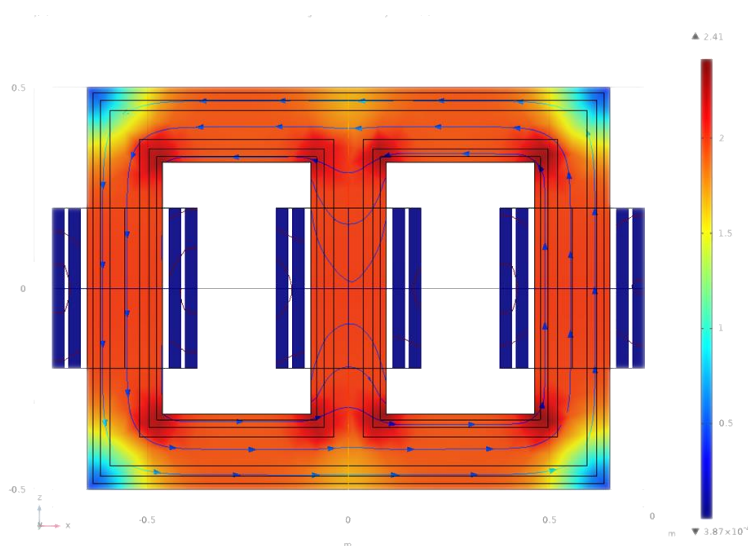


Industria Teknologiaren Ingeniaritzako Gradua

GRADU AMAIERAKO LANA

POTENTZIA-TRANSFORMADORE BATEN MODELATZEA COMSOL MULTIPHYSICS® PROGRAMAREN BITARTEZ.



Ikaslea: <Foruria Egia, Unai>

Zuzendaria: <Aranzabal Santamaria, Itxaso>

Ikasturtea: <2023-2024>

Data: <Bilbo, 2024, ekaina, 28>

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

BILBOKO
INGENIARITZA
ESKOLA
DE INGENIERÍA
DE BILBAO

Laburpena

Potentzia-transformadoreek energia elektrikoaren banaketan paper garrantzitsua jokatzen dute, transmisio efektiboa bermatzeko tentsio elektriko mailak aldatuz. Makina hauen modelatze eta simulazioen zehaztasunak berebiziko garrantzia du hauen diseinu eta funtzionamendu optimoa lortzeko. Lan honen helburua, COMSOL Multiphysics® Elementu Finituetako Metodozko (EFM) programaren bitartez, potentzia-transformadore baten eredua egitea eta simulatzea da, gero literaturan aipatzen diren eredu baliokideen bidez lorturiko emaitzak konparatu asmoz.

Gako-hitzak

Transformadore elektriko, potentzia-transformadore, makina elektriko, fluxu magnetiko, COMSOL Multiphysics®, elementu finitu.

Abstract

Power transformers play a crucial role in electrical energy distribution, converting voltage levels to ensure efficient transmission. Accurate modelling and simulation of these devices are essential for their optimal design and performance. The aim of this work is to build a model of a power transformer and to simulate with Finite Elements Method (FEM) program COMSOL Multiphysics®, to afterwards compare it to the results of the equivalent models that appear on literature.

Keywords

Electrical transformer, power transformer, electrical machine, magnetic flux, COMSOL Multiphysics®, finite element.

Resumen

Los transformadores de potencia desempeñan un papel crucial en la distribución de energía eléctrica, convirtiendo los niveles de voltaje para garantizar una transmisión eficiente. El modelado y la simulación precisos de estos dispositivos son esenciales para su diseño y rendimiento óptimo. El objetivo de este trabajo es construir un modelo de un transformador de potencia y simularlo con el programa de Métodos de Elementos Finitos (MEF) COMSOL Multiphysics®, para luego compararlo con los resultados de los modelos equivalentes que aparecen en la literatura.

Palabras clave

Transformador eléctrico, transformador de potencia, máquina eléctrica, flujo magnético COMSOL Multiphysics®, elementos finitos.

Aurkibidea

IRUDIEN ZERRENDA.....	6
TAULEN ZERRENDA	7
NOTAZIOA.....	8
1. SARRERA.....	9
2. TESTUINGURUA.....	10
2.1 Lanaren ikuspegia.....	10
2.2 Oinarri Teorikoa.....	10
Transformadorea.....	10
Eremu elektromagnetikoa.....	12
Histeresi-zikloa.....	12
Foucault-en korronteeek eragindako galerak.....	14
Transformadore ideala.....	15
Transformadore erreala.....	17
Zirkuitu baliokidea.....	18
Transformadore trifasikoa.....	20
2.3 COMSOL Multiphysics®.....	20
Programaren moduluak.....	21
Programaren atalak.....	21
3. GARAPEN IRAUNKORREKO HELBURUEKIKO ETA PRINTZIPIO ETA BALIO DEMOKRATIKOEKIKO LOTURA	23
4. LANAREN HELBURUAK ETA IRISMENA.....	25
4.1 Helburuak.....	25
4.2 Irismena.....	6
5. LANAK DAKARTZAN ONURAK.....	7
Onura teknikoak.....	8
Egileraren onurak.....	9
Gizartearentzako edo komunitatearentzako onurak.....	10
Hizkuntza-onurak.....	10
6. BALDINTZEN DESKRIBAPENA ETA/EDO GAIAREN EGOERAREN AZTERKETA.....	10
6.1 Baldintzen deskribapena.....	10
Baldintza teknikoak	12
Baldintza teknologikoak.....	12
Dokumentazio- eta gida- baldintzak.....	14
Baldintza linguistikoak.....	15

6.2	Egoeraren azterketa	17
	COMSOL enpresaren transformadoreen ereduak.....	18
	Transformadoreen modelatzearen inguruko lan akademikoak	20
	Transformadoreen inguruko liburuak.....	20
	GrAL-aren inguruko lanak eta liburuak.....	21
7.	METODOLOGIA ETA ANTOLAKUNTZA.....	21
7.1	Metodologia.....	23
7.2	Antolakuntza.....	25
	Ikasketa-fasea.....	25
	Diseinu-fasea.....	25
	Simulazio-fasea.....	26
	Kalkulu-fasea	26
7.3	Gantt diagrama.....	26
8.	AUKEREN ANALISIA.....	26
9.	ARRISKUEN ANALISIA.....	26
10.	PROPOSATUTAKO IRTENBIDEEN AUKERAKETA/DESKRIBAPENA.....	27
10.1	Ereduaren eraketa.....	27
	Parametroak.....	27
	Metodoak.....	27
	Definizioak.....	27
	Geometria	27
	Materialak.....	27
	Fisika.....	28
	Sarea	28
	Ikasketak.....	29
	Emaitzen atala.....	29
11.	EMAITZAK, PRODUKTUAK, TEKNOLOGIAK, SORKUNTZAK, ONDORIOAK, ETORKIZUNEKO LERROAK.....	30
11.1	Emaitzak	30
	Hutseko Saiakuntza	30
	Zirkuitulaburreko Saiakuntza	30
11.2	Ondorioak.....	31
11.3	Etorkizuneko Lerroak.....	33
	BIBLIOGRAFIA.....	33
	ERANSKINAK	33

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

BILBOKO
INGENIARITZA
ESKOLA
ESCUELA
DE INGENIERÍA
DE BILBAO

IRUDIEN ZERRENDA

1. Irudia: Material ferromagnetiko baten asetasun kurba.....	13
2. Irudia: Material ferromagnetiko baten histeresi kurba.....	14
3. Irudia: Material ferromagnetiko solido baten eta xaflatu baten fluxu magnetikoen banaketa.....	15
4. Irudia: Transformadore ideal baten diagrama.....	16
5. Irudia: Transformadore erreal baten diagrama.....	17
6. Irudia: Transformadore baten diagrama, harilkatuen inpedantziak kontuan hartuz..	18
7. Irudia: Transformadore baten harilkatuen zirkuitu elektriko baliokidea.....	19
8. Irudia: Transformadore baten zirkuitu elektriko baliokidea.....	20
9. Irudia: Jarraitutako metodologiaren diagrama.....	30
10. Irudia: Lanaren Gantt diagrama.....	34

1. COMSOL Irudia: Nukleoko parametroak.....	50
2. COMSOL Irudia: Harilkatuko parametroak.....	50
3. COMSOL Irudia: Hutseko metodoa.....	51
4. COMSOL Irudia: Zirkuitulaburreko metodoa.....	51
5. COMSOL Irudia: Aldagai elektrikoak.....	52
6. COMSOL Irudia: Galera-koefizienteak.....	52
7. COMSOL Irudia: Galerak.....	53
8. COMSOL Irudia: Aukeraketak (Goi tentsioa, GT).....	53
9. COMSOL Irudia: Aukeraketak (Nukleoa).....	54
10. COMSOL Irudia: Aukeraketak (Transformadorea).....	54
11. COMSOL Irudia: Aukeraketak (Osoa).....	55
12. COMSOL Irudia: Integrazio-funtzioa (Airea).....	55
13. COMSOL Irudia: Integrazio-funtzioa (Nukleoa).....	56
14. COMSOL Irudia: Integrazio-funtzioa (Harilkatua).....	56
15. COMSOL Irudia: Geometria, bista orokorra.....	57
16. COMSOL Irudia: Lan-planoa, 1. errektangelua.....	57
17. COMSOL Irudia: Lan-planoa, 2. Errektangelua.....	58
18. COMSOL Irudia: Lan-planoa, 3. Errektangelua.....	58
19. COMSOL Irudia: Nukleoaren sekzio-konposaketa.....	59
20. COMSOL Irudia: Estruitutako nukleoaren sekzioa.....	59
21. COMSOL Irudia: Estruitutako nukleoaren sekzioa, kantuz.....	60
22. COMSOL Irudia: Estruitutako nukleoaren sekzioa, sekzio gehigarria.....	60
23. COMSOL Irudia: Amaierako nukleoaren itxura, kantuz (islapena eginda).....	61
24. COMSOL Irudia: Harilkatuaren lan-planoa.....	61
25. COMSOL Irudia: Harilkatuaren lan-planoa, zirkuluak.....	62
26. COMSOL Irudia: Harilkatuaren lan-planoa, zirkunferentziekin.....	62
27. COMSOL Irudia: Harilkatuaren estrusioa.....	63
28. COMSOL Irudia: Harilkatuaren estrusioaren kopiak, dagozkien zutabeetan.....	63
29. COMSOL Irudia: Geometria, osatuta.....	64
30. COMSOL Irudia: Materialak, burdin gozoa.....	64
31. COMSOL Irudia: Materialak, airea.....	65
32. COMSOL Irudia: Materialak, kobrea.....	65

33. COMSOL Irudia: Eremu magnetikoak, ikuspegi orokorra.....	66
34. COMSOL Irudia: Eremu magnetikoak, Ampereren legea 1.....	66
35. COMSOL Irudia: Eremu magnetikoak, isolamendu magnetikoa.....	67
36. COMSOL Irudia: Eremu magnetikoak, hasierako balioak.....	67
37. COMSOL Irudia: Eremu magnetikoak, harilkatuetako baten ezarpena.....	68
38. COMSOL Irudia: Eremu magnetikoak, nukleoan galerarik gabe (Zirkuitulaburreko kasua)	68
39. COMSOL Irudia: Eremu magnetikoa, nukleoa galerekin (Hutseko kasua).....	69
40. COMSOL Irudia: Sare orokorra	69
41. COMSOL Irudia: Sare orokorra, tamaina.....	70
42. COMSOL Irudia: Sarea, harilkatua (goiko eta beheko mugak).....	70
43. COMSOL Irudia: Sarea, harilkatua (ingurua)	71
44. COMSOL Irudia: Sarea, transformadorearen gainerako sarea.....	71
45. COMSOL Irudia: Hutseko analisia, ikuspegi orokorra.....	72
46. COMSOL Irudia: Hutseko analisia, fisiken hautaketa.....	72
47. COMSOL Irudia: Zirkuitulaburreko analisia, fisiken hautaketa	73
48. COMSOL Irudia: Emaitzak, hutseko analisia (fluxu magnetikoa).....	73
49. COMSOL Irudia: Emaitzak, zirkuitulaburreko analisia (fluxu magnetikoa).....	74
50. COMSOL Irudia: Emaitzak, hutseko anailisia (ebaketa-planoak).....	74
51. COMSOL Irudia: Emaitzak, hutseko analisia (balio-eratorriak).....	75

TAULEN ZERRENDA

1. Taula: Hutseko saiakuntzaren harilkatu primarioko korronteak.....	44
2. Taula: Hutseko saiakuntzaren harilkatu sekundarioko korronteak.....	44
3. Taula: Hutseko saiakuntzaren galerak.....	45
4. Taula: Zirkuitulaburreko saiakuntzaren harilkatu primarioko tentsioak.....	45
5. Taula: Zirkuitulaburreko saiakuntzaren harilkatu primarioko tentsioak.....	46
6. Taula: Zirkuitulaburreko saiakuntzaren galerak.....	46

NOTAZIOA

$\nabla \cdot$	Dibergentzia.
D	Desplazamendu elektrikoa.
$\nabla \times$	Errotazionala.
ρ	Karga dentsitatea.
E	Eremu elektrikoa.
B	Eremu magnetikoaren fluxua.
H	Eremu magnetikoaren intentsitatea.
J	Korrente dentsitatea.
μ	Iragazkortasun magnetiko.
K	Materialen konstantea.
f	Maiztasuna.
e	Indar elektroeragilea.
N	Espira kopurua.
φ	Fluxu magnetikoa.
E	Tentsioa.
X	Erreaktantzia.
L	Induktantzia.
ω	Abiadura angeluarra.
R	Erresistentzia.
Y	Admitantzia.
G	Konduktantzia.
B	Suszeptantzia.

1. SARRERA

Transformadore elektrikoa, tentsio eta korrante jakin bateko energia elektrikoa, beste tentsio-balio eta korrante-balio batzuetara transformatzeko ahalmena duen makina estatikoa da. Horretarako, nukleo magnetiko baten inguruan kiribildutako eta material eroalez egindako harilkatu primario bat korrante alernoarekin kitzikatzen da, korrante alerno honek sortutako eremu magnetikoak harilkatu sekundario baten korrantea sortzen duelarik.

COMSOL Multiphysics® programaren bitartez, lan honek transformadore baten modelatzea eta simulazioa du helburutzat. Eredu baliagarri bat lortu ostean, kalkuluak egingo dira eta literaturan dakarrenarekin konparatuko dira.

Gradu amaierako lan (hemendik aurrera, GrAL) honen gaia unibertsitateko ingeniari-tza elektrikoko sailak proposatutako gai batetik abiatu da, COMSOL Multiphysics® programarekin trebatzeko helburua izanik ideia nagusia. Aurretiazko ideia koroa-efektua modelatzea bazen ere, tutoreak berak proposatu zidan gaur egun proiektu gisa egikaritu den gai berria: transformadore baten modelatzea COMSOL Multiphysics® programaren bitartez.

Lan hau era ez-jarraian burutu dut: 2023 hasieran hasi nuen COMSOL Multiphysics® programaren ikasketa, eta azterketak eta lauhileko berria zirela medio, eten bat egin nuen. Bigarren lauhilekoan, elementu finituetan oinarritutako programaren oinarritzko ikasketa amaitu nuen eta transformadore elektrikoa simulatzeko behar nuen informazio guztia pilatzeari ekin nion: programak berak barneko liburutegietan gordetan dituen transformadoreen ereduak eskuratu nituen eta hauek oinarritzat hartuta sortutako beste transformadore batzuen inguruko pare bat artikulu irakurri nituen.

Kurtso amaieran, azterketak zirela eta, beste etenaldi bat egin nuen. Tarte horretan, *El trabajo de fin de grado. Guía para estudiantes, docentes y agentes colaboradores* [1] liburua irakurtzeari ekin nion, proiektu ororen errailak zelan ezarri ikasteko asmoz. 2023ko uda pasata, transformadoreen inguruko eta COMSOL Multiphysics® programaren inguruko ikasketak amaitzeari ekin nion, eta 2024 hasieran diseinu fasean eta simulazio fasean murgildu nintzen, eredu definitiboa lortzeko asmoz. Emaitzak aztertu eta prozesatu eta gero, 2024ko ekain aldera, lan hau bere amaierara heldu da.

2. TESTUINGURUA

2.1 Lanaren ikuspegia

Lan honen zimentuaren kosmobisioaren muinean, lanaren beraren prozesu-ulerkera dago: GrAL, hasieratik amaierarako prozesu bat bezala ulertuta, lanaren helburu gisa definitzen dira lanak bitarteko etapa hauetan egileari eta inguruko eragileei eskaini diezazkien onurak. Gauzak horrela, lan hau aurretiaz egindako lanek sorturiko ezagutzaren eta ni neu naizen konstruktorearen produktu gisa ulertzen dut, baita ondoren etorriko diren lanen baliabide gisa ere. Horrenbestez, lanak berak helburu gisa dauka transmisio eta eraldaketa hori ahalik eta era efektiboenean egitea, lanak berak dauzkan mugapenak ulertuta.

Lan hau fundazionalista da, hau da, lan honetan garatuko diren ideiak, aurretiaz egiazat hartuak diren (frogatuta daudelako edota hasierako axioma batzuetatik eratorriak direlako) lege eta teoretan oinarrituko dira. Aurrerago, metodologia gehiago sakonduko den bezala, horrela banatuko da lana:

- Ikasketa fasea: proiektua aurrera egiteko beharrezko diren tresnak topatuko dira. Horretarako, alde batetik aurretiaz egindako lanetan oinarrituko naiz, nire GrAL-aren mugak gorpuzteko. Bestalde, makina elektrikoaren arloko bibliografiatik, frogatuta dauden oinarriak aterako dira (legeak, teoriak eta abar).
- Diseinu fasea: aurretiaz eraikitako ereduak erreferentziatzen hartuta, eredu propio bat garatuko da, dagozkion ezaugarri konstruktiboak aintzat hartuta, behar ditugun emaitzak emateko gai izango dena.
- Simulazio fasea: ereduaren simulazioa eginda, transformadorearen inguruko bibliografia erabiliko dugu, ereduaren balioztatzea egiteko.

Hau horrela, lanean zehar garatuko diren ideiek oinarritzen izango dute atal honetan zehar aipatutako puntuak.

2.2 Oinarri Teorikoa

Atal honetan, hurrengo ataletan garatuko diren kalkulu eta frogapenei oinarri solidoa emateko xedearekin, lanaren gai nagusiarekin lotutako funtsezko teoriak eta kontzeptuak aztertuko dira.

Transformadorea

Transformadorearen atalak honela sailkatu ditzakegu:

Atal aktiboak

Atal aktiboak, izenak esaten duen moduan, transformazio prozesuan era aktiboan parte hartzen duten transformadorearen atalak dira. Honen barnean, bi atal nagusi ditugu:

Nukleo magnetikoa

Transformadorearen zirkuitu magnetikoa osatzen duen azpiatala da. Nukleoaren funtzio nagusia, nukleoan zehar garraiatzen den fluxu magnetikoaren bidez, energiaren transmisio elektromagnetikoa egitea da. Horretarako, ale orientatuko silizio-altzairuzko eta geruza isolatzaile batez inguratutako xafla ugariz osatutako egitura itxi bat erabiltzen da. Nukleo magnetikoa bi zatitan bana daiteke orohar:

- Zutabeak: harilkatua ezartzeko erabiltzen den nukleoaren zatia. Transformadore bakoitzeko zutabe kopurua, fase kopuruaren eta harilkatuaren kokapenaren arabera alda daiteke, transformadorez transformadore.
- Kulatak: Zutabeak goitik eta behetik batzen dituzten zatia. Normalean, nukleo magnetikoa moduren baten irekitzeko eraikitzen dira, ez baitago harilkatua sartzeko eta ateratzeko beste modu errazagorik.

Aurretik aipaturiko zati hauek, nukleo motaren arabera, fisikoki era ezberdinean egon daitezke lotuta. Aipagarrienak, bi:

- Topekako loturak: nukleo mota honetan, zutabeak eta kulatak osatzen dituzten xaflak era independentean lotzen dira, zutabeek eta kulatek ez daukate beraz elkarrekiko loturarik.
- Gainjartze-loturak: nukleo mota honek berriz, xaflen ezarpen ezberdin bi tartekatzen ditu: bakoitia eta bikoitia. Naiz eta prozesua konplexuagoa izan, xaflak gainjartzen diren heinean nukleoaren egonkortasun mekanikoak gora egiten du.

Horren erabiliak ez diren arren, nukleo mota hau duten transformadorez gain, oskol motako transformadoreak ere badaude; hauetan, nukleoak berak inguratzen du harilkatua. [2]

Beste alderdi bereizgarri bat nukleoaren zeharkako sekzioaren forma da: Transformadore txikietan hau karratua izaten da, baina potentzia handituz joan ahala, transformadorearen sekzioa "biribiltzea" interesgarria da, harilkatuaren barneko azalera zirkularra hobeto probestu nahi baldin bada. Horretarako, gurutze-formako sekzioak erabiliko ditugu, xaflak, era mailakatuan ezarrita dauden multzo handiagoetan batuz. Potentzia handiko transformadoreetan, aireztatzeko kanalak tartekatzen dira xafla-multzo hauen artean, sorturiko beroa hobeto kanporatu asmoz. Amaitzeko, multzo osoa zurezko brida edota isolatutako buloiekin batutako burdinazko profilen bitartez lotzen da. Honek sistema osoari zurruntasun mekanikoa eskainiko dio eta bibrazioak saihestu ahalko dira.

Harilkatua

Transformadorearen zirkuitu elektrikoa osatzen duen azpiatala da. Sekzio biribil edo errektangularra duten kobrezko hari eroalez osatzen dira harilkatuak. Goi-tentsioko eta behe-tentsioko atalak biribiltzen diren eraren arabera, harilkatua zentrokidea edota alternatua izan daiteke:

- Harilkatu zentrokidea: harilkatu mota honek zilindro ardazkide forma du; orohar, behe-tentsioko harilkatua zutabetik hurbilago kokatzen da, goi-tentsioko harilkatua baino errazagoa baita hau isolatzea. Bi harilkatuen artean kartoizko edota bakelatutako paperezko zilindro isolatzaile bat txertatzen da. Hau da eredian zehar erabiliko den harilkatu-mota.

- Harilkatu alternatua: kasu honetan, *galleta* formako zilindro zapalak txertatzen dira zutabeen, goi- eta behe-tentsioko harilkatuak tartekatuz. Hemen ere, behe-tentsioko harilkatuak izango du lehentasuna mutur bakoitzean, isolamendua handitu asmoz.

Energia elektrikoa hartu eta igortzen duten harilkatu sortei, harilkatu primario eta harilkatu sekundario deritze, hurrenez hurren. Bestalde, harilkatu sekundarioko (irteerako) tentsioa primariokoa (sarrerakoa) baino handiagoa bada, transformadorea jasotzailea izango da; ordea, kontrakoa gertatuz gero, transformadore erreduzitaile baten aurrean gaudela diogu.

Harilkatuaren babesean eta isolamenduan xehetasun gehiago baldin badaude ere, lan honetan arbuia egingo ditugu, irismenetik urrun gelditzen baita.

Atal pasiboak

Indukzio elektromagnetikoan aktiboki parte hartzen ez duten atalak dira. Hauen artean, hurrengokoak topa ditzakegu

- Sarrera/Irteerako sistema
- Hozte-sistema
- Babes-sistema
- Kontrol-sistema

Atal pasiboak ez ditugu modelatze prozesuan kontuan hartuko: gure eredua eta honen analisia bera nukleo magnetikoaren ingurunean garatuko da.

Eremu elektromagnetikoa

Transformadore baten oinarrian dagoen fisikari erreparatuz, elektromagnetismoaren legeekin joko dugu: transformadoreak indukzio elektromagnetikoa erabiltzen du arestian aipaturiko fluxu elektrikoaren aldagaien transformazioa burutzeko. Elektromagnetismoa, fenomeno elektriko eta magnetikoak aztertzen dituen fisikaren adarra da. Elektromagnetismoaren oinarri matematikoei so egiten badiegu, Maxwell-en ekuazio deritzon ekuazio-multzoa aurkituko dugu. Ekuazio bakoitzak, lege forman ezarritako fenomeno elektromagnetikoen atal bat azaltzen du:

- Gauss-en legea: $\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v$
- Faraday-ren legea: $\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$
- Gauss-en lege magnetikoa: $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$
- Ampère-ren legea: $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$

Era diferentzian adierazitako lege hauetatik abiatuta, gai izango gara transformadore elektrikoaren sinplifikazio bat egiteko. Horrela, transformadore elektriko baten funtzionamendu orokorra aztertu ahalko dugu.

Histeresi-zikloa

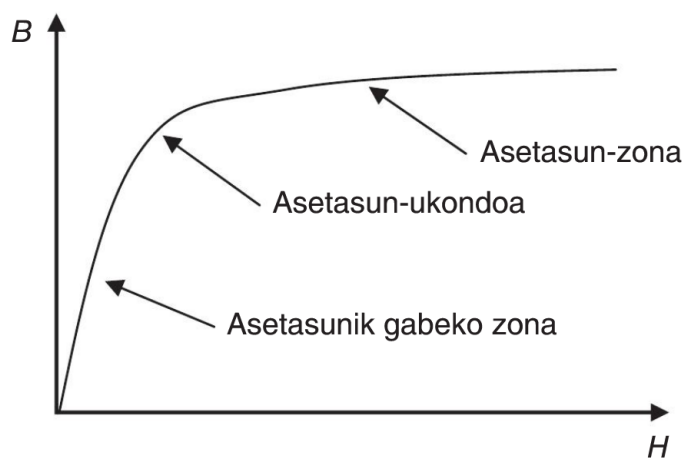
Lehenago aipatu dugun bezala, transformadorearen nukleoa burdin-aleazio batez eginikoa izan ohi da. Burdinak, gainerako material ferromagnetikoei bezala joera nabarmen bat du: material ferromagnetiko bat eremu magnetiko baten kokatzean,

material honen barneko ale txiki batzuen eremu magnetikoak kanpoko eremu magnetikoarekin lerrokatzen dira, eremu magnetiko indartsuago bat osatuz.

Aipatutako fenomenoak Hopkinson-en legeak definitzen du ondo:

$$B = \mu \cdot H = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$$

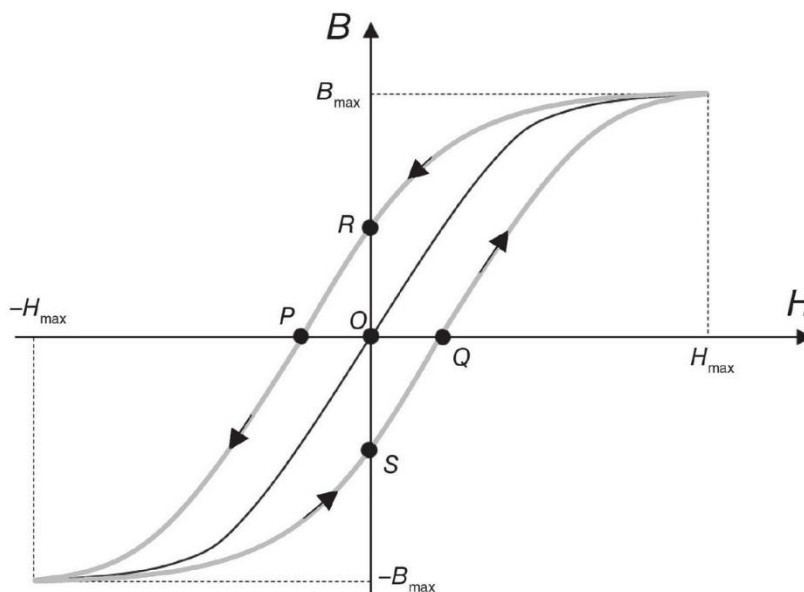
Fenomeno hau B-H kurba edo lehen imantazioaren kurba deritzonaren bitartez adierazten da: hasiera baten, gure material-lagina egoera neutro baten egongo da eta beraz, asetasunik gabeko zonaldean gaudela esango dugu. Eremu magnetikoaren intentsitatea (H) handitu ahala, aleak orientatzen hasiko dira. Puntu jakin batetik aurrera, aleetan mugimendu itzulezinak sortuko dira, eta lagina imanduta geldituko da, hau da, eremu magnetikoaren intentsitatea ezeztatzen baldin bada ere, laginaren aleek norabide jakin bat mantenduko dute. Materiala asetasun-zonan egongo dela esango dugu orduan.



1. Irudia: Material ferromagnetiko baten asetasun kurba.

Asetasunak indukzio erresultantean (B) eragina edukiko du, zenbat eta asetasun handiagoa, orduan eta txikiagoa izango baita proportzioan indukzio erresultantearen igoera. Asetasun maximoko puntuan, indukzio erresultantea berdina izango da edozein eremu magnetikoren intentsitaterako.

Benetan, erresultante honen balioa ez da bakarrik sarrerako eremu magnetikoaren intentsitatearen menpekoa: materialaren beraren aleen orientazioaren, hau da, materialaren historiaren menpekoa ere izango da. Fenomeno honi histeresi-ziklo deritzo.



2. Irudia: Material ferromagnetiko baten histeresi kurba.

Histeresi-zikloak, kalkuluak egitean kontuan hartu beharrekoak diren eta **histeresi-galerak** deituriko potentzia-galera batzuk dakartza berarekin. Horrez gain, fluxu sinusoidalekin gabiltzanean, histeresi-kurbak deformazio txiki bat eragingo die fluxuei, eta forma arinki aldatuko die.

Histeresi galera hauek hurrengo forma hartzen dute:

$$P_H = K_H \cdot f^a \cdot B_{max}^b$$

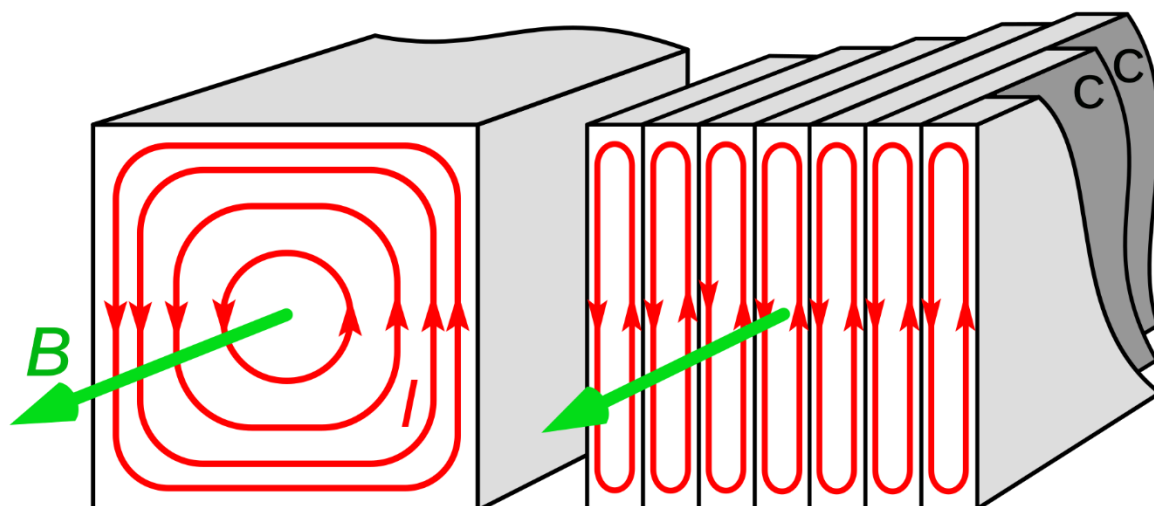
non a-ren balioa 1 izaten da eta b-rena 1,6 eta 1,8 artekoa izaten da.

Aurreko arrazoiak eta aipatutako beste batzuk direla medio, orohar, histeresi-kurbaren asetasunik gabeko atalean egotea interesgarria izango da. Transformadoreak baldintza optimoetan funtzionatzen duela bermatzeko, material eroale ezberdinak erabiltzen dira.

Foucault-en korronteek eragindako galerak

Histeresi-galerez gain, transformadorearen nukleo barnean, Foucault-en korronteek eragindako galerak edo korronte parasitoek eragindako galerak sortuko dira. Galera hauek, fluxu magnetikoak material eroale bat igarotzen duenean sortzen dira.

Foucault-en korronteak edo korronte parasitoak, sekzio eroale batean fluxu magnetiko aldakor bat induzitzen denean sortzen dira. Nukleoko fluxu magnetikoaren aldaketak, Lenz-en legeari jarraituz, tentsio induzitu bat sortzen du nukleoan, honek era berean ibilbide itxia duen korronte elektrikoa sortuz.



3. Irudia: Material ferromagnetiko solido baten eta xaflatu baten fluxu magnetikoen banaketa.

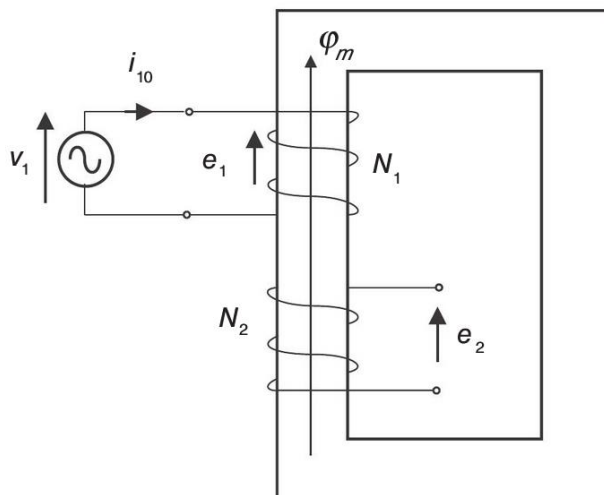
Galera mota hau murrizteko, transformadorearen elementuen atalean azaldutako nukleo xaflatuak erabiltzen dira: aurreko irudian ikus daitekeen bezala, material isolatzailez inguratutako xaflak batzean, korrante parasitoen ibilbidea murriztu daiteke.

Foucault-en korrontek eragindako galerak Steinmetz-en ekuazioaren bidez adieraz daitezke:

$$P_F = K_F \cdot f^2 \cdot B_{max}^2$$

Transformadore ideala

Transformadorearen azterketa teorikoa egiteko, nukleo magnetiko homogeen bat eta harilkatu primario eta sekundario bana definituko ditugu. Transformadorea beheakor gisa hartuko dugu, hau da, sekundarioko tentsioa primariokoa baino txikiagoa izatea aukeratuko dugu. Beraz, goi-tentsioa primarioa konektatuta egongo da eta behe-tentsioa berriz sekundarioa konektatuta. Horrez gain, primarioa tentsio-iturri batekin elikatuko dugu eta harilkatu bakoitzaren tentsio-jaitsiera erresistentzia banarekin modelatuko dugu.



4. Irudia: Transformadore ideal baten diagrama.

Transformadorearen funtzionamendua hobeto ulertzeko, makinaren beraren akatsak albo batera utziko ditugu eta hurrengo baldintza idealak betetzen direla joko dugu:

- Harilkatu primario eta sekundarioek erresistentzia baztergarriak dituzte, eta ondorioz, transformadorearen baitan ez dago Joule efektuaren bidezko galerarik, ezta tentsio jaitsiera erresistiborik ere. Sistema errealean, erresistentzia hauen balioa oso txikia da, baina ez da nulua.
- Ez da dispersio-fluxurik existitzen; horrek esan nahi du, fluxu magnetiko guztia nukleoaren barruan itxita egongo dela eta harilkatu primario eta sekundarioa elkartuko dituela. Transformadore errealean, zirkuitua airetik osatzen duten eta kiribiltze bakarretik igarotzen diren ihes-fluxuak existituko dira, txikiak izango diren arren.

Primarioari u_1 tentsio alternoa ezarriz gero, atal honetatik korrante alterno bat igaroko da; era berean, korrante alterno honek Ampere-ren legearen noranzkoa jarraituko duen fluxu magnetiko bat eratuko du nukleoan zehar. Fluxu magnetiko honen aldakuntza periodikoaren ondorioz, Faraday-ren legeak aurreikusitako indar elektromagnetiko (i.e.m.) batzuk induzituko dira harilkatuetan.

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi_m}{dt} \quad ; \quad e_2 = N_2 \frac{d\phi_m}{dt}$$

Korrante sinusoidalekin bagabiltza, fluxu magnetikoak forma sinusoidala edukiko du, eta beraz, harilkatuen tentsioen moduluak horrela adierazi ahalko ditugu:

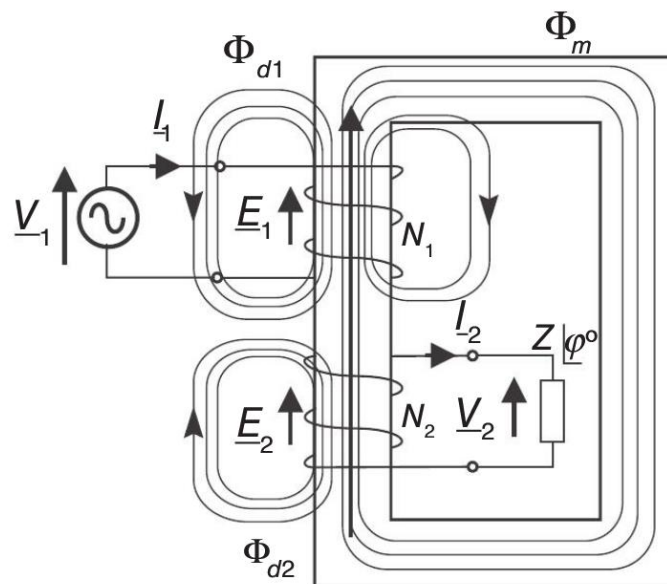
$$E_1 = 4,44 \cdot N_1 \cdot \phi_m \cdot f \quad ; \quad E_2 = 4,44 \cdot N_2 \cdot \phi_m \cdot f$$

Transformadorearen transformazio-erlazioa, primarioaren eta sekundarioaren tentsioen moduluen arteko erlazioa izango da, eta horrela definituko dugu:

$$a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44 \cdot N_1 \cdot \phi_m \cdot f}{4,44 \cdot N_2 \cdot \phi_m \cdot f} = \frac{N_1}{N_2}$$

Transformadore erreala

Oraingoan, aurreko atalean alde batera utzi ditugun erresistentziak eta ihes-fluxuak hartuko ditugu kontuan; transformadore errealean, bi galera hauek kontuan hartu behar ditugu. Hasteko, Φ_1 eta Φ_2 , primarioa eta sekundarioa zeharkatzen dituzten fluxuak eta Φ_1 eta Φ_2 primarioko eta sekundarioko ihes-fluxuak definituko ditugu. Primarioan, ihes-fluxuak magnetizazio-fluxuaren noranzko berdina daukan bitartean, sekundarioko ihes-fluxuak kontrako noranzkoa edukiko du, fluxu honi aurre egiten saiatuko baita.



5. Irudia: Transformadore erreale baten diagrama.

Gauzak horrela, hurrengo ekuazioen bidez adierazi ahalko ditugu fluxuak:

$$\phi_1 = \phi + \phi_{\sigma 1} \quad ; \quad \phi_2 = \phi + \phi_{\sigma 2}$$

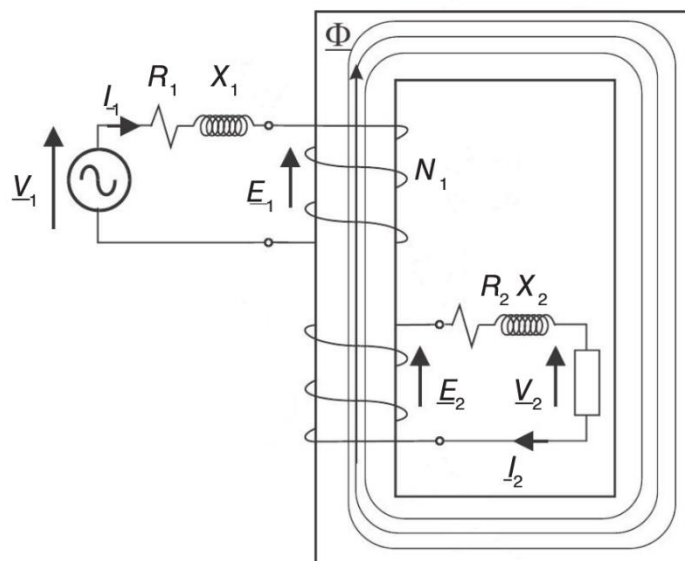
Ihes-fluxu hauek, primarioko eta sekundarioko zirkuitu elektrikoetan txertatuta dauden harilkatu inductibo gisa irudikatu ditzakegu. Erreaktantzia hauen autoindukzio koefizientea hurrengo izango da:

$$L_{\sigma 1} = N_1 \frac{d\phi_{\sigma 1}}{di_1} \quad ; \quad L_{\sigma 2} = N_2 \frac{d\phi_{\sigma 2}}{di_2}$$

Eta beraz, uhin sinusoidalekin ari garela kontuan hartuz, harilkatu hauen erreaktantiaren balioa hurrengo da:

$$X_1 = L_{\sigma 1} \omega \quad ; \quad X_2 = L_{\sigma 2} \omega$$

Harilkatu primarioaren eta sekundarioaren erresistentziak kontuan hartuta, horrela geldituko zaigu transformadorearen zirkuitua:



6. Irudia: Transformadore baten diagrama, harilkatuen inpedantziak kontuan hartuz.

Primarioko eta sekundarioko zirkuituetan Kirchhoff-en bigarren legea aplikatuz, honako ekuazio hauek helduko gara:

$$v_1 = e_1 + R_1 i_1 + L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} \quad ; \quad e_2 = v_2 + R_2 i_2 + L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt}$$

Edota ekuazioak fasore eran jarriz gero:

$$\underline{U}_1 = \underline{E}_1 + R_1 \underline{I}_1 + jX_1 \underline{I}_1 \quad ; \quad \underline{U}_2 = \underline{E}_2 - R_2 \underline{I}_2 - jX_2 \underline{I}_2$$

Zirkuitu baliokidea

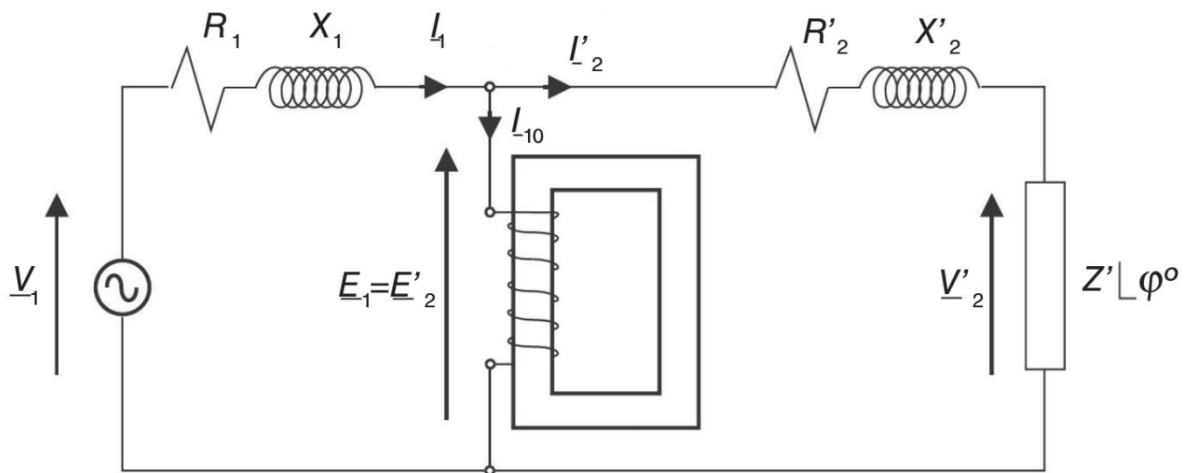
Transformadorean sare elektrikoaren potentzial elektriko osoa aplikatzeko, zirkuitu baliokidearen garapena egitea interesatzen zaigu. Zirkuitu baliokide honek, makina elektrikoaren funtzionamendu-baldintza jakin batzuekiko erantzuna aurretiaz ezagutzea erraztuko digu. Gure kasurako, sekundarioa primarioa murriztuko dugu, sekundarioko espira kopurua N_2 primarioko espira kopuruarekin berdinduz, hau da $N'_2 = N_1$ eginez.

Transformadore berri hau jatorrizko transformadorearen baliokidea izan dadin, makinaren baldintza energetikoak mantendu beharko dira, hots, potentzia aktibo eta erreaktiboa eta hauen banaketa elementu jakin bakoitzeko kontserbatu egin beharko da. Harilkatu berri honekin zerikusia daukaten magnitude guztiek, arestian definituriko transformadore errealearen ikur berdinekin adieraziko ditugu, baina azentu-marka txiki bat jarriko diegu.

Horrez gain, espiren arteko erlazio berria bat denez, hurrengoa ondorioztatuko dugu:

$$a = \frac{E_1}{E'_2} = \frac{N_1}{N'_2} = 1 \quad E_1 = E'_2$$

Azken hori kontuan hartuz eta harilkatuetako tentsioak fasean daudenez, zirkuitu baliokide honetara helduko gara:



7. Irudia: Transformadore baten harilkatuen zirkuitu elektriko baliokidea.

Non I_{10} korronteari hutseko korrontea deritzon. Hutseko korronte hau hutseko adarra deritzon ataletik igarotzen da, eta nukleotik igarotzen den fluxu magnetikoarekin erlazionatuta egongo da. Hutseko adarra banatzen den nodoan Kirchhoff-en lehen legea aplikatuz, hurrengoak lortuko dugu:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}'_2 + \underline{I}_{10} \quad ; \quad \underline{I}_{10} = \underline{I}_1 - \underline{I}'_2$$

Bide batez, azentu-markadun aldagaien balioak hurrengoak izango dira:

$$\underline{E}'_2 = a\underline{E}_2 \quad ; \quad \underline{V}'_2 = a\underline{V}_2 \quad ; \quad \underline{I}'_2 = \frac{1}{a}\underline{I}_2$$

$$R'_2 = a^2R_2 \quad ; \quad X'_2 = a^2X_2$$

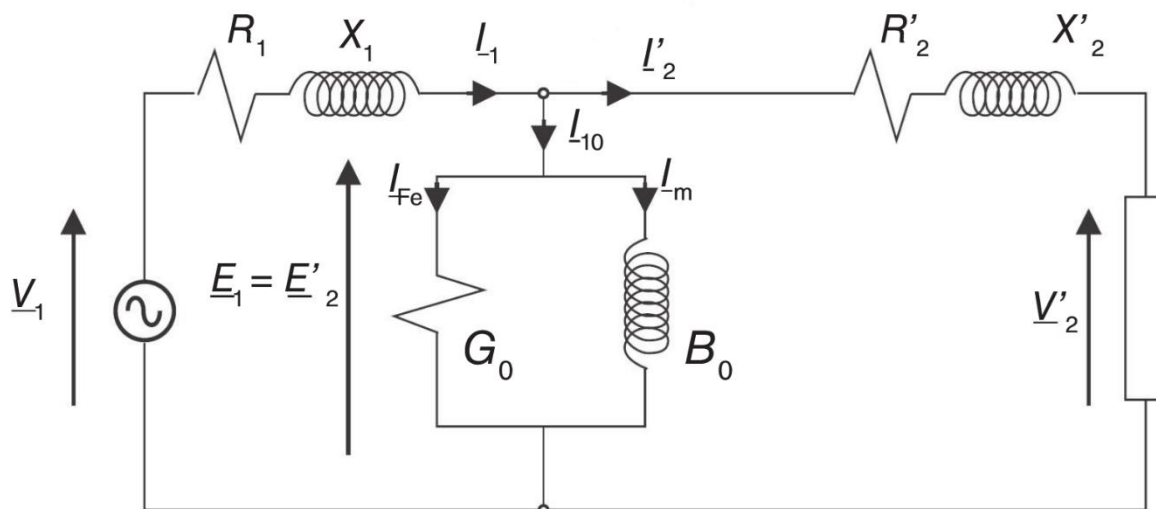
Amaitzeko, nukleoaren barnean dauden galerak hutseko adarrean kokatuta dauden bi adar paraleloren bidez modeliza daitezke. Haietako batean burdinako galerak irudikatzen dituen konduktantzia (G_0) bat txertatzen da eta bestean nukleoaren osagai magnetizatzailearekin lotura duen suszeptantzia (B_0) bat gehitzen da. Adar bakoitzak, hurrenez hurren, dagozkion galerekin lotutako korronte bat edukiko du, I_{Fe} eta I_m zehazki. Gauzak horrela:

$$\underline{I}_{10} = \underline{I}_{Fe} + \underline{I}_m$$

Eta adarraren admitantzia totala:

$$\underline{Y}_0 = G_0 - jB_0$$

Horrela, transformadorearen zirkuitu elektriko baliokidea lortuko dugu:



8. Irudia: Transformadore baten zirkuitu elektriko baliokidea.

Transformadore trifasikoa

Transformadore trifasikoak, transformadore monofasikoarekin alderatuz, 3 fase ezberdin ditu. Makina elektriko mota hau gai da hiru fase ezberdinetan datorren korrante elektrikoaren aldagai elektrikoak transformatzeko. Horretarako, nukleo bereiziz edo nukleo bakarrez osatutako transformadore bat erabiltzen da.

Transformadore trifasiko baten, harilkatu primarioko eta sekundarioko, fase bakoitzeko muturrak batu egiten dira elektrikoki, "konexio" delakoa eratuz. Konexio-motaren arabera, transformazio-erlazioa eta sarrera/irteera-tentsioen desfasea ezberdina izango da transformadorearentzat, eta beraz, ezaugarri berdinak baina konexio-mota ezberdina duten transformadoreak ezin izango dira beti sare biren artean paraleloan konektatu, bateraezinak izango dira batzuetan.

Transformadore trifasikoa zirkuitu monofasiko baliokidearen bitartez azter daiteke, fase bakoitza simetrikoa izango baita. Konexio-motaren arabera, sarrera- eta irteera-aldagaiak ezberdinak izango dira zirkuitu monofasiko baliokidean eta transformadore trifasikoan.

2.3 COMSOL Multiphysics®

COMSOL Multiphysics® elementu finituetako metodoetan oinarritutako programa da. COMSOL AB enpresak garatutako erreminta honen abantaila nagusietako bat, fisika ezberdinak simulazio bakar baten uztartzeko gaitasuna da; hortik datorkio "multifisika" izena. Fisika ezberdinak konbinatzeko gaitasunak, mundu errealeko problemak zehaztasun handiagoz ebaztea dakar.

Horrez gain, simulazioen moldagarritasun esanguratsua dauka, simulazio bakoitza aztertu beharreko xedearen beharrezanetara egokitu baitaiteke, programaren barneko aukeraketa ezberdinen arabera.

COMSOL Multiphysics® programaren inguruko zalantzak argitze aldera, aipagarria da programak atzean daukan komunitate aktiboa eta laguntza; tutorial eta eztabaida foro

ugari daude, edozein simulaziotan gerta daitekeen arazoak konpontzen lagun dezaketena.

Programaren moduluak

COMSOL Multiphysics® programak aurrera eraman beharreko ikasketa simulatzea ahalbidetzen duten hainbat modulu gehigarri dauzka; lau ingurune hauetan bildu daitezke:

- Elektromagnetismo moduluak
- Mekanika estrukturala eta akustika moduluak
- Jariakinen fluxua eta bero-transferentzia moduluak
- Ingeniaritza kimikoa moduluak

Transformadorearen modelatzea egiteko, elektromagnetismo inguruneko moduluak dira proposenak, zehazki, korrante zuzena edota alternoa maneiatzen duen "AC/DC" moduluak. Modulu hau, maiztasun baxuko osagai elektromagnetiko eta elektromekanikoak simulatzeko egokia da, eta beraz, aproposa izango da potentzia-transformadore baten ikasketa egiteko.

"AC/DC" moduluaren barneko aukeren artean, hainbat fisika ezberdin topa ditzakegu, hauen artean:

- Zirkuitu elektrikoak ("Electric Currents")
- Elektrostatika ("Electrostatics")
- Magnetostatika ("Magnetostatics")
- Ereku elektromagnetikoak ("Electromagnetic Fields")
- Makina birakariak ("Rotating Machinery")
- Zirkuitu elektrikoak ("Electric Circuits")

Makina elektriko estatiko batekin gabiltzanez eta fluxu magnetikoa edukiko dugunez aztergai, eremu elektromagnetikoen fisika izango da fisikarik aproposena transformadorearen modelatzea egiteko.

Programaren atalak

Programaren egiturari erreparatuz, hainbat atal edo nodo bereiz ditzakegu, bakoitzak simulazioaren moldaketan bere ekarpena egiten duelarik:

Definizioak:

Definizioak atalean eredu osoari edo atal bati aplikatzen zaizkion ezaugarriak gehitzen dira. Hauen artean topa ditzakegu, besteak beste:

- Parametroak: parametroen bidez, ereduaren geometrian, sarean, soluzio prozesuan eta abarreak, balio jakin batzuk aurrezari ditzakegu.
- Aldagaiak: aldagaiak, simulazioan zehar balio aldakorak edukiko dituzten balioak definitzeko balio dute, adibidez, ekuazio diferentzialetan agertzen diren menpeko aldagaiak adierazteko.
- Funtzioak: funtzioen bidez, simulazioaren kalkuluan balio jakin batzuk hartuko dituen sarrera- edo irteera-aldagaiak sor daitezke.

Geometria:

Atal honetan, eredu eraiki daiteke. Bi dimentsiotan marraztutako formak estructurez edo erreboluzio eragiketa aplikatuz, hiru dimentsioko objektuak lor ditzakegu. Horrez gain, tresna boolearren bidez, sortutako objektu geometrikoekin eragiketa boolearrak egin daitezke.

Materialak:

Materialen atalean, ereduaren zehar erabiliko ditugun materialak eta hauen propietateak definitu daitezke.

Fisikak:

Atal hau fisiken aukeraketari dagokio. Landuko den ikasketan parte hartzen duten fisikak adierazteko balio du atal honek. Atal honetan definitutako nodoen bitartez, EFM kalkuluetan erabiliko diren ekuazioak eta baldintzak zehaztu daitezke.

Sarea:

Ereduaren kalkulua egiteko, beharrezkoa da ereduaren elementu finituak eraikitzea. Atal hau elementu finituen antolaketaz arduratzen da eta eredu geometrikoa eredu numeriko bihurtzen du.

Ikasketak:

Ereduaren eraikuntzako azken atal honetan, arestian definitutako elementu guztiak batzen dira eta kalkulu-metodoak erabakitzen dira. Burutu nahi den ikasketaren arabera, denboraren menpeko, maiztasunaren menpeko edota beste era bateko ikasketak egin daitezke. Sakonago sartuz gero, zenbakizko metodoen zehaztapenak aldatu daitezke.

Emaitzak:

Amaitzeko, atal honetan emaitzak bistaratuko dira. Nodoak eskaintzen dituen aukera ezberdinen bidez, kalkuluen adierazpen ezberdinak egin daitezke, bai kolore eta formen bidez, baita tauletan metatutako balioen bidez ere.

3. GARAPEN IRAUNKORREKO HELBURUEKIKO ETA PRINTZPIO ETA BALIO DEMOKRATIKOEKIKO LOTURA

Lan honek, Garapen Iraunkorreko Helburuekin eta Printzipio eta Balio Demokratikoekin engaiamendua dauka. Zehazki, lan honen helburuek, garapen iraunkorreko hurrengo helburuekin egiten du bat:

4. helburua: Kalitatezko hezkuntza.

Helburu honen muina, guztiontzako kalitatezko hezkuntza inklusiboa nahiz bidezkoa bermatzea eta etengabeko ikaskuntzarako aukerak bultzatzea da.

Arestian aipatu den bezala, GrAL hau prozesu gisa ulertzen da, ez emaitza batzuk lortzeko lan gisa soilik. Hori horrela, lan honen ikuspuntua prozesuan bertan dago zentratuta, eta diziplinartekoa izatea du xede, jasotako esperientzien transmisioa aintzat hartuz.

Ulerkera honek, lana mundua eraldatzeko aktibo bat bezala kokatzen du, eta horren aldeko apustua egiten du lanaren egileak ere.

7. helburua: Energia irisgarria eta ez kutsagarria.

Helburu honen muina, energia eskuragarria, fidagarria, jasagarria eta modernoa bermatzea da.

Lan honen erdigunean kokatuta dagoen elementuak, hots, potentzia-transformadoreak, berebiziko garrantzia dauka elektrizitatearen eta beste energia mota bateko energia seguruaren erabilpenean. Transformadoreen erabilerak energia-iturri berriztagarri ezberdinen integrazioa erraz dezakete, aldaketa klimatikoa eteteko beharrezko den deskarbonizazio prozesuan garrantzia handia izanik.

11. helburua: Hiri eta komunitate jasangarriak.

Helburu honen muina, hiriak eta giza kokaguneak inklusiboak, seguruak, erresilienteak eta jasangarriak izatea lortzea da.

Potentzia-transformadoreak eta orohar transformadore elektrikoak, hirien azpiegitura elektrikoan garrantzi handiko osagaiak dira. Transformadorea, sare-elektrikoaren atal bezala hartuta, ezinbestekoa da hirien diseinu adimentsuan aurrera egiteko eta hiri eta komunitateetako kutsadura-mailak murrizteko.

18. helburua: Hizkuntza eta kultur aniztasuna.

Helburu honen muina, hizkuntza eta kultura guztien presentzia eta aintzatespena bermatu pertsonen eta gizartearen garapenerako.

Nahiz eta helburu hau Nazio Batuen Erakundeak ezarritako helburuen artean ez egon, esan gabe doa gure komunitateak daukan erronka handienetako bat hizkuntza gutxituen aldeko defentsa egitea dela.

Kasu honetan, euskararen normalizazio linguistikoaren prozesuan aurrera egiteko beharrezko diren pausoen artean, ezinbestekoa da mundu akademikotik ere kontuari eustea, euskararen gaur egungo corpus idatzia osatze aldera.

Lan honek, lanaren helburuetan definitu den bezala, aintzat hartzen du euskararen aldeko konpromisoa eta euskararen idatzizko corpus gaurkotua elikatzea du jomugan.

4. LANAREN HELBURUAK ETA IRISMENA

4.1 Helburuak

Lan honetarako, honako helburu hauek ezarri dira:

- Transformadore baten atariko analisia eta modelatzea elementu finituen bidez.
- COMSOL Multiphysics® programaren ikasketa egitea.
- Transformadorearen eredia zabaltzea.
- Euskararen erabilera erreferentzial bat osatzea.
- GrAL erreferentzial bat osatzea eta zabaltzea.

4.2 Irismena

Irismenari dagokionez, hurrengo sailkapena egin da hasiera baten:

- Irismenaren barnean:
 - COMSOL Multiphysics® programaren erabilerari buruzko dokumentazioaren bilaketa.
 - COMSOL Multiphysics® programaren ezaguera praktikoa handitzea, aurretiaz sortutako eredu bidez.
 - Transformadore elektrikoaren eraikuntzaren eta modelatzearen inguruko dokumentazioaren bilaketa.
 - Transformadore elektrikoaren funtzionamenduaren inguruko dokumentazioaren bilaketa.
 - COMSOL Multiphysics® bidez simulatutako transformadoreak aztertzen dituzten dokumentuen bilaketa.
 - GrAL bat zelan egin ikasteko eta definitzeko bibliografiaren bilaketa.
 - COMSOL Multiphysics® bidez aurretiaz ezarritako parametroen barnean dagoen transformadore baten diseinua eta eraikuntza.
 - Ereduaren balioztatzea aurretiaz jasotako dokumentazioan oinarrituta.
 - Lanean erabili den euskararen berrikusketa kontziente eta kritikoa.

5. LANAK DAKARTZAN ONURAK

Lan honek, hurrengo onurak dakartza bere baitan:

Onura teknikoak

- Eredu bat zelan egin aztertuko da, honek ekarri dituen problemak aztertuta
- COMSOL Multiphysics® bidez eraikitako ereduaren balioztatzea egingo da, programaren fidagarritasuna egiaztatu asmoz.

Egileraren onurak

-Lan honek egileari GrAL-ari dagozkion gaitasunak lortzen eta graduan zehar landutakoak finkatzen lagunduko dio, hauen artean:

- G1. Industria Ingeniaritzaren arloko proiektuetan parte hartzeko gaitasuna, proiektu horiek prestatzen, idazten eta aurrera eramaten.
- G2. Industria Ingeniaritzaren arloko proiektuei lotutako jarduerak zuzentzeko gaitasuna.
- G3. Oinarrizko eta teknologiako gaiak ezagutzea, metodo eta teoria berriak ikasi ahal izateko eta egoera berrietara egokitzen jakiteko.
- G4. Industria Ingeniaritzaren arloko arazoak konpontzeko ekimena, sormena, arrazoibide kritikoa, ezagutza, abilezia, trebetasuna eta erabakiak hartzeko gaitasuna izatea, eta ezagutza hori guztia transmititzea.
- G5. Neurketak, kalkuluak, balioespenak, tasazioak, adituen txostenak, ikerketak, txostenak, laneko planak eta antzekoak egiteko ezagutzak.
- G6. Nahitaez bete beharreko zehaztasun, arau eta araudiak erabiltzeko gaitasuna.
- G8. Kalitateko printzipioak eta metodoak aplikatzeko gaitasuna.
- G10. Diziplina anitzeko ingurune eleaniztunean lan egiteko gaitasuna.

-Lan honen bidez, lanaren egileak COMSOL erabiltzen ikasiko du.

-Lan honen bidez, egileak elektromagnetismoaren inguruko literaturaren errebasoa egingo du.

Gizartearentzako edo komunitatearentzako onurak

-Lan hau GrAL batek eduki beharreko formaren eredu esplizitua izango da, bai forma zein eduki aldetik. Horrenbestez, etorkizunean horrelako lan bat abiatzekotan den ikasle orori lagungarri egin dakioke.

-Lan honen bitartez, COMSOL Multiphysics® programaren erabilera ulertu ahalko du programa erabiltzera doan pertsona orok. Gainera, azalpen hauek euskaraz emanak izango dira.

Hizkuntza-onurak

-Lan honetan hartutako konpromisoaren bitartez, lan honek gaur egungo euskararen korpus zientifikoa osatze aldera ekarpena egingo du.

6. BALDINTZEN DESKRIBAPENA ETA/EDO GAIAREN EGOERAREN AZTERKETA

6.1 Baldintzen deskribapena

Atal honetan, lanean zehar beharrezko izango diren elementuen zehaztapena egingo da. Horretarako, lana egin den inguruneke baldintzak aztertuko dira.

Baldintza teknikoak

Lanean zehar, ezaugarri tekniko jakin batzuk zehaztu dira, transformadorearen ereduak bete behar izango dituenak.

- Transformadore

Baldintza teknologikoak

Lan hau egiteko, zenbait baliabide teknologiko behar izan dira:

- Ordenagailu bat. Ezaugarriak:
 - Prozesadorea: Intel® Xeon® CPU E5-2620 v4, 2.10 GHz
 - Instalatutako RAM: 64 GB
 - Sistema eragilea: Windows 10 Enterprise LTSC, x64
- COMSOL Multiphysics® programa. Bertsioa: 5.6.0
- Adimen artifizialeko sostengua: Bing Copilot (GPT-4) erabili da.

Dokumentazio- eta gida- baldintzak

Lan-prozesuaren eta lanean bertan garatutako gaien inguruko ezagutza biltzeko, hainbat iturri erabili dira, hauen artean:

- Interneteko tutorialak → webguneak eta bideoak (laneko ordenagailuan ditut, aipatu)
- Erreferentziazko lanak
- Liburuak.

Erreferentzien atalean gehiago sakonduko da erabilitako iturrien inguruan.

Baldintza linguistikoak

Lan honetan zehar, euskararen erabilera zuzena bermatzeko, hurrengo baliabideak erabili dira:

- Euskaltzaindiaren hizkuntza-baliabideak: <https://www.euskaltzaindia.eus/>
- Elhuyar hiztegia: <https://hiztegiak.elhuyar.eus/>
- Elia itzultzaile neuronal (elhuyar): <https://elia.eus/itzultzailea>
- Itzuli itzultzaile neuronal: <https://www.euskadi.eus/itzuli/>

6.2 Egoeraren azterketa

Arestian aipatu bezala, transformadore elektrikoa erabilera eta zabalpen handiko makina elektrikoa da gaur egun. Honen atzean, hainbat eta hainbat urtetako ikerketak eta teorizazioak eman dira maila akademikoan, eta beraz, horrelako tankerako makina

baten funtzionamendua aurreikusten eta modelatzen duten hainbat formula matematiko osatu dira.

COMSOL Multiphysics® programari helduz, programaren bitartez egindako ereduen inguruko artikulu asko daude sarean. Era berean, ikasketa asko egin izan dira transformadoreen eta hauen elementu finituzko ereduen inguruan.

COMSOL enpresaren transformadoreen ereduak

Hasteko, aipatu beharra dago COMSOL enpresaren webguneak eta programak berak hainbat motatako eredu eta tutorial ezberdinak dituela. Webgunearen barneko blogean, transformadore monofasiko inguruko simulazioen hastapenak [3] eta transformadore trifasikoenak [4] topa ditzakegu. Blog hauen behean, COMSOL enpresak sorturiko transformadore monofasikoaren eta trifasikoaren ereduen orrira birbideratzen gaituzten estekak daude.

Eredu hauekin batera, eredu bakoitzaren azalpen labur bat dator atxikita; monofasikoaren kasuan, ereduak nola eraiki azaltzen duen instrukzio-orri bat topa dezakegu. Eredu hauek eskuratzeko beste era bat, COMSOL Multiphysics® programan bertan aurkitu dezakegun liburutegian transformadore hitza bilatzea litzake; programak, aurretiaz aipaturiko ereduak eskainiko dizkigu.

COMSOL enpresaren webguneko baliabideekin amaitzeko, transformadore trifasikoaren inguruko informazioa ematen duen bideo bat dago webgunearen bideo-biltegian [5].

Transformadoreen modelatzearen inguruko lan akademikoak

Transformadoreen eredu ezberdinen inguruan, badaude elementu finituetako programak erabiliz egindako lan akademiko ezberdinak, hala nola, nukleo mota ezberdineko transformadore trifasikoen analisia [6] edota transformadoreen nukleoko eta harilkatuko bibrazio-zarata elektromagnetikoa [7] aztertzen dituzten lanak.

Orohar, elementu finituetako metodozko programak erabiltzen dituzten lanen artean, hurrengo lanak topa daitezke:

Bibrazioaren inguruan

- Transformadore baten nukleo magnetikoaren magnetostrikzioaren modelatze, bibrazio analisirako [8].
- Oliotan murgildutako transformadore baten bibrazio eta zaraten simulazio eta balidazioa [9].

Material ezberdinen inguruan

- EFM bidezko Distribuzio-transformadore baten modelatzea, nukleo-material ezberdinen nukleo-galeren analisirako [10].
- Nukleoaren eta harilkatuaren materialen ezaugarrien azterketa, potentzia-transformadorearen galerak minimizatzeke [11].

Analisi termikoen inguruan

- Potentzia-transformadore baten akoplamendu elektromagnetiko eta termikoen simulazioa 3D EFM bidez [12].
- Transformadore trifasiko baten nukleoko tenperaturaren banaketaren simulazioa eta balidazio esperimentalak [13].

Zirkuitulaburreko egoeraren analisia

- Elementu finituetako metodoetan oinarritutako ikasketa, zirkuitulaburreko indarren eragina potentzia-transformadoreen harilkatuetan aztertzeko [14].

Transformadoreen inguruko liburuak

Atal honekin amaitzeko, transformadoreen inguruko jakintzaren zabalpenean dibulgazio-liburu edota ikasketa-liburu ugari zabaldu dira. Mundu mailan ingeniari-tza elektrikoan liderra den ABB enpresaren transformadoreen eskuliburuak behar beste informazio eskaini diezaiotke transformadoreen inguruan gehiago jakin nahi duen edozeini [2].

Horrez gain, Euskal Herriko Unibertsitateak kaleratutako *Makina Elektrikoak* [15] liburuak, GrAL baten maila asetzeko besteko informazio eskaini dezake. Amaitzeko, aipatu beharreko liburua da Jesús Fraile Morak idatzitako *Máquinas Eléctricas* [16] liburua.

GrAL-aren inguruko lanak eta liburuak

Lan honek aurretiaz egindako hainbat GrAL erabili ditu erreferentzia gisa, hauen artean, Ane Miren Larrearen *Aireko lineetako koroa-efektuaren analisia elementu finituen bidezko simulazioaz* [17] eta Jon Xabier Rementeria-*ren Tenperatura kontrolatzeko maketa baten interfazearen diseinua* [18].

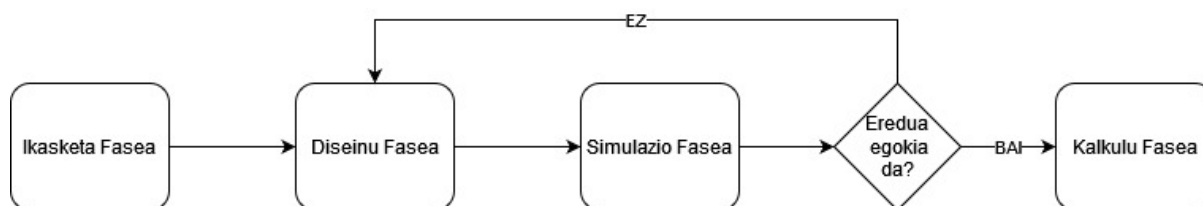
Halaber, GrAL-aren eraketa-prozesuaren izaera ulertzeko, laguntza handiko liburua izan da *El trabajo de fin de grado* [1] gidaliburua. Liburu honek GrAL-aren balioa azpimarratzeaz gain, lanaren nondik norakoaren ulerkeraz zabal bat eskaintzen du.

7. METODOLOGIA ETA ANTOLAKUNTZA

Atal honetan, aurretik planteatutakoarekin koherentea izanik, lana zelan egingo den azalduko da. Atalak proiektuaren bide-orria eta perspektiba metodologikoa bilduko ditu.

7.1 Metodologia

Proiektu hau hainbat fasetan banatu da, fase bakoitzak aldi berean atal ezberdinak dituelarik. Eskema gisara, hurrengo irudian adierazi dira proiektuaren fase ezberdinak.



9. Irudia: Jarraitutako metodologiaren diagrama.

Oinarritzko eskema honetatik abiatuta, gehiago sakonduko da antolakuntza atalean.

7.2 Antolakuntza

Atal honetan, metodologian aurkeztutako faseen garapena azalduko da. Horrela, proiektuan zehar hartutako erabakiak azalduko dira, azkenean lortu dugun eredu horretara heldu arte.

Ikasketa-fasea

Lehenengo fase honetan zehar, proiektuari dagokionez jakin beharrekoa aztertu eta ikasi da. Jakin beharrekoari dagokionez, hiru ardatz nagusi eduki ditu prozesu honek: COMSOL Multiphysics® programaren ikasketa, transformadoreen inguruko ikasketa eta GrAL-aren inguruko ikasketa.

COMSOL Multiphysics® programaren ikasketa

Proiektu hau gauzatzeko ezinbestekoa izan da COMSOL Multiphysics® programa erabiltzen jakitea. Horretarako, programak berak zekartzan tutorialetatik hasi eta aurretiaz egindako ereduarekin jarraitu dut. Hurrengo atalak landuko ditut, besteak beste:

- Fisiken/multifisiken erabilpena
- Geometria
- Domeinuak
- Parametrizazioa
- Sarea
- Materialak

Transformadorearen inguruko ikasketa

Programaren oinarriez gain, beharrezkoa da transformadoreen inguruko ikasketa egitea. Transformadoreen eraikuntzatik hasita, honen nukleoaren, harilkatuaren eta gainerako sistemen ikasketa eginez, baliabide nahikoz hornituko da lana, gerora eredu era errealista baten eraikitzeke.

Ondoren, transformadorearen funtzionamendua berrikastea etorriko. Makina elektrikoaren inguruan nituen ezagutzak euskarritzat hartuta, Maxwell-en ekuazioen, histeresi-zikloaren eta transformadorearen zirkuitu baliokidearen eta honen galeren inguruan gehiago sakondu dut.

Azkenik, beste hainbat artikulutan adierazitako fenomenoak irakurri eta barneratu ditut, hala nola, magnetostrikzioa edota transformadoreetako induktoreak.

GrAL-aren inguruko ikasketa

Gradu Amaierako Lan bat zelan egin ikasteko, hasteko komenigarria da horrelako lan bat zelan egiten den ikastea. Horretarako, *El trabajo de fin de grado* [1] liburuaren irakurketa planteatu da. Liburu honek, GrAL baten ezaugarriak eta nondik norakoak xehetasunez azaltzen ditu eta proiektuan zehar garatzen diren prozesu ezberdinak hobeto ulertzea ahalbidetzen du.

Diseinu-fasea

Hurrengo fasea diseinu-fasea izan da. Fase honetan, arestian aipaturiko ikasketa-fasetik ateratako jakintza trinkotu dut, diseinu eraginkor bat egiteko asmoz.

Diseinuaren aukeraketa (teorikoa)

Fase honi hasiera emateko, diseinuaren nondik norako teorikoa definitu dut. Transformadorearen eraikuntzari dagokionez, hainbat aukera egin ditut:

- Lehendabiziko erabakia atal aktiboak bakarrik eraikitzea izan da. Sarrera/irteerak, hozte sistemak, upel nagusia eta gainerako elementuak gehitzeak eredu gehiegi konplikatzeko zekarrenez, harilkatua eta nukleo magnetikoa eraikitzearekin konformatu naiz.
- Fase kopuruari erreparatu, transformadorea trifasikoa izatea hobetsi dut, mota honetako transformadoreek industria-mailan daukaten garrantziari men eginez eta elementu finituetako programa batek eskaintzen dituen abantailak hobeto aprobetxatu ahal dituelako, adibidez, hiru faseen gainez arpen magnetikoa aztertzerako orduan. Transformadorea trifasikoa denez, hau sare trifasiko batera konektatuta egongo da. Beraz, gero, beste edozein kasutarako baliagarria izango den arren, transformadorearen konexio mota ezarri beharko da.
- Hasiera batean, nukleoko materiala burdina izatea erabaki dut; material estandarrena hautatu dut, beste materialen batekin probatzeari uko egin baitiot, ereduaren sinpletasunaren mesedetan.
- Transformadorearen formari dagokionez, erabaki dut forma karratudun nukleo-erako transformadore bat eraikitzea, mota hauetako transformadoreak baitira anitzenak gaiaren inguruko artikuluetan eraikitako ereduetan. Tamainari ez diot erreparatu, ez duelako aldaketa kualitatibo nabari bat eragiten, emaitzak eskalatuko ditu soilik.
- Nukleoaren formari dagokionez, gurutze-formadun sekzio ezberdinak eraikitzea erabaki dut. Gurutze-formadun sekzioek espazioa hobeto probesten dute, eta beraz, fluxu magnetikoa hobeto igaro daiteke.
- Harilkatua zentrokidea izango da, aurretik aipatutako arrazoiei jarraiki, goitentsioa (GT) kanpoaldean eta behe-tentsioa (BT) barnealdean kokatuz. Faseko GT eta BT harilkatu bana edukiko dugu, bakoitza aurretiaz definitutako espira kopuru jakin batekin. Tamaina ere aurretiaz definituko da.

- Azkenik, nukleoko xaflak sinplifikatuko ditugu, hauek solido gisa kontsideratuz. Nukleoa xaflaz osatuta egoteak eredua asko korapilatzeaz gain, ez du berebiziko ekarpenik egiten, Foucault-en korronteak beste era batzuen bidez kalkula baitaitezke. Egia da fenomeno jakin batzuetarako interesgarria izan daitekeela hau aztertzea, baina proiektu hau gehiegi zailtzea ekarriko luke.

Honekin, nahikoa edukiko daukagu transformadorearen eredua egiten hasteko. Hala ere, hasi aurretik transformadorearen inguruan aztertuko ditugun fenomeno fisikoak eta hauen baldintzak ezarriko ditugu.

Transformadorearen fisika

- Transformadorearen atzean egongo den fisika nagusia elektromagnetismoa izango da. Sinplifikazioak egite aldera, ontzat hartuko dugu zirkuitu monofasiko baliokidea eta histeresi-zikloa eta galera ezberdinak aintzat hartuko ditugu.
- Harilkatuari dagokionez, zirkuitu elektrikoetan oinarrituko gara kalkuluak egiteko. Horrela, atal elektrikitik suposatuko dugu harilkatua bera erresistentzia bat dela, eta primariotik jasoko duela tentsioa eta sekundarioan tentsio jakin bat eragingo duela.
- Mekanikoa
- Termikoa

Diseinuaren modelatzea

Eredua egiteko, COMSOL Multiphysics® programara egingo dugu salto. Hemen, aurretik definitu ditugun ezaugarriak esleituko dizkiogu eraikitze prozesuan dagoen transformadoreari.

- Fisikak/multifisikak
 - Elektromagnetismoa (fluxu magnetikoa)
 - Elektrikoa (korrontea, tentsioa)
 - Termikoa (bero-galerak, tenperatura)
 - Mekanikoa (bibrazioak)
- Egoera
 - Egonkorra
 - Iragankorra
- Sarea
- Geometria (aurreko atalean deskribatuak)
- Parametroak (aurreko ataleko alternatibak batera ezartzeko, tamaina, forma, espira kopuru eta abar desberdinak)
- Domeinua (geometriarekin batera)
- Materialak

Diseinuaren optimizazioa

Modelatzeko atalak berrikusiko dira, hauek konpontzeko/optimizatzeko helburuarekin. Iteratiboa izango da, nahi dugun eredua lortu arte. Interesatzen zaigu:

- Prozesamentu denbora laburra (applet-erako interesgarria)
- Konplexutasun maila bat zehazteko gai den eredurik sinpleena (*overkill*-ik ez)
- Errealismoa (edo irrealismorik eza). Ereduek, ezarritako baldintza batzuetarako, emaitza onak eman behar ditu.

Simulazio-fasea

Emaitzen lorpena

- Interesatzen zaizkigun parametroak ezarri
- Behar den informazioa eskuratu
 - Datu-multzoak
 - Taulak
 - Grafikoak
 - Max/min

Emaitzen azterketa/ebaluazioa

- Literaturan dakarrenarekin konparatu
 - Transformadoreen formulak erabili
 - Fenomeno kualitatiboak aztertu
 - Bibrazioa
 - Akoplamendu magnetikoa
 - Korrante parasitarioak

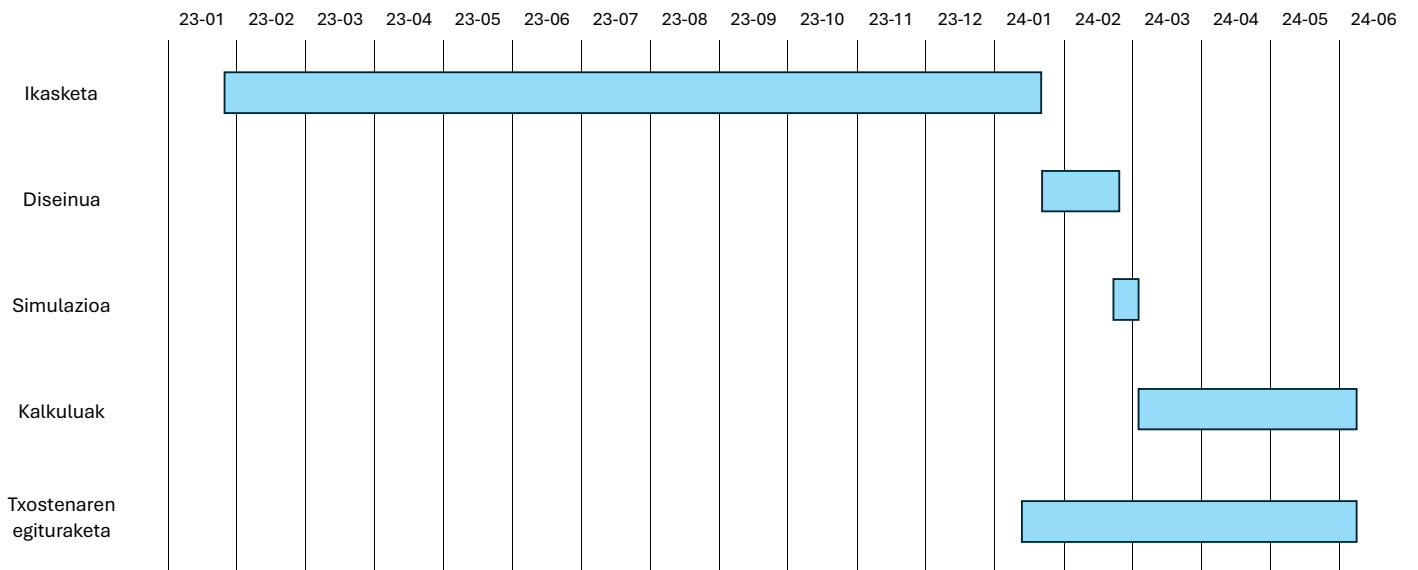
Kalkulu-fasea

Atal honetan, elementu finituen bidezko metodoak erabiliz egindako kalkuluen emaitzak hartuko dira eta aztertuko dira.

7.3 Gantt diagrama

Lan hau aurrera eramateko, kronologikoki banatutako hainbat etapa ezberdin ezarri dira, hein handi batean, arestian aipatutako fase ezberdinekin bat datozenak.

1. Ikasketa: GrAL honen hasierako etapa, 2023ko urtarrilaren 23an hasi zen. Etapa honetan, ikasketa-fasean zehaztutakoarekin hasteaz gain, planifikazio orokor bat egin zen, lanaren helburuak eta norabidea ezarri asmoz. 2024ko urtarrilaren 17ra arte iraun zuen.
2. Diseinua: 2024ko urtarrilaren 22an abiatu nintzen lehenengo diseinuarekin, transformadore monofasiko baten diseinuarekin alegia. Etapa honen amaiera 2024ko otsailaren 28an izan zen, transformadorearen azkenengo eredu definitiboarekin.
3. Simulazioa: 2024ko otsailaren 21ean hasi nintzen simulazio-fasearekin, lehenengo kalkuluak konputatzen. Diseinua baino pare bat egun beranduago amaitu nuen, martxoaren 1ean
4. Kalkuluak: 2024ko martxoaren 1etik aurrera, ekainaren 3ra arte. Eredu definitiboarekin egindako kalkuluen emaitzak aztertu nituen eta konparaketak egin nituen
5. Txostenaren egituraketa: Azken etapa hau 2024ko urtarrilaren 10ean hasi zen eta ekainaren 3ra arte egon da martxan.



10. Irudia: Lanaren Gantt diagrama.

8. AUKEREN ANALISIA

Proiektuaren hasieratik eta hau aurrera eraman bitartean, hainbat aukera ezberdin egon dira gai ezberdinen inguruan. Hasteko, COMSOL Multiphysics® programaren aukeraketa, sarrera aipatu bezala, gaiaren aukeraketarekin batera etorri da. Beraz, ez da analisirik egin EFM erako beste programen inguruan.

Programaren bi bertsio eduki ditut aukeran, bakoitza, saileko ordenagailu batean: COMSOL Multiphysics 5.6 eta 6.2. Hasieratik, 5.6 bertsioa duen ordenagailuarekin ibili naizenez eta behar izan ditudan tresnak (transformadoreen ereduak, besteak beste) eduki ditudanez, bertsio horretan jarraitu dut proiektu osoan zehar.

Lanaren planteamendu orokorra egin baino lehen, azaleratu den aukeretako bat irakaskuntzako material gisa erabil daitekeen izan aplikazio eramangarri bat egitea izan da. Era horretan, transformadorearen eredu edozein ordenagailutan exekutatu litzateke, ordenagailuak berak COMSOL Multiphysics® programa eduki behar izan gabe. Hala ere, horretarako beharrezko den "COMSOL Compiler" [19] moduluaren lizentzia faltan dela eta, irismenetik asko urrunduko naizelakoan, ideia atzean uztea erabaki dut.

Horrez gain, aipatu beharrezkoa da transformadorearen eredu egiterako orduan hainbat aukeraketa egin direla. Aukera hauek COMSOLen transformadore trifasikoaren eredu jarraituz egin dira hein handi batean; aukeren artean daude:

- Eredu monofasikoa/trifasikoa: transformadore trifasiko batek potentzia-transformadore erreal bat hobeto simulatzen duela eta, eredu trifasikoa izatea aukeratu dut.
- Nukleoaren eraikuntza: nukleoaren sekzioak forma ezberdinak izan ohi ditu, tentsio-maila ezberdinetara hobeto moldatzeko. Lan honetan, gurutze-forma ezberdinak lortzeko helburuarekin, nukleoa parametroen menpeko sekzio aldakor batekin modelatzea erabaki da.
- Neurriak: Neurriei dagokienez, transformadorearen neurriak parametroen menpean jarri dira, kalkuluak errazteko.
- Aldagaiak: korronteei, tentsioei eta potentzia elektrikoei balio jakin batzuk esleitu zaizkie, hauek potentzia-transformadore erreal bateri ezarri zaizkioken balioen hurbilak izanik.

COMSOL Multiphysics® barnean ere, badira tentuz hartutako erabakiak:

- Geometria: geometriaren eraikuntza era metodiko baten egin da, eman beharreko urrats kopurua ahalik eta txikiena izan dadin.
- Fisikak: fisiken atalean, eremu magnetikoa izan da hautatutako fisika nagusia.
- Ikasketak: amaitzeko, ikasketak definitzerako orduan, maiztasun-eremua erabili da, egoera-iragankorreko ikasketaren orde. Azkenengo honek denboraren araberako transformadorearen irudikapena egitea ahalbidetzen badu ere, kalkuluak egiteko hobea izango da maiztasun-eremuko analisia.

Aukerekin amaitzeko, aipagarria da horrelako proiektu batek elektrikako sailean eduki dezakeen ekarpena. Mota honetako proiektu baten bidez egindako prestakuntza onuragarria izan daiteke etorkizunean sailean programarekin egin daitezkeen proiektuetarako.

9. ARRISKUEN ANALISIA

Lanean egin beharrekoa planifikatzerako orduan, arrisku hauek aurreikusi ditu:

Hasteko, unibertsitateko sailean programaren inguruan dakien edota programa bera erabiltzen duen ikerlariak baldin badaude ere, programa sakonki menperatzen duen ikerlarien gabezia dago. Horrek, modelatze prozesuan egin ditzakedan akatsen soluzioa topatzeko prozesua horren zuzena ez izatea eragin dezake, nire kabuz topatu beharko baititut erantzun gehienak.

Horrez gain, COMSOL Multiphysics® programa, EFM programa profesional bat da. Programa honen inguruan aurretiazko ezagutzarik eduki ez dudanez, posible da honek eragina izatea ereduaren modelatzearen irismenean; eredia egiteko eta simulatzeko beharrezko den denbora kopurua ezin daiteke erraz kuantifikatu, ezin baititut aurreikusi prozesuan zehar zer akats eduki ditzakedan eta zer sakoneran sartu beharko naizen programan hauei soluzioa emateko.

10. PROPOSATUTAKO IRTENBIDEEN AUKERAKETA/DESKRIBAPENA

10.1 Ereduaren eraketa

Atal honetan, COMSOL Multiphysics® programan garatutako ereduaren eraketa azalduko da. Horretarako, emandako pausoak atalez atal adieraziko dira.

Parametroak

Ereduaren moldagarritasuna bermatze aldera, eredia “parametrizatu” egin da, hau da, transformadorearen eraikuntza-parametro batzuk, sarrera-parametro jakin batzuen menpe jarri dira. Parametro hauek bi taldetan sailkatu dira:

- Nukleoko parametroak (“Parametroak_Nukleoa”): hauen artean topa ditzakegu nukleoren dimentsioak definitzen dituzten parametroak:
 - l_nukleo: nukleoren zabalera.
 - h_nukleo: nukleoren altuera.
 - D_nukleo: nukleoren diametroa.
 - l_kutxa: nukleoa barnean hartuko duen domeinuaren zabalera.
 - h_kutxa: nukleoa barnean hartuko duen domeinuaren altuera.
 - b_kutxa: nukleoa barnean hartuko duen domeinuaren sakonera.
 - gurutz: nukleoren sekzio-mota (gurutze-formako sekzioa) aldatzeko balio garri izango den parametroa, 0 eta 3 bitarteko balioak hartuko dituena.
 - a: sekzio-mota aldatzeak dakartzan geometria-aldaketak zuzentzeko erabilitako parametroa.
- Harilkatuko parametroak (“Parametroak_Harilkatua”): multzo honetan, transformadorearen harilkatuari dagozkion parametroak daude sailkatuta:
 - N_Prim: primarioko espira kopurua, harilkatuko.
 - N_Sek: sekundarioko espira kopurua, harilkatuko.
 - Prim_d: primarioko harilkatuen lodiera (erradiala).
 - Sek_d: sekundarioko harilkatuen lodiera (erradiala).
 - Prim_Rbb: primarioko harilkatuen batezbesteko erradioa.
 - Prim_HarilS: primarioko harilkatuetako eroaleen sekzioa.
 - Sek_Rbb: sekundarioko harilkatuen batezbesteko erradioa.
 - Sek_HarilS: sekundarioko harilkatuetako eroaleen sekzioa.
 - Haril_Rkanpo: harilkatuen kanpo-erradioa.
 - Haril_h: harilkatuen altuera.

Metodoak

COMSOL Multiphysics® programaren barnean integratuta duen “Application Builder” sistemaren bitartez, posible da metodo deritzen eskuz idatzitako aginduak ezartzea. Hauek “method” erako nodo gisa agertuko dira “Global Definitions” nodo nagusian, eta eskuz zein dei bitartez exekutatu ahalko ditugu, ereduan zenbait eraldaketa egiteko. Gure

kasuan, hutseko eta zirkuitu-laburreko saiakerak egingo ditugunez, saiakera bakoitzerako aldagaiak automatikoki aldatzea interesatuko zaigu.

Hori egiteko, hutseko saiakeran 120 gradu defasatutako tentsioak txertatuko ditugu primarioan eta sekundarioan korrante nulua ezarriko dugu. Zirkuitu-laburrekoan, ordea, 120 gradu defasatutako korranteak txertatuko ditugu primarioan eta sekundarioan tentsio nulua ezarriko dugu.

Definizioak

Osagarri nagusiarekin hasiz, definizioetara joko dugu. Atal honetan, ereduaren kalkuluetan erabiliko diren definizio ezberdinak ezarriko ditugu:

Aldagaiak

Aldagaien barnean, korrante eta tentsioen nahiz galeren definizioak egingo dira:

- Aldagai elektrikoak ("aldagai elektrikoak"):
 - S_n : Sareko itxurazko potentzia.
 - $V_{1n_l_RMS}$: lineako tentsio nominala, primarioan (RMS).
 - $V_{2n_l_RMS}$: lineako tentsio nominala, sekundarioan (RMS).
 - $I_{1n_l_RMS}$: lineako korrante nominala, primarioan (RMS).
 - $I_{2n_l_RMS}$: lineako korrante nominala, sekundarioan (RMS).
 - $V_{1n_f_RMS}$: faseko tentsio nominala, primarioan (RMS).
 - $V_{2n_f_RMS}$: faseko tentsio nominala, sekundarioan (RMS).
 - $I_{1n_f_RMS}$: faseko korrante nominala, primarioan (RMS).
 - $I_{2n_f_RMS}$: faseko korrante nominala, sekundarioan (RMS).
 - V_{1n_f} : faseko tentsio nominala, primarioan (modulua).
 - V_{2n_f} : faseko tentsio nominala, sekundarioan (modulua).
 - I_{1n_f} : faseko korrante nominala, primarioan (modulua).
 - I_{2n_f} : faseko korrante nominala, sekundarioan (modulua).
 - K_c : transformadorearen transformazio-erlazio nominala.
 - a_V : primarioko eta sekundarioko tentsio nominalen arteko erlazioa.
 - a_I : primarioko eta sekundarioko korrante nominalen arteko erlazioa.
 - a_N : primarioko eta sekundarioko espiren arteko erlazioa.
 - N_p : primarioko espira kopurua.
 - N_s : sekundarioko espira kopurua.
- Galera-koefizienteak ("Koefizienteak_galerak"):
 - K_{oef_nukleo} : Nukleoko galeren dentsitatea (Histeresi + Foucalt)
 - K_{oef_NuE} ...
 - K_{oef_Stmz} ...
 - K_{oef_Stmz} ...
 - K_{oef_Stmz} ...
 - Q_{ml} : Nukleoaren galera magnetikoen koefizientea
 - $K_{oef_Fclt_k}$: Foucalt-en galeren koefizientea
- Galerak ("Galerak"):
 - $P_{otentzia_haril}$
 - G_{alera_tot}
 - G_{alera_nuk}
 - $G_{alera_nuk_mag}$
 - $G_{alera_nuk_res}$
 - $G_{alera_nuk_Stmz}$

- Galera_nuk_Fclt
- Galera_haril: harilkatuko galerak.
- Galera_aire: airean zeharreko galerak.

Aukeraketak ("Selections")

Aukeraketetan, gerora kalkuluak aplikatzeko balioko diguten domeinuak definituko ditugu. Hauen artean egongo dira:

- GT: goi-tentsioko (primarioko) harilkatuak.
- BT: behe-tentsioko (sekundarioko) harilkatuak.
- Harilkatua: GT + BT.
- Nukleoa: transformadorearen nukleoa.
- Transformadorea: harilkatua + nukleoa.
- Osoa: transformadorea inguratzen duen airea.

Funtzioak

Zenbait kalkulu egiteko (galeren kalkulua, besteak beste), eremu batean zehar dauden aldagaien batuketa egitea interesatuko zaigu. Horretarako, integrazio-funtzioa erabiliko dugu, domeinuen integrazioak kalkulatzeko.

- Int_airea: "Osoa" domeinuaren integrazio-funtzioa.
- Int_nukleoa: "Nukleoa" domeinuaren integrazio-funtzioa.
- Int_harilkatua: "Harilkatua" domeinuaren integrazio-funtzioa.

Geometria

Ereduaren geometria eraikitzeke orduan, eredia bi atal nagusitan banatu da berriz ere; alde batetik nukleoari dagokion eraikuntza egin da eta beste aldetik harilkatuari dagokiona.

Nukleoa

Nukleoaren geometria eraikitzeke baldintzapeko programazioa txertatu da. "If", "else if" eta "else" nodoen bitartez, arestian aipaturiko gurutze-formadun sekzioak modelizatu ahal izan ditut. Aurretik azaldu bezala, lau aukera ezberdin ezarri ditut parametroen atalean:

- 0: Sekzio karratua (gurutze-formarik ez)
- 1: Gurutze-formadun sekzioa, maila bat.
- 2: Gurutze-formadun sekzioa, bi maila.
- 3: Gurutze-formadun sekzioa, hiru maila.

Aukera bakoitzari baldintza jakin bat esleitu zaio, baldintza bakoitzak geometria jakin bat sortzea ahalbidetzen duelarik. Lehenengo aukeraketatik abiatuta, ereduak konplexutasun gehigarria jasotzen du aukeraketan igo ahala. Alabaina, nukleoa eraikitzeke emandako pausuak berberak dira funtsean:

1. "Work-plane" deritzon aginduaren bidez, bi dimentsioko lan-plano bat eratuko dugu.
2. Nodo honen "Plane Geometry" azpinodoan, nukleoaren dimentsioak edukiko dituen errektangelu bat sortuko dugu.
3. Ondoren, nukleoaren zutabe eta kulaten lodiera (arestian parametro gisa definituriko "D_nukleo" diametroa) kenduak dituen beste errektangelu bat eratuko dugu.

4. Beste errektangelu bat eratuko dugu, nukleoaren erdiko zutabea izango dena.
5. "Compose" operazio boolearraren bitartez, lehenengo errektangeluari bigarrena erauziko diogu eta hirugarrena erantsiko diogu; horrela, nukleoaren oinarrizko forma eratuko dugu.
6. Amaitzeko, "extrude" aginduaren bitartez, bi dimentsioko planoan eraikitako nukleoaren forma hiru dimentsiotara igaroko dugu, aukeratutako lodierarekin.

Prozesu hau hainbat alditan errepikatuko dugu gurutze-formadun sekzioko aukeretan, aldi bakoitzean aurretik sorturiko nukleoaren aurpegiei geruza gehigarriak gehituz eta lan-plano berrietan nukleoaren forma txikiagoa izanik. Alde batean egindakoa "mirror" deituriko aginduarekin islatu ahalko dugu nukleoaren beste aldera.

Harilkatua

Nukleoarekin amaitutakoan, harilkatuarekin jarraituko dugu. Horretarako, aurreko atalean eratu dugun nukleoa erditik ebakiko duen plano bat eratuko dugu. Honela, zutabeen sekzioak erakusten dituen lan-plano bat edukiko dugu. Harilkatua eratzeko prozesua nukleoaren sekzio-motaren aukeraketarekiko independentea izango da:

1. Harilkatua eratzeko, lan-planoan "circle" deritzon elementua txertatuko dugu. Elementu honen bitartez, geruza solidoz osaturiko zirkulu bat eratu ahalko dugu: kanpoko geruza primarioa izango da, bigarren geruzak primarioaren eta sekundarioaren arteko distantzia simulatuko du eta hirugarren geruza sekundarioa izango da.
2. Aurreko lan-planoa "extrude" aginduaren bitartez irtenaraziko dugu eta parametroetan definitutako harilkatuaren altuera ezarriko diogu.
3. Erdiko zutabeko harilkatua eratuta daukagula, "copy" aginduaren bitartez eskumako eta ezkerreko zutabeetara eramango dugu harilkatuaren kopia.

Harilkatua eratuta edukiko dugu beraz.

Ingurunea

Ereduaren geometriarekin amaitzeko, kalkulu-ingurunea definituko dugu, kalkulu numerikoa egiteko beharrezko izango diren mugak eratu asmoz. Horretarako, "block" elementu bat eratuko dugu eta parametroetan definitu ditugun balioak esleituko dizkiogu sortu berri dugun kutzari.

"Form union" aginduak ereduaren geometria bateratuko du.

Materialak

Eredua 3 elementu nagusiz osatuta dagoela definitu dugu: nukleoa, harilkatua eta inguruneko airea. Elementu bakoitzari material bat esleituko diogu, gerora kalkuluak egiteko beharrezko propietate fisikoak edukiko dituzten materialak:

- "Soft Iron (without losses)": burdin gozoa, nukleoaren material nagusia izango da. Galerarik ez duela suposatuko dugu, eta behar izanez gero, guk txertatuko dizkiogu ekuazio baten bidez.
- "Air": airea, transformadorea inguratuko duen eremuaren materiala.
- "Copper": kobrea, harilkatuko kableen materiala izango da.

Elementu bakoitzeko domeinuak material jakin batez eginda egotea nahi dugunez, material bakoitzari, dagozkion domeinuak ezarriko dizkiogu domeinu-aukeraketa leihoan.

Fisika

Gure transformadorearen ereduaren transformazio elektromagnetikoaren atala bakarrik interesatzen zaigunez, ereduaren fisika nagusia "Magnetic Fields" izango da. Fisika honek Maxwell-en ekuazio diferentzialak ditu oinarritzat; ekuazio hauetan oinarrituko da elementu finituetako kalkulua.

Domeinuak fisikoki definitzeko asmoz, "Magnetic Fields" nodo berrian hainbat elementu berri gehituko ditugu:

- "Ampere's Law 1": domeinu guztien oinarritzko fisikatzat, Ampereren legea hartuko dugu. Elementu fisiko gehiago gehitzen goazen heinean, oinarritzko lege hau erabiltzen duten domeinuak inguruneko (airea) domeinuak besterik ez dira izango, gainerako domeinuak baliogabetu egingo baitira.
- "Magnetic Insulation": azpinodo honek kalkuluetan beharrezko izango diren mugalde baldintzak ezarriko ditu. Horretarako, arestian definitu ditugun mugak aukeratu ditugu nodoaren domeinu-aukeraketan.
- "Initial values": azpinodo honen bidez, hasierako balio orokorrak ezarriko ditugu. Gure kasuan, harilkatuen fisikan definituko ditugun primarioko aldagaien balioak salbu, gainerako guztia zero izango da.
- Prim 1, Prim 2, Prim 3, Sek 1, Sek 2, Sek 3: Fase bakoitzeko harilkatu primarioko eta sekundarioko fisikak definituko dituzte azpinodo hauek.
 - Ekuazioetan, maiztasun eremua agertuko zaigu, ikasketetako batekin (hutseko edo ZL-ko ikasketak) erlazionatzen dugunean.
 - Horrez gain, "homogenized multiturn" ezarriko dugu eroale gisa eta harilkatua zirkular gisa definituko dugu.
 - Nodo honen azpiatalean korranteak egindako zirkuluaren noranzkoa eta perimetro zirkularra definitu beharko dugu.
 - "number of turns" atalean, primarioko/sekundarioko espira kopuruaren aldagaia txertatuko dugu.
 - "coil wire cross-section area" atalean, arestian definituriko eroaleen sekzioari dagokion aldagaia sartuko dugu.
 - Amaitzeko, primarioko eta sekundarioko tentsio/korranteetaz ez gara arduratuko, arinago definitu dugun metodoaren kodeak hori aldatuko baitu ikasketatik ikasketara.
- "Ampere's Law 2": Ampereren lege hau galerarik gabekoa izango da eta nukleoan aplikatuko dugu. Galerarik ez edukitzearena materialak berak eragingo du, galera gabeko burdin gozoa hartu baitugu nukleoaren material gisa. Horrenbestez, histeresi fenomenoak fluxu magnetikoan daukan eragina simulatzeko asmoz magnetizazio eredurako B-H kurba efektiboa erabiliko dugu. Fisika hau zirkuitulaburreko saiakerari dagokion ikasketan erabiltzea interesatuko zaigu, saiakera honetan arbuigarriak baitira nukleoan gertatzen diren galerak.
- "Ampere's Law 3": Ampereren azken lege honek nukleoko galera magnetikoak simulatzea du helburutzat. Horretarako, magnetizazio eredu gisa "magnetic losses" galera magnetikoak hautatuko ditugu. Eredu fisiko honetan, nukleo magnetikoaren galerak iragazkortasun koefiziente erreal (') eta irudikari (") baten menpekoak dira; galera magnetikoak kalkulatu ahal izatea erabilgarri egingo zaigu hutseko saiakerari dagokion ikasketan, hutseko saiakeran galerak ez baitira arbuigarriak nukleoan.

Sarea

Ereduaren sarea osatu beharko dugu azkenik. Horretarako, erabiltzaileak definitutako sarea aukeratuko dugu sarearen aukeren artean.

1. Nodo nagusiaren azpian, "size" deritzon azpinodoan, tamaina normala hautatuko dugu.
2. Horren ondoren, "free triangular" azpinodo bat definituko dugu, harilkatuaren goiko eta beheko mugak triangelu formako elementuz osatuko ditugu.
3. Aurreko pausoa eman eta gero, "swept" azpinodoaren bidez harilkatuko elementu finituak eratuko ditugu. Agindu honek, aurretiaz definitu diren triangelu formako elementuetatik eratorritako elementu zilindrikoak sortuko ditu, harilkatuaren kanpoaldeko forma zilindrikodun muga karratuz betez.
4. Amaitzeko, "free tetrahedral" baten bidez, transformadorearen nukleoaren elementu finituak eraikiko ditugu.

Ikasketak

Ikasketen atalean, bi ikasketa definitu ditugu: hutseko analisia eta zirkuitulaburreko analisia. Ikasketa bakoitzak bere gain hartzen ditu fisikako nodo guztiak, baina hutseko analisiak "Ampere's Law 3" (galeraduna) erabiliko duen bitartean, zirkuitulaburreko analisiak "Ampere's Law 2" (galararik gabea) erabiliko du. Aurretik aipatu bezala, honek zirkuitu baliokidearekin dauka zerikusia, suposatuko baitugu zirkuitulaburrean galerak hain direla txikiak ezen arbuigarriak izango diren. Aukeraketa egiteko, "Physics and Variables Selection" atalean "Modify model configuration for study step" aukera hautatuko dugu eta interesatzen ez zaigun fisikako nodoa ezgaituko dugu.

Horrez gain, ikasketa bakoitzean maiztasun-eremua ("Frequency Domain") gehituko dugu. Honen arrazoia da sistema periodiko baten aurrean gaudenez, aldagai elektromagnetikoen azterketan hauen modulua interesatzen zaigula fasea baino gehiago. Aurretik metodoetan definitu ditugun sarrera-balioak esandako honekin bat datoz, fasore gisa definitu baititugu.

Adi: Transformadorearen bilakaera denbora-eremuan aztertu nahiko bagenu, "Time Dependent" ikasketa gehitu beharko genuke eta sarrera-balioak funtzio sinusoidal gisa txertatu. Horrez gain, kontuan hartu beharrekoa da fisika atalean definitu ditugun nodo ezberdinek erabiltzen dituzten ekuazio fisikoek ikasketa jakin baten daukatela jatorria (hauek automatikoki ezartzen badira ere). Horrenbestez, agian beste era bateko aldaketak egin beharko lirateke.

Hutseko analisisian maiztasun bakarra txertatuko dugu (50 Hz), zirkuitulaburreko analisisian berriz maiztasun ezberdinak txertatuko ditugu, maiztasunak transformadorearen irteera-balioetan duen eragina aztertu asmoz.

Amaitzeko "Job Configurations" nodoaren barnean kokatutako sekuentzia bat sortu da, metodoetan definitu ditugun sarrera-balioak automatikoki ezartzeko ikasketa aurrera eramaten dugun aldiro. Ikasketa bakoitzari ikasketa jakin horri dagokion metodoa esleitu zaio.

Aurreko guztia definituta dugunean, ikasketa bakoitzaren kalkuluak abiatuko ditugu "compute" botoiaren bidez, eta denbora bat pasata, ordenagailuak kalkulatuako balioek konbergitu egingo dute dagokien balioetara.

Eredua egiten joan naizen ahala, ebazlearen ezarpenak aldatzeko balio duen "Solver Configurations" nodoan aldaketak egin badituz ere, ez dira benetan esanguratsuak eta lanaren irismenetik oso urrun gelditzen dira.

Emaizten atala

Ereduaren azken atal honetan, aurreko nodoan lortu ditugun emaitzak bistaratzeko ditugu:

- Hasteko, "Datasets" azpinodoan, hutseko saiakuntzaren eta zirkuitulaburreko zaiakuntzaren emaitzak agertuko zaizkigu. Atal honetan, "cut-plane" deritzen ebaketa-planoak defini ditzakegu, hurrengoko emaitzen ataletan emaitzak plano hauetan adierazteko.
- Ondoren, "Derived Values" azpinodoan, interesatzen zaizkigun balioak ebaluatu ahalko ditugu era global baten, puntu baten edota integrazio-eremu baten. Atal honetan, parametroen atalean definitu ditugun galeren balioak lortu ahalko ditugu, baita aldagaien atalean definitutako aldagaien balioak ere; balio hauek "Tables" azpinodoan adieraziko dira.
- Azkenik, bi "3D plot group" gehituko ditugu, hau da, hiru dimentsiotako marrazki talde bi eratuko ditugu, transformadoreko fluxua irudikatzeko; lehenengo multzoak hutseko emaitza-multzoa hartuko du eta bigarrenak zirkuitulaburreko emaitza-multzoa. Azpinodo bakoitzaren barnean, "Multislice" bat definituko dugu, gorago definitu ditugun ebaketa-planoak erabiliz, hiru dimentsiotan xy, xz eta yz planoetan gertatzen dena bistaratzeko. Era berean, "Streamline Surface" batekin, ereduaren korrante-lerroak bistaratu ahalko ditugu ebaketa-plano ezberdinetan.

11. EMAITZAK, PRODUKTUAK, TEKNOLOGIAK, SORKUNTZAK, ONDORIOAK, ETORKIZUNEN LERROAK

11.1 Emaitzak

Hutseko Saiakuntza

Hutseko ikasketan lortutako emaitzak, transformadorearen zikloan zeharreko aldiune bateko balioak dira, zehazki, sarrerako tentsioen faseko aldiunekoa.

Primarioko korronteak

1. Taula: Hutseko saiakuntzaren harilkatu primarioko korronteak.

freq (Hz)	Prim1 Korrontea (A)	Prim2 Korrontea (A)	Prim3 Korrontea (A)
50	5.6311∠163.04°	3.8989∠-87.020°	5.6195∠22.370°

Primarioan sortutako korronteetan, aldaketa argia ikus daiteke lehenengo zutabeko eta hirugarren zutabeko harilkatuetakoko korronteak modulu antzekoa dutela. Bigarren zutabeko korronteen modulu ordea, aurreko baina baino txikiagoa da. Hori, bigarren adarreko lerro-magnetikoa beste bi adarretakoa baino txikiago delako da, eta beraz, bigarren adarreko erreluktantzia magnetikoa txikiagoa izango da.

Horrez gain, deigarria da primarioko korronteek sekulako desfasea daukatela, ohikoa den 120°-ko desfasea eduki ordez. Lehenengo adarreko eta hirugarren adarreko korronteen artean, 140°-ko desfasea ageri da, ohikoa dena baino 20° gehiagokoa.

Harilkatu sekundarioan korronteak ez dagoela kontuan hartuz, esan beharra dago balio hauek zertxobait altuak direla.

Sekundarioko tentsioak

2. Taula: Hutseko saiakuntzaren harilkatu sekundarioko korronteak.

freq (Hz)	Sek1 Tentsioa (V)	Sek2 Tentsioa (V)	Sek3 Tentsioa (V)
50	611.22∠60.027°	611.37∠-179.98°	611.36∠-59.967°

Sekundarioko tentsioei so eginez, ikus dezakegu modulu aldetik oso antzeko dabiltzala, %0,03-ko errore erlatiboa edota 0,15V-eko ezberdintasuna baitago gehienez hauen artean. Faseetan ere nabari da zehaztasun hori, 120°-ko desfasea ageri baita gutxi gorabehera, 0,06°-ko desbideratzearekin.

Hutseko saiakera denez, sekundarioko tentsioa primariora erreduzituz eta primarioko tentsioarekin (nominala) konparatuz, antzeko zerbait lortu beharko genuke.

Konparaketa egiteko, primarioko tentsioa sekundariora erreduzituko dugu, emaitzak taulako balioekin alderatu ahal izateko:

$$V'_1 = V_{1N} \cdot \frac{N_2}{N_1} = V_{2N} = V_{2N_{RMS}} \cdot \sqrt{2} = 577,35 \cdot \sqrt{2} = 565,69 \text{ V}$$

Sekundarioko harilkatua lortu ditugun tentsioekin konparatuz, ikusi dezakegu sekundarioko tentsio nominala txikiagoa dela.

Hutseko galerak

3. Taula: Hutseko saiakuntzaren galerak.

freq (Hz)	Galera_aire (W)	Galera_haril (W)	Galera_nuk_mag (W)	Galera_tot (W)
50	0,0018832	55,221	4342,4	4397,6

Hutseko saiakuntzarekin amaitzeko, galeren analisia egingo dugu. Aurreko taulan ikus daitekeen moduan, aireko galerak ez dira esanguratsuak.

Hariletan dauden galerak, arbuigarriak ez diren arren, nukleoko galerekin konparatuta oso txikiak dira, hutseko entseguan izan beharko liratekeen moduan. Hariletako galeren esangura primarioko korronteen balio altuak eragina izan daiteke.

Amaitzeko, galeren artean nukleoko galerek daukate pisurik handiena. Galera hauek, histeresi fenomenoari dagozkio gehienbat. Programak bertak galera hauen kalkulua egin dezake, hala eskatzen bada; Horretarako, Steinmetz-en formula kalkulatu dugu, guk aurretiaz ezarritako $K=100$, $a=1$ eta $b=1,6$ parametroen bitartez eta puntu bakoitzean kalkulatuak indukzio magnetikoa hartuz. Hau da simulazioan lortutakoa:

4. Taula: Histeresi-galerak Steinmetz-en ekuazioaren bitartez

Galera_nuk_Stmz (W)
1761

Kalkulatutako bi galerak oso ezberdinak dira, lehenengoa bigarrena baino 2 aldiz handiagoa izanik.

Zirkuitulaburreko Saiakuntza

Saiakuntza honetan ere, aldiuneko tentsioak lortu ditugu. Kasu honetan, maiztasun ezberdinak erabili ditugu, maiztasunen araberrako alderaketak egiteko.

Primarioko tentsioak

5. Taula: Zirkuitulaburreko saiakuntzaren harilkatu primarioko tentsioak.

freq (Hz)	Prim1 Tentsioa (V)	Prim2 Tentsioa (V)	Prim3 Tentsioa (V)
50	237.24∠-43.285°	237.33∠76.846°	237.12∠-163.04°
100	465.09∠-36.795°	465.34∠83.335°	464.98∠-156.54°
150	694.97∠-34.583°	695.40∠85.545°	694.89∠-154.33°
250	1156.0∠-32.804°	1156.8∠87.324°	1156.0∠-152.55°
500	2310.0∠-31.466°	2311.6∠88.661°	2310.1∠-151.21°
1000	4619.0∠-30.796°	4622.3∠89.330°	4619.3∠-150.54°

Primarioko tentsioei gainera bat botaz gero, maiztasunaren araberrako igoera nabaria dago; hau, zirkuituko atal erreaktiboa, atal erresistiboa baino handiagoa delako gertatzen da, eta, atal erreaktiboa maiztasunarekin linealki aldatzen denez, tentsioak ere aldaketa ia lineal bat jasaten dute. Horrez gain, tentsioen desfasea handitu egiten da bakoitzean, maiztasuna handitu ahala atal erreaktiboa handitzen delako, eta beraz, desfasea ere.

Bestalde, hiru adarretako tentsioak antzerakoak dira eta ia 120°-ko diferentzia dago faseen artean.

Sekundarioko korronteak

6. Taula: Zirkuitulaburreko saiakuntzaren harilkatu primarioko tentsioak.

freq (Hz)	Sek1 Korrontea (A)	Sek2 Korrontea (A)	Sek3 Korrontea (A)
50	434.86∠-120.07°	434.41∠0.0092248°	434.89∠120.10°
100	434.87∠-120.08°	434.41∠0.0044866°	434.88∠120.10°
150	434.87∠-120.08°	434.41∠0.0029073°	434.88∠120.09°
250	434.87∠-120.08°	434.41∠0.0016438°	434.88∠120.09°
500	434.87∠-120.09°	434.41∠6.9614E-4°	434.88∠120.09°
1000	434.88∠-120.09°	434.41∠0.0000°	434.88∠120.09°

Sekundarioko korronteak kontuan hartuz, ikus daiteke maiztasunaren arabera ez dagoela aldaketa handirik. Kasu honetan, zirkuitulaburreko saiakeran betetzen den arauetako bat bete behar da: sekundarioko korrontea primarioa erreduzituta, primarioko korrontearen antzekoa izan behar da. Konparaketa egiteko, primarioko korrontea sekundarioa erreduzituko dugu, emaitzak taulako balioekin alderatu ahal izateko:

$$I'_1 = I_{1N} \cdot \frac{N_2}{N_1} = I_{2N} = I_{2NRMS} \cdot \sqrt{2} = \frac{400 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} \cdot \sqrt{2} = 471,40 \text{ I}$$

Ikus daitekeenez, emaitzak antzekoak dira, baina korronte-galera nabaria dago.

Zirkuitulaburreko galerak

7. Taula: Zirkuitulaburreko saiakuntzaren galerak.

freq (Hz)	Galera_aire (W)	Galera_haril (W)	Galera_nuk_mag (W)	Galera_tot (W)
50	5,8742E-07	1763,9	-1,8588E-19	1763,9
100	2,3285E-06	1763,9	-1,1904E-17	1763,9
150	5,2304E-06	1763,9	-1,9454E-18	1763,9
250	1,4516E-05	1763,9	-1,1485E-17	1763,9
500	5,8039E-05	1763,9	3,4478E-17	1763,9
1000	2,3210E-04	1763,9	1,2111E-17	1763,9

Saiakuntza honetako galeretan, berriz ere antzeman daiteke airetik ez dagoela apenas galerarik. Oraingoan, ezberdintasun nagusia nukleo magnetikoko galerak ia zero direla da. Honek zentzua dauka, zirkuitulaburreko saiakuntzan oso tentsio txikia aplikatu ohi delako istripu bat gertatzeko besteko korrontea ekiditeko, eta beraz, nukleotik barreiatzen den fluxu magnetikoa oso txikia da.

Potentzia-galera nagusia harilkatuetan gertatzen da, joule efektuaren eraginez.

11.2 Ondorioak

Ondorioekin hasteko, hutseko saiakeran lortutako emaitzak aipatu beharra dago. Harilkatu sekundarioko hutseko tentsioa, tentsio teorikotik hurbil badago ere, kezkarria da hau baino handiagoa izatea: Erreduzitutako zirkuitu baliokide batean, tentsio sekundarioa primariokoa baino handiagoa baldin bada, Ferranti fenomenoak gertatzen ari denaren seinale da.

Ferranti efektua transformadorearen sekundarioan angelu jakin batetik aurreragoko karga kapazitibo bat jartzean gertatzen da. Hutsean baina, transformadoreak dituen erreaktantzia bakarrak induktiboak dira, harilkatuaren eta nukleoaren beraren

propietate induktiboek eragina. Hori dela eta, emaitzen arabera transformadorearen atalen batek jokaera kapazitiboa edukiko luke, teorian ezinezkoa dena. Fenomeno hau unibertsitateko hainbat irakaslerekin komentatu eta gero, ereduaren akats bat izan behar dela ondorioztatu da, COMSOL enpresak eredutzat duen transformadore trifasikoan gertakari bera agertzen bada ere.

Horrez gain, hutseko saiakuntzako histeresi-galerak, programak kalkulaturako Steinmetz-en ekuazioarekin konparatuz gero, handiagoak dira. Argitzeke dago zer ezberdintasun dagoen lortutako galera bien artean.

Azkenik, esan daiteke orohar EFM bidezko ereduak bat egiten duela transformadore batek teorian duen portaerarekin.

11.3 Etorkizuneko Lerroak

GrAL honetan garatu den lanak jarraipen-bide ugari ditu etorkizunera begira. Hauen artean, aipagarriak dira egindako ereduarekin jarraituz kalkula daitekeena:

- Gurutze-formako sekzioaren aldaketak emaitzetan daukan eraginaren azterketa.
- Parametro eta aldagaien balioen aldaketak daukan eraginaren azterketa.
- Harilkatuaren bi dimentsiotako azterketa egitea eta harilkatuko indarren kalkulua.
- Nukleoan magnetostrikzio fenomenoaren azterketa.
- Nukleoko xaflen modelatzea eta hauen eraginaren azterketa
- Ondorioetan aipatutako gertakarien argipena.
- Applet independente baten garapena.
- Ereduaren optimizazio-analisia.
- MATLAB edo Simulink bezalako programen bidezko modelatze magnetikoa eta EFM egindako ereduarekin konparaketa.

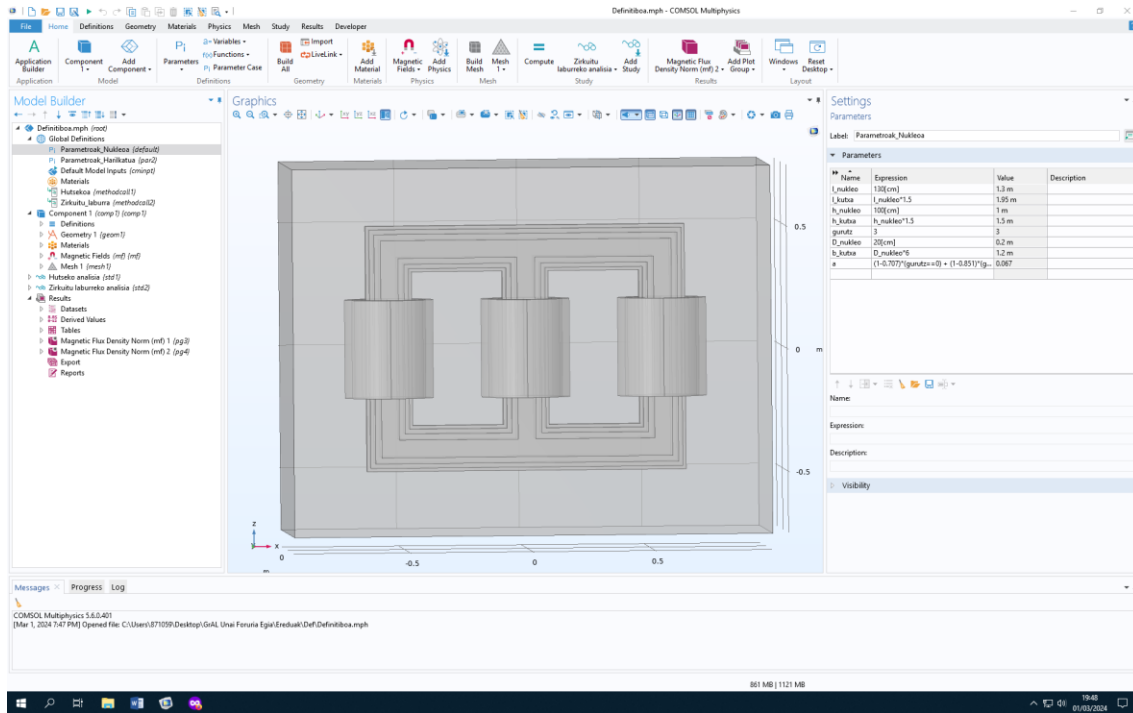
Horrez gain, beste fisika batzuetara salto egitea interesgarria litzake, beste eredu batzuen simulazioekin COMSOL Multiphysics® programako atal gehiagotan sakontzeko.

BIBLIOGRAFIA

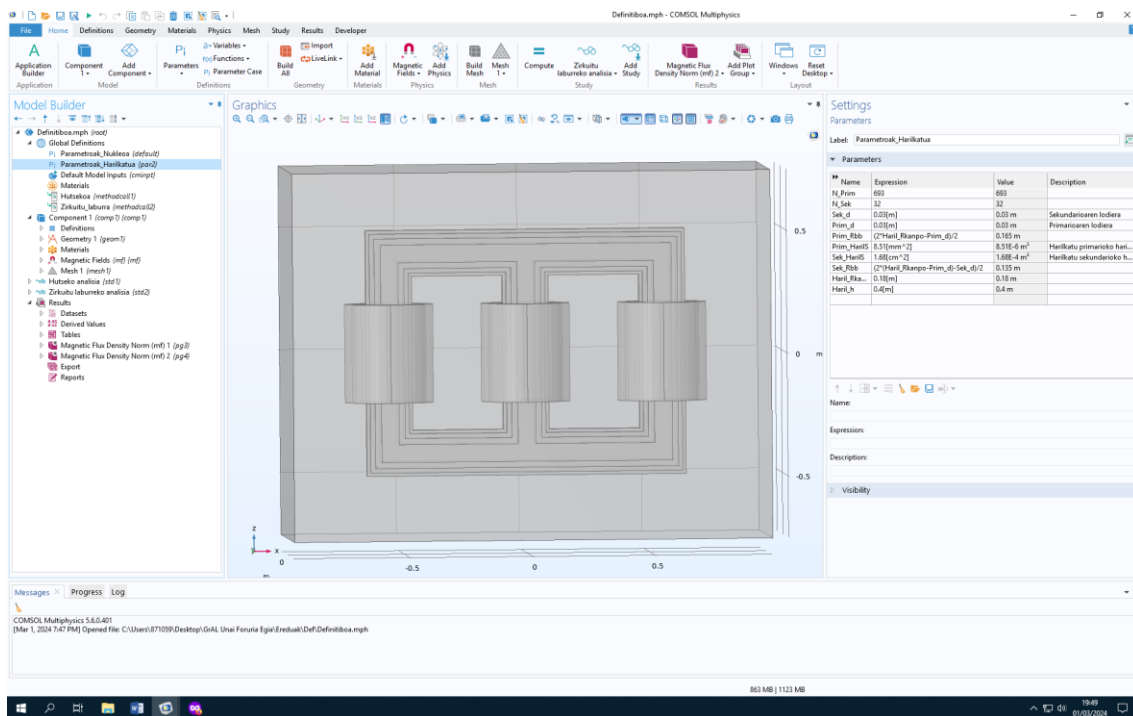
- [1] A. Bartolomé, M. Carmona, V. Ferrer, P. Folgueiras, M. Freixa, J. M. Garcia-Borés, A. Nuri, M. Padrós, R. Ramis eta V. Soria, El trabajo de fin de grado. Guía para estudiantes, docentes y agentes colaboradores, Madrid: McGraw-Hill USA, 2013.
- [2] ABB, ABB Transformer Handbook, Zürich, 2004.
- [3] B. Paulus, «comsol.com,» 25 Urria 2018. [Online]. Available: <https://www.comsol.com/blogs/evaluating-transformer-designs-with-electromagnetics-simulation>.
- [4] N. Picardo, «comsol.com,» 4 Otsaila 2021. [Online]. Available: <https://www.comsol.com/blogs/computing-losses-in-a-three-phase-power-transformer>.
- [5] COMSOL, «comsol.com,» [Online]. Available: <https://www.comsol.com/video/analyzing-transformer-designs-using-comsol-multiphysics>.
- [6] C. J. Kendeg Onla, E. D. Kenmoe Fankem, A. Dountio Tchioffo eta Y. Effa Joseph, «3D Multiphysics Modelling of Three-Phase Transformer,» *ITEE Journal, Volume 10, Issue 2*, 2021.
- [7] H. Jingzhu, L. Dichen, L. Qingfen, Y. Yang eta L. Shanshan, «Electromagnetic vibration noise analysis of,» *IET Journals*, 2015.
- [8] J. Marks eta S. Vitolina, «Modelling of magnetostriction of transformer,» *Open Physics*, pp. 803-808, 2017.
- [9] F. Yang, Z. Ren, D. Zhang, L. Li, X. Fan eta Y. Zhou, «Simulation Analysis and Experiment Validation of Vibration and Noise of Oil-immersed Transformer,» *2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2019.
- [10] K. Dawood, G. Komurgoz eta F. Isik, «Modeling of Distribution Transformer for Analysis of Core Losses of Different Core Materials Using FEM,» *2019 8th International Conference on Modeling Simulation and Applied Optimization (ICMSAO)*, 2019.
- [11] A. Indarto, M. Aziz eta C. Hudaya, «Study of material characteristics of core and winding to minimize losses on power transformer,» *IOP conference series. Earth and environmental science*, 2021.
- [12] H. O. Henriques, C. E. Vizeu, P. C. Souza, M. C. Costa, G. G. Sotelo, J. M. Sousa, M. Z. Fortes eta V. H. Ferreira, «COUPLED ELECTROMAGNETIC-THERMAL SIMULATION OF a POWER TRANSFORMER BY 3D FEM,» *Acta Polytechnica*, pp. 400-409, 2020.

- [13] R. Barroso, «Simulation and Experimental Validation of the Core Temperature Distribution of a Three-Phase Transformer,» Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brazil, 2014.
- [14] S. Yadav eta R. K. Mehta, «FEM based study of short circuit forces on power transformer windings,» *2019 3rd International Conference on Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering (RDCAPE)*, 2019.
- [15] M. Á. Zorrozuza Arrieta, *Makina elektrikoak*, Bilbo: Euskal Herriko Unibertsitatea, Argitalpen Zerbitzua, 2007.
- [16] J. Fraile Mora, *Máquinas Eléctricas*, Madrid: Garceta, 2016.
- [17] A. M. Larrea Valle, «Aireko lineetako koroa-efektuaren analisia elementu finituen bidezko simulazioaz,» Bilbo, 2018.
- [18] J. X. Rementería Rentería, «Tenperatura kontrolatzeko maketa baten interfazearen diseinua,» Bilbo, 2022.
- [19] COMSOL, «COMSOL Compiler ,» [Online]. Available: <https://www.comsol.com/comsol-compiler>.
- [20] COMSOL, «comsol.com,» [Online]. Available: <https://www.comsol.com/video/analyzing-transformer-designs-using-comsol-multiphysics>.

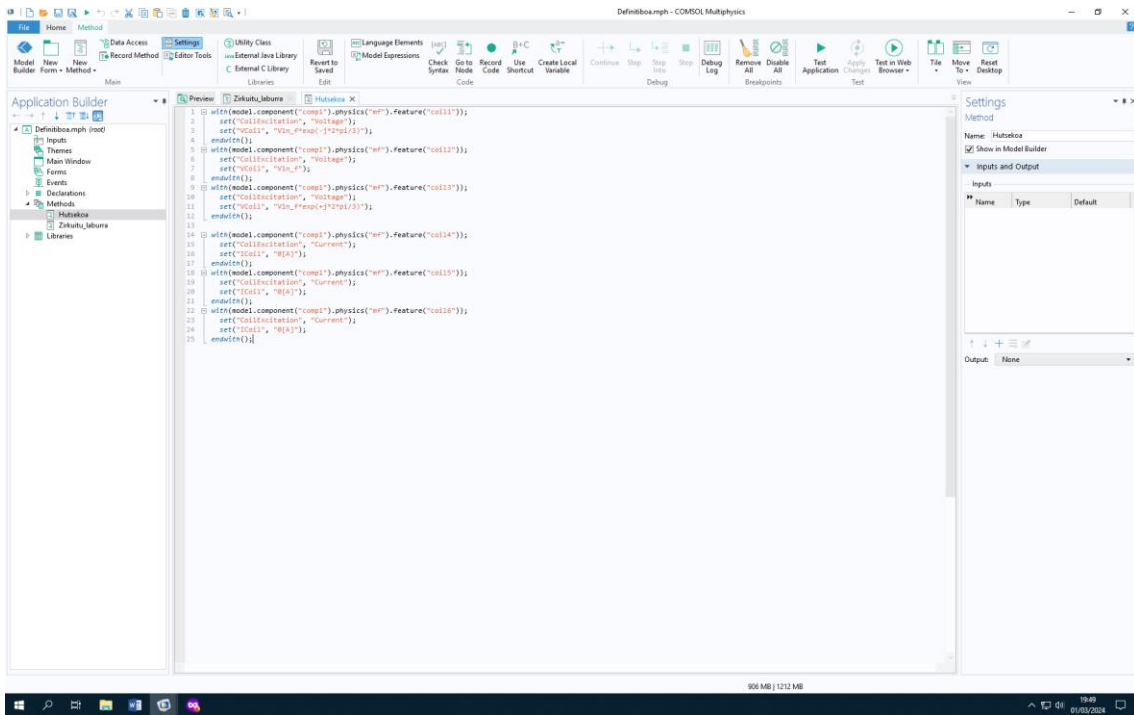
ERANSKINAK



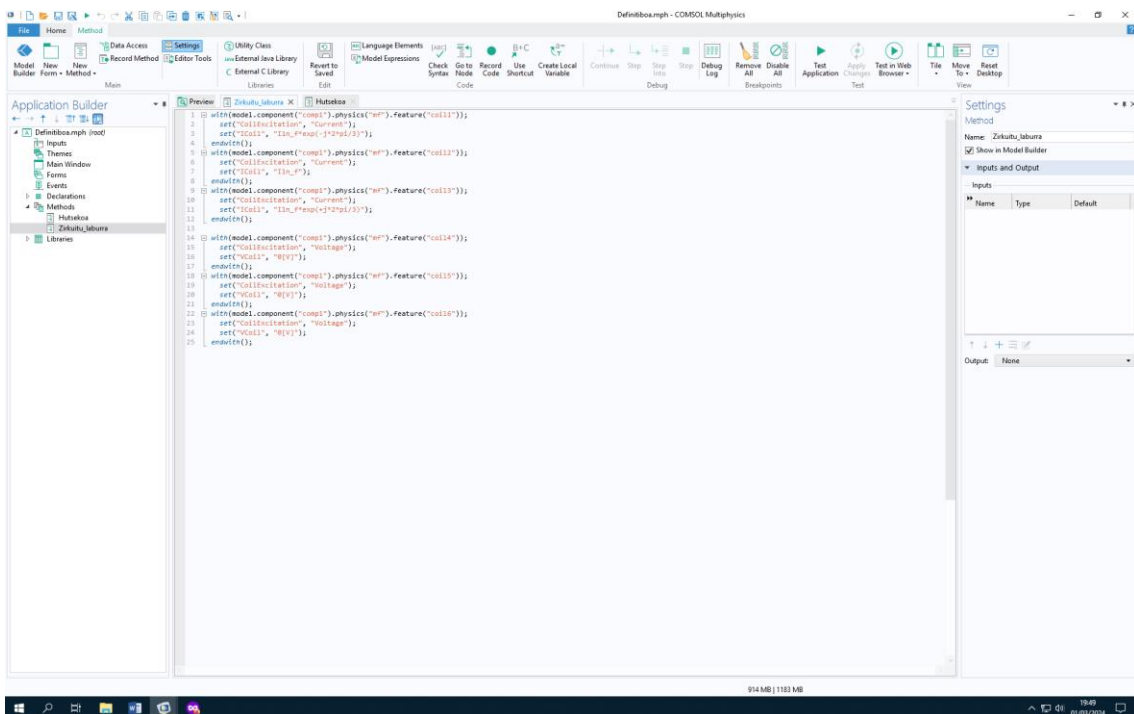
1. COMSOL Irudia: Nukleoko parametroak



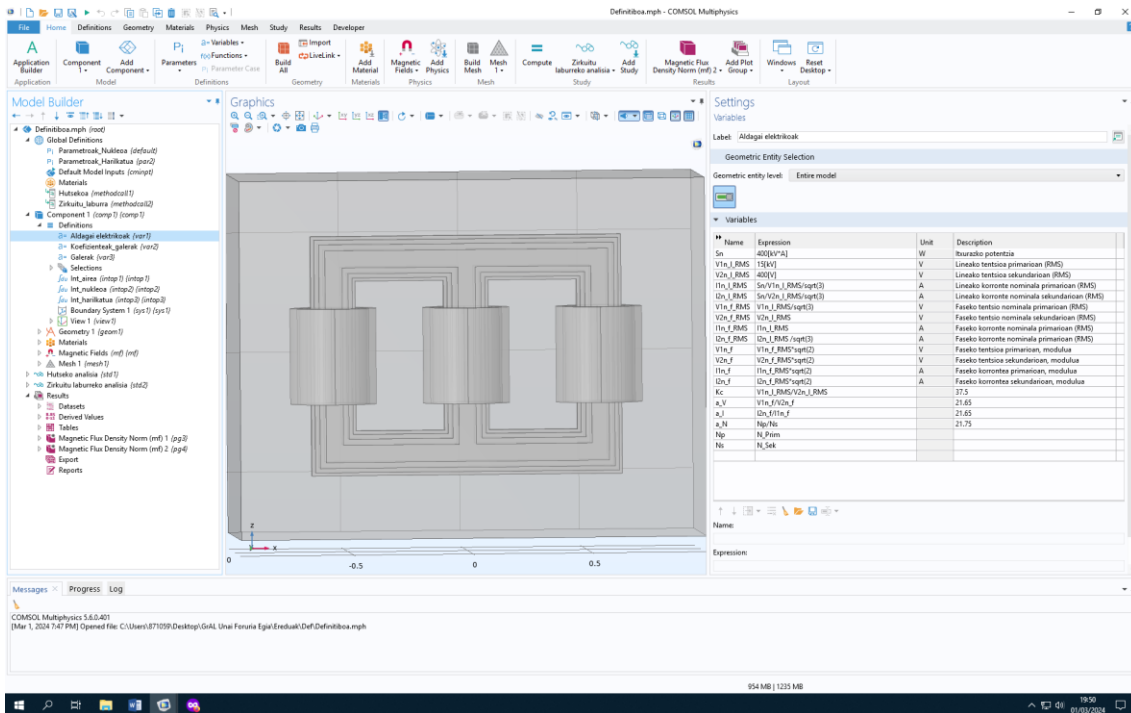
2. COMSOL Irudia: Harilkatuko parametroak



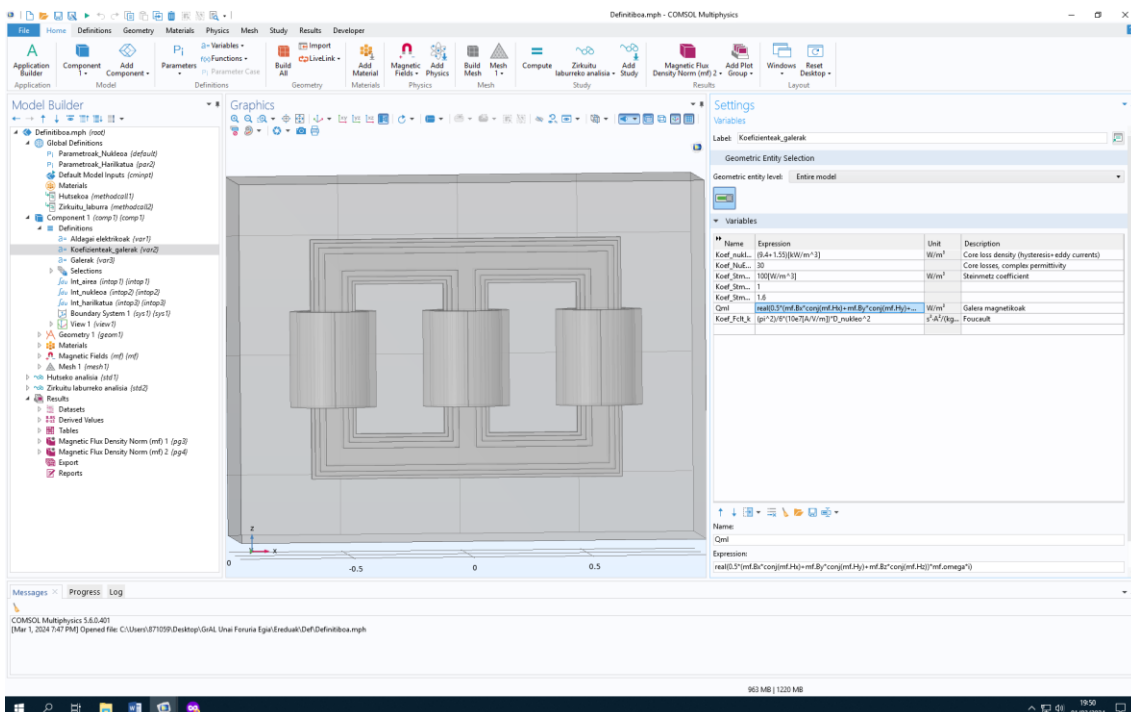
3. COMSOL Irudia: Hutseko metodoa



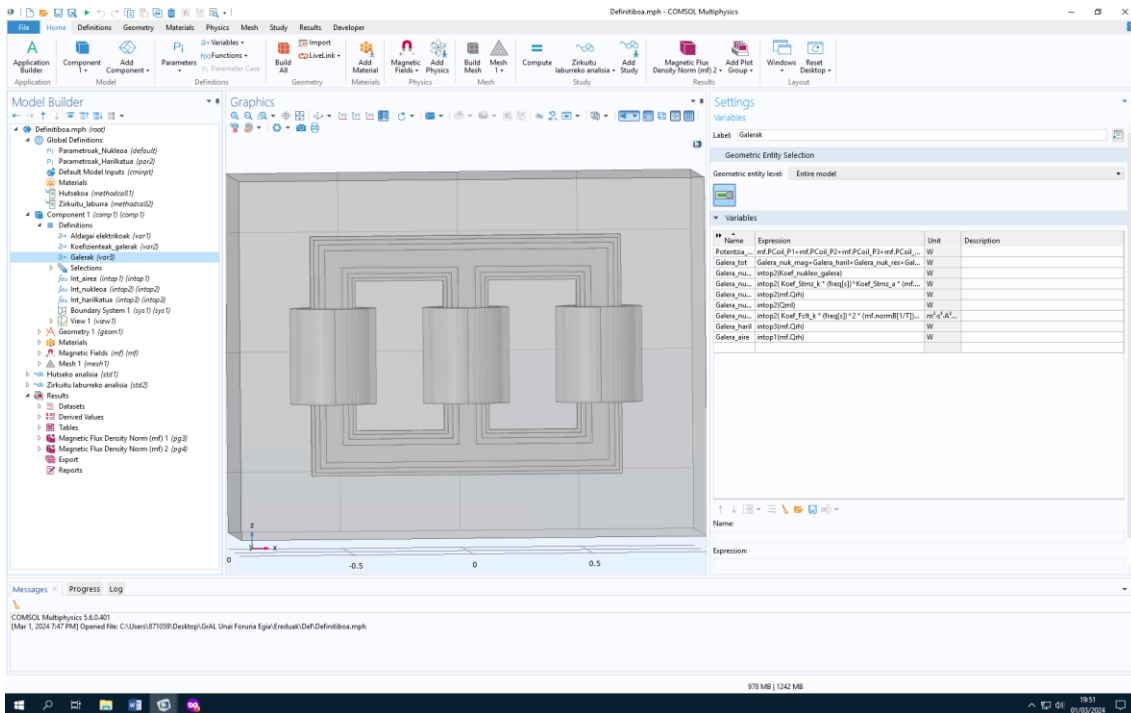
4. COMSOL Irudia: Zirkuitulaburreko metodoa



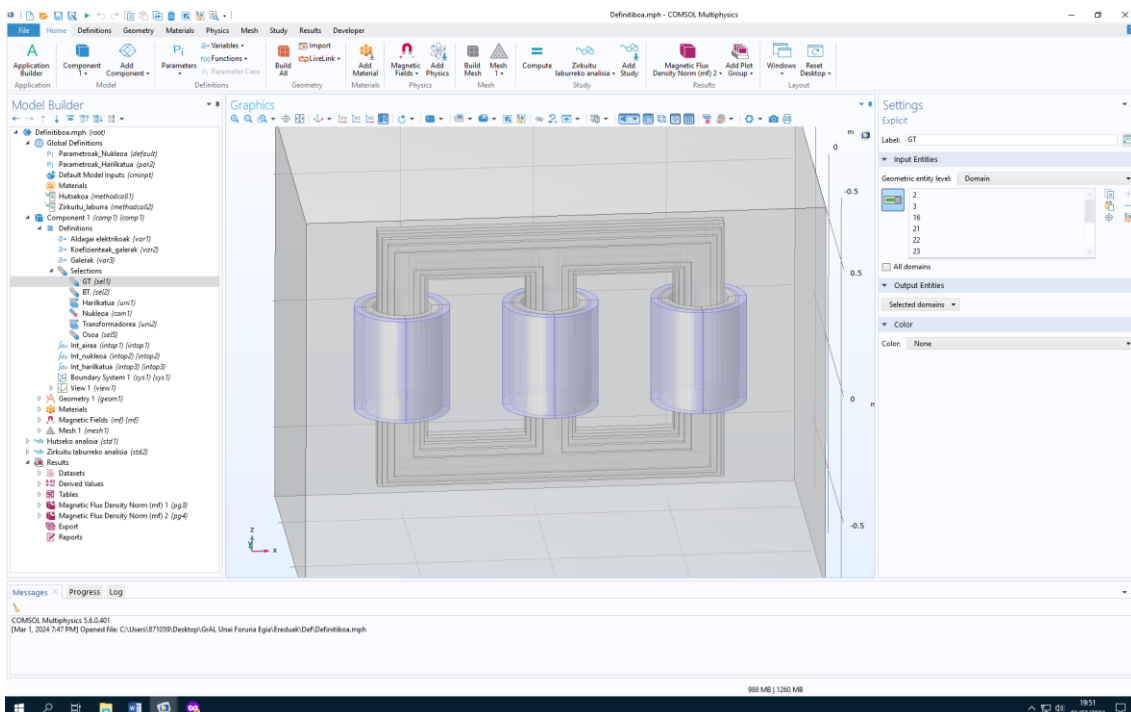
5. COMSOL Irudia: Aldagai elektrikoak



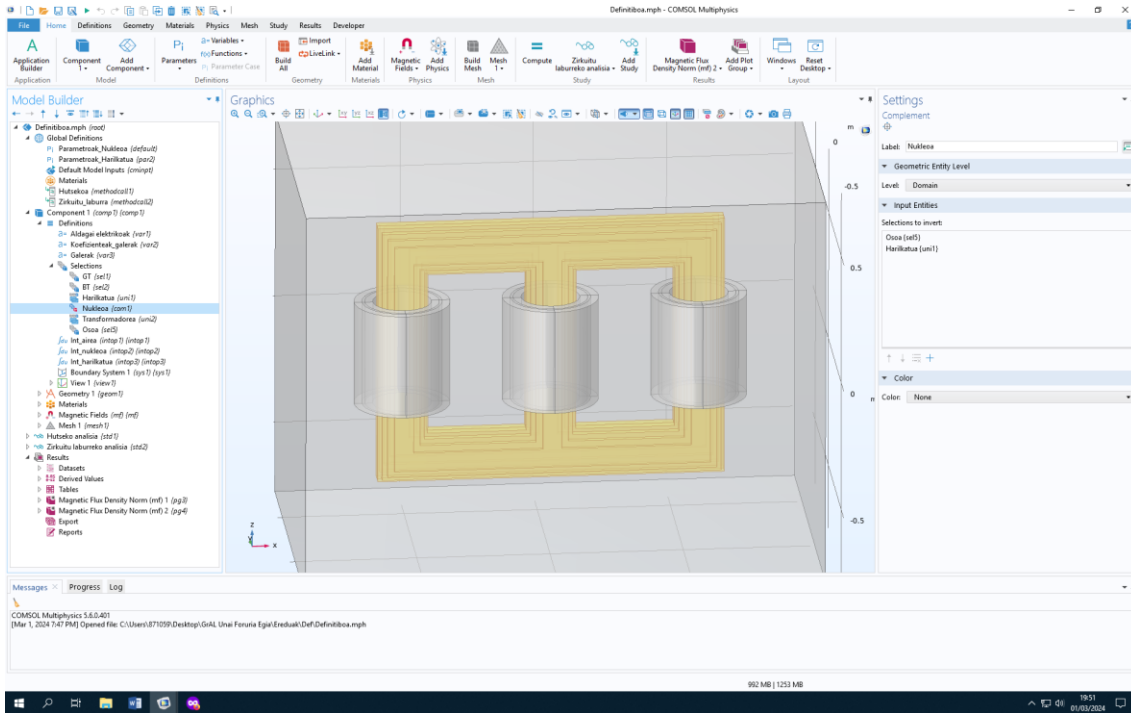
6. COMSOL Irudia: Galera-koefizienteak



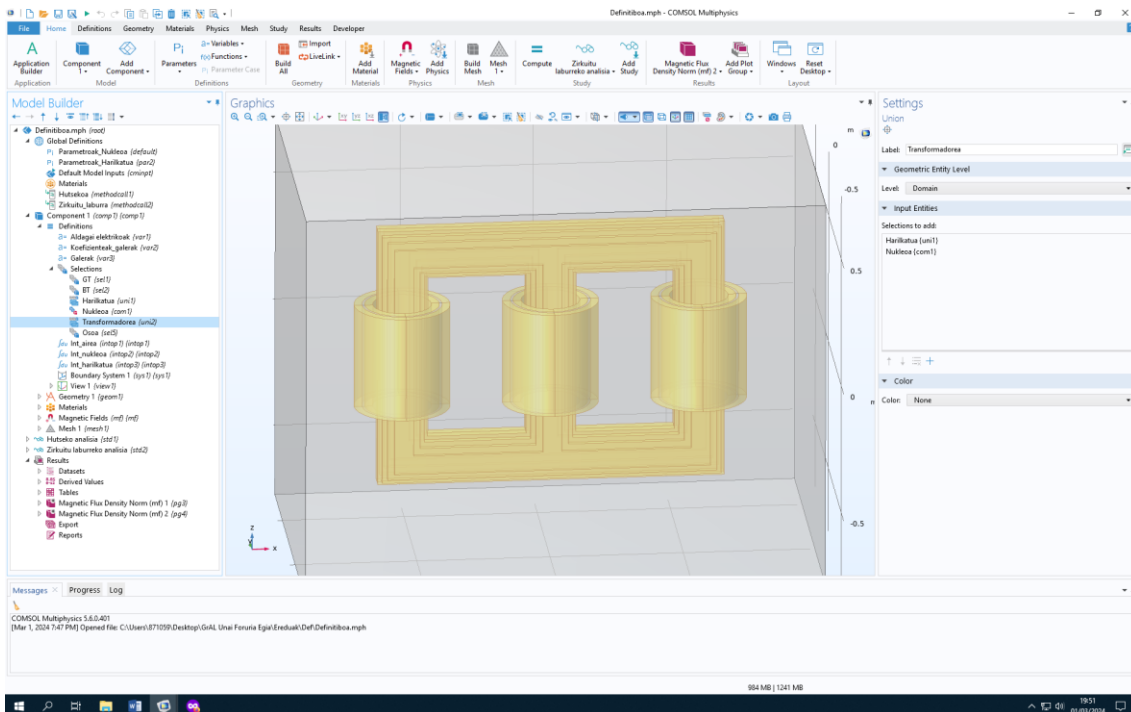
7. COMSOL Irudia: Galerak



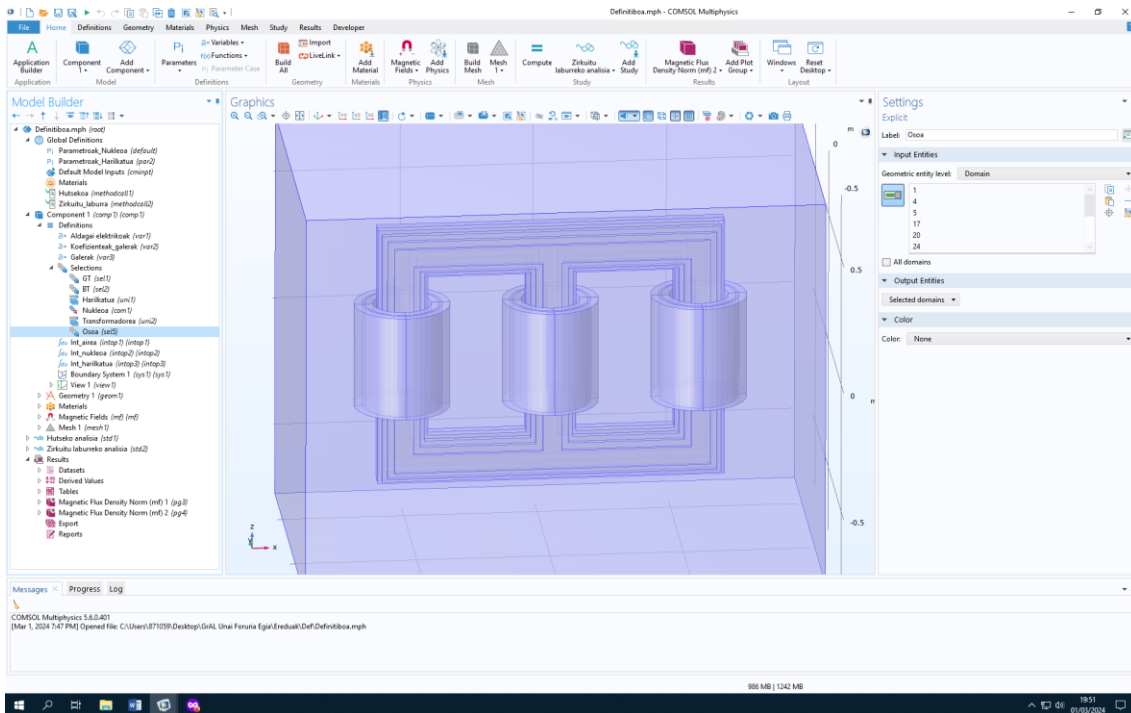
8. COMSOL Irudia: Aukeraketak (Goi tentsioa, GT)



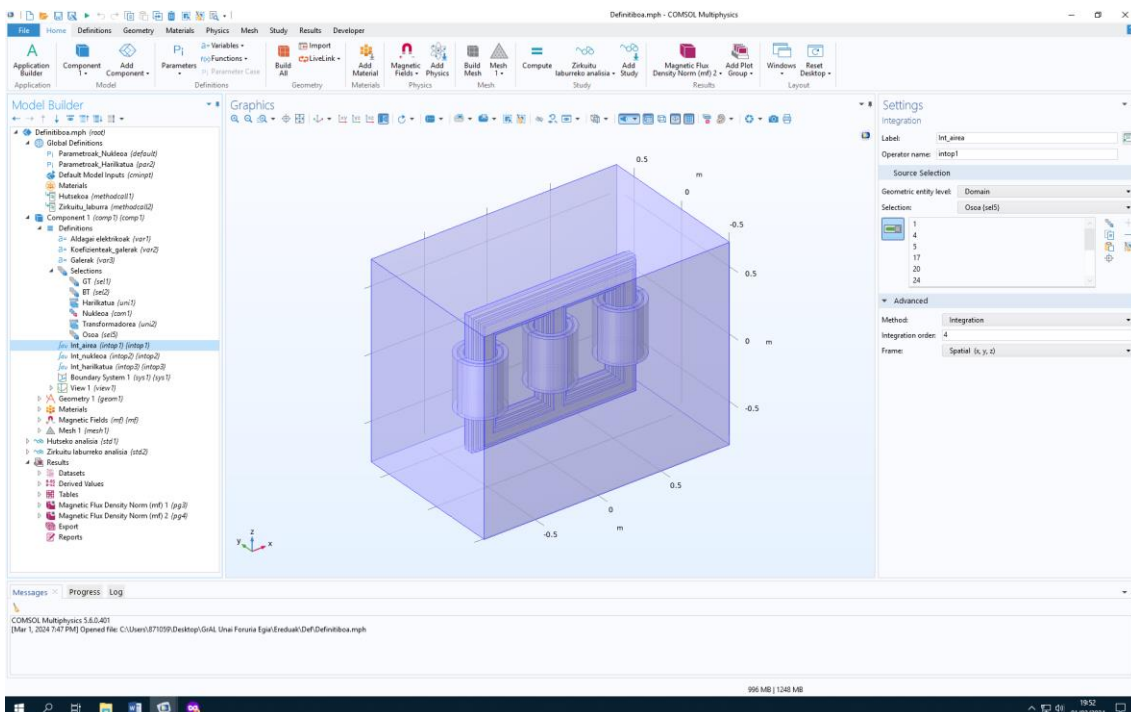
9. COMSOL Irudia: Aukeraketak (Nukeloa)



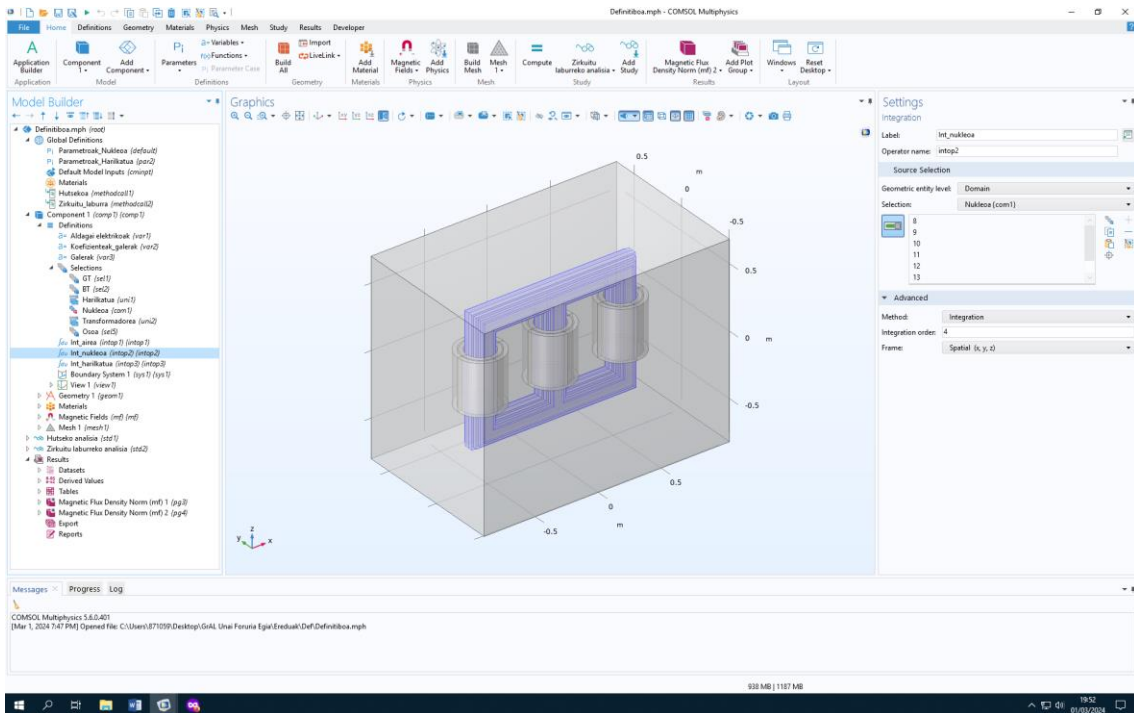
10. COMSOL Irudia: Aukeraketak (Transformadorea)



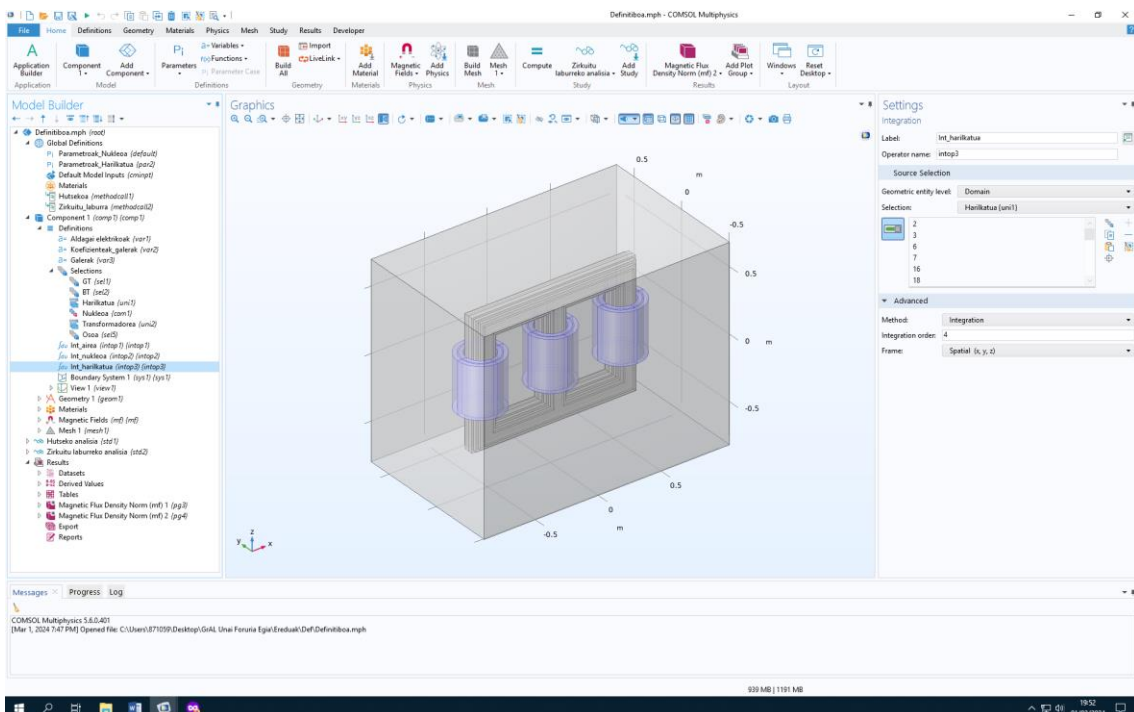
11. COMSOL Irudia: Aukeraketak (Osoa)



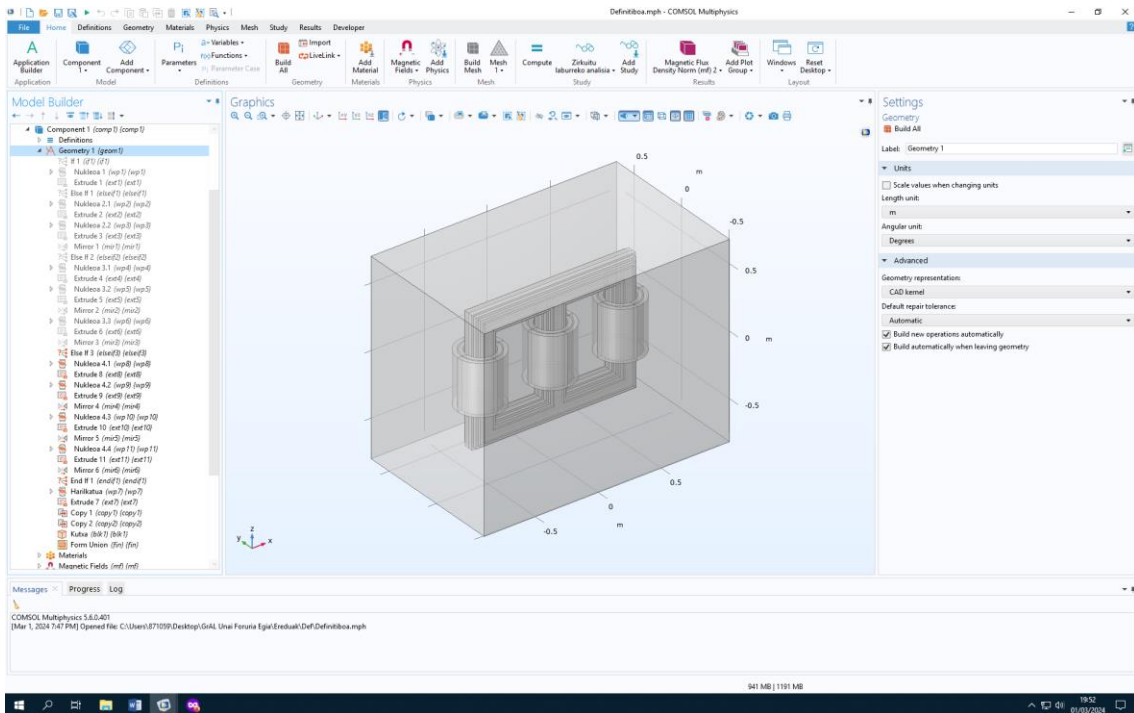
12. COMSOL Irudia: Integrazio-funtzioa (Airea)



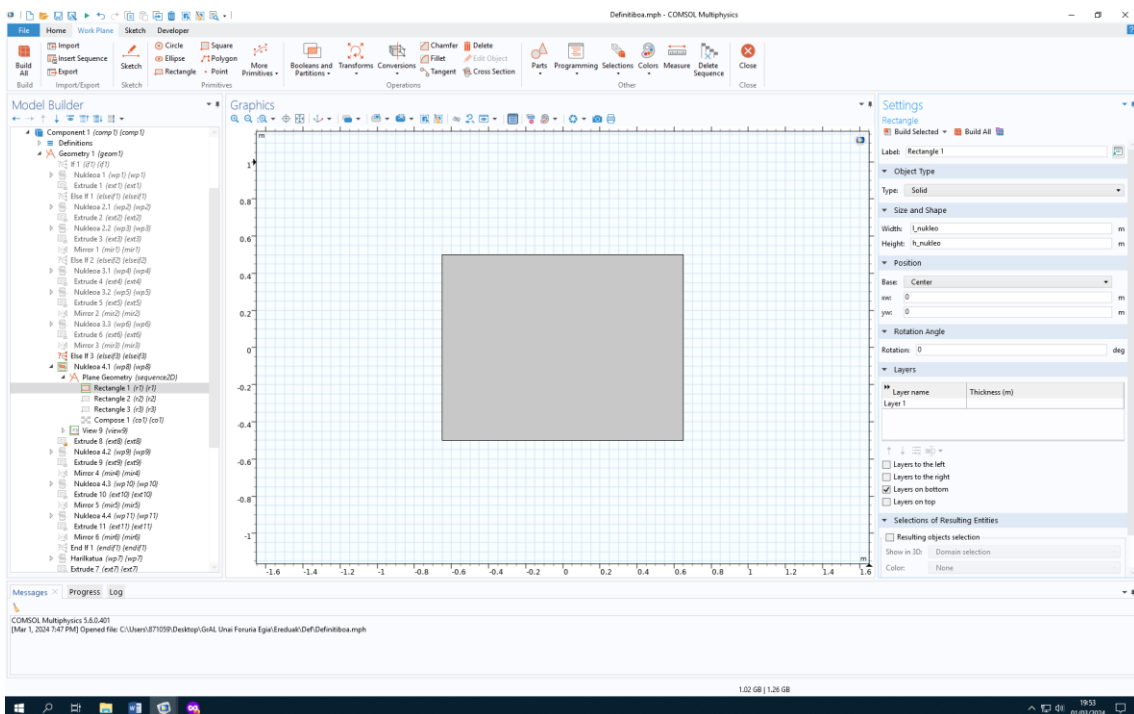
13. COMSOL Irudia: Integrazio-funtzioa (Nukleoa)



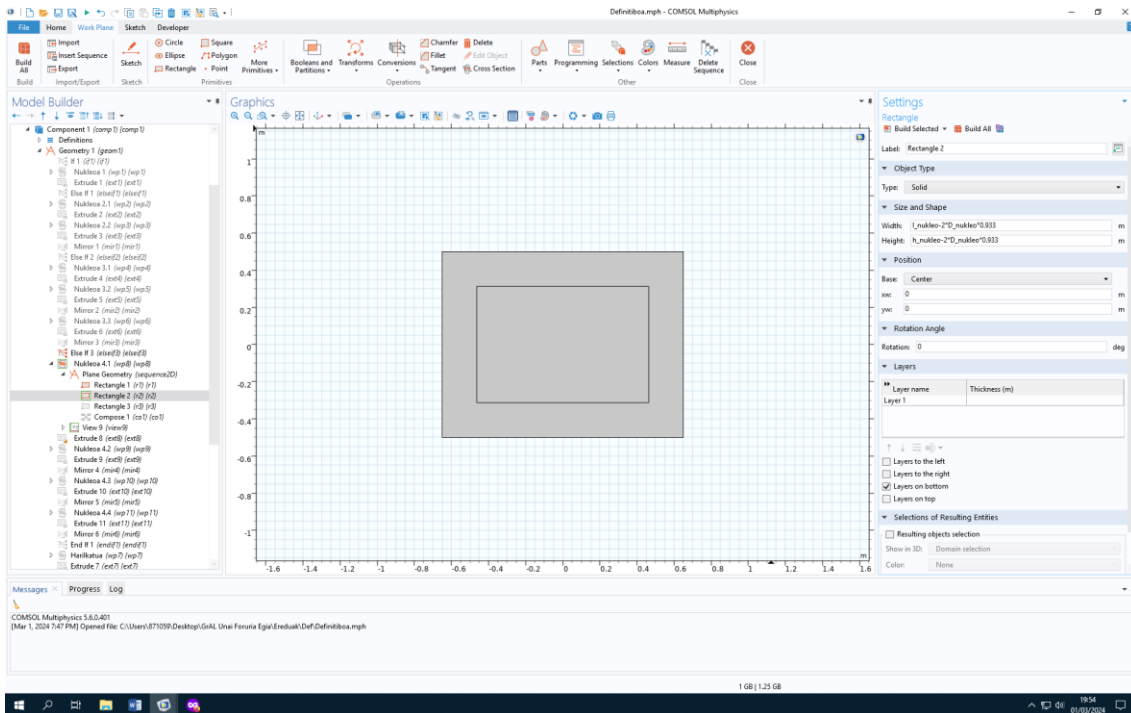
14. COMSOL Irudia: Integrazio-funtzioa (Harilkatua)



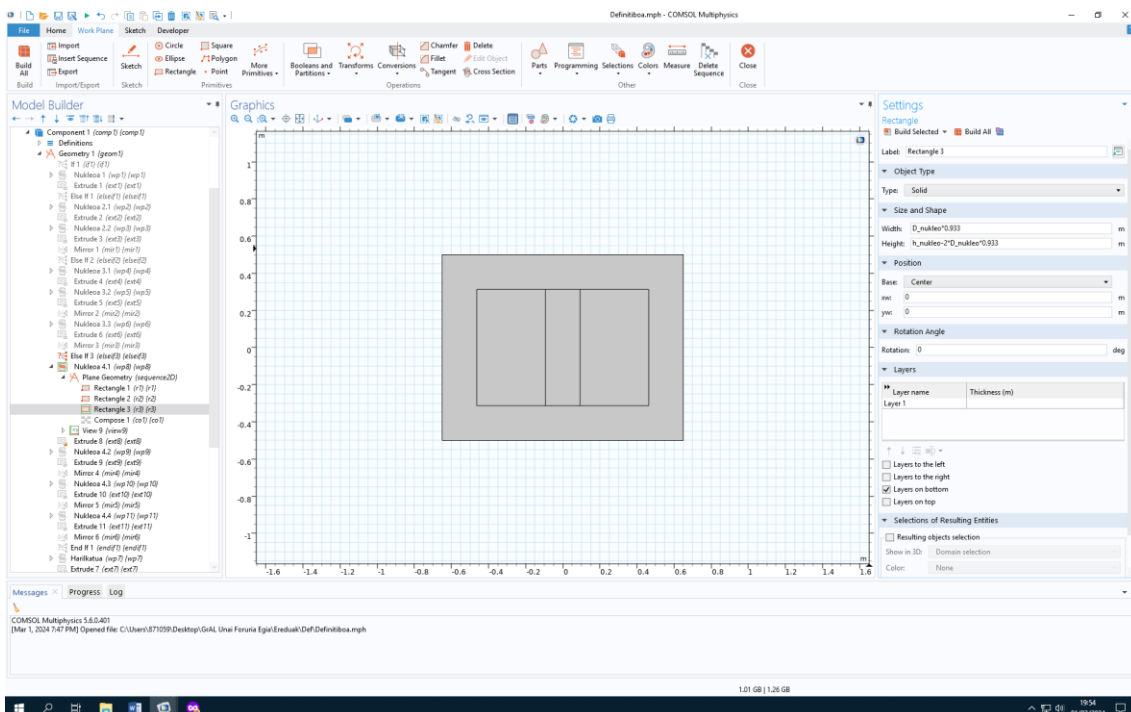
15. COMSOL Irudia: Geometria, bista orokorra



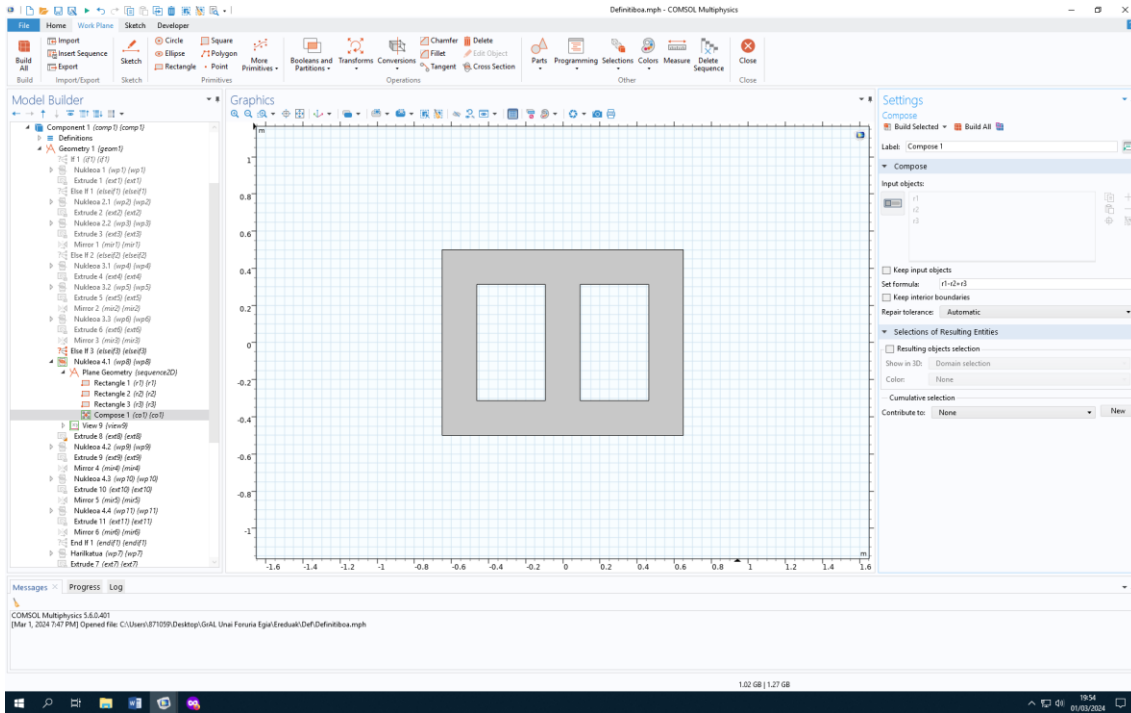
16. COMSOL Irudia: Lan-planoa, 1. errektangelua



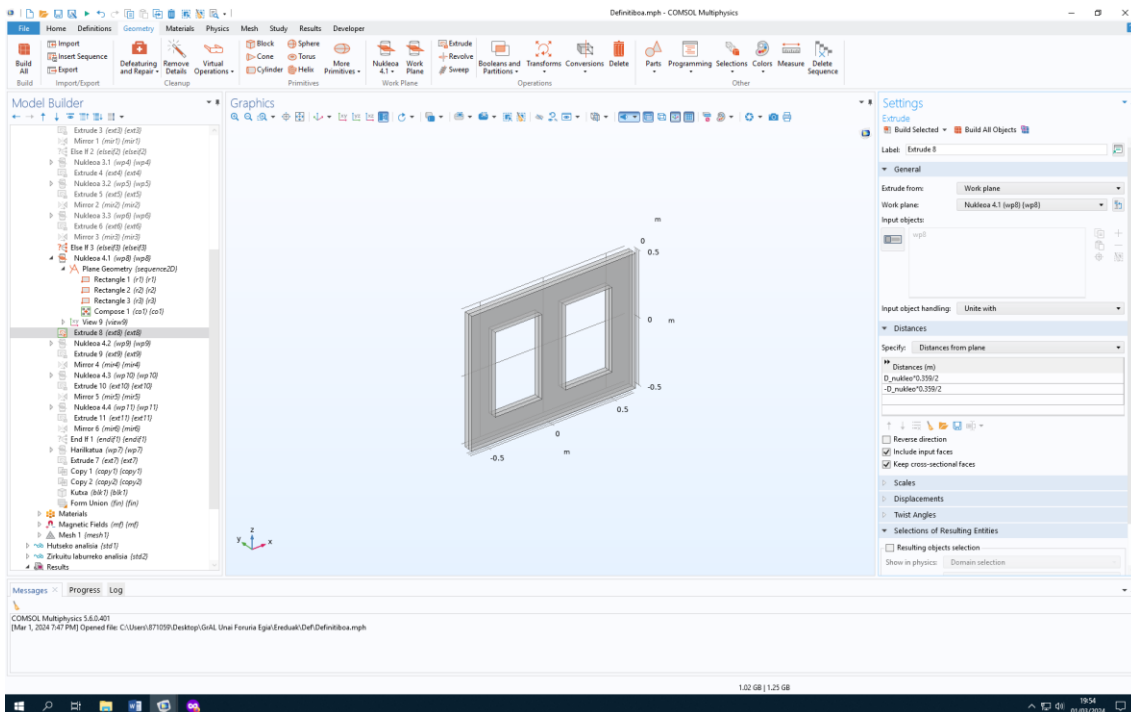
17. COMSOL Irudia: Lan-planoa, 2. Errektangelua



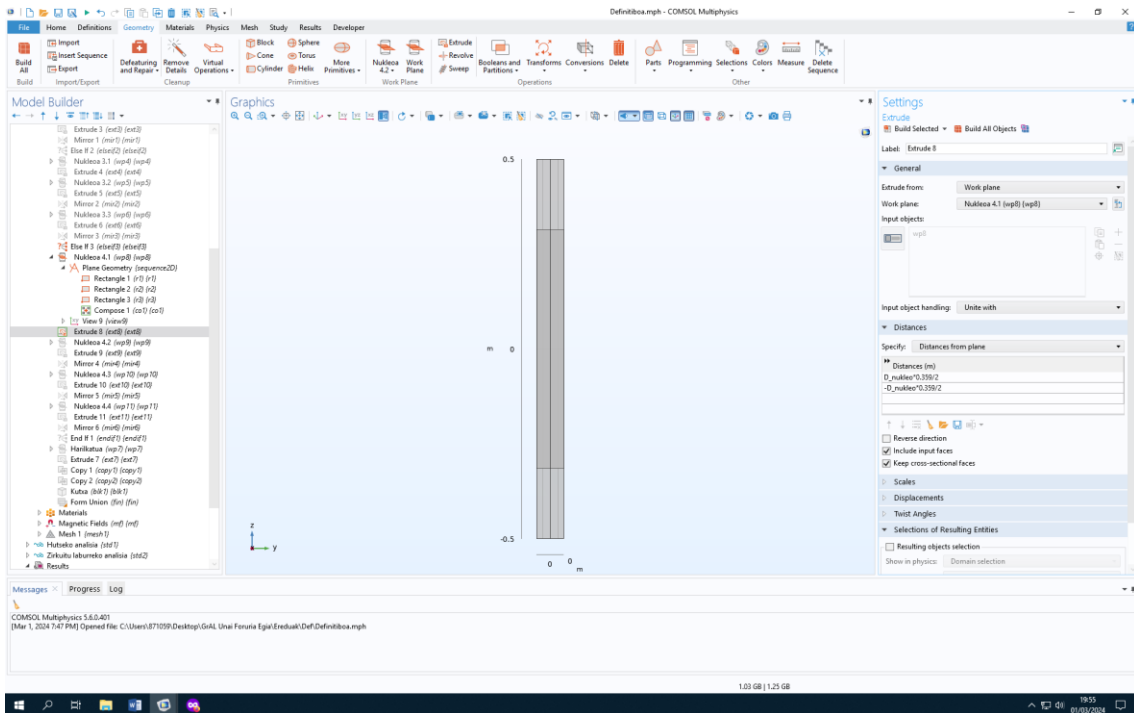
18. COMSOL Irudia: Lan-planoa, 3. Errektangelua



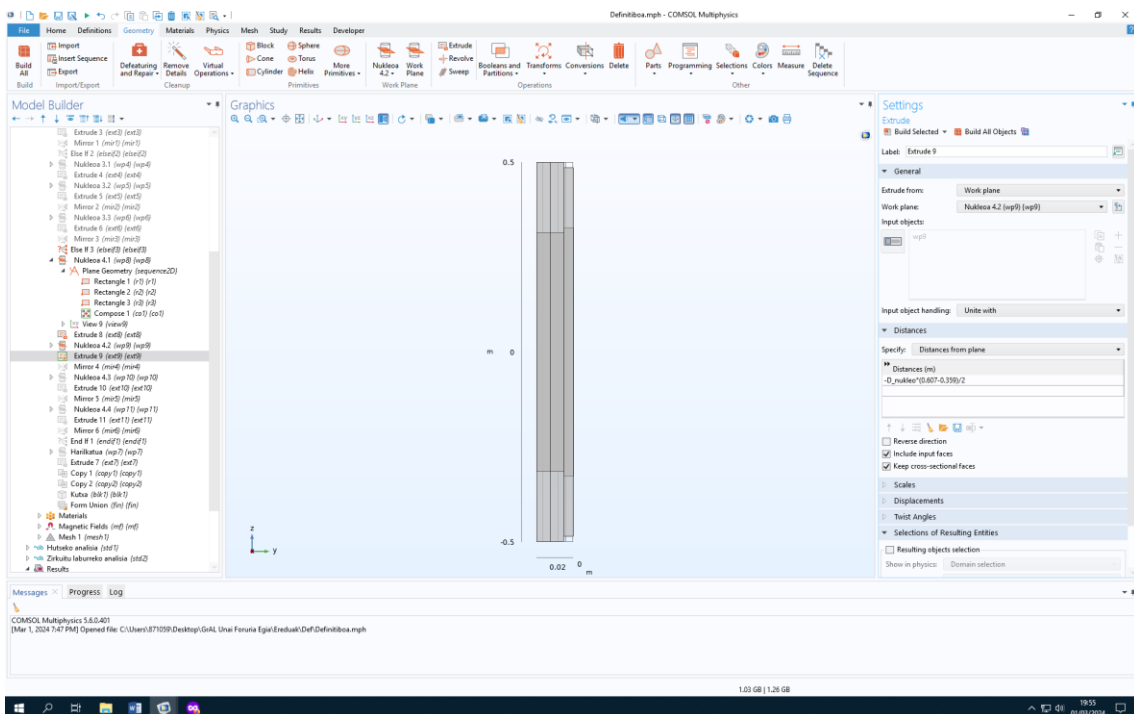
19. COMSOL Irudia: Nukleoaren sekzio-konposaketa



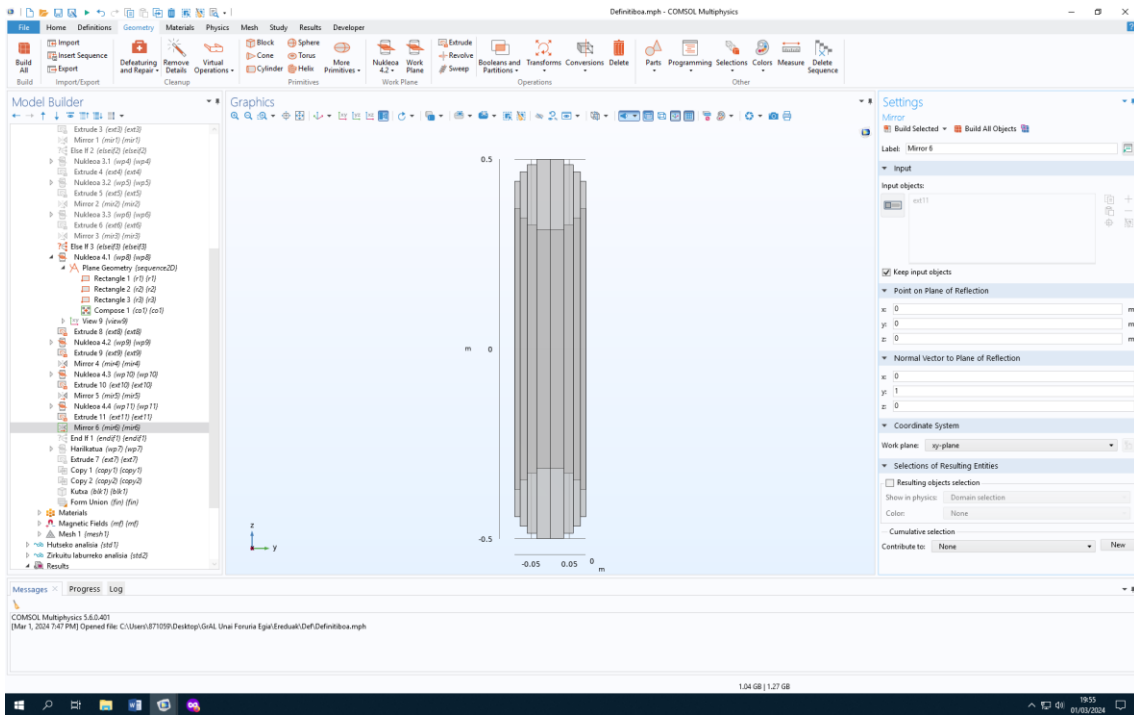
20. COMSOL Irudia: Estrututako nukleoaren sekzioa



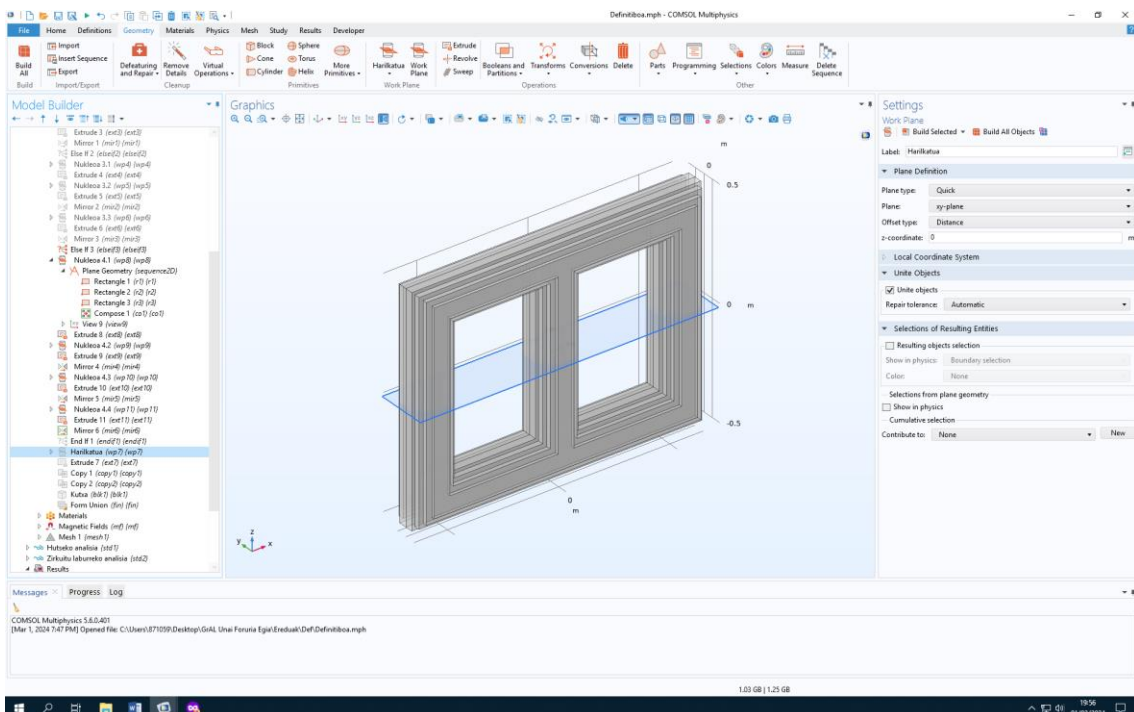
21. COMSOL Irudia: Estruitutako nukleoaren sekzioa, kantuz



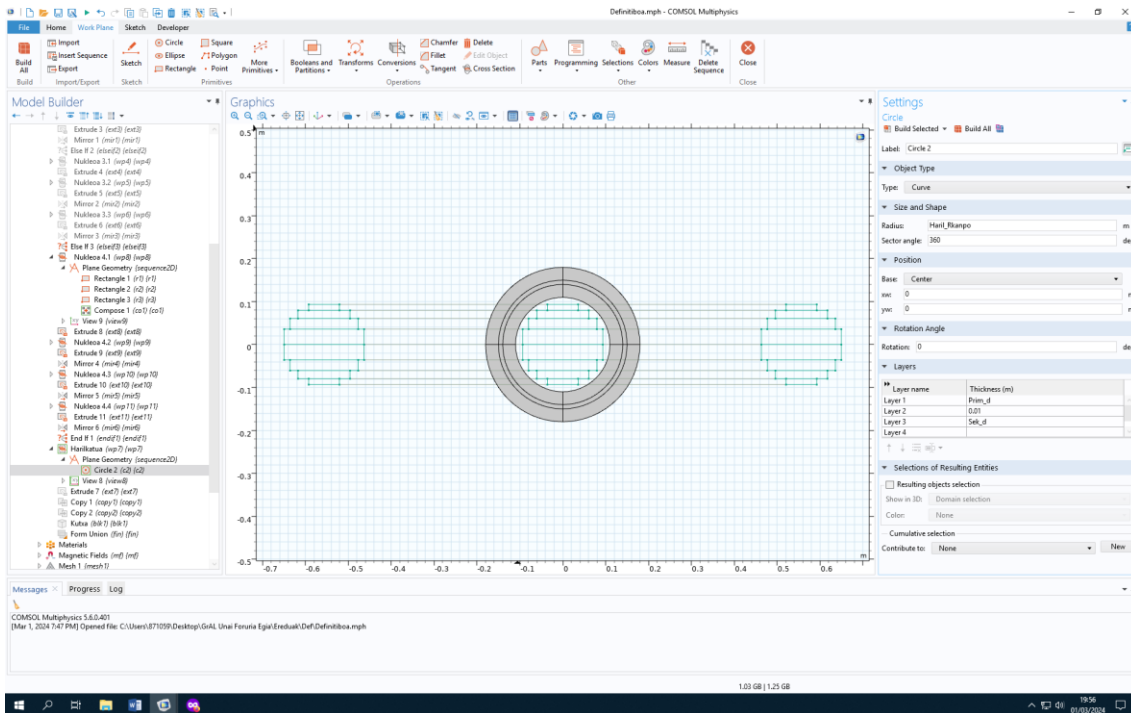
22. COMSOL Irudia: Estruitutako nukleoaren sekzioa, sekzio gehigarria



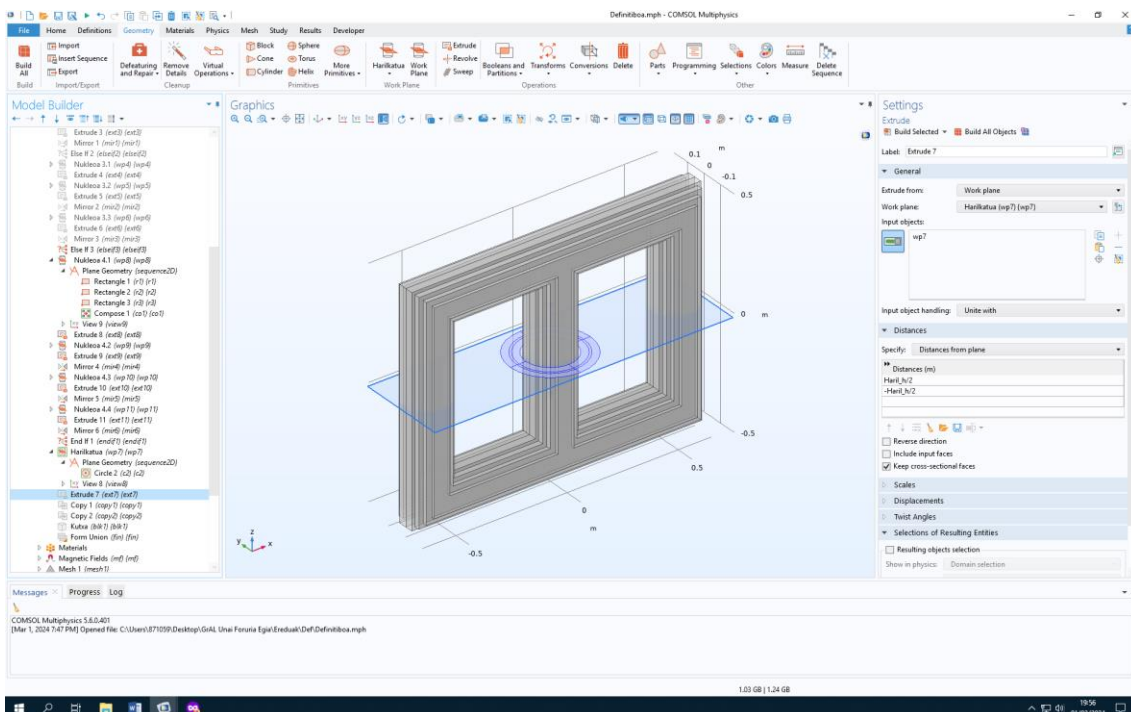
23. COMSOL Irudia: Amaierako nukleoaren itxura, kantuz (islapena eginda)



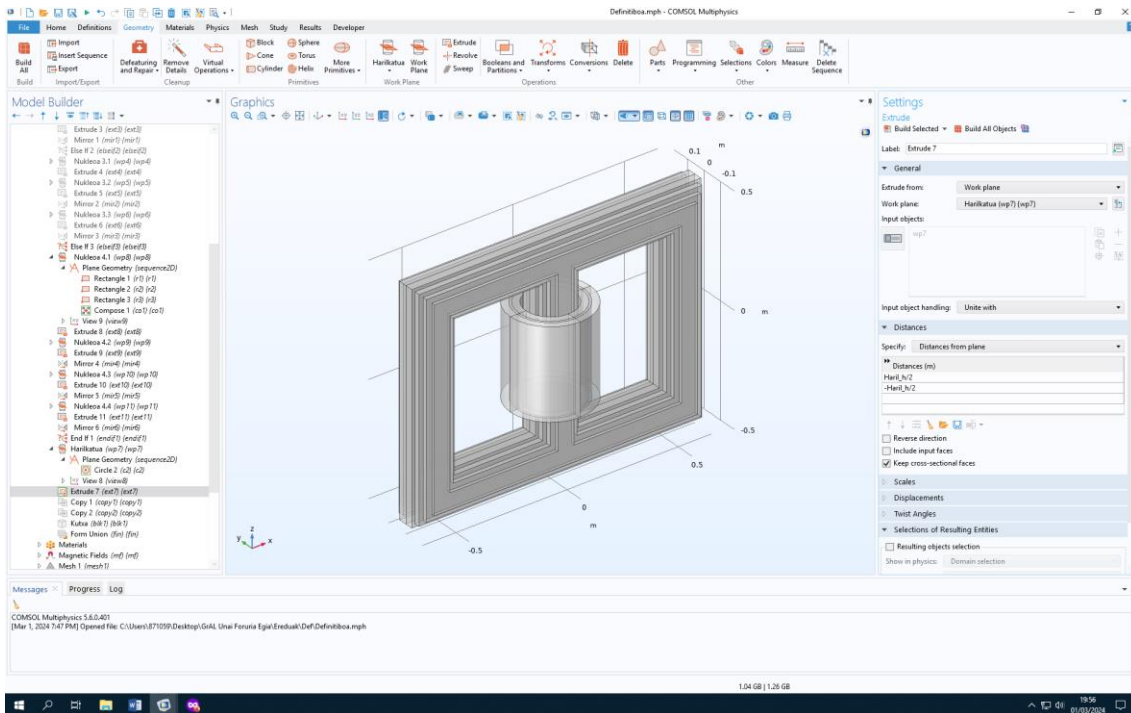
24. COMSOL Irudia: Harilkatuaren lan-planoa



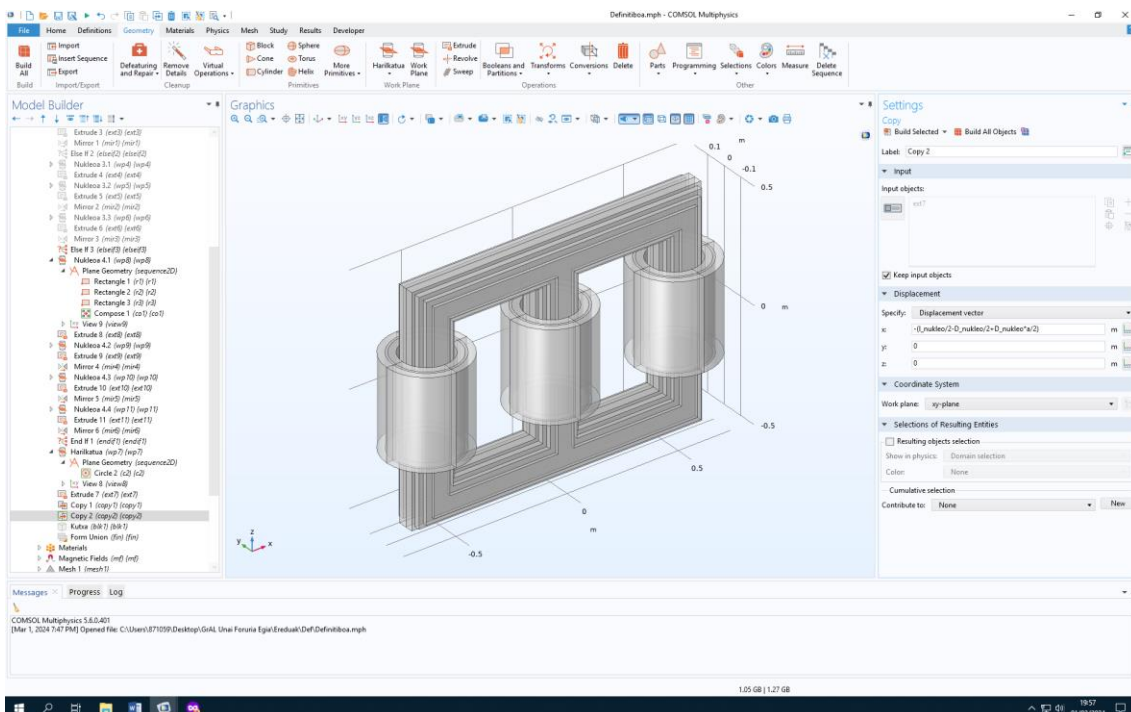
25. COMSOL Irudia: Harilkatuaren lan-planoa, zirkuluak



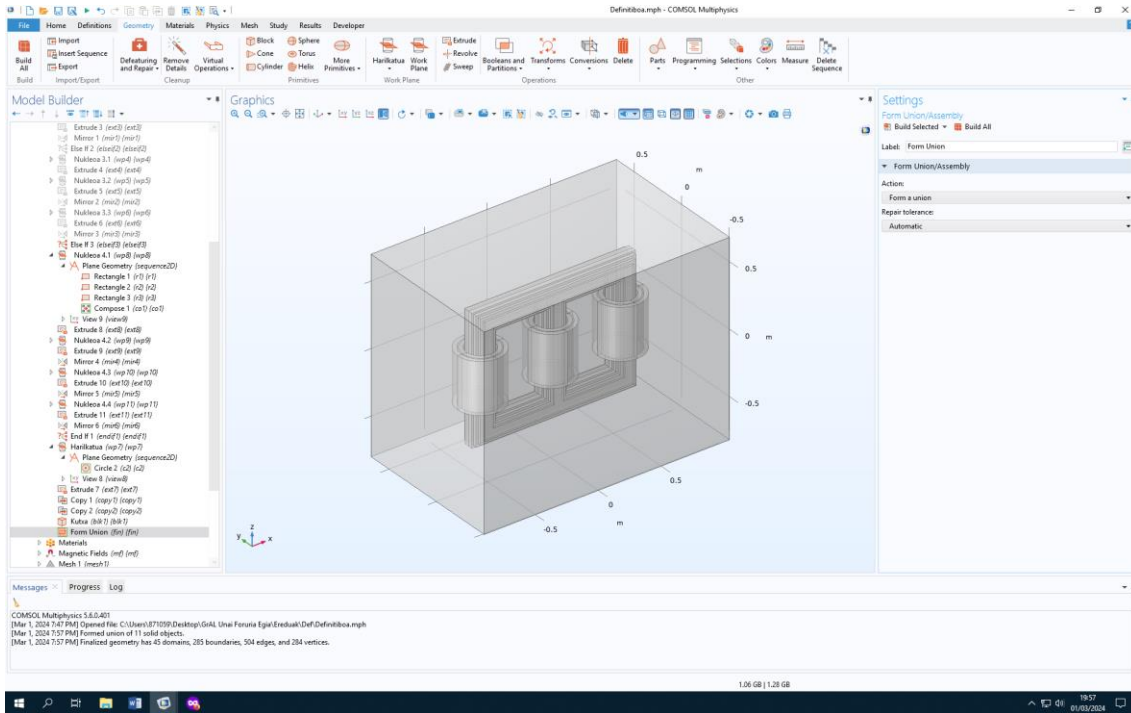
26. COMSOL Irudia: Harilkatuaren lan-planoa, zirkunferentziekin



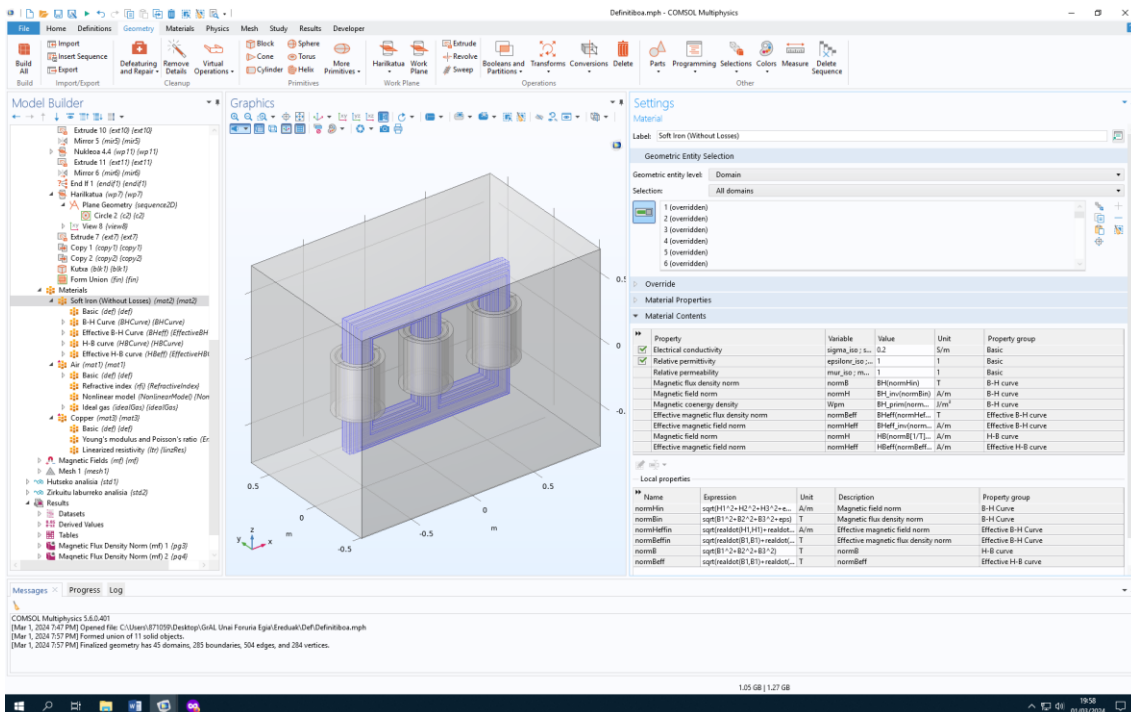
27. COMSOL Irudia: Harilkatuaren estrusioa



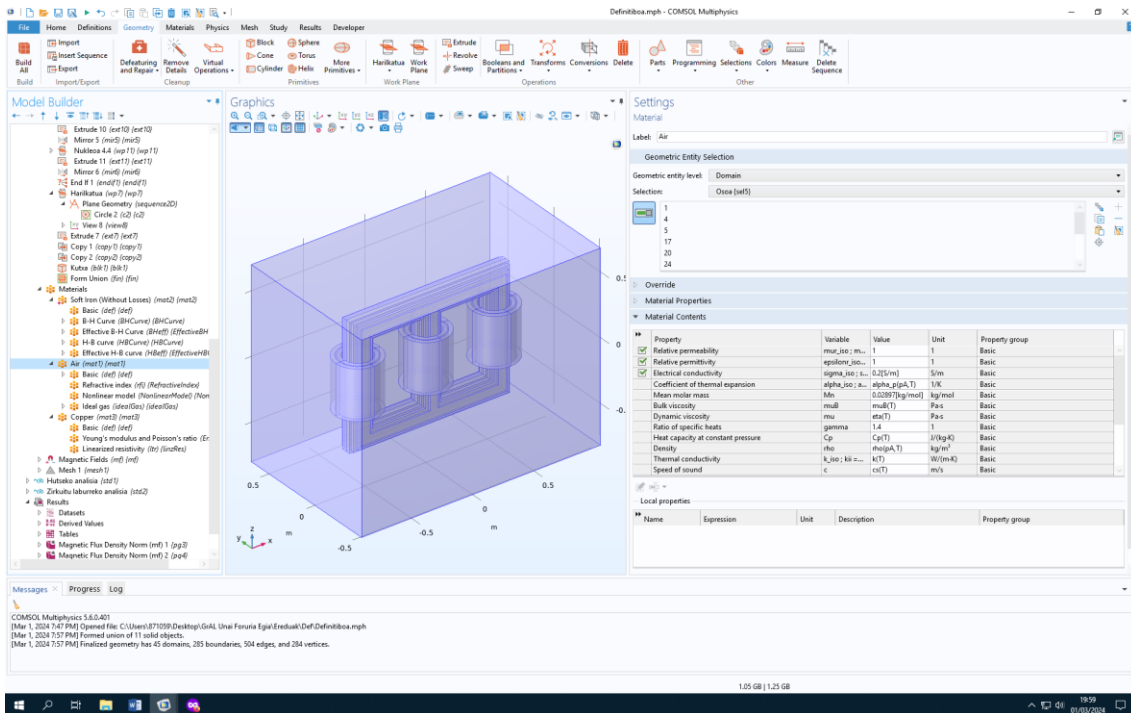
28. COMSOL Irudia: Harilkatuaren estrusioaren kopiak, dagozkien zutabeetan



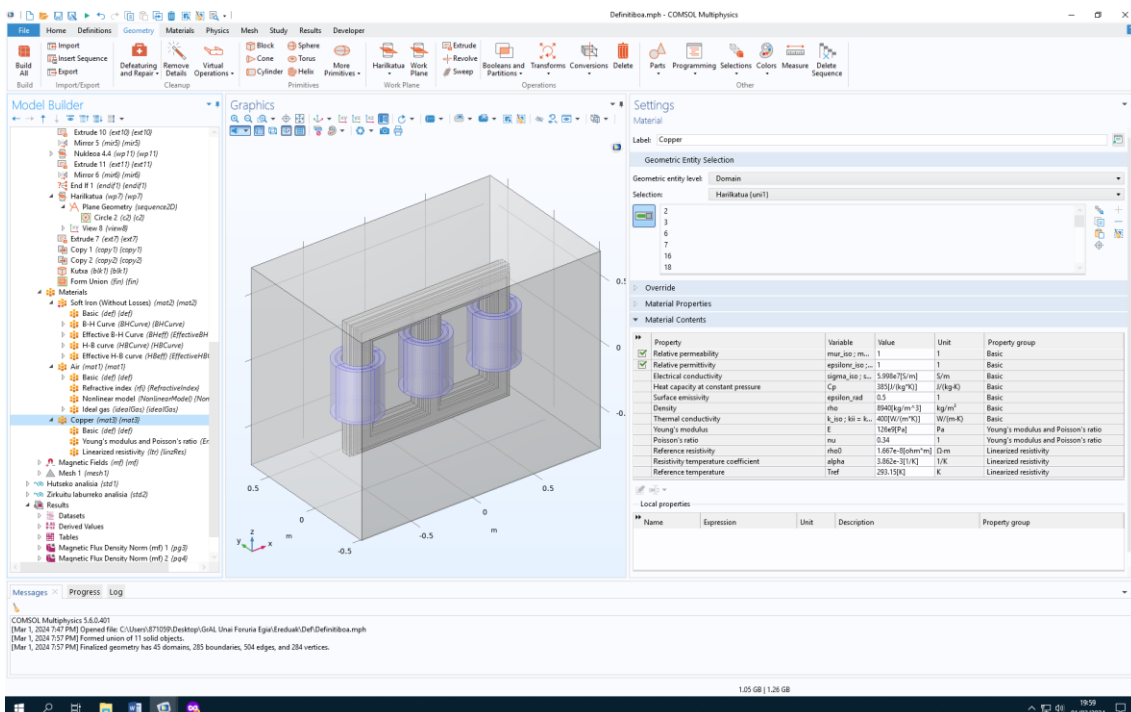
29. COMSOL Irudia: Geometria, osatuta



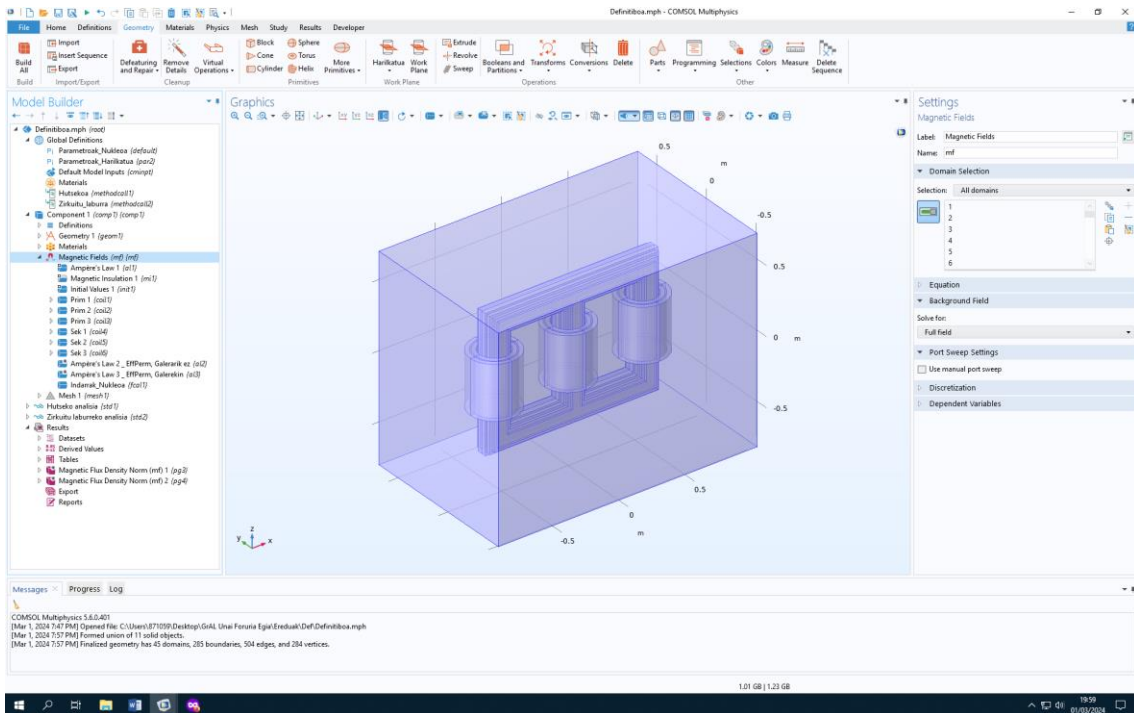
30. COMSOL Irudia: Materialak, burdin gozoa



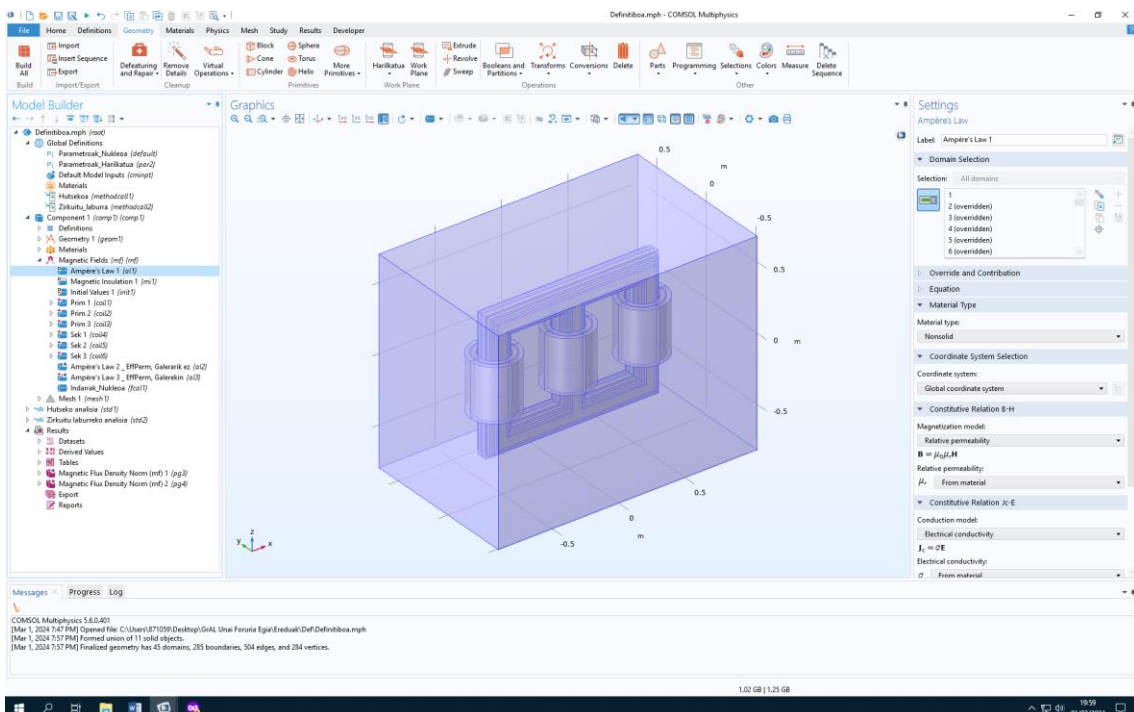
31. COMSOL Irudia: Materialak, airea



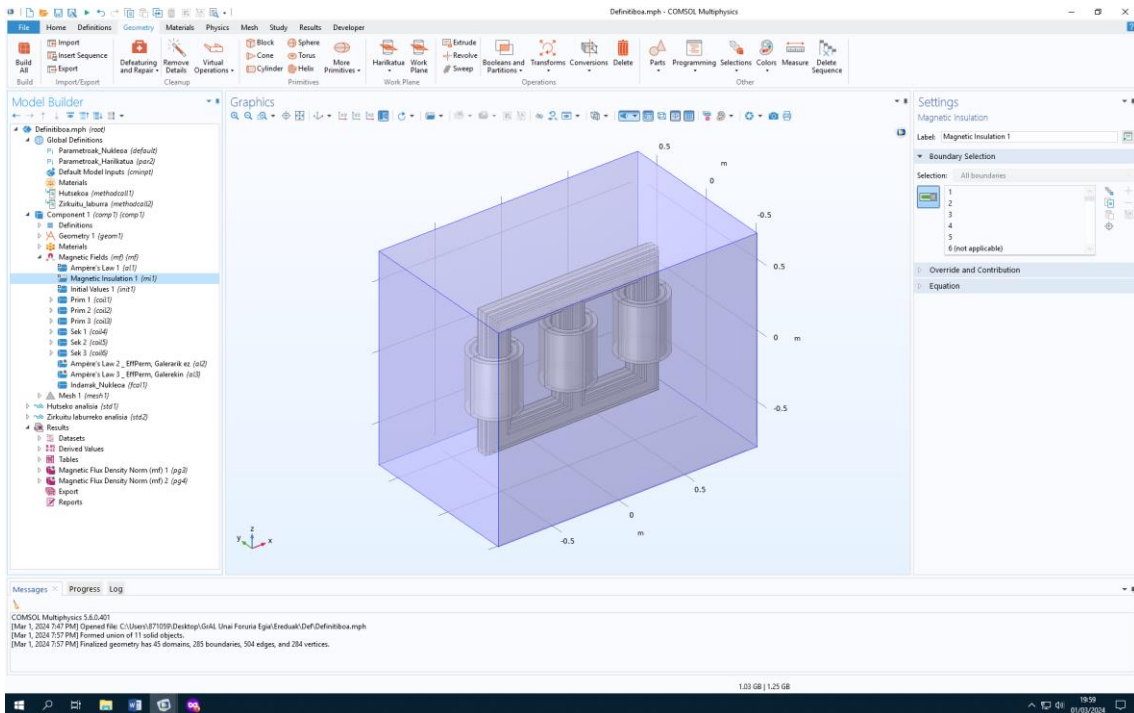
32. COMSOL Irudia: Materialak, kobrea



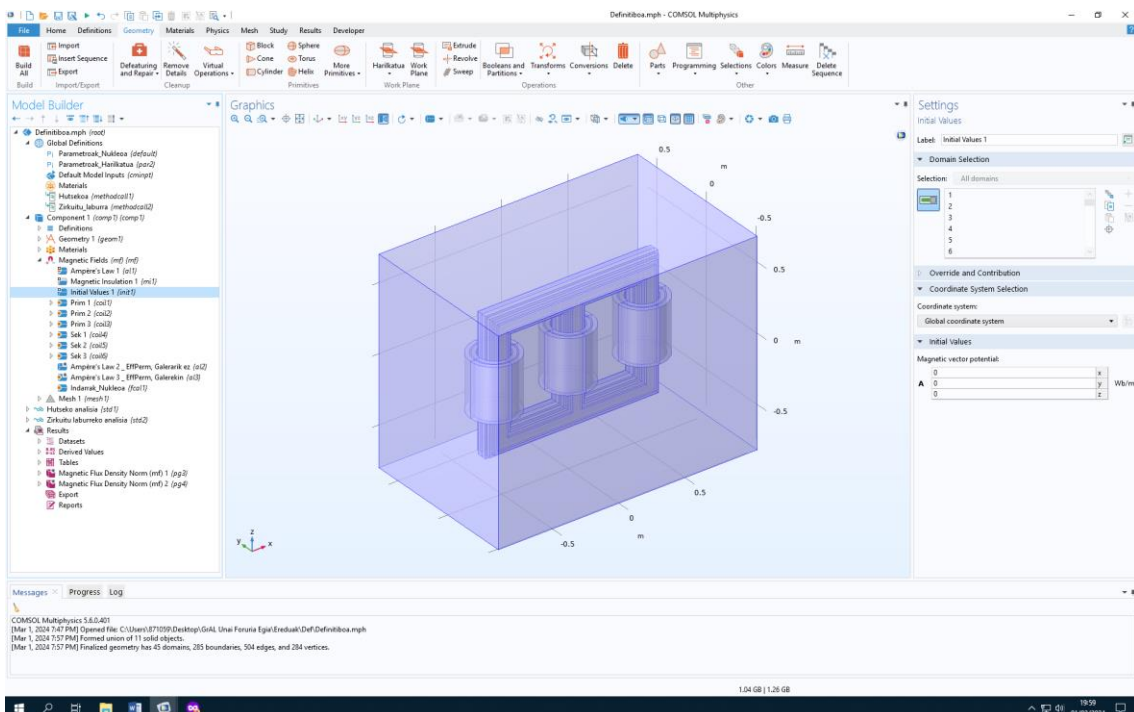
33. COMSOL Irudia: Eremu magnetikoak, ikuspegi orokorra



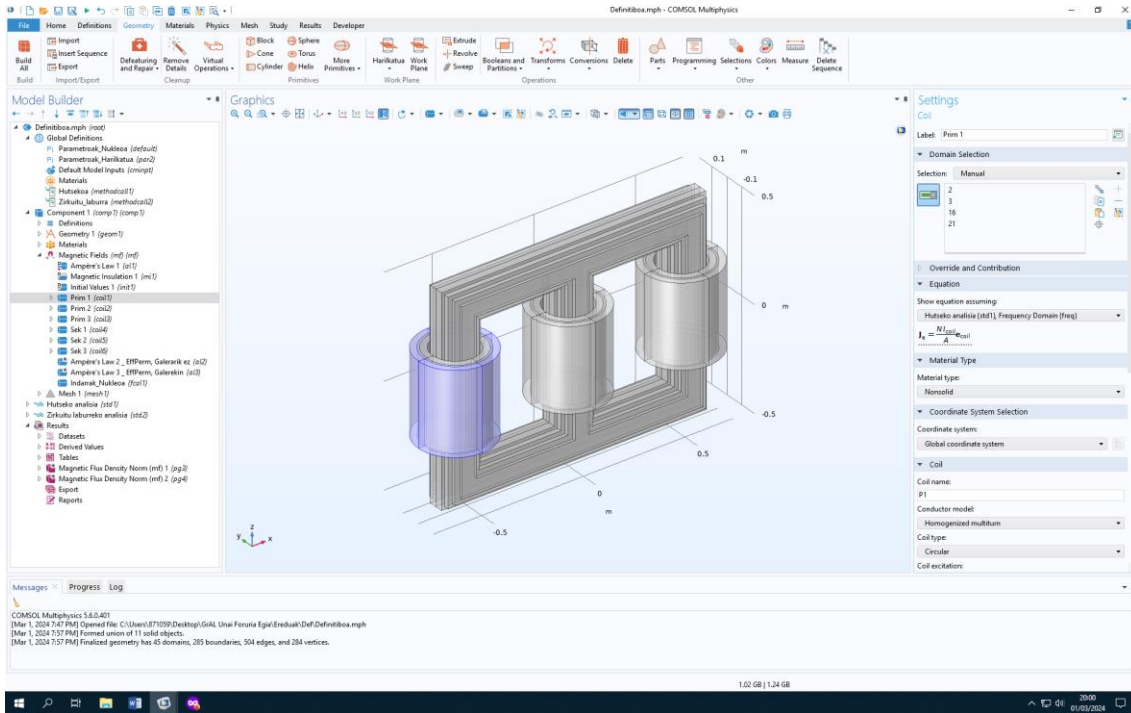
34. COMSOL Irudia: Eremu magnetikoak, Ampereren legea 1



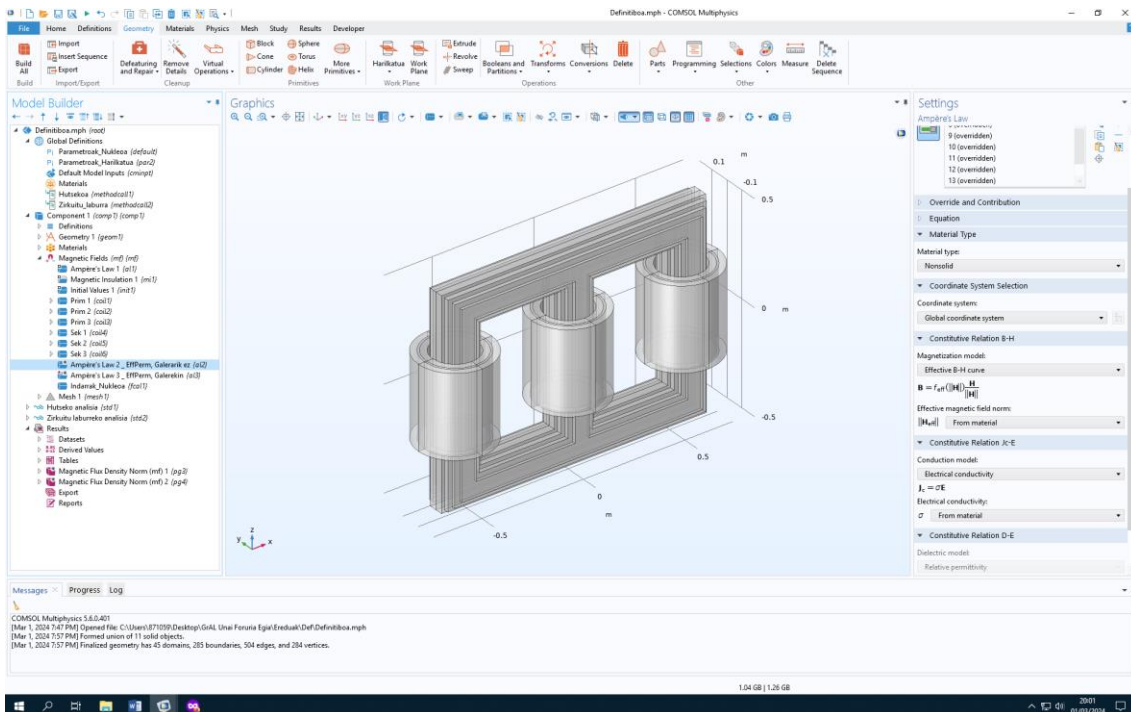
35. COMSOL Irudia: Eremu magnetikoak, isolamendu magnetikoa



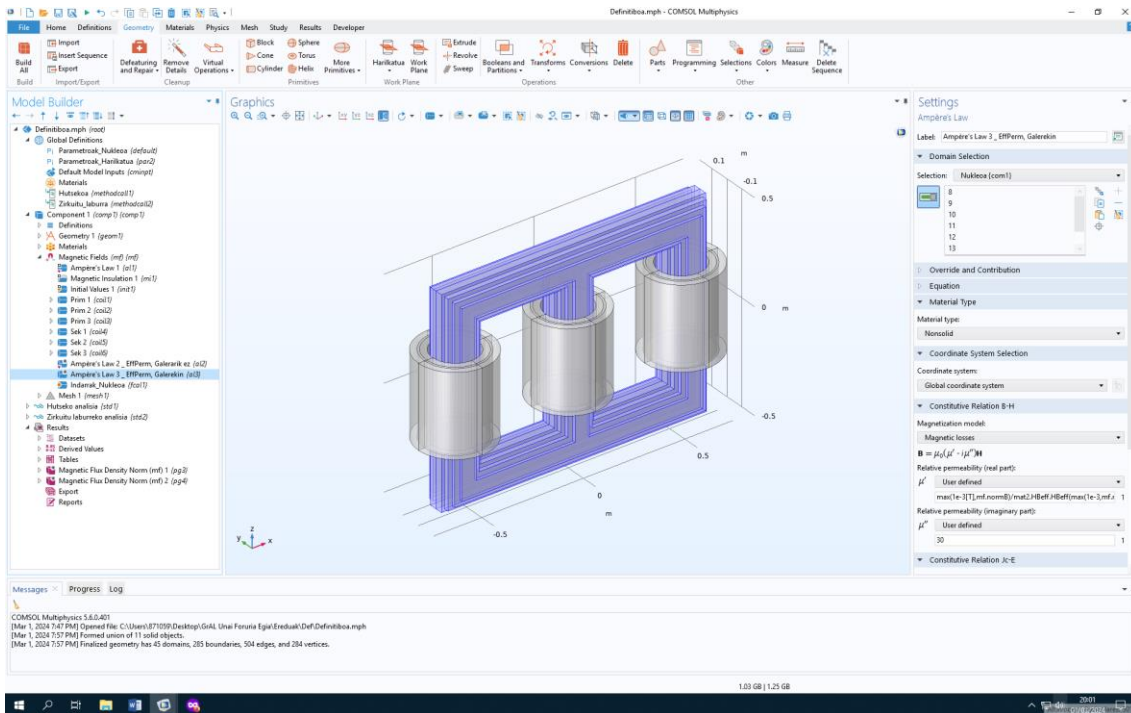
36. COMSOL Irudia: Eremu magnetikoak, hasierako balioak



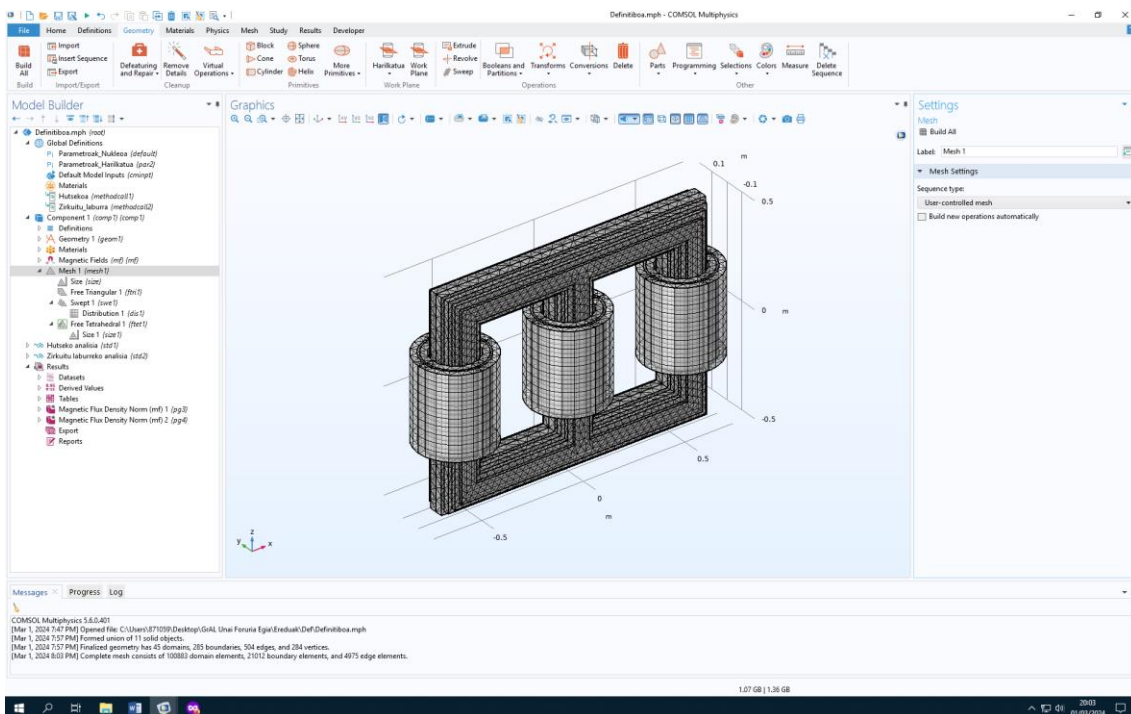
37. COMSOL Irudia: Eremu magnetikoak, harilkatuetak baten ezarpena



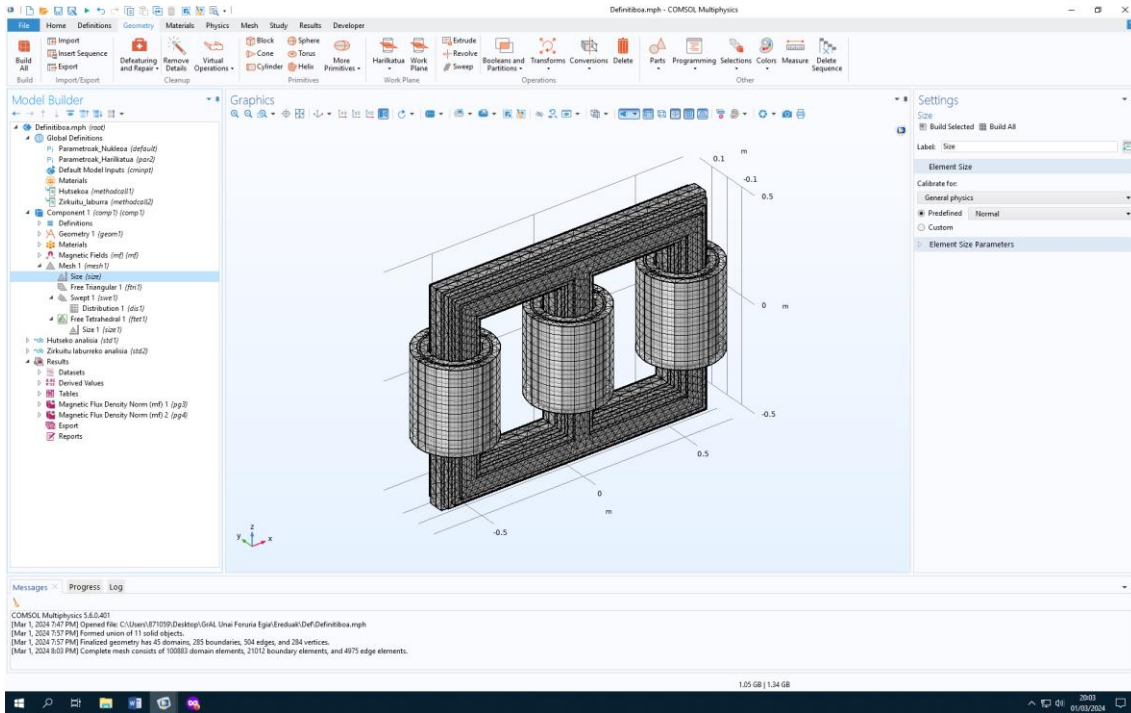
38. COMSOL Irudia: Eremu magnetikoak, nukleoan galerarik gabe (Zirkuitulaburreko kasua)



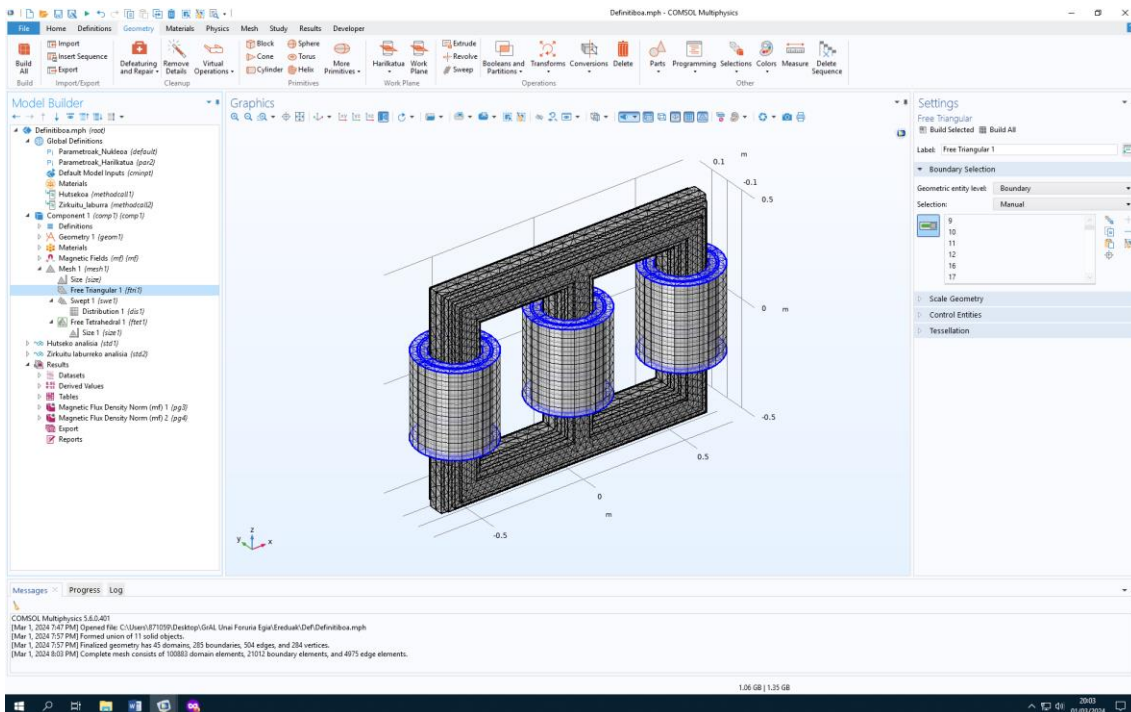
39. COMSOL Irudia: Eremu magnetikoa, nukleoa galerekin (Hutseko kasua)



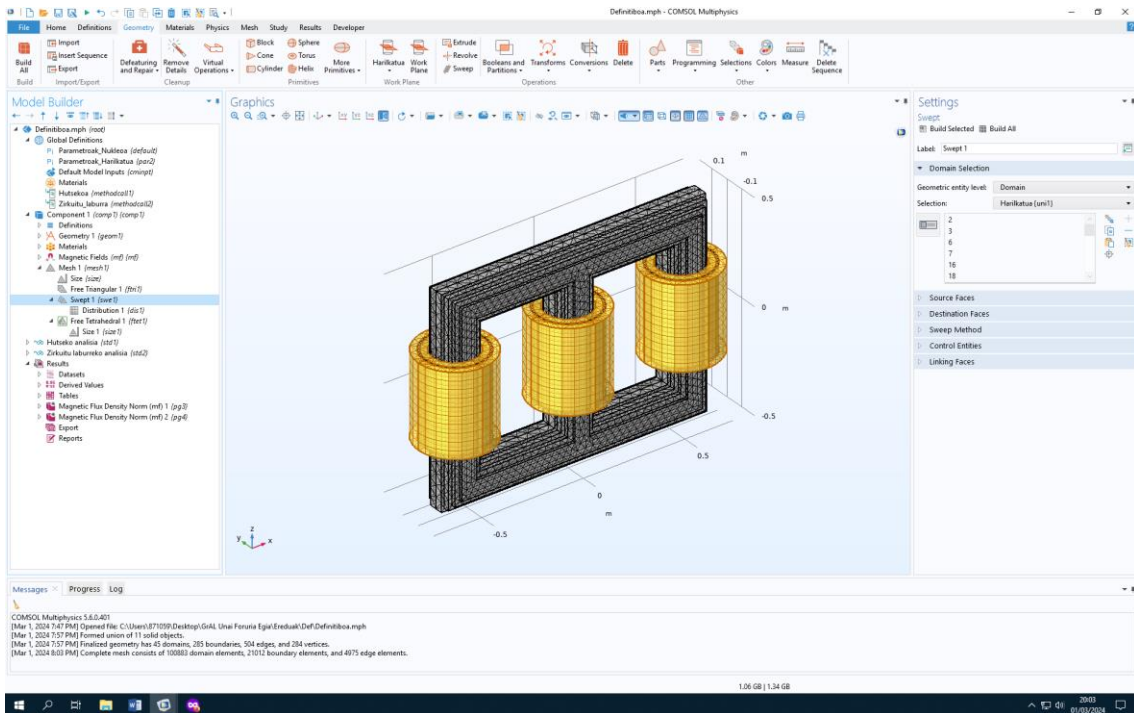
40. COMSOL Irudia: Sare orokorra



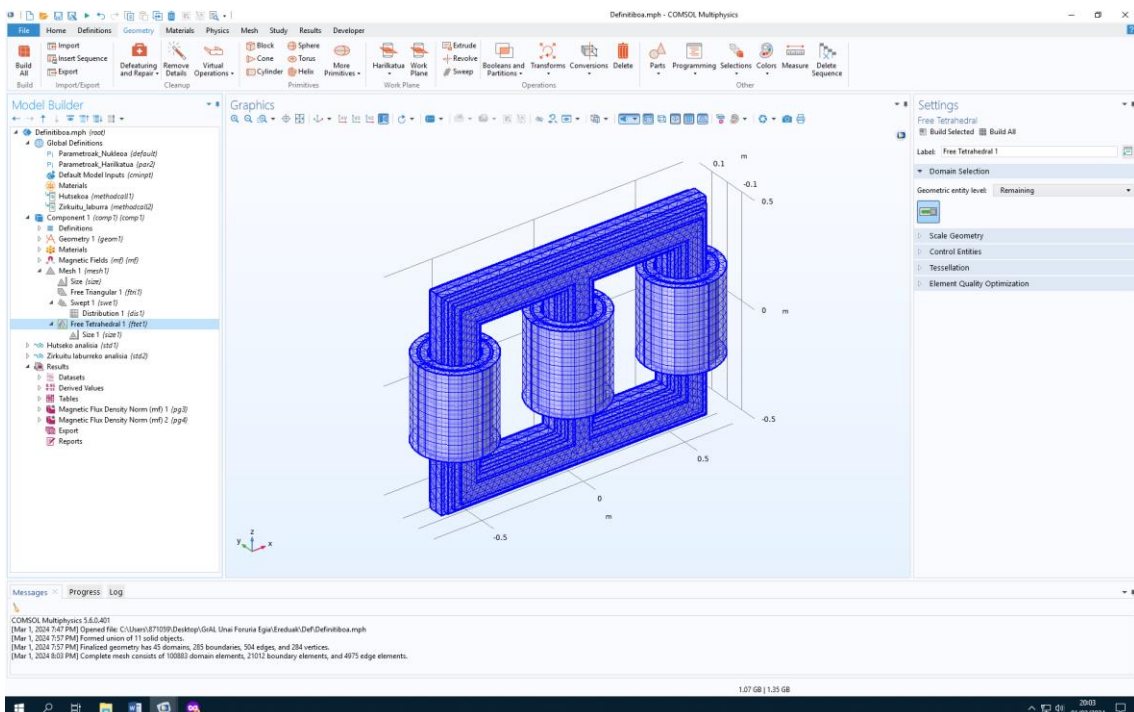
41. COMSOL Irudia: Sare orokorra, tamaina



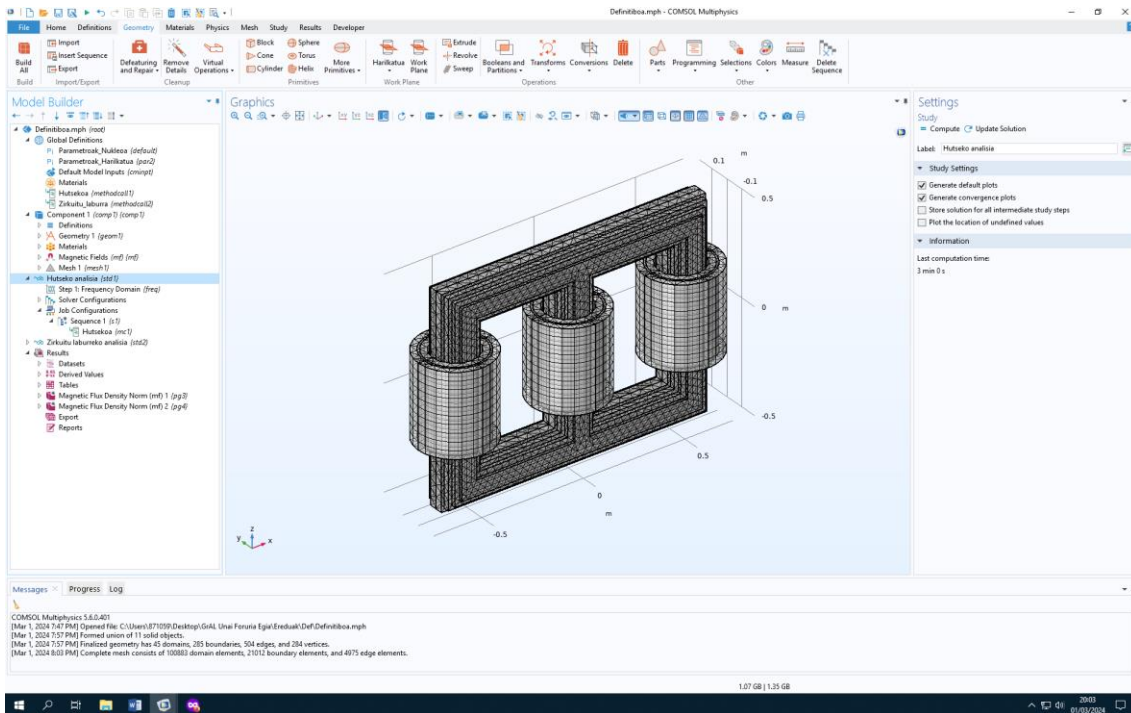
42. COMSOL Irudia: Sarea, harilkatua (goiko eta beheko mugak)



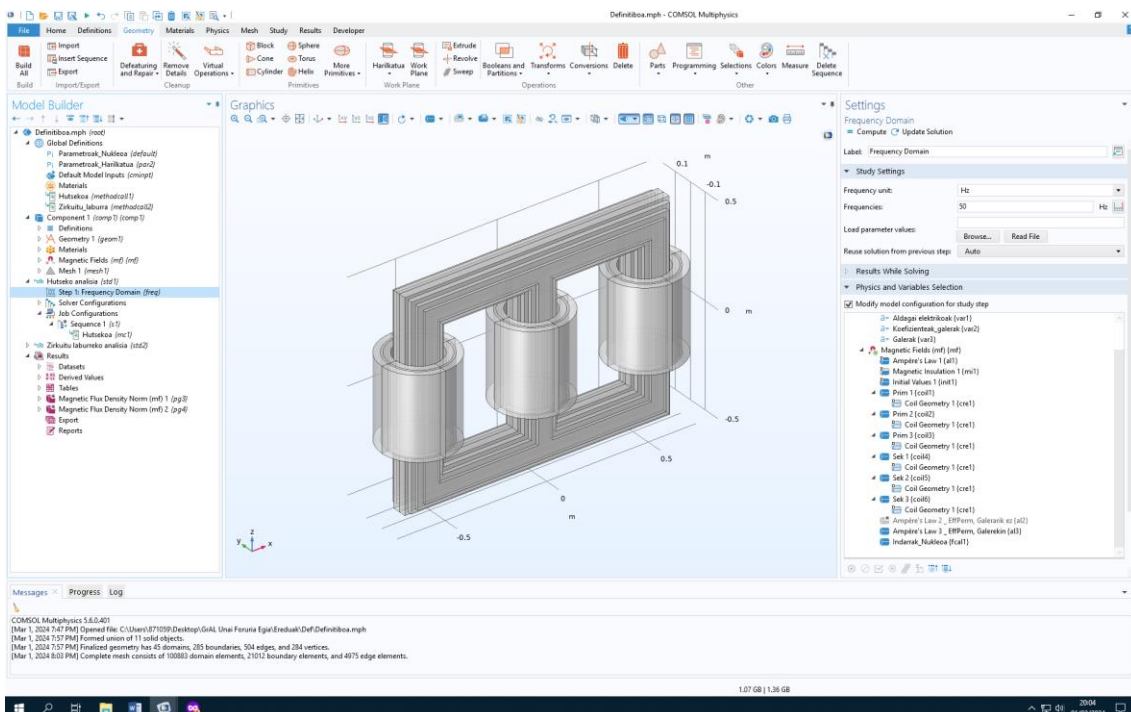
43. COMSOL Irudia: Sarea, harilkatua (inguru)



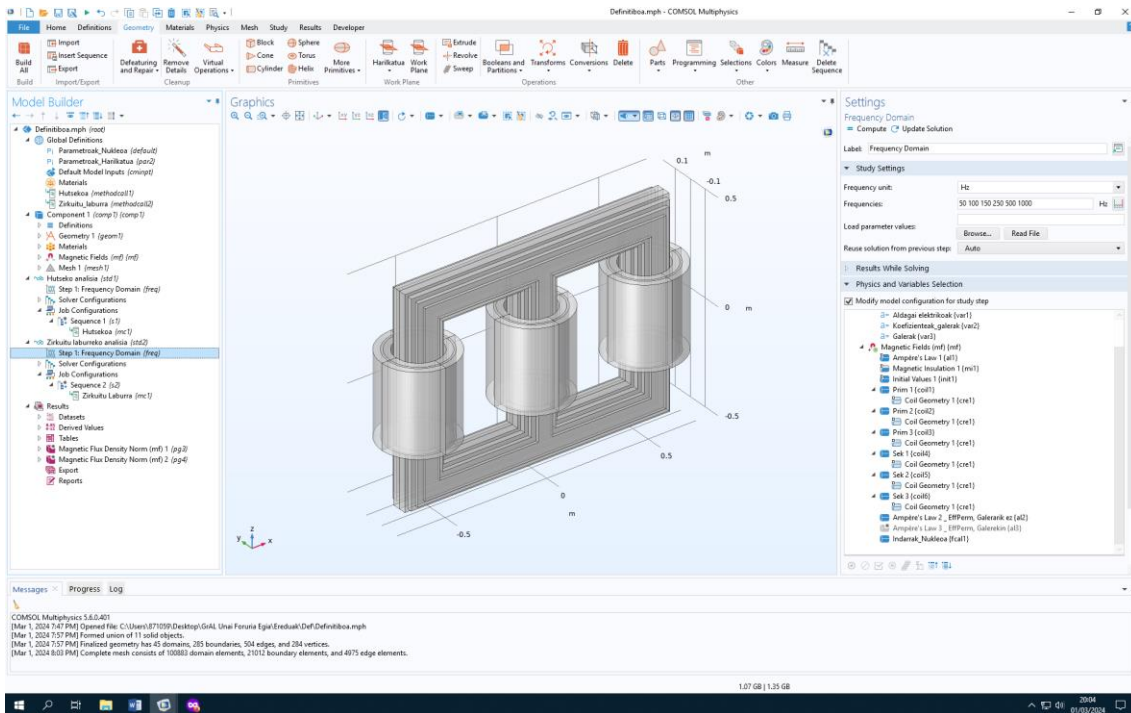
44. COMSOL Irudia: Sarea, transformadorearen gainerako sarea



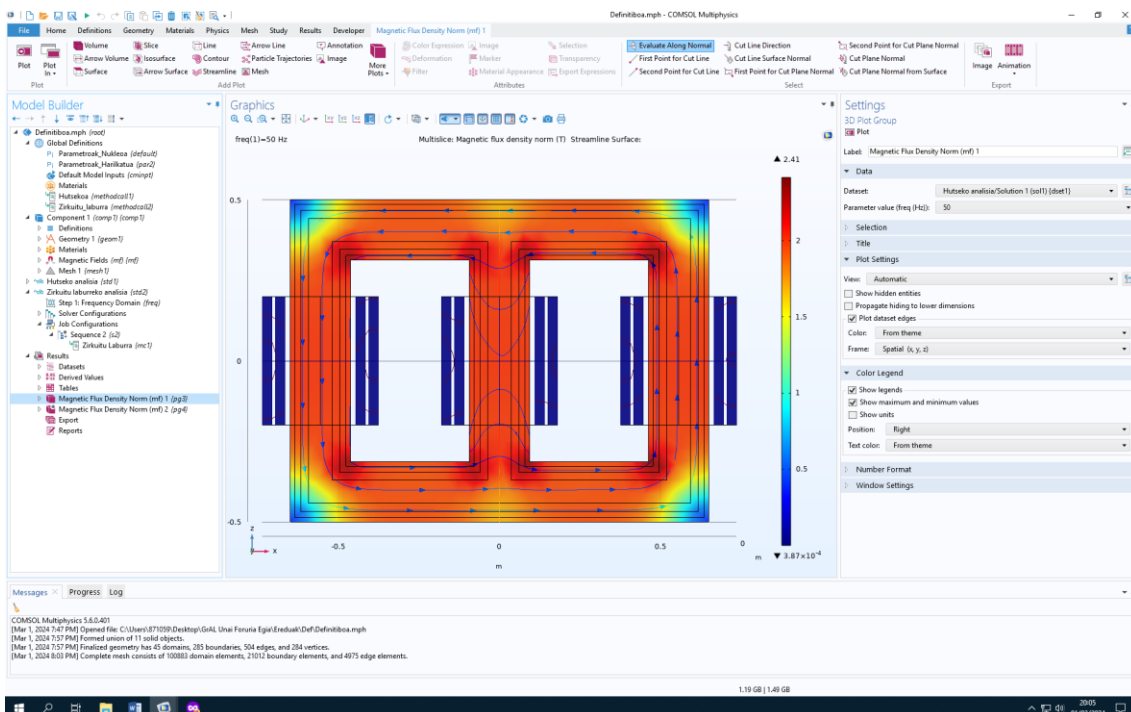
45. COMSOL Irudia: Hutseko analisia, ikuspegi orokorra



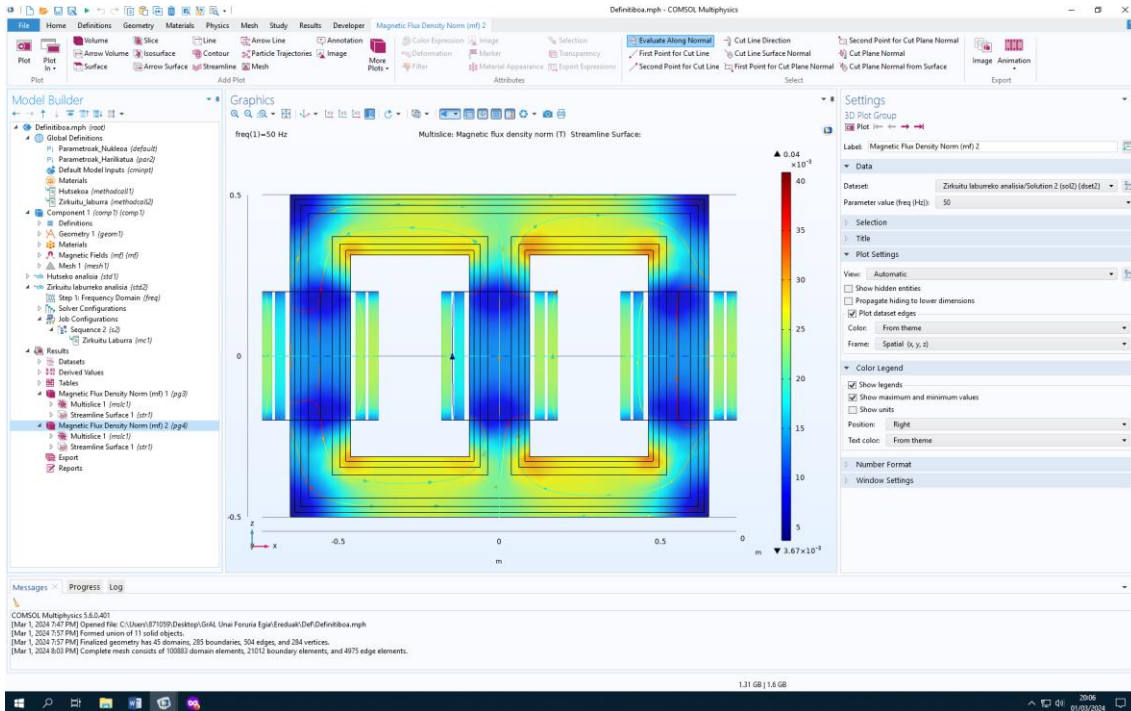
46. COMSOL Irudia: Hutseko analisia, fisiken hautaketa



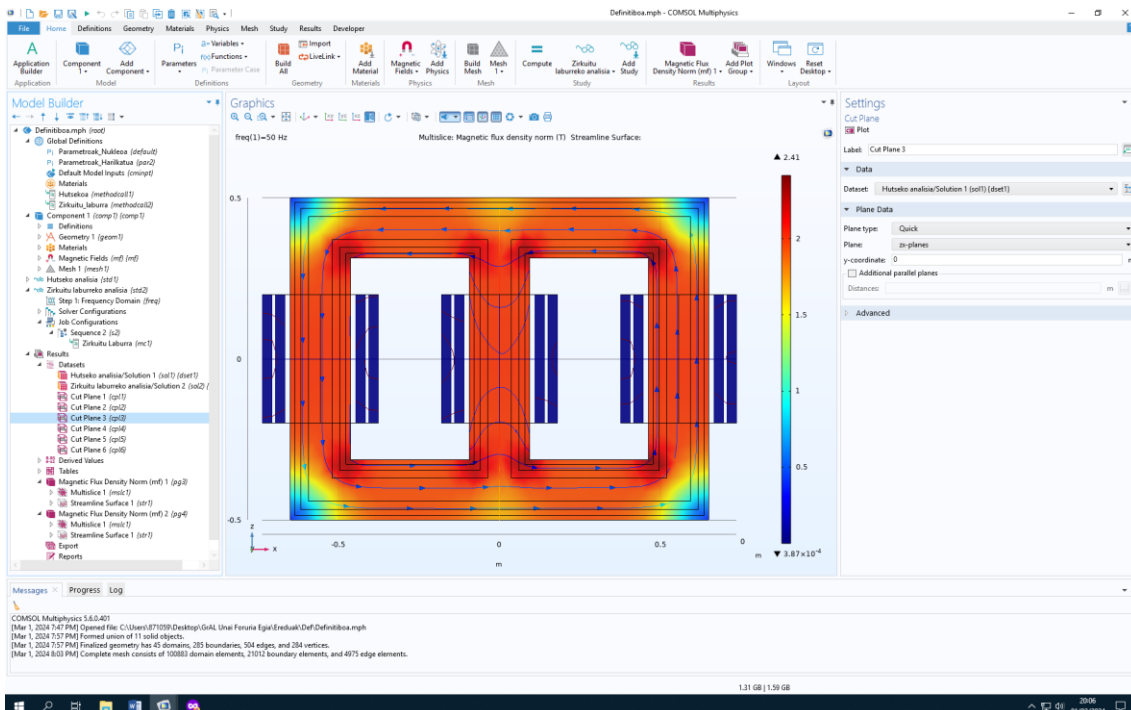
47. COMSOL Irudia: Zirkuitulaburreko analisia, fisiken hautaketa



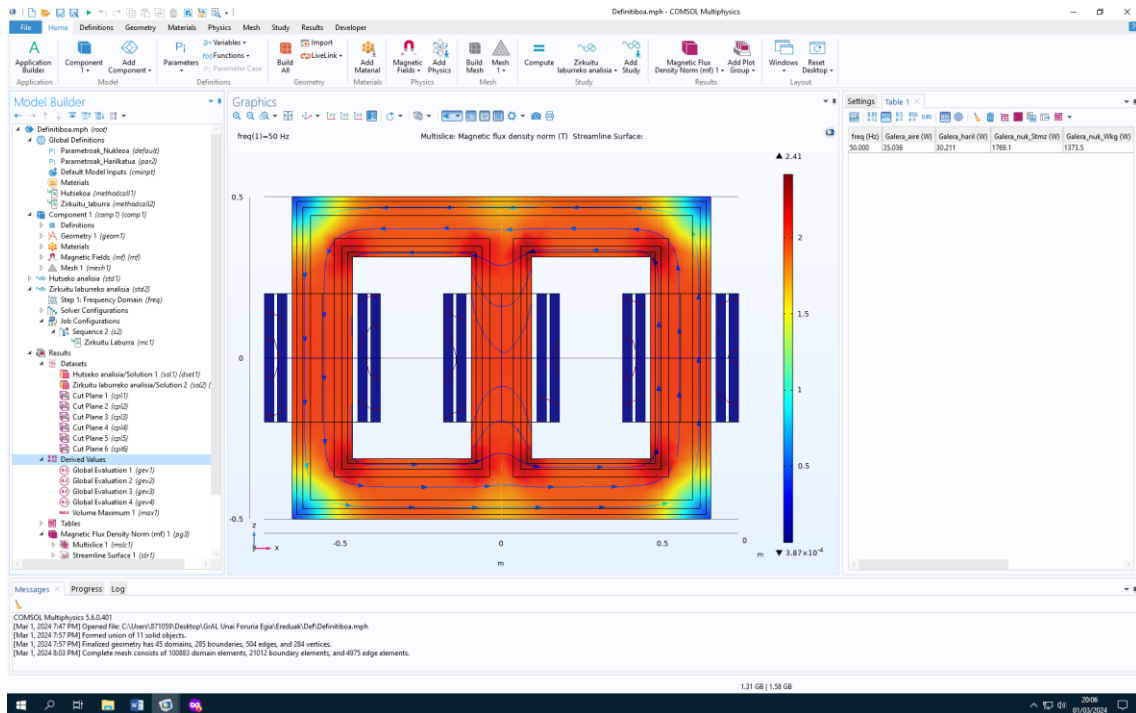
48. COMSOL Irudia: Emaitzak, hutseko analisia (fluxu magnetikoa)



49. COMSOL Irudia: Emaitzak, zirkuitulaburreko analisisa (fluxu magnetikoa)



50. COMSOL Irudia: Emaitzak, hutseko analisisa (ebaketa-planoak)



51. COMSOL Irudia: Emaitzak, hutseko analisisa (balio-eratorriak)