

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE MONDRAGON
UNIBERTSITATEA
MONDRAGON UNIBERTSITATEKO GOI ESKOLA
POLITEKNIKOA

Trabajo fin de máster presentado para la obtención del título de
Titulua eskuratzeko master bukaerako lana

MÁSTER UNIVERSITARIO EN ENERGÍA Y ELECTRÓNICA DE
POTENCIA
ENERGIA ETA POTENTZIA ELEKTRONIKAKO UNIBERTSITATE
MASTERRA

Título del Trabajo *Lanaren izenburua*

INDUKZIO BIDEZKO BEROKUNTZA SISTEMA BAT
DISEINATZEA, ABIARAZTEA ETA BALIOZTATZEA

Autor *Egilea*

AMAIUR MENDI ALTUBE

Curso *Ikasturtea*

2020/2021

Título del Trabajo *Lanaren izenburua*

**INDUKZIO BIDEZKO BEROKUNTZA SISTEMA BAT
DISEINATZEA, ABIARAZTEA ETA BALIOZTATZEA**

Nombre y apellidos del autor

Egilearen izen-abizenak
MENDI ALTUBE, AMAIUR

Nombre y apellidos del/los director/es del trabajo

Zuzendariaren/zuzendarien izen-abizenak
VILLAR, IRMA
BARAIA-ETXABURU, IGOR

Lugar donde se realiza el trabajo

Lana egin deneko lekua
IKERLAN, S.COOP.

Curso académico

Ikasturtea
2020/2021



El autor/la autora del Trabajo Fin de Máster, autoriza a la Escuela Politécnica Superior de Mondragon Unibertsitatea, con carácter gratuito y con fines exclusivamente de investigación y docencia, los derechos de reproducción y comunicación pública de este documento siempre que: se cite el autor/la autora original, el uso que se haga de la obra no sea comercial y no se cree una obra derivada a partir del original.

Master Bukaerako Lanaren egileak, baimena ematen dio Mondragon Unibertsitateko Goi Eskola Politeknikoari Master Bukaerako Lanari jendeaurrean zabalkundea emateko eta erreproduzitzeko; soilik ikerketan eta hezkuntzan erabiltzeko eta doakoa izateko baldintzarekin. Baimendutako erabilera honetan, egilea nor den azaldu beharko da beti, eragotzita egongo da erabilera komertziala baita lan originaletatik lan berriak eratorzea ere.

Laburpena

Master bukaerako lan hau kokatzen da Potentzia Elektronika azken urteotan sakontzen ari den alorretako batean, hain zuzen, indukzio bidezko berokuntzan. Indukzio bidezko berokuntzak ahalbidetzen du material eroaleak berotzea inolako kontaktu fisikorik gabe. Halaber, hiru ezaugarrik nabarmentzen dute berotzeko teknika hori: azkarra, iraunkorra eta kontrolatzeko erraza.

Proiektu hau, zehazki, altzairuzko barrak indukzio bidez tenplatzean oinarritzen da; eta helburua da prozesu hori ahalbidetuko duen sistema bat diseinatzea.

Helburura iristeko, baina, zenbait eginkizunetan banatu da garapena. Lehendabizi, indukzio bidezko berokuntza zertan datzan ikertu da, oinarritzko kontzeptuak barneratu. Gero, aurretik egindako analisiak aztertu eta balioztatu dira; batetik, FLUX bidez (azterketa elektromagnetikoa), eta, bestetik, PLECS softwarea erabiliz (simulazio elektrikoa). Analisi horiek baliozkotzat hartzean gauzatu da diseinua.

Ikerlan zentro teknologikoko (Arrasate) Potentzia Elektronika sailean burutu da lana. Zentroan bertan martxan jarri nahi den erakusle baten potentzia elektronikaren zatia landuko da txosten honetan.

Aurkibidea

Laburpena	i
Irudien zerrenda	vi
Taulen zerrenda	vi
Nomenklatura	vii
1 EGUNGO EGOERA	1
1.1 Indukzio bidezko berokuntza	1
1.1.1 Abantailak	2
1.1.2 Aplikazioak	3
1.2 Indukzio bidezko tenplatzea	4
1.3 Potentzia bihurgailuak indukzio bidezko berokuntzako aplikazioetarako . . .	6
1.3.1 Erresonantzia zirkuituak	7
1.3.2 Erdieroaleak	8
2 INDUKZIO BIDEZKO TENPLATZE SISTEMAREN ZEHAZTAPENAK	10
2.1 Bankuaren ezaugarriak	10
2.1.1 Indukzio sistemaren geometria	11
2.1.2 Piezaren materiala eta tenperatura	11
2.2 Potentzia elektronikaren zehaztapenak	11
3 ANALISI ELEKTROMAGNETIKOA	13
3.1 Indukzio bidezko berokuntzan eragiten duten oinarrizko fenomeno elektromagnetikoak	13
3.1.1 Metalen propietate elektromagnetikoak	13
3.1.2 Gainazal efektua	15
3.1.3 Gertutasun efektua	15
3.1.4 Erastun efektua	16
3.2 Elementu finituen analisia	16
3.2.1 Eremuaren deskribapena	17
3.2.2 Induktorearen diseinua	20
3.2.3 Sistemaren simulazioa bi dimentsiotan (2D)	24
3.2.4 Sistemaren simulazioa hiru dimentsiotan (3D)	25
4 POTENTZIA BIHURGAILUAREN DISEINUA	31
4.1 Karga karakterizatzea	31
4.1.1 Kargaren inpedantzia frekuentziarekiko	31
4.1.2 Kargaren inpedantzia korrontearekiko	33
4.2 Aukeratutako potentzia bihurgailua	34
4.3 Sistema osoaren simulazioa	35
4.4 Erresonantzia zirkuituaren diseinua	42

5	ONDORIOAK ETA ETORKIZUNERAKO ILDOAK	50
5.1	Etorkizunerako ildoak	50
	Erreferentziak	52
	Eranskina A Zirkuitu pasibo baliokideen konparaketa	54
	Eranskina B Osagai ez linealen sinplifikatzea	57

Irudien zerrenda

1	Material eroalea eta bobina.	1
2	Indukzio bidezko berokuntzaren bi arrazoiak: a) Joule efektua eta b) histeresia.	3
3	Prozesuan zehar lortuko den altzairuaren gogortasun maximoa, karbono kantitatearen arabera [3].	5
4	Indukzio bidezko berokuntza sistema baten energiaren bihurtze prozesua [5].	6
5	Erresonantzia zirkuituak: a) seriean, b) paraleloan eta c) LCL.	7
6	Potentzia erdieroaleak erresonantzia zirkuitu motaren arabera, indukzio bidezko berokuntzako aplikazio industrialetan [5].	9
7	Curie tenperaturaren eragina: a) iragazkortasun magnetikoa eta b) sartze sakonera [1], [3].	14
8	Fenomeno elektromagnetikoak: a) gainazal efektua, b) gertutasun efektua eta c) eraztun efektua.	16
9	FLUXeko prozesuaren diagrama.	17
10	Geometria 2D.	18
11	Saretzea 2D: a) simulazio eremu osoa eta b) piezaren eta induktorearen sartze sakonera zonaldetan zooma eginez.	19
12	Zirkuitu elektrikoa 2D.	19
13	Induktorearen geometria.	20
14	Simulatutako induktorearen sekzio bakoitzarekin lortutako errendimenduak ($I = 500 A_{rms}$, $f = 50 \text{ kHz}$, $t_{sim} = 10 \text{ s}$, $T_{ura} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{ing} = 22 \text{ }^\circ\text{C}$, $h_{ura} = 50000 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$, $h_{airea} = 10 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$).	21
15	Induktorearen sekzioan zeharreko tenperatura mapa ($I = 500 A_{rms}$, $f = 50 \text{ kHz}$, $t_{sim} = 10 \text{ s}$, $T_{ura} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{ing} = 22 \text{ }^\circ\text{C}$, $h_{ura} = 50000 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$, $h_{airea} = 10 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$).	22
16	Induktorearen galerak barrutik doan uraren sekzioarekiko ($I = 500 A_{rms}$, $f = 50 \text{ kHz}$, $t_{sim} = 10 \text{ s}$, $T_{ura} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{ing} = 22 \text{ }^\circ\text{C}$, $h_{ura} = 50000 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$, $h_{airea} = 10 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$).	23
17	Hozte sistemaren zirkuitu elektriko baliokidea.	23
18	R eta L baliokideak: a) frekuentziarekiko ($400 A_{rms}$, $25 \text{ }^\circ\text{C}$), b) korrontearekiko (50 kHz , $25 \text{ }^\circ\text{C}$) eta c) tenperaturarekiko ($400 A_{rms}$, 50 kHz).	25
19	Geometria 3D: a) eremu osoa, b) pieza eta berau inguratzen duen aire konprimagarria eta c) pieza bakarrik.	26
20	Saretzea 3D.	27
21	Piezaren berotzea gorako translazio mugimenduan zehar, pieza bera bobinatik pasatu ahala.	28
22	Piezaren ebakiduran zeharreko beroaren banaketa, zuriz dagoen zatia $805 \text{ }^\circ\text{C}$ gainditzen duen gunea da.	29
23	Temperaturaren bilakaera denboran zehar piezako hiru puntutan.	30
24	Indukzio sistema ordezkatzeko duen erresistentzia eta induktantzia baliokideen serieko konexioa.	31
25	Foster-en zirkuitu baliokidea [14].	31
26	Kargaren inpedantzia frekuentziarekiko ($400 A_{rms}$, $25 \text{ }^\circ\text{C}$).	32

27	Foster-en zirkuitu baliokidea osagai ez linealekin [14].	33
28	Kargaren inpedantzia korrontearekiko (50 kHz, 25 °C).	33
29	Indukzio bidezko berokuntza sistema elikatuko duen potentzia bihurtzailua.	34
30	CREE etxearen modulua eta driverra.	35
31	Sare trifasikoaren tentsio eta korronteen uhin formak.	36
32	Sarera konektatuta dagoen artezgailuaren konmutazio seinaleak lortzeko eskema, lehenengo buseko tentsioa kontrolatuz [18].	37
33	Lehenengo buseko tentsioaren erreferentzia eta neurtutakoaren uhin formak.	37
34	Kontrol bektorialeko korronte begizten uhin formak.	38
35	Buck bihurtzailuaren konmutazio seinaleak lortzeko eskema, kargako potentzia aktiboa kontrolatuz [19].	38
36	Kargako potentzia kontrola.	39
37	Bigarren buseko tentsioaren uhin forma.	39
38	Buck bihurtzailuen PWM modulazio eskema.	40
39	Buck bihurtzailuen irteerako korronteen uhin formak.	40
40	Inbertsorearen irteerako tentsioa eta korrontea (goian), eta kargako tentsioa eta korrontea (behean). Erresonantzia puntua: 31,1 kHz.	41
41	Inbertsorearen irteerako tentsioa eta korrontea (goian), eta kargako tentsioa eta korrontea (behean). Funtzionamendu induktiboa: 33 kHz.	42
42	Inbertsorearen irteerako tentsioa eta korrontea (goian), eta kargako tentsioa eta korrontea (behean). Funtzionamendu kapazitiboa: 29 kHz.	42
43	Erresonantzia zirkuituaren batez besteko potentzia edo korrontearen balioaren tendentzia frekuentziarekiko.	44
44	CELEMen kondentsadoreak: a) CSP300 eta b) C500T.	45
45	CELEMen kondentsadoreen mugak.	45
46	Potentzia bihurtzailuaren azken etapa: inbertsorea eta erresonantzia zirkuitua.	46
47	Erresonantzia zirkuituan disipatutako batez besteko potentzia, 25,5 V-eko buseko tentsioarekin. Gorri kolorez CSP300 kondentsadoreen konfigurazioak izendatu dira, urdinez C500T motakoak.	47
48	Erresonantzia zirkuituan disipatutako batez besteko potentzia, 1500 V-eko buseko tentsioarekin. Gorri kolorez CSP300 kondentsadoreen konfigurazioak izendatu dira, urdinez C500T motakoak.	49
49	Foster-en zirkuitu baliokidea [14].	54
50	Cachan-go unibertsitatean garatutako zirkuitu baliokidea [15],[16].	54
51	Kargaren inpedantzia frekuentziarekiko, Foster-en sarea baliatuz (400 A_{rms} , 25 °C).	55
52	Kargaren inpedantzia frekuentziarekiko, Cachan-go unibertsitateko sarea baliatuz (400 A_{rms} , 25 °C).	56
53	Zirkuitu elektrikoa 2D (tentsioarekin elikatuz).	57
54	FLUXeko eta PLECSeko uhin formen konparaketa 500 V-eko tentsio karratuarekin elikatuz (% 50eko lan zikloa 50 kHz-etan).	58
55	FLUXeko eta PLECSeko uhin formen konparaketa 250 V-eko tentsio karratuarekin elikatuz (% 50eko lan zikloa 50 kHz-etan).	59
56	FLUXeko eta PLECSeko uhin formen konparaketa 100 V-eko tentsio karratuarekin elikatuz (% 50eko lan zikloa 50 kHz-etan).	60

57	FLUXeko eta PLECSeko uhin formen konparaketa 50 V-eko tentsio karratu-arekin elikatuz (% 50eko lan zikloa 50 kHz-etan).	61
----	---	----

Taulen zerrenda

1	Zubi konfigurazioko inbertsoreen ezaugarria [1].	8
2	Piezaren eta induktorearen sartze sakonerak.	18
3	Karbono-altzairuaren propietateak.	20
4	Kobrearen propietateak.	20
5	Aurrez zehaztutako induktorearen geometria parametroak.	20
6	Hozte zirkuituaren parametroak.	24
7	Indukzio bidezko tenplatze sistemaren simulazio parametroak.	27
8	Beroaren sakonera eta korrontearen sartze sakoneraren arteko konparaketa 31,1 kHz-etan.	28
9	Potentzia bihurgailuaren osagaien balioak.	34
10	Indukzio sistemaren ezaugarriak.	35
11	Sistema osoaren simulazio parametroak.	36
12	Lehenengo buseko tentsioa erregulatzeko konstante proportzional eta integralaren balioak.	37
13	Kargako potentzia erregulatzeko konstante proportzional eta integralaren balioak.	38
14	Buck bihurgailuen korronteen ezaugarriak.	40
15	CELEMen kondentsadoreen ezaugarriak.	45

Nomenklatura

α	Erresistibitate elektrikoaren tenperatura konstantea [$1/^\circ\text{C}$]
ΔI	Korrontearen kizkurdura [A edo %]
ΔP	Presio jaitsiera [mH_2O]
ΔT	Tenperatura diferentzia [$^\circ\text{C}$]
δ	Sartze sakonera [m]
\dot{m}	Emaria [kg/s]
\dot{Q}	Disipatutako bero kantitatea [W]
η_{sist}	Indukzio bidezko berokuntza sistemaren errendimendua [%]
μ	Iragazkortasun magnetikoa [H/m]
μ_0	Airearen edo hutsaren iragazkortasun magnetikoa, $4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m]
μ_r	Iragazkortasun magnetiko erlatiboa [-]
μ_{r0}	Hasierako iragazkortasun magnetiko erlatiboa [-]
ω	Frekuentzia angeluarra [rad/s]
ω_0	Erresonantzia frekuentzia [rad/s]
ω_n	Frekuentzia naturala [rad/s]
ρC_p	Bero ahalmen bolumetrikoa [$\text{J}/\text{m}^3\text{C}$]
ρ	Erresistibitate elektrikoa [$\Omega \cdot \text{m}$]
ρ_0	Giro tenperaturako erresistibitate elektrikoa [$\Omega \cdot \text{m}$]
σ	Eroankortasun elektrikoa [Ω/m]
ξ	Moteltze faktorea (<i>damping</i>) [-]
A	Azalera [m^2]
a	Induktoarearen espiren arteko distantzia [mm]
A_2	Curie-ren tenperatura [$^\circ\text{C}$]
A_{c1}	Austenizazioaren hasierako tenperatura [$^\circ\text{C}$]
A_{c3}	Austenizazioaren amaierako tenperatura [$^\circ\text{C}$]
B	Fluxu magnetikoaren dentsitatea [Wb]
B_s	Saturazio magnetikoa [T]

C_p	Bero espezifikoa [J/kg°C]
C_r	Erresonantzia kondentsadorea [F]
d	Induktorearen kanpoaldetik uraren sekzioaren hasierara dagoen distantzia [mm]
d	Lan zikloa [%]
dh	Diametro hidraulikoa [m]
E_{tot}	Simulazio eremu osoan metatutako energia [J]
f	Frekuentzia [Hz]
f	Likido bidezko hozte faktorea [-]
g	Grabitatearen azelerazioa [m/s ²]
H	Eremu magnetikoaren intentsitatea [A/m]
h	Konbekzio koefizientea [W/m ² °C]
h	Piezan tratatu beharreko zatia (induktorearen altuera) [mm]
h_{airea}	Ingurugiroko airearen konbekzio koefizientea [W/m ² °C]
h_{ura}	Hozte zirkuituko uraren konbekzio koefizientea [W/m ² °C]
h_{ura}	Uraren sekzioaren altuera [mm]
I	Bobinan zeharreko korrontea [A]
i_d	d ardatzeko korrontea [A]
i_q	q ardatzeko korrontea [A]
I_{avg}	Batez besteko korrontea [A]
I_{buckx}	Buck bihurtzeko x adarreko korrontea [A]
i_{C_x}	x adarreko erresonantzia kondensadoretatik doan korrontea [A]
i_{RL}	Kargatik doan korrontea [A]
I_{rms}	Korrontearen balio efikaza [A]
J	Korronte dentsitatea y distantzian [A/m ²]
J_0	Korronte dentsitatea piezaren gainazalean [A/m ²]
k	Eroankortasun termikoa [W/m°C]
k_i	PI erregulatzailerako konstante integrala [-]

k_p	PI erregulatzailerako konstante proportzionala [-]
L	Induktantzia [H]
L	Induktorearen luzera totala [m]
L_f	LCL iragazkiko bihurtailuaren aldeko induktantzia [H]
L_g	LCL iragazkiko sarearen aldeko induktantzia [H]
L_x	Zirkuitu baliokideko x osagai induktiboa [H]
L_{bal}	Indukzio sistemaren induktantzia baliokidea [H]
L_r	Erresonantzia induktorea [H]
M_s	Martensita faserako hasierako tenperatura [°C]
P_w	Induktoreko potentzia galerak [W]
P_{avg}	Batez besteko potentzia [W]
P_{gal}	Induktorean sortzen diren bero galerak [W]
P_{joule}	Joule galerak [W]
P_{karga}	Kargako potentzia [W]
Q	Kalitate faktorea [-]
R	Erresistentzia [Ω]
r	Induktorearen barne erradioa [mm]
R_f	LCL iragazkiko bihurtailuaren aldeko erresistentzia [Ω]
R_g	LCL iragazkiko sarearen aldeko erresistentzia [Ω]
R_x	Zirkuitu baliokideko x osagai erresistiboa [Ω]
R_{bal}	Indukzio sistemaren erresistentzia baliokidea [Ω]
R_{ind}	Induktorearen erresistentzia [Ω]
R_{pieza}	Berotu nahi den piezaren erresistentzia [Ω]
$R_{th,airea}$	Ingurugiroko airearen erresistentzia termikoa [°C/W]
$R_{th,ura}$	Hozte zirkuituko uraren erresistentzia termikoa [°C/W]
R_{th}	Erresistentzia termikoa [°C/W]
S	Erdieroaleen konmutazio seinaleak [-]
T	Tenperatura [°C]

T_0	Giro temperatura [°C]
T_{ing}	Ingurugiroko airearen temperatura [°C]
t_{sim}	Simulazio denbora [s]
T_{ura}	Hozte zirkuituko uraren temperatura [°C]
v	Abiadura [m/s]
$V_{bus(x)}$	(x) buseko tentsioa [V]
V_{dc}	DC buseko tentsioa [V]
V_{rms}	Tentsioaren balio efikaza [V]
v_{tank}	Erresonantzia zirkuituko tentsioa [V]
w	Induktorearen sekzioaren zabalera [mm]
w_{ura}	Uraren sekzioaren zabalera [mm]
x	Ardatz horizontala edo abzisa ardatza
X_C	Erreaktantzia kapazitiboa [Ω]
X_L	Erreaktantzia induktiboa [Ω]
y	Ardatz bertikala edo ordenatu ardatza
y	Gainazaletik piezaren barnealderantz dagoen distantzia [m]
Z	Inpedantzia [Ω]
Z_{bal}	Indukzio sistemaren inpedantzia baliokidea [Ω]
AC	Korronte alternoa (<i>alternating current</i>)
DC	Korronte zuzena (<i>direct current</i>)
EMC	Bateragarritasun elektromagnetikoa (<i>electromagnetic compatibility</i>)
FEM	Elementu finituen metodoa (<i>finite element method</i>)
GaN	Galio nitruoa
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
LCL	Serie eta paralelo erresonantzia zirkuituen konbinazio hibridoa
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
PI	Erregulatzaille proportzional integrala

PLL	Sistema trifasiko orekatuak sarearekin sinkronizatzeko teknika (<i>Phase Locked Loop</i>)
PWM	Pultsu zabalera bidezko modulazioa (<i>Pulse Width Modulation</i>)
rms	Balio efikaza (<i>root mean square</i>)
SCR	<i>Silicon Controlled Rectifier</i>
SiC	Silizio karburoa
THD	Distortsio harmoniko totala (<i>total harmonic distortion</i>) [%]
WBG	Banda zabaleko tartea (<i>Wide Band Gap</i>)
ZCS	Zero korronterekin piztea (<i>zero current switching</i>)
ZVS	Zero tentsiorekin piztea (<i>zero voltage switching</i>)

1 EGUNGO EGOERA

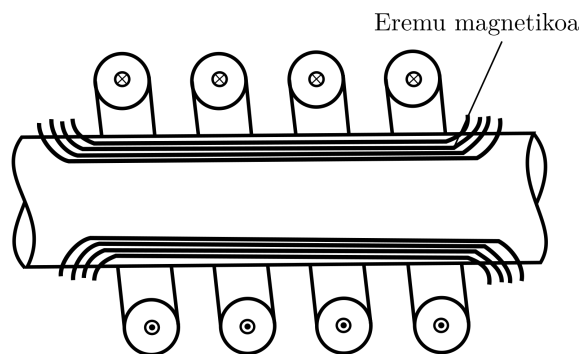
Michael Faraday fisikari ingelesak aurkitu zuen 1831. urtean metalak indukzio bidez berotzearen oinarria. Bi hariz inguratutako burdinazko nukleo arrunt batekin zebilen hara-hona, eta konturatu zen harietako bat bateriarekin lotzen zuen etengailua ixtean beste harian bat-bateko korronte bat neur zitekeela. Etengailuak itxita jarraituz gero, korronte hori desagertzen zen; irekitzean, baina, berriz agertzen zen bat-bateko korronte, aurkako noranzkoan. Hori horrela, Faradayk ondorioztatu zuen korronte elektrikoa sor zitekeela eremu magnetiko aldakor baten eraginez. Orduan hasi zen indukzio elektromagnetikoaren historia, XIX. mendean ditu sustraiak.

Ondorengo hamarkadetan fenomeno hori transformadoreen diseinurako erabili zuten, bi zirkuitu elektrikoren arteko tentsio mailak egokitzeke, elektrizitatearen transmisio eraginkorrago bat lortu nahian. Transformazio horretan beroa galtzen zen transformadoreen nukleotan, sistemaren efizientzia murriztuz; eta galera horiek gutxitzeko asmoarekin, altzairuzko xafla meheak bata bestearen gainean pilatuta eraikitzen ziren nukleoak. XIX. mende bukaerara arte ez ziren ohartu bero galera horiek metalak berotzeko erabil zitezkeela. Horra hor, indukzio bidezko berokuntzaren hastapenak [1].

Harrezkero, zientzialari zein enpresa ugari dihardute gai hori lantzen, belaunaldiz belaunaldi hobetzen, etengabe.

1.1 Indukzio bidezko berokuntza

Indukzio bidezko berokuntza prozesu bat da, zeinetan material eroale bat (normalean, metal bat) berotzen den eremu magnetiko aldakor baten bitartez. Iturriaren eta kargaren arteko energia transmisioa eremu magnetikoaren bidez egiteak dakar prozesua kontaktu fisikorik gabe burutzea. Kasu honetan, karga material eroale bat da eta eremu magnetikoaren iturria induktore edo bobina bat.



Irudia 1. Material eroalea eta bobina.

Korronte alternoak bobina bat zeharkatzean maiztasun bereko eremu magnetiko bat agertzen da piezaren gainazalaren inguruan. Eremu magnetiko horrek eragiten du piezaren

berotzea, bi fenomeno uztartuz: Joule efektua eta histeresia.

Metal guztiak dira elektrizitate eroaleak, eta eroaten duten elektrizitate fluxuarekiko azaltzen duten erresistentziak eragiten ditu potentzia galerak. Potentzia galera horiek bero forman agertzen dira; izan ere, energiaren kontserbazio legeak dioen bezala, energia ez da desagertzen, energia eraldatu egiten da. Horixe da **Joule efektua**, indukzio bidez beroa disipatzearen kausa nagusia. Aplikaturako eremu magnetikoak materialaren gainazalean Foucault deituriko korronteak indusitzen ditu (*eddy* izenez ere ezagutzen dira), eta korronte horiek eragiten dute piezaren berotzea Joule efektuaren bidez. Fenomeno hori gerta daiteke bai material ferromagnetikoetan ($\mu \gg \mu_0$), bai material ez ferromagnetikoetan ($\mu \approx \mu_0$).

$$P_{joule} = R \cdot I^2 \quad (1.1)$$

Badaude metalak erresistentzia baxua dutenak eta, ondorioz, eroale onak direnak (zilarra eta kobrea, esaterako); baita erresistentzia altuagatik elektrizitatea eroaten txarrak direnak ere (altzairua). Horregatik, bero galera handiak sortzen dira korronte elektrikoak altzairua bezalako materialak zeharkatzean. Indukzio bidezko berokuntza sistema baten errendimendua adierazten du, nagusiki, bobinaren erresistentzia eta piezaren erresistentziaren arteko erlazioak [2].

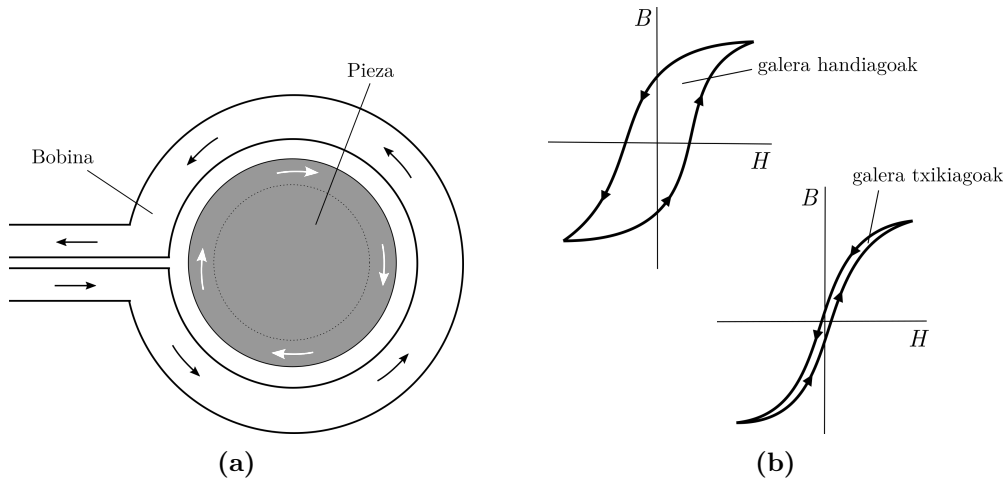
$$\eta_{sist} = \frac{R_{pieza}}{R_{pieza} + R_{ind}} \quad (1.2)$$

Histeresi galerak agertzen dira bakarrik material magnetikoetan; altzairua, nikela eta beste gutxi [3]. Histeresi galerak Joule efektuarenak baino txikiagoak dira, eta aintzat hartzen dira soilik material ferromagnetikoetan (Curie tenperatura azpitik). Material magnetikoak indukzio bidez berotzeko prozesuan, \vec{H} eremu magnetikoa aplikatzean materialaren dipolo magnetikoak oszilatzen hasten dira, \vec{B} erantzun magnetikoa atzeratuz. Oszilazio horri deitzen zaio histeresia. Kasu honetan, beroa da dipoloak berriz orientatzeko prozesuan askatzen den energiaren ondorioa.

1.1.1 Abantailak

Indukzio bidezko berokuntza nabarmentzen da prozesuaren azkartasun, iraunkortasun eta kontrolatzeko erraztasunagatik. Halaber, berezitasun nagusia da piezaren zati konkretu bat bakarrik bero daitekeela, hain zuzen, berotzea nahi den zatia; labeekin ez bezala, ez dago pieza guztia berotu beharrik.

Hona hemen beste abantaila batzuk [3], [4] berotze teknologia tradizionalekin alderatuz:



Irudia 2. Indukzio bidezko berokuntzaren bi arrazoiak: a) Joule efektua eta b) histeresia.

- Propietate mekaniko hobek lortzen dira.
- Errendimendu handiagoko prozesua. Energiaren kontsumoa murrizten da, energia kontsumo totala txikiagoa da ez dagoelako pieza osoa berotu beharrik.
- Ondorioz, kostu txikiagoak.
- Prozesua automatizatzeko aukera ematen du, ekoizpen handiko prozesuetarako ego-
kia.
- Teknologia segurua da, fidagarritasun handikoa, eta mantentzeko erraza.
- Ingurumenarekiko jasangarriagoa.
- Askotariko aplikazioak.

1.1.2 Aplikazioak

Potentzia elektronikak aurrera egin ahala, indukzio bidezko berokuntza gero eta gehiago ari da hedatzen. Gaur egun, alor askotan erabiltzen da teknologia hori, besteak beste, industria aplikaziotan, etxebizitzetan edota medikuntzan [5].

Jarraian, indukzio bidezko berokuntzaren industriako aplikazio erabilienak [1]:

- **Tenplatzea:** indukzio bidezko berokuntzaren aplikazio ohikoenetako bat da ten-
platzea. Piezaren tenperatura igo eta, segidan, bat-batean hoztean datza, materia-
lari beharrezko gogortasuna eta malgutasuna emateko.
- **Iraoketa:** tenplearen ondoren egiten den trataera osagarria da; materialaren zail-
tasuna handitu eta tenplean sortutako tentsioak murrizteko.

- **Suberaketa:** materialak galdu dituen propietateak itzultzean datza (barne tentsioak ezabatu, gogortasuna kendu, mikroegitura espezifiko bat lortu, etab.). Lehenbizi materiala austenizazio tenperaturara heldu arte berotzen da, eta gero poliki-poliki hoztu.
- **Normalizazioa:** tenplea edo suberaketa baino lehenago egiten da. Barneko tentsioak orekatzea du helburu. Horretarako, tenperatura kritikotik gora berotzen da eta ingurugiroko airearekin hozten.
- **Soldatzea:** bere funtzioa piezak itsastean datza, bi pieza edo gehiagoren juntura zona urtze tenperatura ingurura berotuz.
- **Forja:** potentzia altuan eta frekuentzia baxuan burutzen da. Funtsean, aurrez berotutako pieza bat konformatzen da, berotzean deformazioarekiko duen erresistentzia ahultzen zaio eta.
- **Fusioa:** metalak arrago baten barruan urtzen dira. Ondoren, urtutako metala arragotik molde batera isurtzen da, lortu nahi den forma emateko.

1.2 Indukzio bidezko tenplatzea

Aurreko atalean aipatu bezala, indukzio bidezko berokuntzaren aplikazio tipikoenetako bat da altzairuaren edo burdinurtuaren tenplatzea [1]. Aplikazio horretan oinarritzen da proiektu hau, zehazki, altzairuaren gainazaleko tenplatzean.

Tenplatzearen helburua da materialak propietate zehatz batzuk eskuratzea, besteak beste, gogortasuna eta higadurarekiko erresistentzia. Tenplatu nahi den pieza austenizazio tenperatura arte berotzen da eta segituan azkar batean hozten.

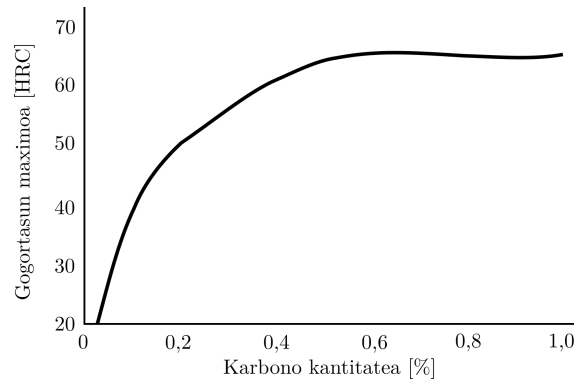
Beraz, prozesua bi etapatan – hiru, nahi izanez gero – banatzen da. Lehenengoa indukzio bidezko berokuntza da, zeinetan induktore batetik korrante alternoa pasatzean pieza berotzen den. Bertan, hiru tenperatura kritiko bereizten dira: Curie-ren tenperaturak (altzairuetan, 700-800 °C) muga ferromagnetikoa zehazten du, eta A_{c1} eta A_{c3} temperaturek, hurrenez hurren, austenizazioaren hasiera eta bukaera. Behin piezak A_{c3} tenperatura gaindituta (arau orokor gisa, 50 bat °C gehiago), garrantzitsua da berehala hoztea; hain zuzen, horretan datza tenplatze teknika. Hozketa azkar hori egiten da pieza oliotan sartuz edo polimero akuosodun dutxekin. Orduan, austenita zena martensita bihurtuko da (M_s , 400 °C inguru, azpitik), are gehiago gogortuz, baina hauskorrago bilakatuz. Azkenik, beharrak behar, iraoketa prozesua egongo litzateke; hauskortasun hori gutxitu eta barne tentsioak ahuldu asmoz. Horretarako, pieza berotzen da A_{c1} tenperatura azpitik, eta beharrezko denbora tartean tenperatura horretan mantendu ondoren, ingurugiroko airearekin hozten da.

Tenplatzea indukzio bidez gauzatzean, piezaren zona konkretu batean eratzen da martensita kapa, tratatu nahi ez den zatia bere horretan mantenduz. Izan ere, A_{c1} ten-

peratura gainditzen ez duten zatietan ez dira aldatuko propietate mekanikoak.

Indukzio bidezko tenplatzea bereitzen da beroarekin tratatutako zatietan lortzen duen zehaztasun altuagatik. Distortsioa alait txikiena izatea ahalbidetzen du indukzioak; prozesuaren azkartasunagatik, batetik, eta bero iturriak gainazaleko kapan kontzentratzeko duen gaitasunagatik, bestetik. Kapa horri deitzen zaio korrontearen sartze sakonera (δ) eta zuzenean eragiten du gogortasunaren sakoneran.

Altzairuaren aleazioak sarri erabiltzen dira indukzio bidezko tenplatze teknikan. Altzairu mota aukeratzeko da lan baldintzen arabera, hain zuzen, lortu nahi den gainazalaren gogortasun mailak eta profilak gehi sistemaren kostuak definitzen dute. Karbono-altzairu purua eta aleazio baxukoak dira merkeenak, askotariko tenplatze aplikaziotan erabiliak; zehazki, % 0,2-0,7 bitarteko karbono kantitatea izan ohi dute. Altzairuaren karbono kantitateak zehazten du lortuko den gainazalaren gogortasun maximoa.



Irudia 3. Prozesuan zehar lortuko den altzairuaren gogortasun maximoa, karbono kantitatearen arabera [3].

Tratamendu termikoaren zehaztapenen edo piezaren geometriaren arabera, indukzio bidezko tenplatze sistema izan daiteke aparatu simple bat edo makina konplexu bat.

Indukzio bidezko tenplatze sistema bat diseinatzeko lehenbiziko pausua da azalaren gogortasun profila, sakonera eta trantsizio zona zehaztea. Piezaren erradioan edota lodieran zeharreko gogortasunaren banaketan zerikusia duten faktoreak honakoak dira: tenperaturaren distribuzioa, metalaren mikroestruturak eta konposizio kimikoa, hozte baldintzak, ale tamaina eta altzairuaren tenplatze ahalmena.

Berokuntza sistema tradizionalarekin alderatuz, indukzio bidezko teknikan nabarmen eragiten dute metalen (izan altzairua edo burdina) konposizio kimikoan gertatzen diren aldaketek. Horregatik da ezinbestekoa aldaketa horiek ondo kontrolatzea. Garrantzitsua da ale homogeneo eta xeheak, bero tratamenduarekiko metalaren erantzun azkarra eta ahal den distortsio txikiena izatea. Hasierako mikroestruturak horrek bermatuko du gogortasun handiagoa lortzea sakonera zabalagoan. Gainazal leunagoek ere hobetzen dituzte bero tratamenduaren baldintzak (nekea, erresistentzia eta iraunkortasuna).

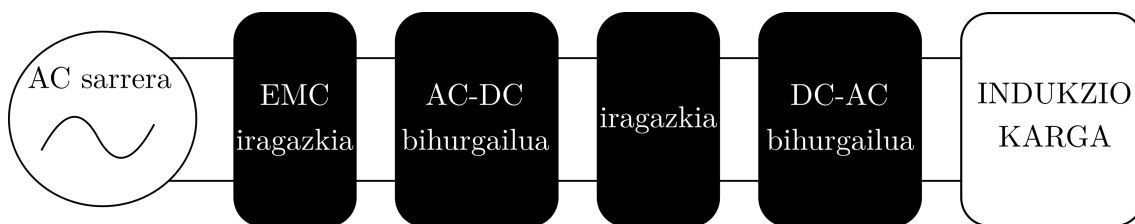
Temperaturaren banaketari dagokionez, eragina dute piezaren zein bobinaren geometriak, potentzia dentsitateak eta frekuentziak. Diseinu konplexuek, zuloek, ertz zorrotzek, eta abarrek prozesuaren arrakasta baldintzatzen dute. Gainera, prozesua ondo gauzatzeko berotze ziklo laburrak behar direnez, potentzia dentsitate – korrante intentsitate – altuekin egin behar da lan. Frekuentzia da indukzio bidezko berokuntza sistematan kontuan hartzen den lehenengo parametroa, zeinak aipatu azaleraren gogortasun profila, sakonera eta trantsizio zona zehaztuko dituen.

Garrantzitsua da berotze eta hozte denborak, hurrenez hurren, aski luzeak eta motzak izatea. Bestela, “supertenplatzea” deituriko fenomenoak gertatzen da. Izenak dioen bezala, pieza bat behar baino gehiago tenplatzean datza, eta bi dira arrazoiak: azkarregi berotzea eta geldoegi hoztea. Fenomeno hori agertzen da, batik bat, % 0,35-0,6 karbono duten altzairuetan.

Burdinurtuaren indukzio bidezko tenplatzeak badu zerikusirik altzairuarekin. Berabat, kontuan hartu beharreko desberdintasunak ere badituzte. Dena den, proiektu honetan ez da material hori landuko.

1.3 Potentzia bihurgailuak indukzio bidezko berokuntzako aplikazioetarako

Indukzio bidezko berokuntzan erabiltzen diren potentzia iturrien sorta oso zabala da, aplikazioz aplikazio aldatzen baitira beharrianak. Hain zuzen, frekuentzia eta irteerako potentziaren arabera aukeratzen da bihurgailu bat edo beste. Dena den, berdina da guztien zeregina. Potentzia iturri hauek, funtsean, frekuentzia aldatzaileak dira; sareko 50 Hz-eko potentzia trifasikotik sortzen dute frekuentzia handiagoko potentzia monofasikoa [3].



Irudia 4. Indukzio bidezko berokuntza sistema baten energiaren bihurtze prozesua [5].

Lehenbizi, EMC iragazkiak ziurtatzen du bihurgailuak irizpide elektromagnetikoak betetzea. AC-DC etapak inbertsorea hornitzeko busa ahalbidetzen du; artezgailu hori izan daiteke kontrolatu gabea (diodoekin osatua) edota kontrolatua. Aplikazioaren arabera, indukzio sistema batzuetan potentzia faktore zuzentzaile bat tartekatzen da tentsioa igo edota jaisteko, eta sarreran korrante sinusoidala bermatzeko. DC-AC etapa, hots, inbertsorea, da garrantzitsua. Izan ere, indukzio sistema hornitzeko behar den frekuentzia

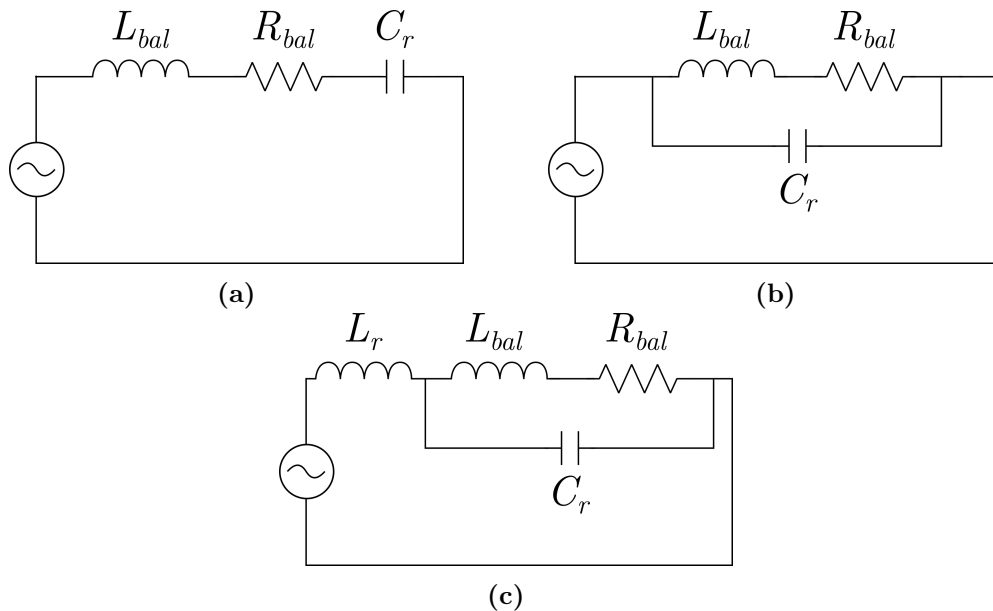
ertaineko korronea ahalbidetzen du. Operazio frekuentzia 20 kHz-etik (zarata entzungarria saiheste aldera) 1 MHz arte irits daiteke, betiere aplikazioaren arabera. Indukzio bidezko berokuntzan gehien erabiltzen diren artezgailuak dira etengailu bakarrek, zubi erdikoak eta zubi osokoak. 5 kW baino gehiagoko irteerako potentzia eskatzen duten aplikazioetan – sistema industrialetan – zubi motakoak dira erabilienak.

Gaur egun, indukzio bidezko berokuntza sistema denek edo ia denek baliatzen dituzte erresonantzia zirkuituak [6] inbertsorearen etapan, errendimendu eta potentzia dentsitate altuak lortzeko. Jarraian azalduko dira erresonantzia zirkuituen funtzionamendua eta topologia erabilienak.

1.3.1 Erresonantzia zirkuituak

Indukzio karga (bobina eta pieza) erresistentzia eta induktantzia baliokide (R_{bal} eta L_{bal}) banarekin adieraz daiteke, modeloaren arabera, seriean edo paraleloan konektatuz; erresonantzia zirkuitua osatzeko kondentsadore edota induktantzia gehigarriak batzen zaizkio. Frekuentzia egokian – erresonantzia frekuentzian – lan egitean lortzen da inpedantzia kapazitibo eta induktiboak berdintzea; horrela, zirkuituan sartuko den potentzia guztia aktiboa izango da eta errendimendu maximoarekin egingo du lan sistemak.

Egitura erabilienak dira bigarren mailako erresonantzia zirkuituak seriean (Irudia 5a) edo paraleloan (Irudia 5b) konektatuta, eta bien konbinazioa den hirugarren mailako erresonantzia zirkuitua (Irudia 5c).



Irudia 5. Erresonantzia zirkuituak: a) seriean, b) paraleloan eta c) LCL.

Seriean konektatutako erresonantzia zirkuitua normalean erabiltzen da tentsio itu-

rridun inbertsoretan; induktorean zeharreko korrontearen batezbesteko nulua lortzen da serieko kondentsadorearekin eta zero tentsioarekin pizten da (ZVS) erresonantzia frekuentziatik gora diharduenean, hots, pizte galerak saihesten dira. Paralelo konexioko erresonantzia zirkuituak, berriz, korronte iturridun inbertsoretan baliatzen dira; etengailuetan zeharreko korronteak murriztuz eta zero korronterekin piztea (ZCS) ahalbidetuz. Azkenik, serie-paralelo konfigurazio hibridoak (LCL) aurreko bi egituren abantailak konbinatzen ditu; horregatik da topologia erabiliena potentzia altuko industria aplikazioetan.

Serie konfigurazioan kargako tentsioa anplifikatzen da, paraleloan korronte, eta LCL egituren biak. Hazkuntza hori **kalitate faktoreak** (Q) adieraziko du [7].

$$Q = \frac{L_{bal} \cdot \omega_0}{R_{bal}}, \quad (1.3)$$

non R_{bal} eta L_{bal} parametroek, aurrez aipatu bezala, kargaren inpedantzia baliokidea adierazten duten, eta ω_0 zirkuituaren erresonantzia frekuentzia den. Serie topologiaren kasuan (1.4) da erresonantzia frekuentziaren adierazpena. Paralelo konexioan, aldiz, konplikatua da; baina, berdintza hori antzekotasun bezala (\approx) adieraz daiteke.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1.4)$$

Jarraian, zubi konfigurazioko inbertsoreen ezaugarrien laburpen bat azaltzen da, erresonantzia zirkuitu serie eta paraleloekin erlazionatuz.

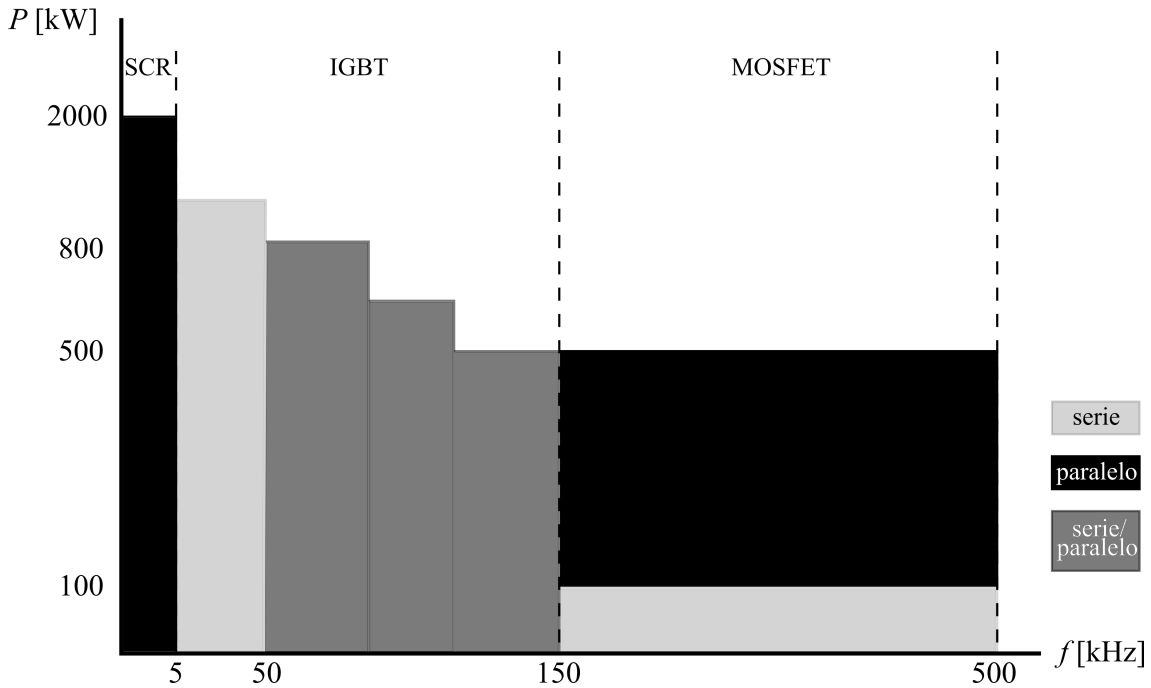
TAULA 1. Zubi konfigurazioko inbertsoreen ezaugarria [1].

Tentsioarekin elikatuta	Korrontearekin elikatuta
DC iragazki kapazitiboa	DC iragazki induktiboa
Tentsio karratua	Tentsio sinusoidala
Korronte sinusoidala	Korronte karratua
Serieko erresonantzia zirkuitua	Paraleloko erresonantzia zirkuitua
Kargako korronte = irteerako korronte	Kargako tentsio = irteerako tentsio
Tentsioa x Q	Korronte x Q
Q txikiko kargak	Q handiko kargak

1.3.2 Erdieroaleak

Aplikazioa eta berotu nahi den materialaren arabera, asko aldatzen da potentzia bihurtgailuaren lanerako frekuentzia; potentzia altuko sistemetan hertz gutxi batzuetatik

hasi (metalen urtzea) eta ehunka kilohertz arte (gainazalen tratamendua). Hori horrela, aplikazio industrialetan erabiltzen diren potentzia erdieroaleak dira tiristoreak, IGBTak eta MOSFETak. Lehenengoek 3 kHz-erainoko frekuentzian eta megawatt anitzeko potentziakin egiten dute lan; bigarrenak 150 kHz eta 3 MW-era irits daitezke; eta frekuentzia altuagoetan, ehunka kilohertz, azkeneko aparatuek erabiltzen dira, irteerako potentzia 500 kW baino baxuagoa denean.



Irudia 6. Potentzia erdieroaleak erresonantzia zirkuitu motaren arabera, indukzio bidezko berokuntzako aplikazio industrialetan [5].

Goiko grafiko hori 2014. urtekoa da; siliziozko erdieroaleak erabiltzen zirenekoa. Geroago, ordea, SiC eta GaN materialak azaldu dira [8]. WBG erdieroale hauek propietate hobek dituzte (erresistentzia txikiagoa, kapazitate parasito murriztuak...); horregatik lortzen da: 1) lehengo frekuentzietan askoz galera txikiagoak izatea eta 2) frekuentzia maila asko igotzea galerak ia handitu gabe.

2 INDUKZIO BIDEZKO TENPLATZE SISTEMAREN ZEHATZAPENAK

Txostenaren hasiera-hasieran aipatu bezala, proiektu honetan landuko da Ikerlanen martxan jarri nahi den indukzio bidezko tenplatze sistemaren potentzia elektronikako zatia. Horregatik, kapitulu honetan sistema osoaren zehaztapenak azalduko dira gainetik, eta potentzia elektronikak bete behar dituen baldintzak zerrendatuko dira sakonago.

Bankuaren helburua da indukzio bidezko tenplatze modeloak ikertu eta balidatzea. Jarraian, bankuaren kontrol egoki bat gauzatzeko beharrezko puntuak:

- Sentsorizatuta behar du egon.
- Sarrerako parametroak (korronea eta frekuentzia) aldatzeko prestatuta egon behar da.
- Zenbait induktore geometria erabili ahal izatea behar du bermatu.

Azken finean, banku honekin lortu nahi da entsegu mekanikoak burutzea geometria anizteto piezekin. Era berean, tenplatutako piezak erabiliko dira mikrostrukturak, barne tentsioak, gogortasun aldaketak, zailtasuna, haustura tentsioak eta abar analizatzeko.

2.1 Bankuaren ezaugarriak

Indukzio bidezko tenplatze sistemak ondorengo azpisistemak izango ditu:

- Potentzia elektronika
 - Bihurgailuak
 - Kondentsadoreak
 - Potentzia kontrola
 - Induktorearen hozte sistema
- Kontrola eta monitorizazioa
 - Entseguaren kontrola
 - Datuak eskuratu eta monitorizatzea
 - Sentsoreak (termopareak eta pirometroa)
- Egitura
 - Moldaeraza eta modularra
 - Induktorearen, hozte sistemaren eta potentzia elektronikaren ahokalekua
- Tenplearen hozte sistema

- Ponpa, uraren/polimero akuosoaren depositua, isurbidea, hoditeria
- Dutzaren diseinua eta fabrikatzea
- Induktorea
 - Bobina
 - Bobina eta egitura elkartzeko pieza

2.1.1 Indukzio sistemaren geometria

Lan eremua izango da tenplatuko den piezaren tamainaren arabera. Bankuan probatuko diren piezak izan daitezke ardatzak, errodamenduak edota beste mota batekoak. Dena den, proiektu honetan, hurrenez hurren, 150 eta 20 milimetroko luzera eta diametroa dituen ardatza aztertuko da.

Induktoreak sei bira egingo ditu piezaren inguruan; 15 milimetroko barruko erradioarekin eta espiren artean 3 milimetroko distantzia bermatuz (piometroa pasatu ahal izateko). Gainera, piezaren tratatzeko zatia ez da 50 milimetro baino luzeagoa izango.

2.1.2 Piezaren materiala eta temperatura

Aurretik aipatu bezala, altzairua izango da indukzio bidez tratatu nahi den materiala. Hain zuzen, % 0,2-0,7 bitarteko karbonodun altzairua erabiliko da.

Temperaturari dagokionez, aurreikusten da 100 °C-tik (aurrerago iraoketa aplikatzeko asmoarekin) 1200 °C-ra arte (gainberotzeak aztertze aldera) irits daitekeela.

2.2 Potentzia elektronikaren zehaztapenak

Atal honetan azalduko dira indukzio bidezko tenplatze sistemaren potentzia elektronikak bete behar dituen zehaztapenak. Izan ere, horretan datza proiektu hau, hots, sistemaren potentzia elektronika diseinatzean.

- 30 kW-erainoko potentzia, irteerako korrante nominala 500 A rms izanik.
- Frekuentzia tartea: 0,5-50 kHz.
- Bai potentzia, bai frekuentzia, biek beharko dute izan erregulagarriak; aldagai horiek izango dira entseguetan aztertu beharreko parametroak.
- Potentziaren kontrol pulsatzaile baten aukera baloratzea, iraoketa bezalako prozesuak ahalbidetzeko.
- Potentzia eta frekuentziak handitzeko aukera eman behar du, baita induktore desberdinak erabiltzekoa ere.

- Induktorea etengabe hoztuko da, hozte sistema propioa izan behar du.
- Indukzio bidezko berotzearen kontrola akoplatu eta sinkronizatu behar da makina osoaren kontrolarekin.

OHARRA: Bankua diseinatu da Fabrikazio Aurreratua (mekanika) departamentuarekin elkarlanean; bertan aurrera eramandako entsegu batzuen arabera egin da diseinua. Horregatik, zehaztutako parametro gehienak entsegu horietan erabilitakoak dira, eta horrela landuko da sistema proiektu honetan. Behin bankua martxan jarrita, posible da hasierako entseguak parametro horiekin egitea; baina, aipatu bezala, entsegu anitzak gauzatzeko eraikiko da erakuslea.

3 ANALISI ELEKTROMAGNETIKOA

Indukzio bidezko tenplatze sistema (2. kapitulua) elektromagnetikoki aztertzen hasi aurretik, ezinbestekoa da kontzeptu jakin batzuk barneratzea.

Indukzio bidezko berokuntza hiru fenomenoren konbinazio konplexu bat da: elektromagnetismoa, bero transferentzia eta metalurgia. Bero transferentzia eta elektromagnetismoa elkarri loturik daude; izan ere, beroarekin tratatutako materialen propietate fisikoak eremu magnetikoaren intentsitatearen eta tenperaturaren menpekoak dira. Berebat, fenomeno metalurgikoak tenperatura, bero intentsitate, konposizio kimiko eta abarren funtzio ez linealak dira. Kapitulu honen hasieran aspektu elektromagnetikoan eragiten duten kontzeptu garrantzitsuenak azalduko dira. Jarraian abiatuko da indukzio bidezko tenplatze sistemaren analisi elektromagnetikoa.

3.1 Indukzio bidezko berokuntzan eragiten duten oinarrizko fenomeno elektromagnetikoak

Fenomeno elektromagnetikoek [1] eragiten dute korrontearen banaketa uniformea ez izatea piezan eta bobinan zehar, eta ondorio gisa, ezta tenperaturaren distribuzioa ere. Asko dira fenomeno horiek; atal honetan garrantzitsuenak aipatu eta laburki azalduko dira.

3.1.1 Metalen propietate elektromagnetikoak

Hasteko, garrantzitsua da metalen oinarrizko propietate elektromagnetikoak ezagutzea. Indukzio bidezko berokuntza sistematan eragin handiena dutenak dira erresistibitate elektrikoa eta iragazkortasun magnetikoa.

Material batek korronte elektrikoa garraiatzeko duen gaitasuna da eroankortasun elektrikoa (σ); **erresistibitate elektrikoa** (ρ) eroankortasun elektrikoaren alderantzizkoa da. Metalak eta aleazioak eroale onak direnez, erresistibitate baxua dute beste materialekin (zeramika, plastikoa, etab.) alderatuz. Hala ere, erresistibitate baxuko metalak (zilarra, kobrea, urrea, aluminioa) eta erresistibitate altukoak (altzairua, titanioa) bereitzen dira. Tenperaturaren, konposizio kimikoaren, metalaren mikroegituraren eta ale tamainaren arabera aldatzen da erresistibitatea. Metal puruen kasuan, tenperaturaren funtzio linealtzat hartzen da.

$$\rho(T) = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)], \quad (3.1)$$

non ρ_0 giro tenperaturako (T_0) erresistibitatea den, $\rho(T)$ erresistibitatea T tenperaturan, eta α tenperatura koefizientea.

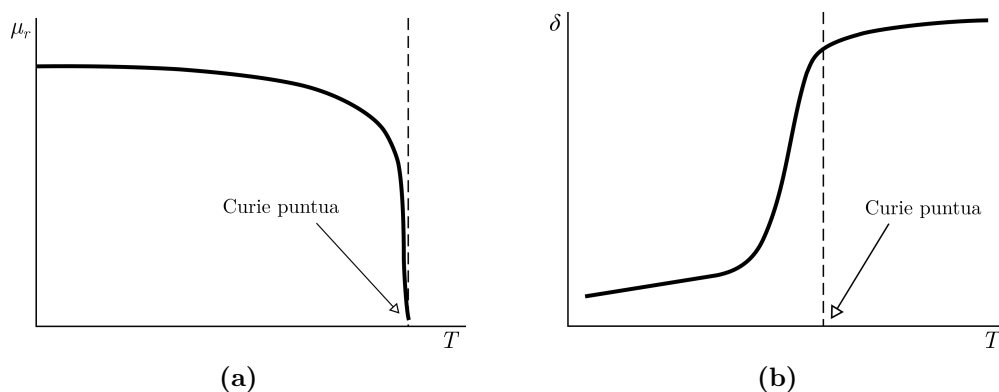
Temperatura koefizientea positiboa edo negatiboa izan daiteke. Metal gehienek kasuan, erresistibitatea tenperaturekin hazten da; baina, badira material elektriko batzuk beroarekin erresistibitatea galtzen dutenak. Beste material batzuen kasuan (karbono-altzairuak, altzairu aleazioak, grafitoa, etab.), erresistibitatea eta tenperatura ez dira linealki aldatzen.

Iragazkortasun magnetiko erlatiboa (μ_r) esaten zaio material batek airea edo hutsarekin konparatuz fluxu magnetikoa garraiatzeko duen gaitasunari. Iragazkortasun magnetiko erlatiboaren eta airea edo hutsaren iragazkortasunaren (μ_0) arteko biderketaren emaitza da **iragazkortasun magnetikoa** (μ). Era berean, iragazkortasun magnetikoa da fluxu magnetikoaren dentsitatearen eta eremuaren intentsitatearen arteko ratioa.

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.2)$$

Material guztiak sailka daitezke magnetizatzeko gaitasunaren arabera. Material paramagnetikoak ($\mu_r > 1$) eta diamagnetikoak ($\mu_r < 1$) material ez magnetikotzat hartzen dira indukzio bidezko berokuntza sistematan, μ_r -ren diferentzia hutsalagatik. Material ferromagnetikoek iragazkortasun magnetiko erlatibo oso altua dute ($\mu_r \gg 1$).

Material ferromagnetiko bat ez magnetiko bihurtzen den tenperaturari esaten zaio Curie-ren tenperatura (A_2). Bero intentsitatearen eta konposizio kimikoaren (karbono kantitatea) arabera alda daiteke Curie puntua. Halaber, puntu horretan iragazkortasun magnetiko erlatibo unitarioa izango du materialak, eta sartze sakonera (3.3) nabarmen haziko da.



Irudia 7. Curie tenperaturaren eragina: a) iragazkortasun magnetikoa eta b) sartze sakonera [1], [3].

3.1.2 Gainazal efektua

Korronte zuzenarekin ez bezala, korronte alternoak hari bat zeharkatzen duenean hariaren sekzioan zeharreko korronte banaketa ez da uniforme izango. Korronte dentsitate balio handiena hariaren gainazalean agertu eta erdialderantz ahultzen joango da. Fenomeno horri gainazal efektua deritza, ingelesez “*skin effect*” izenez ezaguna. Gainera, bobinak inguratzen duen piezan ere efektu berdina islatuko da, *eddy* korronteak piezaren gainazalean agertzeko arrazoi nagusienetakoa izanik. Hori horrela, piezaren erdialdean ez da korronte fluxurik antzemango.

Gainazal efektuaren ondorioz, potentziaren % 86 inguru gainazaleko kapan kontzentratuko da. Kapa horri sartze sakonera (δ) esaten zaio, “*skin depth*” ingelesez. Sartze sakonera frekuentziaren eta materialaren propietateen (erresistibitate elektrikoa eta iragazkortasun magnetikoa) arabera da.

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu_0 \mu_r f}} \quad (3.3)$$

Korronte dentsitatearen distribuzioa piezaren sekzioan (erradioan) zehar nolakoa izango den adierazten du (3.4) ekuazioak. Gainazal efektua oso nabarmena izango da frekuentzia handitan edota piezaren erradioa erlatiboki altua denean.

$$J = J_0 \cdot e^{-y/\delta}, \quad (3.4)$$

non J eta J_0 , hurrenez hurren, y distantziako eta gainazaleko korronte dentsitateak diren.

3.1.3 Gertutasun efektua

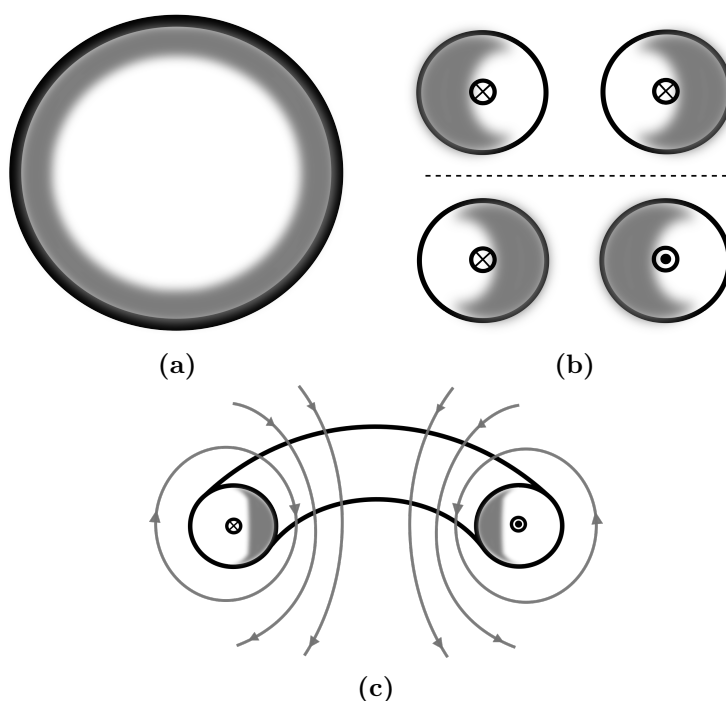
Gainazal efektua azaltzean eroale bakar bat aipatu da; baina, indukzio sistema gehiengan eroale (edo inductoraren espira) bat baino gehiago egoten dira bata bestearengandik hurbil. Eroale horietako bakoitzak du bere eremu magnetikoa, zeinak inguruko eremuekin elkar eragiten duen. Horregatik, bi eroale ondoan jartzean, gainazal efektuaz gain gertutasun efektuak ere izango du zerikusirik korronte dentsitatearen banaketan.

Eroaleak zeharkatzen dituzten korronteen noranzkoak kontrakoak badira, korronte gehiago kontzentratuko da bi eroaleen arteko gainazal zatietan; aldiz, noranzko berdineko korronteak badituzte, kanpoko aldeetan egongo da korronte dentsitate handiagoa.

3.1.4 Eratzun efektua

Aurreko bi efektuei batzen zaie eratzun efektua. Izan ere, eroale bat kiribiltzean, korrante lerroak eratzunaren barnealdean kontzentratuko dira, kanpoaldeko korrante dentsitatea murriztuz. Horregatik, korrante gehiena eratzunaren barruko gainazaleko kapan egongo da.

Eratzun efektua ona edo txarra izan daiteke, eraiki nahi den aplikazioaren arabera. Ohiko indukzio bidezko berokuntza sistematan, zeintzuetan berotu nahi den pieza hariaz inguratzen den, positiboa izango da erantzuna; gainazal eta gertutasun efektuekin batera, eratzun efektuak lagunduko baitu korrantea barnealdean kontzentratzen, bobinaren errendimendua handituz. Piezaren barrualdeko gainazalen bat berotzea helburu duten sistematan, baina, negatiboki eragingo du.



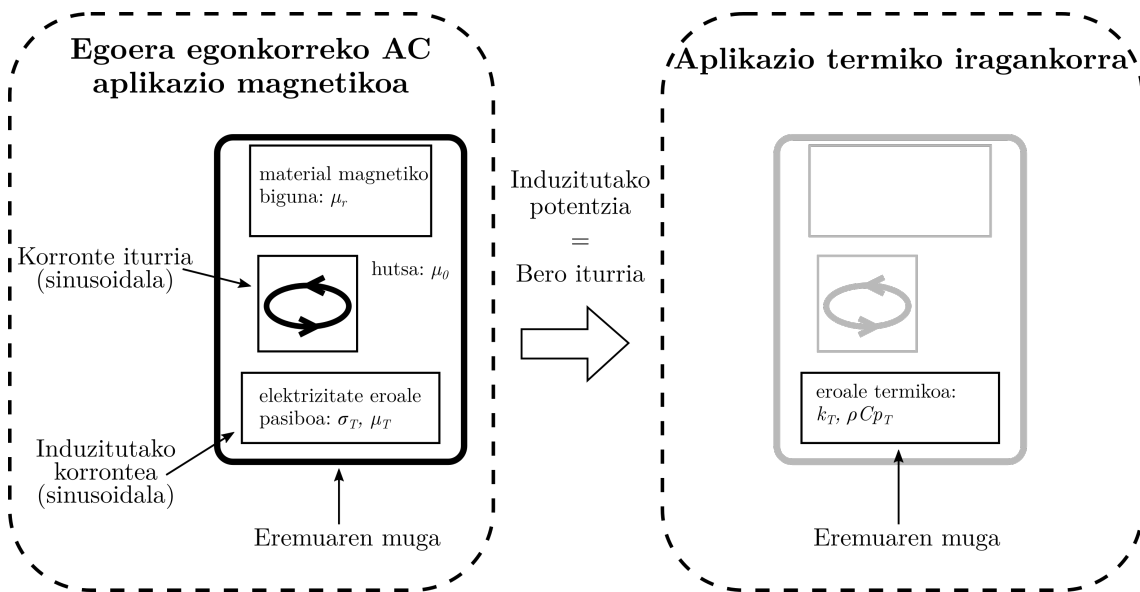
Irudia 8. Fenomeno elektromagnetikoak: a) gainazal efektua, b) gertutasun efektua eta c) eratzun efektua.

3.2 Elementu finituen analisisia

Hasieran aipatu bezala, elektrizitate eroaleak diren gorputzak eremu magnetiko aldakor baten eraginpean jartzean, *eddy* korronteak induzitzen dira; hortik, tenperatura igoera. Prozesuan eragiten dute iturriko korrontearen ezaugarriek, hots, anplitudeak (disipatutako potentzia) eta frekuentziak (sartze sakonera).

Indukzio bidezko tenplatze sistemaren analisi elektromagnetikoa elementu finituen metodoaren (FEM) bidez egingo da. Horretarako, Altair-en FLUX softwarea baliatuko da. FLUXen simulatu daitezkeen aplikazioak anitzak dira; elementu finituen analisiak egin daitezke elektrikoki, magnetikoki eta termikoki. Bi aplikazio akoplatzea ere ahalbidetzen du, eta horrek egiten du berezi Altair-en softwarea.

Indukzio bidezko berokuntza sistema aztertzeko erabiliko da “*Steady State AC Magnetic coupled with Transient Thermal*” aplikazioa [9]. Bi aplikazioen elkartzea da: batetik, egoera egonkorreko AC magnetikoa; eta, bestetik, termiko iragankorra. Horrela, lehenengoan kalkulaturako potentzia galerak bigarreneko bero iturri izango dira, eta bigarrenean eskuratutako tenperatura erabiliko da lehenengoko datuak eguneratzeko.



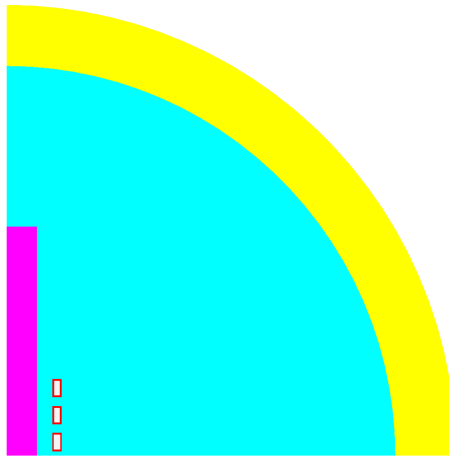
Irudia 9. FLUXeko prozesuaren diagrama.

3.2.1 Eremuaren deskribapena

FLUXen edozein sistema simulatu aurretik hiru kontzeptu zehaztu behar dira: geometria, saretzea eta fisika. Behin hiruak ondo definituta daudenean, agertokia aukeratzen da, zer simulatu nahi den erabaki. Aplikazioa estatikoa bada, operazio puntu konkretu bat edo edozein parametroren ekorketak simula daitezke; aplikazio iragankorretan, aldiz, denborarekiko edota posizioarekiko – mugimendu mekanikorik badago – simulatuko da. Simulazioa amaitzean, agertoki horretako datuak prozesatuko dira, ikusi nahi denaren arabera.

Jarraian, tenplatze bankuari dagokion eremua zehaztuko da, gero sistema simulatu ahal izateko. Bi dimentsioko sistema erabiliko da eremua deskribatzeko; aipatu hiru dimentsiotan pausu berdinak jarraitu behar direla.

Lehenik eta behin, sistemaren geometria [10] adieraziko da. 2. kapituluan azaldu legez, pieza zilindriko batek (arrosa) eta sei espiradun inductoreak (gorria) osatzen dute indukzio sistema. Induktorearen barruan ikusten den eskualde zuria inductorea bera hoztuko duen ura da (hurrengo azpiatalean azalduko da). Horrez gain, kolore urdinez airea adierazi da eta horiz infinitua, indukzio sistemaren ingurunea definitzeko. Simulazioa sinplifikatu eta azkartzeko, baina, simetriak aplikatu dira: batetik, y ardatzarekiko axisimetrikoa izango da; eta, bestetik, x ardatzarekiko simetria arrunta edukiko du. Ondorioz, sistemaren plano laurdena simulatuko da (Irudia 10).

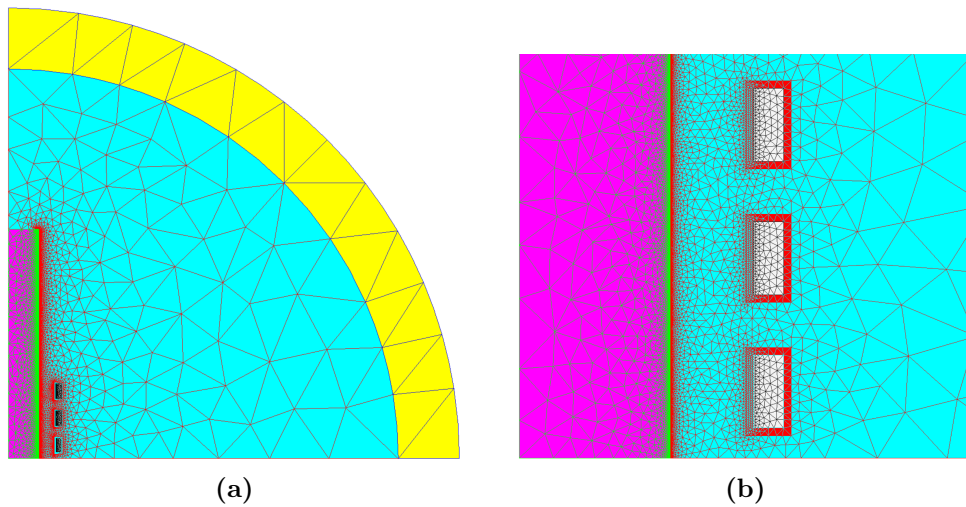


Irudia 10. Geometria 2D.

Geometria hori saretu [10] behar da gero, azken finean, nodoetan egingo baitira kalkuluak; gero eta nodo gehiago, orduan eta zehatzagoa izango da emaitza, baina luzeagoa simulazioa. Badago gune kritiko bat, non distantzia oso txikitik balioak asko aldatzen diren. Gune hori da sartze sakonera, eta tarte horretan zehar garrantzitsua da nodo kantitate handiagoa izatea, soluzio albat zehatzenak bermatze aldera. Sartze sakonera kalkulatu da 50 kHz-eko frekuentziarako (3.3); izan ere, frekuentzia horretan izango du balio txikiena (kritikoena). Sartze sakonerak eragiten du bai piezan, bai inductorean; horregatik, nodo kontzentratu horiek ezarriko dira piezaren albo gainazal guztian zehar eta inductoreak piezaren aldera dituen aurpegietan (Irudia 11). Simulazio denbora optimizatu asmoz, piezatik alendu ahala, nodoen arteko distantzia handitzen joango da.

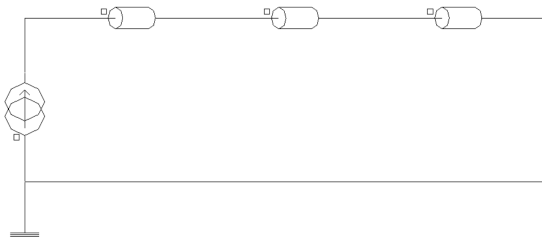
TAULA 2. Piezaren eta inductorearen sartze sakonerak.

	δ (50 kHz)
Pieza (altzairua)	0,023 mm
Induktorea (kobrea)	0,3 mm



Irudia 11. Saretzea 2D: a) simulazio eremu osoa eta b) piezaren eta induktorearen sartze sakonera zonaldetan zooma eginez.

Simulatu aurretik zehaztu behar da sistemaren fisika (materiala, eskualdeak eta zirkuitu elektrikoa). Materialari dagokionez [11], pieza karbono-altzairuzkoa (Taula 3) da eta bobina kobrezkoa (Taula 4). Eskualdeak zehazteak esan nahi du aurpegi, lerro edota puntu bakoitzari dagozkion ezaugarriak banatzea, hain zuzen, piezari, bobinari, urari, aireari eta infinituari (aurpegiak bostak). Zirkuitu elektrikoa [12] osatzeko espirak seriean konektatu dira, guztiak korrante iturri batekin elikatuz (Irudia 12). Garrantzitsua da zehaztea gainontzeko espira simetrikoak ere seriean konektatuta daudela.



Irudia 12. Zirkuitu elektrikoa 2D.

TAULA 3. Karbono-altzairuaren propietateak.

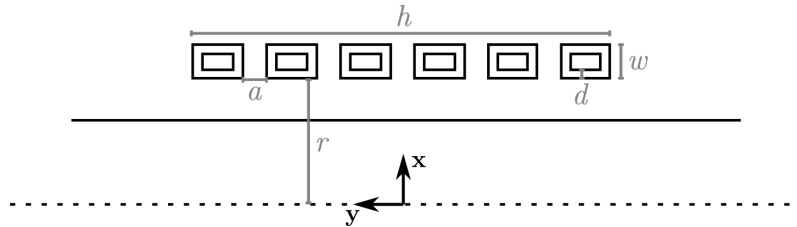
Propietatea	Balioa
Saturazio magnetikoa, B_s	1,5 T
Hasierako iragazkortasun magnetiko erlatiboa, μ_{r0}	1854
Konstante termikoa, α	0,005 1/°C
Erresistibitatea, ρ	$1,8955 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot m$
Eroankortasun termikoa, k	45 W/m°C
Bero ahalmen bolumetrikoa, ρC_p	$3691380 \text{ J/m}^3\text{°C}$

TAULA 4. Kobrearen propietateak.

Propietatea	Balioa
Iragazkortasun magnetiko erlatiboa, μ_r	1
Konstante termikoa, α	0,00393 1/°C
Erresistibitatea, ρ	$1,7241 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$
Eroankortasun termikoa, k	400 W/m°C
Bero ahalmen bolumetrikoa, ρC_p	$3439205 \text{ J/m}^3\text{°C}$

3.2.2 Induktorearen diseinua

Sistema bere osotasunean simulatu aurretik diseinatu da induktorea, elementu finituen metodoaren bidez. Parametro geometriko batzuk aurretik zehaztuta daude (2. kapitulua), eta parametro finko horietatik abiatuz gauzatu da analisisa.



Irudia 13. Induktorearen geometria.

TAULA 5. Aurrez zehaztutako induktorearen geometria parametroak.

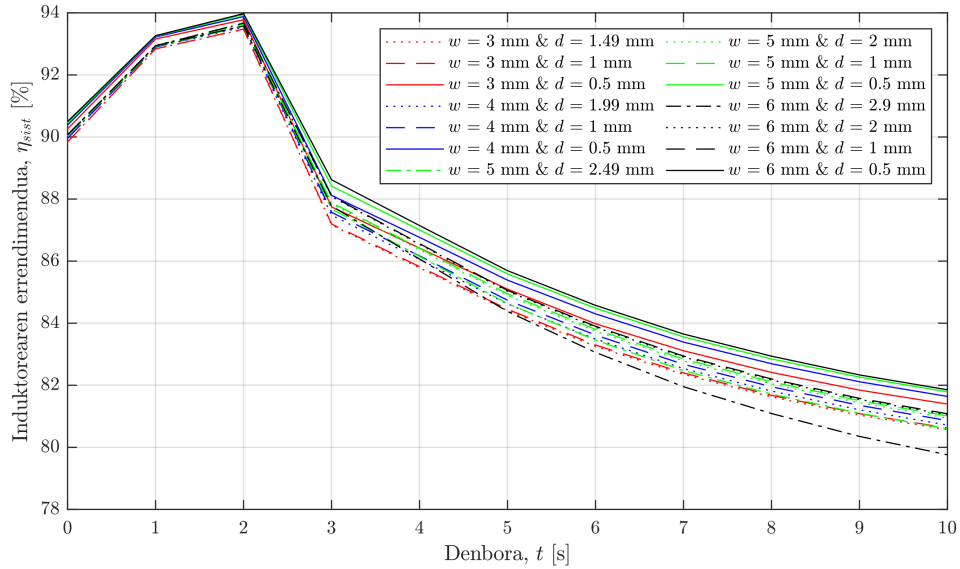
Parametroa	Balioa
h	50 mm
r	15 mm
a	3 mm

Zehaztuta dauden parametroak dira piezaren tratatzeko zatia (h), induktorearen barne erradioa (r) eta bi espiren arteko distantzia (a). Hori horrela, induktorearen sekzioaren

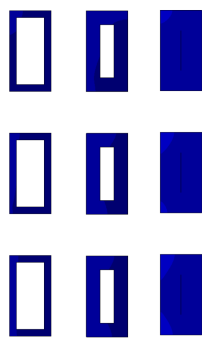
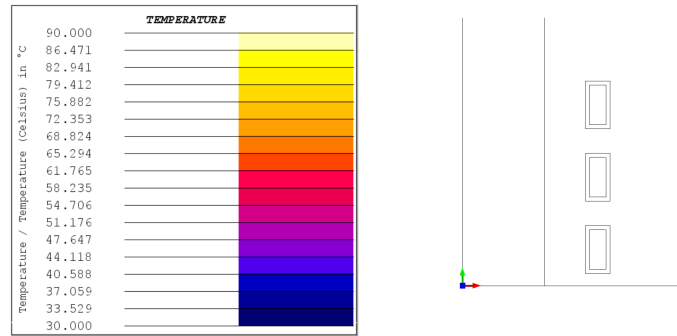
zabaleraren (w) eta barrutik pasaraziko den uraren sekzioaren (d -rekiko aldatzen dena) ekorketak egingo dira jarraian. Bertan aztertuko dira induktoreak hartzen duen temperatura eta sistemaren errendimendua (1.2) denboran zehar.

Azterketa honetan ikusi da d txikiekin, hots, uraren sekzio handiekin, lortzen dela induktorearen temperatura baxuen mantentzea (Irudia 15). Gainera, ekorketa horien errendimendua irudikatu dira (Irudia 14), eta ondorio berdina baieztatzen da: gero eta hozte azalera handiagoa, orduan eta altuagoa da induktorearen errendimendua.

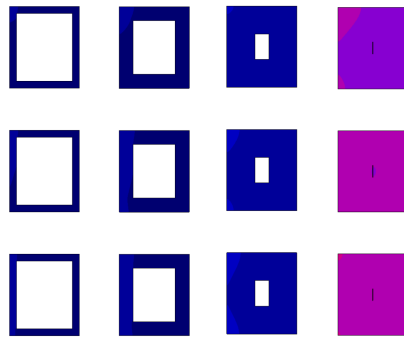
Horrez gain, aztertu nahi izan da non dagoen d parametroaren muga. Izan ere, uraren sekzioa ia-ia induktorearen berdina denean, hau da, d oso-oso txikia denean, egongo da puntu bat, non galerak nabarmen handitzen diren. Puntu hori sartze sakoneraren arabera da, bertan kontzentratzen baita korrante dentsitatearen zati handiena. Adibidez, 50 kHz-eko frekuentzia baterako, kobreak sartzeko sakonera ia 0,3 mm-koa da, eta ikusi da gutxi gorabehera puntu horretan hasten direla galerak handitzen d txikitu ahala (Irudia 16). Neurri txiki horiek fabrikaezinak direla esan daiteke; baina, posible izanik ere, ez litzateke komeni izango.



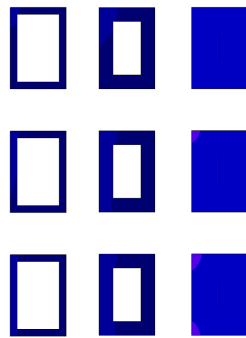
Irudia 14. Simulatutako induktorearen sekzio bakoitzarekin lortutako errendimendua ($I = 500 \text{ A}_{rms}$, $f = 50 \text{ kHz}$, $t_{sim} = 10 \text{ s}$, $T_{ura} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{ing} = 22 \text{ }^\circ\text{C}$, $h_{ura} = 50000 \text{ W/m}^2\text{C}$, $h_{airea} = 10 \text{ W/m}^2\text{C}$).



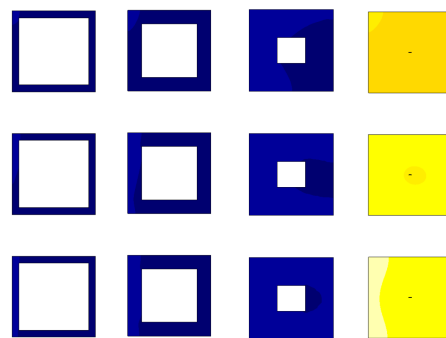
$w = 3 \text{ mm}$



$w = 5 \text{ mm}$

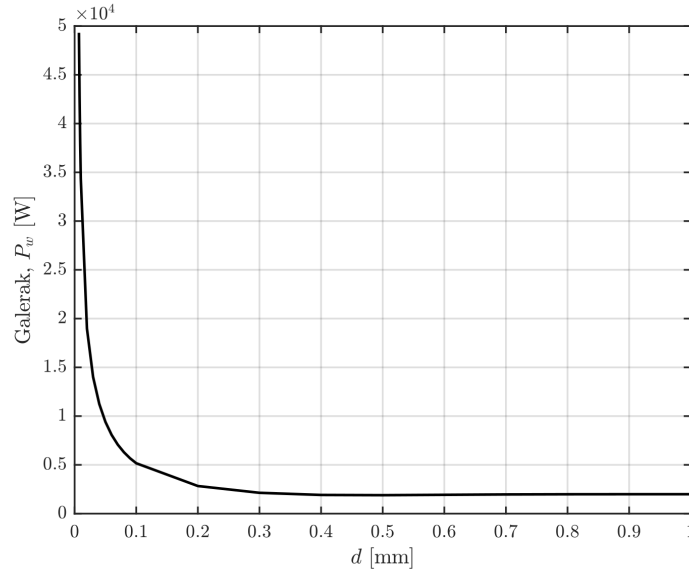


$w = 4 \text{ mm}$



$w = 6 \text{ mm}$

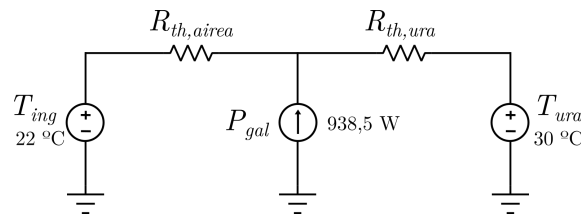
Irudia 15. Induktorearen sekzioan zeharreko temperatura mapa ($I = 500 \text{ A}_{rms}$, $f = 50 \text{ kHz}$, $t_{sim} = 10 \text{ s}$, $T_{ura} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{ing} = 22 \text{ }^\circ\text{C}$, $h_{ura} = 50000 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$, $h_{airea} = 10 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$).



Irudia 16. Induktorearen galerak barrutik doan uraren sekzioarekiko ($I = 500 A_{rms}$, $f = 50 \text{ kHz}$, $t_{sim} = 10 \text{ s}$, $T_{ura} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{ing} = 22 \text{ }^\circ\text{C}$, $h_{ura} = 50000 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$, $h_{airea} = 10 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$).

Azkenean 3 milimetrotako zabalera duen induktorea aukeratu da 0,5 mm-ko d distantziarekin. Batetik, zabalera txikia izateak ahalbidetzen du material gutxiago erabiltzea, induktorearen pisua eta, era berean, prezioa murriztuz; bestetik, fabrikazio prozesuari dagokionez, errazagoa da altuera baino zabalera txikiagoa duen bobina bat egitea.

Hozte sistemaren zirkuitu elektriko baliokidea (Irudia 17) baliatu da uraren tenperatura $30 \text{ }^\circ\text{C}$ -tan mantenduz disipatu beharreko bero kantitatea kalkulatzeko. Ingurugiroko tenperatura $22 \text{ }^\circ\text{C}$ -koa izanik eta induktorean sortzen diren bero galerak $938,5 \text{ W}$ badira ($w = 3 \text{ mm}$ kasurako), hozte zirkuituak disipatuko duen beroa $937,3 \text{ W}$ -ekoa da. Aavid etxearen bero trukatzaille txikia – HydroSink small – aukeratu da tenplatze bankuko induktorea hozteko; 3 kW bero disipatzeko gai da berau.



Irudia 17. Hozte sistemaren zirkuitu elektriko baliokidea.

$$R_{th} = \frac{1}{h \cdot A} \tag{3.5}$$

Jarraian kalkulatu dira 1 kW bero disipatzeko beharrezko uraren emaria (3.6), aukeraturako sekzioan zeharreko abiadura eta horrek dakarren presio jaitsiera. Azken parametro hori kalkulatzeko hodi zilindrikoentzako Darcy-Weisbach ekuazioa (3.7) erabili da [13]; diametro hidraulikoa sekzio laukizuzenera egokituz (3.8).

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \rightarrow \dot{m} = \frac{\dot{Q}}{C_p \cdot \Delta T} \quad (3.6)$$

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{dh} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (3.7)$$

$$dh = \frac{4 \cdot w_{ura} \cdot h_{ura}}{2 \cdot (w_{ura} + h_{ura})}, \quad (3.8)$$

non w eta h induktorearen barruko sekzioaren – uraren – zabalera eta altuera diren.

TAULA 6. Hozte zirkuituaren parametroak.

Emaria [l/min]	Abiadura [m/s]	Presio jaitsiera [bar]
1,7966	3,0979	0,3451

Oso txikia da hozte sistemako ura 30 °C-tik ez igotzeko beharrezko emaria, emari handiago batekin lortuko da ura are gutxiago berotzea, hots, 25 bat °C-tan mantentzea. Hozte sistemaren beharrik ez dagoela ere esan daiteke. Dena den, txostenaren hasierahasieran aipatu bezala, bankuko entseguak ez dira mugatuko proiektu honetan azaldutako tenplatze prozesura bakarrik, eta aurrerago hozte sistema hori ezinbestekoa izango dela aurreikusten da.

3.2.3 Sistemaren simulazioa bi dimentsiotan (2D)

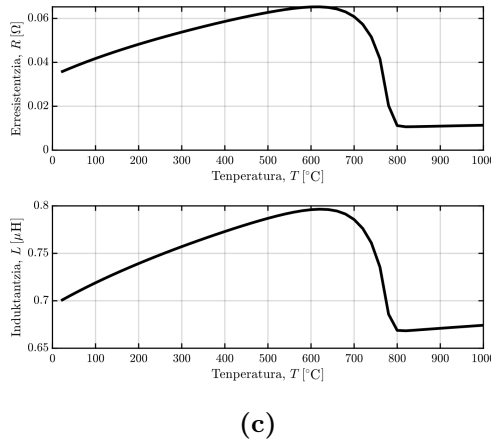
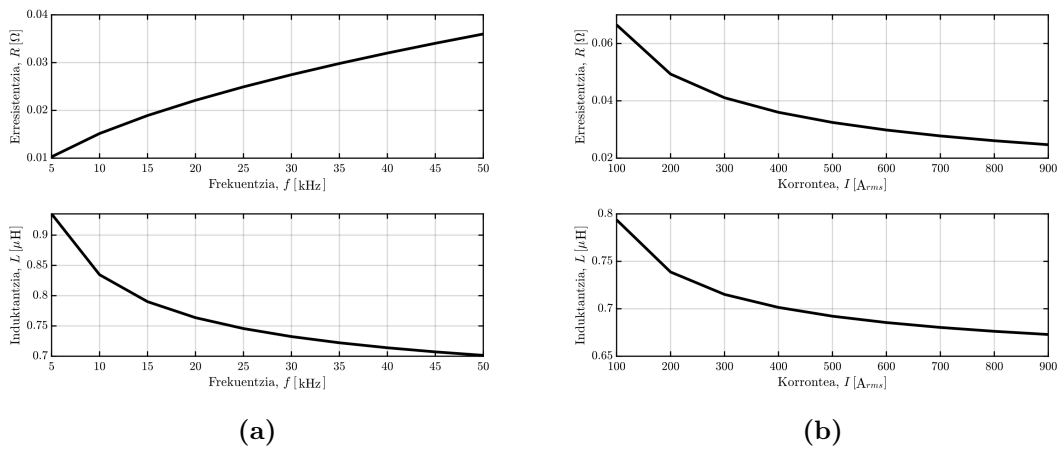
Behin induktorearen geometria zehaztu denean, bi dimentsioko FEM simulazioa erabiliko da bobinak eta piezak osatzen duten karga karakterizatzeko, alegia, karga hori adierazten duten erresistentzia eta induktantzia balioak eskuratzeko.

Kasu honetan, karga karakterizatzeko helburu izanik, hiru ekorketa egin dira: frekuentziarekiko, korrontearrekiko eta tenperaturarekiko. Horrela, parametro bakoitzarekin R eta L balioak nola aldatzen diren ikusi da (Irudia 18). Erresistentziaren balioa (3.9) kalkulatu da piezaren Joule galeretatik, eta induktantziarena (3.10) simulazio eremu osoan metatutako

energiatik. Simetria horizontala dela eta, bikoiztu egin dira kalkuluok.

$$R_{bal} = \frac{P_{joule}}{I^2} \cdot 2 \quad (3.9)$$

$$L_{bal} = \frac{2 \cdot E_{tot}}{I^2} \cdot 2 \quad (3.10)$$



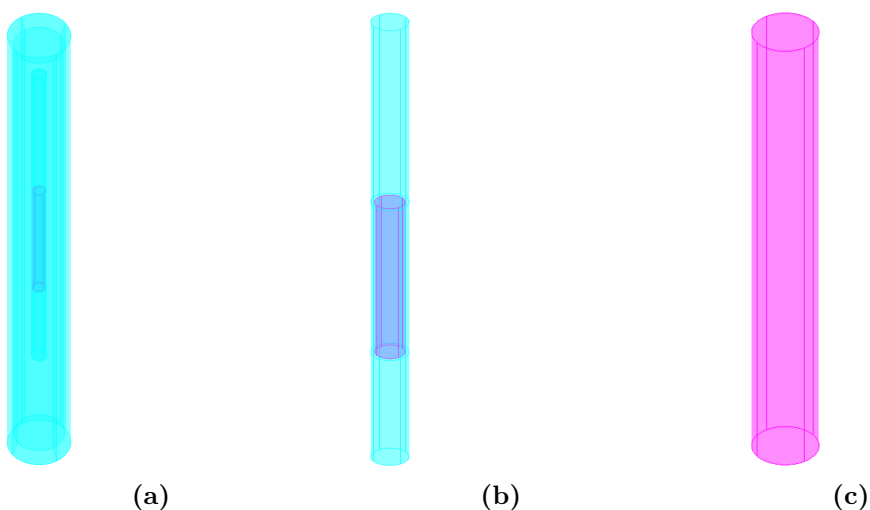
Irudia 18. R eta L baliokideak: a) frekuentziarekiko ($400 A_{rms}$, $25^{\circ}C$), b) korrontearekiko ($50 kHz$, $25^{\circ}C$) eta c) tenperaturarekiko ($400 A_{rms}$, $50 kHz$).

3.2.4 Sistemaren simulazioa hiru dimentsiotan (3D)

Hiru dimentsioko simulazioa baliatuko da altzairuzko piezaren tenplatze prozesua simulatzeko. Lehenbizi, pieza berotuko da, eta hoztu gero. Bi simulazio eramango dira aurrera:

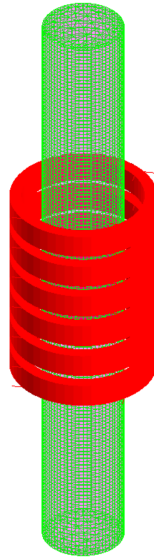
berotzea simulatzeko pieza induktoretik pasaraziko da (mugimenduarekin), eta behin pieza osoa berotuta, simulatuko da hoztea (mugimendurik gabe). Posible da simulazio osoa (berotzea eta hoztea) ebazpen bakarrean gauzatzea; dena den, oraingoan bi zatitan egitea erabaki da. Batetik, hozte prozesua translazio mugimendurik gabe burutzeak dakar simulazioa azkarragoa izatea; eta, bestetik, berotze prozesua ondo burutu dela ziurtatu nahi izan da hoztea simulatu aurretik.

Mugimendua dela eta, eremuaren geometria zertxobait aldatzen da bi dimentsioko deskribapenetik (Irudia 19). Izan ere, simulazio pauso bakoitzeko saretzen da sistema; eta, horregatik, aire gune konprimagarri bat gehitu behar izan zaio piezaren ingurune hurbilenean (behin eta berriz saretuko dena). Horrez gain, 2Dko eremuan bezala, ingurunea irudikatzen duen airea ere ezarri da.



Irudia 19. Geomtria 3D: a) eremu osoa, b) pieza eta berau inguratzen duen aire konprimagarria eta c) pieza bakarrik.

Eremua sartzeko (Irudia 20), dimentsio biko simulazioan bezalaxe, piezaren sartze sakonera hartu da kontuan, piezaren gainazalean nodo kopuru kontzentratu bat edukitzea helburu izanik. Hala ere, badu berezitasun bat hiru dimentsioko erramintak: ingelesez *non-meshed coil* deritzona. Saretze beharrik ez duten bobinak simulatzea ahalbidetzen du funtzio horrek, nodo kopurua – simulazio denbora – nabarmen murriztuz. Induktantziaren azterketa aurreko simulazioetan gauzatu denez, hemen ez da horren garrantzitsua bobinan bertan zer gertatzen den ikustea. Horrela, simulazio eremu osoan 413.831 nodo ezarri dira, horietatik 166.186 piezan bertan kokaturik. Simulazio osoak, gutxi gorabehera, 144 ordu (6 egun) iraun du.



Irudia 20. Saretzea 3D.

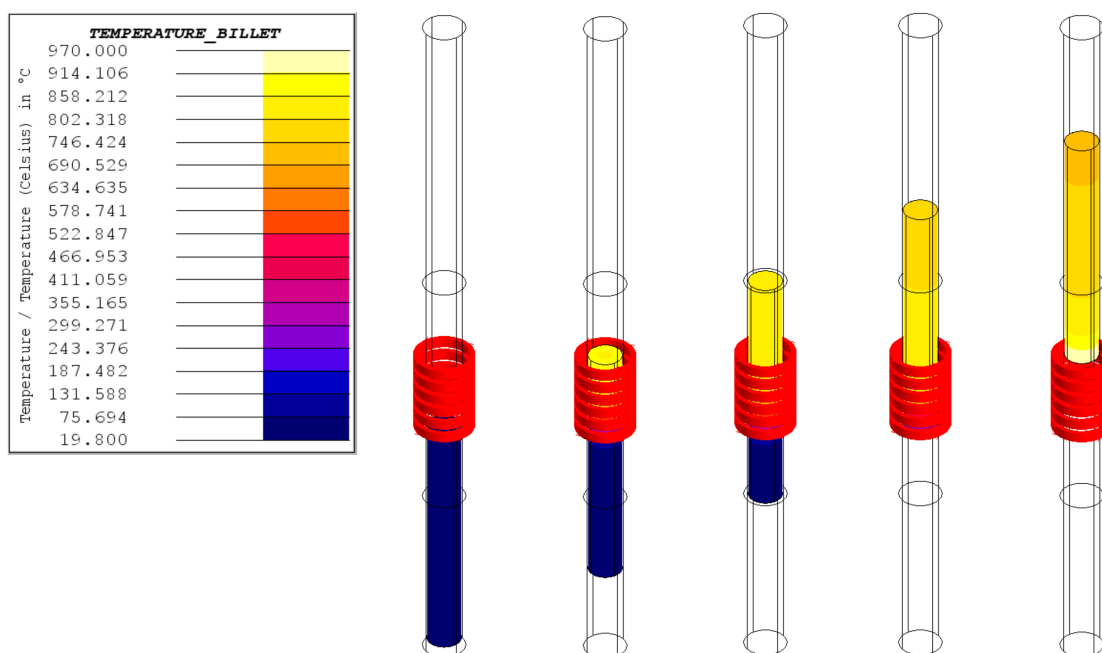
Fisikaren barruan zehaztu dira materiala, eskualdeak eta zirkuitu elektrikoa (kasu honetan sei espira, denak seriean konektatuta). Horrez gain, translazio mugimendua ezarri zaio piezari, ingurune hurbileneko airea konprimagarria dela zehaztuz eta kanpoko finkoa. Jarraian simulatuko den aplikazioa da egoera egonkorreko AC magnetikoaren eta termiko iragankorraren konbinaketa (Irudia 9).

Berotze prozesurako konbektzio naturala, $10 \text{ W/m}^2\text{C}$ -ko koefizientea, aplikatu zaio altzairuzko pieza eta berau inguratzen duen airearen arteko gainazalari (dutxa simulatzeko parametro horrekin jolasten da). Esan bezala, mekanikako departamentuan aurretik egin-dako entseguetan oinarritzen da bankuaren diseinua, eta sistema simulatzeko parametroak ere beraiek erabilitakoak izango dira.

TAULA 7. Indukzio bidezko tenplatze sistemaren simulazio parametroak.

Korrontea	Frekuentzia	Berotze denbora
441 A rms	31,1 kHz	8 s

Translazio mugimendua zehaztu da pieza bobinan sartzen denetik osorik irteten denera arte, 4 mm/s -ko abiadurarekin (bobinaren gune eraginkorrean pieza 8 segundoz berotzea bermatuz).



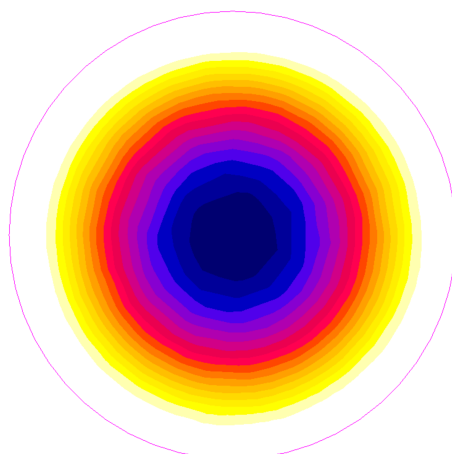
Irudia 21. Piezaren berotzea gorako translazio mugimenduan zehar, pieza bera bobinatik pasatu ahala.

Tenperatura piezaren gainazaletik erdigunera nola aldatzen den aztertzeko piezaren ebakidura horizontaleko tenperaturaren banaketa bistaratu da (Irudia 22). Bertan ikusten da kanpoaldean berotasun handiagoa pilatzen dela barrualdean baino, piezaren gainazaletik gertuen dagoen zatia (tenplatu nahi dena) austenizazio fasera iritsiz. Austenizazio tenperatura $805\text{ }^{\circ}\text{C}$ -tan zehaztu da, $1,55$ milimetroko sakonera lortuz. Aipatu sakonera horretan korrontearen sartze sakonera terminoak eragiten duela, baina balioak ez dira berdinak (Taula 8); izan ere, kondukzioa dela eta, berotasuna δ -tik harago doa.

TAULA 8. Beroaren sakonera eta korrontearen sartze sakoneraren arteko konparaketa $31,1\text{ kHz}$ -etan.

Beroaren sakonera	Korrontearen sartze sakonera
$1,55\text{ mm}$	$0,03\text{ mm}$

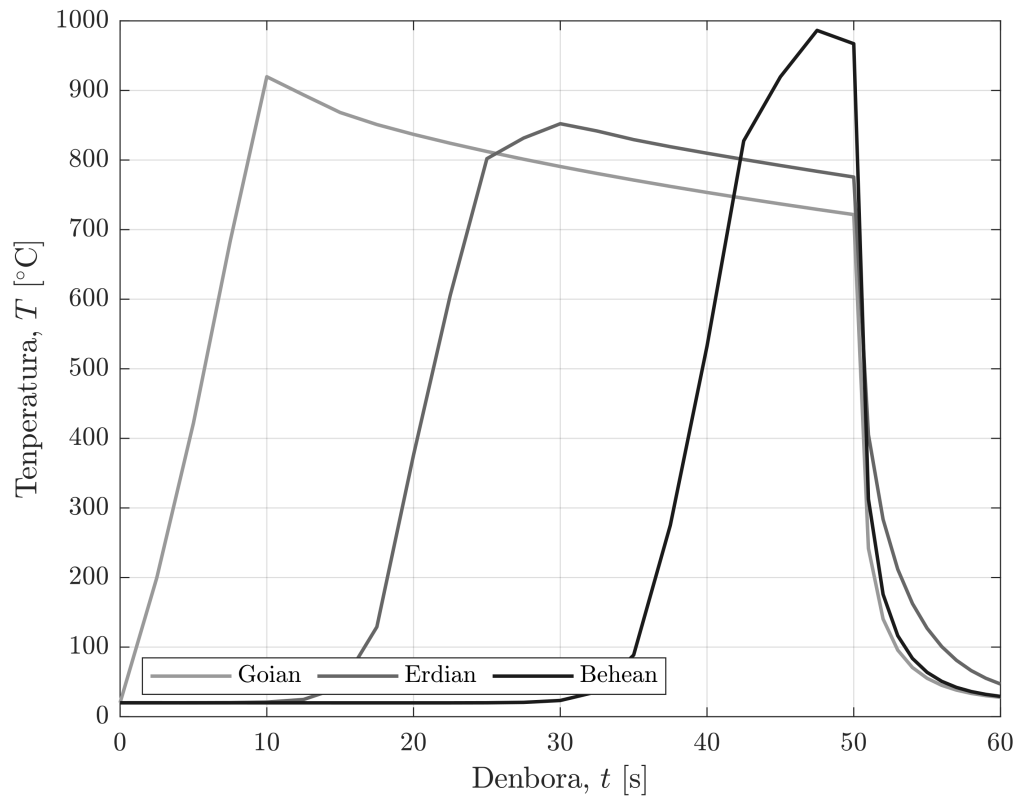
Suposatzen da tenplatuko den zatia – gogortasun kapa – sakonera horren tamainakoa dela, austenita dena martensita bihurtzen baita hozte prozesuan.



Irudia 22. Piezaren ebakiduran zeharreko beroaren banaketa, zuriz dagoen zatia $805\text{ }^{\circ}\text{C}$ gainditzen duen gunea da.

Bestalde, hozte prozesua simulatzeko abiatu da aurreko simulazioaren azkenengo puntutik, hots, pieza osoa induktoretik irteten den momentutik; induktorea itzali, pieza gelditu eta dutxa aplikatu zaio. Horretarako, piezaren konbektzio koefizientea asko handitu da, hain zuen, $10000\text{ W/m}^2\text{C}$ -ko balioa eman zaio; berotutako gainazalean dutxak eragiten duen konbektzio bortxatua adierazteko.

Temperaturak piezan zehar izango duen bilakaera zehatzago jakiteko, piezako hiru puntu estrategikotan tenperaturak duen eboluzioa aztertu da denboran zehar (Irudia 23). Hiru puntuak piezaren gainazalekoak dira: goiko bat, erdiko beste bat eta behekoa azkena. Bertan ikusi da hamar bat segundoan berotzen dela pieza, eta beste horrenbeste behar duela hozteko. Horrez gain, pieza osoa induktoretik atera arte itxaron denez hozte prozesua abiarazi aurretik, goiko eta erdiko gunek denbora luzez egon dira bero hori mantentzen, eta horrek tenplatze prozesua kaltetzen du. Izan ere, prozesuaren eskakizunetako bat da pieza berotu bezain laster hoztea. Horregatik, prozesu idealena litzateke pieza zatika hoztea, hau da, induktoretik pasatu ahala, berotu berri diren gunek horietan aplikatzea dutxa.



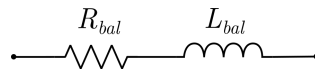
Irudia 23. Temperaturaren bilakaera denboran zehar piezako hiru puntutan.

4 POTENTZIA BIHURGAILUAREN DISEINUA

Kapitulu honetan landuko da indukzio bidezko berokuntza sistema elikatuko duen potentzia bihurgailua. Horretarako, baina, karga induktiboa karakterizatu beharra dago lehenik. Aurreko kapituluan ikusi da karga hori aldatzen dela frekuentziarekin, korrontearekin eta tenperaturarekin. Hasteko, PLECSen inplementatuko dira frekuentziaren eta korrontearen eraginak; simulazioa sinplifikatze aldera, ingurugiroko tenperaturan burutuko da azterketa, ahaztu gabe tenperaturak berak duen eragina. Behin karga karakterizaturik, sistema osoaren simulazio elektrikoari ekingo zaio.

4.1 Karga karakterizatzea

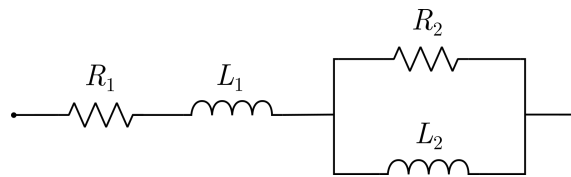
Zirkuitu elektrikoa simulatzeko aipatu erresistentzia eta induktantzia baliokideak erabiltzen dira indukzio sistemaren orde; izan ere, sistema bera ezin izaten da software elektrikoaren bidez adierazi. Horregatik, elementu finituen metodoarekin eskuratutako R eta L parametroen serieko konfigurazioa usatzen da (Irudia 24). Atal honetan aztertuko diren kasuetan, konfigurazio horren baliokidea den beste zirkuitu bat baliatuko da, beharriaren arabera osagaien balioak egokituko zaizkiona.



Irudia 24. Indukzio sistema ordezkatzeko duen erresistentzia eta induktantzia baliokideen serieko konexioa.

4.1.1 Kargaren inpedantzia frekuentziarekiko

Frekuentzia igo ahala ikusi da erresistentziaren balioa handitzen dela eta induktantziarena txikitzen (Irudia 18a). Efektu hori elektrikoki irudikatu asmoz, Foster-en zirkuitu baliokidea [14] erabili da (Irudia 25).

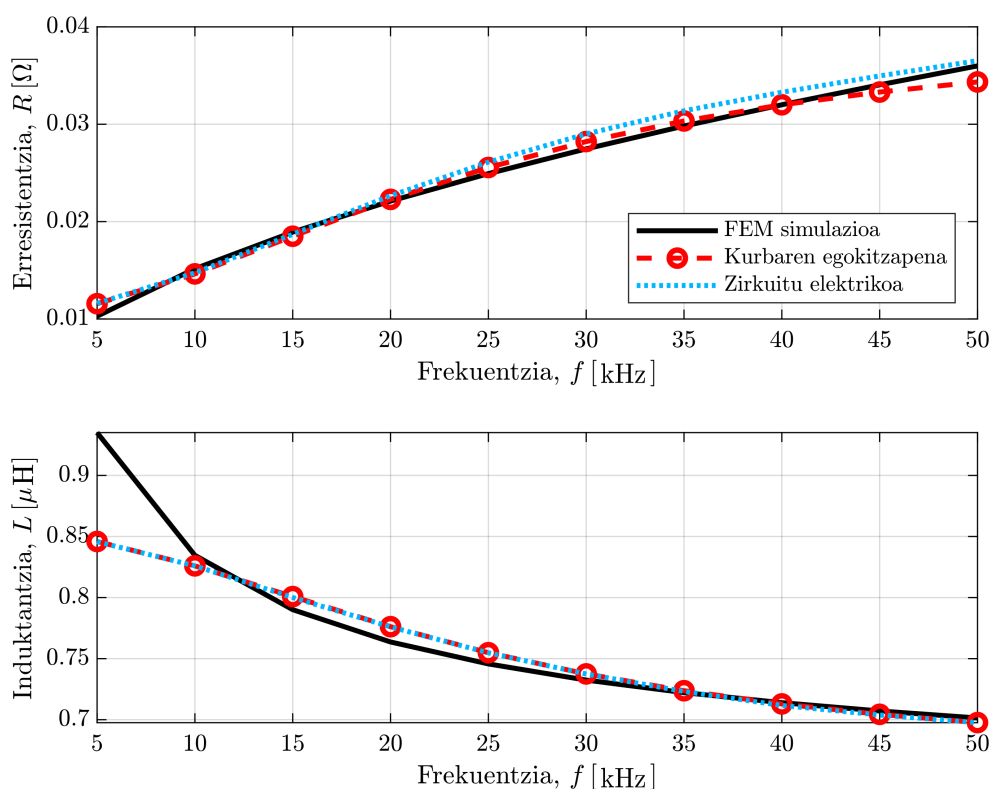


Irudia 25. Foster-en zirkuitu baliokidea [14].

$$Z_{bal}(\omega) = R_1 + j\omega L_1 + (R_2 || j\omega L_2) \quad (4.1)$$

R_1 osagaiak DCko erresistentzia adierazten du eta L_1 -ek infinituko induktantziaren balioa (frekuentziarekiko independentea). R_2 eta L_2 bezalako bikoteen serieko konexioek islatzen dute frekuentziaren eragina; horrelako bikote gehiago jar daitezke, katea nahi beste luzatuz. Gero eta osagai gehiago, orduan eta zehatzagoa izango da egokitzapena, baina konplexuagoa gero etorriko den analisia. Hori horrela, ontzat eman da bina erresistentzia eta induktantziaz osatutako sarea. Egia da frekuentzia baxutan ez dela oso zehatza; kontrakoa, nahiko traketsa da hurbilketa (Irudia 26). Aplikazio honek, ordea, frekuentzia handiagotan egingo du lan.

Foster-en sarea osatzen duten osagaiak lortzeko FLUXen eskuratutako kurben doi-kuntza egin da MATLAB bidez, eta osagai horien balioak PLECSen simulatu.

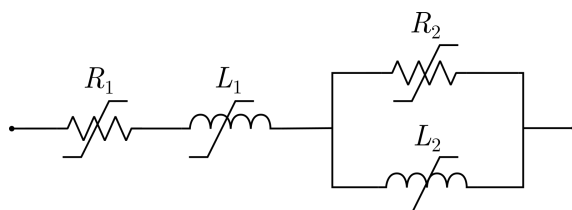


Irudia 26. Kargaren inpedantzia frekuentziarekiko ($400 A_{rms}$, $25\text{ }^\circ\text{C}$).

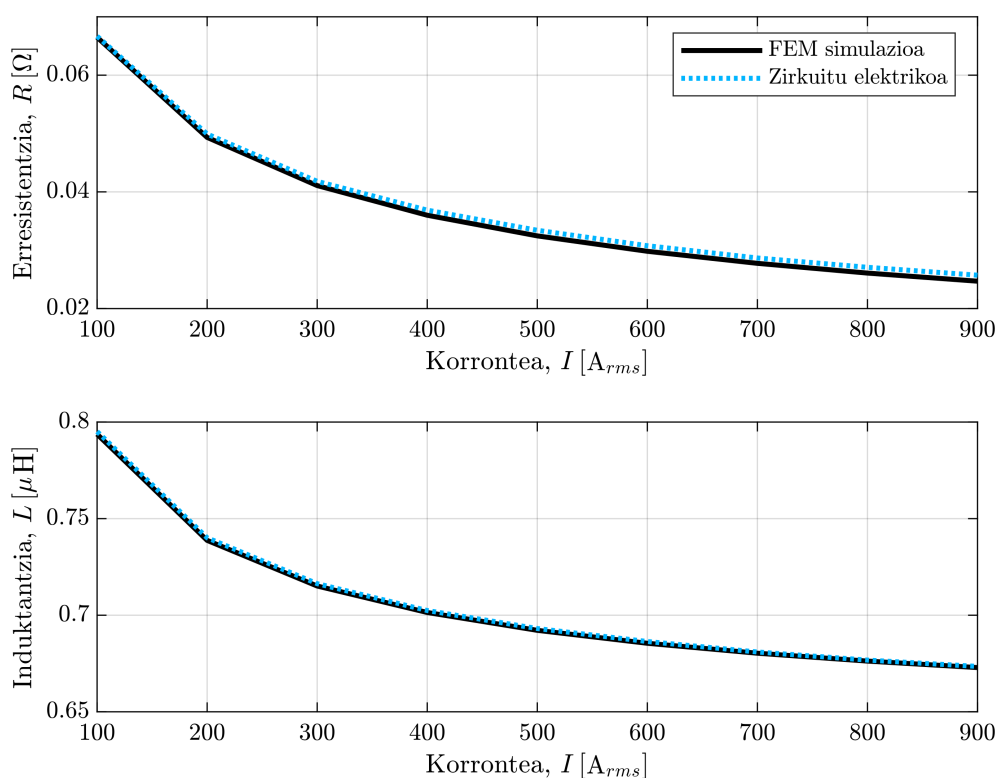
Frekuentziak inpedantzian duen eragina islatzen duten zirkuitu gehiago daude; A eranskinen egiten da Foster-en zirkuitu baliokidearen eta Cachan-go (Frantzia) unibertsitateko ikertzaile talde batek garatutako beste sare pasibo baten [15],[16] konparaketa.

4.1.2 Kargaren inpedantzia korrontearekiko

Korronteak kargaren R eta L balioak murrizten ditu (Irudia 18b), inpedantzia totala txikituz. Eragin hori islatzeko Foster-en zirkuitu baliokideko osagaiak ez lineal bihurtu dira [14]. Horretarako, korrontearen balio batzuentzat R_1 , L_1 , R_2 eta L_2 osagaiak kalkulatu eta PLECSen linealtasun ez hori aplikatu da (Irudia 27).



Irudia 27. Foster-en zirkuitu baliokidea osagai ez linealekin [14].



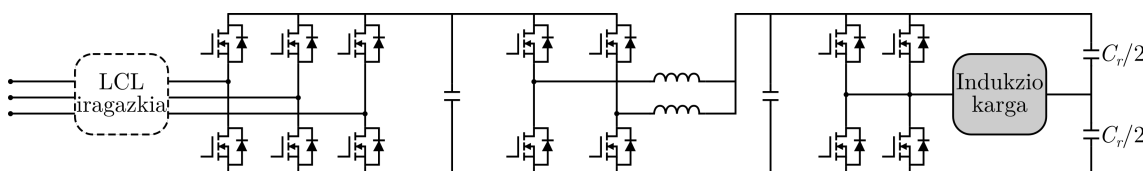
Irudia 28. Kargaren inpedantzia korrontearekiko (50 kHz, 25 °C).

Hemen sinplifikazio bat egin da: osagaiak linealak dira simulazio batean zehar, korrontearen anplitudearekiko aldatzen dituzte balioak, ez korrontearen formarekiko. B eranski-nean arazoitzen eta baliozkotzen da erabaki hori.

4.2 Aukeratutako potentzia bihurgailua

Indukzio sistema elikatuko duen potentzia bihurgailua ez da berrikuntza bat; aitzitik, departamentuan bertan aurretik garatutako pare bat proiektutan erabilitakoa da topologia. Proiektu horietan baliatutako potentzia bihurgailua egokitu da indukzio bidezko tenplatze bankura.

Hiru etapa nagusitan banatzen da bihurgailua (Irudia 29). Lehenbizi, hiru faseko artezgailu bat dago, sareko AC tentsioa 750 Vdc-ra egokituko duena. Jarraian, tentsio hori murriztuko da, kargako potentzia kontrolatuz, bi buck DC-DC bihurgailuren bidez, paraleloan konektatuta biak. Azkenik, indukzio karga elikatuko duen zubi konfigurazioko inbertsore bat ezarri da. Azken honek tentsio seinale karratu bat izango du % 50eko lan zikloarekin, eta korrante alternoa emango du irteeran. Bihurgailuaren eskeman ikusten da bi zubi erdi paraleloan konektatu direla; horren helburua da kargatik korrante handiagoak pasatu ahal izatea, erdieroaleak hondatu gabe. Dena den, aukera egongo da nahi denean bi zubi erdi beharrezan zubi oso bat osatzeko, korrante ez hain handia eta tentsio altuagoa behar diren aplikazioen batean, alegia.

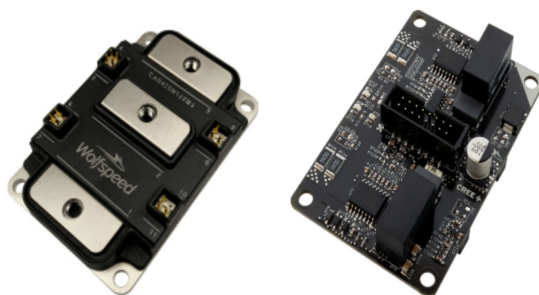


Irudia 29. Indukzio bidezko berokuntza sistema elikatuko duen potentzia bihurgailua.

TAULA 9. Potentzia bihurgailuaren osagaien balioak.

Osagaia	Balioa
LCL iragazkiaren sarearen aldeko induktantzia	80 μH
LCL iragazkiaren kapazitatea	33 μF
LCL iragazkiaren moteltze erresistentzia	100 m Ω
LCL iragazkiaren artezgailuaren aldeko induktantzia	260 μH
Lehenengo buseko kapazitatea	600 μF
Bigarren buseko kapazitatea	400 μF
Buck-aren induktantziak	330 μH

Erdieroale guztiak SiC teknologian oinarritutako MOSFETak dira; CREE fabrikatzailearen 1200 V eta 425 A-ko CAB425M12XM3 moduluak. Kapsulatu oso txikiko moduluak dira, barne induktantzia baxua dutenak; eta beren terminalen antolaketak errazten du induktantzia parasitoak murriztea busa diseinatzerako orduan. Etxe bereko CGD12HBXMP modeloa da erdieroale horien driver komertziala.



Irudia 30. CREE etxearen modulua eta driverra.

Silizio karburoaren propietate hobek ahalbidetzen dute gailu hobekoak ekoiztea [17]. Batetik, materialaren beraren etendura eremuarekiko erresistentzia handiagoak dakar blokeo tentsio jakin batean erresistentzia murriztea. Gainera, korrante berdinentzat area aktibo txikiagoa baliatzen dute; horregatik dira gailuak txikiagoak eta kapazitate parasitoak murriztagoak (korrante berdinerako). Parasito gutxitu eta saturazio abiadura handiagoei esker azkartzen da konmutazioa. Temperaturari dagokionez ere abantailak ditu SiC teknologiak; izan ere, materialaren urtze puntu eta eroankortasun termiko balio altuagoek gailuaren portaera termikoa hobetzen dute.

4.3 Sistema osoaren simulazioa

Jada karga karakterizatuta dago eta potentzia bihurgailuaren azalpen labur bat eman da aurretik. Jarraian, indukzio sistema osoa (potentzia bihurgailua eta indukzio karga) simulatuko da, laburki azaldutako bihurgailuaren etapak banan-banan aztertuz.

Sistema osoa simulatzeko FLUXeko simulazioko parametroak baliatuko dira, operazio puntu berdina aztertu asmoz. Batetik, sistemaren karga osatuko duen erresistentzia eta induktantzien sarea egongo da; eta, bestetik, indukzio sistemari ezarritako frekuentzia (inbertsorearen konmutazio frekuentzia izango dena). Gainera, kargako potentzia kontrolatuko denez (aurrerago azalduko da), bertatik 441 A rms igarotzeko zer potentzia behar den kalkulatu da, (1.1) ekuazioa erabiliz. Kalkuluan baliatuko den erresistentziaren balioa izango da korrante eta frekuentzia jakin horietan karakterizatutakoa.

TAULA 10. Indukzio sistemaren ezaugarriak.

Frekuentzia	Korrontea	Erresistentzia	Potentzia
31,1 kHz	441 A rms	0,026 Ω	5056 W

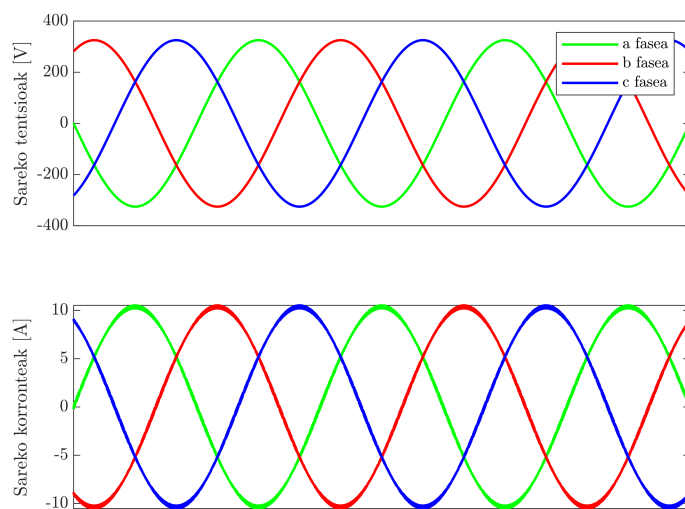
Gainera, sistema 31,1 kHz-etan erresonantzian egon dadin kalkulatu da erresonantzia kapazitatearen balioa; nahiz eta aurrerago diseinatuko den erresonantzia zirkuitua.

Hori horrela, hona hemen sistema osoaren (potentzia bihurgailua eta indukzio sistema) simulazio parametroak:

TAULA 11. Sistema osoaren simulazio parametroak.

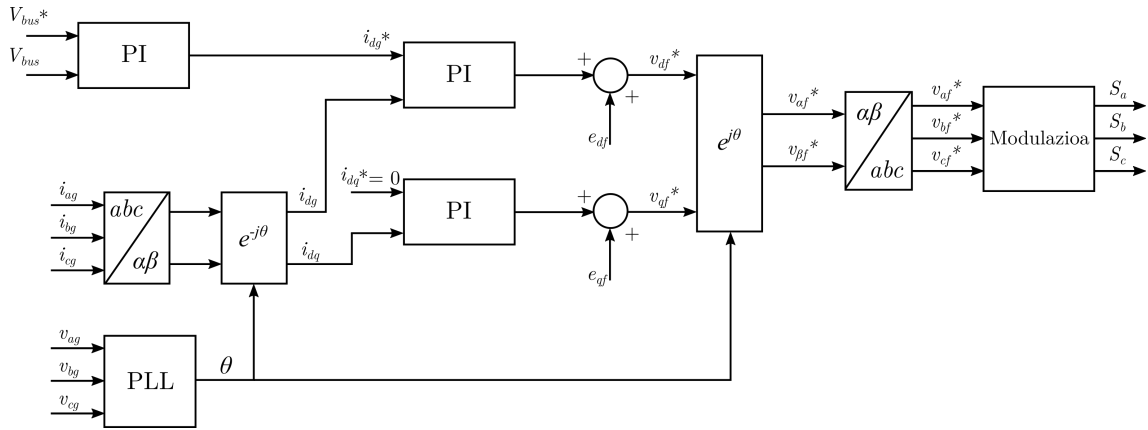
Parametroa	Balioa
Sareko tentsioa	230 V_{rms}
Sareko frekuentzia	50 Hz
Artezgailu trifasikoaren frekuentzia	16 kHz
Buck bihurgailuaren frekuentzia	15 kHz
Indukzio sistemaren frekuentzia	31,1 kHz
Kargako potentzia	5056 W
Erresonantzia kapazitatea	36,02 μF

Hasteko, sare elektrikoa dago; hiru faseko sarea (Irudia 31). Energia fluxua artezgailu trifasikora heldu aurretik, LCL iragazki batetik pasaraziko da. Iragazki horren helburua da saretik xurgatutako korrontearen harmonikoak murriztea. Kasu honetan, % 0,55 da sareko korrontearen THD-aren balioa.



Irudia 31. Sare trifasikoaren tentsio eta korronteen uhin formak.

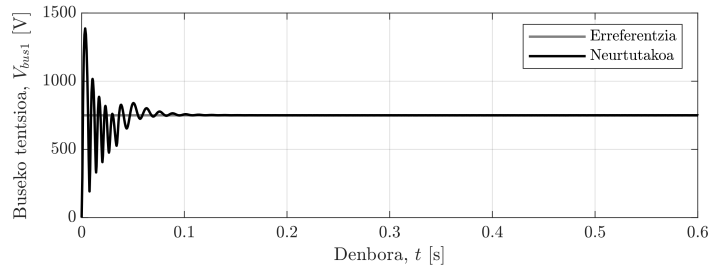
Hiru faseko artezgailuak bihurtuko du sareko AC seinalea DCn; lehenengo buseko tentsioa 750 voltetan finkatuz. Horretarako implementatu da PI bidezko tentsio kontrola, kontrol bektorialean d eta q ardatzetako korronte begiztak baliatuz (Irudia 32). Simulazioan garbi ikusten da tentsio (Irudia 33) zein korronte (Irudia 34) begiztak ondo erregulatuta daudela; izan ere, neurtutako seinaleek ondo jarraitzen diete erreferentziei.



Irudia 32. Sarera konektatuta dagoen artezgailuaren konmutazio seinaleak lortzeko eskema, lehenengo buseko tentsioa kontrolatuz [18].

TAULA 12. Lehenengo buseko tentsioa erregulatzeko konstante proportzional eta integralaren balioak.

k_p	0,5
k_i	20

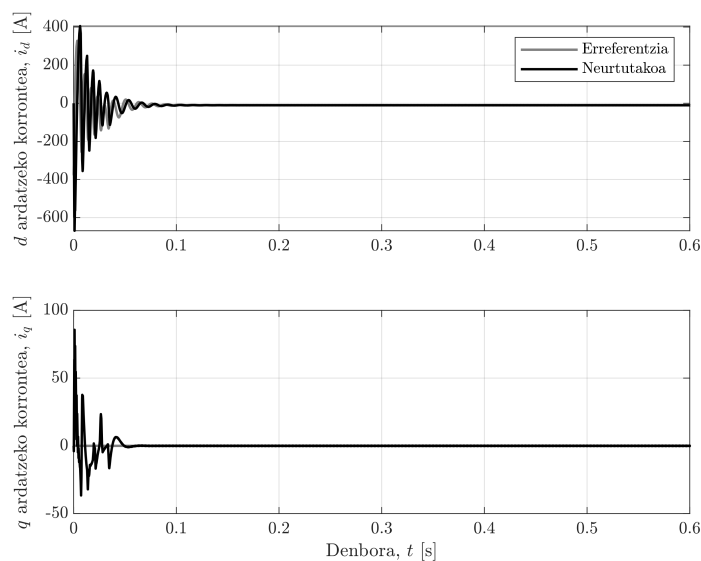


Irudia 33. Lehenengo buseko tentsioaren erreferentzia eta neurtutakoaren uhin formak.

Korrante begizten erregulatzaileak doitzen dira begizta irekiko tentsioen ekuazioetatik abiatuz [18]. LCL iragazkiaren kasuan, honakoak dira adierazpenak:

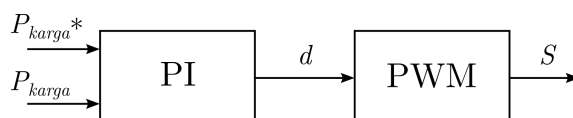
$$k_p = (L_f + L_g)2\xi\omega_n - (R_f + R_g) \quad (4.2)$$

$$k_i = (L_f + L_g)\omega_n^2 \quad (4.3)$$



Irudia 34. Kontrol bektorialeko korrante begizten uhin formak.

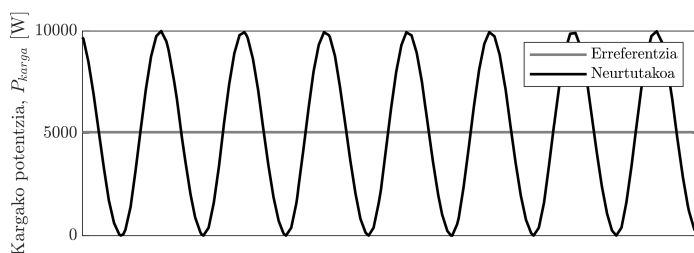
Bigarren busak, berriz, ez du edukiko tentsio finko bat. Indukzio sistemak beharko duen potentziaren araberakoa izango da, hau da, buck bihurgailua kontrolatuko da kargan behar den potentzia aktiboaren arabera (Irudia 35). PI kontrolatzaile bat erabiliko da potentzia hori erregulatzeko, eta bere irteera zuzenean modulaziora doan lan zikloa izango da.



Irudia 35. Buck bihurgailuaren konmutazio seinaleak lortzeko eskema, kargako potentzia aktiboa kontrolatuz [19].

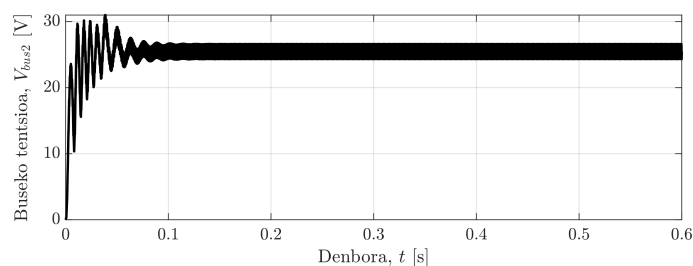
TAULA 13. Kargako potentzia erregulatzeko konstante proporzional eta integralaren balioak.

k_p	$1 \cdot 10^{-6}$
k_i	0,001



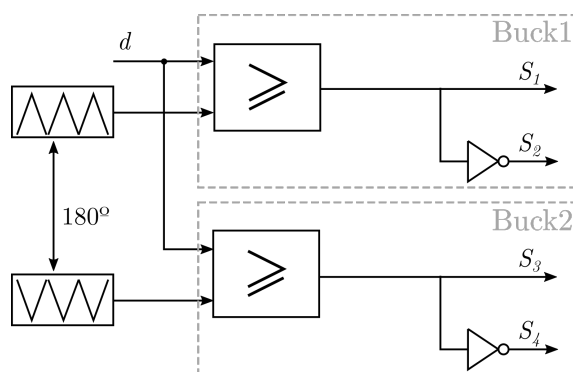
Irudia 36. Kargako potentzia kontrola.

Kargan lortutako batez besteko potentziak inposatutako erreferentziarekin (5056 W) bat egiten duela ikusten da (Irudia 36), hots, kargan behar den potentzia kontrolatzea lortu da. Karga horretan potentzia hori izateko bigarren buseko tentsioak 25,5 V-eko batez besteko balioa izango du (Irudia 37). Espero eta nahi zen moduan, tentsio hori konstante mantentzea (DC) ere lortu da.

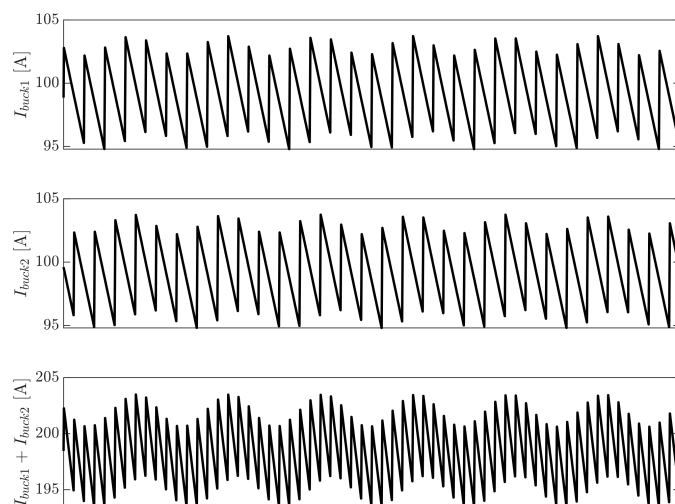


Irudia 37. Bigarren buseko tentsioaren uhin forma.

Potentzia bihurgailuaren eskeman (Irudia 29) ikusten da bi buck bihurgailu paraleloan konektatu direla. Bi DC-DC bihurgailuen artean 180 graduko desfasea dago (Irudia 38). Konfigurazio horren helburua da irteerako korrontearen kizkurdura txikitzea (Irudia 39); bi adarretako korrontea batuz magnitude bikoitza eta kizkurdura erdia duen korrontea bidaliko da inbertsorera (Taula 14).



Irudia 38. Buck bihurtailuen PWM modulazio eskema.



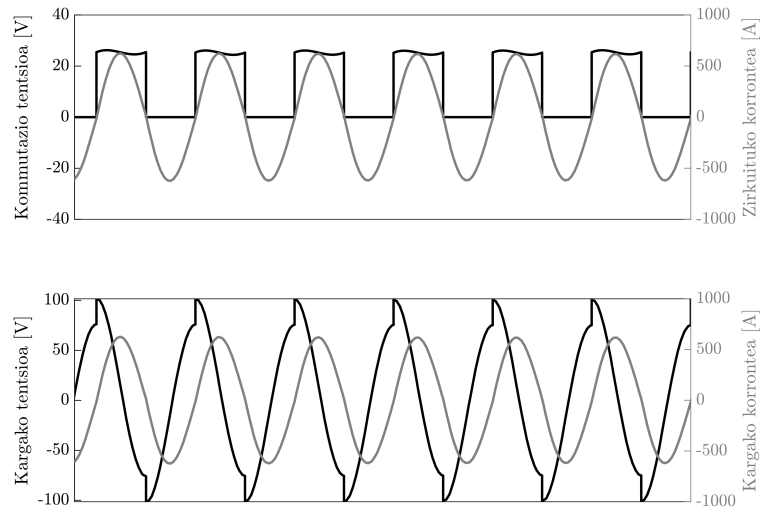
Irudia 39. Buck bihurtailuen irteerako korronteen uhin formak.

TAULA 14. Buck bihurtailuen korronteen ezaugarriak.

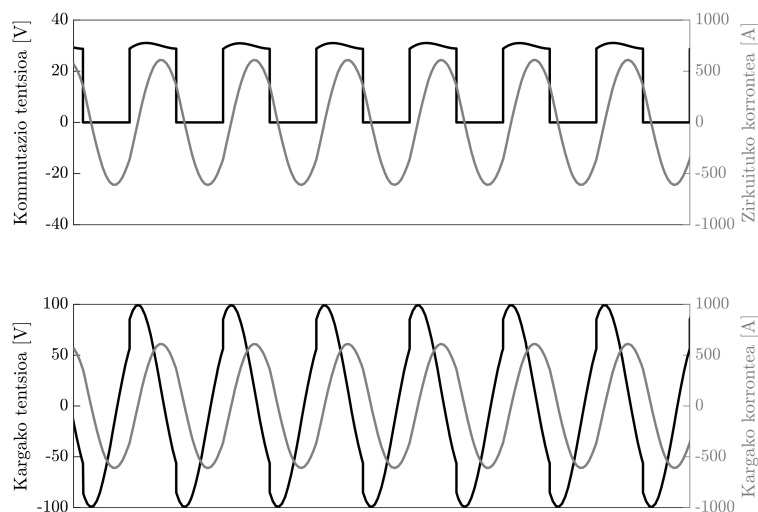
	Buck1	Buck2	Buck1+Buck2
I_{avg} [A]	99,2	99,2	198,5
ΔI [A]	8,9	8,9	10
ΔI [%]	8,97	8,97	5,04

Azkeneko etapa da indukzio sistema elikatuko duen zubi erdi konfigurazioko inbertsorearena. Indukzio karga erresonantzia kondentsadore batekin konektatu da seriean, serieko erresonantzia zirkuitua eratuz. Atal honetan, sistemak erresonantzian lan egitea behartu da (Irudia 40), korronte albait altuena lortuz; beraz, potentzia maximoa emanez. Irudian bertan ikusten da sistema erresonantzian dagoela, korronte eta tentsioa fasean

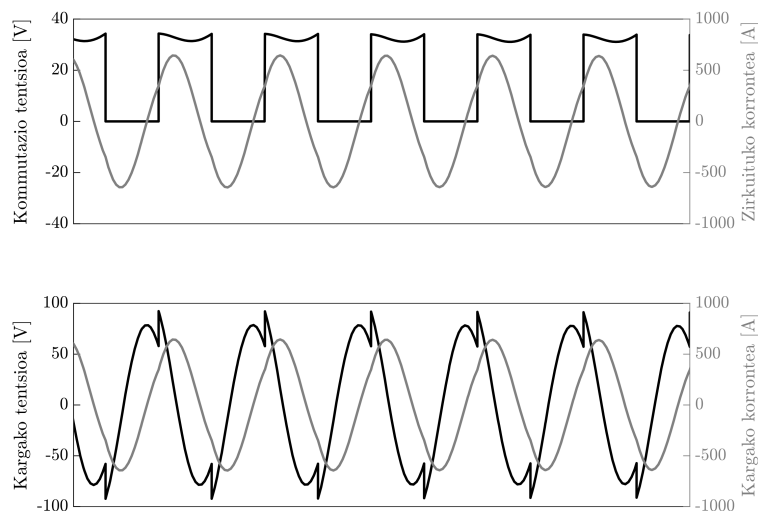
daudelako. Erresonantzia frekuentzia baino balio altuagoekin lan egitean, korronea atzeratu egiten da tentsioarekiko, eta sistemak modu induktiboan lan egiten duela esaten da (Irudia 41). Aldiz, erresonantzia frekuentzia azpitik, korronea aurreratu eta modu kapazitibora igarotzen da (Irudia 42). Hurrengo atalean azalduko da sakonago erresonantzia zirkuituaren funtzionamendua.



Irudia 40. Inbertsorearen irteerako tentsioa eta korronea (goian), eta kargako tentsioa eta korronea (behean). Erresonantzia puntua: 31,1 kHz.



Irudia 41. Inbertsorearen irteerako tentsioa eta korronea (goian), eta kargako tentsioa eta korronea (behean). Funtzionamendu induktiboa: 33 kHz.



Irudia 42. Inbertsorearen irteerako tentsioa eta korronea (goian), eta kargako tentsioa eta korronea (behean). Funtzionamendu kapazitiboa: 29 kHz.

4.4 Erresonantzia zirkuituaren diseinua

Erresonantzia zirkuituen funtzionamendu orokorra eta zirkuitu motak azaldu dira 1. kapituluan; bertan sortzen diren uhin formak ikusi dira aurreko atalean. Orain, indukzio

sistema konkretu honek baliatzen duen erresonantzia zirkuituaren azalpen zehatzagoa eman [20] eta diseinuari ekingo zaio.

Korronte alternoko erresonantzia zirkuituek frekuentzia berezi batekin egiten dute lan (1.4), zeina zehazten den erresistentzia, kapazitate eta induktantzia balioen arabera. Serieko erresonantziaren (Irudia 5a) kasuan, erresonantzia baldintza zuzena – erraza – da, zero fasean inpedantzia minimoa duelarik; paraleloan (Irudia 5b), berriz, kontu handiagoz definitu behar dira parametroak.

Serieko RLC zirkuituan erresonantzia gertatzen da erreaktantzia induktibo eta kapazitiboaren balioak berdinak direnean, bata bestearekin deuseztatuz, 180° defasatuta baitaude.

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R \quad (4.4)$$

Aurreko ataleko azken hiru grafikoei erreparatuz, hiru funtzionamendu modu bereizten dira, zirkuituko tentsioaren eta korrontearen arteko desfasearen arabera: 1) erresonantzia (Irudia 40), 2) funtzionamendu induktiboa (Irudia 41) eta 3) funtzionamendu kapazitiboa (Irudia 42). Hiru modu horiek frekuentziarekin aldatzen dira, aurrez aipatu bezala. Erresonantzia puntuan inpedantzia minimoa eta guztiz erresistiboa denez, zirkuituan disipatutako potentziaren batezbestekoa eta zirkuituko korrontearen balioa puntu gorenean egongo dira; eta erresonantzia frekuentziatik aldentu ahala (izan gora edo behera), balio horiek nabarmen egingo dute behera.

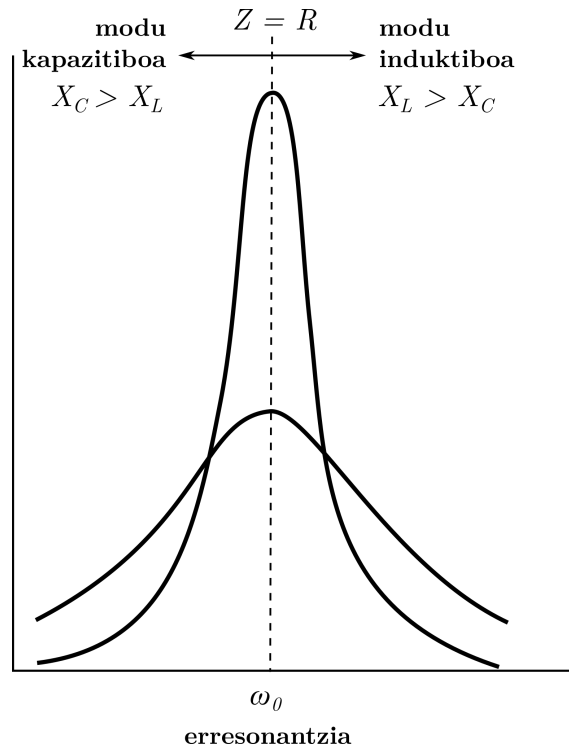
Kalitate faktorearen (1.3) arabera izango da batez besteko potentzia edota korrontearen kurbaren zorrotasuna. Q handi batekin forma zorrotzagoa izango du; aldiz, Q txikiagoekin balio maximoa txikitu eta jaitsiera ez da horren maldatsua izango (Irudia 43).

Serieko erresonantzia zirkuitu batean disipatzen den batez besteko potentzia adieraz daiteke korronte eta tentsio balio efikazen bidez:

$$P_{avg} = I_{rms}^2 R = \frac{V_{rms}^2}{Z^2} R = \frac{V_{rms}^2 R}{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (4.5)$$

Jarraian, erreaktantzia induktibo eta kapazitiboaren adierazpenak erabiliz eta erresonantzia frekuentziaren ekuazioa (1.4) aplikatuz, frekuentziaren menpe jarriko da potentzia:

$$(X_L - X_C)^2 = \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2 = \frac{L^2}{\omega^2} (\omega^2 - \omega_0^2)^2 \quad (4.6)$$



Irudia 43. Erresonantzia zirkuituaren batez besteko potentzia edo korrontearen balioaren tendentzia frekuentziarekiko.

(4.5) eta (4.6) bateratuz:

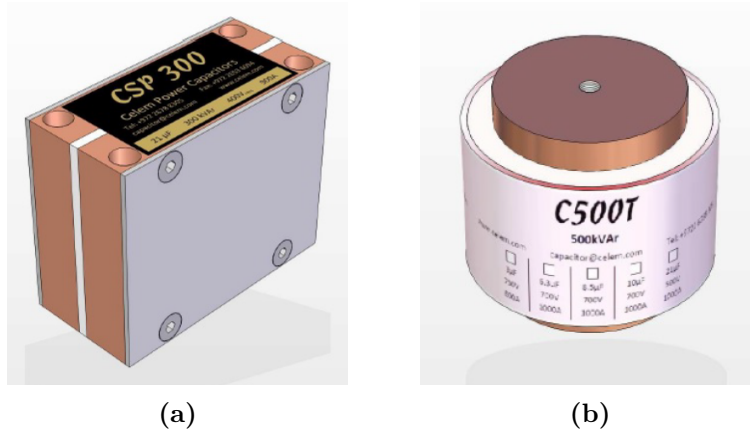
$$P_{avg} = \frac{V_{rms}^2 R \omega^2}{R^2 \omega^2 + L^2 (\omega^2 - \omega_0^2)^2} \quad (4.7)$$

Erresonantzia frekuentzian disipatutako batez besteko potentzia lortuko da tentsioaren karratua erresistentziarekin zatituta. Izan ere, eta aurrez aipatu bezala, puntu horretan erreaktantzia induktibo eta kapazitiboek elkar ezabatuko dute, inpedantzia zeharo erresistiboa izanik (4.4).

Ondorengo lerroetan konfiguraturako dira erresonantzia kondentsadoreak. Horretarako erabiliko dira CELEM etxearen CSP300 eta C500T kondentsadoreak. Hona hemen laburpen bat kondentsadore mota bakoitzaren kapazitate eta kopuruena:

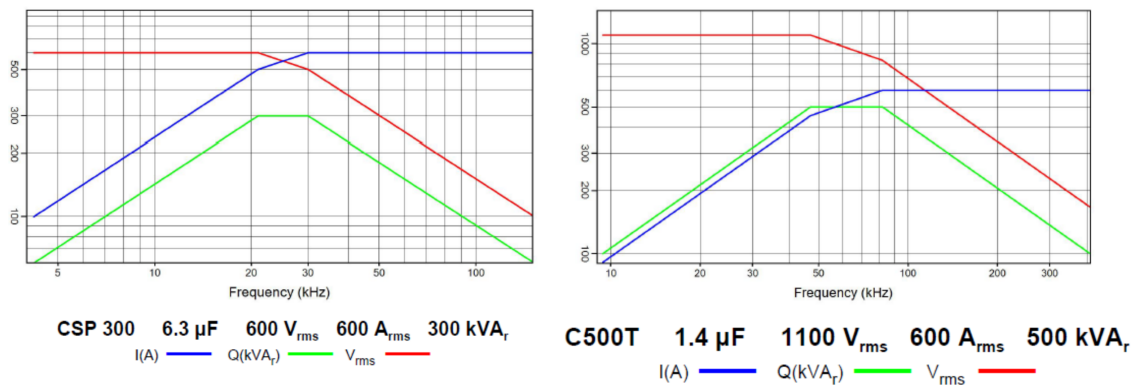
TAULA 15. CELEMen kondentsadoreen ezaugarriak.

Mota	Kapazitatea	Kopurua
CSP300	6,3 μF	8
C500T	1,4 μF	16



Irudia 44. CELEMen kondentsadoreak: a) CSP300 eta b) C500T.

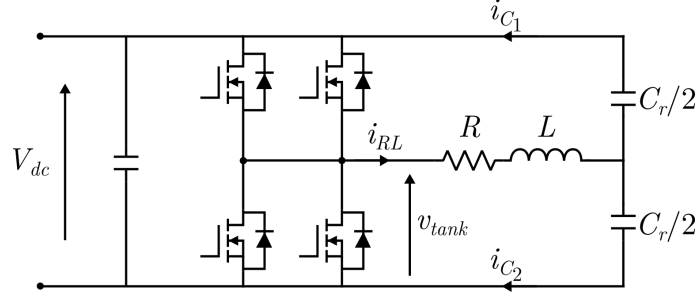
Kondentsadore horiek tentsio eta korrante mugak dituzte domeinu frekuentzian (Irudia 45), hots, frekuentzia jakin batzuetan ezin dituzte tentsio eta korrante balio batzuk gainditu. Bestela, kondentsadoreak degradatzeko arriskua dago; eta, kasu horretan, bere-nak ez diren beste kapazitate balio batzuk izango dituzte, sistema desorekatu edota kontrola galduz.



Irudia 45. CELEMen kondentsadoreen mugak.

Aipatu bi kondentsadore moten serie eta paralelo konexioak konbinatuz osatuko dira kondentsadore bankuak (biak ala biak berdinak). Helburua, esan bezala, erreaktantzia induktiboaren balio berdina duen erreaktantzia kapazitiboa lortzea da, erresonantzia puntua bilatu asmoz. Horretarako, baina, potentzia bihurgailuaren (Irudia 29) azken etapa

aztertuko da lehenik, ezagutzeko kondentsadoreetan eroriko den tentsioa eta horietatik igaroko den korronea; gero, beren mugekin konparatu ahal izateko.



Irudia 46. Potentzia bihurgailuaren azken etapa: inbertsorea eta erresonantzia zirkuitua.

$$i_{RL} = i_{C_1} + i_{C_2} \quad (4.8)$$

$$i_{C_1} = i_{C_2} \quad (4.9)$$

$$v_{tank} + i_{RL}(R + X_L) + i_{C_2}X_C = 0 \quad (4.10)$$

(4.8), (4.9) eta (4.10) bateratuz:

$$i_{RL} = \frac{v_{tank}}{R + X_L + X_C/2}, \quad (4.11)$$

non $v_{tank} = V_{ac}/2$ den eta $V_{ac} = V_{dc} \frac{4}{\pi}$ (Irudia 40).

Kondentsadore multzo bakoitzetik igarotzen den korronea kargakoaren erdia denez, korronea bera eta bankuan erortzen den tentsioa kalkula daitezke.

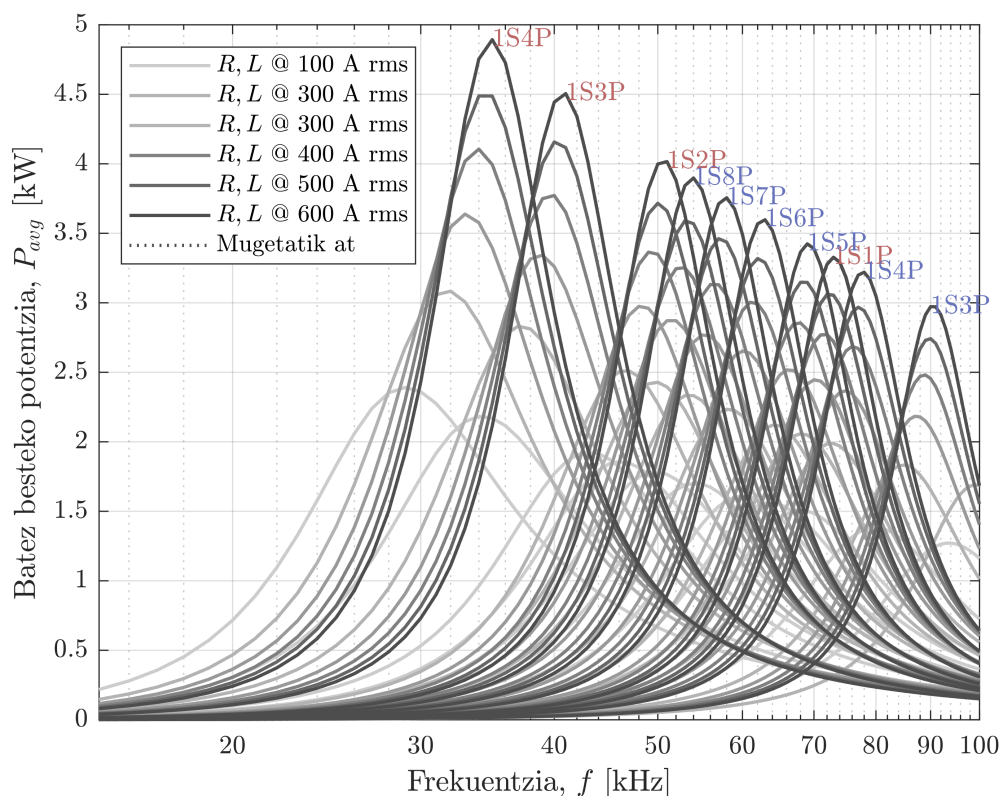
$$i_C = \frac{i_{RL}}{2} \quad (4.12)$$

$$v_C = i_C \frac{1}{\omega C_r/2} \quad (4.13)$$

Puntu honetan posible da erresonantzia kondentsadore bankua diseinatzea. Jarraian, departamentuan erabilgarri dauden bi erresonantzia kondentsadore moten (Taula 15) serie

eta paralelo konexioak (xSxP) konbinatuz aztertuko da erresonantzia zirkuituan disipatutako batez besteko potentzia.

Orain arteko garapenekin koherentzia bat bermatze aldera, aurretiko simulazioetan erabilitako operazio puntu berdina landuko da; 25,5 V-eko buseko tentsioa, alegia.



Irudia 47. Erresonantzia zirkuituan disipatutako batez besteko potentzia, 25,5 V-eko buseko tentsioarekin. Gorri kolorez CSP300 kondentsadoreen konfigurazioak izendatu dira, urdinez C500T motakoak.

Goiko grafikotik informazio anitz atera daiteke. Lehenengoa, eta aurretik aztertutakoa, R eta L parametroen balioak korrontearekin nabarmen aldatzen direla da; eskuratutako potentzian eraginez zuzenean. 100 A rms-ko inpedantziarekin lor daitekeen potentzia maximoa 600 A rms-tan duen balioarekin lor daitekeenaren erdia da. Horregatik da garrantzitsua zenbait korrontetan izango den inpedantziarekin ager daitezkeen kurbak marraztea, lan puntua zehatzago kokatu asmoz. Azpimarratu kurba bakoitzeko korrontea ez dela konstantea, ez duela zertan izan uneoro irudian adierazten den balioa; korrontea ere potentziaren antzeko joera baitu (Irudia 43), frekuentziarekin bere balioa aldatuz.

Kalitate faktoreari dagokionez, ondorioztatu da korronte handiagoetan ikusiko diren

erresistentzia eta induktantzia balioekin handituko dela Q -ren balioa. Izan ere, kurba ilunak zorrotzagoak dira argiak baino.

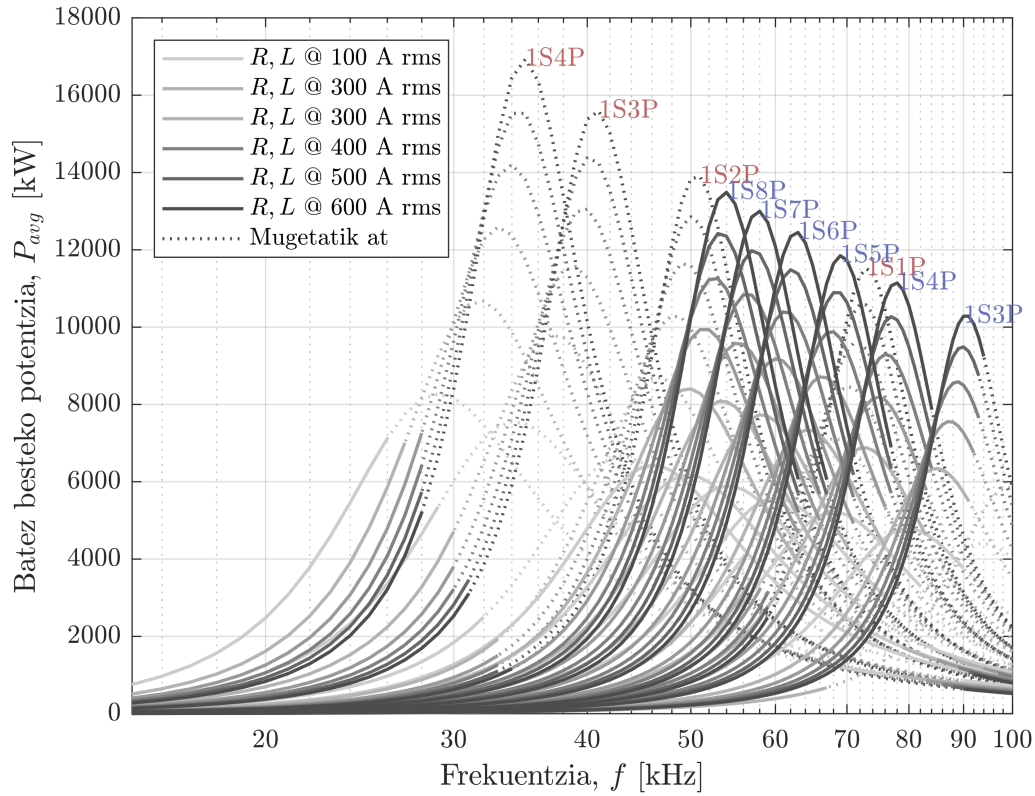
Konfigurazioei erreparatuz, guztiak paraleloan konektatutako kondentsadore bakunak dira. Kondentsadoreen serieko konexioek multzo osoaren kapazitatea jaisten dute (erresistentzia eta induktantziarekin gertatzen ez den bezala); ondorioz, erresonantzia puntua urrunduz. Horregatik, 100 kHz-erainoko frekuentzietan erresonantzen duten konbinazio guztiak dira 1SxP motakoak. Frekuentzia barrutia handituz agertuko lirarteke kurba gehiago.

Bestalde, kondentsadoreen tentsio eta korrante mugak (Irudia 45) aztertu dira. Ikusi da 25,5 V-eko buseko tentsioarekin muga horiek ez direla gainditzen. Hori horrela, tentsio horrekin edozein operazio puntutan egin daiteke lan.

Berebat, muga horiek potentziaren kurbetan izango luketen eragina hobeto ikusteko, buseko tentsioa 1500 V-era igo da. Jakina da ez dela balio erreal bat; batetik, lortutako potentziak ikaragarri handiak direlako, eta, bestetik, buck-aren irteeran ezin lor daitekeelako tentsio hori. Hala ere, interesgarria da ikustea kurbak nola marrazten diren muga horietatik kanpo (Irudia 48).

Txosten honetako azkeneko bi grafikoetako potentzia kurbak oso baliagarriak dira desio den operazio puntua bilatzerako orduan. Izan ere, indukzio bidezko berokuntza sistemetan, eta tenplatzean, bereziki, frekuentzia jakin batean lan egitea erabakigarria da. Lan egin nahi den frekuentzia aukeratzen da lehenbizi; korrontearen sartze sakonerarekin, eta, beraz, beroaren sakonerarekin zerikusi zuzena duena. Korrontearen intentsitatea ere aldagai esanguratsua da; horren arabera berotuko baita pieza gehiago edo gutxiago. Bi parametro horiekin sistemari dagokion erresonantzia puntua aurki daiteke kurbetan; eta, horrela, kondentsadore banku biak konfiguratu. Era berean, kondentsadoreen mugak gainditzen diren ala ez jakin daiteke momentuan bertan.

Adibidetzat har daiteke proiektu guztian zehar landu den operazio puntua: 31,1 kHz-eko 441 A rms-ko korrantea. Landu diren konfigurazioetara mugatuz gero, korrontearen balio horrekin lor daitekeen potentzia maximoa 4 eta 4,5 kW artean kokatzen da (< 5 kW), 34 kHz inguruko frekuentzian. Hala ere, tendentzia aztertuta, kHz gutxi batzuk jaitsez gero, sistema 5 kW emateko gai dela aurreikus daiteke. Eta puntu hori lortuko da CSP300 eta C500T kondentsadoreak beren artean konbinatuz (paraleloan, seguruena).



Irudia 48. Erresonantzia zirkuituan disipatutako batez besteko potentzia, 1500 V-eko buseko tentsioarekin. Gorri kolorez CSP300 kondentsadoreen konfigurazioak izendatu dira, urdinez C500T motakoak.

5 ONDORIOAK ETA ETORKIZUNERAKO ILDOAK

Kapitulu honetan proiektuan zehar ateratako ondorioak laburbilduko dira paragrafo gutxi batzuetan. Eta, lan honen azken hausnarketa gisa, etorkizun labur batera begira, indukzio bidezko tenplatze bankuaren potentzia elektronikako zatiarekin amaitzeko beharrezko pausuak zerrendatuko dira.

Hasteko, induktorea diseinatu da 3. kapituluan. Bertan ikusi da induktorea hozteko sistemaren beharrik ez dagoela analisisian baliatutako kargarekin. Batetik, induktorea bera asko ez dela berotzen aztertu da; eta sekzioak (induktorearena eta urarena) zehaztean, beroa disipatzeko beharrik ez dagoela ere ondorioztatu da. Hala ere, esan bezala, etorkizuneko entseguetan hozte zirkuitua beharrezkoa izango dela aurreikusten da, beste karga batzuk aplikatuko baitira.

Kapitulu berean aztertu da indukzio karga nola aldatzen den frekuentzia, korronea eta tenperaturaren arabera. Ondoren, potentzia bihurtzailua simulatzeko, karga hori frekuentzia eta korronearekiko karakterizatu da, giro tenperatura konstate batentzat. Bi doikuntzetan erantzun onak hauteman dira.

Elementu finituen analisiarekin jarraituz, hiru dimentsioko simulazioa burutu da sistema errealak nola funtzionatuko lukeen aurreikusteko. Bertan ikusi da zein neurritako gogortasun kapa lor daitekeen aplikatutako simulazio parametroekin. Kapa hori neurtzeko, baina, austenita kapa erabili da; izan ere, dutxaren eragina ez da guztiz ondo aplikatu (hobetzeke etorkizunean).

Kapituluz aldatuz, 4.ean sistema osoa (potentzia bihurtzailua eta indukzio karga) simulatu da. Departamentuan ezaguna den bihurtzailuaren diseinua ondo egokitu da indukzio bidezko tenplatze bankura. Eskuratutako uhin formetan ikusi da aplikatutako kontrolak ondo erregulatzen dutela sistema.

Azkenik, erresonantzia zirkuitua diseinatu da; hain zuzen, erresonantzia kondentsadore bankuak. Ikerlanen erabilgarri dauden erresonantzia kondentsadoreen konbinaketa aztertu da. Horrekin lortu nahi da, berotze tratamendu bakoitza egiterako orduan, lan egin gura den operazio puntua izateko zein konbinazio behar den erlatiboki azkar jakitea. Horrez gain, kondentsadoreen mugak, zirkuituaren kalitate faktorea eta abar grafikoari begiratuaz bakarrik ezagutzea ahalbidetzen du.

5.1 Etorkizunerako ildoak

Master bukaerako lan honen izenburuak dio: “Indukzio bidezko berokuntza sistema bat diseinatzea, abiaraztea eta balioztatzea”. Diseinua ondo gauzatu da, baina denbora eta lehen tasun kontuak tarteko, ezin izan da abiarazi; ondorioz, ezta balioztatu ere. Horregatik, atal hau azkeneko bi ekintza horiei bideratuta dago batik bat.

Hala ere, etorkizun hurbileko ondorengo bi zereginak ordenagailu bidezko analisiari lotuta daude, hots, ez dago sistema fisikoki muntatu beharrik (egin daitezke aurretik edo ostean):

- Hiru dimentsioko simulazioan dutxa ondo aplikatu ez dela aipatu da. Tenplatze prozesuan garrantzitsua da pieza berotu bezain laster hoztea. Sinpletu asmotan, pieza osoa berotu eta dena batera hoztu da gero. Hori, baina, ez da batere industrialia; izan ere, gogortasun kaparen homogeneotasuna galtzen da. Horregatik, ondo legoke beste simulazio bat egitea; dutxa aplikatuz induktoretik atera berri diren piezaren zatietan. Behin simulazioa ondo burutzean, austenita eta martensita kapak ikusaraziko lirarteke FLUXen.
- Kargaren karakterizazioari dagokionez, temperaturaren eragina PLECSen aplikatzea litzateke hurrengo urratsa; indukzio karga berotu ahala potentzia bihurgailuaren portaera aztertzeke.

Abiarazte eta balioztatze atalei dagokienez:

- Potentzia bihurgailua muntatu ostean, indukzio bankutik kanpo jarriko da martxan.
- Behin bihurgailuak funtzionatzen duenean, indukzio sisteman ezarri eta abiaraziko da; gero, aurretiko simulazioak balidatuz.
- Azkenik, askotariko piezekin prozesu anitzak burutzea legoke; hori baita bankuaren funtsa.

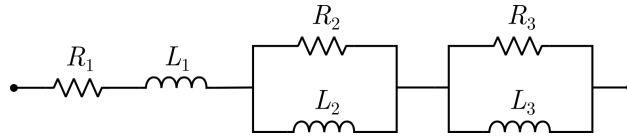
Erreferentziak

- [1] V. Rudnev, D. Loveless, R. Cook, and M. Black, *Handbook of Induction Heating*, CRC, Ed. INDUCTOHEAT, Inc., 2017.
- [2] J. Acero, C. Carretero, R. Alonso, and J. M. Burdío, “Design of efficient loads for domestic induction heating applications by means of non-magnetic thin metallic layers,” in *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2016, pp. 3026–3031. DOI: 10.1109/APEC.2016.7468294.
- [3] R. E. Haimbaugh, *Practical Induction Heat Treating*. ASM International, 2001.
- [4] “Industrial induction heating solutions,” GH INDUCTION. (), [Online]. Available: <http://www.ghinduction.com/>.
- [5] O. Lucía, P. Maussion, E. J. Dede, and J. M. Burdío, “Induction heating technology and its applications: Past developments, current technology, and future challenges,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 5, pp. 2509–2520, 2014. DOI: 10.1109/TIE.2013.2281162.
- [6] M. A. Dzieniakowski, “Power electronics converters in induction heating - the survey,” in *2017 Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE)*, 2017, pp. 1–6. DOI: 10.1109/PAEE.2017.8009013.
- [7] Z. Ye and Zhixiang Liang, “Modeling and design of a pulse phase modulated resonant inverter system,” in *INTELEC 2008 - 2008 IEEE 30th International Telecommunications Energy Conference*, 2008, pp. 1–7. DOI: 10.1109/INTLEC.2008.4664031.
- [8] H. Sarnago, J. M. Burdío, and O. Lucia, “High-frequency gan-based induction heating versatile module for flexible cooking surfaces,” in *2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2019, pp. 448–452. DOI: 10.1109/APEC.2019.8721779.
- [9] Altair, Ed., *Volume 3, Physical applications: Magnetic, electric, thermal,...* 2020.
- [10] Altair, Ed., *Volume 1, General tools, geometry and mesh*, 2020.
- [11] Altair, Ed., *Volume 2, Physical description, solving and postprocessing*, 2020.
- [12] Altair, Ed., *Volume 4, Circuit coupling, kinematic coupling, multiphysics coupling and skew*, 2020.
- [13] J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, *A Heat Transfer Textbook*, 3rd ed. Cambridge, Massachusetts, U.S.A.: Phlogiston Press, 2004, ch. 3, p. 139. [Online]. Available: <http://web.mit.edu/lienhard/www/ahtt.html>.
- [14] D. Puyal, C. Bernal, J. M. Burdío, I. Millan, and J. Acero, “A new dynamic electrical model of domestic induction heating loads,” in *2008 Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2008, pp. 409–414. DOI: 10.1109/APEC.2008.4522754.
- [15] F. Forest, E. Laboure, F. Costa, and J. Y. Gaspard, “Principle of a multi-load/single converter system for low power induction heating,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 15, no. 2, pp. 223–230, 2000. DOI: 10.1109/63.838094.

- [16] F. Forest, S. Faucher, J. Gaspard, D. Montloup, J. Huselstein, and C. Joubert, “Frequency-synchronized resonant converters for the supply of multiwinding coils in induction cooking appliances,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 1, pp. 441–452, 2007. DOI: 10.1109/TIE.2006.888797.
- [17] B. W. Nelson, Ed., *Maximize SiC Dynamic Performace In Hard-Switched Applications*, CREE Wolfspeed, May 2021.
- [18] G. Abad, *Power Electronics and Electric Drives for Traction Applications*. 2017, ch. 4, pp. 193, 195.
- [19] P. Pal, D. Roy, A. Datta, P. Sadhu, and A. Banerjee, “Frequency-synchronized resonant converters for the supply of multiwinding coils in induction cooking appliances,” *Archives of Electrical Engineering*, vol. 65, no. 4, pp. 827–841, 2016. DOI: 10.1515/aee-2016-0058.
- [20] HyperPhysics, Ed. “Resonance.” (), [Online]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/serres.html#c2>.
- [21] C. Carretero, O. Lucía, J. Acero, J. M. Burdío, and R. Alonso, “Passive network equivalent of an induction system for domestic cookers applications based on fea tool simulation,” in *2011 Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2011, pp. 1753–1758. DOI: 10.1109/APEC.2011.5744833.

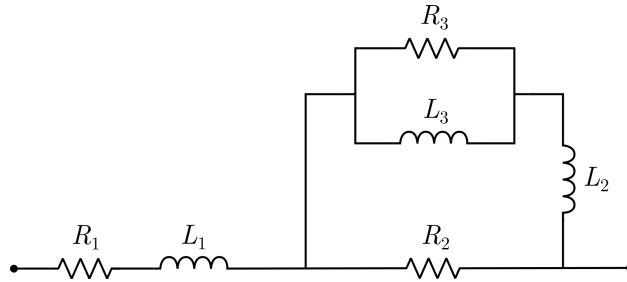
Eranskina A Zirkuitu pasibo baliokideen konparaketa

Indukzio bidezko berokuntza sistemetan karga adierazteko erabiltzen diren erresistentzia eta induktantzia baliokideen balioak aldatzen dira frekuentziarekin, korrontearekin eta temperaturarekin (3. kapitulua). Frekuentziaren eragina islatzeko zenbait R eta L -z osatutako sareak erabiltzen dira. Eranskin honetan literaturan gehien erabiltzen diren bi zirkuitu landuko dira: Foster-en zirkuitu baliokidea (Irudia 49) eta Cachan-go unibertsitateko ikertzaile talde batek garatutako sarea (Irudia 50). Inpedantzia baliokideak (A.1) eta (A.2) ekuazioekin adierazten dira, hurrenez hurren.



Irudia 49. Foster-en zirkuitu baliokidea [14].

$$Z_{bal}(\omega) = R_1 + j\omega L_1 + (R_2 || j\omega L_2) + (R_3 || j\omega L_3) \quad (\text{A.1})$$



Irudia 50. Cachan-go unibertsitatean garatutako zirkuitu baliokidea [15],[16].

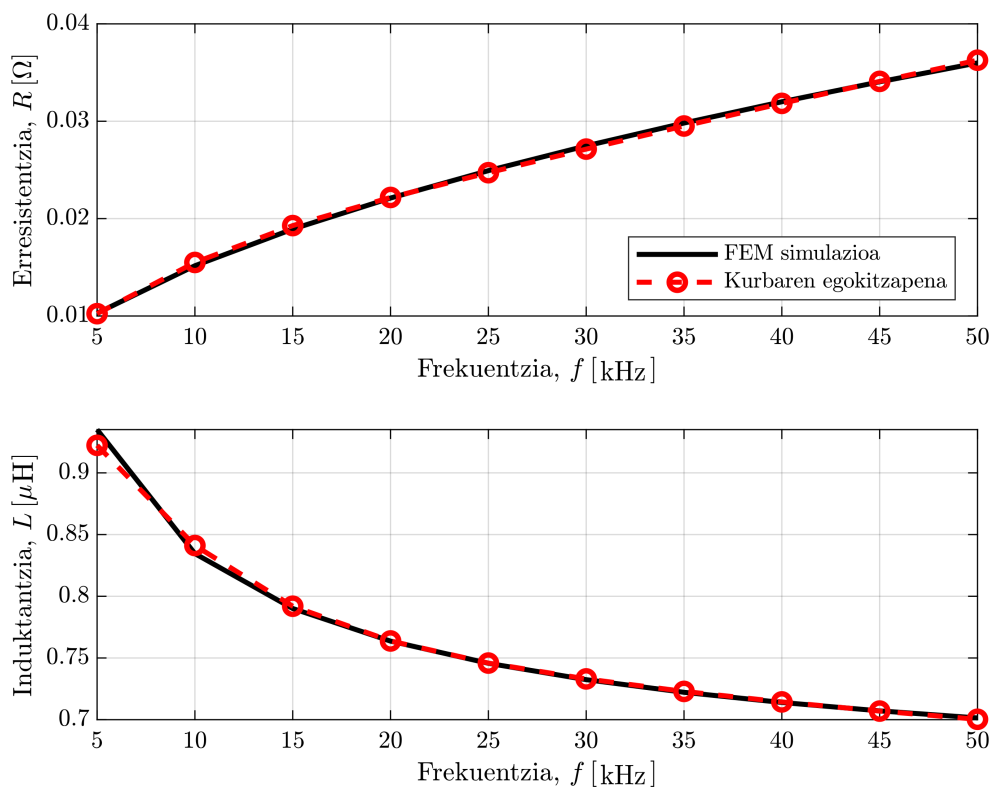
$$Z_{bal}(\omega) = R_1 + j\omega L_1 + (R_2 || (R_3 || j\omega L_3) + j\omega L_2) \quad (\text{A.2})$$

Foster-en zirkuitu baliokidearen azalpena 4. kapituluan ageri da. Cachan-go unibertsitatean garatutako zirkuituak antzera funtzionatzen du. Hala ere, sinpletasuna tarteko, bigarrenarekin inpedantzia hobeto egokitzen dela diote batzuek [21]. Kasu honetan, baina, biak ala biak hiruna erresistentzia eta induktantziak daude osatuta; osagai kopuru berdina dute, hau da, bata ez da bestea baino sinpleagoa.

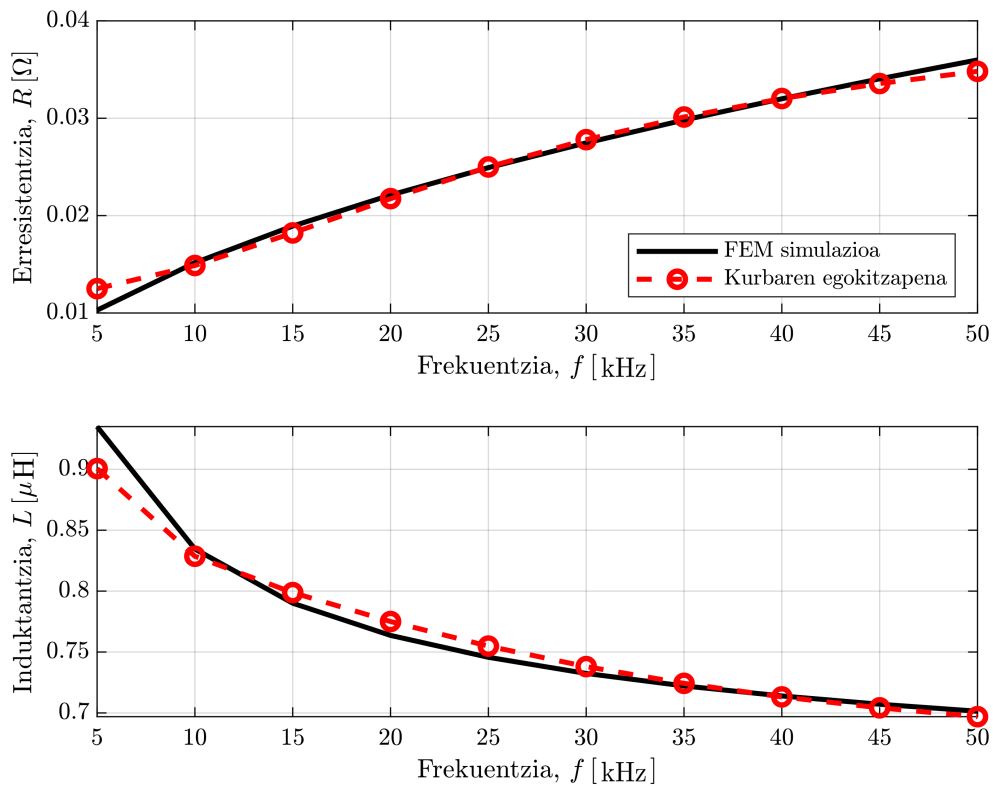
MATLABen bi egokitzapenak kalkulatu dira, FLUXen simulatutako kurbaren eta sare bakoitzaren ekuazioen artean karratu txikiaren metodoa aplikatuz. Horrela ikusi da Foster-en konfigurazioaren hurbilketa zertxobait hobea dela (Irudia 51), baina frantsesak

ere oso ondo doitzen du (Irudia 52).

Azkenik, erabaki da Foster-en sare murriztua (Irudia 26) baliatzea frekuentziak inpedantzia duen eragina islatzeko. Izan ere, proiektu honetan frekuentzia nahiko altutan egingo da lan, eta hasieran duen erroreak ez du simulazioa oztopatuko. Horrez gain, bina R eta L erabiltzen direnez, ondorengo analisiak asko sinplifikatzen dira.



Irudia 51. Kargaren inpedantzia frekuentziarekiko, Foster-en sarea baliatuz ($400 A_{rms}$, $25\text{ }^\circ\text{C}$).

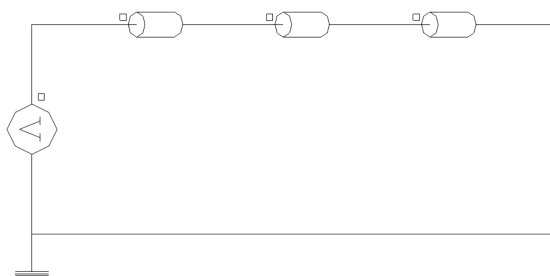


Irudia 52. Kargaren inpedantzia frekuentziarekiko, Cachan-go unibertsitateko sarea baliatuz ($400 A_{rms}$, $25\text{ }^\circ\text{C}$).

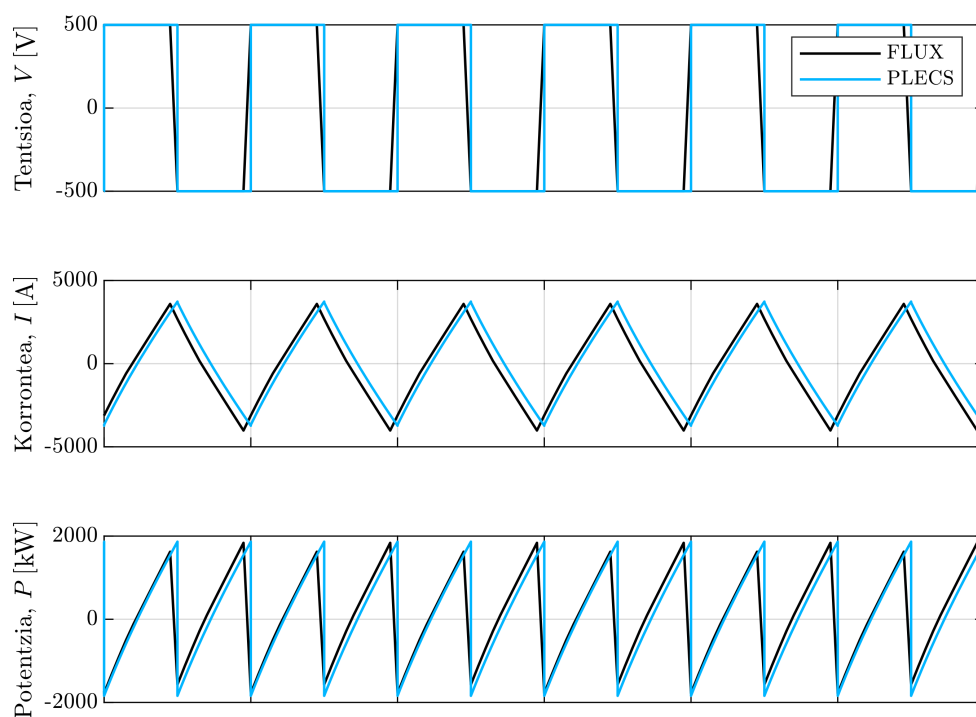
Eranskina B Osagai ez linealen sinplifikatzea

Erresistentziak eta induktantziak berez ez dira linealak, hau da, korrontearekin aldatu egiten dira beren balioak. Linealtasun ez hori PLECSen aplikatu daiteke, osagai ez linealak eskuragarri baititu liburutegian. Horretarako, 4. kapituluaz azaldu bezala, FLUXen simulatutako korronte balio bakoitzarentzat Foster-en zirkuitu baliokiderako osagaiak kalkulatu dira MATLAB bidez. Kargara doan – zubi erdiko inbertsorearen irteerako – korronte triangeluarra da (erresonantzia kondentsadoreak gehitu gabe) eta FLUXen simulatutakoa sinusoidala. Gainera, korrontearen uhin formarekiko beharrezkoak, balio efikazarekiko kalkulatu dira osagaiok.

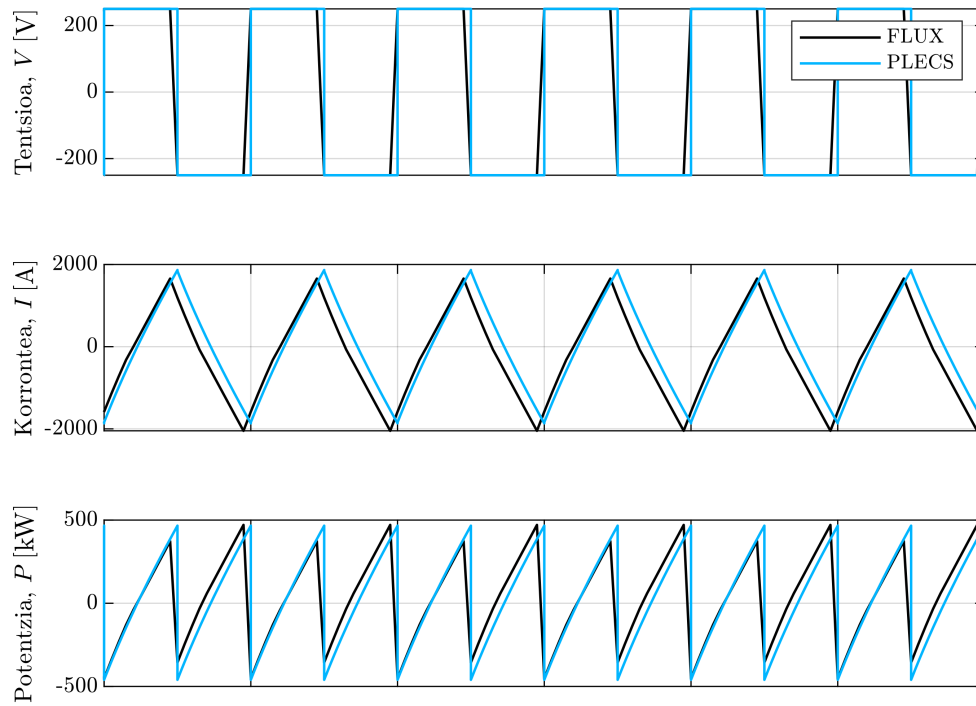
Simplifikazio hori baliozkotu asmoz, buelta eman zaio simulatzeko moduari. Indukzio sistemari korronte sinusoidala aplikatu beharrezkoak, inbertsoreak irteeran emango duen tentsio karratuarekin elikatu da induktorea, eta zer korronte lortzen den ikusi. Horretarako, FLUXeko aplikazio magnetiko iragankorra erabili da; korronte iturriaren ordez tentsioa aplikatuz (Irudia 53). Gero, PLECSen egoera horiek simulatu eta ikusi da lortutako korronteak parekoak direla. Horrela eman da ontzat hurbilketa.



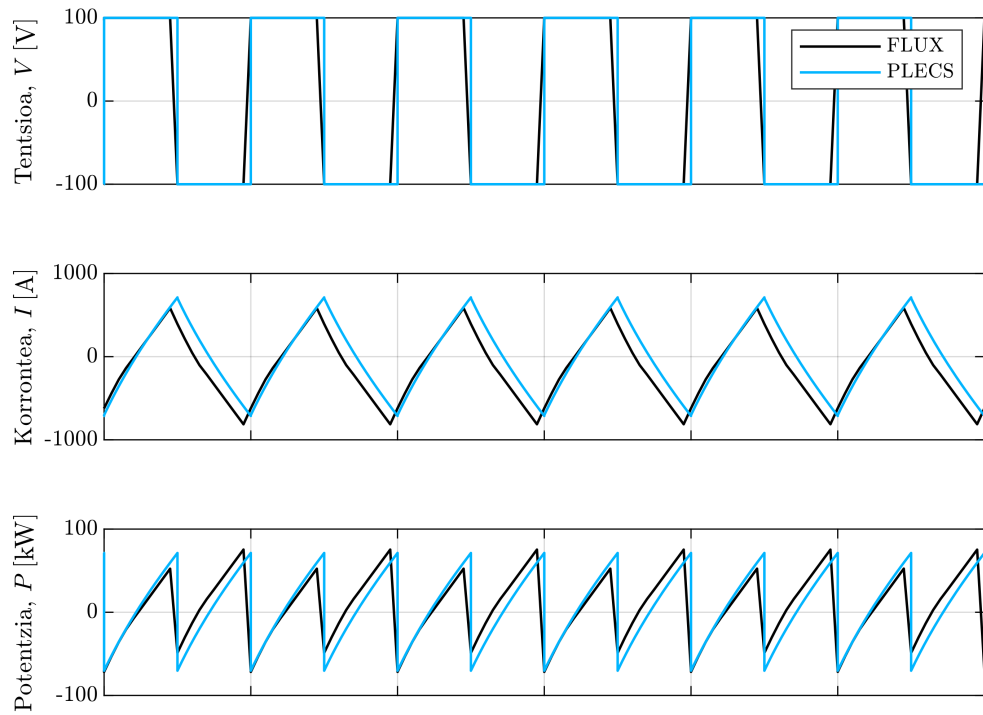
Irudia 53. Zirkuitu elektrikoa 2D (tentsioarekin elikatuz).



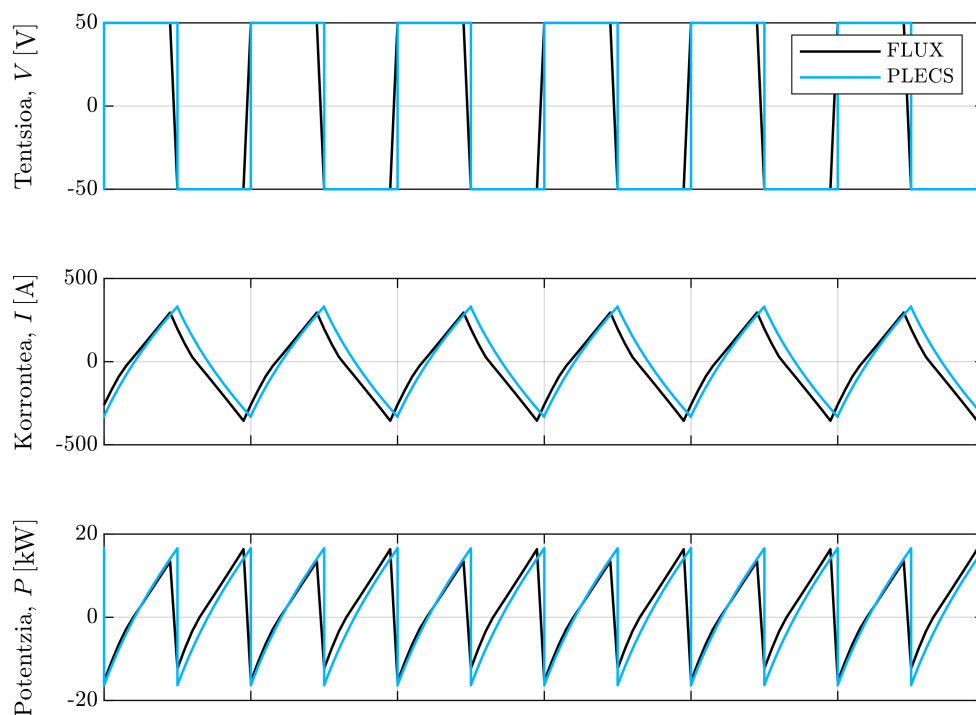
Irudia 54. FLUXeko eta PLECSeko uhin formen konparaketa 500 V-eko tentsio karratu-arekin elikatuz (% 50eko lan zikloa 50 kHz-etan).



Irudia 55. FLUXeko eta PLECSeko uhin formen konparaketa 250 V-eko tentsio karratu-arekin elikatuz (% 50eko lan zikloa 50 kHz-etan).



Irudia 56. FLUXeko eta PLECSeko uhin formen konparaketa 100 V-eko tentsio karratu-arekin elikatuz (% 50eko lan zikloa 50 kHz-etan).



Irudia 57. FLUXeko eta PLECSeko uhin formen konparaketa 50 V-eko tentsio karratu-arekin elikatuz (% 50eko lan zikloa 50 kHz-etan).