

MASTER AMAIERAKO LANA

DCDC bihurtgailu erresonante isolatua

Ikaslea Iker Aretxabaleta Astoreka

Titulazioa Telekomunikazio Ingeniaritza Unibertsitate Masterra

Data 2016ko ekaina

Proiektuaren Zuzendaria

Iñigo Martínez de Alegría Mancisidor

Kurtso Akademikoa

2015/2016

Aurkibidea

Laburpena	iii
Taulen zerrenda.....	iv
Irudien zerrenda.....	v
Akronimoen zerrenda.....	vii
1. Memoria	1
Helburua eta helmena	1
Gaiaren egoera.....	3
1.2.1 Sarrera.....	3
1.2.2 HVDC-aren eboluzioa	4
1.2.3 Funtzionamendua eta abantailak.....	5
Alternatiben analisisa.....	11
1.3.1 Ponderazio-taula	11
1.3.2 Aukera posibleak.....	11
1.3.3 Aukeraketa.....	20
Arriskuen analisisa.....	21
1.4.1 Arriskuen definizioa	21
1.4.2 Arriskuen probabilitatea eta eragina.....	21
2. Metodologia	22
2.1 Zereginen deskribapena.....	22
2.1.1 Gaiaren kokapena	22
2.1.2 Diseinu analitikoa	22
2.1.3 Simulazioa.....	23
2.1.4 Prototipoaren fabrikazioa	23
2.1.5 Software bidezko diseinu elektrikoa	24
2.1.6 PCBaren diseinua	24
2.1.7 Egiaztapena eta emaitzen bilketa.....	24
2.1.8 Proiektuaren kudeaketa.....	24
2.1.9 Prestakuntza	25
2.1.10 Dokumentazioa	25
2.1.11 Proiektuaren aurkezpena	25
2.2 Faseak.....	26
2.3 Gantt diagrama.....	27
3. Kalkuluak.....	28
Diseinuaren espezifikazioak	28
Diseinu analitikoa	29
Analisi orokorra.....	29
Magnetizazio induktantziaren eragina	32
Tiristoreen kontrola.....	37
Simulazioa.....	39
Prototipoaren fabrikazioa.....	42
Softwarearen bidezko diseinu elektrikoa	46
PCBaren diseinua.....	48
Egiaztapena eta emaitzen bilketa.....	49

4. Alderdi Ekonomikoak.....	50
4.1 Gastuen justifikazioa.....	50
4.1 Gastuen guztirakoa	51
5. Ondorioak	52
6. Bibliografia.....	53
I. Eranskina: Baldintzen plegua. Aplikatu daitezkeen arautegia.....	54
II. Eranskina: Planoak eta eskemak.....	55
Diseinu analitikoa	55
Simulazioa.....	57
Prototipoaren fabrikazioa.....	62
Softwarearen bidezko diseinu elektrikoa	63
PCBaren diseinua.....	69

Laburpena

Proiektu honen funtsa silizio-karbuoz (SiC) osatutako tiristore bidezko tentsio handiko DC/DC transformadore erresonantzaile isolatu bat eraiki aurretik, horren tentsio baxuko prototipo bat garatzea da. Jadanik erabiliak dira HVDC (High Voltage Direct Current) trakzio-aplikazioetan, eta ikerketa askoren ondorioek diotenez, transformadore hauek potentzia altuko elektrizitatearen garraioan oso erabilgarriak izango dira etorkizunean. Ekar ditzaketen onurak asko izan daitezke, horien artean, energia kontsumoa eta energiaren garraio-kostuak gutxitzea, baita ere, transformadoreen tamaina txikitzea, baina horretarako beharrezkoa da kostu baxuko eta sendotasun handiko transformadoreak garatzea.

Este proyecto describe la fabricación de un prototipo previo al desarrollo de un transformador DC/DC de alta tensión resonante y aislado, compuesto por tiristores carburo de silicio (SiC). A día de hoy este tipo de transformadores DC se utilizan en aplicaciones de tracción, y según muchos estudios realizados, serán este tipo de transformadores los que cambien el modelo de distribución de electricidad de alta potencia. Los beneficios que pueden llegar a tener son muchos, algunos de ellos podrían ser las disminuciones del consumo de energía y costes de la distribución energética, tanto como la disminución de tamaño de los transformadores, pero para ello será necesario desarrollar transformadores robustos y de bajo coste.

This project seeks to describe a first prototype manufacture, before the development of a DC/DC isolated resonant transformer made of silicon carbide (SiC) thyristors. Nowadays this kind of transformers are used in traction applications, and according to many studies, these components will be the future of power distribution. The benefits of these transformers could be many, such as less energy consumption, volume and cost reduction in power distribution. To do so, it is necessary to develop robust and low cost transformers to be an alternative of existing ones.

Taulen zerrenda

Taula 1 – Ponderazio-taula	11
Taula 2 – Osagaia-taula Farnell Components S.L.....	17
Taula 3 – Osagai-taula RS Components	17
Taula 4 – Aukeraketa-taula.....	20
Taula 5 -Probabilitatea vs eragina taula	21
Taula 6 – Proiektuaren kudeaketa fasea.....	26
Taula 7 – Proiektuaren hasiera fasea.....	26
Taula 8 -Proiektuaren garapen fasea	26
Taula 9 – Proiektuaren aurkezpen fasea	26
Taula 10 – Osagaien taula.....	35
Taula 11 - Egoera gate1 seinalea aktibo dagoenean	38
Taula 12 - Egoera gate2 seinalea aktibo dagoenean	38
Taula 13 – Barne orduak.....	50
Taula 14 - Amortizazioak.....	50
Taula 15 – Osagaien kostuak.....	50
Taula 16 – Kostu orokorrak.....	50
Taula 17 – Gastuen guztirakoaren taula	51

Irudien zerrenda

Irudia 1 – Oinarrizko HVDC sistema.....	5
Irudia 2 – HVDC LCC sistemaren potentzia-bihurgailua	6
Irudia 3 – HVDC LLC sistemaren sarrera (beltzez) eta irteera seinaleak (gorriz) .	6
Irudia 4 – Tiristoreak seriean konektatuz osatutako HVDC etengailua	6
Irudia 5 – HVDC VSC sistemaren eskema	7
Irudia 6 –AC eta DC sistemetako bide-zorraren konparaketa.....	9
Irudia 7 – Tiristorearen egitura eta sinboloa.....	12
Irudia 8 – Tiristorearen I-V kurba, ateko korrante ezberdinen kasuen azalpena	13
Irudia 9 – MOSFETen sinbolo bidezko sailkapena.....	13
Irudia 10 – MOSFETen sailkapena egituraren arabera.....	14
Irudia 11 – MOSFETen $I_D - V_{GS}$ kurbak.....	15
Irudia 12 – MOSFETen $I_D - V_{DS}$ kurbak, V_{GS} ezberdinetarako.....	15
Irudia 13 – IGBTaren sinboloa.....	16
Irudia 14 – IGBTen erabilera ezberdinen eskema eta maiztasun- I_c erlazioa [9].	16
Irudia 15 – IGBTaren egitura.....	16
Irudia 16 – IGBTaren $I_D - V_{CE}$ kurba, V_{GE} ezberdinetarako	17
Irudia 17 –Kapazitatea (VA) vs maiztasuna (Hz)–Osagaien erabilera esparruak [Powerex.inc-en eskutik]	18
Irudia 18 – Tentsioa vs korrantea vs maiztasuna – Gailuen konparaketa	18
Irudia 19 - Tentsioa vs korrantea vs maiztasuna.....	19
Irudia 20 – Gantt diagrama	27
Irudia 21 – PCBaren diseinua.....	28
Irudia 22 – Diseinuaren potentzia-atala	29
Irudia 23 – Tiristore bakarraren kasua.....	29
Irudia 24 – Tiristore bakarraren kasu sinplifikatua.....	29
Irudia 25 – Pultsu erresonantea eta kondentsadorearen karga.....	30
Irudia 26 – Lurreko korrante nulua adierazteko eskema.....	30
Irudia 27 – Fase bereko tiristore bi aktibo daudeneko kasua.....	31
Irudia 28 – Pultsu erresonante bikoitza	31
Irudia 29 – Magnetizazio induktatzia diseinu orokorrean	32
Irudia 30 – Vichy DM4070 inpedantzia neurgailua.....	33
Irudia 31 – Neurketa egiteko egin erabili beharreko eskema	33
Irudia 32 –Tiristore bakarra, magnetizazio induktantzia kontuan izanda	33
Irudia 33 – Tiristorea itzaltzen den kasua	34
Irudia 34 – Simulazio bidezko emaitzak.....	34
Irudia 35 – Transformadoreak ikusten duen zirkuitu baliokidea	35
Irudia 36 – Magnetizazio induktantziaren efektua.....	36
Irudia 37 – Tiristoreen disparo-seinaleak isolatzeko zirkuitua	37
Irudia 38 – Pultsu erresonanteak sortzeko zirkuitua.....	37
Irudia 39 – Simulazio eskema	39
Irudia 40 – Simulazio emaitzak.....	39
Irudia 41 – Tiristorearen tentsioa eta korrantea	40
Irudia 42 –Kargako kondentsadorearen karga eta deskarga	40
Irudia 43 – Transformadorearen sekundarioko korrantea	41
Irudia 44 – Prototipoa protoboard batean muntatuta	42
Irudia 45 - Transformadorea.....	42

Irudia 46 – Tiristoreen kontrol zirkuitua	43
Irudia 47 – Tiristoreak, paraleloko kondentsadoreak eta ateko erresistentziak .	43
Irudia 48 – Zubi artezgailua.....	43
Irudia 49 – Kargako kondentsadorea	44
Irudia 50 –Kargako erresistentzia.....	44
Irudia 51 – Irteerako tentsioa, tiristorearen korrontea eta tentsioa, eta ateko seinalea	44
Irudia 52 – Tiristorearen tentsio eta korronteen zoom-a.....	45
Irudia 53 – Irteerako tentsioa, kondentsadoreko korrontea eta gate1 seinalea..	45
Irudia 54 – OrCAD Capture softwarean diseinatutako eskema elektrikoa	46
Irudia 55 – Library Expert Pro 2015 – SK80D12F oinatza.....	46
Irudia 56 – Library Expert Pro 2015 – Tiristorearen (TO220) oinatza.....	46
Irudia 57 – Osagaien ezaugarri-taula.....	47
Irudia 58 – Netlista sortzeko leihoa.....	47
Irudia 59 – OrCAD PCB Editor – Place Manual aukera botoia	48
Irudia 60 - PCBaren diseinu osoa	48
Irudia 61 - funtzionamendua.....	49

Akronimoen zerrenda

HVDC	Tentsio altuko korrante zuzena (High Voltage Direct Current)
MVDC	Tentsio ertaineko korrante zuzena (Medium Voltage Direct Current)
DC	Korrante zuzena (Direct Current)
AC	Korrante alternoa (Alternating Current)
SiC	Karburu-silizioa (Silicon Carbide)
LV	Tentsio baxua (Low Voltage)
MV	Tentsio ertaina (Medium Voltage)
HV	Tentsio altua (High Voltage)
PCB	Printed Circuit Board
MOSFET	Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor

1. Memoria

Helburua eta helmena

Proiektu honen helburua haize-sorgailuak elikatzeko DCDC transformadore erresonante isolatu baten prototipoa garatzea da. Tentsio-maila baxuetarako DCDC transformadore erresonante isolatu bat prestatu eta eraikiko da, DC elikadura bipolarra eta lurreko korrantea zero duen diseinu bat garatuz. Mota honetako transformadoreek haize-turbinaren sistemaren elikadura erregulatzen laguntzen dute haizerik ez dagoen kasuetan. Energiaren ikuspuntutik, transformadore horiei esker uneoro erantzun ahal izango zaio potentziaren eskariari, oso erantzun-denbora azkarrekin gainera [1]. Tentsio-maila altuak erabiltzen dituzten beste aplikazio berezi batzuk ere badaude, hala nola laser sistemak, medikuntzako zein industriako X izpien bidezko aplikazioak, eta *travelling wave tube* (TWT) erabiltzen duten telekomunikazio-ekipoak edo iragazki elektrostatiakoak besteen artean.

Gaur egungo adimendun transformadoreak garatzen direnean, normalean maiztasun altuko DCDC motako bitarteko lotura bat erabiltzen da, transformadorearen nukleo magnetikoa txikiago izan dadin [2], eta hau da proiektu honetan erabiltzen den transformadore erresonantea izatearen zergatia. Noranzko bakarreko potentzia elektrikoak bihurtzeko kasuan, tentsio-maila altuko harian bakarrik jarri ohi dira diodoak, baina haize-turbinaren kasuan konfigurazio horrek ez du balio, haizerik ez dagoenean energia bidali behar baita haize-turbinarantz, kontrolari eusteko. Aurretik esan bezala, potentzia elektrikoak noranzko bikoak izan behar du, haize-turbinek lana ondo egiteko; noranzko bateko potentzia-mailak oso altua izan beharko du, MW ingurukoa, eta beste noranzkoa kW-ekoa; hortaz, sistemaren kostuak murrizteko asmoz, potentzia txikiko bihurtzeko erabiltzea proposatzen da haize-sorgailua elikatzeko. Horrela potentzia handiko norabidean diodoak bakarrik erabiltzen dituen konbertidorea erabili daiteke prezioa asko txikituz.

Jarduera horietaz gain, tentsio-maila handiak lortzeko, ohikoa da moduluak seriean batzea, baina horrek bere alderdi txarrak ditu, zeren harilak (L) eta kondentsadoreak (C) dituzten zirkuitu erresonanteak elkarrekin lotzea ez baita beti erraza izaten, horiek maiztasun ezberdinetan izan dezaketen portaera ez baita arrunta [3]. Hortaz, tentsio altuko gailuak erabiltzea komeni da, beraien artean seriean konektatuta egongo diren modulu kantitatea murrizteko, zenbat eta seriean konektatutako modulu gehiago, are eta osagai parasito gehiago izango baitira.

DC motako transformadore erresonanteek ditzuzten konmutazio-galera baxuek oso erabilgarri bilakatzen dituzte, baita tiristoreen erabilerak ere, piztu-itzaltze leunak baitituzte. Tiristore horiek oso tentsio eta korrante handiak jasan ditzakete, eta ezaugarri hori oso interesgarria da tentsio ertaineko distribuzio-sistemetan.

Gaur egun, elektronikako gailuen merkatuan 6,5 kV eta 40-60 A inguruko silizio-karburozko (SiC) tiristoreak daude [4], oso egokiak direnak *Smart Grid* motako sare elektrikorako, oso tentsio handiko sareak dira eta.

Proiektu honetan garatu den DC transformadore erresonantea oso egokia da tentsio baxuetarako (LV), prototipo bat baita, non, tiristoreen ateko kontrola egiteko maiztasun finko bat erabiliz gero, “true” izeneko DC transformadore bat izango litzatekeen, $V_{out} = NV_{in}$ erlazioa betetzen dutenetakoa, N delakoa transformadorearen espiren erlazioa izanik. Gerora, etorkizuneko proiektuetan, prototipoaren diseinutik abiatuz, MV/LV motako DC transformadore bat sortuko da, siliziozko tiristoreak erabili ordez, silizio-karburozko eta potentzia handiko tiristoreak erabiliz.

Gaiaren egoera

Proiektu hau HVDC (High Voltage Direct Current) esparruan kokatzen da. Gaiaren egoera hau kokatzeko, lehenik eta behin, sarrera txiki bat egingo da, ondoren HVDCak izan duen eboluzioaren jarraipen bat gauzatu. Azkenik HVDC teknologiaren funtzionamentua aztertuko da eta hau erabiltzeak dituen abantaila tekniko, ekonomiko eta ingurumenarekiko abantailak azalduz.

1.2.1 Sarrera

Energia elektrikoa korrante alternoaren (AC edo alternating current) garraiatu eta heltzen da gure lantegi eta etxeetara, honen arrazoia garraioan ematen diren potentzia galerak txikitzean datza.

Potentzia jakin bat eramateko, kableetan ematen diren galera ohmikoak korrontearekin era kuadratikoa handitzen dira ($P = R \cdot I^2$) eta beraz garraioan tensio oso altuak erabili behar dira korrantea gutxitzeko: potentzia bera garraiatu ahal baita tentsio-maila altu eta korrante-maila baxuekin, zein tentsio-maila txiki eta korrante-maila handiekin ($P = I \cdot V$). AC motako sistemek ere badituzte abantaila batzuk: tentsioa handitu edo txikitzea sinplea da transformadoreen bidez, hauek oso isolamendu maila handiak lortzen dituzte eta galera gutxi izaten dute. Horretaz gain AC sorgailu trifasikoa askoz efizienteagoa da ikuspegi guztietatik DC sorgailua baino.

Arrazoi hauengatik, XIX. mendetik, Westinghousek Edisonekin korranteen gatazka irabazi zuenetik, AC sistemak eta transformadoreak erabiltzen dira elektrizitatea garraiatzeko, eta horrek DC sistemen eboluzioa geldoagoa izatea eragin du, baina gaur egun sistema hauen beharrezan geroz eta handiagoa da eta ikertzaileen lanek horrela islatzen dute.

Nahiz eta energia elektrikoaren garraio eta sarbide-sareak korrante alternoan lan egiten duten, HVDC sistema korrante jarraiko alternatiba efizientea da oso distantzia luzeko eta potentzia handiko energia elektrikoaren garraiorako, adibidez itxasoan sortutako energia kostaldera garraiatzeko eta beste hainbat aplikazio berezitan. Etorkizuneko energia berriztagarrietan oinarritutako sistema elektrikoaren lagungarri handia eta ezinbestekoa izango da HVDC teknologia. Honen zergatia AC sistemen mugetan datza, hauetako bi distantzia mugak eta maiztasun ezberdinetako sareak zuzenean lotu ezina dira.

Energiaren paradigma aldaketarekin eta sare inteligenteagoa eraikitzeke ahalegin honetan, HVDC sistemak gaur arte izan duen garrantzia baino garrantzi handiagoa hartuko du korrante alternoko sarea osatzen. Adibidez, gaur egun itxasotik energia elektrikoa lurrera garraiatzeko metodorik hautatuena eta korrante alternoko sare asinkrono ezberdinen arteko loturak egiteko modurik egokiena HVDC da. Era berean, HVDC distantzia oso luzeko energia elektriko kantitate handiak garraiatzeko teknologiarik egokiena da, energia galera minimoekin garraiatzeko gai baita. Ahalmen honek, kontsumitzaileetatik oso urruti dauden energia berriztagarriek sortutako energia hauengana garraiatzeko aukera ematen du.

Kasu espezifikoeetan, korrante alternoaren ordez HVDC aukeratzea arrazoi konplexu askorengatik izan daiteke. Batzutan teknikoki desiragarria da sarearen kontrolabilitatea handitzeko, beste batzuetan ekonomikoki inbertsioa osotasunean merkeagoa izan daiteke galerak kontutak hartuta, eta besteetan ingurunerako egokiagoa gertatzen da. Gehienetan HVDC loturak erabiltzea arrazoi tekniko, ekonomiko eta ingurune arrazoen konbinazio-sorta batekin justifikatuta daude.

1.2.2 HVDC-aren eboluzioa

HVDCren ikuspegi teknikoa landu aurretik, historian zehar teknologia honek eduki duen lekua aztertuko da atal honetan. HVDC bideragarria izateko, tentsio oso altuak arteztu eta korrante zuzena lortzeko gaitasunaz gain, gero korrante jarrai hori berriro korrante alternora pasatzeko gai izan behar da.

Izatez, energia elektrikoaren garraioa eta banatzea korrante jarraiko sistemekin hasi zen. Alemanian, 1882. urtean, 50 km eta 2 kV-eko tentsiodun korrante jarraiko transmisio-sistema eraiki zen Miesbach eta Munichen artean. Garai horietan tentsioaren handitzea korrante jarraiko makina birakariekin bakarrik egin zitekeen.

1920. hamarkadan Calverley eta Highfieldek "*transverter*" izeneko sistema martxan jartzen saiatu ziren, hainbat transformadore sinkrono eta eskuilak erabiltzen zituen artezgailu batetan oinarrituta. [5]

Merkurio-arkuko artezgailuak asmatu zirenean, 1930. hamarkadan, artezgailu eta inbertsore estatikoak sortzen saiatu ziren lehenengo aldiz, eta 1940. urterarte Amerikan *thyatrona* eta European *mercury pool* erabiliz hainbat artezgailu fabrikatzeko saiakerak egin ziren.

Suedia, Estatu Batuak eta Sobietar Batasunean distantzia oso handiak daudenez, herrialde hauek oso interesatuta agertu ziren HVDC sistemak garatzeko. Sobiet Batasunean anodo bakarreko balbula bat erabili zen II. Mundu Gerra garaian, eta Suedian *Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget* (ASEA) elkarte industrialak ikerketa ahalegin handia egin zuen 1940tik aurrera. Alemaniako kasuan, sare elektrikoaren bonbardaketetatik babesteko lurpeko kableak seguruak izango zirelakoan, Berlinen Charlottenburg eta Moabit lotzen zuen 115 km, 60 MW eta 400 kV-ko HVDC sistema bat eraiki zen, baina martxan jarri aurretik, Sobiet armadak Berlin hartu zuen eta sistema elektriko hura Sobiet Batasunera eraman zen.

1945tik aurrera Sobiet Batasunak balbulen ikerketak berrartu zituen eta Mosku eta Kashira arteko 112 km, 30 MW eta 200 kV-ko HVDC sistema bat eraiki zen. Ala ere Suedia, eta bereziki Udo Lamm, izan zen HVDC sistemaren garapenean pausurik garrantzitsuenak eman zuena, bi korrante alternoko sistemak (Gotland uhartekoa eta Suediakoa) lotzean 50 km, 20 MW, eta 100 kV ko HVDC sistema bat erabiliz 1954an. Horren ondoren ASEAk la Manchako ubidean, Konti-Skan, Suedia, Dinamarka, Sakuma, Zelanda Berriko eta Italia Sardinia HVDC transmisio-sistemak eraiki zituen merkuriozko balbulak erabiliz.

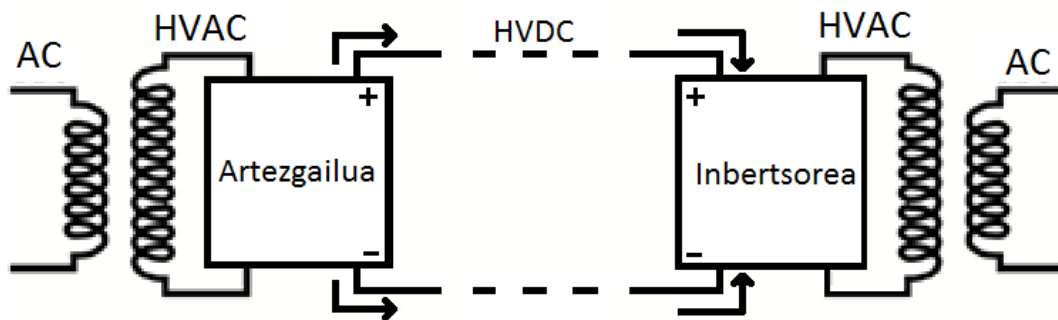
Hurrengo urrats garrantzitsua 1967an eman zen, Gotlandko sisteman merkuriozko balbula tiristore-sistema baten (tiristoreak material erdieroalez egindako artezgailuak dira) bidez ordezkatzean. Ondorengo aurrerapausu adierazgarria 1997. urtean ABBk (Asea Brown Boveri) Hällsjönen, Suedian, lehenengo aldiz HVDC VSC (Voltage Source Converter) IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor) erdieroale bidezko teknologia erabili zuenenean eman zen. Lehenengo entsegu honetan 10 km, 3 MW eta 10 kV-ko sistema inplementatzen saiatu ziren, eta ordutik hona teknologia honek HVDCaren erabilpenaren hedapena ahalbidetu du hurrengo ataletan ikusiko den bezala.

Azken urteotan HVDC VSC teknologian eman den aurrerapen tekniko nagusia bi mailako konbertidoreak MMC (Modular Multi-level Converter) bihurgailuen bidez ordezkatzean eman da. Lehenengo HVDC VSC sistema komertziala MMC potentzia bihurgailuekin 2010. urtean eraiki zen, San Frantzisko hiriko badiaren bi muturren arteko kablea instalatzeko (*trans bay cable*). Ordutik hona, potentzia-erdieroaleen garapenarekin batera eman dira HVDC sistemen aurrerapausu handienak eta HVDC sistemen kopurua munduan asko handitu da.

1.2.3 Funtzionamendua eta abantailak

Funtzionamendua

Gaur eguneko HVDC sistema AC/DC eta DC/AC konbertsioa egiteko potentzia-elektronikan oinarritzen da, irudian erakusten den bezala. Kontuan izan behar da oso tentsio eta korrante handietan (80 kV - 800 kV eta 100 A - 5000 A) egin behar dela konbertsio hau, eta gaur egun existitzen diren potentzia handieneko erdieroaleak erabiltzen dira bertan.

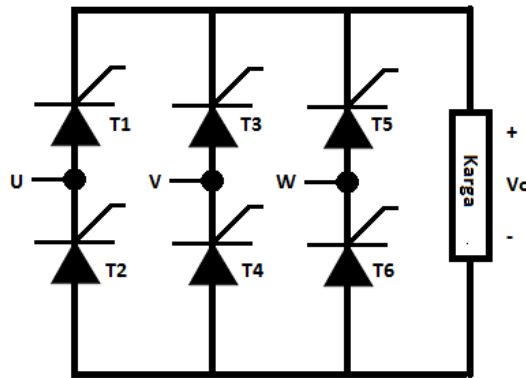


Irudia 1 – Oinarrizko HVDC sistema

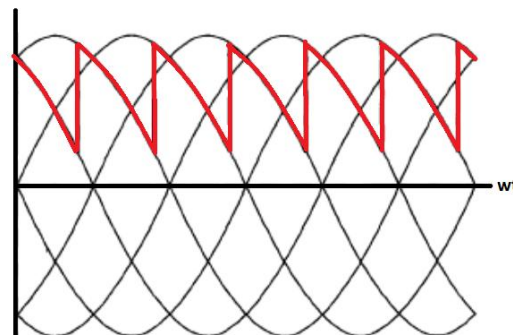
Aplikazioaren arabera bi teknologia nagusi erabiltzen dira gaur egun, batetik HVDC LCC, potentzia-maila altuenak lortzeko, eta bestetik HVDC VSC potentzia maila txikiagoetan eta kontrolagarritasun baldintza handiagoak izan behar direnean, eta batez ere, itsasoan kableak erabili behar direnean. Sistema hau goiko irudian azaltzen diren artezgailu eta inbertsoreetan erabiltzen diren potentzia-bihurgailuetan oinarritzen da. Hurrengo ataletan bi teknologia hauek deskribatzen dira.

HVDC LCC:

HVDC LCC (Line Commutated Converter) tiristore bidezko artezgailuetan oinarritzen da. Hurrengo irudian HVDC LCCn erabiltzen den oinarritzko sistema agertzen da. Bihurgailua tiristoreen bidez osatutako artezgailu bat da, non, DC aldeko tentsioaren batz besteko balioa kontrolatu daitekeen, +V eta -V balioen artean, tiristoreen desarraila angeluaren (α) bidez, eta transmisio-linearen mutur bakoitzean artezgailu bat kokatuz potentzia bi norabideetan bidali daiteke.



Irudia 2 – HVDC LCC sistemaren potentzia-bihurgailua



Irudia 3 – HVDC LCC sistemaren sarrera (beltzez) eta irteera seinaleak (gorriz)

Gaur egun HVDC LCCn erabiltzen diren tiristoreak 8 kV eta 4 kA jasateko gai dira eta 50-60 kHz-ko maiztasunetan konmutatzen dute. HVDCn behar diren tentsioak lortzeko tiristoreak serian konektatu behar dira, hauen artean tentsioa era egokian banatu. Hurrengo irudian tiristoreak serian konektatuz lortutako gailua ikusi daiteke.

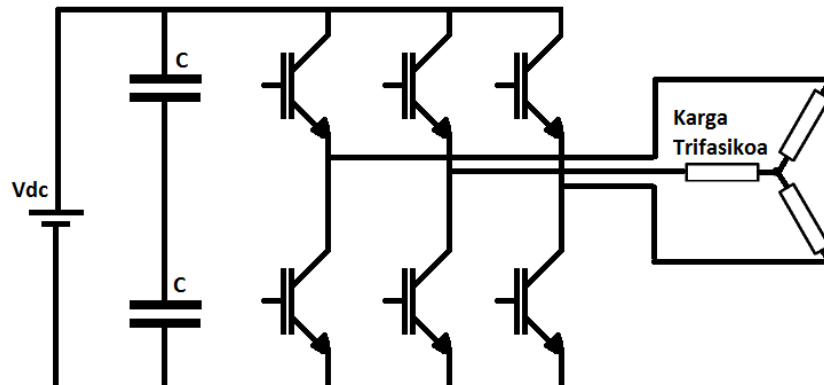


Irudia 4 – Tiristoreak serian konektatuz osatutako HVDC gailua

HVDC VSC:

HVDC VSC (Voltage Source Converter), IGBTak erabiltzen dituzten inbertsore guztiz kontrolatueta oinarritzen da. Lehenengo generazioko HVDC VSC sistemak inbertsore trifasikoaren topologian oinarrituta zeuden, baina gaur egun MMC (Modular Multilevel Converter) topologia erabiltzen da galerak gutxitzeko eta distortsio harmonikoa gutxitzeko [6].

HVDC VSCn erabiltzen diren IGBTak 5 kV eta 3 kA jasateko gai dira, eta 2 kHz-etan konmutatu daitezke. Hurrengo irudian HVDC VSCn erabiltzen den oinarritzko eskema agertzen da.



Irudia 5 – HVDC VSC sistemaren eskema

Abantaila Teknikoak

Gaur egungo HVDC teknologia sare elektrikoari hainbat abantaila tekniko eskaintzen dizkion teknologia bat da. Zenbait aplikaziotan aukera bakarra da korrante alternoak dituen mugengatik. Adibidez, korrante alternoan, ezin dira era ekonomikoan garraiatu oso distantzia luzeko (>1000 km) energia elektriko kantitate handiak, tentsio erorketa eta galerak handiegiak direlako. Gainera, maiztasun ezberdinetan lan egiten duten korrante alternoko sareak ezin dira elkar lotu HVDC lotura bat ez bada erabiltzen (horretaz gain HVDC sistemak potentziaren fluxuaren berehalako kontrol zehatza ahalbidetzen du). Hurrengo lerroetan HVDCaren abantaila tekniko nagusiak zehazten dira [7]:

- **Sare elektriko asinkronoen arteko lotura:**

AC sistema ezberdinak zuzenenan lotzeko, adibidez sarea indartzeko edo sistemen arteko energiaren salerosketa ahalbidetzeko, hauek sinkronizatuta egon behar dute. Horrek, tentsio eta maiztasun berdinean lan egitea esan nahi du, eta hau lortzea oso zaila izan daiteke arrazoi ezberdinengatik: ezegonkortasunak sortu daitezkelako, zirkuitulabur korronteak handiegiak izan daitezkelako, edota kontrolatu gabeko energia-fluxuak azaldu daitezkelako. HVDC asinkronoa denez, maiztasun ezberdineko AC sistemak lotzeko erabili daiteke. Teknologia hau munduko hainbat lekutan erabili da banatutako sistema elektriko handiak elkarrekin lotzeko, adibidez Nordel (Eskandinavia) eta Europako UCTE sistemak, Estatu Batuetako ekialde eta mendebaldeko sistemak (maiztasun berdinean erabiltzen dituztelako, baina ez daude sinkronizatuta), baita Japonia eta Sudamerikako hainbat sistema ere (maiztasun ezberdinak erabiltzen dituzte).

- Distantzia handiko urpeko kableen bidezko konexioak:

Oso distantzia handiko AC motako sistemen bidezko energia-transmisioan, kablearen kapazitatearen korrante erreaktiboa korrante aktiboari gehitzen zaio, eta honek kablearen luzeera maximoa mugatzen du. DC sistema batean ordea ez dago honelako mugarik, eta teorikoki edozein luzerako kablea erabili daiteke. Arrazoi horregatik batzuetan HVDC da erabili daiteken aukera bakarra. Adibidez, itsasoan instalatutako sistema batean, 50 km ingurutik gorako distantzietan, HVDC izaten da aukera tekniko bakarra. Adibidez NorNed konexioa, Norbegia eta Holanadaren artean, itsasotik 580 km luzeko HVDC kable bidez egiten da.

- Sarearen kontrolagarritasunaren hobekuntza:

HVDCk ia berehala kontrolatu dezake potentzia aktiboaren fluxua (HVDC VSC teknologiak gauza bera egin dezake potentzia reaktiboarekin), eta beraz AC sistemetan gertatzen diren oszilazioak moteltzeko, maiztasuna konstante mantentzeko, AC sarean potentzia era egokian banatzeko, oszilazioak moteltzeko eta abar oso erabilgarriak izaten dira. Askotan, kontrol gehigarri hori AC linea ezberdinen kapazitatea handitzeko erabili daiteke.

- Zirkuitulabur korrontearen gutxitzea:

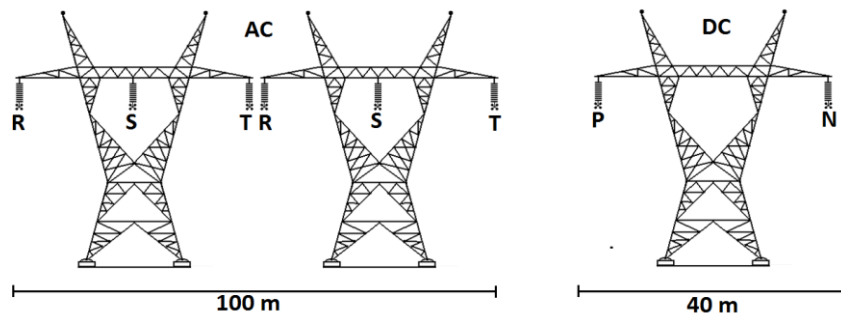
Sorkuntza-instalazio bat AC sarera lotzean, AC motako transmisioa erabiliz, zirkuitulaburreko korrontea handitzen da. Zirkuitulaburreko korrante oso altuak geroz eta arazo handiagoa bihurtzen ari dira hiri edo biztanleria handiko gunetan, eta askotan beharrezkoa izaten da babes-ekipamendu berriak, handiagoak eta gareztiagoak jartzea. HVDC sistemak ez du handitzen konektatzen den AC sisteman zirkuitulaburreko korrontea. Energia sorgaliuak DC sistema baten bidez lotzen badira, zirkutu labur korrontea ez denez handitzen, ez da babes ekipamendu berririk jarri behar AC sistemaren aldean.

Ingurugirorako abantailak eta abantaila ekonomikoak

HVDC sistemak, hainbat kasutan, abantaila ekonomiko, tekniko eta ingurugiroarekiko abantailak dituzten inpaktu gutxiagoko alternatiba izaten dira. Hurrengo lerroetan abantaila nagusienak aipatzen dira:

- Bide-zorraren beharraren gutxitzea:

HVDC aireko linea bipolar bat, zirkuito bikoitzeko AC aire linea bat bezalakoa da fidagarritasun ikuspuntutik, beraz bi eroaledun HVDC linea batek inpaktu txikiagoa du ingurugiroan, 6 eroaleko AC zirkuito batek baino, espazio gutxiago eta bistarako inpaktu txikiagoa duelako. HVDC VSC teknologiarekin, posiblea da lurperatutako kableak erabiltzea airetik doazen lineak ordezkatuz. Beheko irudian potentzia bera eramateko eta redundantzia bereko AC eta DC sistemek behar duten bide-zorra erakusten da.



Irudia 6 –AC eta DC sistemetako bide-zorraren konparaketa

- Energia-galerak gutxitu:

Kasu gehienetan, HVDC transmisio galerak kapazitate berdineko AC transmisioarenak baino txikiagoak izaten dira aire lineak erabiltzen direnean, eta baita kableak erabiltzen direnean ere. Adibidez, 735 kVeko HVACko 3 GWeko transmisio-sistema batean potentzia galerak % 6,5-ekoak dira 1000 km-ko distantzia baterako. HVDC sistema batean ordea, 800 kVeko eta 6,4 GWeko transmisio-sistema batean potentzia galerak % 3,5ekoak izango lirateke.

- Eragin positiboak sistema elektrikoan:

HVDC sistema asko sare elektriko ezberdinak lotzeko eraiki dira. Lotura hauek era eraginkorragoan lan egiteko aukera ematen dute. Energia elektrikoa sortzeko dauden gune ezberdinak lotzeko aukera ematen du HVDC teknologiak, sorkuntza-instalazio berriak eraikitzeko beharra gutxituz, honek ekonomikoki dakarren aurreztearekin. Ingurugirorako abantailen artean, sorkuntza-gune berriak ez eraikitzea, eta existitzen direnak era eraginkorrago batean lan egitea daude. Adibidez, ingurugirorako oso lagungarria izan daiteke sorkuntza hidroelektriko ahalmen handia duten sistemak eta energia sorkuntza konbentzionalean oinarrituta dauden sistemak elkarrekin lotzean. Energia-sorkuntza konbentzionala gutxitzeko, eskari-pikoak ematen direnean energia hidroelektrikoa erabili daiteke, eta sorkuntza konbentzionala era efizienteagoan erabili kontsumo konstantearen bidez.

Ikuspegi ekonomikotik, *break even distance* izendatutako transmisio-distantzia batetik aurrera HVDC sistema merkeagoa gertatzen da. Normalean, aire lineak erabiltzen direnean 500-800 km inguruan egoten da distantzia hau eta kableak erabiltzen direnean 50 km inguru.

Aire lineak edo kableak merkeagoak dira HVDCren kasuan, baina HVDCn erabili behar diren artezgailuak kostu handiagoa daukate AC estazioekin alderatuz. HVDC kasuan transformadoretaz gain ACDC eta DCAC bihurketa egiten duten bihurgailuak erabili behar baitira.

Ala ere transmisio-distantzia handitzen den heinean, linearen kostua eta potentzia-galeren kostua handiagoa egiten denez, *break-even distance* izeneko puntu batera heltzen da, eta distantzia honetatik aurrera HVDC sistemaren kostua AC sistemarena baino merkeagoa izaten da. Hau nabarmenagoa da kableak erabiltzen diren kasuetan (normalean *break even distance* delakoa 50 km inguruan egoten da).

MVDC itsasoan dauden parke eolikoetan

Itsasoan kokatutako parke eolikoetan dagoen kableen luzera ehundaka kilometrotakoa izan daiteke. Horregatik, onuragarria izan daiteke aurretik azaldu diren abantailak kontutan harturik MVDC sistemak erabiltzea parkearen barruan. Horretarako haize-sorgailuak tentsioa igotzeko DCDC transformadoreak erabili beharko dituzte. Gaur egun teknologia hau ez dago garatuta eta proiektu honek ildo horretan hasierako urratsak eman nahi ditu.

Alternatiben analisia

Atal honen helburua proiektuko DCAC bihurketa gauzatzeko erabili ahal daitezken potentzia-elektronikako gailuen arteko alternatiben analisi bat gauzatzea da. Horretarako beharrezkoa da hasieratik ponderazio-taula bat garatzea, ondoren gailu bakoitzaren ezaugarrien arabera aurretik zehaztutako puntu kantitate jakin bat esleitzeko ponderazio-taulako atal bakoitzean. Azkenik, puntuazio altuena duen gailua izango da proiektuan erabiliko dena.

Emandako puntuak 0tik 10era bitartekoak izango dira: 0 proiektuarentzat onurarik ez dakarrenean esleituko da, eta 10 proiektuarentzat oso onuragarria den kasuetan soilik.

1.3.1 Ponderazio-taula

Gailuaren ezaugarri ezberdinak izango dira kontuan: tamaina, jasan ditzakeen tentsio eta korrante maximoak, kommutazio abiadura eta prezioa. Ondorengo taulan azaltzen da proiektuarentzat aurretik zerrendatutako ezaugarri bakoitzak duen garrantzia, ehunekotan.

Ponderazio-taula	
Gailuaren tamaina	% 10
Potentzia maximoa	% 50
Kommutazio abiadura	% 10
Prezioa	% 30

Taula 1 – Ponderazio-taula

1.3.2 Aukera posibleak

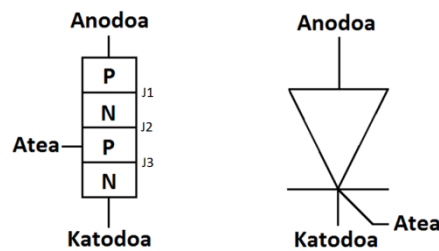
Proiektu hau gauzatzeko gailu elektronikoen artean aukera ezberdin asko daude, baina hurrengo hauek analisatuz jardungo da: tiristoreak (SCR), IGBTak eta MOSFETak. Hurrengo lerroetan gailu bakoitzaren deskripzio labur bat egingo da, funtzionamendua azaldu eta ponderazio-taulan azaltzen diren ezaugarrien inguruko analisi sakonago bat gauzatu da gailu bakoitzaren kasurako. Neurri handi batean funtzionamenduaren informazioa **Muhammad H. Rashiden Potentzia Elektronika** liburutik eskuratu da [8], eta prezioen, zein potentzia (tentsio eta korrante) maximoen azterlana egiteko Farnell Components SL eta RS Components distribuzio etxeen katalogoak erabiliko dira, betiere prezio antzekorako dauden tentsio eta korrante maximoak bilatuz gailu bakoitzaren kasuan.

Lehenik eta behin gailu erdieroale bakoitzaren funtzionamenduaren azalpen labur bat egingo da, eta ondoren argibide-taula baten bidez beste alderaketa guztia egingo da, grafika adierazgarri batzuekin lagunduz.

Tiristoreak:

Tiristoreak potentziako gailu-erdieroale mota garrantzitsuenetariko bat dira, hori dela eta asko erabiltzen dira potentziako zirkuitu elektronikoetan. Hauen portaera gailu biegonkorrena da, hau da, ez-eramalea izatetik, eramalea izatera pasatzen dira. Tiristore bat aktibatze modu ezberdinak daude, hauen artean haustura bidezko aktibazioa (tentsio oso handiak aplikatuz anodo-katodo bitartean) eta tiristorearen atean (gate) korronte bat injektatuz lortzen dena. Azken hau kommutazioa kontrolatua izatea nahi dugunean erabiltzen den aktibatze modua da.

Tiristorearen egitura PNPN motatakoa da, eta horrela adierazten du ondorengo irudiak.

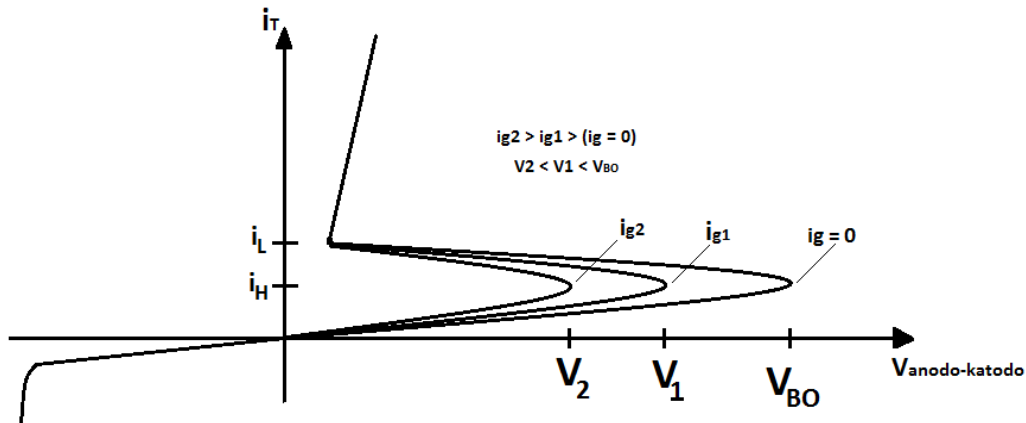


Irudia 7 - Tiristorearen egitura eta sinbologia

Anodoaren eta katodoaren arteko tentsioa (V_{AK}) positiboa denean J_1 eta J_3 junturak zuzenean polarizatuta daudela esaten da, eta J_2 ordea, alderantziz polarizatuta. Egoera honetan dagoenean, esan daiteke tiristorea ez dagoela korronterik eramaten, nahiz eta ihes-korronte txiki bat badagoen. V_{AK} tentsioa asko handitzen bada, gailuaren V_{BO} (*break out* tentsioa) gaindituz, gailua haustura egoeran sartuko da, oldarrezko biderkatzea gertatzen hasiko da, eta elektroiak mugitzen hasiko dira egitura atomikoan dauden beste elektroien aurka talka eginez. Hau gertatzen denean kate-erreakzio bat gauzatzen da, eta azkenean J_2 juntura ere korronte eraman hasten da, tiristorea aktibatuz. Honen ondorioz tiristoreak eramaten duen korronte asko handituko da eta V_{AK} tentsioa asko jaitsiko da.

Beste aktibazio egoera, atean korronte injektatze bidezko kommutazioan datza. Kasu honetan ateko terminalean korronte bat aplikatzen da, J_2 juntura korronte eramaten hastera behartzeko. Kasu honetan ere, lehen azaldutako oldarrezko biderkatzea gertatzen da, baina V_{BO} baino tentsio maila txikiagoekin nahikoa izaten da J_2 juntura zuzenean polarizatuta egotera pasatzeko, injektatzen den korronte horrek kitzikapen bat gauzatzen baitu, justura hori errazago aktibatzea eragiten duelarik. Zenbat eta handiagoa izan atetik sartzen den korronte, are errazagoa izango da tiristorea egoeraz aldatzea. Kasu guztietarako, tiristoreek gutxieneko korronte bat behar dute aktibo egoerara pasatzeko, I_L (edo latch current) korronte. Korronte muga hau gainditzen ez bada, tiristorea ez da guztiz eramalea izatera pasatzen, J_2 juntura ez baita guztiz zuzenki polarizatzen. Bestalde, tiristorea aktibatzea lortzen bada I_L baino korronte handiago bat sartuz, erdieroalea aktibo mantentzeko gutxieneko I_H (*holding current*) korronte bat beharrezkoa izango da, bestela J_2 junturan agortze-eremu bat sortuko da eramale kopuru urriarengatik, eta tiristorea itzaltze-egoerara bueltatuko da. Betiere $I_L > I_H$ betetzen da.

Ondorengo irudian tiristore baten I-V kurba ikusi daiteke, koadrante positiborako, non hausturako kasua zein ateko-terminal bidezko aktibazioak azaltzen diren:



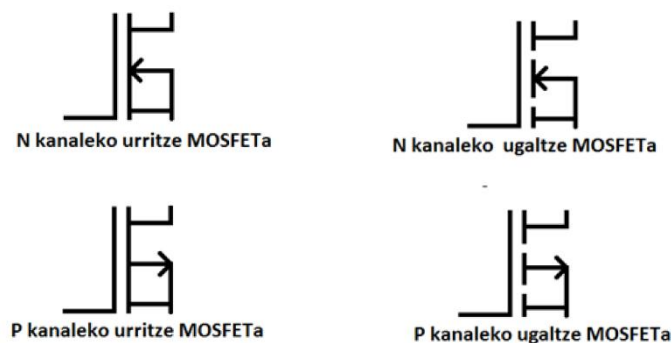
Irudia 8 – Tiristorearen I-V kurba, ateko korrante ezberdinen kasuen azalpena

Atal honetan aztertu nahi den tiristore mota fase-kontrola duten tiristorea da, SCR (Silicon Controlled Rectifier) siglekin identifikatzen dena. Mota honetako tiristoreek linea-maiztasunetan egiten dute lan, eta konmutazio naturalez deskatibatzen dira, hau da, V_{AK} tentsio negatiboa egiten denean (konmutazio denbora 50-100 us bitartekoa izaten da), eta horrek gailu erdieroale hau oso interesgarria egiten du konmutazioa abiadura baxua behar duten aplikazioentzat.

MOSFETak:

MOSFETa (Metal-Oxid-Semiconductor Field-Effect Transistor) tentsio bidez kontrolatzen den eta sarrera korrante oso baxua behar duen potentzia elektronikako gailu bat da. MOSFETek BJTen (Bipolar Junction Transistor) aldean ez daukate bigarren mailako hausturaren arazoa, zeinek korrante kontzentrazio handiek eragindako gune baten gainberotzea dakarren, energia asko metatuz gero erdieroalea hausteko arriskua izanik gainera.

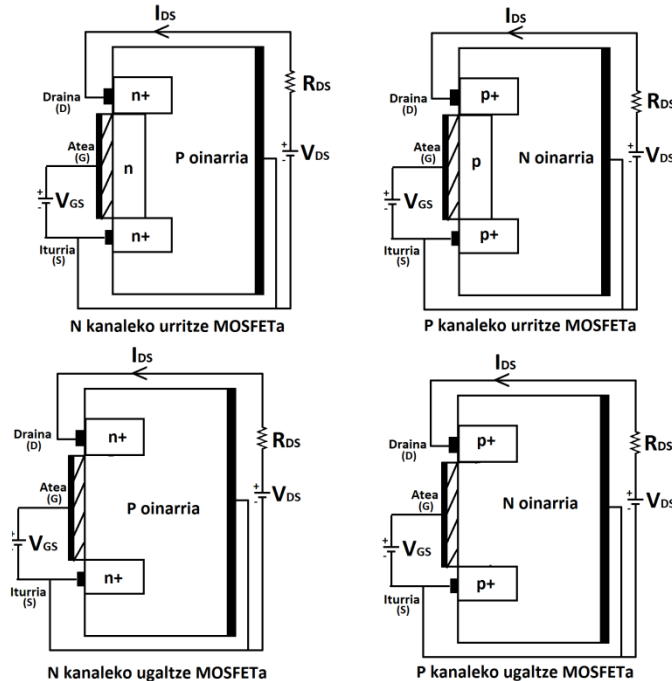
Konmutazio denborari dagokionez, oso gailu bizkorra da besteekin alderatuz gero, nanosegundo inguruko magnitudetakoa. Horrek oso interesgarria egiten du maiztasun altuko eta potentzia baxuko aplikazioetarako.



Irudia 9 – MOSFETen sinbolo bidezko sailkapena

MOSFETen artean mota ezberdin bi bereizi daitezke, alde batetik urritze MOSFETak, eta bestetik ugaltze MOSFETak. Horiek guztiek hiru terminal dituzte, D (draina), S (iturria) eta G (atea).

Beheko irudietan argiago ikusi daiteke ugaltze eta urritze MOSFET ezberdinen egitura.

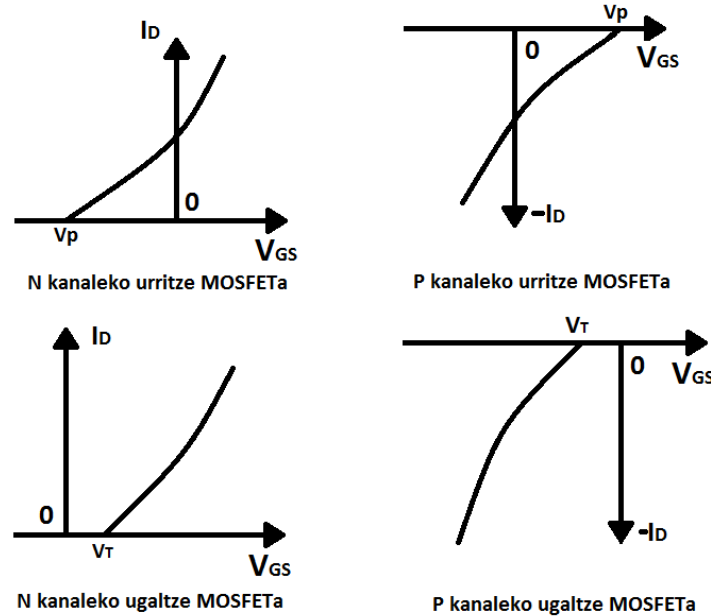


Irudia 10 – MOSFETen sailkapena egituraren arabera

Urritze motako MOSFETen kasuan, ateko oxidoaren azpian N edo P motako kanal bat duen gailu erdiekoale bat sortzeko, hurrenez hurren P edo N motako siliziozko oinarri bat erabiltzen da, non biziki dopatutako n+ edo p+ motako terminal bi sortzen diren. N eta P motako gailuen ezberdintasun bakarra D eta S terminalen polaritatearen aldaketa da. Urritze motako MOSFETen V_{GS} balioa, ateko (G) eta iturriko (S) terminalen arteko tentsioa, positiboa zein negatiboa izan daiteke. Negatiboa bada, oxidoaren azpiko kanalaren elektroiak aldaratu egingo dira, eta erresistentzia handiko gune bat sortuko da D eta S terminalen artean (R_{DS}), drainetik iturrira doan korronea (I_{DS}) oso txikia eginez, eta V_{GS} balioa oso negatiboa bada, kanal fisikoa guztiz itxiko da eta $I_{DS} \approx 0$ A izango da. Bestalde, V_{GS} balioa positiboa egiten den kasuetan, kanala zabalagoa izango da, eta horrek R_{DS} erresistentzia txikiago izatea eragingo du, I_{DS} korroneak balio handiak lortuz. Hortaz, esan daiteke, MOSFET batek korronea handia izateko, V_{GS} balioa handia izan behar dela (beti ere MOSFETaren V_T atalase tentsioa baino handiagoa), eta kontrara, MOSFETak korronea ez eramateko, V_{GS} balioa oso negatiboa egin beharko dela.

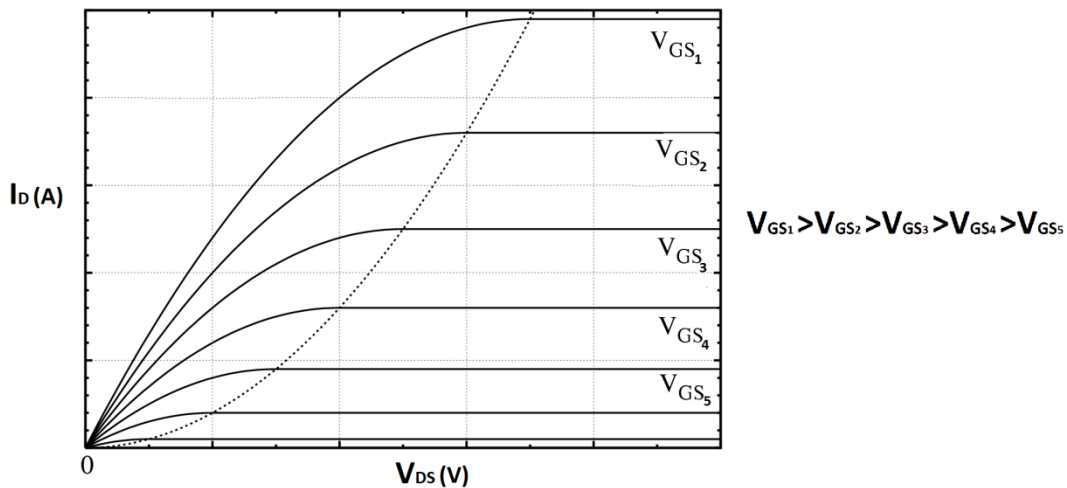
Ugaltze MOSFETen kasuan ordea, ez dago kanal fisikorik ateko oxidoaren azpian. Hortaz, V_{GS} balio handiak behar izango ditugu (MOSFETaren V_T baino handiagoak). Atearen eta iturriaren arteko tentsio maila behar bezain handia denean, elektroiak gailuaren oinarritik oxidoaren azpira mugitzen dira, kanal birtual bat sortuz, eta honek I_{DS} korronea handia izatea ahalbidetzen du.

Urritze eta ugaltze MOSFETen arteko alderdi garrantzitsua V_P eta V_T atalase tentsioak dira. Urritze MOSFETek, lehenago esan bezala, kanal fisiko bat dute eta ugaltze MOSFETek ez. Horregatik, $V_P < V_T$ betetzen da, korronea eramateko tentsio handiagoa aplikatu behar baitaio ugaltze MOSFET bati, urritze MOSFET bati baino. Beheko grafikoek argiago adierazten dute kontu hau.



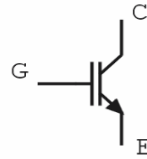
Irudia 11 – MOSFETen $I_D - V_{GS}$ kurbak

MOSFETen funtzionamendua hobeto ulertzeko, ekoizleek mota honetako grafikoak erabiltzen dituzte, non V_{GS} tentsio handietarako korrontearen balioa handiagoa izango den, eta $V_{GS} < V_T$ betetzen den kasuetan I_{DS} korronea zero dela betetzen delarik:



Irudia 12 – MOSFETen $I_D - V_{DS}$ kurbak, V_{GS} ezberdinetarako

IGBTak:

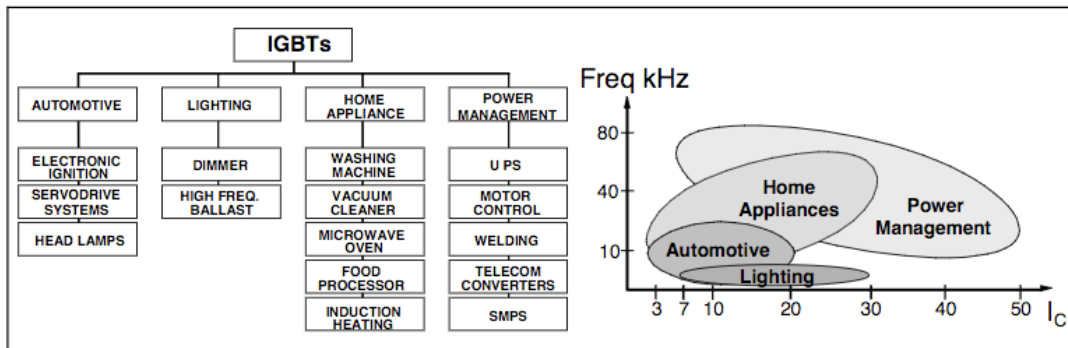


Irudia 13 - IGBTaren sinboloa

IGBT bat tentsio bidez kontrolatutako potentzia-elektronikako gailu bat da. IGBT batek, BJT eta MOSFET gailuen abantailak konbinatzen ditu, MOSFETen sarrerako inpedantzia altua baitu, eta BJTen antzera eroapen-galera baxuak baititu aktibo dagoenean, horiek izan ohi duten bigarren mailako haustura arazoak izan gabe.

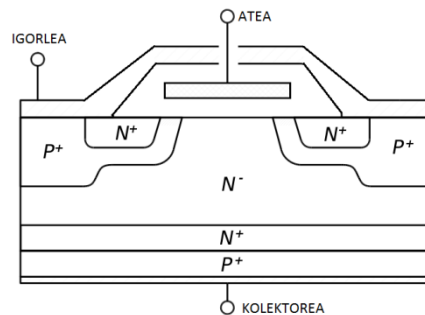
IGBT batek hiru terminal ditu, atea (G), igorlea (E) eta kolektorea (C). V_{GE} tentsioaren balioa positiboa bada IGBTa aktibatu egiten da. Tentsio hori handiagotu ahala, I_{CE} korronea handiagoa bilakatzen da. Bestalde, tentsioaren balioa $V_{GE} < 0$ V bada, IGBTtik ez da korronterik pasatzen, hau desaktibatuz.

Kommutazio abiadurari dagokionez, MOSFETena baino baxuagoa izan ohi da IGBTena, baina jasan ditzakeen tentsio eta korrone mailak askoz altuagoak dira. Horregatik, geroz eta gehiagotan erabiltzen dira potentzia handiko aplikazioetan, adibidez motoreen propulsaizailetan. Beheko irudian aplikazio ezberdinen konparaketa deskribatzen da, kasu bakoitzean beharrezkoa den kommutazio maiztasuna eta korronearen araberrako grafika batekin.



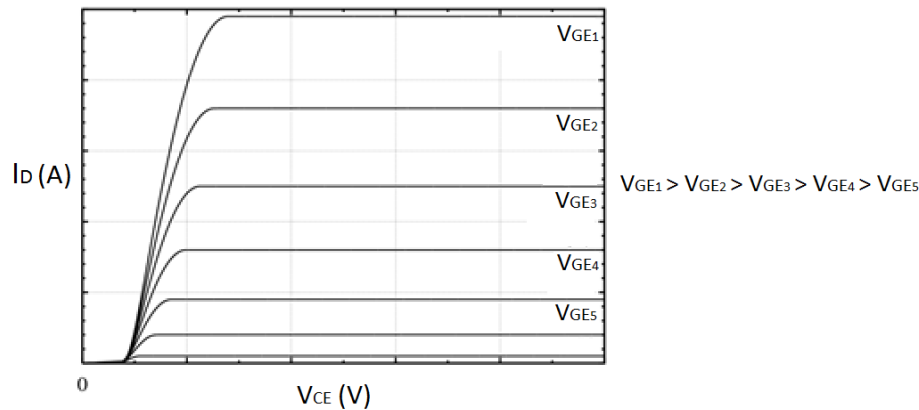
Irudia 14 - IGBTen erabilera ezberdinen eskema eta maiztasun- I_c erlazioa [9]

IGBT baten egitura, MOSFET baten egituraren berdina da, p^+ oinarria ezik, baina berez IGBTen jokamoldea eta funtzionamendua BJT baten antzeko da. Honen zergatia ondorengoa da: p^+ oinarriak eramaleak injektatzen ditu n eskualdean.



Irudia 15 - IGBTaren egitura

IGBTen funtzionamendua hobeto ulertzeko, fabrikatzaileek mota honetako grafikak erabiltzen dituzte. Atearen (G) eta igorlearen (E) arteko tentsioa zenbat eta handiagoa izan are eta korronte gehiago eramateko gaitasuna dute IGBTek.



Irudia 16 – IGBTaren I_D - V_{CE} kurba, V_{GE} ezberdinetarako

Tiristoreak VS MOSFETak VS IGBTak:

Aurreko atalean hiru gailu erdieroale horien deskribapena eta funtzionamendua azaldu da, eta hurrengo atal honetan gailu horien ezaugarri esanguratsuenak deskribatu eta konparatuko ditugu [10]: gailuaren tamaina, jasan ahal duten tentsio eta korronte maximoak, konmutazio abiadura eta prezioa.

Atalaren sarreran esan bezala Farnell Components SL eta RS Components-en katalogoak erabiliko dira. Konparaketa sinplifikatzeko eta beraien ezaugarriak alderatzeko asmoz, prezio antzekoko gailuak bilatuko dira, baina, betiere, goiko mugetara bidetuta egongo da bilaketa, bertan egongo baitira korronte eta tentsio maila altuenak jasaten dituzten gailuak.

Farnell Components SL:

	IGBTa	MOSFETa	SCR Tiristorea
Farnell ref	1833598	2449318	2423671
Prezioa	859,47 €	801,49 €	655,52 €
Tamaina	172 x 89 x 38	107 x 62 x 31	150 x 60 x 52
Korronte	650 A	325 A	1 kA
Tentsioa	1,7 kV	1,7 kV	1,6 kV
Kommutazio abiadura	1 MHz	1 MHz	25 kHz

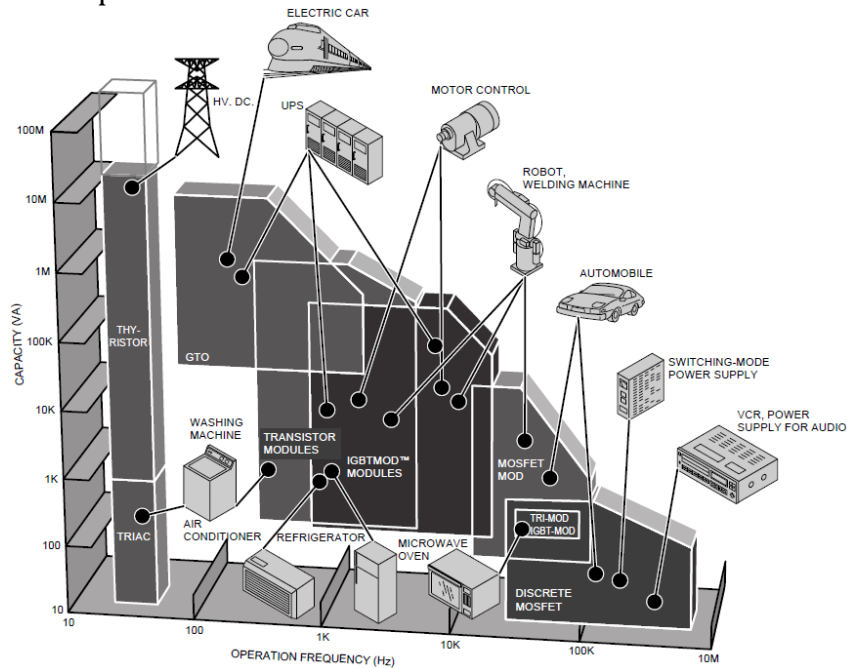
Taula 2 – Osagaia-taula Farnell Components S.L.

RS Components:

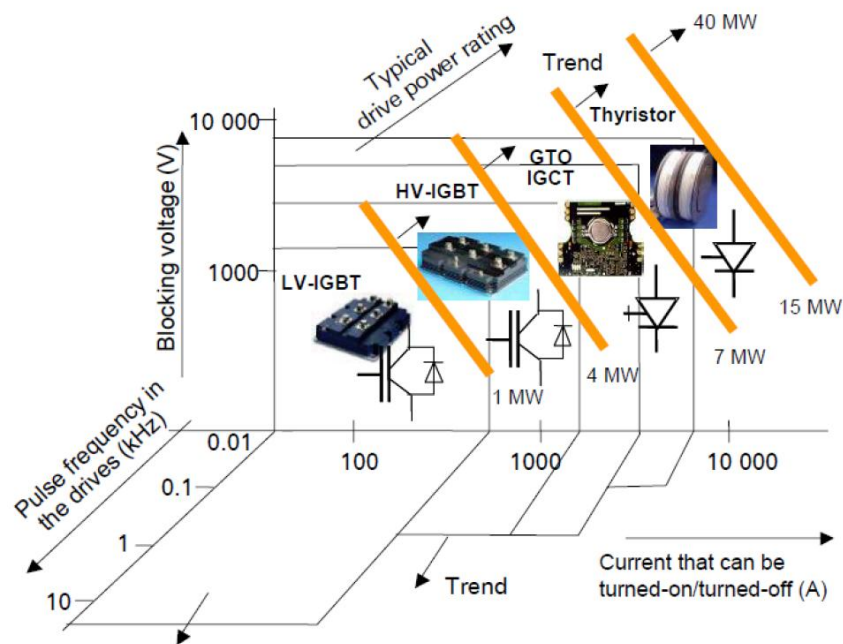
	IGBTa	MOSFETa	SCR Tiristorea
RS ref	906-3072	916-3872	903-3507
Prezioa	633,71 €	648,06 €	615,54 €
Tamaina	152 x 165 x 20.55	106.4 x 61.4 x 30	150 x 60 x 52
Korronte	450 A	404 A	500 A
Tentsioa	1,2 kV	1,2 kV	1,6 kV
Kommutazio abiadura	1 MHz	1 MHz	25 kHz

Taula 3 – Osagai-taula RS Components

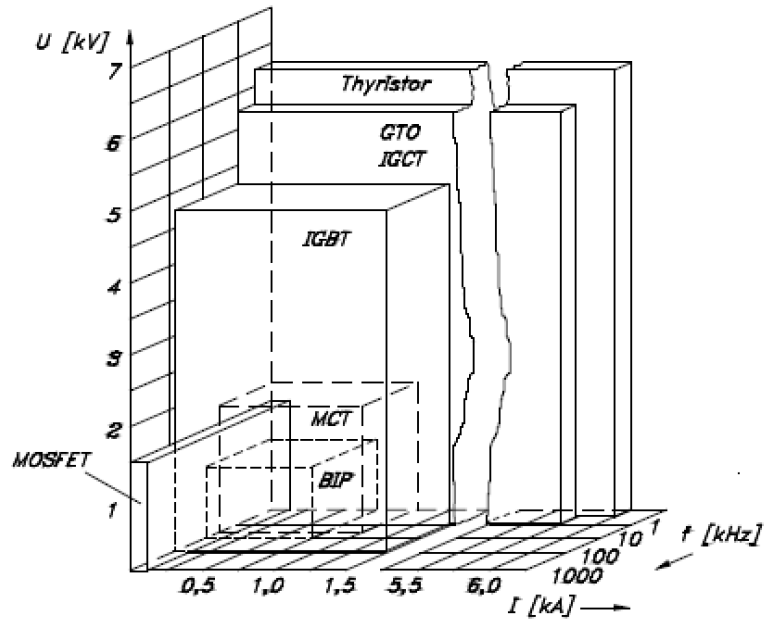
Prezio antzekoetarako gailu bakoitzak dituen ezaugarriak ikustea posible da goiko tauletan. Hurrengo iruditan erreferentzia ezberdinetan potentzia erdieroale ezberdinen lan egiteko korrante, tentsio eta maiztasun mailak erakusten dira aplikazio ezberdinetan:



Irudia 17 –Kapazitatea (VA) vs maiztasuna (Hz)–Osagaien erabilera esparruak [Powerex.inc-en eskutik]



Irudia 18 – Tentsioa vs korrantea vs maiztasuna – Gailuen konparaketa



Irudia 19 - Tentsioa vs korronea vs maiztasuna

1.3.3 Aukeraketa

Funtzionamenduari dagokionez hiru gailu erdieroaleak izan daitezke egokiak, guztiek konmutatu baitezakete aktibo eta ez-aktibo egoeren artean. Atal honen hasieran proposatutako puntuazio-sistemaren arabera adierazpena ondorengo da:

	Ponderazioa	IGBTa	MOSFETa	Tiristorea
Gailuaren tamaina	% 10	6	8	7
Tentsio-Korronte maximoa	% 50	6	5	7
Konmutazio abiadura	% 10	7	8	2
Prezioa	% 30	5	6	7
Puntuazioa		5,8	5,9	6,5

Taula 4 - Aukeraketa-taula

Aurreko taula ikusirik, proiektu honetan tiristoreak erabiltzea erabaki da, alternatibaren analisia argi definitzen baitu tiristoreak gailu egokienak direla proiektu hau gauzatzeko, gehienbat muntaia honek ez duelako behar konmutazio-abiadura handiegia izaterik, baina bai, ordea, potentzia handiak jasatea, korronte eta tentsio handiak garraiatu beharko baitituzte gailuek elektronikoen, eta gainera, kontuan izan behar da, prezioaren ikuspuntutik tiristoreak direla puntuazio hobereana lortu dutenak.

Arriskuen analisia

1.4.1 Arriskuen definizioa

1. **Transformazio galera altuegiak:** sarrerako potentzia eta irteerako potentziaren arteko erlazioaren efizientzia baxuegia izatea.

$$Efizientzia (\%) = \frac{Irteerako potentzia (W)}{Sarrerako potentzia (W)} \cdot 100$$

2. **Tentsio eta maiztasun muga:** DC transformadoreak lana ondo ez egitea elikadura bipolar altuetan eta tiristoreen kommutazio maiztasun handietan.
3. **Aurrekontu altuegiak:** proiektuan gauzatutako tentsio baxuko prototipoaren aurrekontua altuegia izateak, ondoren etorri ahal diren eskala handiagoko prototipoen (HV/MV) aurrekontuak are handiagoak izatea ekarriko luke, hortaz proiektuarentzat arrisku potentzial bat izan daiteke.
4. **Konpetentziaren prototipoen efizientzia eta prezioa:** proiektu antzekoak garatzen dituzten beste talde edo erakunde batzuen prototipoak gureak baino efizientzia maila altuagoa eta prezio baxuagoa izatea, edo bi termino hauen arteko erlazioa gurea baino hobea izatea.

1.4.2 Arriskuen probabilitatea eta eragina

1. **Transformazio galera altuegiak:** probabilitate ertaina, eragin altua.
2. **Tentsio eta maiztasun muga:** probabilitate altua, eragin altua.
3. **Aurrekontu altuegiak:** probabilitate baxua, eragin altua.
4. **Konpetentziaren prototipoen efizientzia:** probabilitate ertaina, eragin ertaina.

		Probabilitatea (%)		
		Baxua	Ertaina	Altua
Eragina	Baxua			
	Ertaina		4	
	Altua	3	1	2

Taula 5 - Probabilitatea vs eragina taula

2. Metodologia

Dokumentazioaren atal honetan proiektu hau egiteko jarraitu den metodologia zein izan den azalduko da. Proiektuan zehar dauden zeregin ezberdinak ondorengoak dira:

1. Gaiaren kokapena
2. Diseinu analitikoa
3. Simulazioak
4. Prototipoaren fabrikazioa
5. Software bidezko diseinu elektrikoa
6. PCBaren diseinua
7. Egiaztapena eta emaitzen bilketa
8. Proiektuaren kudeaketa
9. Prestakuntza
10. Dokumentazioa
11. Proiektuaren aurkezpena

2.1 Zereginen deskribapena

2.1.1 Gaiaren kokapena

Lehen zeregina proiektua kokatzen den esparruan jakituria-maila areagotzea da. Horretarako, gaiaren inguruko publikazio ezberdinak bilatu eta irakurtzea izango da jarraitu beharreko metodologia. Artikulu ezberdinen artean aipamen gehien dituztenak bilatuko dira, eta behin lan hau burutu ostean, artikulu hauek guztiak sakonki irakurri, eta artearen egoera bat egin beharko da, non teknologiaren ezaugarri nagusiak, funtzionamendua, eta abantailak azalduko diren.

2.1.2 Diseinu analitikoa

Zeregina hau, dauzkagun beharrianak betetzen dituen diseinu elektrikoa egitean datza. Horretarako, gaiaren inguruan dauden hainbat artikulu eta publikazio irakurriko dira, hor azaltzen baitira, gai honen inguruan jorratu duten beste ikerlari askoren lanak eta ideiak. Behin gure diseinuaren inguruan sortutako zalantza guztiak kentzen ditugunean, diseinu analitikoa gauzatu daiteke.

Hurrengo pausua, tiristoreen ateetara aktibazio-seinalea bidaliko duen zirkuitua diseinatzea da. Potentziako atala eta kontroleko atala isolatuta egon behar dira elkarrekiko, eta horrela adierazten da geroagoko “Kalkuluak” atalean, proiektuaren espezifikazio gisa. Hori betetzeko optoakopladore bat erabiltzea aukera ona da, horrek, alde batetik sartzen den seinalea, bestetik isolatuta ateratzea ahalbidetzen baitu.

2.1.3 Simulazioa

Behin prototipoaren diseinu elektrikoa eginda dagoenean, hurrengo pausua eskema hori simulatzea da, benetan gure espezifikazioak bete ahal dituen jakiteko. Horretarako Power SIM Tech-en PSIM 6.0 softwarea erabiliko da.

PSIM softwarearekin lan egiteko, gure osagaien simulazio-modeloak izatea beharrezkoa da, eta beraz, naiz eta batzuetan programak modelo hauek bere barneko datu-basean izaten dituen, lehenengo lana hauek bilatzea izango da. Ondoren, PSIM programaren *layout*-ean osagai guztiak sartu eta hauen arteko konexioak gauzatuko dira.

Simulazioak hasi aurretik, osagai bakoitzaren ezaugarriak ondo zehaztu beharko dira osagaien konfigurazio atalean, adibidez tiristoreen kasuan hauen *latch current*-a, *holding current*-a eta aktibo egoeran erortzen den tentsioa zenbatekoa den. Diseinu analitikoan zehaztutako osagaiek balio ezberdinak hartu ditzakete, beraz, balio hauek aldatuz joan beharko da simulazio ezberdinak eginez, lortu nahi den emaitza izan arte.

Azkenik, simulazio denbora adostu beharko da, eta zenbateko denbora-pausua izan behar duen simulazioak simulazio-bereizmen egokia izateko.

2.1.4 Prototipoaren fabrikazioa

Simulazioan esperotako emaitzak lortu ostean, beharrezkoa da prototipoaren muntaia azkar bat egitea. Horretarako *proto-board* motako plaka bat erabiliko da. Plaka hauek aurredefinitutako konexioak dituzte, eta hortaz askoz bizkorragoa da muntaia.

Muntaia egiteko lehenengo pausua kontroleko zirkuitua muntatzea da, horrela, isolatzailea den zirkuitu integraturen baten bidez, potentziako ataleko tiristoreen disparenak isolatuta izango dira.

Ondoren, diseinu analitikoan eta simulazioan erabilitako potentziako zirkuitu bera muntatuko da *proto-board*-ean, eta azkenik, osziloskopioaren bidez neurtutako proba batzuk egingo dira, funtzionamendua egokia dela zihurtatzeko.

Normalean, simulazioan lortutako emaitzen antzeko zerbait lortuko da *proto-board*-arekin egindako muntaian, baina izan daiteke hau horrela ez gertatzea, simulazioak egiterakoan kontuan izaten ez diren alderdi batzuk daudelako. Kasua hau izango balitz, osagai ezberdinak gehitzea, kentzea edo osagaien balioak aldatzea proposatzen da muntaia-metodologia honetan.

2.1.5 Software bidezko diseinu elektrikoa

Ikusirik prototipoaren funtzionamendua ona dela, hurrengo pausua *Cadence OrCAD Capture* softwarearekin diseinu elektrikoa egitea da, non lehenik eta behin funtsezko diseinua gauzatuko den, eta ondoren, diseinuko osagai bakoitzari PCBaren diseinurako erabiliko den oinatz izena ezarriko zaion osagaiaren ezaugarri-taulan, geroago *Library Expert Pro 2015* softwarearen bitartez osagai bakoitzaren oinatz diseinatuko, eta izen berberaz definituko baita.

Hau guztia egin ondoren, *PCB Editor*-ak beharrezkoa duen *Netlist* bat sortuko da, zeinek *OrCAD Capture* softwarean egindako diseinuaren bertsio baliokide bat sortuko duen, baina kasu honetan *PCB Editor* softwarearentzat baliagarria dena.

2.1.6 PCBaren diseinua

Azkenik, aurreko atal guztiak eginda daudela, PCBaren fabrikazio prozesua abiatuko da. Horretarako, *OrCAD PCB Editor* softwarea erabiliko da. Horrekin baliauz, eskema guztia gauzatuko da, osagai guztien oinatzak *layout*-ean jarritz.

Behin hau eginda, diseinuaren itxura ahalik eta simetrikoena gauzatzen ahaleginduko da, zirkuitua begi-bista hutsez hobeto ulertzeko. Azkenik gailuen arteko konexioak egingo dira. PCBen diseinuan oso garrantzitsuak dira lur-planoak, hauek korrontearen itzulera errazten baitute. Horregatik, bai TOP eta baita BOTTOM planoetan ahalik eta lur-plano handienak jarri beharko dira, betiere kontuan izanda kontrol eta potentzia-atalak isolatuta egon behar direla optoakopladorearen zirkuitu baten bitartez. PCBaren diseinua guztiz bukatuta dagoenean, egin behar den azken gauza *gerber* motako fitxategiak sortzea da, hauek baitira fabrikatzaileentzat baliagarriak diren fitxategiak manufaktura egiteko.

2.1.7 Egiaztapena eta emaitzen bilketa

Ondoren, muntaia fabrikaziora bidali ostean, PCBaren gainean osagaiak soldatu eta funtzionamendua aztertu beharko da, dena ondo dagoela zihurtatzeko.

Proiektuaren funtsa bete dela ikusteko, osziloskopioaren bidez proba batzuk egingo dira:

- **Funtzionamenduaren egiaztapena:** zirkuituaren diseinua eta muntaia ongo eginda daudela zihurtatzeko espezifikazio minimoak betetzen dituen konfigurazioa gauzatu beharko da (*kalkuluak - diseinuaren espezifikazioak* atalean zehaztutakoa) eta proiektuan gauzatutako muntaia ondo diseinatuta dagoela zihurtatu.

2.1.8 Proiektuaren kudeaketa

Proiektua martxan dagoen bitartean, kudeaketa etengabe bat egin beharko da, proiektuak dituen fase bakoitza zehaztutako denboran doan kontrolatuz.

Kudeaketa fasean, mugarri eta entregagaietzat data limite batzuk ezarriko dira, eta hauek betetzen direla ere kontrolatu egin beharko da.

2.1.9 Prestakuntza

Prestakuntza fasean, proiektu zuzendariarekin batera, egin beharreko zereginak zerrendatuko dira, eta bakoitzarentzat beharrezkoa izango den gutxi gorabeherako denbora zehaztuko da, horrela plangintza egoki bat egiteko asmoz. Plangintza hau Gantt diagrama batean irudikatuko da.

2.1.10 Dokumentazioa

Proiektua hasten den lehen unetik dokumentazioari forma emango zaio. Lehen unean, nahiz eta informazio gehiegirik ez izan asko dokumentatzeko, memoria egituratu egin beharko da, eta ondoren, denbora aurrera joan ahala, eta proiektua gauzatzean lortutako emaitzak eta harrapaketak aurretik egindako egituran sartzen joango da. Azkenean, memoria osotu bat lortuko da, ahalik eta hobekien dokumentatua, eta ahalik eta zehatzena.

2.1.11 Proiektuaren aurkezpena

Proiektuan egindako mutaiak ondo funtzionatzea eta ezarritako espezifikazioak betetzea beharrezkoa da, baina garrantzia berbera izan dezake azken produktuaren aurkezpena ondo egiteak. Horretarako, testu gehiegi ez duen aurkezpen bat prestatuko da, non informazioa era egokian aurkezten den, hau da, ez da gehiegizko informaziorik egon behar, eta benetan proiektuak emandako frutuak ondo erakutsi behar ditu, betiere entzuleari ulermena errazteko tresnak erabiliz, adibidez, irudiak, eskemak, etab.

2.2 Faseak

Atal honetan, proiektuan izandako fase ezberdinak eta fase horietako bakoitzean dauden zereginak zehaztuko dira.

1. fasea – Proiektuaren kudeaketa				
Zeregin zenb.	Zeregin izena	Hasiera-data	Amaiera-data	Iraupena
8	Proiektuaren kudeaketa	2015/10/01	2016/06/03	246 egun

Taula 6 – Proiektuaren kudeaketa fasea

2. fasea – Proiektuaren hasiera				
Zeregin zenb.	Zeregin izena	Hasiera-data	Amaiera-data	Iraupena
1	Gaiaren kokapena	2015/10/01	2015/12/01	61 egun
9	Prestakuntza	2015/10/01	2015/10/02	2 egun

Taula 7 – Proiektuaren hasiera fasea

3. fasea – Proiektuaren garapena				
Zeregin zenb.	Zeregin izena	Hasiera-data	Amaiera-data	Iraupena
2	Diseinu analitikoa	2015/12/01	2015/12/31	31 egun
3	Simulazioak	2016/01/01	2016/02/01	31 egun
4	Prototipoaren fabrikazioa	2016/02/01	2016/02/15	14 egun
5	Software bidezko diseinu elektrikoa	2016/02/15	2016/03/01	16 egun
6	PCBaren diseinua	2016/03/01	2016/04/11	40 egun
7	Egiaztapena eta emaitzen bilketa	2016/04/11	2016/04/20	10 egun

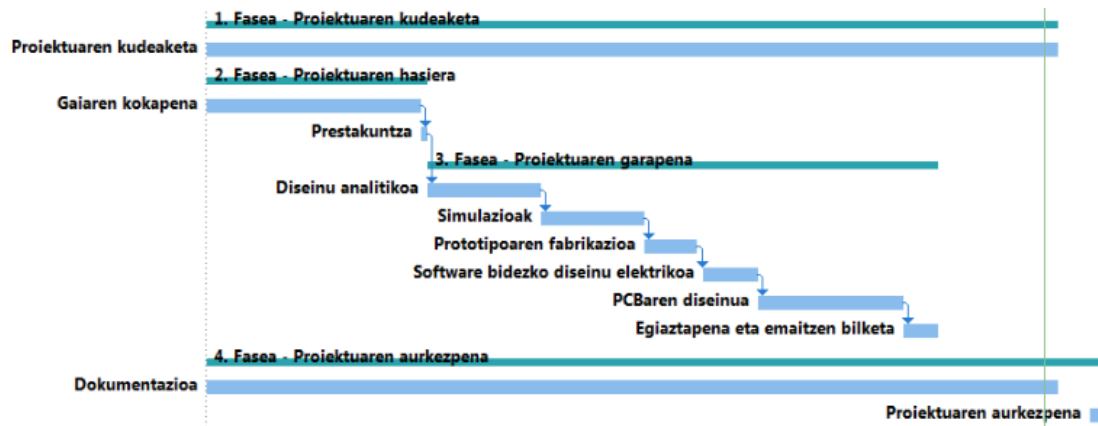
Taula 8 -Proiektuaren garapen fasea

4. fasea – Proiektuaren aurkezpena				
Zeregin zenb.	Zeregin izena	Hasiera-data	Amaiera-data	Iraupena
10	Dokumentazioa	2015/10/01	2016/06/03	246 egun
11	Proiektuaren aurkezpena	2016/06/13	2016/06/17	5 egun

Taula 9 – Proiektuaren aurkezpen fasea

2.3 Gantt diagrama

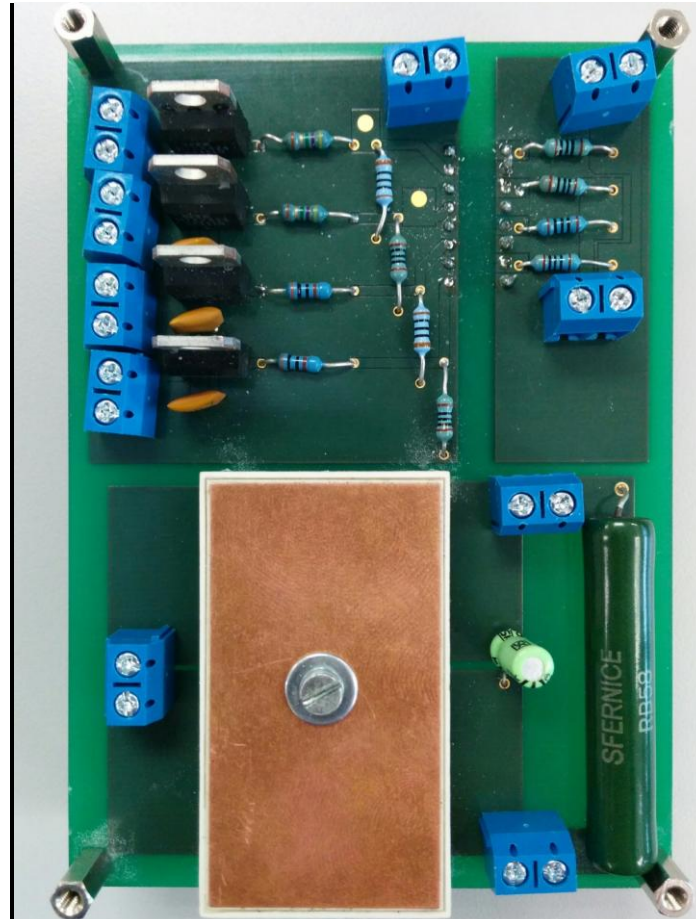
Proiektuaren planifikazioa gauzatzeko egin den *Gantt* diagrama ondorengo irudian ikusten dena da.



Irudia 20 - Gantt diagrama

3. Kalkuluak

Kapitulu honetan proiektuaren soluzioaren deskripzioa egingo da. Horretarako, diseinuak bete behar dituen gutxieneko espezifikazioak zeintzuk diren azalduko da, ondoren, erabilitako metodologiaren arabera diseinuaren deskripzio bat eginez, eta azkenik, lortutako emaitzen azalpen labur bat burutuz.



Irudia 21 - PCBaren diseinua

II. eranskinean azalduko dira eskemak, simulazioak eta PCBaren diseinua zehaztasun handiagoarekin, horrela atal hau luzeegia izatea ekidingo da.

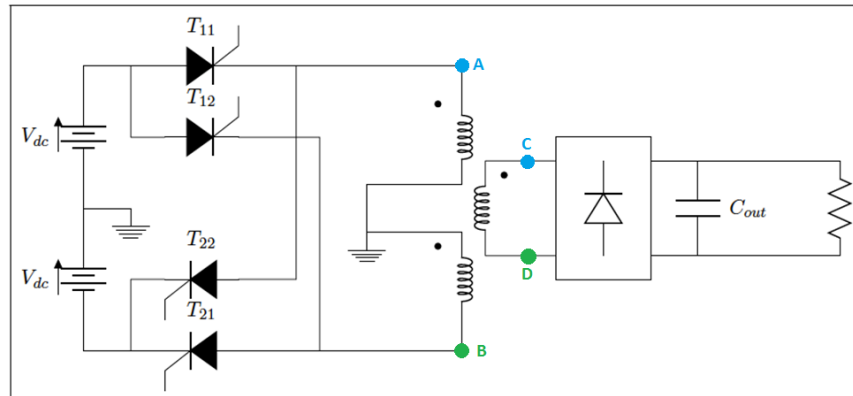
Diseinuaren espezifikazioak

Proiektu honen diseinuaren espezifikazio orokorra DCDC bihurketa garatzeko gaitasuna duen diseinu bat garatzea da. Ondoren, diseinuak bete behar dituen espezifikazio zehatzak zerrendatuko dira:

- Sarrerako tentsioa bipolarra izan behar da, eta ± 15 V baliokoa.
- Gutxieneko maiztasuna 1 kHz izan behar da.
- Transformadorearen espiren erlazioa N:M motakoa izan behar da, non $N < M$ betetzen den.
- Kontroleko atala eta potentziako atala isolatuta egon behar dira.
- Potentzia ataleko sarrera bipolarraren lurreko korrantea ~ 0 A izan behar da.

Diseinu analitikoa

Atal honetan proiektuaren diseinu analitikoa egingo da, non aurretik zehaztutako diseinuaren espezifikazioak betetzen dituen zirkuitu elektronikoa nola egin den azalduko den, eta beharrezkoak izan diren kalkuluak azalduko diren. Proiektuaren espezifikazioak betetzen dituen diseinuaren potentzia-atala hurrengo irudian azaltzen dena da:

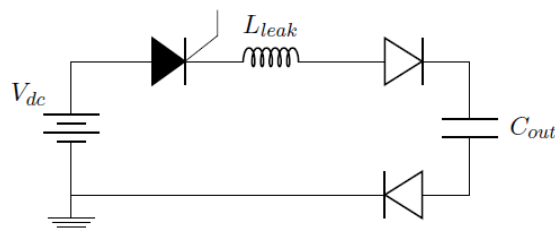


Irudia 22 – Diseinuaren potentzia-atala

Analisi orokorra

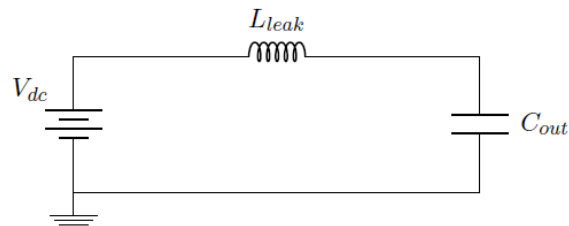
Lehenengo analisia egiteko, transformadoeraren L_m magnetizazio-induktantzia ez da kontuan hartuko.

Diseinu hau, diseinu erresonante bat da. Lau tiristore daude zirkuituan, baina binaka aktibatzen dira. Hauetako bakar bat aktibatzen denean ondorengo zirkuitu baliokidea lortzen da, non L_{leak} transformadorearen ihes-induktantzia den, zirkuitua seriean lotzea eragiten duena:



Irudia 23 – Tiristore bakarraren kasua

Tiristorearen aktibo egoeran, eta tiristoreen zein zubi-artezgailuko diodoen tentsio-erorketak abuiatuz, hurrengo zirkuitu baliokidea lortzen da, non begi bistaz ikusi daitekeen LC zirkuitu erresonante bat dela.



Irudia 24 – Tiristore bakarraren kasu sinplifikatua

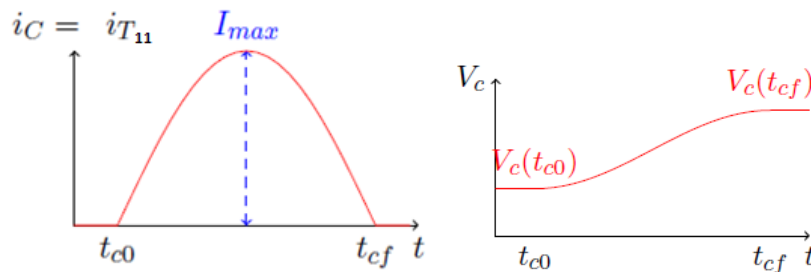
Kondentsadorearen karga erresonantearen azterketa matematikoa sinplifikatzeko, transformadorearen espiren erlazioa 1:1 motako dela suposatuko da.

Suposatzen bada, hasierako unean ($t = t_{c0}$) tiristore bakarra dagoela aktibo (1/4):

- Kondentsadoreko tentsioa $V_c(t_{c0}) = V_{dc} - \Delta V_1$, orduan,

$$i_{T_{11}} = \frac{(V_{dc} - V_1(t_0))}{L_{leak} \omega_0} \sin \omega_0 t, \text{ non } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{leak} C_{out}}}$$

Korrontearen itxura sinusoidala izango da, $I_{max} = \sqrt{\frac{C_{out}}{L_{leak}}} \times (V_{dc} - V_c(t_{c0}))$ balio maximoarekin eta kondentsadorearen karga erresonantea malda positibokoa, korronte positiboa pasatzen den bitartean:

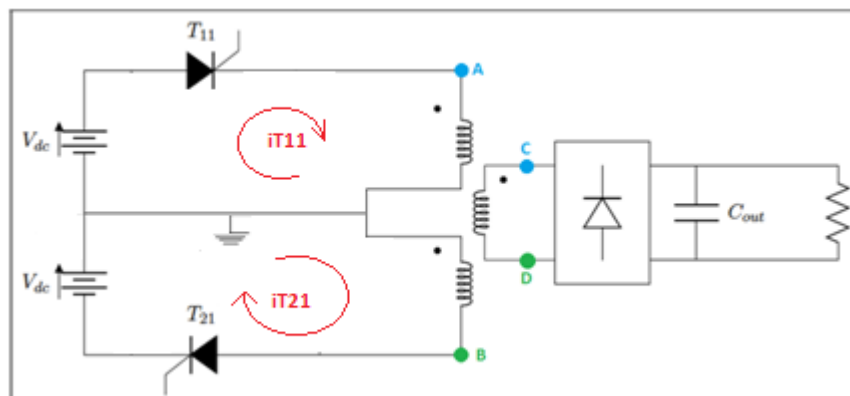


Irudia 25 – Pulstu erresonantea eta kondentsadorearen karga

Karga erresonantearen bukaerako tentsioa $V_c(t_{cf}) = V_{dc} + \Delta V_1$ izango da, eta korronte-pulstu erresonantearen iraupena $t_{cf} - t_{c0} = \pi \sqrt{L_{leak} C_{out}}$

Tiristorea era naturalean irekitzen denean (korronteak zeroko muga gurutzatzen duenean), korronte erresonantea nulua izango da eta kondentsadorea irteerako zubi-arte-zigilutik eta kondentsadoretik deskargatuko da, era esponentzialean, irteerako zirkuitua RC zirkuitu bat baita.

Lurreko korrontea nulua izateko berriz ere hasierako zirkuitura bueltatu beharra dago, bi tiristore aldi berean disparatzeak eragingo baitu efektu hau. Lau tiristoretik aldi berean disparatzen diren tiristore bi bakarrik hartuko dira kontuan, beraz hau izango da zirkuitu baliokidea:

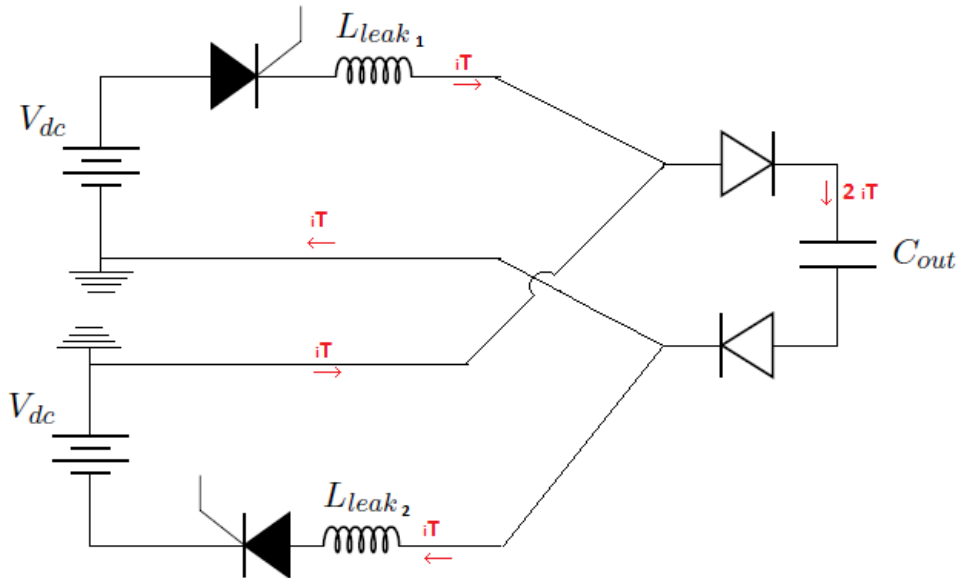


Irudia 26 – Lurreko korronte nulua adierazteko eskema

Ikusi ahal den bezala, i_{T11} korrontea eta i_{T21} korrontek teorikoki balio bera daukate, eta hortaz, lurretik zehar doan korrontea nulua izango da:

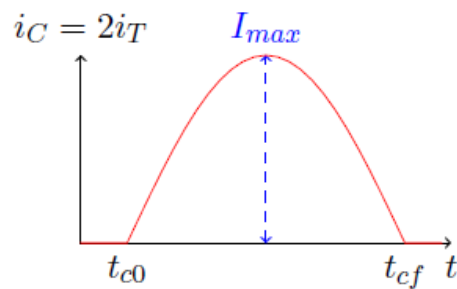
$$i_{gnd} = i_{T11} - i_{T21}, \quad \text{non } i_{T11} = i_{T21} \rightarrow i_{gnd} = 0 \text{ A}$$

Gainera, tiristore bi aldi berean disparatzearekin, ez da lurreko korrontea nulua izatea bakarrik lortzen. Aldi berean, kondentsadorea kargatzeko lortzen den korronte erresonanteak balio bikoitza izango du. Bi tiristore aktiborekin lortuko den zirkuitu erresonantea hurrengoa da:



Irudia 27 – Fase bereko tiristore bi aktibo daudeneko kasua

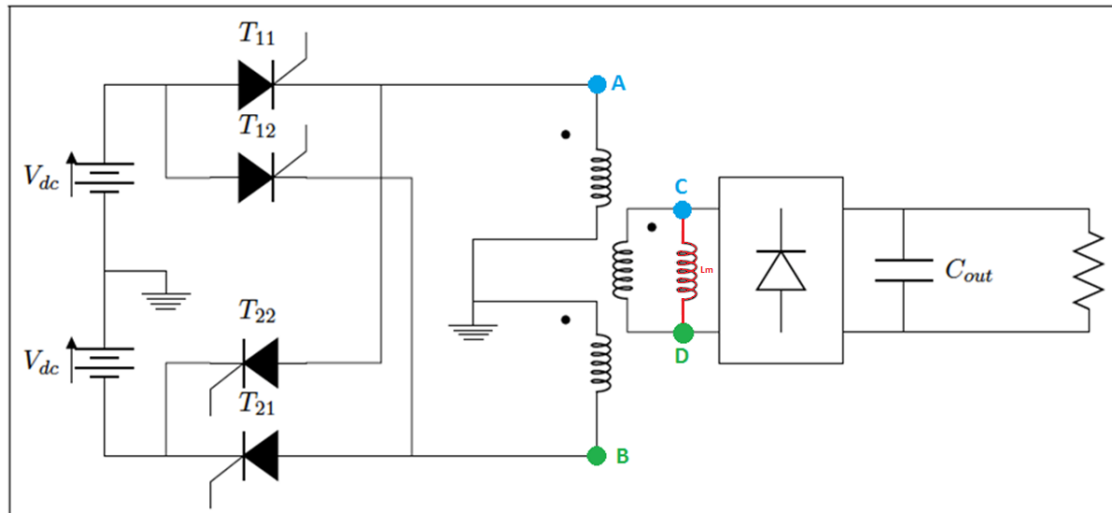
Eta hau izango da pultsu erresonantea, non lehenengo suposaketarekin alderatuz (tiristore bakarra aktibo), korrontea bikoitza izango den, baina pultsuaren iraute-denporari ez dio eragiten, hau L_{leak} eta C_{out} -en araberakoa baita.



Irudia 28 – Pultsu erresonante bikoitza

Magnetizazio-induktantziaren eragina

Analisiaren hasieran L_m magnetizazio-induktantzia arbuia du, baina beste analisi bat egitea beharrezkoa da, L_m kontuan hartuta, tiristoreak itzaltzen direnean transformadorearen alde primarioan ikusten diren tentsio-mailen zergatik azaltzeko. Analisi hau gauzatzeko erabiliko den zirkuitua hau da:



Irudia 29 – Magnetizazio induktantzia diseinu orokorrean

Diseinua analitikoa egiterakoan, hainbat kalkulu egin behar izan dira, eta horietako batzuetan transformadorearen magnetizazio induktantziaren (L_m) eta ihes-induktantziaren (L_{leak}) datuak behar izan da. Hau kalkulatzeko prozedura enpirikoa hurrengoa da:

Magnetizazio induktantzia (L_m):

Proiektua gauzatzeko erabili den transformadorea “VAC T60004-L2160-W758”a izan da, hau jada laborategian zegoen materiala baitzen, izatez transformadore hau beste proiektu baten testuinguru berean egina baita. Ekoizlearen informazio orrien artean nukleoaren A_L parametroaren balioa eskuratu da eta beharrezkoa den L_m balio bat zehaztu:

$$\begin{aligned}
 A_L &= 31 \mu\text{H}/N^2 \\
 L_m &= 76 \text{ mH}
 \end{aligned}$$

Datu horiek izanda, nukleoaren alde primarioaren inguruan egon behar diren espiren kokurua kalkulatu daiteke:

$$N = \sqrt{\frac{L_m}{A_L}} = \sqrt{\frac{76 \text{ mH}}{31 \mu\text{H}}} = 49,51 \approx 50$$

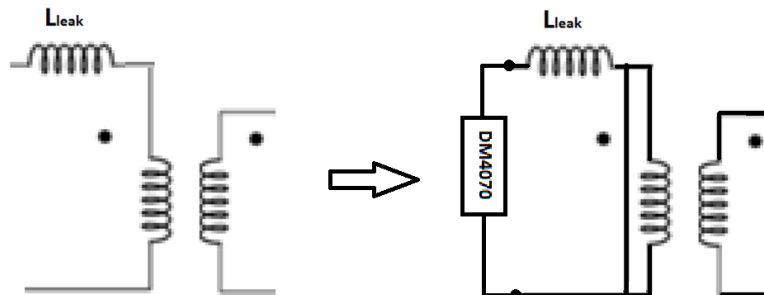
Ihes-induktantzia (L_{leak}):

Ihes-induktantziak kalkulatzeko Vichy DM4070 inpedantzia neurgailua erabili da:



Irudia 30 – Vichy DM4070 inpedantzia neurgailua

Gailu hau erabiliz eta transformadorearen harilkatu sekundarioa zirkuitulaburtuz, L_{leak} -en neurketak egin daitezke, zirkuitulaburtze horrek primarioko inдукtancia ezerezten baitu L_{leak} bakarrik utziz neurketarako:



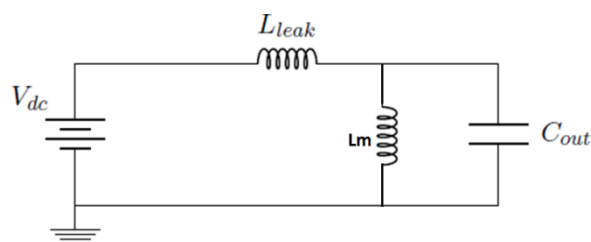
Irudia 31 – Neurketa egiteko egin erabili beharreko eskema

Neurketa horiek ein ostean, lortutako emaitza hau da:

$$L_{Leak} = 208 \mu H$$

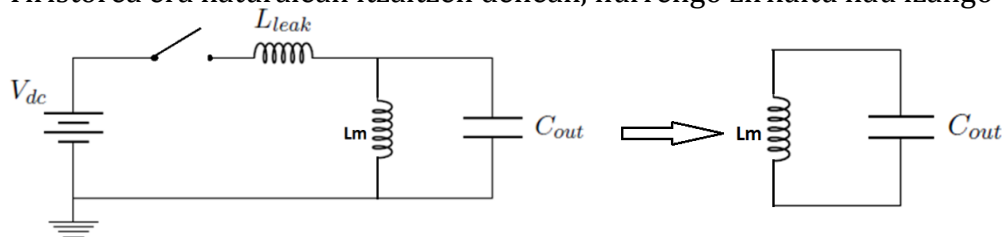
Funtzionamenduaren azalpena gauzatzeko, tiristore bakarra aktibo dagoeneko eta jarraian itzali egiten deneko kasua hartuko dugu, betiere transformadorearen espiren erlazioa 1:1-ekoa mantenduz.

Tiristorea aktibo dagoenean beheko zirkuituan baliokidea izango dugu, non L_m inдукtanciazirik ere korronea pasako den, hau kargatuz.



Irudia 32 – Tiristore bakarra, magnetizazio inдукtancia kontuan izanda

Tiristorea era naturalean itzaltzen denean, hurrengo zirkuitu hau izango dugu:

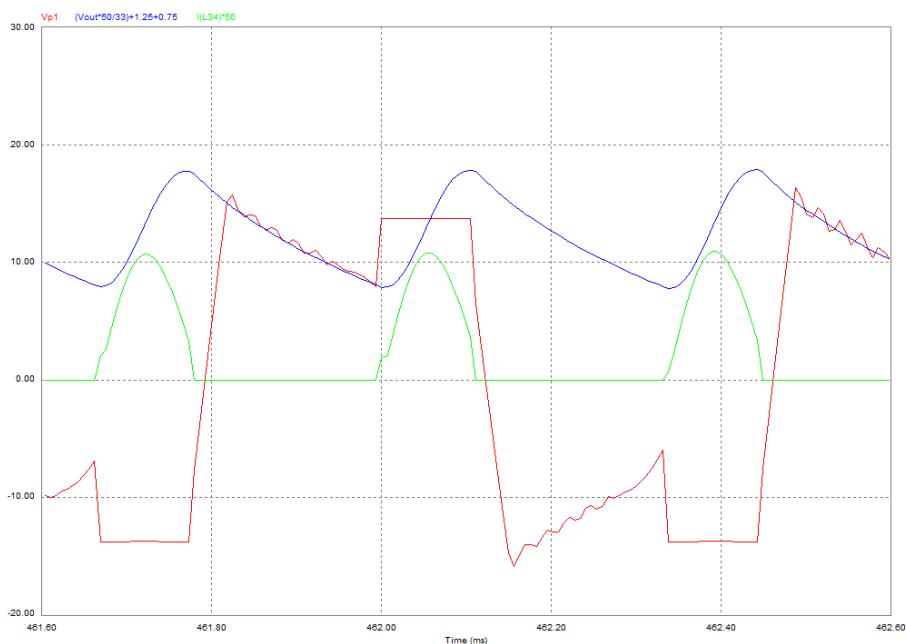


Irudia 33 – Tiristorea itzaltzen den kasua

Amaierako eskema elektrikoan ikusten da, non C_{out} kondentsadorea kargatuta dagoen eta deskargatzen joango den, eta L_m -k gordetako korrontea askatuko duen, horregatik eta L_m inдукtancia existitzearen ondorioz, alde sekundarioko tentsioa, alde primarioan ikusiko da islatuta.

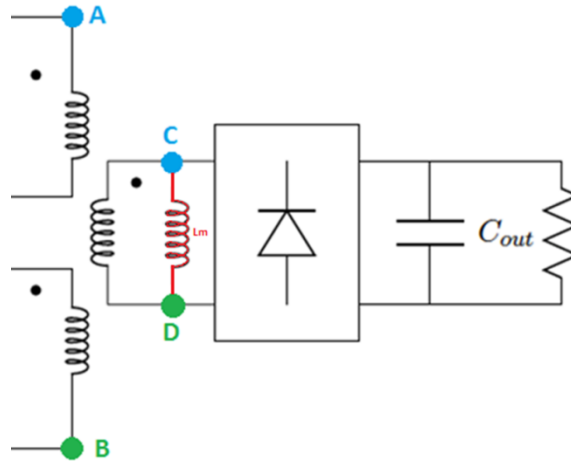
Hau guztia hobeto ulertzeko, simulazio bidez lortutako emaitzak aztertuko dira:

Simulazioaren emaitzak erakusten dituen beheko irudian korronte-pultsu erresonantea (berdea), tiristoreen eta diodoen tentsio-erorketak eta transformadorearen espiren erlazioa arbuizaten dituen irteerako tentsioa (urdina), eta transformadorearen alde primarioan ikusten den tentsioa (gorria) ikusten dira.



Irudia 34 – Simulazio bidezko emaitzak

Irudia aztertzen bada, ikusi daiteke pultsu-erresonantea dagoen bitartean, primarioko tentsio-mailak ± 15 V balioak dituela, baina tiristorea itzaltzen denean (pultsu-erresonanterik ez dagoen tartean), ikusi daiteke tentsioa ez dela 0 V-era jaisten, baizik eta malda esponentzial bat irudikatzen duela, C_{out} kondentsadorearen deskarga erresistibo malda hain zuzen. Hurrengo irudian egoera hau dagoen bitartean transformadoreak ikusten duen zirkuitu baliokidea dago.



Irudia 35 – Transformadoreak ikusten duen zirkuitu baliokidea

Tiristorea aktibo dagoenean, zubi-artezgailuko diodo bi daude korronea eramaten noranzko batean, baina tiristoreak itzaltzean, zubi-artezgailuko diodoak aldatu egiten dira, C_{out} kondentsadoreak duen korronea eramaten hasteko, eta korronteak kontrako noranzkoa hartzen du. Hori gertatzean L_m induktantziak irteerako kondentsadorearen balioa hartzen du, eta hori transformadorearen alde primarioan islatu egiten da.

Primarioko tentsioaren maldan ikusten den kiskurdura L_m induktantziak eragiten du, gordeta daukan korronea zirkuitura isurtzean. Induktantziaren balioa zenbat eta txikiagoa izan isurtzen duen korronea handiagoa da eta tiristoreen euste-korronea (I_{Holding}) baino handiagoa izanez gero, tiristorea ez itzaltzea ekar dezake, eta hurrengo faseko tiristore biak aktibatzen direnean lau tiristoreak aldi berean aktibo egotea, horrek zirkuitulaburra sortuko lukeelarik.

Hurrengo pausua, erabiliko den osagai oro zein izango diren aukeratzea da. **DCDC transformadore erresonante isolatuaren** eskala txikiko prototipo bat gauzatzeko, eta ondoren aukeratutako gailuen datuekin, aukeratutako transformadorearen L_m induktantzia nahiko handia den ikusi beharko da:

Gailua	Fabrikatzailea	Osagaia
Tiristoreak	NTE Electronics	NTE5424
Kondentsadoreak	Vishay	F472K75Y5RN83K0R
Kontrol ataleko erresistentziak	Vishay	NFR2500002200JA500
Tiristoreen ateetako erresistentziak	Vishay	NFR2500001000JA500
Optoakopladoreak	Vishay	K847P
Zubi-artezgailua	Semikron	SK 80 D 12 F
Kargako kondentsadorea	Vishay	MAL209758478E6
Kargako erresistentzia	Vishay	RWM041047R0JR15E1
Transformadorea	VAC	Vitroperm 500F

Taula 10 – Osagaien taula

Aukeratutako tiristoreek 30-50 mA tarteko I_{Hold} balioa daukate, eta aukeratutako transformadoreak 76mH-ko magnetizazio induktantzia (L_m) eta 460 μ H-tako ihes-induktantzia. Irteerako kondentsadoreak (C_{out}) 4,7 μ F-ko kapazitatea dauka. Datu hauek kontuan izanda, osagaiak elkarren artean bateragarriak diren aztertu daitezke:

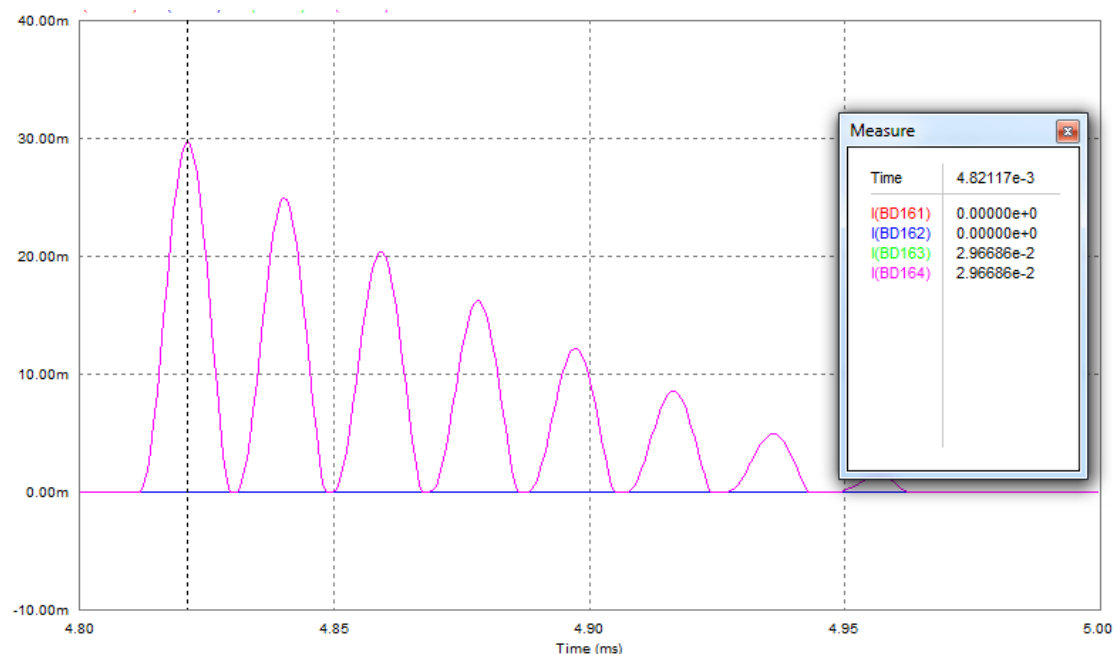
- Pulsu erresonantearen iraupena:

$$t = t_{cf} - t_{c0} = \pi \sqrt{L_{\text{leak}} C_{\text{out}}} = \pi \sqrt{460 \mu\text{H} \cdot 4.7 \mu\text{F}} = 146 \mu\text{s}$$

- Magnetizazio induktantzia (L_m): 76 mH
- $V_L = L_m \frac{di}{dt} \rightarrow \Delta i = \frac{V_L \cdot t}{L_m}$, non $V_L = V_{DC} \rightarrow \Delta i = \frac{V_{DC} \cdot t}{L_m} = \frac{15\text{V} \cdot 146 \mu\text{s}}{76 \text{mH}} = 28.82 \text{ mA}$

Ikusten den modura, $\Delta i = 28,82 \text{ mA}$ -koa da, eta beharbada arazoak izan ahal ditugu, oso hurbil baitago I_{Hold} baliotik, baina ez zertan gertatu behar. Arazoak izanez gero, transformadore aldatu daiteke L_m handiagoa duen bat hartuz, edo tiristoreak aldatu I_{Hold} korrante altuagoa duen gailuren bat hartuz.

Hala ere, simulazioaz ahalbidetzen bagara, datu hauek erabiliz ez du arazorik ematen, eta 29,66 mA-eko balioko kiskurdura bat azaltzen da, ez dena nahikoa gure tiristoreak itzaltzen ez usteko, nahiz eta oso hurbil ibili.

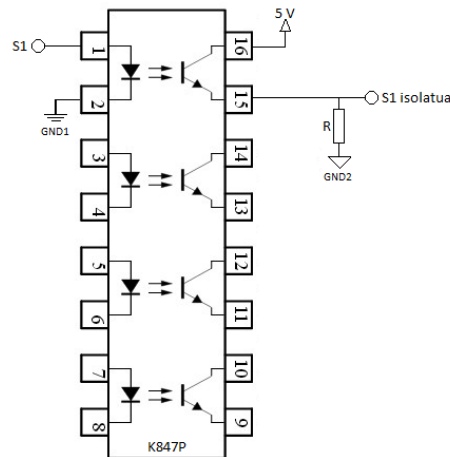


Irudia 36 - Magnetizazio induktantziaren efektua

Tiristoreen kontrola

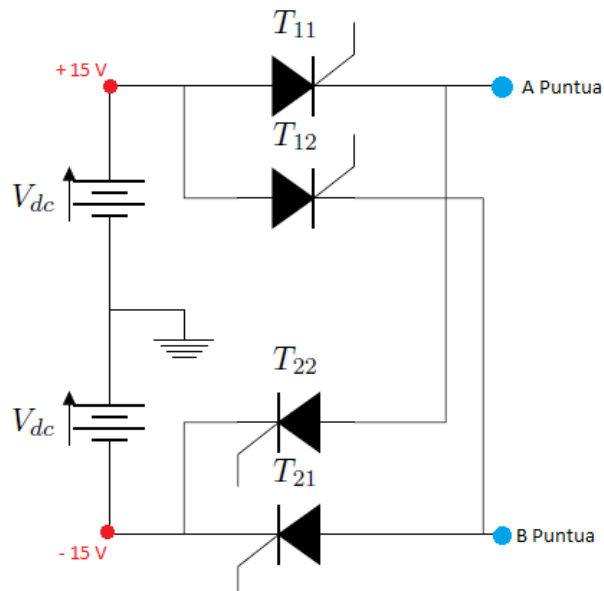
Proiektu honetan erabiltzen diren tiristoreek seinaleen bitartez egiten dute ateko konmutazioa, aktibo - ez-aktibo egoeren artean mugitzeko. Diseinuaren kontrolerako zati hau eta potentziako beste atal guztia isolaturik egon behar dira bata bestearekiko. Horretarako, kanpo kontrolerako seinaleak (irudiko S_1), optoakopladorearen den K847P zirkuitu integratua bideratzen dira. Honek, alde batean sartzen den seinalea, bestaldean ateratzen du, baina isolatuta.

Kontrolerako seinaleak isolatzeko erabili den zirkuitu bakoitza honelakoa da:



Irudia 37 - Tiristoreen dispareo-seinaleak isolatzeko zirkuitua

Kontrolerako zirkuituak tiristoreak nola aktibatzen dituen, eta une bakoitzean egoera joera zein den azalduko da hurrengo lerroetan:



Irudia 38 - Pulsu erresonanteak sortzeko zirkuitua

Irudian ikusten den diseinua pulsu erresonanteak sortzeko erabili dena da. Goiko tiristore bien (T_{11} eta T_{12}) anodoak +15 V-eko tentsioa dagoen puntura lotzen dira, eta bestalde, beheko tiristoreen (T_{22} eta T_{21}) katodoak -15 V-eko tentsioa dagoen puntura.

Tiristoreen ateetan korrontea injektatzeko, batak bestearikiko 180 graduko desfasea duten bi seinale erabiltzen dira, gate1 eta gate2 aurrerantzean. T_{11} eta T_{21} tiristoreek ateko aktibazio seinale bera daukate (gate1) eta, T_{12} eta T_{22} tiristoreek ere bai (gate2). Horrela, gate1 seinalea aktibatzean, A puntuan +15 V-eko tentsioa ezarriko da, eta B puntuan -15 V-eko tentsioa. Bestalde, gate 2 seinalea aktibatzen denean, A puntuan -15 V-eko tentsioa ezarriko da, eta B puntuan +15 V-ekoa. Honen guztiaren laburpena beheko tauletan azaltzen da.

Tiristorea/Seinale aktiboa	Gate 1	Tentsioa A Puntuan	Tentsioa B Puntuan
T_{11}	Aktibo	+15 V	-15 V
T_{12}	Ez aktibo		
T_{21}	Aktibo		
T_{22}	Ez aktibo		

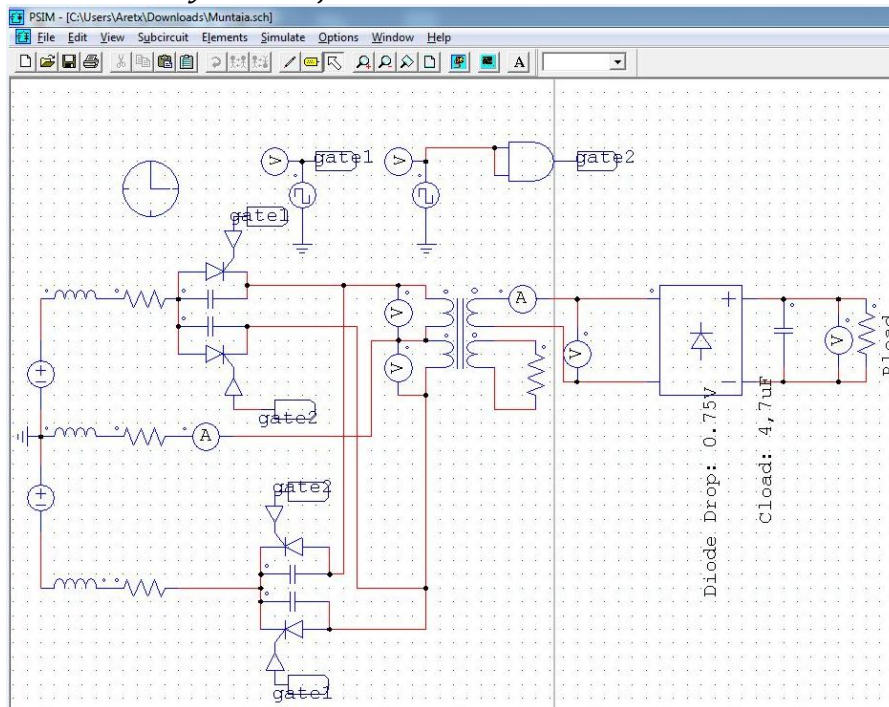
Taula 11 - Egoera gate1 seinalea aktibo dagoenean

Tiristorea/Seinale aktiboa	Gate 2	Tentsioa A Puntuan	Tentsioa B Puntuan
T_{11}	Ez aktibo	-15 V	+15 V
T_{12}	Aktibo		
T_{21}	Ez aktibo		
T_{22}	Aktibo		

Taula 12 - Egoera gate2 seinalea aktibo dagoenean

Simulazioa

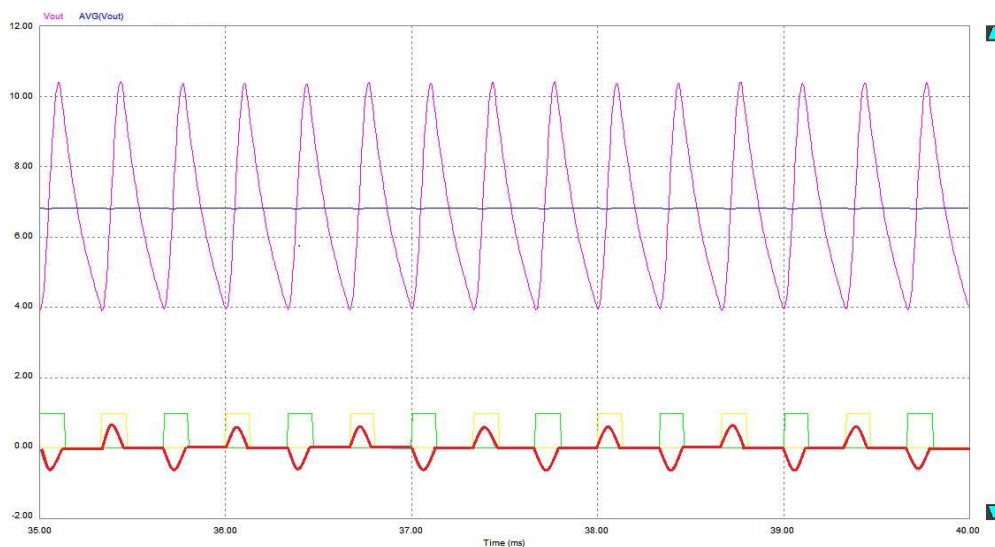
Diseinu analitikoan egindako eskema simulatu behar da. Horretarako, osagaiak PSIM softwarearen *layout*-ean jarri dira beheko irudian ikusten den modura.



Irudia 39 – Simulazio eskema

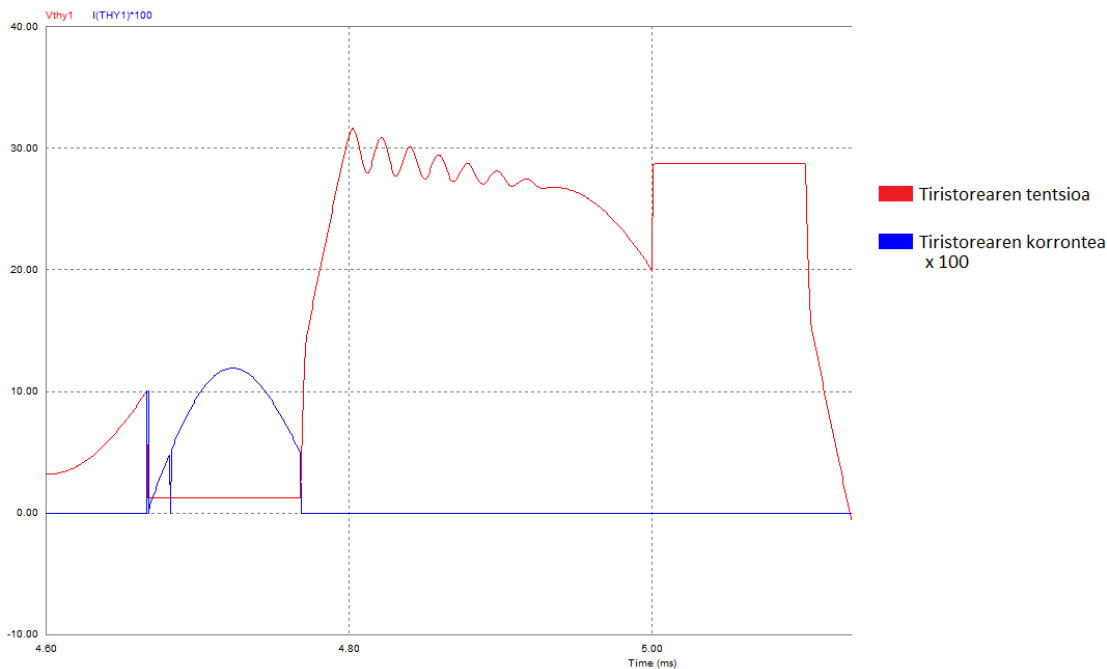
Tiristoreekin paraleloan dauden kondetsadoreen balioak aldatuz joan da, hauek baitira tiristoreen dv/dt aldaketak azkarrago edo motelago egitea ahalbidetzen dutenak. Azkenean, simulazio askoren ondoren, balio egokia $4,7 \mu\text{F}$ -koa dela ondorioztatu da, hauekin proiektuaren espezifikazioak betetzen dituen simulazioa gauzatu baitaiteke. Ondoren irudi batzuen bitartez simulazioan ikusi den azalduko da:

- Tiristoreen disparoak (berdez eta horiz), pultsu erresonanteen sorreraren emaitza (gorriz) eta azken AC/DC bihurketaren emaitza (morez, eta batzbestekoa urdinez) ikusi daitezke.



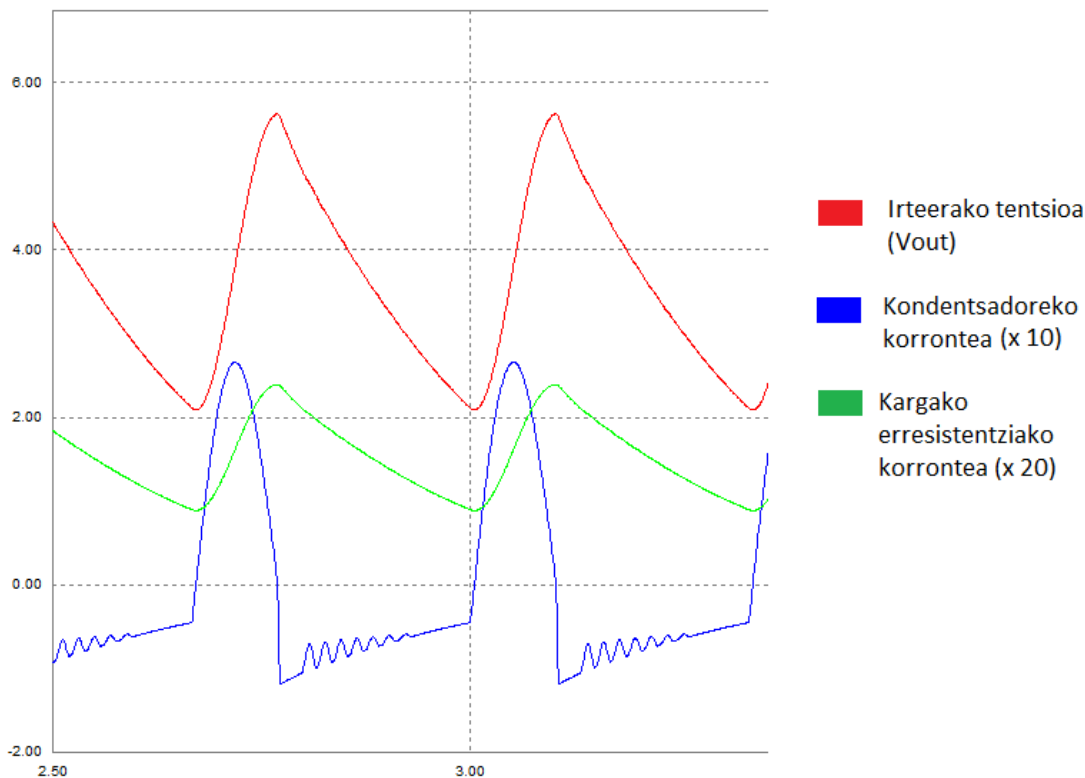
Irudia 40 – Simulazio emaitzak

- Tiristore bakar baten tentsioa eta korrontea, non ikusi daitekeen korrontea pulsu erresonante baten itxura duela, eta pulsu horren ondoren berriz ere tiristoreak sarrerako tentsioa jasaten duela.



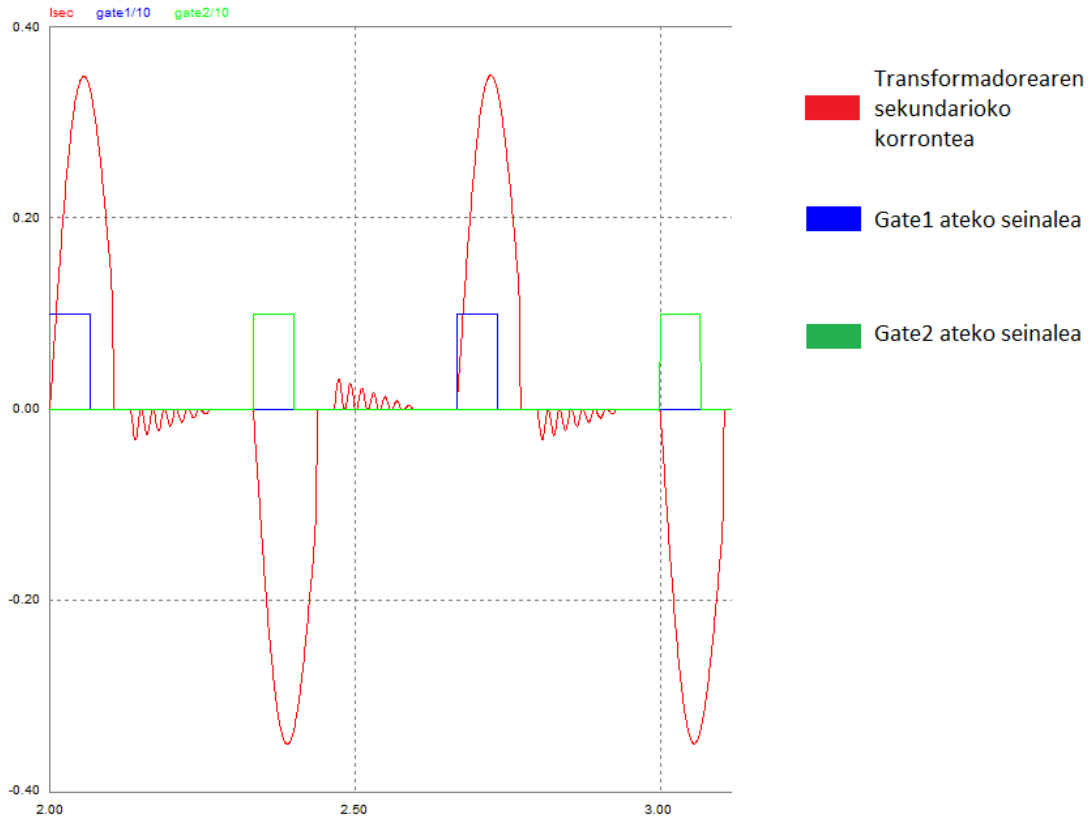
Irudia 41 – Tiristorearen tentsioa eta korrontea

- Kargako kondentsadorearen karga erresonantea eta deskarga esponentziala ikusi ahal dira. Korronte pulsuak heltzean kondentsadorea kargatu egiten da, eta ondoren erresistentziaren bidez deskargatu.



Irudia 42 –Kargako kondentsadorearen karga eta deskarga

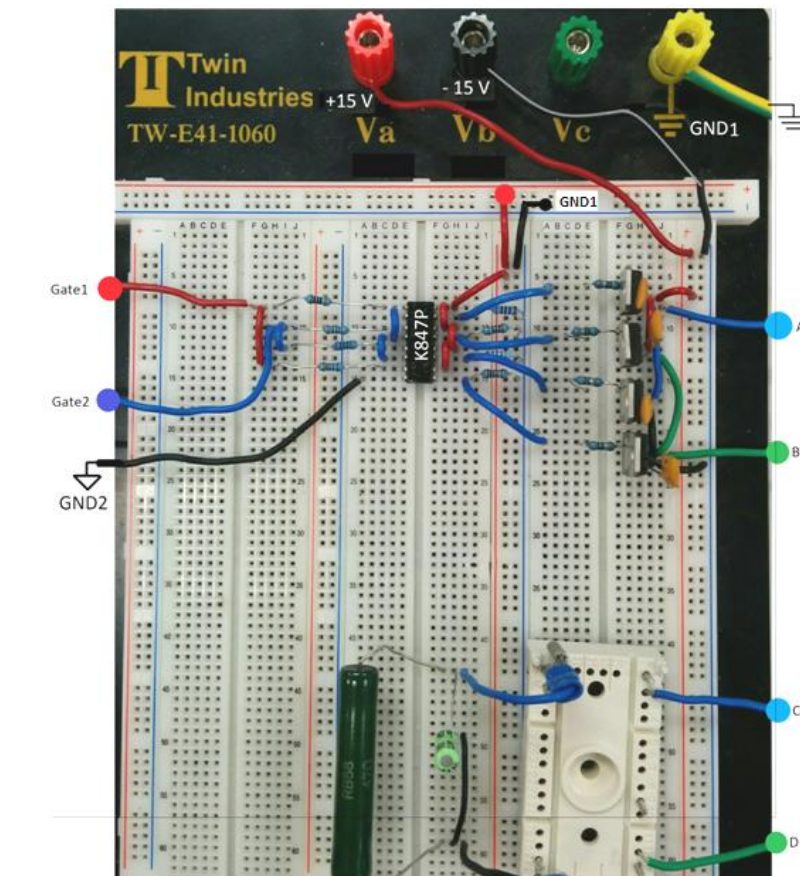
- Tiristoreen ateko seinaleak aktibatzen direnean sortzen den pulsu erresonantea ikusi daiteke, eta nola hau transformadorearen sekundariora hedatzen den.



Irudia 43 – Transformadorearen sekundarioko korronea

Prototipoaren fabrikazioa

Ondorengo hau da DCDC bihurgailu erresonante isolatuaren prototipoa *protoboard* batean muntatuta:



Irudia 44 – Prototipoa protoboard batean muntatuta

Irudian azaltzen diren A, B eta potentziako lurra (GND1) transformadorera konexioa egiten duten puntuak dira, eta C eta D puntuak transformadorearen irteera dira, non zubi-artezgailua dagoen konektatuta.

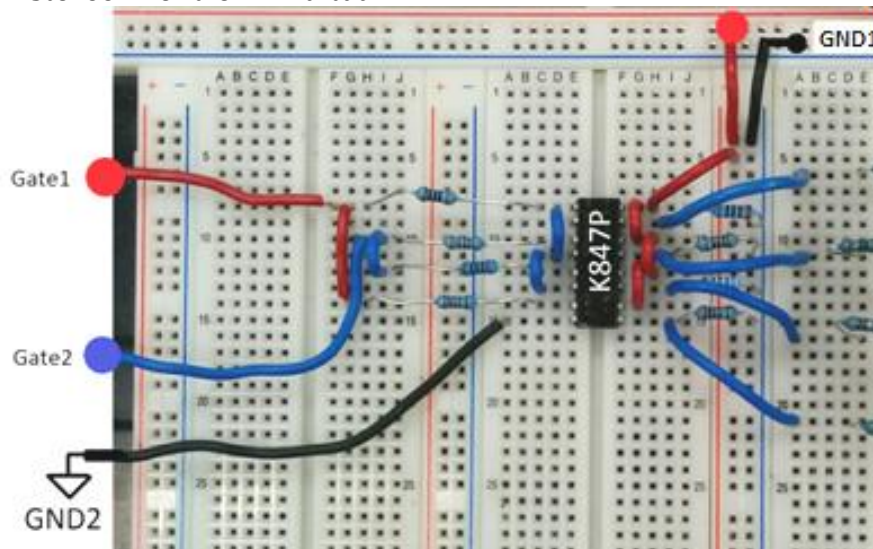
Erabili den transformadorea ondorengoa da:



Irudia 45 - Transformadorea

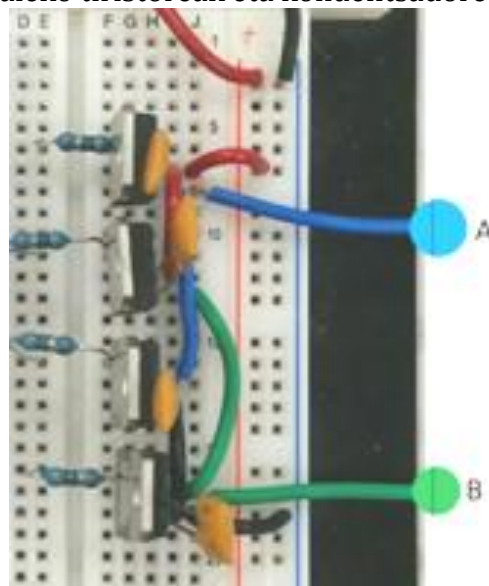
Prototipoaren muntaiaren atal ezberdinak:

- Tiristoreen kontrol zirkuitua



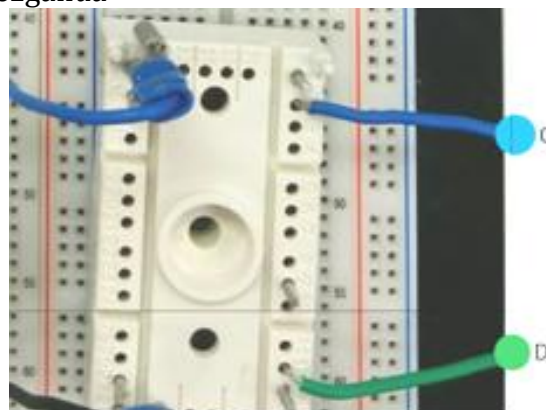
Irudia 46 –Tiristoreen kontrol zirkuitua

- Potentziako ataleko tiristoreak eta kondentsadoreak



Irudia 47 –Tiristoreak, paraleloko kondentsadoreak eta ateko erresistentziak

- Kargako artezgailua



Irudia 48 – Zubi artezgailua

- Kargako kondentsadorea



Irudia 49 – Kargako kondentsadorea

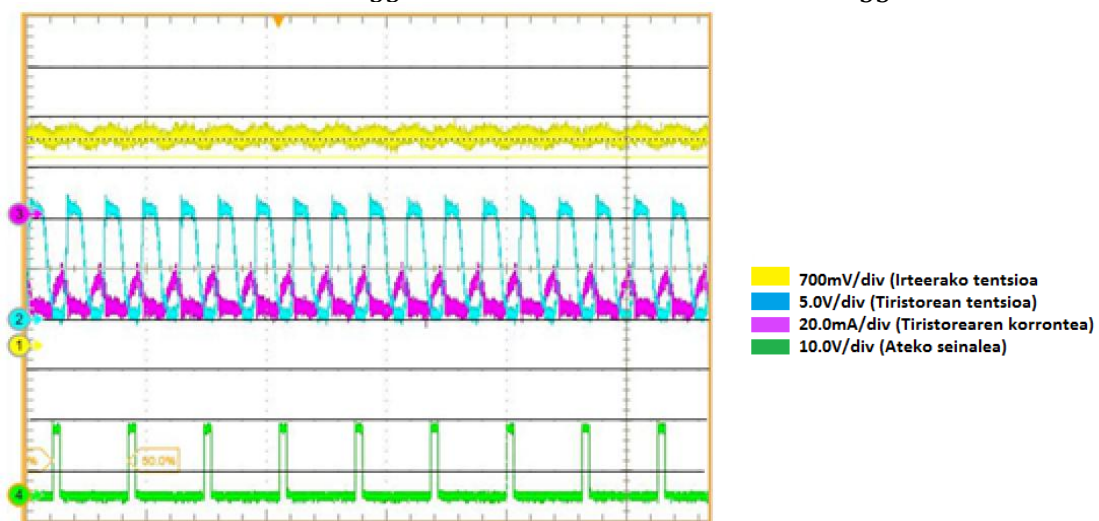
- Kargako erresistentzia



Irudia 50 –Kargako erresistentzia

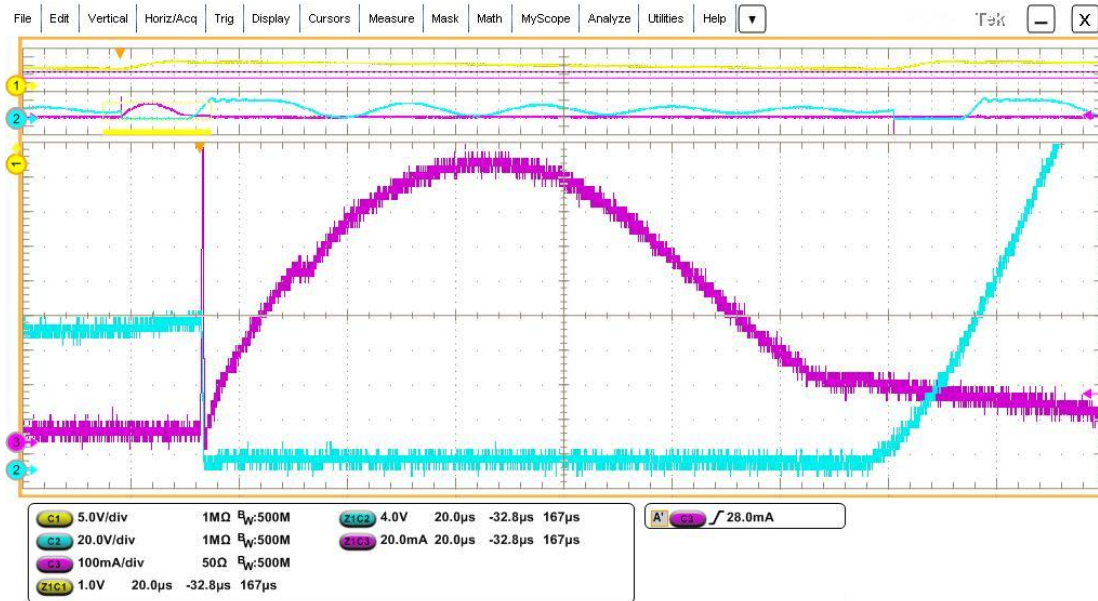
Ondoren datorren irudian, osziloskopioaren harrapaketa bat azaltzen da, non tiristorearen ateko sarrera-seinalea (berdez), tiristore hortan zehar doan korrontea (morez), anodo-katodo tentsioa (urdinez), eta azkenik, irteerako DC motako tentsioa (horiz) azaltzen diren. Tiristoreen atara doan seinalea (berdea) 1,5 kHz-eko maiztasunekoa da eta sarrerako tentsioa ± 3 V-ekoa. Jakinda espiren erlazioa 33:50 dela, tentsioa %151 igoko da, eta tiristoreetan zein zubi-artezgailuan erortzen den tentsioa kontuan hartuta, irteerako tentsioak (horia) adierazpen hau izango du:

$$V_{OUT} = (V_{IN} - V_{tiristorea}) \cdot \frac{50}{33} - V_{zubi-artezgailua} = (6 V - 2.5 V) \cdot \frac{50}{33} - 2.5 = 2.8 V$$



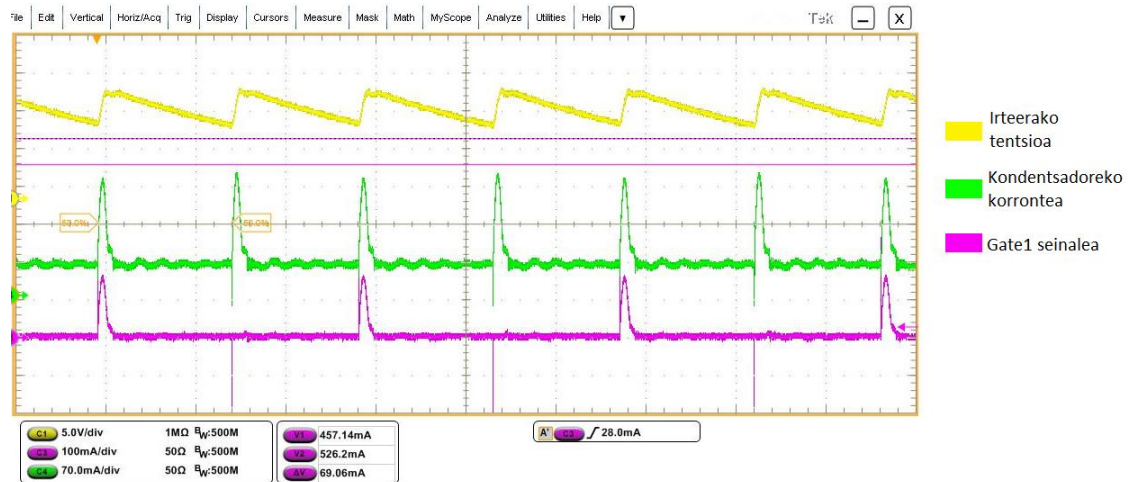
Irudia 51 – Irteerako tentsioa, tiristorearen korrontea eta tentsioa, eta ateko seinalea

Aurreko irudian zoom bat egiten bada, ikusi daiteke nola pulsu erresonante bat dagoen, eta pulsuaren bukaeran tentsioak gora egiten duen.



Irudia 52 – Tiristorearen tentsio eta korronteen zoom-a

Beheko irudi honetan kondentsadorearen karga eta deskarga ikusi daitezke, non pulsu erresonantea dagoenean kondentsadorea kargatu egiten den eta ondoren deskargatu. Gate1 seinalea ere ikusi daiteke, eta kontuan izan behar da gate2 seinalea 180° desfasatuta dagoela gate1-ekiko.

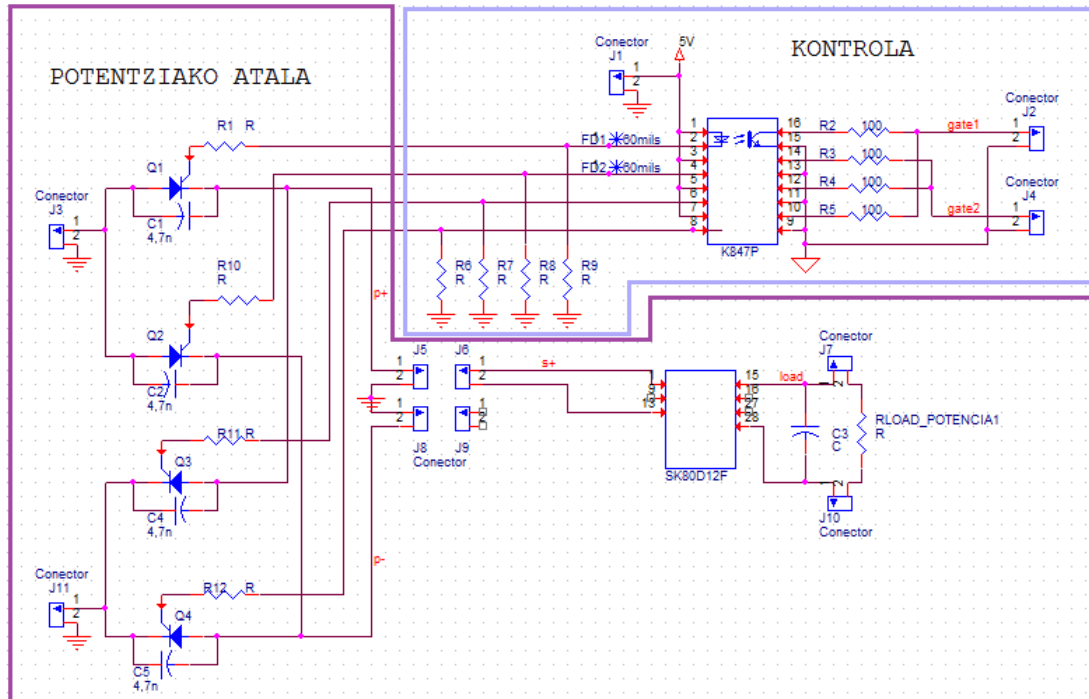


Irudia 53 – Irteerako tentsioa, kondentsadoreko korrontea eta gate1 seinalea

Softwarearen bidezko diseinu elektrikoa

Diseinu elektrikoa egiteko *OrCAD Capture* softwarea erabili da. Irudian ikusten den modura, eskema elektrikoa bat da, non osagai ezberdinak kokatzen diren eta beraien arteko konexioak egiten diren.

Beheko irudian eskema osoa ikusi daiteke, kontroleko eta potentziako atalak ezberdinduz:



Irudia 54 – OrCAD Capture softwarean diseinatutako eskema elektrikoa

Behin konexio guztiak eginda daudela, osagai bakoitzari bere oinatzak ezarriko zaio, *Library Expert Pro 2015* softwarearen bidez diseinatutakoa. Ondorengo irudian oinatz adibide bi ikusi daitezke: SK80D12F zubi-artezgailua eta TO-220 enkapsulatudun tiristorea; oinatz guztiak zehatzago azalduko dira II. eranskinan.



Irudia 55 – Library Expert Pro 2015 – SK80D12F oinatzak



Irudia 56 – Library Expert Pro 2015 – Tiristorearen (TO220) oinatzak

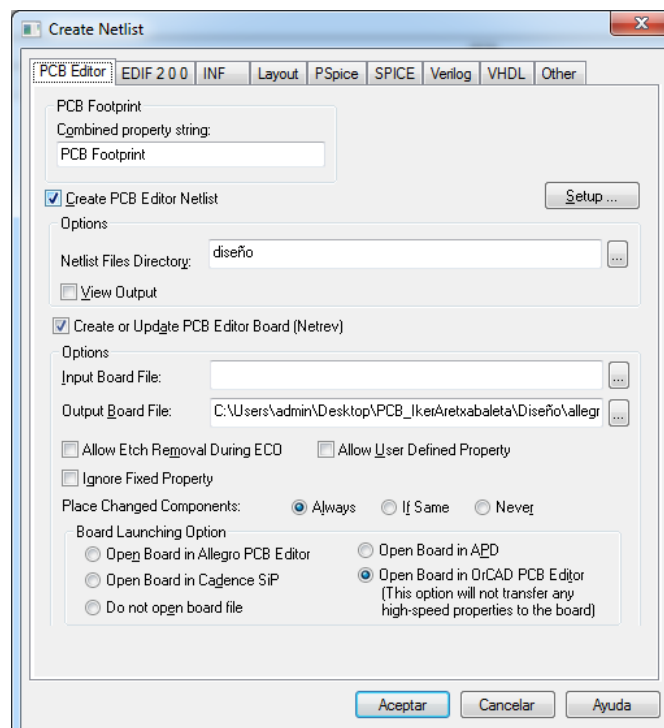
Oinatz horien izena zehatz-mehatz erabilita, osagaien ezaugarrietako *PCB Footprint* atala bete behar da. Horrela, gerora, *OrCAD PCB Editor* softwarearentzat beharrezkoa den *Netlist*-a sortzean osagai bakoitzari bere oinatzaz ezarriko zaio.

Hurrengo irudian azaltzen da OrCAD Capture softwareko osagaien ezaugarrien edizioko *layout*-a, non *PCB Footprint* atala ikusi daiteken kasu batzuetarako:

		Part Reference	PCB Footprint	Color	Description	Graphic	
1	+	SCHEMATIC1 : PAGE1	C1	CAPRR254W55L762T381H991	Default	Condensador ceramico	C.Normal
2	+	SCHEMATIC1 : PAGE1	C2	CAPRR254W55L762T381H991	Default	Condensador ceramico	C.Normal
3	+	SCHEMATIC1 : PAGE1	C3	CAPPRD500W60D500H1100	Default	Condensador electrolitico	C.Normal
4	+	SCHEMATIC1 : PAGE1	C4	CAPRR254W55L762T381H991	Default	Condensador ceramico	C.Normal
5	+	SCHEMATIC1 : PAGE1	C5	CAPRR254W55L762T381H991	Default	Condensador ceramico	C.Normal

Irudia 57 – Osagaien ezaugarri-taula

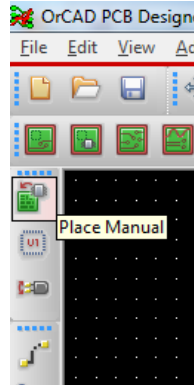
Hau guztia egin ondoren, *Netlist*-a sortuko da.



Irudia 58 – Netlista sortzeko leihoa

PCBaren diseinua

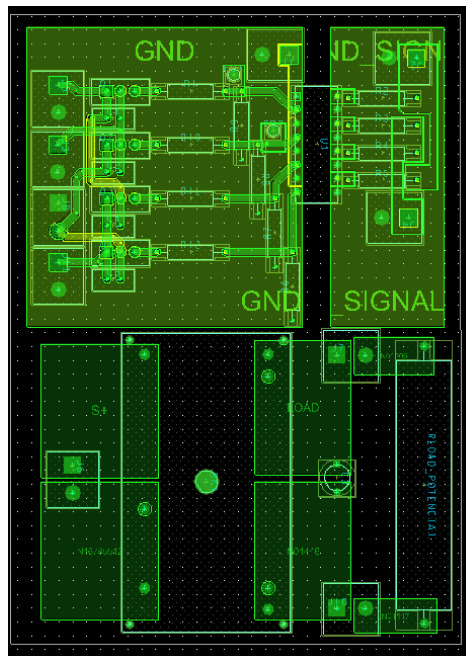
PCBaren diseinua egiteko *OrCAD PCB Editor* softwarea erabili da. Lehenik eta behin egin dena *layout*-ean osagai guztiak banan-banan jartzea izan da, ahalik eta ergonomikoen ezarriz. Horretarako *Place Manual* aukera erabili da.



Irudia 59 – OrCAD PCB Editor – Place Manual aukera botoia

Ondoren lur planoak (GND eta GND_SIGNAL) sortu dira osagaien inguruan, korrontearen itzulera errazteko. K874P zirkuitu integratua elikatzeke 5 V-eko elikadura-plano bat ere sortu da, konexio arrunt baten ordean, elikadura korrontea hobeto garrantzeko. Azkenik, osagaien artean egin beharreko konexio guztiak gauzatu dira, eta lur planoak zein elikadura planoak erabiltzen dituzten osagaien kasuetan, bata bestearen gainean daudenez, osagai-plano konexioa *Full Contact* motakoa ezarri da, konexioa hobea baita *thermal pad*-ekin baino.

Ondorengo irudian PCBaren diseinu osoa ikusi daiteke:



Irudia 60 - PCBaren diseinu osoa

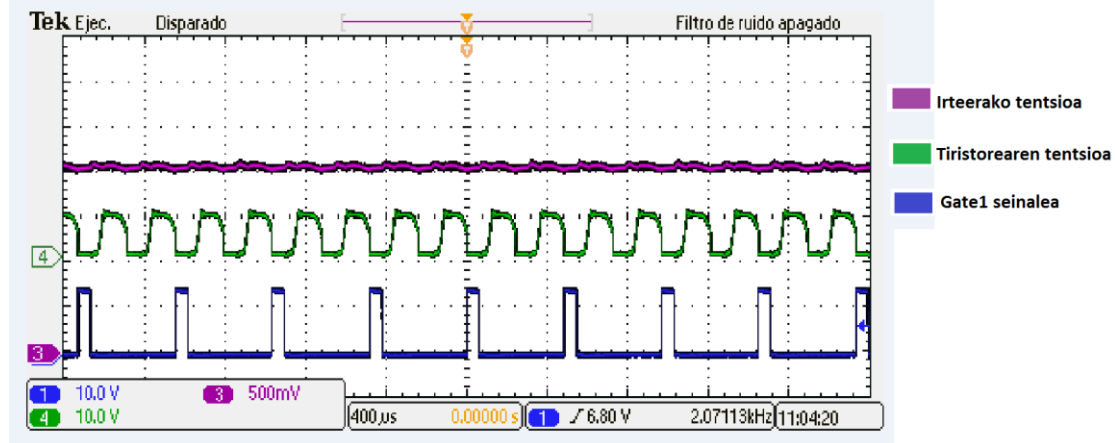
PCBa guztiz diseinatuta dagoenean, *Drill* fitxategiak eta *Gerber* fitxategiak sortu behar dira fabrikazioa egiten duten makinariak kode hau baitute lengoia bezala.

Egiaztapena eta emaitzen bilketa

PCBa fabrikatuta dagoela, osagaiak bertan soldatu eta honen funtzionamendua egiaztatu da. Hasteko, gutxieneko espezifikazioak betetzen dituela egiaztatzen da, hau da:

- Sarreran DC motako tentsio bipolarra ± 15 V
- DC/AC bihurketa 2 kHz-eko maiztasunean.
- Lurreko korronea 0A
- Irteeran DC motako tentsioa

Sarrerako baldintza hauekin, ondorengo osziloskopio harrapaketak lortu dira:



Irudia 61 - funtzionamendua

Ikusten den bezala, diseinuak bere helburua betetzen du, DC motako sarrera bipolar batetik, DC motako irteera bat lortzen baitu.

4. Alderdi Ekonomikoak

4.1 Gastuen justifikazioa

Atal honetan proiektuaren aurrekontua azalduko da, non barne orduak, amortizazioak eta kostu orokorrak bezalako kontzeptuak izango diren kontuan.

Barne orduak			
	Lanorduak (h)	Kostua (€/h)	Kostua
Proiektu zuzendaria	50	60	3000 €
Ingeniaria	20	40	800 €
		Guztira:	3800 €

Taula 13 - Barne orduak

Amortizazioak				
Kontzeptua	Erosketa Kostua (€)	Bizi orduak (h)	Erabilera (h)	Kostua
Ordenagailua	1500 €	2000	500	450 €
Orcad Softwarea	3000 €	8760	400	136,99 €
			Guztira:	586,99 €

Taula 14 - Amortizazioak

Osagaien kostuak			
Osagaia	Kostua (€/unit.)	Kantitatea	Kostua (€)
Tiristoreak	3.44 €	4	13,76 €
Kondentsadoreak	0.876 €	4	3,504 €
Kontrol ataleko erresistentziak	0.258 €	8	2,064 €
Tiristoreen ateetako erresistentziak	0.268 €	4	1,072 €
Optoakopladoreak	0.923 €	1	0,923 €
Zubi-artezgailua	24.16 €	1	24,16 €
Kargako kondentsadorea	0.284 €	1	0,284 €
Kargako erresistentzia	1.12 €	1	1,12 €
Transformadorea	150 €	1	150 €
		Guztira:	196,887 €

Taula 15 - Osagaien kostuak

Kostu orokorrak	
Kontzeptua	Kostua (€)
Bulegoko materiala	10 €
PCB fabrikazioa	80 €
Guztira:	90 €

Taula 16 - Kostu orokorrak

4.1 Gastuen guztirakoa

Gastuen guztirakoa	
Kontzeptua	Kostua (€)
Barne orduak	3800 €
Amortizazioak	586,99 €
Osagaien kostuak	196,89 €
Kostu orokorrak	90 €
Guztira:	4673,88 €

Taula 17 – Gastuen guztirakoaren taula

5. Ondorioak

Proiektu honetan, silizio-karburuzko (SiC) tiristorez osatutako tentsio handiko DCDC transformadore baten portaera eta mugak aurreikusteko erabiliko den tentsio baxuko prototipo bat garatzea lortu da.

Honen ezaugarrien artean pultsu erresonanteen bidezko karga, eta kontrol eta potentzia-atalen arteko isolamendua daude. Lehenengo ezaugarriari esker tiristoreen konmutazio maiztasuna igotzea lortzen da, erabili beharreko transformadorearen nukleoa txikiagoa izatea lortuz, eta bigarrenari esker, tiristoreen ateko seinaleak gailu ezberdinek sortu ahal izatea bermatzen da.

Transformadore hauek duten erabilera esparrua oso potentzia altukoa izan daiteke, eta hortaz garrantzia handia dauka erabilitako osagaiek jasan ahal duten potentziak. Hauek zenbat eta potentzia gehiago jasan, gutxiago jarri beharko dira seriean, horrek dituen onurekin. Hori dela eta tiristoreak erabili dira zirkuitua gauzatzeko, hauek baitira osagai erdieroaleen artean potentzia gehien jasan dezaketenak. Gainera, erresonantea izateak konmutazio-galerak txikiagoak izatea bermatzen du, korronea 0 A den unean ez baitago galerarik.

Etorkizunean, HVDC sistemak dituen alderdi onuragarriak kontuan hartuz, horien artean maiztasun ezberdineko sistemen interkonexioa, HVDC motako energiaren garraioak izango duen garrantzia aurreikusi daiteke, eta mota honetako proiektuek esparru horren garapena bultzatzea dute helburu.

6. Bibliografía

- [1] G. De Carne, M. Liserre, M. Paolone, K. Christakou, “Voltage Control and Current Congestion Management in Distribution Grids by means of a Smart Transformer, Proceedings of the International Symposium on Industrial Electronics ISIE” 2014, 1-4 June, Istanbul.
- [2] J.W. Kolar, G.I. Ortiz, Solid State Transformers: “Key components of Future Traction and Smart Grid Systems”, Proceedings of the International Power Electronics Conference IPEC, Hiroshima, Japan, 2014.
- [3] R. Pena-Alzola, G. Gohil, M. Liserre, F. Blaabjerg, “Review of modular power converters solutions for smart transformer in distribution system”, Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013.
- [4] R. Singh, “Ultra High Voltage SiC Bipolar Devices for Reduced Power Electronics Complexity”, ARPA Power Electronics in Photovoltaic Systems Workshop, 2011.
- [5] Jos Arrillaga, “High Voltage Direct Current Transmission”, Second Edition, 1998 [Book]
- [6] N. Flourentzou, V. Agelidis, and G. Demetriades, “VSC-based HVDC power transmission systems: An overview,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 24, no. 3, pp. 592–602, Mar. 2009
- [7] A. Elasser and T. Chow, “Silicon carbide benefits and advantages for power electronics circuits and systems,” Proc. IEEE, vol. 90, no. 6, pp. 969–986, Jun. 2002
- [8] Rashid, M.H, “Power Electronics Handbook”, Third Edition, 2011 [Book]
- [9] M. Aleo, “IGBT Basics AN1491 application note”, 2001
- [10] S. Linder, “High-power semiconductor devices. Review and comparative assessment,” Russ. Elect. Eng., vol. 78, pp. 509–514, Oct. 2007

I. Eranskina: Baldintzen plegua. Aplikatu daitezkeen arautegia

Proiektu honen funtsa prototipo baten fabrikazioa da, eta hau ez da merkaturatuko. Nahiz eta horrela izan, eta proiektuan zehar segurtasuna bermatzeko asmoz hurrengo normatibak aplikatu dira proiektua gauzatzean.

Gainera, diseinurako eta probak egiteko normatiba hauek kontuan izango dira:

- IEC 77 Ekipamendu elektronikoa orokorrean.
- IEC 146 Bihurgailuak.
- IEC 60310 Trakziorako transformadoreak eta induktantziak.
- IEC 60529 Esparruen segurtasun graduen sailkapena.
- IEC 571 - EN 50155. Gailu elektronikoak eta kontrolekoak, arautuak ezik.
- IEC 1133 Saiakerak egiteko metodoak.
- MIL-HDBK-217 Fidagarritasuna ekipo elektronikoetan.
- EN 61000-4-2 Bateragarritasun elektromagnetikoa. Proba-teknikak eta neurketak.
- EN 55011 Interferentzien ezaugarrien limiteak eta neurketa-metodoak.
- EN 61000-4-4 Bateragarritasun elektromagnetikoa. Trantsitorio azkarrei inmunitate probak.
- EN 61000-4-5 Bateragarritasun elektromagnetikoa. Energia altuko pultsuei inmunitatea.
- EN 50160 Distribuzio sistema publikoek emandako tentsioaren ezaugarriak.

II. Eranskina: Planoak eta eskemak.

Eranskin honetan *Kalkuluak - soluzioaren deskripzioa* atalaren garapen fasea zehaztasun handiagoarekin dokumentatuko da, memoriaren atal nagusia laburtzeko asmoz sartu ez diren azalpenak, eskemak eta irudiak eranskin honetan sartuz.

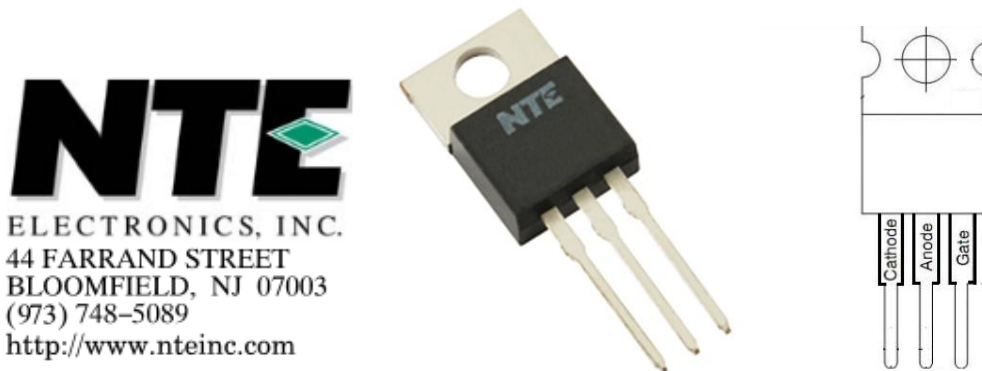
Eranskina hobeto antolatuta egoteko, soluzioaren deskripzioko atal-izen berberak erabiliko dira.

Diseinu analitikoa

Ondoren, hautatu diren osagaririk garrantzitsuenak zehaztasun handiagoarekin aztertuko dira.

Tiristoreak

NTE Electronics fabrikatzailearen NTE5424 tiristoreak hautatu dira muntaia egiteko.



Honen ezaugarriak hurrengo hauek dira:

- Korronte maximoa: 5 A (75 A-eko pikoak 50 Hz-etan)
- Tentsio maximoa: 400 V
- Tentsio-erorketa aktibo egoeran (V_{TM}): Typ: 2,34 V – Max: 4 V
- Euste korrontea (I_{Holding}): Typ: 20 mA – Max: 50 mA
- Ateko korrontea (I_{Latch}): 50 mA
- Maiztasun maximoa: 25 kHz

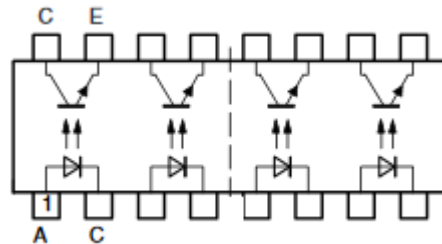
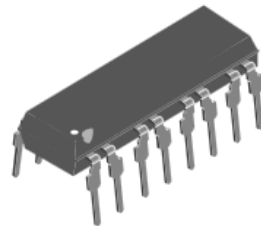
Proiektu honetan muntatu den prototipoa tentsio baxuko diseinu bat denez, tiristore hauek, inongo arazo gabe jasan ahalko dituzte zirkuituak eskatzen dituen tentsio eta korronte mailak. Bestalde, gutxienez 50 mA eman ahal dituen optoakopladore bat beharrezkoa izango da, tiristoreak disparatzeko zirkuitua egiteko.

Optoakopladore

Vishay fabrikatzailearen K847P optoakopladore erabili da. Honen ezaugarriak hauek dira:

- Sarrerako korronea (I_F): 60 mA
- Irteerako korronea (I_C): 50 mA
- Igorle-kolektore tentsioa (V_{CE}): 70 V

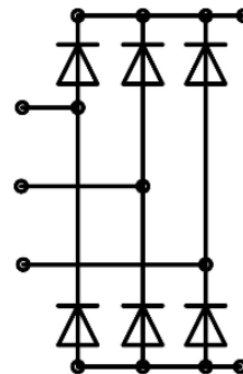
Irteerako korronea 50 mA-koa da eta tiristoreek behar duten ateko korronea ere 50 mA-koa da, hortaz, ez dugu arazorik izango tiristoreak optoakopladorearen bidez dispartzeko.



Zubi-artezgailua

Semikron fabrikatzailearen SK 80 D 12 F zubi-artezgailua erabili da, eta hauek dira bere ezaugarriak:

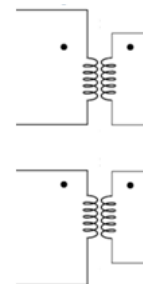
- Sarrera trifasikoa dauka, guk bi fase bakarrik erabiliko ditugu
- Korronte maximoa (I_D): 80 A
- Tentsio erorketa (V_F): 2,5 V



Transformadorea

Vacuumschmelze GmbH & Co. fabrikatzailearen transformadorea erabili da. Bere ezaugarriak hauek dira:

- Harilkatu bikoitza dauka transformadorearen atal bakoitzean.
- Espiren erlazioa 33:50 da.

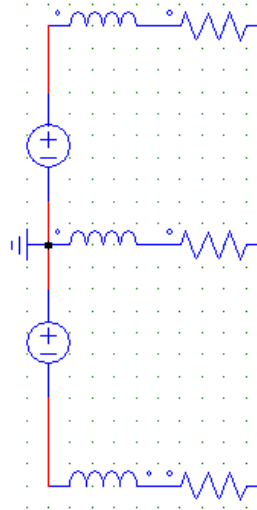


Simulazioa

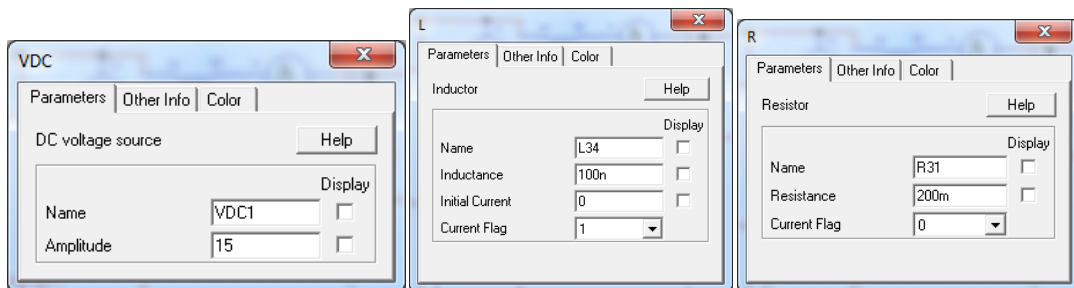
Atal honetan, simulazioak egiteko orduan kontuan izan diren alderdi guztiak adieraziko dira.

Sarrera bipolarra

Sarrera bipolarra simulatzeko, V_{DC} iturri bi sartu dira biak +15 V-eko balioarekin, eta bien artean lurreko erreferentzia puntua kokatu da. Simulazioa hainbat errealena izateko, kablearen inдукtantzia (L) eta erresistentzia (R) kontuan izan dira. Beheko irudietan, sarrera bipolarraren eskema ikusi daiteke, eta osagai bakoitzaren ezaugarri taula:



Sarrera bipolarren eskema



a)

Tentsio sorgailuen (V_{DC}) balioa

b)

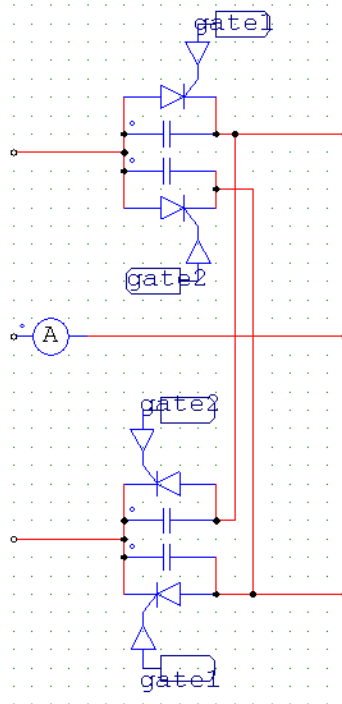
Sorgailuaren inдукtantzia (L)

c)

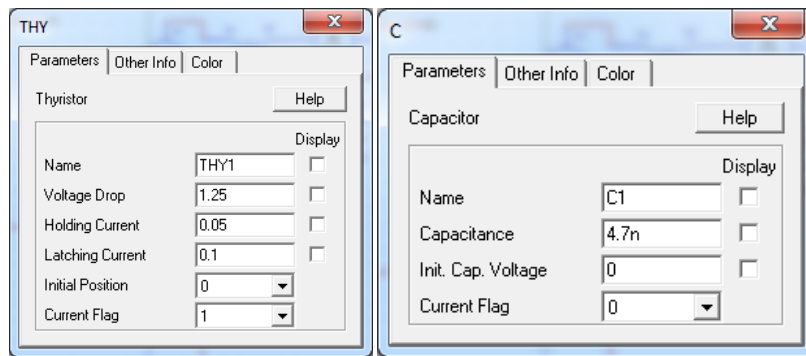
Sorgailuaren erresistentzia (R)

Pulstu erresonantearen sorrera

Sarrera bipolarretik DC motako tentsioa sartzen da, eta tiristoreen bidez pulstu erresonante motako tentsioa korronea sortzen da. Horretarako, tiristoreak *gate1* eta *gate2* seinaleen bidez aktibatzen dira. Seinale hauek, bata bestearekiko kontrafasean daude, hau da 180° -ko desfasearekin. Ondorengo irudietan eskema azaltzen da, eta bertan dauden osagai ezberdinen ezaugarri taulak.



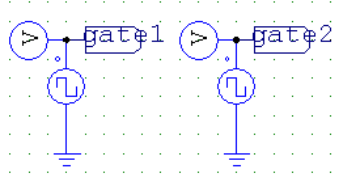
DC/AC bihurketa eskema



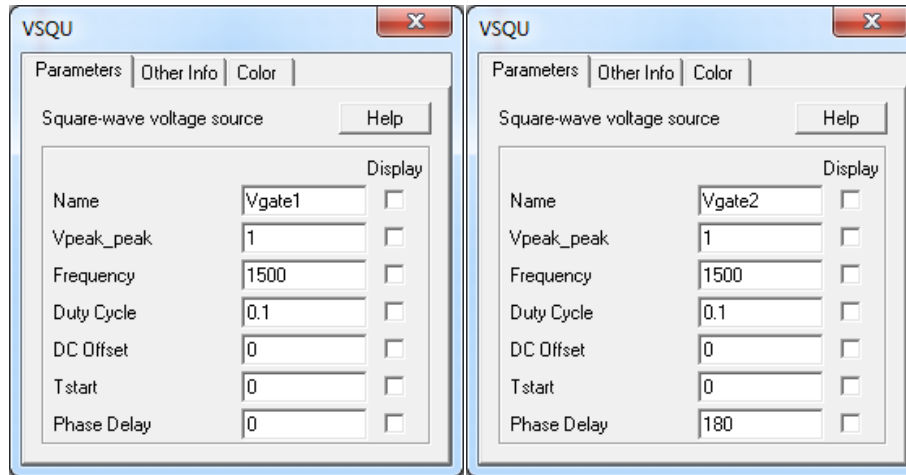
a)

b)

Tiristoreen konfigurazioa (a) eta paraleloko kondentsadoreen konfigurazioa (b)



Ateko *gate1* eta *gate2* seinaleen sorrera eskema



a)

b)

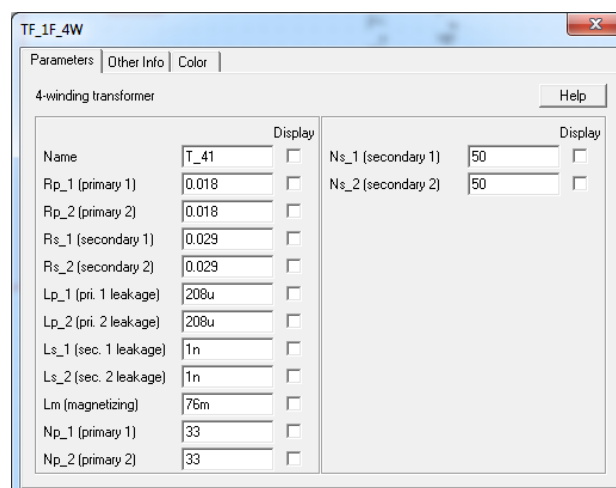
Ateko seinaleak sortzeko erabiltzen den uhin karratu iturrien konfigurazioak

AC/AC transformazioa

Behin AC motako tentsioa izanda, transformazioa egingo da. Horretarako, alde primarioan zein sekundarioan, harilkatu bikoitza duen transformadore bat erabiliko da, $N_p:N_s$ erlazioa 33:50 duena. Simulazioan, transformadorearen modeloak, kontuan izan ahal diren ezaugarri asko ditu, horien artean harilkatu ezberdinen inductantzia (L_{p_1} , L_{p_2} , L_{s_1} , L_{s_2}) eta erresistentziak (R_{p_1} , R_{p_2} , R_{s_1} , R_{s_2}), eta bestalde magnetizazioari dagokion inductantzia (L_m).

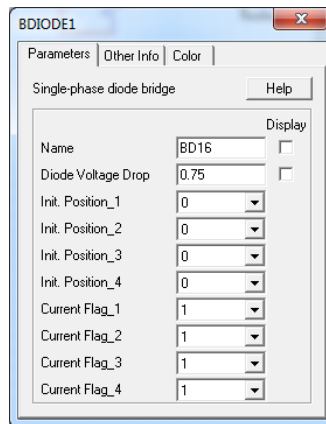
Azken faktore hau, L_m , transformadorearen datu-orrian dauden parametroen bidez kalkulatu daiteke.

Behin datu guztiak izanik, transformadorearen simulazio modeloko ezaugarri-taula betetzen da, horrela, ahalik eta simulazio errealena lortuko baita.

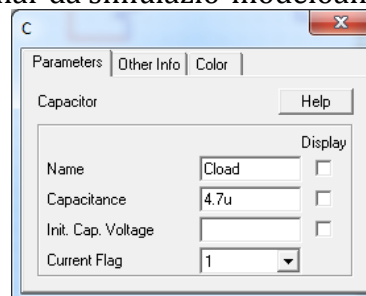


Zubi-artezgailua eta irteerako kondentsadorea

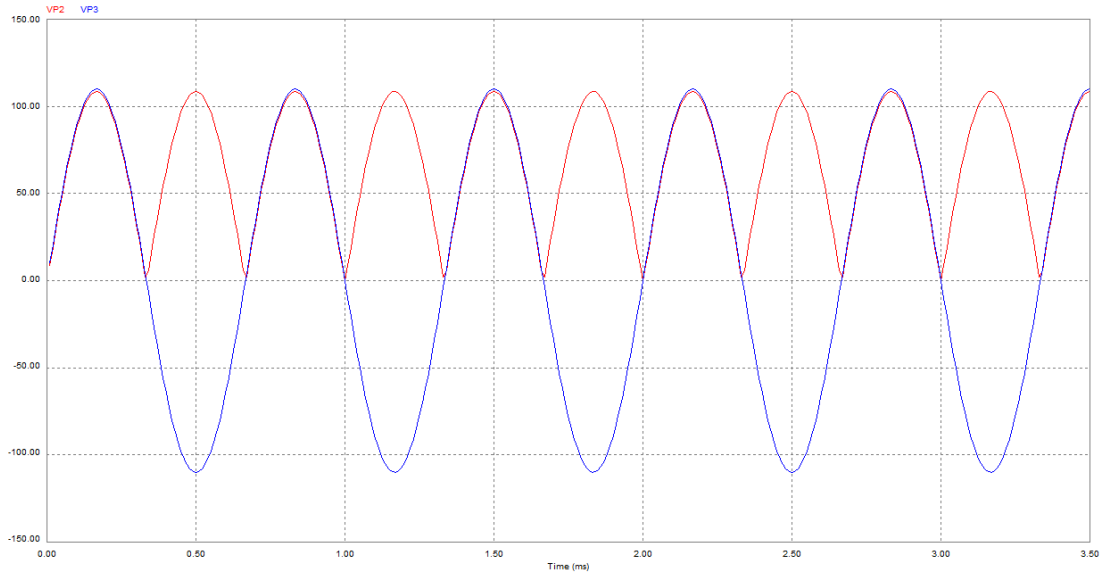
Transformadoreak tentsio-maila aldatu ondoren, AC motako tentsioa DC motako tentsioa bihurtu behar da, proiektuan gauzatzen den prototipoa DCDC transformadore bat baita bere osotasunean. Horretarako zubi-artezgailu bat eta kondentsadore bat erabiliko dira. Lehenik eta behin, zubi-artezgailuak AC motako tentsioaren fase negatiboa, positibo bihurtuko du. Hori ondo simulatzeko, ezaugarri taulan diodo bakoitzean erortzen den tentsioa sartu beharko zaio simulazio-modeloari:



Ondoren kondentsadoreak tentsio aldaketak jasango ditu pultsu erresonante bakoitzean kargatuz, eta pultsurik ez dagoenean deskargatuz. Hori simulatzeko bere kapazitatea ezarri behar da simulazio-modeloan:

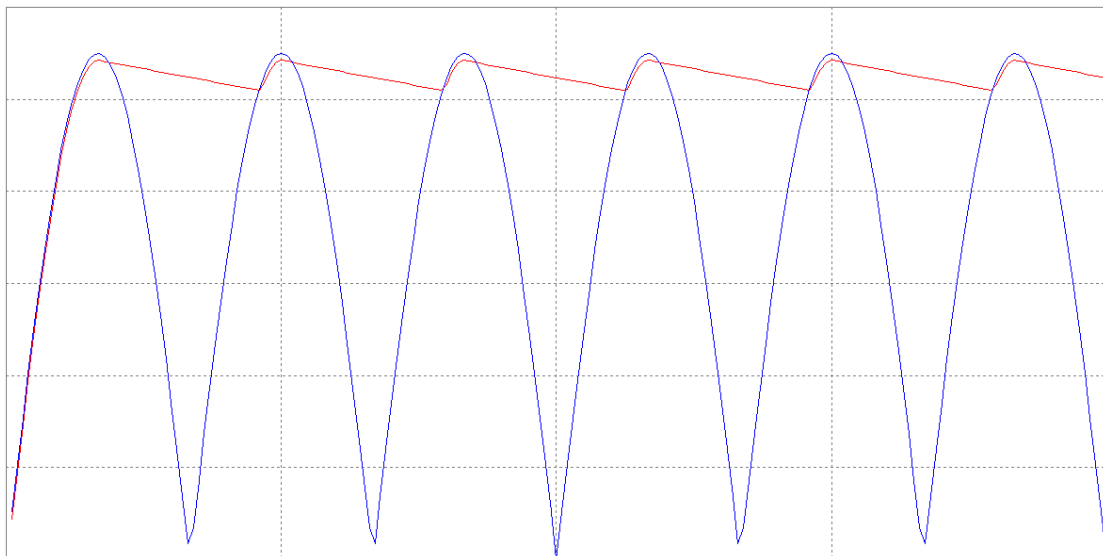


Hurrengo harrapaketan ikusi daiteke artezgailuaren funtzionamendua, non seinale urdina sarrera den eta gorria arteztutako irteera:



AC – Arteztutako AC - Kondentsadore gabe

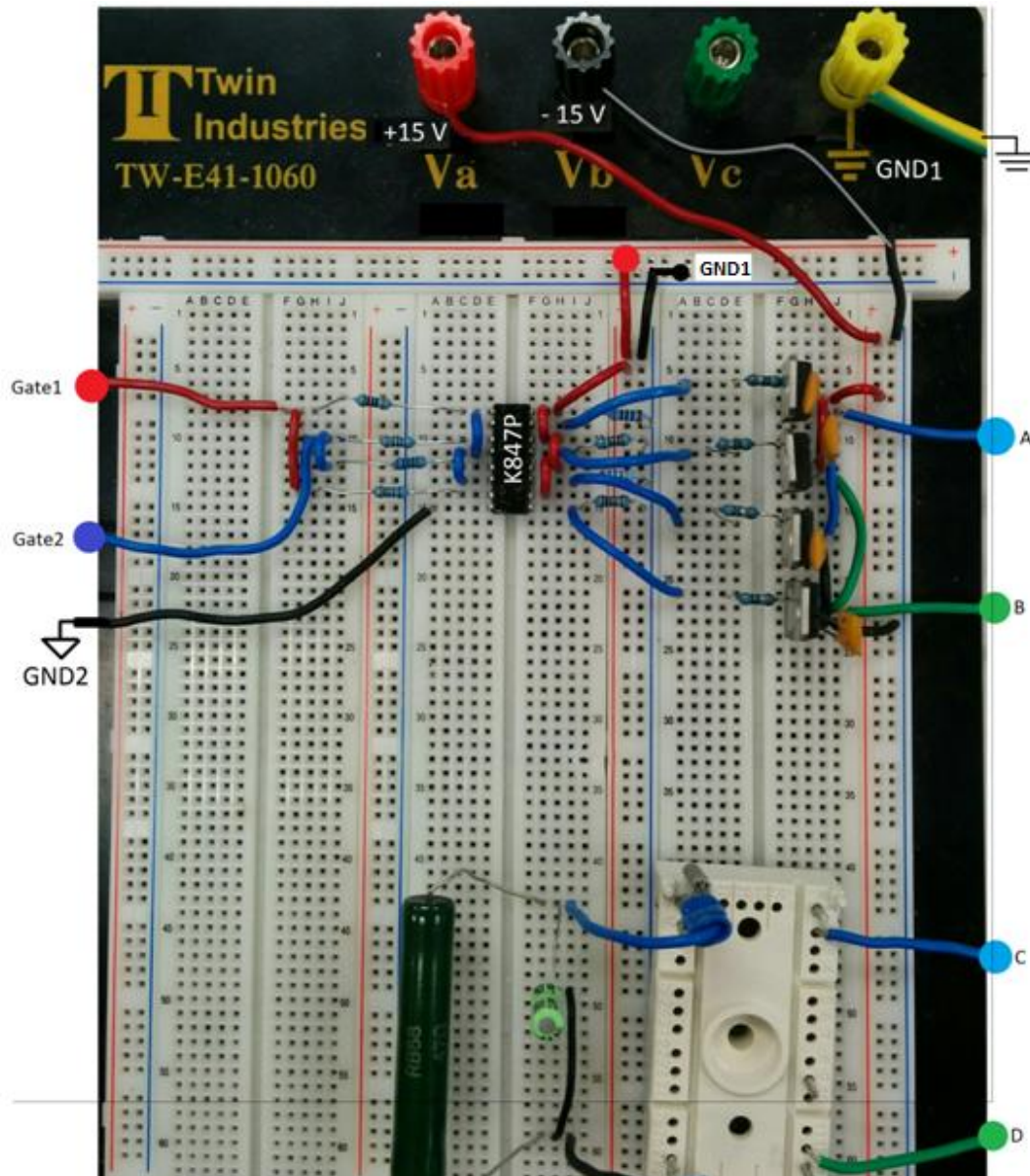
Ondorengo harrapaketan ikusten den bezala, kondentsadoreko tentsioa (V_C) nahiko zuzena da, kondentsadoreak tentsio aldaketa bizkorrak mugatzen baititu, baina hau kargaren araberakoa da, oso erresistentzia txikiko karga izanez gero tentsioa gehiago eroriko da.



Kondentsadorearen efektua – V_C gorriz

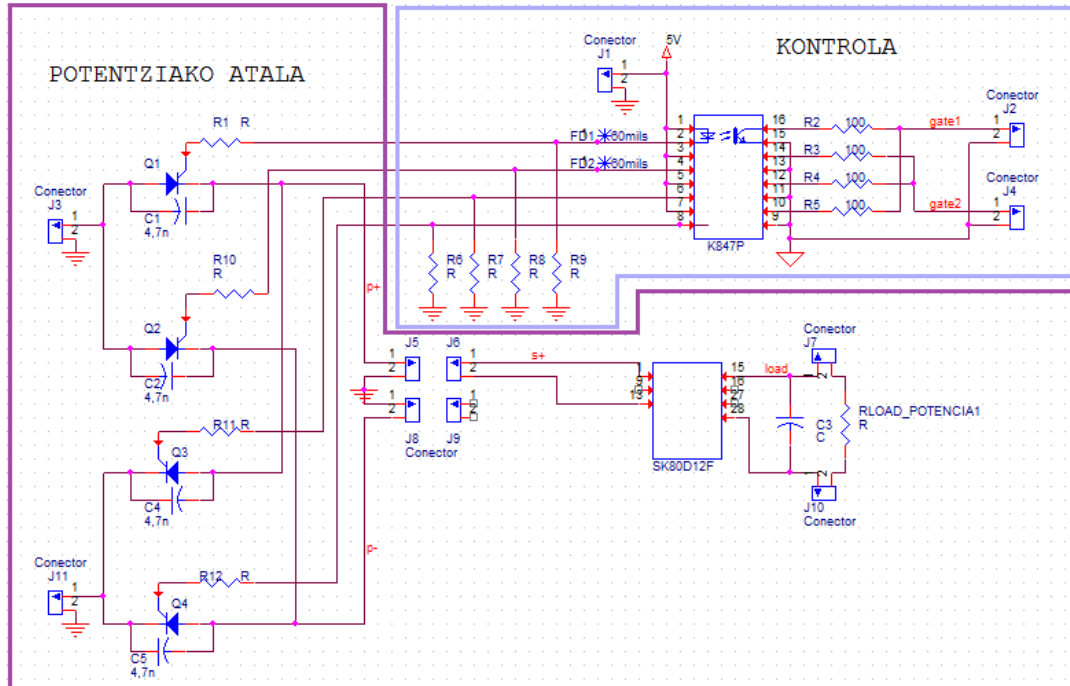
Prototipoaren fabrikazioa

Prototipoaren fabrikazioan, potentziako atala eskema elektrikoan bezala gauzatu da. Tiristoreen disparo seinaleak egiteko hainbat aukera aztertu dira, horien artean TCA785 zirkuitu integratua erabiltzea, honek fase kontrola ahalbidetzen baitu. Bestalde prototipoaren azken bertsioan dagoen bezalako konfigurazio bat erabiltzea aztertu da, horrela, edozein kontrol-zirkuitu erabili daiteke tiristoreak disparamatzeko. Azkeneko hau izan da aukeratu den kontrolerako zirkuitua.



Softwarearen bidezko diseinu elektrikoa

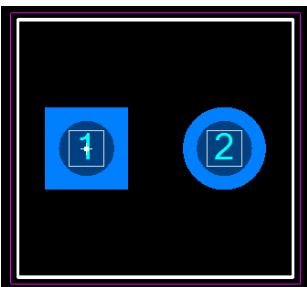
Diseinu elektrikoa egiteko *OrCAD Capture* softwarea erabili da. Eskema orokorra hurrengo hau da, non argi bereizten diren kontrolako eta potentziako atalak:



Eskema elektrikoa osatzen denean, osagai bakoitzaren oinatzak sortu behar da *Library Expert Pro 2015* softwarearen bidez, ondoren, *OrCAD Capture* softwarean dauden ezaugarri-tauletan, osagai bakoitzari bere oinatzak esleitzeko.

Sortu diren oinatz guztiak hauek dira:

- Konektoreak (izena: MKDSN_2)



Component Type: Header, Vertical

Component: Terminal Drafting Footprint

Dimensions Settings 3D Colors

Pin Number Method: Numeric

Body Style: Receptacle

Lead Shape: Square

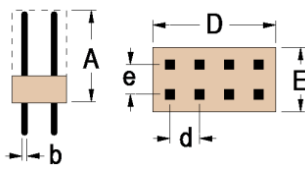
	d	e	
Pitch	5.08		
	D	E	Count
Pins	2	1	2

Pin Pattern: [Arrow]

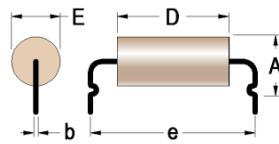
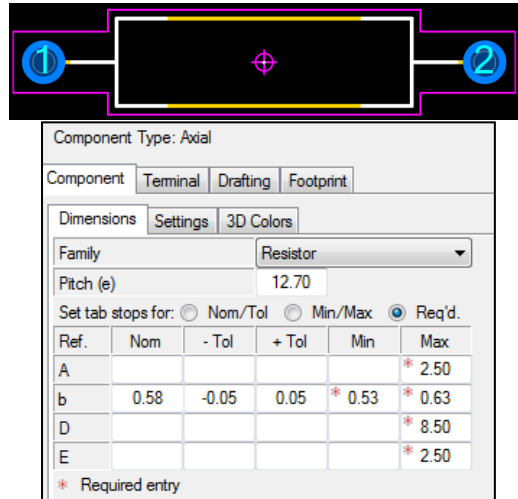
Set tab stops for: Nom./Tol Min./Max Req'd.

Ref.	Nom	- Tol	+ Tol	Min	Max
A					* 15.00
b					* 1.30
D	* 10.16				
E	* 9.50				

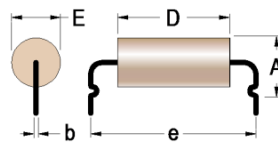
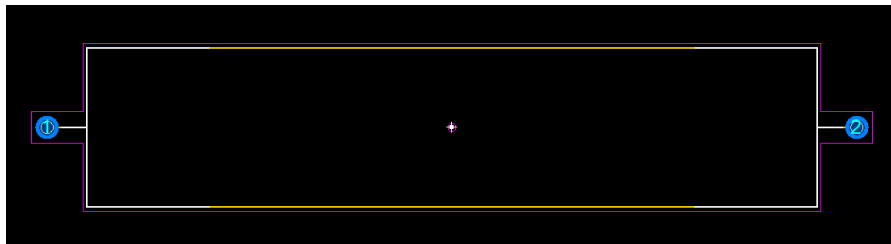
* Required entry
 * Optional dimension



- Erresistentzia txikiak (izena: RESAD1270W58L850D250)



- Kargako erresistentzia (izena: RESAD5100W73L4600D1000)



- Kondentsadore zeramikoak (izena: CAPRR254W55L762T381H991)



Component Type: Radial (Molded)

Component: Terminal Drafting Footprint

Dimensions Settings 3D Colors

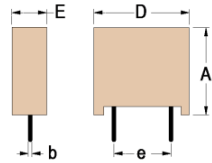
Family: Capacitor

Pitch (e): 2.54

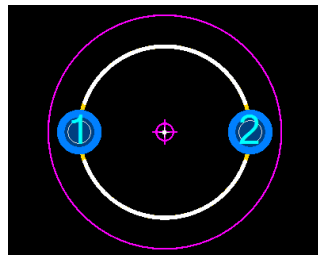
Set tab stops for: Nom/Tol Min/Max Req'd.

Ref.	Nom	- Tol	+ Tol	Min	Max
A					* 9.91
b	0.55	-0.05	0.05	* 0.50	* 0.60
D					* 7.62
E					* 3.81

* Required entry



- Kondentsadore elektrolitikoa (izena: CAPRD500W60D500H1100)



Component Type: Radial (Dipped, Round)

Component: Terminal Drafting Footprint

Dimensions Settings 3D Colors

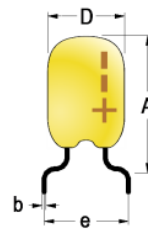
Family: Capacitor

Pitch (e): 5.00

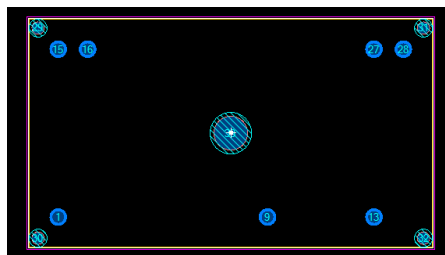
Set tab stops for: Nom/Tol Min/Max Req'd.

Ref.	Nom	- Tol	+ Tol	Min	Max
A					* 11.00
b	0.60	-0.065	0.065	* 0.535	* 0.665
D					* 5.00

* Required entry



- SK 80 D 12 F zubi-artezgailua (izena: sk_80d12f)



Component Type: User defined package

Component: Drafting Footprint 3D Colors

Units: Millimeters

Body Pins Origin Finish

Physical Characteristics

Shape: Rectangle

Length (X): 55.00

Width (Y): 31.00

Height (Z): 12.00

Create Options

Courtyard Excess: 0.25

Courtyard Round: 0.01

Polarity on Assembly: None

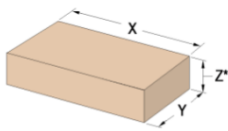
Body outline Silkscreen label

Silkscreen outline Assembly label

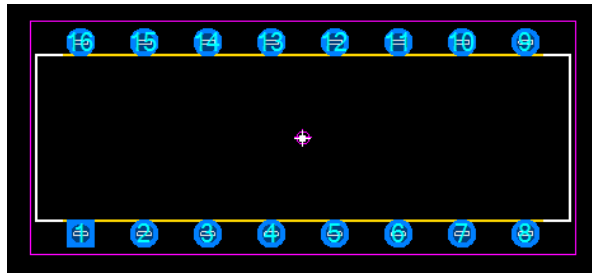
Assembly outline Assembly label

Courtyard outline Origin marker

Options are disabled if line width is zero



- K847P optoakopladora (izena: DIP762W47P254L2134H508Q16)



Component Type: Dual In-Line Package (DIP)

Component Terminal Drafting Footprint

Dimensions Settings 3D Colors

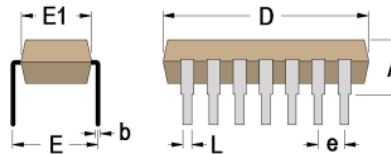
Pitch (e) 2.54

	Pkg	Count
Pins	16	16

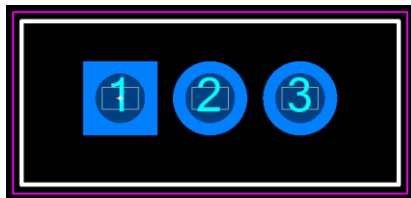
Set tab stops for: Nom/Tol Min/Max Req'd.

Ref.	Nom	- Tol	+ Tol	Min	Max
A					* 5.08
b	0.10	-0.02	0.02	* 0.08	* 0.12
D					* 21.34
E	* 7.62				
E1					* 6.60
L	0.47	-0.075	0.075	* 0.395	* 0.545

* Required entry



- Tiristoreak (izena: TO254P1064X462X2820-3)



Component Type: Flange Mount (TO-220) Vertical

Component Terminal Drafting Footprint

Dimensions Settings 3D Colors

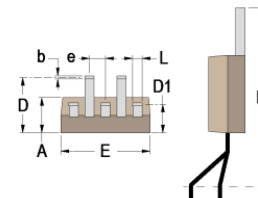
Pitch (e) 2.54

	Pkg	Count
Pins	3	3

Set tab stops for: Nom/Tol Min/Max Req'd.

Ref.	Nom	- Tol	+ Tol	Min	Max
A					* 4.62
b	0.48	-0.15	0.15	* 0.33	* 0.63
D	* 2.18				
D1					
E					* 10.64
L	0.89	-0.13	0.13	* 0.76	* 1.02
H					* 28.20

* Required entry
 * Optional dimension

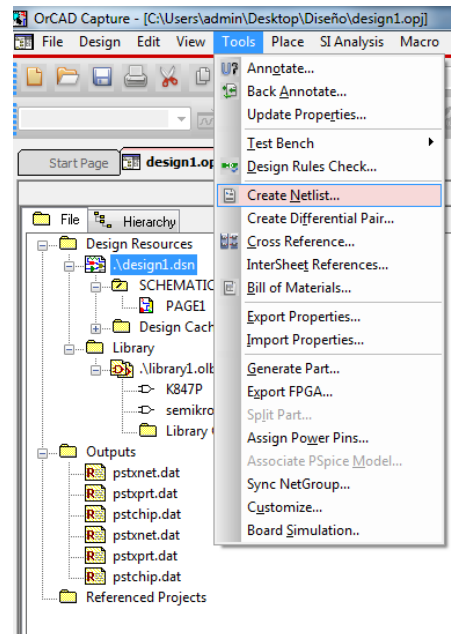


Oinatz guztiak sortu ondoren *OrCAD Capture* softwarean osagaien modelo bakoitzari oinatz bat esleitu behar zaio *PCB Footprint* eremuan.

		Part Reference	PCB Footprint	Color	Description	Graphic
1	SCHEMATIC1 : PAGE1	C1	CAPRR254W55L762T381H991	Default	Condensador ceramico	C.Normal
2	SCHEMATIC1 : PAGE1	C2	CAPRR254W55L762T381H991	Default	Condensador ceramico	C.Normal
3	SCHEMATIC1 : PAGE1	C3	CAPPRD500W60D500H1100	Default	Condensador electrolitico	C.Normal
4	SCHEMATIC1 : PAGE1	C4	CAPRR254W55L762T381H991	Default	Condensador ceramico	C.Normal
5	SCHEMATIC1 : PAGE1	C5	CAPRR254W55L762T381H991	Default	Condensador ceramico	C.Normal
6	SCHEMATIC1 : PAGE1	FD1	PAD_2mm	Default	Punto fiducial de posiciona	COSA_0.Normal
7	SCHEMATIC1 : PAGE1	FD2	PAD_2mm	Default	Punto fiducial de posiciona	COSA_0.Normal
8	SCHEMATIC1 : PAGE1	J1	MKDSN_2	Default	Conector borne-PCB paso	CON2_0.Normal
9	SCHEMATIC1 : PAGE1	J2	MKDSN_2	Default	Conector borne-PCB paso	CON2_0.Normal
10	SCHEMATIC1 : PAGE1	J3	MKDSN_2	Default	Conector borne-PCB paso	CON2_0.Normal
11	SCHEMATIC1 : PAGE1	J4	MKDSN_2	Default	Conector borne-PCB paso	CON2_0.Normal
12	SCHEMATIC1 : PAGE1	J5	MKDSN_2	Default	Conector borne-PCB paso	CON2_0.Normal
13	SCHEMATIC1 : PAGE1	J6	MKDSN_2	Default	Conector borne-PCB paso	CON2_0.Normal
14	SCHEMATIC1 : PAGE1	J7	MKDSN_2	Default	Conector borne-PCB paso	CON2_0.Normal
15	SCHEMATIC1 : PAGE1	J8	MKDSN_2	Default	Conector borne-PCB paso	CON2_0.Normal
16	SCHEMATIC1 : PAGE1	J9	MKDSN_2	Default	Conector borne-PCB paso	CON2_0.Normal
17	SCHEMATIC1 : PAGE1	J10	MKDSN_2	Default	Conector borne-PCB paso	CON2_0.Normal
18	SCHEMATIC1 : PAGE1	J11	MKDSN_2	Default	Conector borne-PCB paso	CON2_0.Normal
19	SCHEMATIC1 : PAGE1	Q1	TO254P1064X462X2820-3	Default	Tiristor	2N1595.Normal
20	SCHEMATIC1 : PAGE1	Q2	TO254P1064X462X2820-3	Default	Tiristor	2N1595.Normal
21	SCHEMATIC1 : PAGE1	Q3	TO254P1064X462X2820-3	Default	Tiristor	2N1595.Normal
22	SCHEMATIC1 : PAGE1	Q4	TO254P1064X462X2820-3	Default	Tiristor	2N1595.Normal
23	SCHEMATIC1 : PAGE1	R1	RESAD1270W58L850D250	Default	Resistencia	R.Normal
24	SCHEMATIC1 : PAGE1	R2	RESAD1270W58L850D250	Default	Resistencia	R.Normal
25	SCHEMATIC1 : PAGE1	R3	RESAD1270W58L850D250	Default	Resistencia	R.Normal
26	SCHEMATIC1 : PAGE1	R4	RESAD1270W58L850D250	Default	Resistencia	R.Normal
27	SCHEMATIC1 : PAGE1	R5	RESAD1270W58L850D250	Default	Resistencia	R.Normal
28	SCHEMATIC1 : PAGE1	R6	RESAD1270W58L850D250	Default	Resistencia	R.Normal
29	SCHEMATIC1 : PAGE1	R7	RESAD1270W58L850D250	Default	Resistencia	R.Normal
30	SCHEMATIC1 : PAGE1	R8	RESAD1270W58L850D250	Default	Resistencia	R.Normal
31	SCHEMATIC1 : PAGE1	R9	RESAD1270W58L850D250	Default	Resistencia	R.Normal
32	SCHEMATIC1 : PAGE1	R10	RESAD1270W58L850D250	Default	Resistencia	R.Normal
33	SCHEMATIC1 : PAGE1	R11	RESAD1270W58L850D250	Default	Resistencia	R.Normal
34	SCHEMATIC1 : PAGE1	R12	RESAD1270W58L850D250	Default	Resistencia	R.Normal
35	SCHEMATIC1 : PAGE1	RLOAD_POTENCIA1	RESAD5100W73L4600D1000	Default	Resistencia Potencia	R.Normal
36	SCHEMATIC1 : PAGE1	SK1	sk_80d12f	Default	SK 80 D 12 F	semikron.Normal
37	SCHEMATIC1 : PAGE1	U1	dip762w47p254i2134h508q16	Default	K874P	K847P.Normal

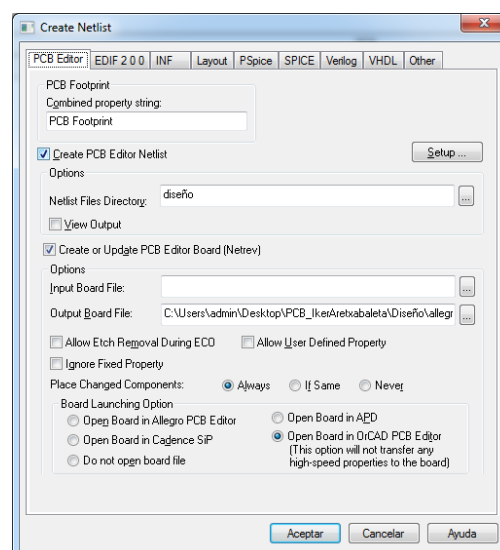
Azkenik, *OrCAD Capture* softwarearekin bukatzeko, *Netlist* bat sortu behar da. *Netlist*-a PCB editoreak ulertzen duen fitxategi-sorta bat da, non osagai bakoitza oinatz batekin erlazionatzen den zuzenean.

Netlist-a egiteko, OrCAD Capture softwarean konfigurazio lehia guztiak itxita egon behar dira, eta proiektuko diseinua aukeratuta, beheko irudian ikusten den bezala. (PCB Editor programa ere itxita egon behar da). Ondoren “Tools -> Create Netlist...” egin beharko da:



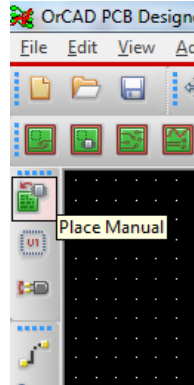
Netlist-a sortzeko hurrengo erara jarri beharko da, eta “Aceptar” klikatu:

- “Create PCB Editor Netlist” aukeratuta dagoen
- “Netlist Files Directory” helbide ezagun bat den
- “Create or Update PCB Editor Board (Netrev)” aukeratuta dagoen
 - “Input Board File”
 - Netlist berria bada: hutsik (*.brd bat sortuko du “Output Board File” helbidean)
 - Netlist-a eguneratzen bagaude: adierazi non dagoen lehenago sortutako *.brd fitxategia.
 - “Output Board File”: irteerako *.brd fitxategia
 - “Place Changed Components”: Always
 - “Board Launching Option”: Open Board in OrCAD PCB Editor

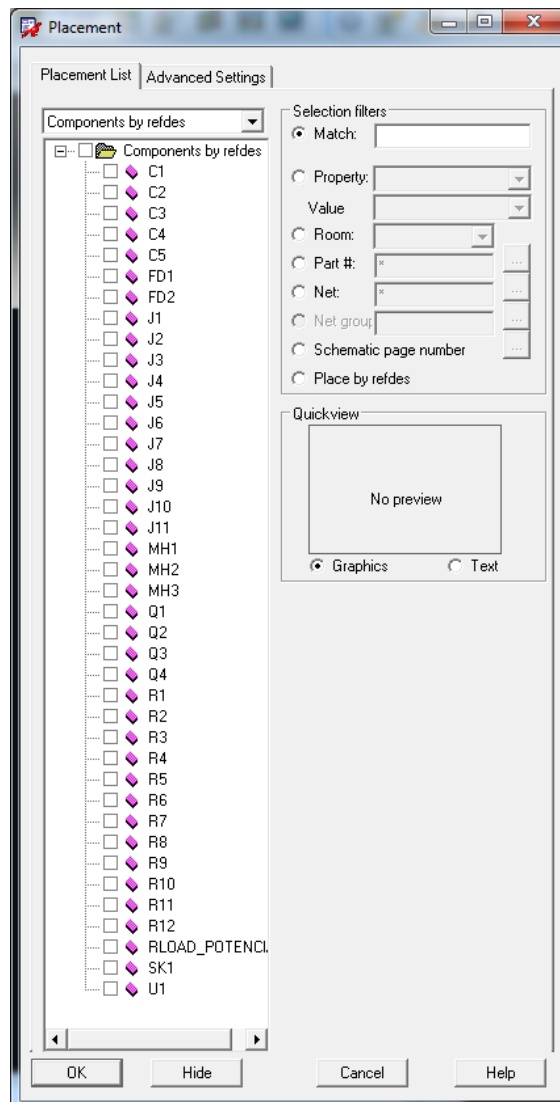


PCBaren diseinua

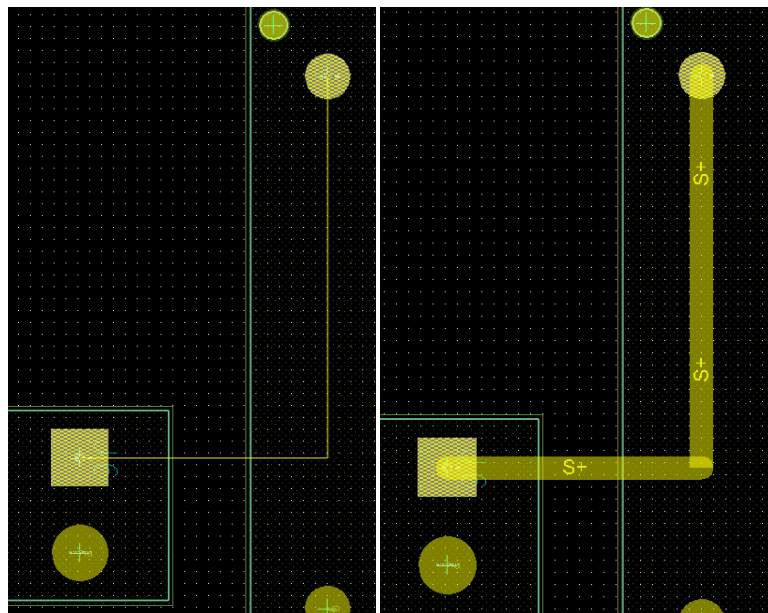
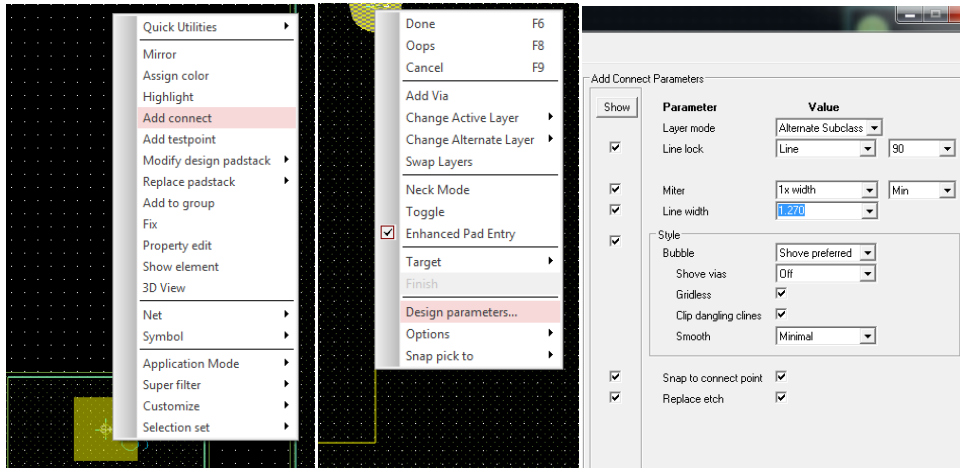
Aurreko pausuan, *netlist*-a sortzean, *PCB Editor* softwarea irekiko da, non *layout* beltz bat azalduko den osagairik gabe. Menuaren ezkerrean “*Place Manual*” aukera klikatu eta leiho bat azalduko da diseinuko osagai guztiekin.



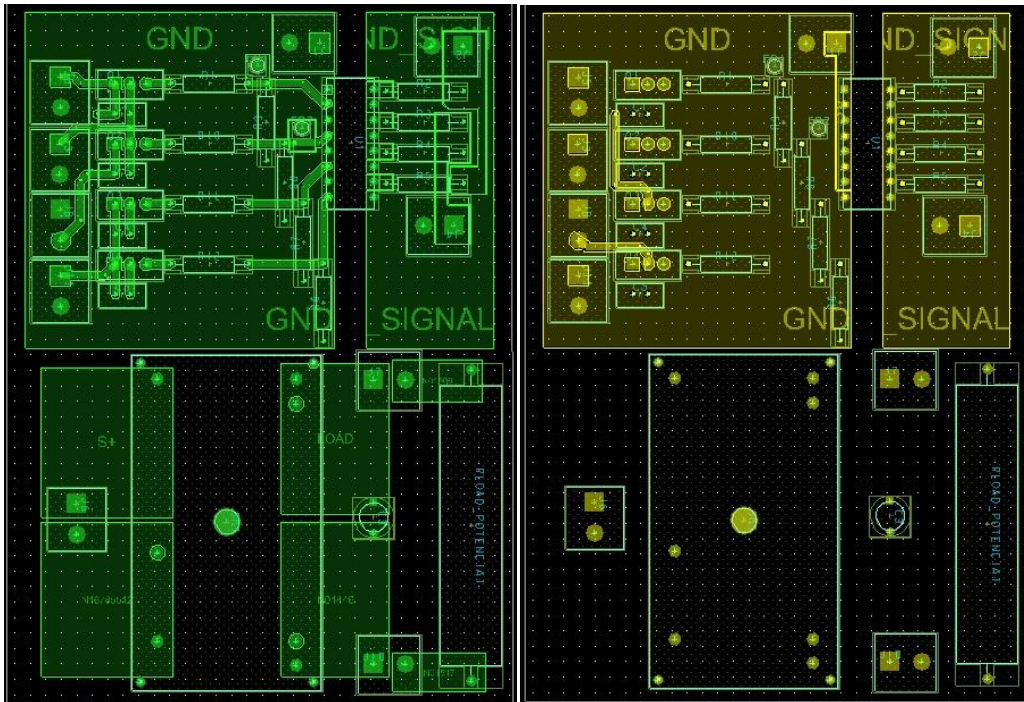
Leiho hau irekita dagoen bitartean osagaiak *layout*-ean ezarri daitezke, eta osagaiak ezarri ahala, listatik desagertzen joango dira.



Osagai guztiak elkarren artean lotu behar dira eskema elektrikoa jarraituz. Konexioak egiteko *pin*-etan eskuineko botoiaz klik egin behar da, eta “Add Connect” aukeratu, eta orduan, *OrCAD Capture* softwarean egindago konexio berbera egitea gomendatuko du *PCB Editor*-ek, baina lehenetsitako pista-lodiera ez da nahikoa, eta beraz hau lodiagoa egin beharko da “Design parameters...” aukeraren bitartez, hurrengo erara:



Guztia eginda dagoenean itxura hau izango du, non PCBaren TOP aldean kokatuta dauden osagaiak eta pistak kolore berdez azaltzen diren, eta horiz BOTTOM aldean daudenak.

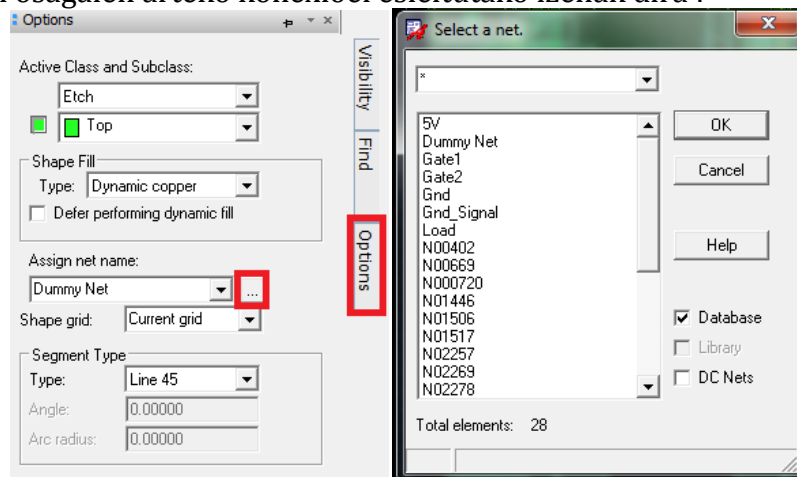


Planoei dagokienez, lur-planoak, elikadura-planoak eta konexio-planoak daude. Zenbat eta lurreko planoak handiagoak izan, korronteak itzulera bidea errazago izango du, eta horrek zirkuituaren funtzionamendua hobetuko du. Gainera osagaietako batzuk zuzenean planoetara konektatu daitezke.

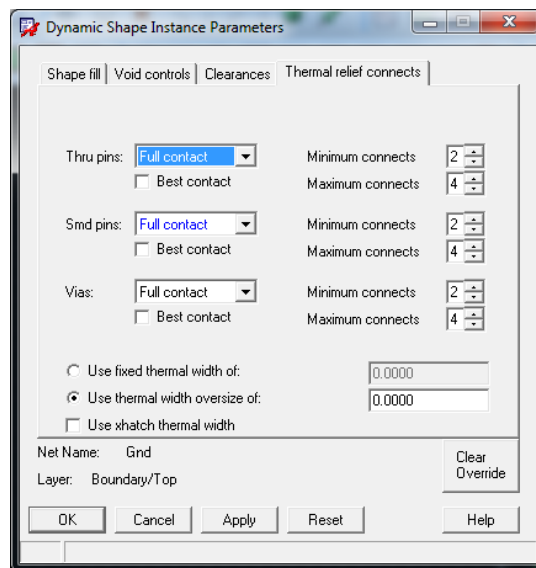
Planoak ezartzeko orduan, menu honekin forma ezberdinak egitea dago:



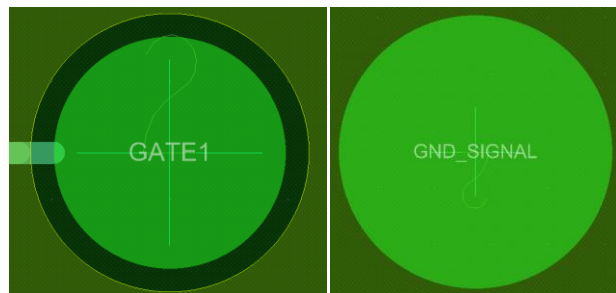
Irudikatu nahi den forma aukeratu ondoren, eskuineko menuan plano hori zein puntura konektatuta egongo den zehaztu behar da. Puntu horiek *OrCAD Capture* softwarean osagaien arteko konexioei esleitutako izenak dira :



Osagaiak planoarekin zuzenean konetatzen dira, baina konexio hori hobetu daiteke *thermal path*-a kenduta, horretarako planoaren parametroetara joan eta “*Full Contact*” bezala ezarri behar dira “*Thru pins*” eta “*Smd pins*” aukerak:

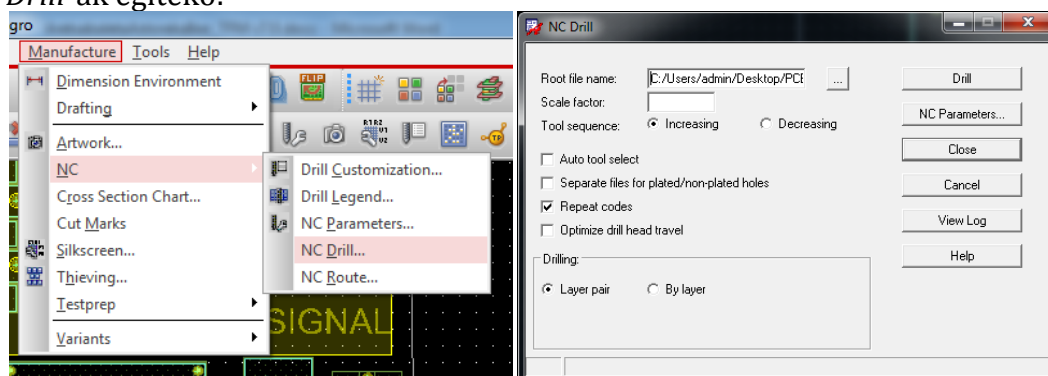


Horrela, beheko irudian ikusten den aldaketa gertatuko da, non puntua inguratzen duen eremu beltza desagertu egingo den:

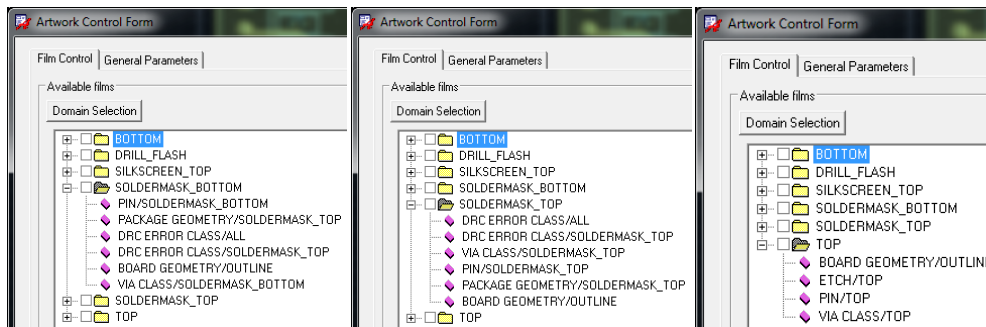
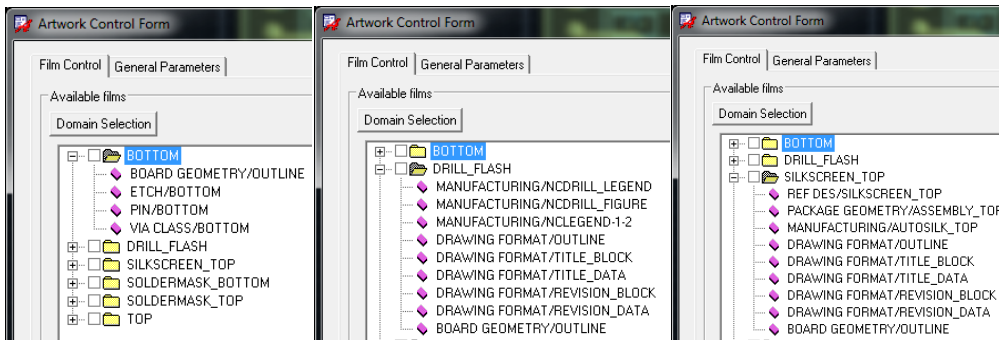
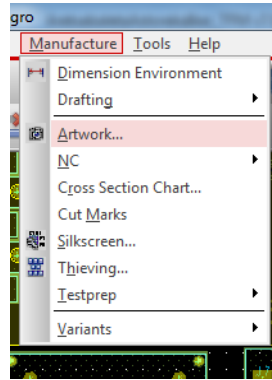


PCBa guztiz diseinatuta dagoenean, *Drill* fitxategiak eta *Gerber* fitxategiak sortu behar dira fabrikazioa egiten duten makinariak kode hau baitute lengoia bezala.

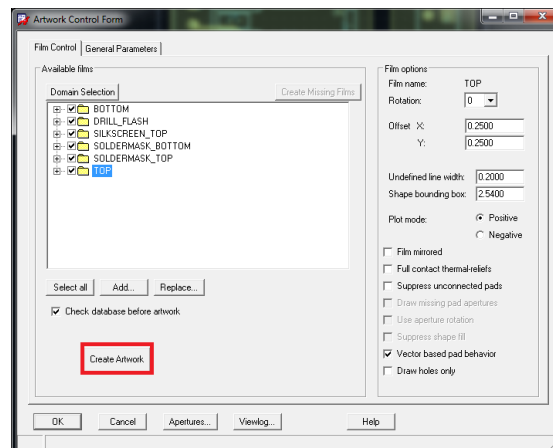
Drill-ak egiteko:



Gerber-ak egiteko:

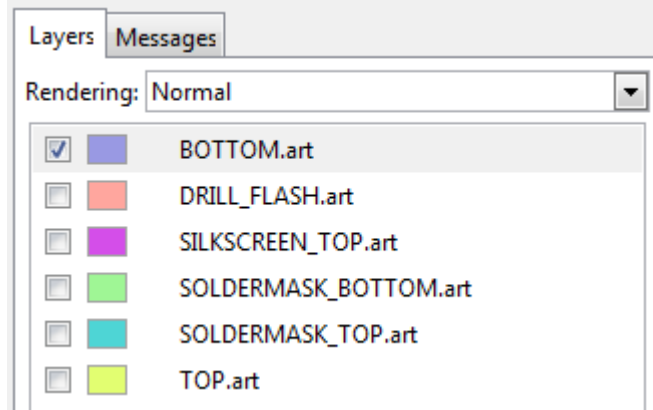


Behin beharrezkoak diren *Film* guztiak “Available films”-en barruan sartuta eta aukeratuta daudenean, “Create Artwork” aukeratu da, eta honek *Gerber*-ak sortuko ditu.

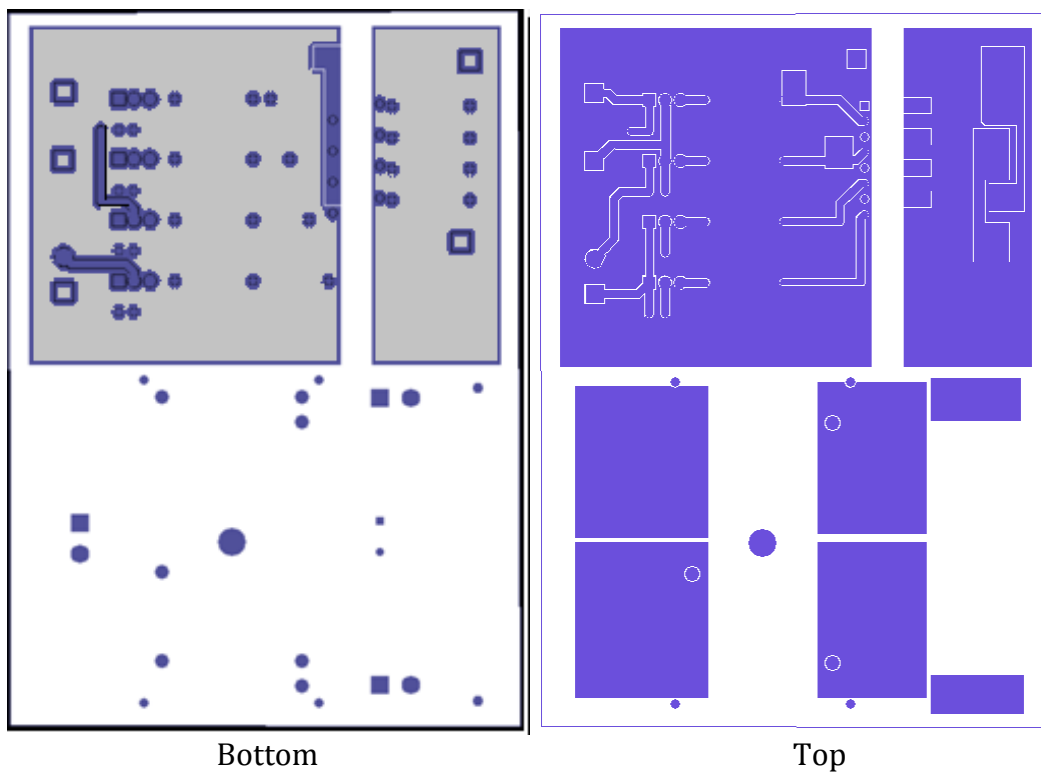


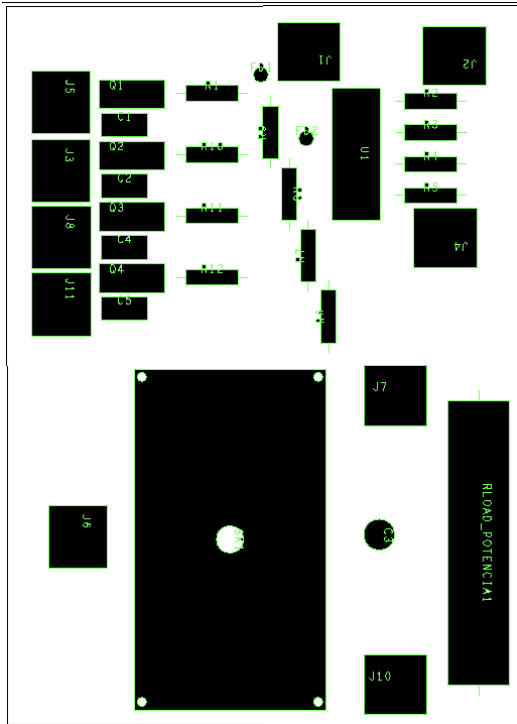
Fabrikaziora bidali orduko sortutako gerber fitxategiak guk diseinatu dugun bezala sortuak izan dirala zihurtatu behar da, horretarako gerber fitxategiak ikusteko sortutako *Gerby* softwareaz baliatuko gara.

Lehenik eta behin, gerber fitxategi guztiak kargatuko ditugu programa, eta *Layer* leihoan ikusiko ditugu guztiak:

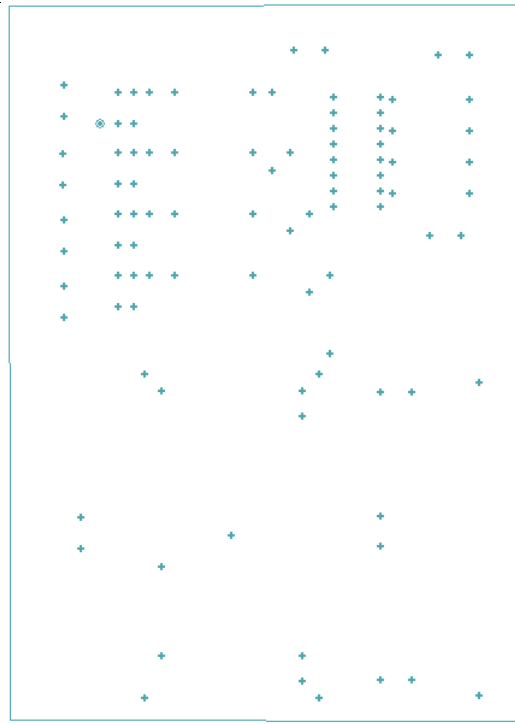


Ondoren banaka aktibatuko ditugu eta guk sortu dugun diseinuarekin bat datozen zihurtatuko gara:

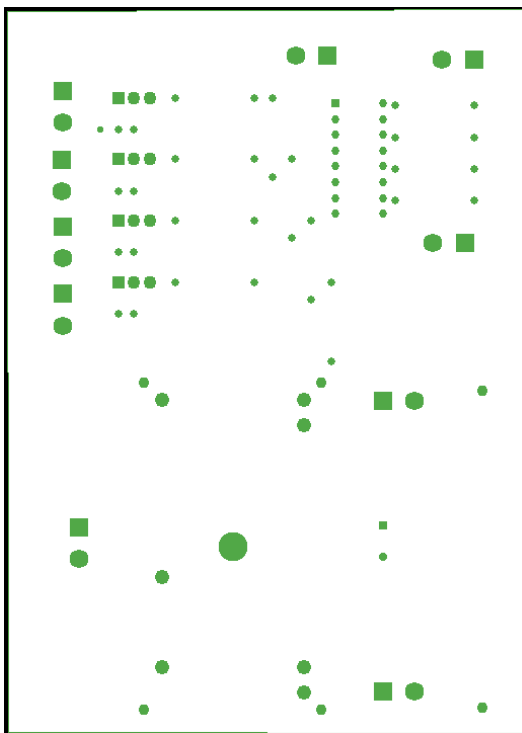




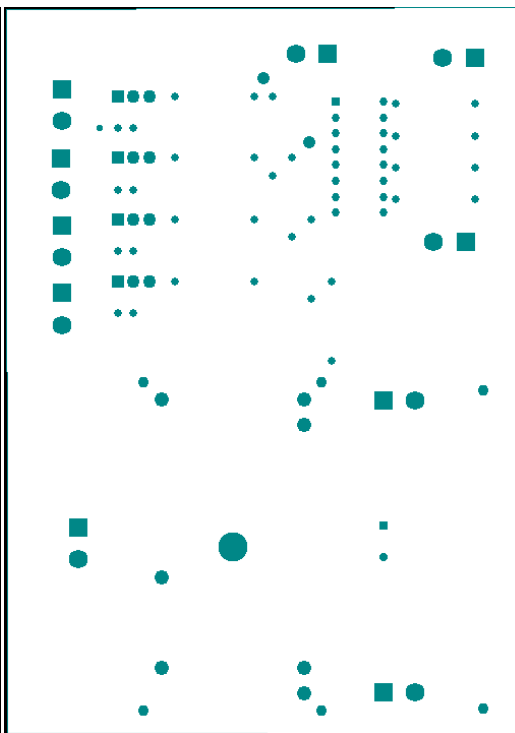
Silkscreen Top



Drill Flash



Soldermask Bottom



Soldermask Top