.700	149.700	149.700	149.700	149.700

Taula 2.6: AC simulaziotik lortutako kondentsadore bakoitzaren korrontearen balioa.

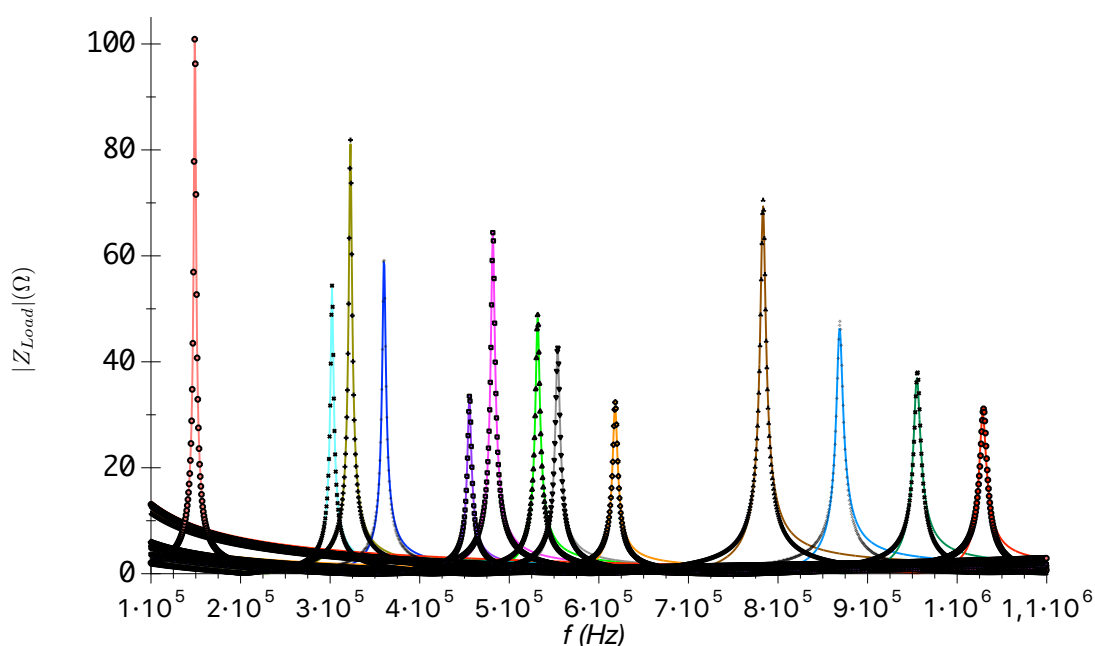
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$I_{S_1}(A)$	29.87	44.40	63.03	57.68	45.36	83.20	76.55	73.96	64.77	156.45	147.16	145.35	146.43
$I_{S_2}(A)$	65.15	91.90	128.73	118.35	97.95	172.17	156.28	151.19	132.94	0.00	0.00	0.00	0.00
$I_{S_3}(A)$	100.42	139.40	194.43	179.02	146.71	0.00	103.16	75.01	0.00	159.23	150.29	148.63	149.70
$I_{S_4}(A)$	135.70	186.90	128.75	90.97	0.00	0.00	53.12	0.00	136.22	0.00	0.00	0.00	0.00
$I_{S_5}(A)$	170.98	123.60	63.07	0.00	0.00	0.00	0.00	152.36	136.22	0.00	150.29	148.63	149.70
$I_{S_6}(A)$	206.25	60.29	0.00	0.00	0.00	0.00	159.37	152.36	136.22	0.00	150.29	0.00	0.00
$I_{S_7}(A)$	241.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	159.37	152.36	136.22	0.00	150.29	0.00	149.70
$I_{S_8}(A)$	141.10	142.50	131.40	121.35	244.66	86.13	79.73	77.23	68.17	0.00	0.00	0.00	0.00
$I_{S_9}(A)$	176.38	95.00	65.70	60.67	48.76	0.00	0.00	0.00	0.00	159.23	150.29	148.63	149.70
$I_{S_{10}}(A)$	211.65	47.50	0.00	0.00	0.00	172.17	53.12	76.18	136.22	0.00	0.00	0.00	0.00
$I_{S_{11}}(A)$	246.93	0.00	65.68	90.97	146.71	172.17	106.25	152.36	0.00	159.23	150.29	148.63	149.70
$I_{S_{12}}(A)$	282.20	63.30	131.36	181.95	146.71	172.17	159.37	0.00	0.00	159.23	0.00	0.00	0.00
$I_{S_{13}}(A)$	317.48	126.61	197.04	181.95	146.71	172.17	0.00	0.00	0.00	159.23	0.00	148.63	149.70
$I_{S_{14}}(A)$	0.00	189.91	262.72	181.95	146.71	172.17	0.00	0.00	0.00	159.23	0.00	148.63	0.00

Taula 2.7: EM05-aren etengailu bakoitzetik zenbateko korrontea pasatzen den konfigurazio bakoitzean.

2.3 Etengailuek Jasandako Korronteen Kalkulua

Esan bezala, aurreko atalean kalkulaturako korronteak ez dira benetan etengailuetatik igarotzen direnak, simulaturako zirkuituaren erresonantzia maiztasunak ez direlako benetako zirkuituaren erresonantzia maiztasunak, 2.10 irudian ikus daitekeen bezala.

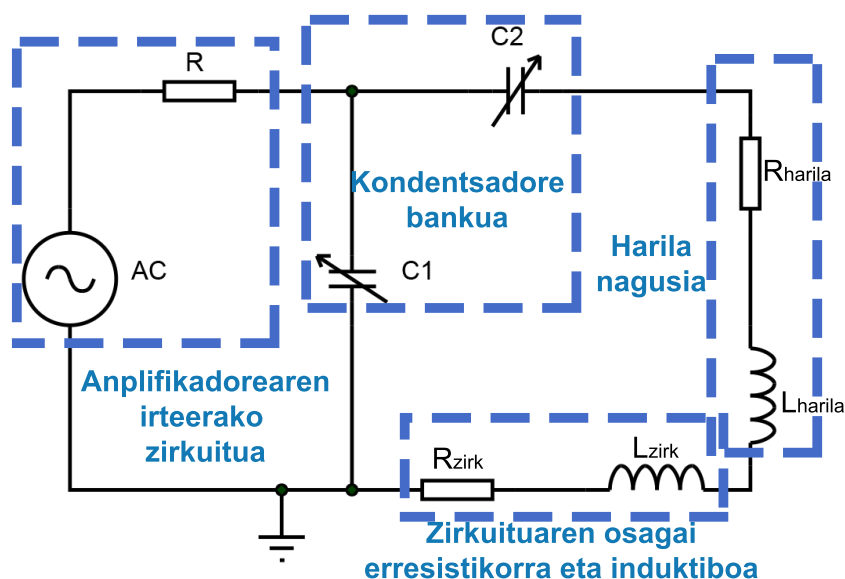
Benetako korronteak zenbatekoak diren jakiteko, zirkuituaren inpedantziaren (Z_{bal}) doiketa egin da *Matlab* programa erabiliz, eta beraren *lsqcurvefit* funtzioa [15] erabiliz. Zirkuituaren inpendatzia neurtzeko sare aztertzailea erabili da. Doiketa hau egitean, 2.4 irudiko zirkuitua kontsideratu da, baina kasu honetan, R eta L harilarenak soilik ez direla kontsideratu da. Hau da, 2.4 irudiko zirkuitua kontsideratu da doiketa egiteko, baina irudiko R eta L zirkuitu osoarenak izanik. Doiketa eginez *EM05*-aren konfigurazio bakoitzerako, honako kurbak lortu dira:



Irudia 2.11: *EM05*-aren inpedantzia adierazten duten puntu esperimentalen doiketa 2.4 irudiko zirkuituaren eskema erabiliz.

2.11 irudiko doiketa kurbetatik, erabilitako zirkuituaren R_{zirk} eta L_{zirk} kalkulatu dira, zeintzuk 2.8 taulan jaso diren. Esan bezala, kalkulaturako R eta L hauek zirkuitu osoarenak dira, eta 2.8 taulan ikus daitekeen bezala, aurreko simulazioak egitean erabilitako harilaren R eta L-ren ezberdinak dira. Beraz, ondorioztatu daiteke, aurreko simulazioetan erabilitako erresistentziari eta induktoreari, beste erresistentzia eta induktore bat falta zaiela seriean konektatuta 2.12 irudian ikus daitekeen bezala.

2.12 irudian ikus daitekeen bezala, zirkuitua erresistentzia bakar baten bidez R_{fit} eta induktore bakar baten bidez L_{fit} osatuta balego bezala kontsideratu daiteke. Zeintzuk zirkuituaren erresistentzia eta harilaren erresistentziaz, eta zirkuituaren induktoreaz eta harilaren induktoreaz osatuta egongo diren kasuan kasu. Hau da, zirkuitua ondorengo erresistentzia eta induktoreaz osatuta balego bezala kontsideratu daiteke: $R_{fit} = R_{harila} + R_{zirk}$ eta $Z_{L_{fit}} = Z_{harila} + Z_{zirk}$. Izan ere, seriean konektaturako erresistentzia zein induktoreen inpedantziak batu egiten dira: $R_{bal} = R_1 + \dots + R_n$ eta $Z_{L_{bal}} = j\omega L_1 + \dots + j\omega L_n$.



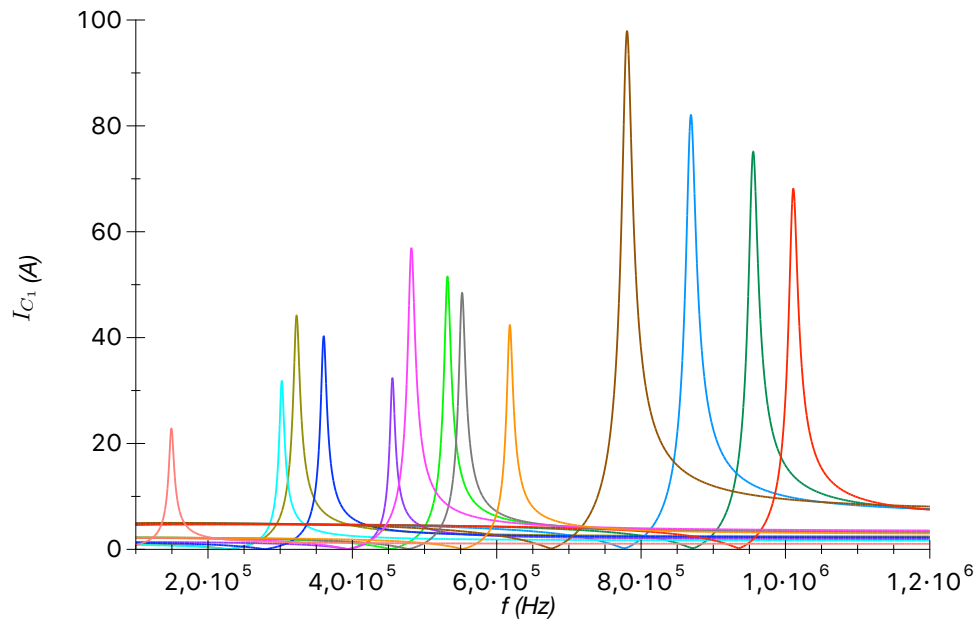
Irudia 2.12: EM05-aren zirkuitu osoaren eskema.

f (MHz)	R_{fit} (m Ω)	L_{fit} (μ H)	R_{harila} (m Ω)	L_{harila} (μ H)	R_{zirk} (m Ω)	L_{zirk} (μ H)
0.149	22.60	1.63	9.01	0.74	13.59	0.89
0.302	32.20	1.62	14.43	0.74	17.77	0.88
0.323	33.30	1.62	15.01	0.74	18.29	0.88
0.360	36.40	1.63	15.97	0.74	20.43	0.89
0.455	40.90	1.63	18.07	0.74	22.83	0.89
0.481	42.70	1.64	18.55	0.74	24.15	0.90
0.531	46.50	1.64	19.40	0.74	27.10	0.90
0.554	48.70	1.66	19.75	0.74	28.95	0.92
0.618	52.10	1.66	20.56	0.74	31.54	0.92
0.783	59.50	1.66	21.43	0.74	38.07	0.92
0.869	72.50	1.68	20.91	0.74	51.59	0.94
0.960	75.20	1.67	19.27	0.74	55.93	0.93
1.030	79.40	1.74	17.04	0.74	62.36	1.00

Taula 2.8: 2.11 irudiko kurbetatik lortutako zirkuituaren erresistentzia eta induktantzia baliokideak. Eta horietatik lortutako zirkuituaren erresistentzia eta induktantzia.

2.8 taula kalkulatu, 2.12 irudiko R_{harila} , L_{harila} eta R_{zirk} , L_{zirk} ezagunak dira maiztasun bakoitzean, R_{harila} eta L_{harila} harilarenak eta R_{zirk} eta L_{zirk} zirkuituarenak izanik.

Aurreko atalean egin den bezala, kondentsadore guztietatik igarotzen diren korronteak 2.9 taulan bildu dira eta etengailu bakoitzak zenbateko korrontea jasaten duen kalkulatu da 2.10 taulan bilduz. 2.10 taulan ikus daiteke, etengailu batek jasaten duen korronte maximoa $|I_{max}| = 205.62A$ dela. Zehazki, korronte hau lehenengo konfigurazioan 13. etengailuak jasaten du. Ikusten denez, korronte hau ez da aurreko simulazioan lortutako korrontea bezain altua, baina hala eta guztiz ere korronte handia izaten jarraitzen du.



Irudia 2.13: 2.10 irudian egin den bezala, konfigurazio bakoitzean lehenengo kondentsadoretik pasatzen den korrontearen balioa zenbatekoa den, eta konfigurazio bakoitzak zien maiztasunean duen erresonantzia.

2.13 iruditik ondorioztatu daitezkeen erresonantzia maiztasunak 2.4 taulan agertzen diren maiztasunekin bateragarriak dira. Gainera, erresistentzia eta harila horiek konfigurazio bakoitzean gehitzea, maiztasun hauek 2.5 taulan agertzen diren maiztasunak baino dezente txikiagoak izatea ahalbidetu du, eta baita kondentsadoreetatik igarotzen diren korronteak txikitzea, eta beraz, etengailuetatik igarotzen diren korronteak txikitzea.

Konf.	$I_{Load}(A)$	$I_{C_1}(A)$	$I_{C_2}(A)$	$I_{C_3}(A)$	$I_{C_4}(A)$	$I_{C_5}(A)$	$I_{C_6}(A)$	$I_{C_7}(A)$
1	2.401	22.847	22.847	22.847	22.847	22.847	22.847	22.847
2	3.095	31.826	31.826	31.826	31.826	42.395	42.395	42.395
3	2.670	44.197	44.197	44.197	44.164	44.164	44.164	0.000
4	2.997	40.282	40.282	40.282	60.367	60.367	0.000	0.000
5	3.395	32.349	32.349	32.349	96.893	0.000	0.000	0.000
6	2.927	56.946	56.946	113.78	0.000	0.000	0.000	0.000
7	3.181	51.546	51.546	34.315	34.315	102.94	0.000	0.000
8	3.269	48.469	48.469	48.387	48.387	96.775	0.000	0.000
9	3.396	42.377	42.377	84.562	84.562	0.000	0.000	0.000
10	2.837	97.902	97.773	97.773	97.773	0.000	0.000	0.000
11	3.204	82.059	81.868	81.868	81.868	81.868	0.000	0.000
12	3.337	75.161	74.945	74.945	74.945	74.945	74.945	0.000
13	3.422	68.26	67.884	67.884	67.884	67.884	67.884	67.884

Taula 2.9: AC simulaziotik lortutako kondentsadore bakoitzaren korrontearen balioa.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$I_{S_1}(A)$	-20.45	-28.73	-41.53	-37.28	-28.95	-54.02	-48.36	-45.20	-38.98	-95.07	-78.85	-71.82	-64.84
$I_{S_2}(A)$	-43.29	-60.56	-85.72	-77.57	-64.54	-113.78	-99.91	-93.67	-81.36	0.00	0.00	0.00	0.00
$I_{S_3}(A)$	-75.12	-92.38	-129.92	-117.85	-96.89	0.00	-65.60	-45.28	0.00	-97.77	-81.87	-74.95	-67.88
$I_{S_4}(A)$	-97.97	-124.21	-85.76	-60.37	0.00	0.00	-34.32	0.00	-84.56	0.00	0.00	0.00	0.00
$I_{S_5}(A)$	-120.81	-81.81	-41.59	0.00	0.00	0.00	0.00	-96.78	-84.56	0.00	-81.87	-74.95	-67.88
$I_{S_6}(A)$	-143.66	-39.42	0.00	0.00	0.00	0.00	-102.94	-96.78	-84.56	0.00	-81.87	0.00	0.00
$I_{S_7}(A)$	-166.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-102.94	-96.78	-84.56	0.00	-81.87	0.00	-67.88
$I_{S_8}(A)$	-91.39	95.48	-88.39	-80.56	161.44	-56.95	-51.55	-48.47	-42.38	0.00	0.00	0.00	0.00
$I_{S_9}(A)$	-114.24	63.65	-44.20	-40.28	-32.35	0.00	0.00	0.00	0.00	-97.77	0.00	-74.95	-67.88
$I_{S_{10}}(A)$	-137.08	31.83	0.00	0.00	0.00	-113.78	-34.32	-48.39	84.56	0.00	0.00	0.00	0.00
$I_{S_{11}}(A)$	-159.93	0.00	-44.16	-60.37	0.00	-113.78	-68.63	-145.16	0.00	-97.77	-81.87	-74.95	-67.88
$I_{S_{12}}(A)$	-182.78	-42.40	-88.33	-120.73	0.00	-113.78	-102.94	0.00	0.00	-97.77	0.00	0.00	0.00
$I_{S_{13}}(A)$	-205.62	-84.79	-132.49	-120.73	0.00	-113.78	0.00	0.00	0.00	-97.77	0.00	-74.95	-67.88
$I_{S_{14}}(A)$	0.00	-127.19	-176.66	-120.73	0.00	-113.78	0.00	0.00	0.00	-97.77	0.00	-74.95	0.00

Taula 2.10: EM05-aren etengailu bakoitzetik zenbateko korrontea pasatzen den konfigurazio bakoitzean.

Kapitulua 3

Etengailu Elektronikoak

3.1 Etengailuen Ezaugarriak

EM05 aplikagailuaren automatizaziorako dauden etengailu mekanikoak elementu elektronikoengatik ordezkatu dira. Gailuaren automatizaziorako hainbat elementu elektroniko ezberdin aztertu dira; tiristoreak, trantsistoreak, IGBT-ak eta egoera solidoko erreleak esaterako. Azterketa honetan egokiak izan daitezkeen elementuen simulazioak burutu dira irakasgai ezberdinetan ikasitako *PSpice* programa erabiliz. Etengailu berri hauek aurreko kapituluan kalkulatuak korrante maximoa erre gabe jasateko gai izan behar dira. Hori dela eta, 3.1 taulako korranteak jasaten dituzten potentziako elementuak aztertu dira.

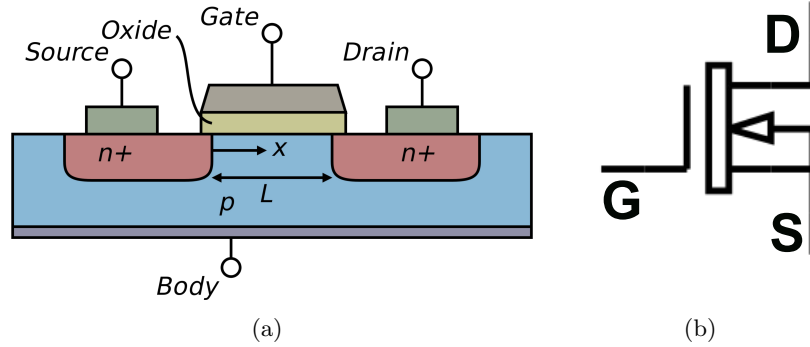
Etengailua	$I_{Sx}(A)$
1	95.07
2	113.78
3	129.92
4	124.21
5	120.81
6	143.66
7	166.51
8	161.44
9	114.24
10	137.08
11	159.98
12	182.78
13	205.62
14	176.66

Taula 3.1: Etengailu bakoitzak jasan beharreko korrante maximoa edozein konfiguraziotan.

Elementuak aztertzerako orduan tenperaturak korrontean eragina izan dezakeenez, 25°C-ko tenperaturan elementuek jasan dezaketen korrantea aztertu da. Izan ere, neurketak egitean nanopartikulek energia xurgatzen dute eremu magnetikotik eta laginaren tenperatura igoko da, baina honek ez du inolako garrantziarik etengailuetan hauek beti egongo baitira giro tenperaturan. Bestalde, etengailu bezala aukeratutako elementu elektronikoa edozein izanda ere, hauek eduki behar ez duten ezaugarrietako bat arintasuna da. Hots, *OFF*-etik *ON*-era zenbateko denbora behar duen edo kontrako noranzkoan behar duen denbora ez da faktore kritiko bat aplikagailu honekin neurketak egiterako orduan.

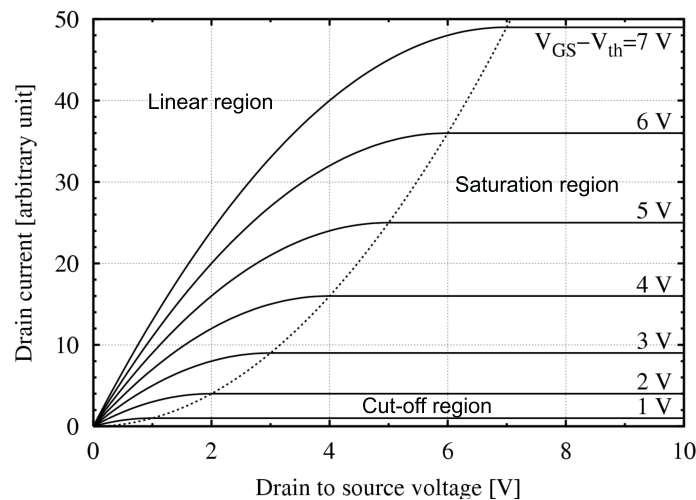
3.2 Potentzia Mosfet-ak

Mosfet (*Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) [16] bat dopaturiko erdie-roale batez (orokorrean Silizioa) osatuta dauden 3 geruzaz osatutako elementu elektroniko bat da, 3.1 irudian ikus daitekeen bezala [17].



Irudia 3.1: (a) Mosfet-aren egitura fisikoa. Irudian ikus daiteke nola txandakatzen diren dopaturiko erdie-roalearen P motako eta N motako geruzak. (b) mosfet-aren ikurra, atea (G), iturria (S) eta hobia (D) zeintzuk diren adieraziz.

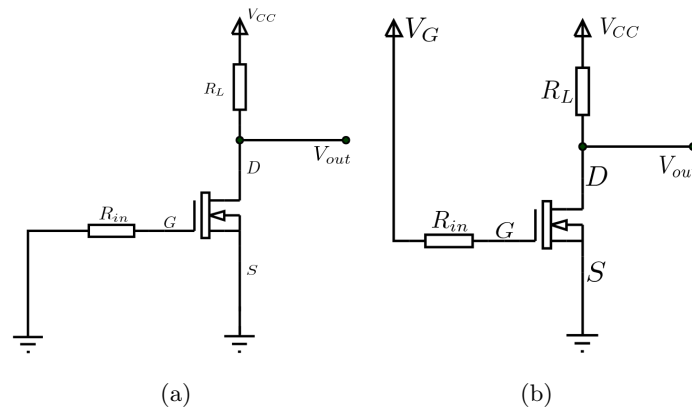
Mosfet-a etengailu bezala erabili daiteke bere funtzionamendu gunea etenduratik saturazioa pasaz [18]. Aipatutako mosfet baten bi funtzionamendu guneak bere kurba karakteristikoan, 3.2 irudia, ikus daitezke.



Irudia 3.2: Mosfet-aren I-V ezaugarri kurba.

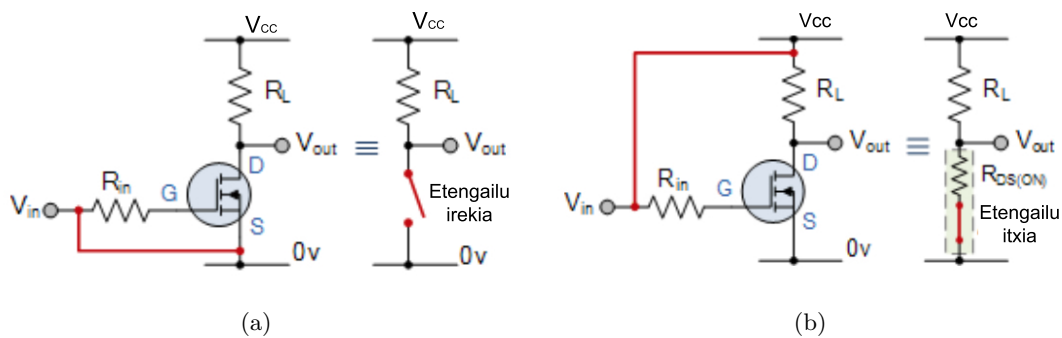
3.2 irudian ikus daiteke trantsistorea etenduran (*Cut-off region*) dagoenean ez duela korronek pasatzen uzten, etengailua irekita egongo litzateke; eta, aldiz, trantsistorea saturazioan (*Saturation region*) dagoenean bere hobitik korrone konstante bat igarotzen da, etengailua itxita egongo litzateke eta korronea pasatzen utziko luke. 3.2 irudian ikus daiteke etengailua irekita eta itxita egotearen arteko ezberdintasuna mosfet-ak atean duen tentsioa dela. Izan ere, 3.2 irudian ikus daiteke, drenadoreko korrone batentzako V_{GS} balioaren arabera (funtzionatzen dagoen kurbaren arabera) trantsistorea saturazioan egon daitekeela edo ez, V_{DS} -ak duen balioaren arabera.

Hau kontuan hartuta, etengailua irekita dagoenean beraren atean lurra konektatuta egongo balitz bezala aztertu liteke mosfet-a (ikus 3.3 irudia). Eta, bestalde, etengailua itxita dagoenean, mosfet-aren atean tentsio bat egongo balitz bezala egin daiteke mosfet-aren azterketa (ikus 3.3 irudia).



Irudia 3.3: Etengailu irekiaren eta etengailu itxiaren zirkuitu baliokideak mosfet bat erabiltzean. (a) irudiak etengailu irekia (OFF egoera) erakusten du. (b) irudiak etengailu itxia (ON egoera).

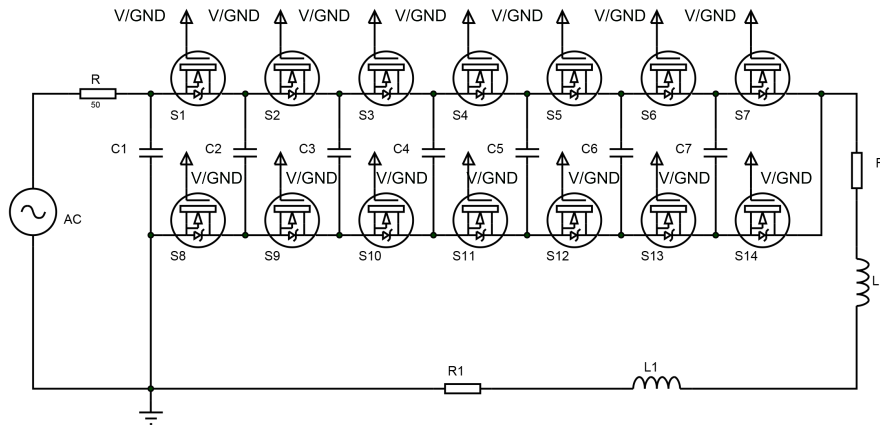
Mosfet trantsistoreek *Threshold* tentsioa V_{Th} dute, zeinak atearen eta iturriaren arteko tentsioa zenbatekoa izan behar duen adierazten duen, trantsistorea konduzitzen hasteko. Hau jakinda, ondorioztatu daiteke 3.3 (a) irudian $V_{GS} < V_{Th}$ eta $I_D = 0$ direla eta, aldiz, 3.3 (b) irudian $V_{GS} > V_{Th}$ eta $I_D = V_{CC}/R_L$ direla. Hau hobeto ikus daiteke 3.4 (a) eta 3.4 (b) irudietan.



Irudia 3.4: (a) irudiak etengailu irekia (OFF egoera) erakusten du eta (b) irudiak etengailu itxia (ON egoera).

Beraz, mosfet-ak erabiliz gero etengailu bezala aztergai den zirkuituak 3.5 irudiko itxura izango du korrontea DC korrontea balitz. Mosfet-en ateetan beharrezkoa den V_{GS} -a aplikatuko litzateke etengailu hauek itxita egon behar badira; eta lurra izango lukete beraien ateetan etengailuak irekita egon behar badira.

Potentzia mosfet-ak erabiltzen direnean, kontuan hartu behar da potentzia mosfet-ak ez dutela mosfet arrunten funtzionamendu bera. Izan ere, potentzia mosfet-ak gune linealean erabiltzen dira etengailu modura [17][19].



Irudia 3.5: *EM05*-aren eskema, mosfet-ak jarritz etengailu moduan korrontea DC motakoa balitz. Bertako mosfet-ak tentsioa edukiko dute atean itxita egon behar bada etengailua eta lurra izango dute atean, etengailua irekita egon behar bada.

Aurreko kapituluaren kalkulatu den bezala, etengailuek pasatzen utzi beharreko korrante maximoa $I_{max} \sim 205A$ da. Beraz, hobiko korrante hori jasaten duten potentzia mosfet-ak dira kontsultatu beharrekoak. Bigarren kapituluaren (2.10, 2.13 irudietan eta 2.7, 2.10 tauletan) ikus daiteke nolako garrantzia izan dezake μH gutxi batzuetako harila batek zirkuituaren erresonantzia maiztasunean, eta nolako garrantzia izan dezakeen $m\Omega$ batzuetako erresistentzia batek etengailuetatik igarotzen den korrontean. Beraz, hauek hirurak dira trantsistoreak kontsultatzerako orduan parametro kritikoak.

Beraz, teorikoki edozein elementu seriean konektatutako erresistentzia batengatik, kondentsadore batengatik eta harila batengatik ordezkatu daitekeenez, garrantzitsua da trantsistorearen $R_{DS(on)}$ eta trantsistorearen modeloaren induktantzia eta kondentsadore baliokideak oso baxuak izatea zirkuituaren erresonantzia maiztasuna eta etengailuetatik igarotzen den korrontea aldatu ez daitezen.

Kontuan hartuz korrote handiak direla jasan beharrekoak, begiratu diren potentzia mosfet-etan korrante maximo horri marjina bat eman zaio, korrante maximo osoa igarotzen dela zihurtatzeko. Potentzia mosfet fabrikatzaile bat baino gehiago existitzen direnez bakoitzaren espezifikazio orrietan murgiltzea eta hauetako notazioa ulertzea beharrezkoa da.

Hau honela, trantsistoreen bilaketa fabrikatzaileen web-orrietan *Infineon* edo *International Rectifier* [20], *Fairchild Semiconductors* [21], *ON Semiconductors* [22], *IXYS* [23], *Semikron* [24] eta RS-ko [25], Mouser-eko [26] eta Digi-Key [27] web-orrietan egin da.

3.2.1 Trantsistoreen PSpice Ereduak

3.1 taulan ikus daitekeen moduan, etengailu bakoitzak jasan beharreko korrante maximoa ez da korrante maximo guztien maximoaren berdina. Beraz, pentsa daiteke trantsistore ezberdinak erabiltzea, eta ez izatea 14 etengailuak berdinak. Hau horrela egiteko asmoarekin, fabrikatzaile ezberdinen hainbat trantsistore kontsultatu dira eta horien artean PSpice-ko eredu eskuragarria dutenak aukeratu dira; hau da, *Infineon*-ek egindako IPT007N06N [28], BSC009NE2LS [29], IPB095N15N3 [30], BSB012NE2LXI [31] eta

BSB008NELX [32] trantsistoreak kontsultatu dira; zeintzuk 3.2 taulan agertzen diren.

Etengailuak	Izena	$I_D(A)$	$V_{GS}(V)$	$R_{DS(on)}(m\Omega)$	$L_G(nH)$	$L_S(nH)$	$L_D(nH)$
1	BSC009NE2LS	100	10	0.9	3	0.3	1
2,3,4,5,9	IPB065N15N3	130	10	6.5	4	2	1
6,7,8,10,11	BSB012NE2LXI	170	10	1.2	0.1	0.05	0.7
12,13	IPT007N06N	300	10	0.75	3	1	0.5
14	BSB008NE2LX	180	10	0.8	0.1	0.05	0.7

Taula 3.2: Etengailu moduan erabiltzeko egokiak izan daitezkeela pentsatu diren trantsistore ezberdinen ezau-garriak.

3.2 taulan agertzen diren trantsistoreen I_D -a temperaturaren arabera aldatu daiteke, baina taulan agertzen den drenadoreko korronea $T=25$ °C temperaturari dagokiona da. Bestalde, taulan agertzen diren induktantziak trantsistoreak bere ateetan dituen induktantziak dira. 3.2 taulan agertzen diren trantsistoreak prezio ezberdinak dituzte denda ezberdinetan. Prezio horiek 3.3 taulan jaso dira:

Trantsistorea	RS	Mouser	Digi-Key
BSC009NE2LS	1.23 €	1.46 €	0.64 \$
IPB065N15N3	4.13 €	5.98 €	3.22 \$
BSB012NE2LXI	-	0.55 €	0.60 \$
IPT007N06N	3.90 €	5.65 €	2.89 \$
BSB008NE2LX	-	1.50 €	-

Taula 3.3: Trantsistore mota bakoitza web-orri ezberdinetan dituzten prezioak.

Aipatutako trantsistoreen kasuan *Infineon*-ek 4 eredu ditu eskuragarri; 4 simulazio eredu edo maila [33]. Horietatik lehenengoa, 0 maila deritzona, trantsistorearen oinarriko funtzioak ditu eta fabrikatzaileak esaten duenez, egokiena da simulazioaren arintasunari begiratu gero. Bigarrena, 1 maila deritzona, temperatura konstanteko simulazioak egiteko da egokiena. Hirugarrenak, 2 maila deritzona, erabiltzaileari ahalbidetzen dio zirkuituaren zati ezberdinetan temperatura ezberdinak erabiltzen. Eta laugarrena, 3 maila deritzona, autoberokuntza dinamikoa kalkulatzeko da. Beraz, aurrerago ikusiko diren simulazioak egiteko aukeragarri dauden ereduetatik bigarrena, 1 maila, erabili da.

3.2 taulan ikus daiteke aztertutako trantsistoreen artean IPT007N06N trantsistorea dela R_{DS} txikiena duen trantsistorea. Beraz, pentsa daiteke, trantsistore guztiak honen berdina izanez gero, erresistentzia horien eragina beste edozein konfigurazioren eragina baino baxuagoa izango dela. Hots, lehen kondentsadoretik igarotzen den korronea, adibidez, aurreko kapituluaren kalkulaturako korrontetik gertuago egongo dela trantsistore guztiak IPT007N06N badira.

Dena dela, badaude 300 A jasateko gai diren trantsistore gehiago R_{DS} baxuarekin eta V_{GS} berdinarekin. Trantsistore horiek 3.4 taulan jaso dira. 3.4 taulako trantsistoreen I_D -a temperaturaren arabera aldatu daiteke, baina taulan agertzen den drenadoreko korronea $T=25$ °C temperaturari dagokiona da. 3.2 taulan bezala, 3.4 taulan agertzen diren induktantziak trantsistoreak bere ateetan dituen induktantzien balioak dira. Trantsistore

hauen prezioak web-orri desberdinetan 3.5 taulan bildu dira.

Fabrikatzailea	Izena	$I_D(A)$	$V_{GS}(V)$	$R_{DS(on)}(m\Omega)$	$L_G(nH)$	$L_S(nH)$	$L_D(nH)$
Infineon	IPT015N10N5	300	10	1.5	3	1.5	1
Infineon	IPT007N06N	300	10	0.75	3	1	0.5
Infineon	IPT020N10N3	300	-	2	4	1.5	1
Infineon	IPT004N03L	300	10	0.4	-	-	-

Taula 3.4: Etengailu moduan erabiltzeko egokiak izan daitezkeela pentsatu diren trantsistore ezberdinak.

Trantsistorea	RS	Mouser	Digi-Key
IPT015N10N5	-	6.05 €	3.46 \$
IPT007N06N	3.90 €	5.65 €	2.89 \$
IPT020N10N3	4.61 €	5.84 €	3.34 \$
IPT004N03L	-	3.44 €	1.86 \$

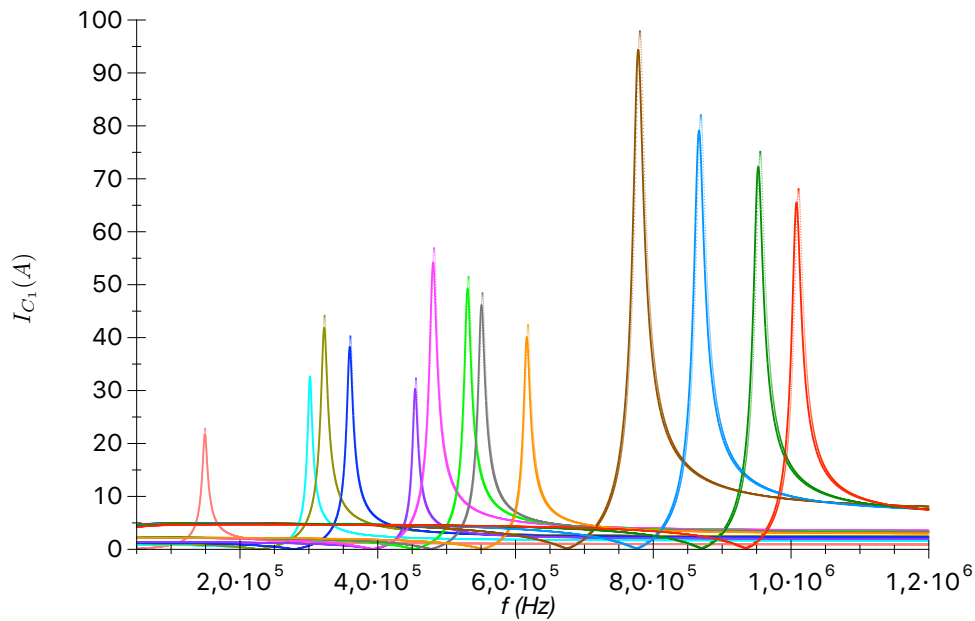
Taula 3.5: Trantsistore mota bakoitzak web-orri ezberdinetan dituzten prezioak.

Aurreko trantsistoreetatik aukerarik egokiena IPT004N03L trantsistorea da, honek gehitzen baitio erresistentziarik txikiena zirkuituari, baina trantsistore honen eredurik ez dago fabrikatzailearen web-orrian eta ezezaguna da bere induktantziaren balioa.

Beraz, IPT007N06N trantsistorea erabili da lehenengo simulazioak egiteko. Simulazio hauetan etengailu modura funtzionatzen duen trantsistorearen erresistentzia eta induktantzia jarri dira etengailuen posizioan. Hau da, *ON* egoerako trantsistoreak beraiek karakterizatzen dituzten harilengatik eta erresistentziengatik ordezkatu dira. Hau honela, 3.6 taulan biltzen diren erresonantzia maiztasunak lortu dira simulazioetan, zeintzuk 3.6 irudian ere ikus daitezkeen.

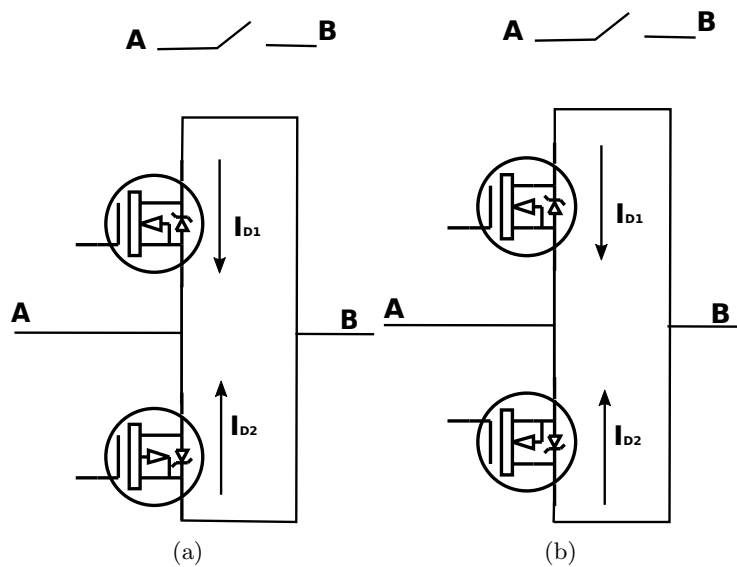
Etengailua	$f(kHz)$	$I_{C_1}(A)$
1	149.1	21.7
2	301.6	32.7
3	322.2	41.9
4	359.4	38.3
5	454.3	30.3
6	480.5	54.2
7	530.5	50.0
8	550.7	46.2
9	616.5	40.5
10	778.2	94.4
11	866.5	79.1
12	952.4	72.3
13	1007.9	65.5

Taula 3.6: IPT007N60N trantsistoreak erabilia etengailu modura, lortzen diren erresonantzia maiztasunak, eta lehenengo kondentsadoretik igarotzen den korrontea.



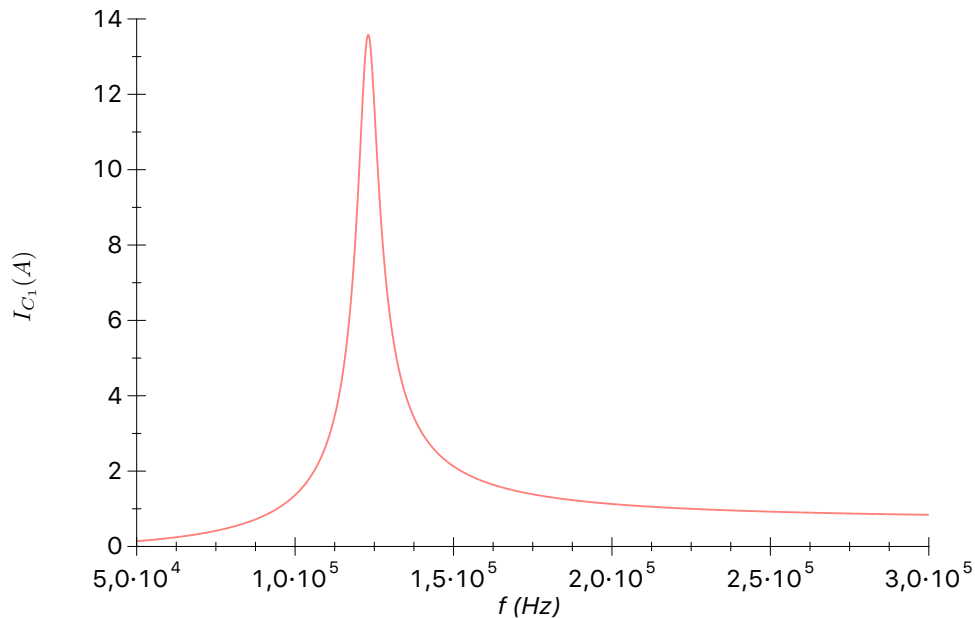
Irudia 3.6: Trantsistoreak harilengatik eta erresestentziengatik ordezkatu eta gero konfigurazio guztietan zirkuituak duen erantzuna. Lerroekin adierazi da kalkulaturako erantzuna eta puntuekin adierazita dago aurreko kapituluan kalkulaturako erantzuna.

3.5 irudiko zirkuitua egokia izango litzateke korrontea DC korrontea izango balitz, baina *EM05* aplikagailu elektromagnetikoaren kasuan korrontea AC korrontea da. Beraz, 3.5 irudian agertzen diren moduan ipintzen badira trantsistoreak AC korrontearen erdiziklo negatiboetan korrontea ez litzateke etengailutik igaroko trantsistoreak barnean duen diodoa dela eta. AC korrontea etengailutik igarotzeko etengailu modura atetik eta iturrietatik akoplatutako bi trantsistore erabili beharko lirateke. Hau honela, erdiziklo positiboan trantsistoreetako batek utziko luke korrontea pasatzen, eta erdiziklo negatiboan besteak. Trantsistoreen konfigurazio hau 3.7 irudian ikus daiteke.



Irudia 3.7: (a) Etengailuen tokian ipini beharreko trantsistoreen konfigurazioa kanal ezberdina badute. (b) Etengailuen tokian ipini beharreko trantsistoreen konfigurazioa kanala berdina bada.

Infineon-en web-orrian *PSpice*-erako eskuragarri dagoen IPT007N60N trantsistorea-ren eredia erabili nahi bada simulazioak egiteko, 3.7 irudiko (b) irudian agertzen diren moduan ipini behar dira trantsistoreak. Simulazio hauek egin dira lehenengo kondentsadoretik igarotzen den korrontearen kurba lortzeko.



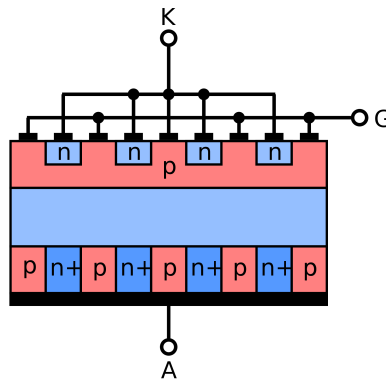
Irudia 3.8: 3.7 irudiko trantsistoreen konfigurazioa erabilia lehenengo konfigurazioaren kasuan zirkuituak duen erantzuna.

3.8 irudia nahikoa da ikusteko trantsistoreak erabiltzea ez dela soluzio ona *EM05* aplikagailu elektromagnetikoaren etengailuak ordezkatzeko. Irudian ikus daitekeen moduan, etengailuak konfigurazio honetan ipinitako trantsistoreengatik ordezkatzuz gero lortzen den erresonantzia maiztasuna 123 kHz-tan lortzen da; simulazioa egin den lehenengo konfigurazioaren benetako erresonantzia maiztasuna, 149 kHz, baino txikiagoa. Izan ere, trantsistoreak era honetara erabiltzean etengailu bakoitzean bi trantsistore kokatzen dira eta 100 kHz - 1 MHz tarteko maiztasunekin egiten denez lan, korronte eta kapazitate parasitoen ekarpenak nabarmenak izan daitezke.

3.3 Tiristoreak

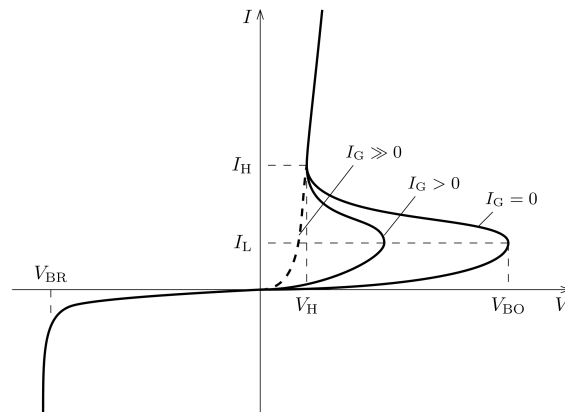
Potentzia mosfet-ak erabili beharrenean tiristoreak erabili daitezke etengailu modura. Tiristorea erdieroaleetan oinarritzen den egoera solidoko gailu elektronikoa da. Tiristoreetan N-motako eta P-motako lau geruza txandakatzen dira 3.9 irudian ikus daitekeen bezala. Tiristorea potentzia aplikazioetan erabili ohi da etengailu bezala, eta bi egoera posible ditu: etengailu irekia, zeinean ez den korronterik pasatzen bertatik; eta etengailu itxia, zeinean sartzten den korronte osoa irteten den [17][19].

Tiristoreak *ON* egoeran daudenean, 2000-3000 A-rainoko korronteak eroan ditzakete boltio gutxi batzuen galerarekin bakarrik. Tiristorearen bi terminal nagusiak katodoa (K) eta anodoa (A) dira, eta beraietatik igarotzen den korronte atea (G) kontrolatzen du. Izatez, korronte hau da, I_A , lan hau egiteko tiristore baten parametro garrantzitsuena, hau baita tiristoreak jasaten duen korronte maximoa. Tiristorearen ezaugarri kurba 3.10



Irudia 3.9: Tiristorearen barne egitura eta bera osatzen duten N-motako eta P-motako geruzak eta konexio metalikoak.

irudian ikus daiteke.

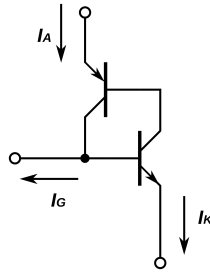


Irudia 3.10: Tiristore baten ezaugarri kurba.

Tiristore bat *ON* egoeratik *OFF* egoerara igarotzeko hainbat modu daude [17][19][34]. Horietako bat tiristore bati korrante positibo bat atean aplikatzea da, *ON* egoerarako trantsizioa anodo-katodo tentsio txikiagoentzako gertatu ahal delarik horrela. Tentsio hau 3.10 irudian ikus daiteke V_{BO} moduan. Ate korrante hau ez da zertan DC korrante bat izan behar; korrante pultsu bat ere izan daiteke, zeinak iraupen minimo bat izan beharko lukeen. Tiristorearen egoera aldaketa gerta dadin beste modu bat tentsio altua aplikatzea da; anodotik katodorako tentsioa haustura tentsioa baino handiagoa bada, ihes korrante bat sortuko da zeina nahikoa izango den berrelikadura bidezko aktibazioa hasteko. Metodo honek gailuan kalteak eragin ditzake, gailua hondatzeko nahikoak izan daitezkeen kalteak hain zuzen. Hirugarrenez, eta azkenik, tiristorearen egoera aldaketa gerta daiteke anodo-katodo tentsioaren igoeraren bidez; tentsioaren hazte abiadura nahikoa handia bada, junturen korrantea nahikoa izan daiteke tiristorea aktibatzen. Metodo honek ere, kalteak eragin ditzake gailuan. Aldiz, tiristore bat itzaltzeko modu bakarra kanpoko zirkuitu batentzako, bere terminalen artean igarotzen den korrantea I_H (*Holding Current*) baino txikiagoa izatea da.

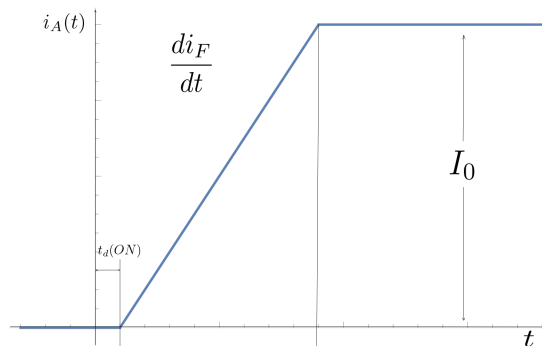
Tiristore baten erdua maiztasun baxuetan bi trantsistorez osatuta dago (ikus 3.11 irudia) [17][19]. Eredu honen arabera behin tiristorea polarizatuta, atearen eraso egiten

da korronte pulsuarekin. Hau honela, T1-en kolektoreko korrontea $\beta_1 I_G$ da, non β_1 T1-en korronte irabazia den. Korronte hau da T2 trantsistorearen basean sartzen dena, beraren kolektoreko korrontea $I_G \beta_1 \beta_2$ izatera pasatzen delarik. Hemen, bi aukera daude: $\beta_1 \beta_2 < 1$ izatea eta beraz gailua ez piztea; eta, $\beta_1 \beta_2 \sim 1$ izatea eta elementua kondukzioan egotera pasatzen da. Beraz, tiristorearen korrontea ahula bada, hau ez da pizten eta nahikoa altua bada, pizten den momentuan trantsistoreen berrelkadurak egiten du hauek saturazioan sartzea (itxitako etengailua) [17][35].



Irudia 3.11: Tiristore baten erudia maiztasun baxuetan.

Elementu elektroniko hauetan garrantzitsua da anodoaren korrontearen hazkera balio maximo baten azpitik egotea, ezaugarri orrietan datu bezala egon ohi dena, di_F/dt [17][19]. Izan ere, di_F/dt balio hau maximoa baino handiagoa bada, gailu elektronikoa hondatu egin daiteke. Tiristorearen anodoaren korrontek honako itxura du denboran:



Irudia 3.12: Tiristorearen anodoaren korrontea denboran zehar.

Fabrikatzaileek notazio ezberdinak dituzten arren, orokorrean anodoko korronteari buruz hitz egiteko (I_A) I_{TAVM} edo I_{FAVM} notazioa erabiltzen da. Gogoratu anodoko korronte hau dela tiristorearen katodo eta anodoaren artean egongo den korrontea (*maximum average on-state current*).

Tiristoreen munduan hainbat tiristore mota eta fabrikatzaile existitzen dira. Fabrikatzaile eta tiristore mota aniztasun horren adibide da 3.7 taula [20][21][22][23][24][25][26][27][36].

Jarraian 3.7 taulan agertzen diren tiristore mota ezberdinen ohiko erabilerak zeintzuk diren aipatuko dira [19][34]: SCR tiristoreen ohiko erabilera bat etengailu elektroniko bezela erabiltzea da. TRIAC tiristoreen ohiko erabilera etengailu elektroniko bezela erabiltzea da baita, baina TRIAC batek bi noranzkoetan funtzionatzen du SCR batek ez

	Infinenon	ON Semi-conductor	Fairchild Semiconductor	IXYS	Semikron	ABB
SCR (<i>Silicon Controlled Rectifier</i>)	✓	✓	✓	✓	✓	
TRIAC (<i>Triode for Alternating Current</i>)		✓	✓	✓		
DIAC (<i>Diode for Alternating Current</i>)			✓			
SIDAC (<i>Silicon Diode for Alternating Current</i>)		✓		✓		
PCT (<i>Phase Controlled Thyristor</i>)	✓			✓		✓
GTO (<i>Gate Turn Off Thyristor</i>)				✓		✓

Taula 3.7: Tiristore fabrikatzaileetako batzuk, eta horietako bakoitzak taulan agertzen diren tiristore mota horiek fabrikatzen dituen.

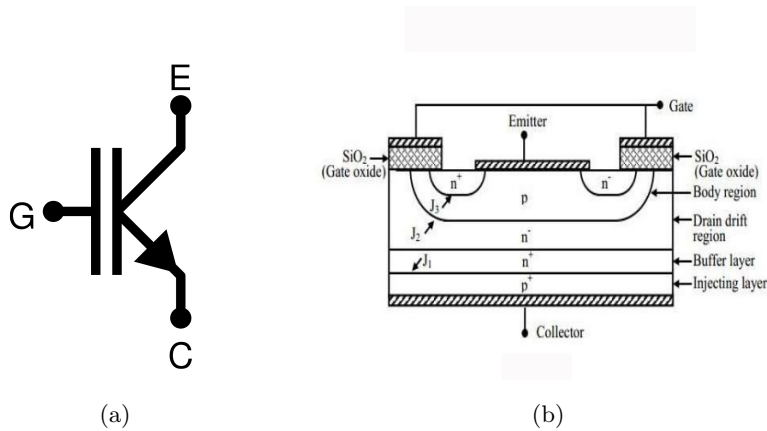
bezala. Orokorrean TRIAC bat 50-60 Hz-ko AC korronteekin erabiltzen da. DIAC tiristore baten ohiko aplikazioa TRIAC tiristoreak jaurtitzea izan ohi da. SIDAC tiristore baten ohiko erabilera DIAC baten erabileraren berdina da, baina orokorrean tentsio eta korrante altuagoetarako. PCT tiristoreak kontrolatutako fase korrontearen balbula moduan erabili ohi dira, AC-DC konbertsioak egiteko bi noranzkoetan. Eta, azkenik, GOT tiristoreak daude, zeintzuen ezaugarria da, pultsu negatibo bat aplikatuz gero *OFF* egoerara pasa ahal direla.

2. kapituluan ikusi den bezala, etengailuetako batek jasan beharreko korrante maximoa $|I_{max}| \sim 205A$ inguruan dago. Arazorik ez edukitzeko gutxi gora behera 250 A - 300 A onartzen dituzten tiristoreak kontsultatu behar dira burutu nahi den aplikaziorako.

Hau guztia kontuan hartuta tiristoreak etengailu modura erabiltzeko diseinatutako elementu elektronikoak direnez, tiristoreek zirkuituan gehitzen duten erresistentzia eta induktantzia arbuigarriak dira, potentzia mosfet-en kasuan ez bezala. Aurreko atalean bezala, TRIAC tiristoreen ereduak (gogoratu korrontea AC dea) bilatzea eta simulazioak egitea da egin beharreko hurrengo pausua; baina ezinezkoa izan da fabrikatzaileen web-orrietan korrante eta maiztasun baldintzak betetzen dituzten *PSpice*-rako, edo beste programa baterako egindako, eredurik aurkitzea. Beraz, ezin izan dira simulazioak egin TRIAC tiristoreak erabiliz etengailu modura.

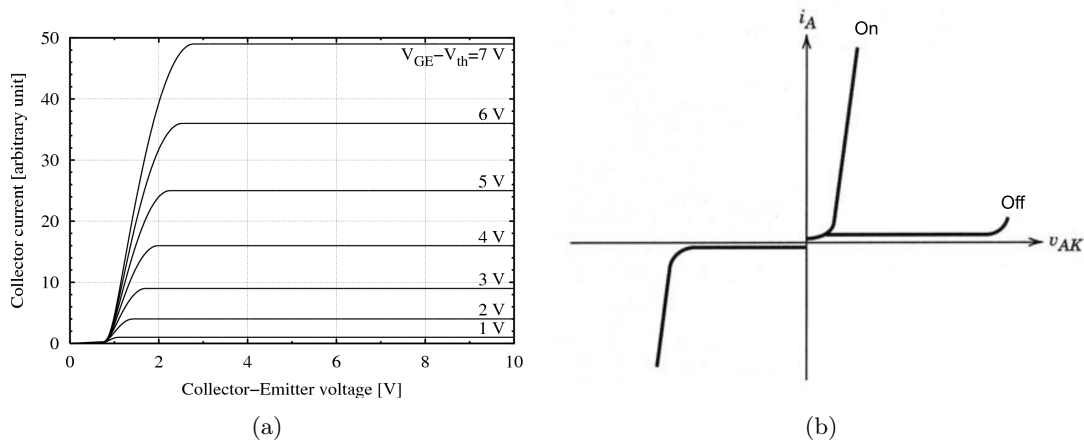
3.4 IGBT

IGBT-ak, *Insulated Gate Bipolar Transistor*, isolatutako atea duten trantsistore bipolarrak dira eta BJT-en, mosfet-en [37] eta GTO-en [19] abantailatako batzuk dituzte konbinatuta. Mosfet-en antzera IGBT trantsistoreak inpedantzia handiko ate bat dute, zeinak energia kantitate txiki bat bakarrik beharrezkoa duen gailuaren egoera aldatzeko. BJT-en antzera, aktibatutako egoerako boltaia txikia du. Eta, GTO-en antzera, tentsio negatiboak blokeatzeko diseinatu daitezke.



Irudia 3.13: (a) IGBT trantsistore baten ikurra eta IGBT trantsistorearen egitura (b).

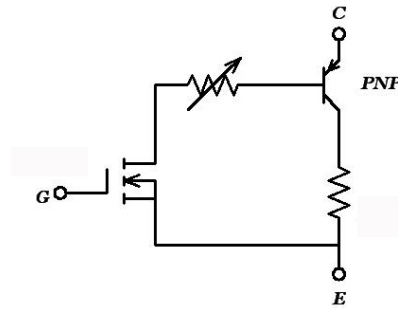
3.13 irudiko (b) irudian ikus daiteke IGBT trantsistore baten egitura mosfet baten egituraren antzekoa dela, ezberdintasun nagusia IGBT-aren drenatzea osatzen duen p^+ geruza delarik [19]. Atalaren lehen paragrafoan aipatzen diren ezaugarriak biltzen dituzten ezaugarri kurbak 3.14 irudian ikus daitezke.



Irudia 3.14: Atalaren lehen paragrafoan aipatutako ezaugarriak biltzen dituzten ezaugarri kurbak.

3.14 irudiko (a) irudian ikus daiteke 3.14 irudiko (a) irudian ikus daiteke IGBT baten ezaugarri kurbak eta BJT batenak oso antzekoak direla, baina bi kurba hauen artean ezberdintasun aipagarri bat dago. BJT bat kontrolatzeko korrante bat erabiltzen da bere basean eta IGBT bat kontrolatzeko, aldiz, tentsio diferentzia bat, mosfet-ekin gertatzen den bezala.

IGBT-aren kontrola atearen bidez egiten denez, mosfet baten kasuan bezala, IGBT-ak lan egin ahalko du etenduran edo gune aktiboan. Etendurako lan gune hau mosfetaren etendurako lan gunearen identikoa da. Bestalde, IGBT-aren lan gune aktiboan gailuaren funtzionamendua 3.15 irudian erakusten den zirkuitu baliokidearen bidez ondorioztatu daiteke.



Irudia 3.15: IGBT-aren zirkuitu baliokidea lan gune aktiboan. Ikusten den erresistentzia aldakorra, arraste gunearen erresistentzia da.

3.15 irudian ikus daiteke IGBT-a *Darlington* [38] zirkuitu bat bezala ondorioztatu daitekeela, non PNP trantsistorea trantsistore nagusia den eta mosfet-ak, eragingailu lana betetzen duen [19].

Kapitulu hasieran aipatutako korronteak jasateko gai diren IGBT batzuk aurkitu dira RS [25], Mouser [26] eta Digi-Key [27] web-orrietan, prezio ezberdinetan. Datu hauek 3.8 taulan jaso dira.

IGBT	RS	Mouser	Digi-Key
IXXK200N65B4 [39]	-	16.02 €	17.93 €
IXXN110N65C4H1 [40]	-	20.61 €	22.76 €
IYGK120N120A3 [41]	-	22.51 €	24.66 €
IYX120N120C3 [42]	22.60 €	22.73 €	25.10 €

Taula 3.8: Jasan beharreko korronteak jasaten dituzten IGBT-en izenak eta web-orri ezberdinetan dituzten prezioak.

International Rectifier fabrikatzailearen IGBT-ak ez dira aipatu lan honetan beraien datu-orrietan agertzen delako limitatuta dutela jasan dezaketen korrontea, beraien enkapulazioarengatik ('Package IGBT current limit is 195 A'). Honen adibide dira *international Rectifier*-en AUIRGPS4067D1[43] eta IRGPS46160DPbF [44] IGBT-ak.

IGBT-en datu-orrietan jasan dezaketen korronte maximo bat baino gehiago ager daiteke, zein tenperaturatan jasan dezaketen korronte hori adieraziz edo I_{C_x} notazioa erabiliz, x zenbaki bat izanik, zeinak tenperatura bat adierazten duen. Notazio hau erabiltzearen arrazoia, IGBT-ek jasan dezaketen korronte maximoa tenperaturarekin aldatzen dela da.

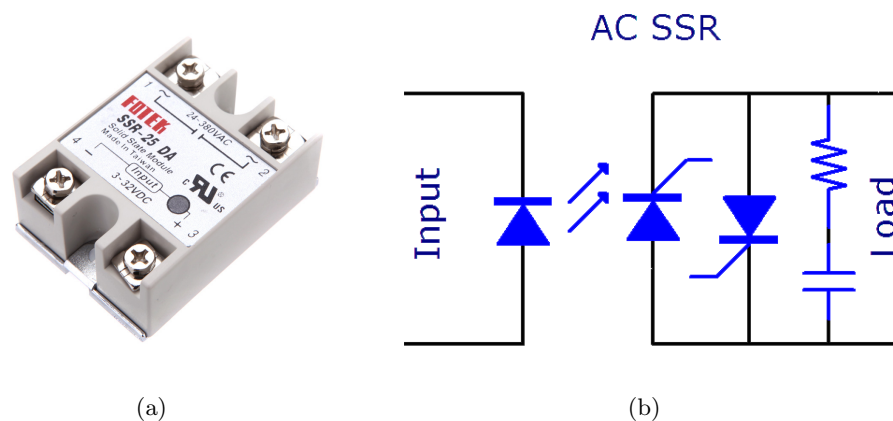
IYXS fabrikatzailearen web orrian bi IGBT topatu dira, IXXK200N65B4 eta IXXN110N65C4H1, lan honetarako beharrezkoak diren ezaugarriekin bat egiten dutenak eta *PSpice*-ko ereduak dutenak. Baina eredu hauetan ez dago *.slb* fitxategia eta ezin izan dira simulazioak burutu.

Bestalde, existitzen dira baita ere IGBT moduluak baina hauek dezente garestiagoak dira. Adibidez, $T=25\text{ }^\circ\text{C}$ -tan 240 A jasaten dituzten IGBT moduluak honako prezioetatik

gora daude kontsultatu diren web-orrietan: 105 € RS [25] web-orrian, 93.31 € Mouser [26] web-orrian eta 88.84 \$ Digi-Key [27] web-orrian. Beste adibide bat Infineon-ek egindako [45] IGBT-a da, zeinak 25°C-ko temperaturan 225 A-ko korronea jasan dezakeen eta zeinak 102.2 €-ko prezioa duen RS-n [25] eta 92.04 €-ko prezioa Mouser-en [26].

3.5 Egoera Solidoko Erreleak

Etengailu bezala aritzeko beste aukera bat egoera solidoko erreleak erabiltzea da. Egoera solidoko erreleak, SSR (*SolidStateRelay*), errele mekaniko baten funtzio bera du, baina ez ditu honek dituen atal mugikorak. Egoera solidoko erreleak, errele mekanikoak bezala, kontrol seinale baten arabera etengailu ireki edo etengailu itxi modura aritu daitezke zirkuitu batean. Atal mugikorrik ez edukitzea, metalezko kontaktu hauen ondorioz sortu daitezkeen korrone parasitoak saihestea ahalbidetzen du. Era berean, kontaktu mekanikorik ez dagoenez, kontaktu hau osatzen duten ataletan ez da higadurarik egongo eta hauen bizitza luzeagoa izango da [46][47].



Irudia 3.16: (a) SSR baten itxura, enkapsulazioa eta guzti. (b) SSR baten eredu eskematikoa.

Egoera solidoko erreleak tiristoreak eta trantsistoreak bezala erdieroaleetan oinarritutako teknologia erabiltzen dute 100 A baino gehiagoko korroneak konmutatzeko. SSR-en itxura eta hauen ikurra 3.16 irudian ikus daitezke. Nahiz eta lan honetan etengailuen konmutazio denbora garrantzitsua ez izan, aipatzekoa da SSR-ak milisegundoen ordenean pasa daitezkeela etengailu ireki baten moduan jokatzen, etengailu itxi baten moduan jokatzen.

Aurreko ataletan egin den bezala *EM05*-ean dauden korroneak jasaten dituzten elementu egokiak bilatu behar dira lehenengo. Elementu egokien bilaketa egiteko RS [25], Mouser [26] eta Digi-Key [27] web-orriak kontsultatu dira. Web-orri hauetan karga korrone maximoa duten SSR-ak 160 A-ko korronea dute; *EM05*-ean dagoen korrone maximoa baino txikiagoa.

Beraz, nahiz eta teorikoki SSR-ak soluzio bat izan daitezkeen gero hau ezin da praktikara eraman, ez baitira aurkitu egokiak diren SSR-ak.

Kapitulua 4

Aplikadore Elektromagnetikoaren Automatizazioa

4.1 Automatizaziora sarrera

Aurreko kapituluko azterketaren ostean, zeinean aukera ezberinak aztertu diren *EM05*-aren automatizaziorako, hau ordenagailutik nola kontrolatu ahal den garatu behar da. Automatizazio hau egiteko hiru era ezberdin proposatzen dira lan honetan. Horietako lehenengoa *LabView* programarekin kontrolatutako txartel bat erabiltzea da, zeinarekin konfigurazio bakoitzean, pin jakin batzuk aktibatuko diren. Bigarrena, *Raspberry Pi*-a erabiltzea da, honek ematen duen erraztasunagatik pin zehatz batzuk pizteko. Hirugarrena, aldiz, Arduino bat erabiltzea da, honek ere irteera batzuk pizteko aukera ematen duelako.

Gailuaren kontrolerako proposatzen diren hiru aukerekin, konfigurazio bakoitzean zein etengailu piztuko den aukera daiteke. Ordenagailutik konfigurazio bat aukeratu eta konfigurazio horretan piztuta egon behar diren etengailuei dagozkien *pin*-ak piztu egiten dira. *Pin* hauek piztea, etengailu bakoitzera doan tentsio seinale bat sortzea da, zeinak gailuaren egoera aldatzea gertatuko den kontrolatuko duen.

Aurreko paragrafoan esan den bezala, automatizazio honetan etengailu bakoitzaren kontrol seinalea tentsio seinale bat izango da. Irteera tentsio seinale bat izateak ez du arazorik sortzen mosfet trantsistoreak, IGBT-ak edo egoera solidoko erreleak aukeratzeko badira etengailu gisa, hauek guztiak tentsio seinale batekin kontrolatzen direlako. Aldiz, tiristoreak erabiliz gero automatizazioa egiteko tiristorearen egoera *OFF*-etik *ON*-era pasatzeko zirkuitu laguntzaile bat diseinatu behar da; izan ere, aurreko kapituluan esan bezala, tiristoreen egoera aldatzeko korrante pulsu bat behar da. Zirkuitu laguntzaile horrek tentsio seinalea korrante seinale batean bihurtu behar du etengailua era egokian *ON* egoerara pasatzeko. Tentsio seinale hori korrante seinale batean bihurtzeko, *VCCS* (*Voltage Controlled Current Source*) bat erabili daiteke.

Hau guztia eta aurreko kapitulua kontuan hartuta, IGBT-ak edo SSR-ak erabiltzea aukerarik onenak direla pentsatu da. Eta hauen bien artean, SSR-ak aukerarik onena direla uste da. Nahiz eta, mosfet aukera zabalagoa egon merkatuan, beharrezkoak diren ezaugarriekin, eta hauek izan, gainera, automatizazioa inplementatuz gero aukerarik merkeena; hauekin automatizazioa egitea IGBT-ekin edo SSR-ekin egitea baino zailagoa da, AC korrantea delako *EM05* aplikagailu elektromagnetikoan dagoen korrantea.

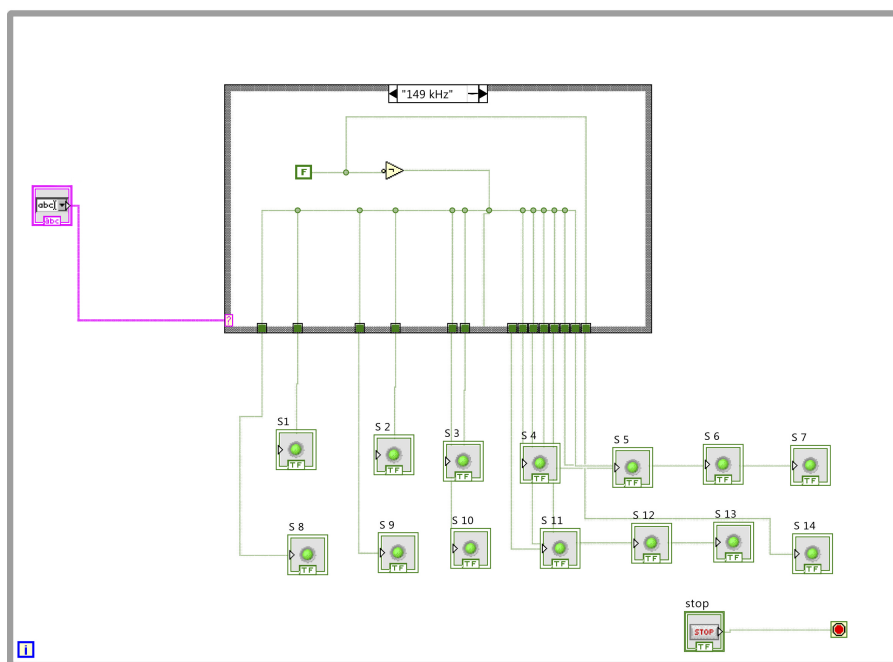
4.2 LabView eta irakurri/idatzi txartela

EM05-aren kontrolerako *LabView* programa erabiltzeak hainbat abantaila izan ditzake nanopartikulek xurgatutako energia neurtzean, izan ere, neurketa horiek egiteko erabiltzen den programa *LabView software*-an eginda dago, eta kontrolaren integrazioa programa nagusian erreza izango litzateke bere *.vi* fitxategia gehituz.



Irudia 4.1: National Instruments-en NI USB-6501 txartelaren irudia.

Kontrol programa hori garatzeko, *LabView software*-an bloke panel bat garatu behar da, zeinak beste panel batetik neurketa zein maiztasunean egingo den hartzen duen *input* bezala eta txartelari *pin* zehatz batzuk pizteko esaten diona, sartutako maiztasunaren arabera. Programa hori garatzeko *Combo Box* bat eta *case* egitura bat erabili dira [48]. *Combo Box*-ak menu batean maiztasun erresonantzien aukera guztiak erakusten ditu erabiltzaileak horietako bat aukeratu dezan eta *case* egitura batek, aldiz, konfigurazio bakoitzean *ON* egoeran egon behar den etengailuak zeintzuk diren adierazten du. Guztira, garatutako kontrol programa 4.2 irudian ikus daiteke.



Irudia 4.2: *EM05*-aren konfigurazio ezberdinetan zein etengailu piztu behar den kontrolatzen duen programaren blokeen eskema. Irudian, $f = 149\text{kHz}$ -ko konfigurazioa agertzen da.

4.2 irudian ikus daiteke programaren simulazioa egiteko *LabView*-ek berak dituen LED-ak erabili direla. LED hauek benetako aplikazio batean idazteko txartel bategatik ordezkatu beharko lirateke. Simulazioaren bi adibide 4.3(a) eta 4.3(b) irudietan ikus daitezke. Irudietan ikus daiteke aukeratutako maiztasunean etengailu egokiak pizten direla 2.5 irudiarekin alderatuz gero.



Irudia 4.3: (a) Simulazioa $f = 149\text{kHz}$ konfigurazioa aukeratuz gero; eta (b) simulazioa $f = 783\text{kHz}$ konfigurazioa aukeratuz gero.

Programa hau errealitatean implementatzeko Tresneria II irakasgaian erabiltzen den *National Instruments*-en SCB-68 konektorea [49], zeinak NI 6221 txartela konektatuta duen, erabiltzea pentsatu da. Konektorearen ezaugarri orria aztertzean ikusi da ezinezkoa dela txartel hau erabiltzea konektoreak 7 irteera digital dituelako soilik. Irteera digitalak emandako tentsioa 5V dira *pin*-a piztuta dagoenean eta 0 bestela. 4.1 taulan, kontsultatu diren *National Instruments*-en txartel batzuen ezaugarriak bildu dira.

Txartela	Prezioa (€)	Dimentsioak (cm)	Irteera digitalak
SCB-68 [49]	380	18.1x15.2x4.5	8
NI USB-6501 [50]	110	8.18x8.51x2.31	24
NI USB-6509 [51]	495	17.78x10.30x3.34	96
NI USB-6341 [52]	1360	26.4x17.3x3.6	24
NI 6320 [53]	595	9.9x16.8	24

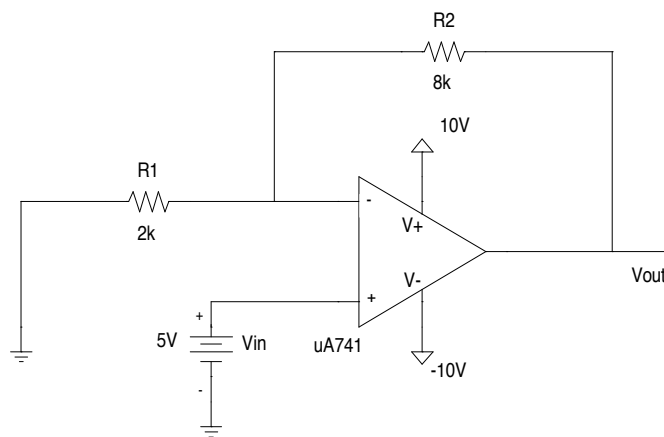
Taula 4.1: Kontsultatu diren NI txartel batzuk eta beraien ezaugarriak.

4.1 taulako txartelez gain txartel gehiago ere existitzen dira aplikazio honetan bete beharreko baldintzak dituztenak noski. Txartel horietako batzuk 10000€-rainoko prezioa dutelarik. 4.1 taulan ikus daitekeen bezala NI USB-6501 txartelak eman nahi zaion aplikaziorako irteera digital nahikoa ditu: 24 Digital I/O *pin*. Gainera kontsultatu diren txartelen artean honek du prezio baxuena.

Bestalde, automatizazioa IGBT-ekin edo SSR-ekin eginez gero, hauen sarreran *pin* digital batek eman ditzakeen 5V-ak baino tentsio handiagoa beharrezkoa da etengailua

itxita egongo den egoeran. Beraz, beharrezkoa da irteera hauek anplifikatzea trantsistoreen ateetara eraman baino lehen.

Txartelaren irteera bakoitzaren anplifikazio etapa eta gero IGBT zein SSR-en sarreran tentsio jakin bat egon behar da irteera piztuta badago eta 0V irteera itzalita badago. Erraz pentsa liteke txartelaren irteerako 5V-ak beharrezkoa den tentsioan bihurtzea erraz egin daitekeela tentsio sorgailu bat ipiniz txartela eta gero, baina aukera honekin irteera itzalita dagoen kasuan trantsistorearen atean sorgailu horrek emandako tentsioa egongo litzateke eta ez 0V. Beraz, anplifikazio hau egiteko proposatzen den aukera anplifikadore operazioanala (UA741) erabiltzea da, anplifikadore ez inbertsore baten konfigurazioan [54], ikus 4.4 irudia. Anplifikadore ez inbertsore honek A irabazi bat izan beharko du. Adibidez, IGBT-ek 10V beharko balute sarreran, $A = 2$ izan beharko luke.



Irudia 4.4: Txartelaren irteera bakoitzari gehitu beharreko zirkuitua IGBT-ra honen irteera eraman baino lehen.

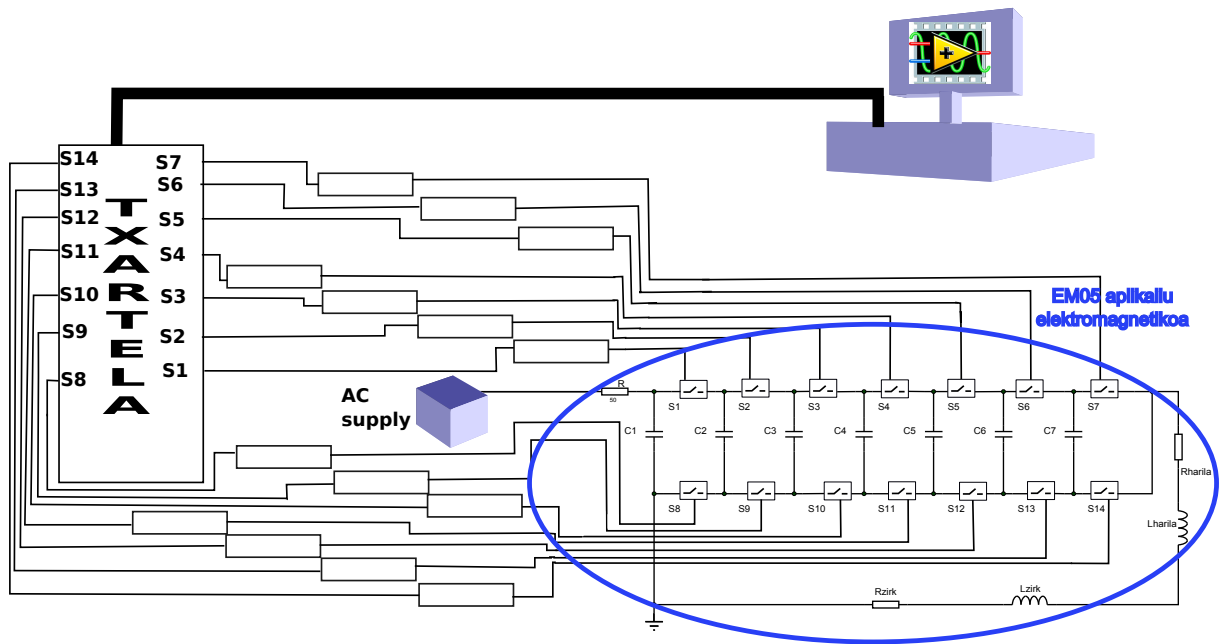
Anplifikadore ez inbertsorearen irabazia 4.1 ekuazioan ikus daiteke. Ekuazio hori aztertuz gero erraz ondorioztatu daiteke, $A = 2$ izan behar deneko adibidearekin jarraituz, R_1 eta R_2 berdinak izan behar direla.

$$A = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (4.1)$$

Hau guztia kontuan hartuta, 4.5 irudian ikus daitekeen moduan geratuko litzateke EM05-a bere kontrolarekin. 4.5 irudian, txartela eta gero, agertzen diren laukiak honen irteera bakoitza anplifikatzeko erabiliko den etapa adierazten dute, zeina 4.4 irudian ikus daitekeen.

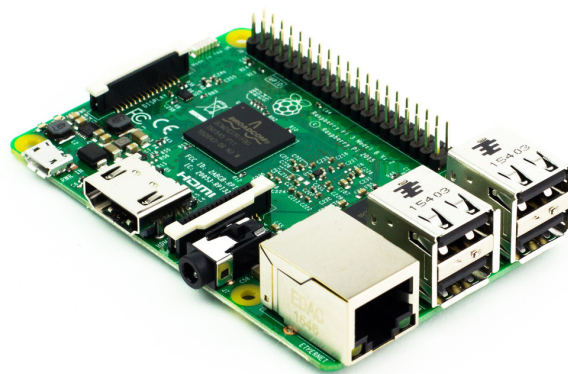
4.3 Raspberry Pi

Raspberry Pi-a erabiltzea ezerosoagoa izan daiteke, Raspberry-a ordenagailura konektatu behar delako *ssh* konekzio baten bidez eta zein maiztasunean neurtu nahi den esan behar zaiolako, maiztasun horretan itxita dauden etengailuei dagozkien irteerak zeintzuk diren pizteko. *Pin*ak piztuta daudenean 5V-ko seinalea ematen dute. Beraz, beharrezkoa izango litzateke aurreko atalean azaldutako anplifikazio fasea implementatzea trantsistoreak pizteko.



Irudia 4.5: *EM05* aplikagailu elektromagnetikoa, bera kontrolatzeko erabiliko den sistemarekin; ordenagailua *LabView*-ko programarekin, idazteko erabiliko den txartela, amplifikazio etapak (txartelaren osteko laukiak).

Raspberry-a erabili ahal izateko kontrol orokorra exekutatzen den ordenagailuaren eta Raspberry-aren arteko datu transferentzia bat egon behar da. Horretarako, Raspberry-a interneten bidez ordenagailura konektatu behar da; azken Raspberry Pi modeloan, Raspberry Pi 3, hari gabeko konexioa eskuragarri dago, aldiz, hau baino zaharragoa den modelo bat edukiz gero *ethernet* konexioa erabili daiteke. Raspberry Pi-aren prezioa 33€ dira.



Irudia 4.6: Raspberry Pi 3-aren irudia.

Raspberry-a erabiltzeko era bat *Python* programazio lengoaiaren bidez programatzea da. Adibidez, funtzio bat garatu daiteke zeinak testu fitxategi batetik neurketa zein maiz-

tasunetan egin nahi den irakurtzen duen. Maiztasun horren arabera beste funtzio batek *pin* batzuk edo beste batzuk piztuko ditu.

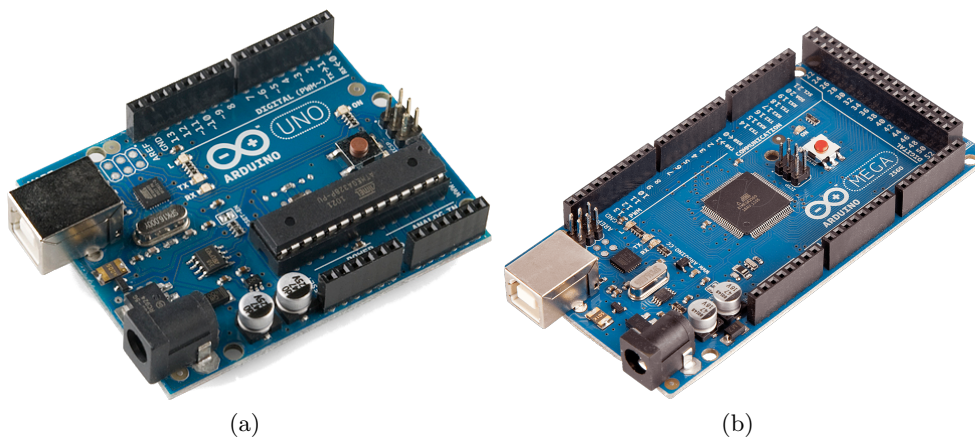
Raspberry-a erabiltzeko beste era bat aurreko atalean diseinatutako .vi fitxategiaren antzeko programa bat diseinatzea da, Raspberry-arentzako egokitua. Izan ere, existitzen da *LabView*-arentzako konpilatzaile bat, zeinak .vi fitxategia Raspberry-ra egokitzen duen gero bertatik exekutatu ahal izateko. Konpilatzaile honen egilearen arabera “*The LabVIEW for Raspberry Pi is a compiler that takes a LabVIEW program, compile and download it to Raspberry Pi single board computers. The downloaded code will execute embedded and standalone on the Raspberry Pi*” [55].

Raspberry-a erabiltzeko hirugarren modu bat Raspberry-arekin web zerbitzari bat sortzea izango litzateke. Zerbitzari horretan aplikazio bisual bat egongo litzateke, zeinean neurketak zein maiztasunean egin nahi diren aukeratu ahal izango den. Hau dena egiteko aukera bat *Python* programazio lengoaiaren bidez interfaz grafikoa duen aplikazio bat sortzea litzateke, aplikazio horretan maiztasun bakoitzerako konfigurazioa egongo da idatzita eta maiztasun bat aukeratzean horren araberako konfigurazioa aktibatuko da.

Guztira, ondorioztatu daiteke Raspberry-arekin, edozein modutara, neurketa batetik bestera maiztasuna aldatu nahi bada, Raspberry-arekin komunikazioa beharrezkoa dela.

4.4 Arduino

Txartel bat edo Raspberry-a erabili nahi ez bada, Arduino-a erabiltzea pentsa liteke. Izan ere arduinoarentzako konpilatzailea ere existitzen da *LabView*-en. Arduino Uno-aren [56] (22.50 €) kasuan 14 irteera digital daude eta Arduino Mega-ren [57] (47 €) kasuan, aldiz, 54 irteera digital.



Irudia 4.7: a)Arduino Uno-aren irudia. b)Arduino Mega-ren irudia.

Dena dela, arduinoaren kasuan ere *LabView*-en garatutako programa plakara pasatuko da eta bertatik exekutatu da. Kasu honetan ere, neurketa batetik bestera maiztasuna aldatu nahi bada, Arduino-arekin komunikazioa beharrezkoa da.

Kapitulua 5

Ondorioak

Gradu amaierako lan honetatik atera diren ondorioak honakoak dira:

- Lan honetan aukera ezberdinak proposatu dira etengailuak ordenagailuaren bidez kontrolatu ahal diren elementu elektronikoengatik ordezkatzeko. Aukera ezberdin hauen proposaketak fabrikatzaile ezberdinen web-orrietan murgiltzeko beharra ekarri du, eta nola fabrikatzaile ezberdinek gauza ezberdinak egiten dituzten ikasteko aukera. Web-orrietan barrena murgilduz ikusi da fabrikatzaileek informazio asko dutela eskuragarri: datu-orriak, gailuen oinarri fisikoak zeintzuk diren eta hauek nola funtzionatzen duten etab. Logikoa denez, fabrikatzaile batzuk aipatu dira textuan zehar, baina existitzen dira gehiago; batzuk graduan zehar ikasitakoak eta beste batzuk lana egin arte ezezagunak zirenak.

Honekin batera, ikusi da datu-orriak fabrikatzaile batetik bestera dezente aldatzen direla, fabrikatzaile ezberdinek era ezberdinetan egiten diotelako erreferentzia gauza berari.

- Lan hau egiteko hainbat potentzia mosfet, tiristore eta IGBT kontsultatu dira, baina hirugarren kapituluan aipatutako trantsistoreekin soilik egin ahal izan dira simulazioak, beraien *PSpice*-ko eredu lortzea posible izan delako. Eredu falta honen adibide izan daitezke, hauetako bi esatearren, *IXYS*-k egindako MMIX1F360N15T2 trantsistorea eta *Texas Instruments*-ek egindako CSD18535KTT. IGBT-en kasuan nahiz eta aurkitu den bi IGBT-en *PSpice*-ko eredu, ezin izan dira simulazioak burutu, eredu hauetan *.slb* fitxategia falta delako.
- *EM05*-aren erresonantzia maiztasunak maiztasun altuak direnez xede horretarako diseinatutako trantsistoreak aztertzean, RF trantsistoreak, ikusi da trantsistore hauek ez direla aplikagailuan jasan beharreko korronteak jasateko gai. Aurkitu diren RF trantsistoreen artean korronte gehien jasaten duen RF trantsistoreak 100A jasaten ditu eta honako hau da: MDS 1100 trantsistorea, Microsemi-k egina [58].
- Simulazioak egiteko *PSpice*-ko ereduak urriak direnez, beharrezkoak diren baldintzak betetzen dituzten trantsistoreak diseinatzea pentsatu da. Horretarako N eta P zonalde ezberdinen dopaketak pentsatu beharko lirатеke, N edo P kanalaren luzera eta zabalera kalkulatu beharko lirатеke, substratu egokia bilatu beharko litzateke beharrezkoak diren korronteak jasateko (ez da uste Si-arekin arazorik egongo denik puntu honetan), trantsistorearen enkapsulazioa pentsatu beharko litzateke eta honen limiteak aztertu etab. Dena dela, aukera hau bidezkoa ez dela pentsatzen

da, kalkulu denak egin ostean lortutako trantsistorea, baldintza espezifiko batzuen pean diseinatu dena, merkatuan dagoen trantsistore batekin bat etortzeko aukera oso txikia izango delako. Gainera, trantsistore horiek enpresaren batean fabrikatzea eskatuko balitz proiektuaren kostea handitu egingo litzateke.

- Lanean zehar ikus daiteke, batez ere bigarren kapituluan, miliohm-etako balioa duen erresistentzia batek eta μH -ko balioa duen harila batek zirkuituaren erresonantzia maiztasuna eta bertatik pasatzen den korrontearen balioa aldatu egiten dutela.
- Nahiz eta ez den aurkitu *EM05* aplikagailu elektromagnetikoaren baldintzekin bat datorren SSR-rik, hauetako bi paraleloan ipiniko balira, horietako bakoitzetik igarotzen den korrontea txikitzea lortuko litzateke. Hori kontuan hartuta, etengailu bakoitzari dagozkion bi erreleak aktibatuta baleude etengailu hori *ON* egoeran egongo litzateke.
- Lan honi esker ezezagunak ziren gailu elektronikoz ezberdinak ikasi dira. Lanarekin hasi aurretik guztiz ezezagunak zirenak adibidez: tiristoreak, IGBT-ak eta egoera solidoko erreleak. Eta lanarekin hasi aurretik izenez ezagunak zirenak, baina beraiei buruz jakintza gutxi edukitakoak: Raspberry Pi-a, Arduino-a, edo irakurri/idatzi txartelak.
- Lanean zehar ikusitako gailuen prezioak aztertuta ondorioztatu daiteke elementu diskretuak erostea moduluak erostea baino merkeagoa dela orokorrean, bilatzen diren ezaugarriak betetzen dituen elementu diskretua existitzen bada betiere. Bestalde, ikus daiteke elementuak merkeen saltzen dituen web-orria RS dela, baina kontratu elementu gutxien dituen web-orria dela. Beraz, gailuen prezioan orokorrean alde handirik ez dagoenez, beharrezko gailuak Mouser web-orrian erostea proposatzen da gailuen eskaintza zabalagoa baitu.
- Automatizazioa burutzerako orduan, irakurri/idatzi txartela aukerarik egokiena dela pentsatzen da, nahiz eta aukera hau garestiagoa izan. Izan ere, Raspberry-a erabiltzearen edo Arduino-a erabiltzearen aurrean txartela erabiltzearen abantaila LabView-etik zuzenean kontrolatu ahal izatea da. Beste aukerekin maiztasuna aldatu nahi den bakoitzean beraiekin komunikazioa beharrezkoa da eta komunikazio hau *LabView* programatik kanpo egiten da.
- Gradu Amaierako Lan hau *EM05* aplikagailuaren automatizazioaren proiektuaren diseinua nola burutzearen inguruan jardun da. Bertan egindako lana teorikoa izan da guztiz eta proiektua amaitu ahal izateko lanean proposatutako ideiak aplikagailu elektromagnetikora eraman behar dira.

Bibliografia

- [1] Christopher Habib and Gurdev Parmar. Hyperthermia in oncology. *The Journal of IHP*, 2012.
- [2] J. van der Zee. Heating the patient: a promising approach? *Annals of Oncology*, 13:1173–1184, 2002.
- [3] Joshua James Fairbairn, Mohammad Waleed Khan, Kirk Joseph Ward, Brian Willard Loveridge, Daryl William Fairnairn, and Kim Leslie O’Neil. Induction of apoptotic cell dna fragmentation in human cells after treatment with hyperthermia. *Cancer Letters*, 1995.
- [4] H. Kampinga and E. Dikomey. Hyperthermic radiosensitization: mode of action and clinical relevance. *International Journal of Radiation Biology*, vol 77(399-408), 2001.
- [5] F. A. Stewart, B. D. Michael, and J. Denekamp. Late radiation damage in mouse vladder as measured by increased urination frecueny. *Radiation Research*, vol. 75, 1978.
- [6] C. Mariano and A. Cividalli. Combined radiation and hyperthermia effects of the number of heat fractions and their interval on normal and tumour tissues. *International Journal of Hyperthermia*, vol. 8, 1992.
- [7] A. Jordan, R. Scholz, P. Wust, H. Föhling, J. Krausse, W. Wlodarczyk, B. Sander, Th. Vogl, and R. Felix. Effects of magnetic fluid hyperthermia (mfh) on c3h mammary carcinoma in vivo. *International Journal of Hyperthermia*, 1993.
- [8] R. Feynman, R. Leighton, and M. Sands. *The Feynman Lectures on Physics*. Addison-Wesley, 1963.
- [9] I. A. Brezovich. Low frequency hyperthermia: capacitive and ferromagnetic thermo-seed methods. *Medical Physics Monograph*, 16:82–111, 1988.
- [10] E. Garaio, J. M. Collantes, F. Plazaola, J. A. Garcia, and I. Castellanos-Rubio. A multifrequency electromagnetic applicator with an integrated ac magnetometer for magnetic hyperthermia experiments. *Measurement Science and Technology*, 25(11), 2014.
- [11] Electronics & Innovation Ltd. 1140la broadband power amplifier. Revision D, July 2008.
- [12] High Energy Corp. Chh seriees metallized film capacitors, part number chh66010m.
- [13] <http://www.femm.info/wiki/homepage>, 2016.

- [14] OrCAD PSpice Inc. *User's guide*, 1998.
- [15] Matlab. <http://es.mathworks.com/help/optim/ug/lsqcurvefit.html>, 02 2016.
- [16] Vrej Barkhordarian and International Rectifier. Power mosfet basics. *www.irf.com*.
- [17] Muhammad H. Rashid. *Electrónica de potencia. Circuitos, dispositivos y aplicaciones*. Prentice Hall Hispanoamericana, S.A., 2^a edición edition, 1995.
- [18] ON Semiconductor. Using mosfets in load switch applications, 09 2015.
- [19] Mohan, Undeland, and Robbins. *Power Electronics. Converters, applications, and design Third Edition*. Wiley, November 2002.
- [20] International Rectifier. <http://www.irf.com/index>, 03 2016.
- [21] Fairchild Semiconductor. <https://www.fairchildsemi.com>, 03 2016.
- [22] ON Semiconductor. <http://www.onsemi.com>, 03 2016.
- [23] IXYS. <http://www.ixys.com>, 03 2016.
- [24] Semikron. <https://www.semikron.com>, 03 2016.
- [25] RS. <http://es.rs-online.com/web/>, 04 2016.
- [26] Mouser Electronics. <http://www.mouser.es>, 04 2016.
- [27] Digi-Key Electronics. <http://www.digikey.es>, 04 2016.
- [28] Infineon Power Management & Multimarket. Ipt007n06n power-transistor. 2014.
- [29] Infineon. Bsc009ne2ls power-mosfet. 2013.
- [30] Infineon. Ipb065n15n3 g power-transistor. 2010.
- [31] Infineon Power Management & Multimarket. Bsb012ne2lxi power-mosfet. 2015.
- [32] Infineon Power Management & Multimarket. Bsb008ne2lx power-mosfet. 2015.
- [33] F. Stueckler, K. Bueyuektas, and Infineon et al. Introduction to infineon's simulation models power mosfet. 2013.
- [34] Henri Lilen. *Tiristores y triacs*. Marcombo, 6 edition, 1986.
- [35] Escuela de Ingeniería Electrónica. TEC Tecnológico de Costa Rica. <http://www.ie.itcr.ac.cr/juanjimenez/cursos/potencia%20diplomado/tiristores.pdf>, March 2016.
- [36] ABB. <http://new.abb.com/power-electronics>, 04 2016.
- [37] Abdus Sattar and IXYS Corporation. Insulated gate bipolar transistor (igbt) basics.
- [38] A.S. Sedra and K.C. Smith. *Microelectronic Circuits*. Oxford University Press, New York, 2010.
- [39] IXYS CORPORATION. Preliminary technical information ixk200n65b4. 2014.

- [40] IXYS CORPORATION. Ixxn110n65c4h1. 2015.
- [41] IXYS CORPORATION. Preliminary technical information ixgk120n120a3. 2009.
- [42] IXYS CORPORATION. Ixyx120n120c3. 2013.
- [43] International Rectifier. Insulated gate bipolar transistor with ultrafast soft recovery diode airgps4067d1. 2012.
- [44] International Rectifier. Insulated gate bipolar transistor with ultrafast soft recovery diode irgps46160dpbf. 2014.
- [45] Infineon. Ff150r12ks4 technical information.
- [46] OMRON. Solid state relay user's guide. 2001.
- [47] Solid State Optonics. Application note, solid state relays vs. electromechanical relays. 2014.
- [48] National Instruments. *LabVIEW User Manual*. National Instruments, April 2003.
- [49] National Instruments. Daq scb-68 68-pin shielded connector block user manual. (Part Number 320745B-01), December 2002.
- [50] National Instruments. Ni usb-6501 low-cost usb digital i/o device. *www.ni.com*, 2014.
- [51] National Instruments. High-density industrial digital i/o for usb - 96-channel, 5v ttl/cmos. *www.ni.com*, 2014.
- [52] National Instruments. Ni x series multifunction data acquisition, usb-6341. *www.ni.com*, 2014.
- [53] National Instruments. Ni x series multifunction data acquisition, 6320. *www.ni.com*, 2014.
- [54] M.A. Pérez. *Instrumentación Electrónica*. Thomson, 2004.
- [55] <https://www.tsxperts.com/labviewforraspberrypi/>.
- [56] <https://www.arduino.cc/en/main/arduinoboarduno>.
- [57] <https://www.arduino.cc/en/main/arduinoboardmega>.
- [58] Microsemi power products group. Mds 1100.
- [59] <http://www.ixys.com/technicalsupport/pspice.aspx>, 04 2016.
- [60] Andrew McHutchon. Machine learning group University of Cambridge. Rlc resonant circuits. April 2013.
- [61] Infineon Power Management & Multimarket. Ipt004n03l power-transistor. 2014.
- [62] Infineon Power Management & Multimarket. Ipt020n10n3 power-transistor. 2014.
- [63] Infineon Power Management & Multimarket. Ipt015n10n5 power-transistor. 2015.
- [64] AP. Meenakshi Mataray. Modern power semiconductor devices (a review). *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, 3(4), 2012.

-
- [65] Labcenter Electronics. *Intelligent Schematic Input System - User Manual*. Labcenter Electronics, November 2002.
- [66] Seiook Toraya-Brown and Steven Fiering. Local tumour hyperthermia as immunotherapy for metastatic cancer. *International Journal of Hyperthermia*, 2014.

