

GRADUA: INDUSTRIA TEKNOLOGIAREN
INGENIARITZA

GRADU AMAIERAKO LANA

***AIREKO LINEETAKO KOROA-
EFEKTUAREN ANALISIA ELEMENTU
FINITUEN BIDEZKO SIMULAZIOAZ***

Ikaslea: Larrea, Valle, Ane Miren

Zuzendaria: Etxegarai, Madina, Agurtzane

Ikasturtea: 2017/2018

Data: Bilbo, 2018ko Uztailaren 24a

LABURPENA

Korua-efektua tentsio altuko lineen eroale eta elementuen inguruan sortzen da airearen ionizazioaren ondorioz, elektrizitate-galerak eta lineetan kalteak eraginez. Lan honen helburua parametro atmosferikoek korua-efektuan dituzten ondorioak ikertzea da. Ikerketa hau Jorgensen eta Pedersen-ek lortutako datu esperimentaletan oinarritzen da, haien kalkuluak Townsend-en teorian oinarrituta egonik. Ereku elektrikoa kalkulatzeko, COMSOL multiphysics elementu finituen softwarea erabiliko da eta lortutako emaitzak Excel bidez aztertuko dira. Behin datu teorikoak lortuta, presio, temperatura eta altitude parametroak aldatuko dira korua-efektua baldintza ez-estandarrean aztertzeko.

Gako-hitzak

Korua-efektua, ionizazioa, eremu elektrikoa, dentsitate erlatiboa, elementu finituak.

RESUMEN

El efecto corona se crea alrededor de los cables y elementos de las líneas de alta tensión como consecuencia de la ionización del aire, causando pérdidas de electricidad y destrozos sobre las líneas. El objetivo de este trabajo es investigar los efectos de distintos parámetros atmosféricos sobre el efecto corona. Este estudio se basa en los datos experimentales obtenidos por Jorgensen y Pedersen, que basaron sus cálculos en la teoría de Townsend. Para el cálculo del campo eléctrico se utilizará primero el software de elementos finitos COMSOL multiphysics y después se analizarán los resultados mediante Excel. Una vez obtenidos los datos teóricos, se modificarán los parámetros presión, temperatura y altitud para analizar el efecto corona en condiciones no estándares.

Palabras clave

Efecto corona, ionización, campo eléctrico, densidad relativa, elementos finitos.

ABSTRACT

The corona effect is created around the cables and elements of the high voltage lines as a result of the ionization of the air, causing electricity losses and damage to the lines. The objective of this work is to investigate the effects of different atmospheric parameters on the corona effect. This study is based on the experimental data obtained by Jorgensen and Pedersen, who based their calculations on Townsend's theory. For the calculation of the electric field, the finite element software COMSOL multiphysics will first be used and then the results will be analysed using Excel. Once the theoretical data has been obtained, pressure, temperature and altitude parameters will be modified to analyse the corona effect in non-standard conditions.

Keywords

Corona effect, ionization, electric field, relative density, finite elements.

AURKIBIDEA

LABURPENA	2
Gako-hitzak	2
RESUMEN	2
Palabras clave	2
ABSTRACT	3
Keywords	3
TAULEN ZERRENDA.....	6
IRUDIEN ZERRENDA	7
1. SARRERA	9
2. TESTUINGURUA	11
3. LANAREN HELBURUAK ETA IRISMENA	14
3.1. HELBURUAK	14
3.2. IRISMENA	14
4. LANAK DAKARTZAN ONURAK	16
4.1. ONURA TEKNIKOAK	16
4.2. ONURA EKONOMIKOAK	16
4.3. ONURA SOZIALAK.....	17
5. GAIAREN EGOERAREN AZTERKETA	18
6. AUKEREN ANALISIA	25
7. PROPOSATUTAKO IRTENBIDEAREN AUKERAKETA	27
8. METODOLOGIA.....	29
8.1. EGINBEHARREKOEN DESKRIBAPENA	29
8.1.1. Eremu elektrikoaren kalkulua	30
8.1.2. Ionizazio-koefizienteen kalkulua	31
8.1.3. $g(x)$ kurben kalkulua	31
8.1.4. Hasierako baldintzen aldaketa	32
8.2. GANTT DIAGRAMA.....	33

8.3. KALKULUAK.....	35
8.3.1. Eremu elektrikoaren kalkulua.....	35
8.3.2. Ionizazio-koefizienteen kalkulua.....	36
8.3.3. $g(x)$ kurben kalkulua.....	37
8.3.4. Hasierako baldintzen aldaketa.....	37
8.4. EMAITZEN DESKRIBAPENA.....	38
8.4.1. Eremu elektrikoaren kalkulua.....	38
8.4.2. Ionizazio-koefizienteen kalkulua.....	39
8.4.3. $g(x)$ kurben kalkulua.....	40
8.4.2. Hasierako baldintzen aldaketa.....	41
9. AURREKONTUA.....	46
9.1. BARNE-ORDUAK.....	46
9.2. INBERTSIOAK.....	46
9.3. AURREKONTU OSOA.....	47
10. ONDORIOAK.....	48
11. BIBLIOGRAFIA.....	50
12. ERANSKINA.....	53
12.1 ESFERA-ESFERA IRUDIAK.....	53
12.1.1 Eremu elektrikoa.....	53
12.1.2 Presioa, temperatura eta altuera ezberdinen $g(x)$ $d=5$ cm izanik.....	54
12.1.3 Presioa eta temperatura ezberdinen $g(x)$ $d=7$ cm izanik.....	58
12.1.4 Presioa eta temperatura ezberdinen $g(x)$ $d=10$ cm izanik.....	61
12.2 Esfera-plano irudiak.....	62

TAULEN ZERRENDA

1. Taula: Ver Pancken Eremu elektrikoa- α erlazioa [15].....	20
2. Taula: Altuera-Presioa-Tenperatura [18].	32
3. Taula: GrAL planifikazioa	34
4. Taula: Eremu teorikoaren eta EFM bidez lortutako eremuaren arteko konparaketa.	36
5. Taula: Barne-orduak.	46
6. Taula: Inbertsioak.	46
7. Taula: Aurrekontua.	47

IRUDIEN ZERRENDA

1. Irudia: Karga positibo eta negatiboen indarra eremu elektriko batean.....	11
2. Irudia: Koroa-efektua goi tentsioko aireko linea batean [6].....	12
3. Irudia: Molekula neutro eta elektroi baten arteko talka [7].	18
4. Irudia: Elektroi-oldea [7].	19
5. Irudia: Eremua- α erlazioa Ver-Planck arabera.	20
6. Irudia: Paschen V-pd kurba.	23
7. Irudia: Kontaros eta Paschen V haustura-tentsioa.	28
8. Irudia: Eginbeharrekoen fluxugrama.	29
9. Irudia: Eremu elektrikoa lortzeko fluxugrama.	30
10. Irudia: Gantt diagrama.	34
11. Irudia: Bi esferen arteko eremu elektrikoa EFM bidez lortuta.	35
12. Irudia: Eremu elektrikoa $V=136$ kV eta $d=5$ cm denean.....	35
13. Irudia: E eta α teoriko eta lortutakoaren arteko konparaketa.	36
14. Irudia: Ezkerrean lortutako $g(x)$ funtzioak, eskuinean $g(x)$ funtzio teorikoak.	37
15. Irudia: Eremu elektrikoen arteko konparaketa.	38
16. Irudia: Eremu elektrikoa esferen erradioaren arabera.	39
17. Irudia: Ionizazio-koefizientea tentsio ezberdinetan.....	40
18. Irudia: $g(x)$ ez-uniformea tentsio ezberdinetan.	40
19. Irudia: $g(x)$ tenperatura ezberdinetan $V=136$ kV denean.	41
20. Irudia: $g(x)$ presioaren arabera $V=136$ kV denean.....	42
21. Irudia: $g(x)$ altitudearen arabera $V=136$ kV denean.....	42
22. Irudia: $g(x)$ tenperatura ezberdinetan $V=207$ kV denean.	43
23. Irudia: Eremu elektrikoa esfera-esfera eta esfera-plano geometrietan.	44
24. Irudia: $g(x)$ ez-uniformea eta uniformea esfera-plano geometrian $V=136$ kV izanik.	44
1. E Irudia: Eremu elektrikoa $V=136$ kV eta $d=7$ cm denean.....	53
2. E Irudia: Eremu elektrikoa $V=136$ kV eta $d=10$ cm denean.....	53
3. E Irudia: Eremu elektrikoa $V=136$ kV eta $d=20$ cm denean.	54
4. E Irudia: $g(x)$ funtzioak $d=5$ cm, $V=207$ kV eta 241 kV denean.	54
5. E Irudia: $g(x)$ Tenperatura ezberdinetan $d=5$ cm eta $V=207$ kV denean.....	54
6. E Irudia: $g(x)$ Tenperatura ezberdinetan $d=5$ cm eta 241 kV denean.	55
7. E Irudia: $g(x)$ Presio ezberdinetan $d=5$ cm eta $V=207$ kV denean.	55
8. E Irudia: $g(x)$ Presio ezberdinetan $d=5$ cm eta 241 kV denean.	56

9. E Irudia: $g(x)$ altuera ezberdinetan $d=5$ cm eta $V=136$ kV denean.	56
10. E Irudia: $g(x)$ altuera ezberdinetan $d=5$ cm eta $V=207$ kV denean.	57
11. E Irudia: $g(x)$ altuera ezberdinetan $d=5$ cm eta $V=241$ kV denean.	57
12. E Irudia: $g(x)$ funtzioak $d=7$ cm, $V=136$ kV, $V=207$ kV eta 241 kV denean.	58
13. E Irudia: $g(x)$ Tenperatura ezberdinetan $d=7$ cm, $V=207$ kV eta 241 kV denean. ...	59
14. E Irudia: $g(x)$ Presio ezberdinetan $d=7$ cm, $V=207$ kV eta 241 kV denean.	60
15. E Irudia: $g(x)$ funtzioak $d=10$ cm, $V=207$ kV eta 241 kV denean.	61
16. E Irudia: $g(x)$ Tenperatura ezberdinetan $d=10$ cm, $V=207$ kV eta 241 kV denean.	61
17. E Irudia: $g(x)$ Presio ezberdinetan $d=10$ cm, $V=207$ kV eta 241 kV denean.	61
18. E Irudia: Eremu elektrikoa $V=136$ kV eta $d=5$ cm denean.	62
19. E Irudia: Eremu elektrikoa $V=136$ kV eta $d=7$ cm denean.	62
20. E Irudia: Eremu elektrikoa $V=136$ kV eta $d=10$ cm denean.	62
21. E Irudia: Eremu elektrikoa $V=136$ kV eta $d=20$ cm denean.	63

1. SARRERA

Koroa-efektua goi-tentsioko aireko lineetan ematen den fenomeno da. Ere-gradu-gradiente handi bategatik aireko molekulak ionizatzen dira eroale bihurtuz. Efektu honek dituen ondorio nagusiak energia-galerak eta lineako elementuen degradazioa dira. Frogatuta dago hainbat baldintzen arabera dela. Gradu Amaierako Lan (GrAL) honetan presioa, tenperatura, altitudea eta geometria baldintzak dituzten eragina aztertu da.

GrAL honen lehenengo puntua testuingurua izango da. Atal honetan koroa-efektua zer den eta non agertzen den azalduko da. Bere agerpenarekin batera dakarren ondorio garrantzitsuenak aipatuko dira. Amaitzeko efektu hau ikertu duten hainbat zientzialarien ikerketak ginetik deskribatuko dira.

Ondoren, helburuak eta irismena azalduko dira, izan ere, lan honen ikerketa kokatzea ezinbestekoa da. Hasieran lanaren helburuak zerrendatuko dira eta gero, irismenean, lan honetatik at dauden baldintzak banan-banan aipatuko dira.

Helburuak eta irismena definitu eta gero, lanaren onurak aurkeztuko dira, onura tekniko, ekonomiko eta sozialak azpiataletan banatuta.

Bosgarren atala gaiaren egungo egoera izango da. Atal honetan gaur egun koroa-efektuari buruzko datu teorikoak azaltzen dira, efektu hau aztertzeko dauden teoriak azalduz.

Hurrengo atala aukeren analisia da. Hemen lana burutzeko dauden hainbat aukerak zerrendatzen dira, hala nola software desberdinak, teoria desberdinak edo eremua lortzeko beste teknikak. Puntu honen helburua lana burutzeko hartutako aukerak bakarrik ez direla erakustea da.

Behin lana burutzeko aukerak zehaztuta, hurrengo puntuan proposatutako irtenbideak azalduko dira, aurretik zerrendatutako aukeren artean zeintzuk eta zergatik hautatu diren azalduz.

Segidan, lanerako metodologia deskribatzen da, hainbat azpi-puntutan banatuta. Hasieran, eginbeharrekoen deskribapena azalduko da eta ondoren Gantt diagrama, lana burutzeko eman diren pausoak eta puntu bakoitzak iraun duen denbora zehaztuz. Gero egin diren kalkuluak eta lortu diren emaitzak deskribatuko dira.

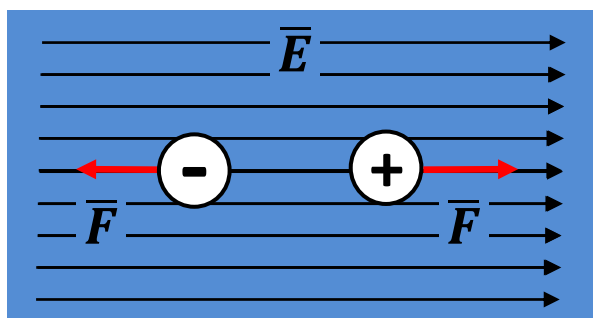
Jarraian lanaren aurrekontua azalduko da, ikerketa egiteko behar izan diren baliabideak aztertuz eta bakoitzaren prezioa kuantifikatuz.

Aurrekontua eta gero lana burutzean lortu diren ondorioak eztabaidatuko dira.

Amaitzeko, lana gauzatzeko behar izan den informazio guztiaren iturriak bibliografian esleitu dira. Bibliografia eta gero lagungarriak izan daitezkeen hainbat irudi eta grafiko batu dira eranskinak deitzen den azkeneko puntuan.

2. TESTUINGURUA

Karga elektriko baten agerpenak espazioaren zati baten ezaugarriak aldatzen ditu, eremu elektriko bat sortaraziz [1]. Sortu den eremu elektrikoan karga bat sartzen bada, honek indar batzuk jasango ditu. GrAL honetan egindako irudian (1.irudia) ikusten da nola karga positiboa bada jasango duen indarrak eremu elektrikoaren noranzko berdina izango duela eta negatiboa bada, aldiz, kontrakoa.



1. Irudia: Karga positibo eta negatiboen indarra eremu elektriko batean.

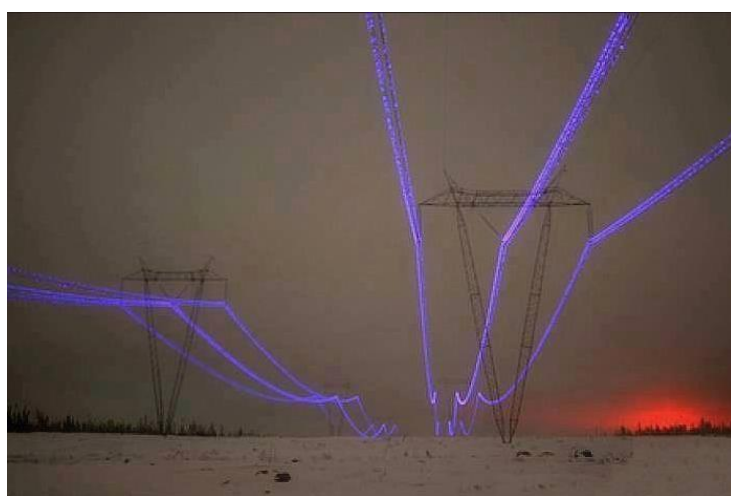
Eremu elektriko uniformea edo ez-uniformea izan daiteke. Eremu elektriko uniformean eremu lerroak berdinak izan behar dira eta haien arteko distantzia berdina izan behar da (1.irudia). Eremu elektriko ez-uniformean, aldiz, baldintza hori ez da bete behar [2].

Eroale baten gainazaleko tentsioa haustura-tentsioaren berdina edo handiagoa bada eremu elektrikoko gradiente handi bat sortzeko, airea ionizatzen da eta ihes korrante bat agertzen da, hau da, eroaletik doazen elektroik batzuk airerantz ihes egiten dute aireko molekulak eroale bihurtuz. Haustura-tentsio hori material bat ez-eroale izatetik eroalea izatera pasatzeko behar den tentsio minimoa da [3]. Hortaz, airea (edo eroalea inguratzen duen gasa) isolatzaile izatetik eroalea izatera pasatzen da. Horretarako, eremu elektrikoaren gradiente erradiala airearen zurruntasun dielektrikoaren balio berdina edo handiagoa izatea lortu behar da. Fenomeno horri koroa-efektua deritzo eta tentsio altuko aireko lineetan ematen da.

Ihes korrante honen ezaugarriak esanguratsuenak zaratatsua dela eta eroalearen inguruan kokatzen dela dira. Orokorrean, eroalearen geometria zirkularra denez, sortzen den fenomenoak aureola itxuraren antza du eta, horregatik, koroa-efektua deritzo [4]. Tentsioa zenbat eta handiagoa izan, kolore gorritik kolore urdina izatera pasatzen da, tentsioagatik tenperatura handitzen doalako [3]. Baina fenomeno hau soilik posiblea da gaez ikustea, nahiz eta egunez egiten duen zaratagatik bereiz

daitekeen. Fenomeno hau antzematea oso erraza izan, aztertzea, aldiz, nahiko zaila da.

Koroo-efektuaren ondorio garrantzitsu bat isolatzaileen degradazioa da. Efektu honen ondorioz, ozonoa (O₃) eta nitrogeno monoxidoa (NO) agertzen dira eta inguruko hezetasunarekin erreakzionatuz, azido nitrikoa (HNO₃) eta nitrogeno dioxidoa (NO₂) sortzen dira [5]. Fenomenoa kontrolik gabe eta berez sortzen denean, sortutako gasak arriskutsuak bihurtzen dira nahiko korrosiboak direlako. Hala, lineen elementuak suntsi ditzakete [6]. Beraz, koroo-efektuaren ezagutza eta ikerketa beharrezkoak dira tentsio altuko gailuak diseinatzerako orduan.



2. Irudia: Koroo-efektua goi tentsioko aireko linea batean [6].

Koroo-efektua aztertu zuen lehenengoa Peek zientzialari iparramerikarra izan zen, XX. mendearen hasieran. Formula esperimental batzuk lortu zituen haustura-tentsioa kalkulatzeko. Hau da, koroo-efektua agertzeko beharrezkoa den tentsio minimoa kalkulatzeko [7]. Haustura-tentsio honek geometria eta baldintza klimatologikoak hartzen ditu kontuan zuzenketa-koefiziente batzuen bidez [7].

$$V_c = \frac{29,8}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{3} \cdot m_c \cdot \delta \cdot m_t \cdot r \cdot \ln\left(\frac{DMG}{r}\right) \quad (1)$$

non:

m_c = eroalearen zimurtasun-koefizientea

δ = dentsitate-erlatiboa

m_t =koefiziente meteorologikoa

r = eroalearen erradioa (cm)

DMG=distantzien batezbesteko geometrikoa (cm)

Haustura-tentsio kritikoaren formularekin batera potentzia-galerak kalkulatzeko beste formula bat argitaratu zuen, haustura-tentsioan oinarrituz [8].

$$P = \frac{244}{\delta} \cdot (f + 25) \cdot \sqrt{\frac{r}{DMG}} \cdot (V - V_c)^2 \cdot 10^{-5} \quad (2)$$

non:

f =maiztasuna (Hz) v = lineako tentsioa (kV) V_c = haustura-tentsioa (kV)

Peeken haustura-tentsioa kalkulatzeko ekuazioak soilik balio du eremu-tarte zehatz batzuetan eta, gainera, datuak interpolatzeak errore handiak sor ditzake [9]. Arazo honen soluzio bat formula erdi-enpirikoak erabiltzea izango litzateke. Jorgensen eta Pedersenek, bosgarren ataletan azalduko den Townsend teoria klasikoan oinarrituz, formula erdi-enpiriko batzuk lortu zituzten, aurretik azalduko arazoak baztertuz. GrAL honen oinarria Jorgensen eta Pedersen egin zuten ikasketa koroa-efektuaren inguruan da, haien balio teorikoak COMSOL multiphysics softwarean eta Excel-an lortutako balioekin konparatuz.

3. LANAREN HELBURUAK ETA IRISMENA

3.1. HELBURUAK

GrAL honen helburu nagusia Elementu Finituen Metodoaren bidez koroa efektua aztertzea da, ingurumen eta geometria ezberdinen arabera. Horretarako, hurrengoak bete behar dira:

1. Koroa-efektua antzemateko hainbat teoria daude [9]-[16]. Haien arteko ezberdintasunak aztertu eta ebaluatuko dira.
2. Koroa-efektua analitikoki aztertzeke metodologia fidagarri bat aurkitzea. Izan ere, datu esperimentalak baliagarriak eta zehatzak dira baina datuak interpolatzerakoan errore handiak sor daitezke [9].
3. Koroa-efektua sakonki aztertu ahal izateko, hasieran geometria sinpleetan aztertu behar da. Hortaz, geometria sinple batean erabilitako metodologia frogatuko da.
4. Koroa-efektua eremu elektrikoaren arabera aldatzen da. Beraz, eremu elektrikoa aztertzea ezinbestekoa da, hainbat parametrok dituzten eragina ikertuz.
5. Energia elektrikoa garraiatzeko lineetan agertzen den koroa efektua linearen tentsioa, eroaleen diametroa, eroaleen arteko distantzia, eroaleen altuera itsasoaren mailarekiko, ingurumen baldintzen eta abarren menpe dagoela frogatuta dagoenez, koroa-efektua murriztu daiteke linearen diseinuarekin jolastuz. Faktore hauek kontuan hartuz, parametro batzuk aldatuko dira bakoitzak daukan eragina ikusteko.

3.2. IRISMENA

GrAL honen irismenetik kanpo daude:

1. Helburua ez da izango koroa-efektuagatik sortutako galerak zenbatestea, ezta koroa-efektua kuantifikatzea, baizik eta non eta zein baldintzetan agertuko den aztertzea.
2. Jorgensen eta Pedersen lortutako datuetan oinarritzen da, eta ez beste artikuluetako datu esperimentaletan.
3. Eremuaren analisisa egiteko behar diren eskakizunak COMSOL multiphysics softwareak guztiz betetzen ditunez, ez da ANSYS, Nastran, edo RFEM motako softwarerik erabiliko.

4. Helburua ez da izango esfera-esfera edo esfera-plaka ez diren geometriak aztertzea. Hau da, bi geometria sinple hauetatik kanpo dauden geometria konplexuak ez dira aztertuko.
5. Geometria eraikitzerakoan materiala airea ez den edozein material baztertuko da.
6. Ingurumena simulatzeko erabilitako gasa airea da. Ikerketa ez da beste materialetan egingo.
7. Aztertutako ingurumen-baldintzak itsas mailarekiko altuera, presioa, tenperatura eta dentsitatea dira. Beraz, hezetasuna eta beste hainbat ingurumen faktore ez dira kontutan izango.

4. LANAK DAKARTZAN ONURAK

Atal honetan proiektu hau gauzatzearen ondorioz egongo diren onurak ebaluatuko dira. Ezinbestekoa da GrAL honek dakartzan onurak zeintzuk diren aztertzea, GrAL burutzea justifikatzen baitute. Halabeharrezkoa da garraio lineak altitude altuetatik eta baldintza atmosferiko konplexuetatik pasatu behar direla. Baina baldintza hauek lurralde jakin batzuetan soilik ematen dira (Txina, India, Bolivia...). Hori dela eta, koroa-efektuari buruzko ikerketak altitudea kontuan hartuz aurkitzea nahiko arraroa da literaturan. Arazo hori justifikazio nahikoa izango litzateke GrAL burutzeko. Dena den, beste hainbat onura daude, ondoren hiru talde desberdinetan sailkatuko direnak: onura teknikoak, onura ekonomikoak eta amaitzeko, onura sozialak.

4.1. ONURA TEKNIKOAK

Eremu elektrikoan oinarrituz, koroa-efektuaren eragina aztertuko da, GrAL honen helburu nagusia izanik. Koroa-efektua noiz eta non agertuko den jakitea ezinbestekoa izango da goi tentsioko lineak diseinatzerako orduan. Fenomeno honengatik hainbat galera sor daitezke, potentzia linearen bidez galduz eta linearen efizientzia murriztuz. Gainera, isolagailuen eta lineako beste elementuen suntsipena dakar. Onurarik nabarmena hori izango litzateke: etorkizunean goi tentsioko lineetan ematen den koroa-efektuagatik sortutako koroa-efektuaren ondoriozko galerak minimizatzea edo ezabatzea eta lineako elementuen suntsipena saihestea.

4.2. ONURA EKONOMIKOAK

Alde batetik, goi tentsioko lineetan koroa efektuagatik sortzen diren galerak amaieran galera ekonomikoetan bihurtzen dira. Hartzaileak jaso behar duen potentzia lortzeko, iturritik atera behar den potentzia handiagoa izango da koroa-efektuaren ondoriozko galerengatik galdutakoa berdintzeko eta, beraz, enpresei kostu ekonomiko gehigarri bat suposatuko die.

Beste alde batetik, koroa-efektuagatik isolamenduak eta lineako beste hainbat elementu apurtzen dira. Honen ondorioz, behar baino gehiagotan aldatu behar dira, beste kostu gehigarri bat suposatuz.

4.3. ONURA SOZIALAK

Airea ionizatzean ozonoa eta oxido nitrikoa agertzen dira, eta atmosferako urarekin erreakzionatuz azido nitrikoa eta nitrogeno dioxidoa sortzen dira. Sortutako nitrogeno dioxidoa kutsadura atmosferikoan parte hartzen du negutegi efektua bultzatzen duelako [18]. Beraz, klima aldaketan laguntzen dute. Koroa-efektuak eragiten duen etengabeko zaratagatik antzeman daiteke, kutsadura akustikoa sortuz.

Printzipioz, goi tentsioko lineak etxebizitzetatik urrun daude kokatuta eta koroa-efektuaren ondorioak ez ohi dira nabarmenak izaten herritarrengan. Hala ere, kaltegarriak izan daitezke langileen osasunarentzat.

Aurreko arazoez gain, koroa-efektuak irrati interferentziak eragiten ditu [6] eta hori saihesteak inguruko pertsonentzat onuragarria izango litzateke haien aisialdietarako.

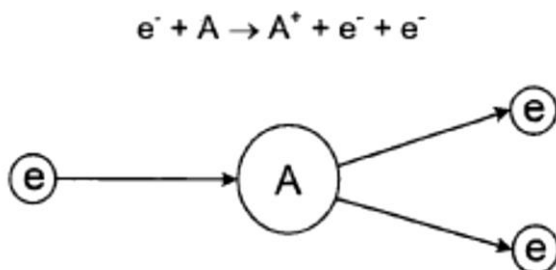
Hortaz, aurreko arazoak ekiditearen ondorioak onuragarriak izango dira gizartean.

5. GAIAREN EGOERAREN AZTERKETA

Literaturan ez da ohikoa koroa-efektuari buruzko ikerketak altitudea kontuan hartuz aurkitzea. Gainera, nahiz eta hainbat artikulu egon efektu honen inguruan [9]-[16] haien artean ezberdintasun asko daude koroa-efektua non agertuko den puntua ikusteko eta ingurune baldintzak aldatzerako orduan. Jarraian oinarri teorikoak azalduko dira.

Townsen teoria

Airearen edo eroalea inguratzen duen gasaren molekula neutro baten ionizazioa, eremu elektriko batengatik azeleratuta izan den elektroien baten talkagatik gertatzen da. Prozesu honi ionizazio prozesu primarioa deritzen. Prozesu honen ondorioz beste elektroien ioi pare bat sortzen da, molekula neutroa positiboa bihurtuz elektroia galtzearen ondorioz. Hau da, neutroa den molekula bat positiboa bihurtzen da talkaren ondorioz elektroien bat galtzen duelako (3.irudia). Elektroien kantitatea oso azkar handitzen da, elektroien-oldea sortuz. Ioi positiboak ere azeleratzen dira eremu elektrikoagatik, baina haien pisua negatiboena baino askoz handiagoa denez, hauen eraginez gasa ez da ionizatuko [19]. Ionizatu diren ioiak zenbatesteko, α [cm^{-1}] **ionizazio-koefizientea** azaldu zuten Townsenek.



3. Irudia: Molekula neutro eta elektroien arteko talka [19].

Nahiz eta beste ionizazio prozesu batzuk egon (foto-ionizazioa, molekula neutroaren eszitazioa...), koroa-efektuan eragin handiena daukana ionizazio prozesu primarioa da.

α ionizazio-koefizientearen kalkulua

Aurretik azaldu den bezala, ionizazio-koefizientea Townsenek azaldu zuten lehenengo aldiz ionizatutako molekulak zenbatesteko. Ionizazio-koefizientea kalkulatzeko Townsend-ek hurrengo formula proposatu zuten [16].

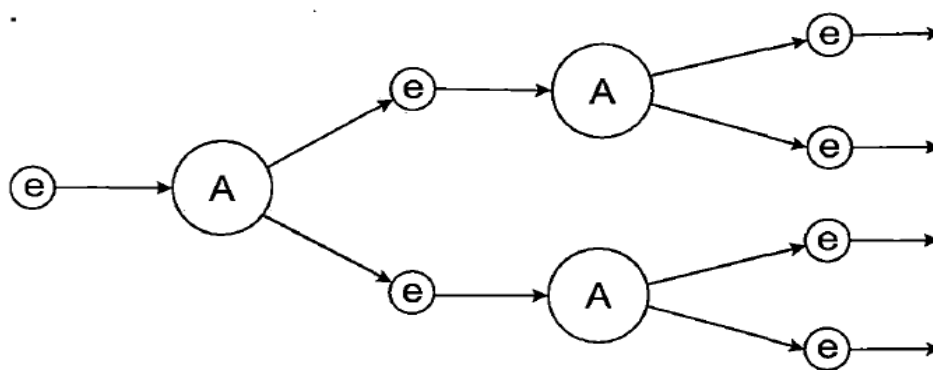
$$\frac{dn}{ds} = \alpha n \quad (3)$$

non:

n = elektroi kopurua

s = elektroi eta iturriaren arteko distantzia

(3) ekuazioa bakarrik erabil daiteke elektroi-olde bakarra gertatuko balitz (3.irudia). Baina elektroi-oldea oso luzea denean (4.irudia) α ez da berdina izango tarte guztietan eta, beraz, Townsenden ekuazioa ez da baliagarria izango.



4. Irudia: Elektroioldea [19].

Ver Planck zientzialariak ionizazio-koefizientea esperimentalki azaldu zuen eremua elektrikoa tarteka banatuz, Townsend, Wheatley, Paavola, Masch eta Sanders lortu zituzten datu esperimentaletan oinarrituz [16].

α eta eremuaren arteko erlazioa gasaren δ dentsitate-erlatiboaren menpe aztertu zuen, ondoren erakutsiko den taulan azaltzen den moduan (1. Taula). Dentsitate-erlatiboa koefiziente zuzentzaile bat da, presioa eta tenperatura kontuan izaten duena airearen dentsitatea zuzentzeko. Koefiziente zuzentzaile hori Peekek erabili zuen lehenengo aldiz.

Tartea	E/δ [kV/cm] tartea	a	b	α/δ [cm ⁻¹]
I	15-25.8	1.67×10^{-5}	0.47	$a \cdot \exp(b \cdot E/\delta)$
II	25.8-78.7	0.166	21.5	$a \cdot (E/\delta - b)^2$
III	78.7-200	19	50	$a \cdot (E/\delta - b)$
IV	200-467	1.08×10^4	266	$a \cdot \exp(-b \cdot \delta/E)$
V	>467	322	850	$a \cdot (E/\delta)^{1/2} - b$

1. Taula: Ver Plancken Eremu elektrikoa- α erlazioa [16].

non:

E = eremu elektrikoa (kV)

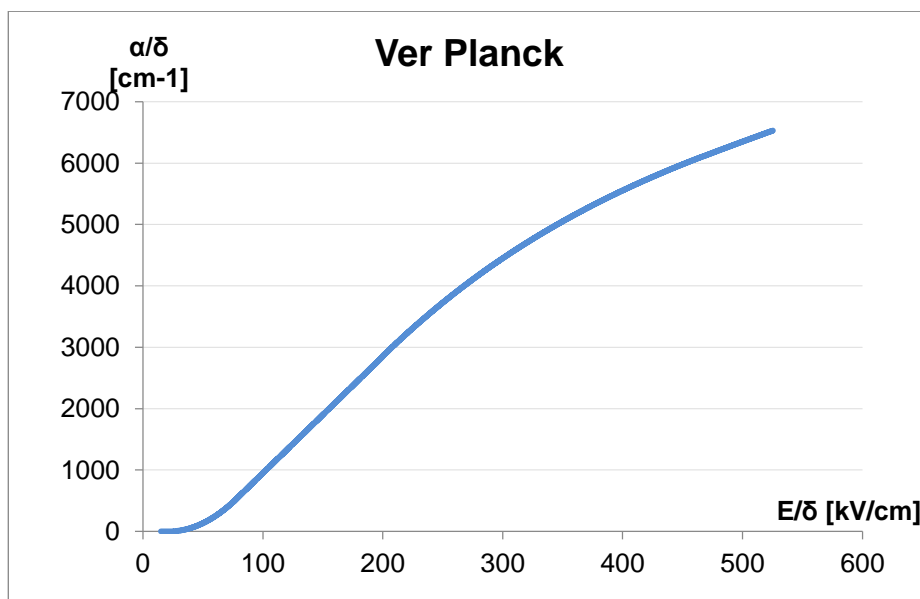
a, b = konstanteak

δ = dentsitate erlatiboa

α = ionizazio-koefizientea (cm⁻¹)

E/δ 15 kV/cm baino txikiagoa denean haustura-tentsioa ez da gaindituko, hau da, koroa-efektua ez da agertuko eta, beraz, α nulua kontsideratuko da, bere azterketa arbuigarria kontsideratuz. Beste modu batean esanda, elektroiak ez dute ionizatzeko beharrezko energia lortuko [16].

GrAL honetan irudikatu den hurrengo dentsitate erlatiboaren menpeko E - α grafikoan (5.irudia) ikus daiteke α -ren aldaketa eremu elektrikoarekiko.



5. Irudia: Eremua- α erlazioa Ver-Planck arabera.

Hausturaren kalkulua

Haustura-puntua zein den jakiteko α -ren menpe dagoen funtzio bat erabili daiteke. Meek-en [9] hurrengo formulaz baliatuz, $G(x, \rho, f(E), \mu, \%H_2O, \dots)$ funtzioa kalkula daiteke (4) ekuazioan.

$$\alpha \cdot \exp\left\{\int_0^x \alpha dx\right\} = G\{x, \rho, f(E), \mu, \%H_2O, \dots\} \quad (4)$$

non:

x = distantzia (cm)

μ = fotoizazioa

ρ = aire dentsitatea (g/cm^3)

$\%H_2O$ = hezetasuna

E = eremu elektrikoa (kV/cm)

$G\{x, \rho, f(E), \mu, \%H_2O, \dots\}$ funtzioa hainbat aldagaien menpe dagoenez, kalkulatzeko oso zaila edo ezinezkoa da. Arazo honen irtenbide bat aldagai garrantzitsuenak soilik kontuan hartzea izango litzateke: iturritik dagoen distantzia eta eroalea inguratzen duen gasaren dentsitatea. Beraz, G funtzioa sinplifikatuz, (5) ekuaziora hel daiteke.

$$\alpha \cdot \exp\left\{\int_0^x \alpha dx\right\} = G\{x, \rho\} \quad (5)$$

Gasaren airea izanik eta ingurumen-baldintza estandarrek kontsideratuz (presio atmosferikoa eta 20 °Cko tenperaturan), ekuazioa asko sinplifikatzen da, dentsitateak balio unitarioa hartzen duelako.

$$\alpha \cdot \exp\left\{\int_0^x \alpha dx\right\} = G\{x, 1\} \quad (6)$$

Lan egiteko, (6) ekuazioa ez da oso eroso. Beraz, logaritmikoa bihurtuz bere erabilera nahiko errazten da.

$$\ln(\alpha) + \int_0^x \alpha dx = g(x) \quad (7)$$

Eremu uniforme batean α konstantea izango litzateke. Beraz, ionizazio-koefizientearen integrala distantziarekiko kalkulatu da gelditzen da, distantziarekiko proportzionala izanik.

$$\ln(\alpha) + \alpha x = g(x) \quad (8)$$

Aurreko baldintza betetzen den puntua **haustura-puntua** izango litzateke eta zein baldintzetan agertu den jakiteko aukera ematen digu. Beraz, korroa-efektua aztertzeko

tresna simple bat $g(x)$ funtzioaren azterketa izango litzateke, eta eremu uniformearena eta eremu ez-uniformearen funtzioak konparatuz emaitza lortuko da. Hau da, (10) ekuazioa betetzen deneko puntuan efektua agertuko litzateke:

$$\ln(\alpha_{ez-uniformea}) + \int_0^x \alpha_{ez-uniformea} dx = \ln(\alpha_{uniformea}) + \alpha_{uniformea} \cdot x \quad (9)$$

$$g(x)_{ez-uniformea} = g(x)_{uniformea} \quad (10)$$

Eremu ez-uniformearen $g(x)$ funtzioa kalkulatzeko Ver Plack-en datu esperimentalak erabil daitezke (1. Taula). Baina eremu uniformearen $g(x)$ funtzioa kalkulatzeko hainbat proposamen daude, haustura-tentsioan eta α -an oinarrituz.

Kontarosek hiru ekuazio proposatu zituen, alde batetik α kalkulatzeko (11) eta (12) eta, bestetik, haustura-tentsioa kalkulatzeko (13) [21]. Haustura-tentsioa dentsitatearen menpe dagoenez, hasierako baldintzak aldatzea zuzenean egin daiteke, dentsitatea temperatura eta presioaren arabera baita.

$$\alpha = \int_V^\infty N(\bar{w})P(w)F(w)dw \quad (11)$$

non:

w= elektroien energia	N=elektroien talka-kopurua
P= elektroia talka egiteko probabilitate funtzioa	F= elektroien energia sakabanatuaren funtzioa

$$\alpha d = 8,9 \cdot 10^{-2} \cdot V^{1/2} \quad (12)$$

non:

d= distantzia (cm)	V= haustura-tentsioa (kV)
--------------------	---------------------------

$$V = \frac{2.54 \times 10^8 \cdot \rho d}{\ln(2.33 \times 10^7 \cdot \rho d)} \quad (13)$$

non:

d= distantzia (cm)	ρ =dentsitatea (g/cm ³)
--------------------	--

$g(x)$ uniformeak kalkulatzeko Cigre haustura-tentsioan oinarritu zen. Lortu ziren datuak oso zehatzak izan ziren esperimentalak izan zirelako, baina ez zen ekuaziorik lortu [22].

Paschen-ek haustura-tentsioa kalkulatzeko formula enpiriko bat proposatu zuen, formula erabilgarria izateko baldintza bakarra tenperatura 20 °C izanik. Proposatu zuen formula presioan eta iturritik dagoen distantzian oinarritzen da. Formula honekin lortzen diren emaitzak Cigrek lortu zituenak baino apur bat txikiagoak dira, baina emaitza hauek baliagarritzat hartuko dira segurtasun aldetik onuragarriak direlako [21].

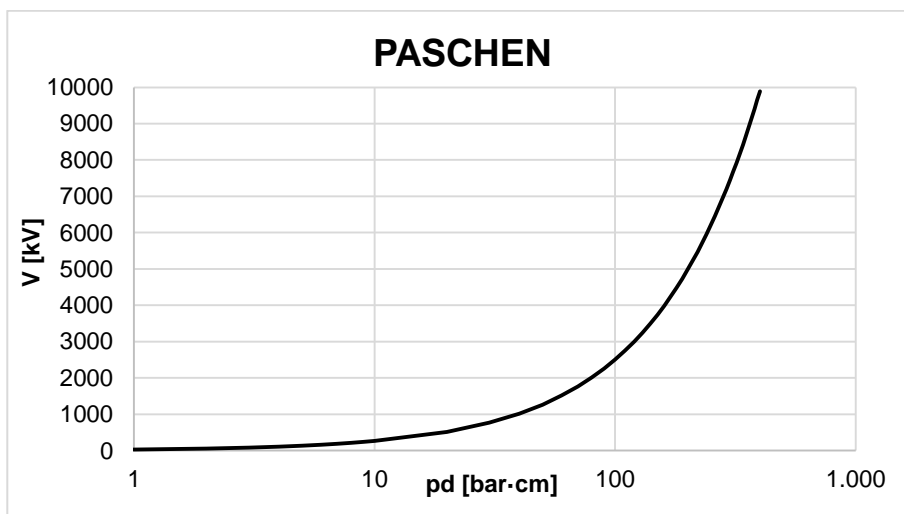
$$V_B = 6.72\sqrt{pd} + 24.4 \cdot pd \quad (14)$$

non:

p =presioa (bar)

d =distantzia (cm)

GrAL honetan garatutako 6.irudian agertzen da (14) ekuazioan oinarritutako tentsioa eta pd arteko erlazioa.



6. Irudia: Paschen V-pd kurba.

Behin haustura-tentsioa lortuta, eremu elektrikoa kalkula daiteke, tentsioa distantziarekiko zatituz. Eremua kalkulatu eta Ver Plancken proposamena erabiliz (1.taula), α kalkula daiteke, ondoren (7) ekuazioaz baliatuz $g(x)$ ez-uniformea kalkulatu ahal izateko.

Hasierako baldintzak aldatzeko Paschenek, hurrengo suposizioa egin zuen haustura-tentsioa kalkulatzeko [21].

$$V(\delta) = \delta \cdot V(\delta = 1) \quad (15)$$

Hau da, δ dentsitate-erlatiboa daukan potentziala, δ -rekiko eta baldintza estandarreko haustura-tentsioarekiko zuzenki proportzionala da. Helburua $g(x)$ funtzioak alderatzea denez, tentsioaz baliatuz $g(x)$ kalkula daiteke ondoren azalduko den metodologia jarraituz.

$$E(\delta) = \frac{V(\delta)}{x} = \delta \cdot \frac{V(\delta=1)}{x} = \delta \cdot E(\delta = 1) \quad (16)$$

$$E(\delta) = \delta \cdot E(\delta = 1) \quad (17)$$

$$\frac{E(\delta)}{\delta} = \frac{\delta \cdot E(\delta=1)}{\delta} = E(\delta = 1) \quad (18)$$

$$\text{Non } \delta = \frac{p_0}{p} \cdot \frac{T+273}{T_0+273} = \frac{1}{p} \cdot \frac{T+273}{293} \quad (p \text{ (atm) eta } T \text{ (}^\circ\text{C)}) \quad (19)$$

Beraz, $E(\delta)/\delta = E(\delta = 1)$ datuarekin Ver Plancken grafikoan sartu (5.irudia), α/δ datua lortzen da. Hortaz, ingurumen baldintzak aldatzerakoan α kalkulatzeko egin behar den eragiketa bakarra δ dentsitate erlatiboagatik biderkatzea izango litzateke. Ondoren, eremu uniformeko $g(x)$ funtzioa kalkulatu ahal izango da.

6. AUKEREN ANALISIA

Korua-efektua detektatzeko hainbat aukera daude. Aireko lineetan frogatuta dago korua-efektuaren agerpena eroaleen erradioaren menpekoa dela. Beraz, hurrengo formulaz baliatuz ionizazioa agertzeko beharrezkoa den eremu elektrikoaren gradientea kalkula daiteke [23].

$$g_0 = 30 \cdot (1 - 0,7r) \quad (20)$$

non:

$$g_0 = \text{eremu elektrikoaren gradientea (kV/cm)} \quad r = \text{erradioa (cm)}$$

Baina (20) formula soilik baliagarria da 25 °C-tan eta presio atmosferikoan. Gainera, ez da edozein geometriarako aplikagarria, bakarrik sekzio zirkularra eta uniformeak daukaten eroaleetan.

Korua-efektua antzemateko beste metodo bat haustura-tentsioa eta tentsio maximoa aldaratzea da. Haustura-tentsioa Peeken ekuazioaz (1) kalkula daiteke eta eroalearen tentsio maximoa (21) formularen bitartez. Linearen tentsio maximoa haustura-tentsioa baino handiagoa bada, korua-efektua agertuko da [4].

$$U_{me} = 1,15 \cdot U_{linea} \quad (21)$$

Beste aukera Meekek azaldutako eremu elektriko uniformearen eta ez-uniformearen $g(x)$ funtzioak konparatzea da [9]. Bi funtzio hauek berdinak direnean korua-efektua agertuko da [9]. Eremu ez-uniformearen $g(x)$ lortzeko Paschen formula ez den beste aukera bat Cigre-ren datu taulatuak erabiltzea izango litzateke. Metodo hau erabiltzeko eremu elektrikoak kalkulatzeko beharrezkoa da.

Espazioko zati batean karga puntual bakarra baldin badago, eremu elektriko oso erraz kalkula daiteke. Baina errealitatean karga asko daude eta eremu elektrikoaren kalkulua zailtzen da. Arazo honi aurre egiteko metodo batzuk existitzen dira.

Zilindro itxurako eroale batentzat (22) ekuazioa erabili daiteke [26].

$$E = -\frac{\mu_0 \omega J_0 \text{sen}(\omega t) a^2}{4} \left(1 + 2 \text{Ln} \left(\frac{\rho}{a} \right) \right) \quad (22)$$

non:

J_0 = maiztasuna (A/m^2)

ω = maiztasun abiadura (rad/s)

t = denbora (s)

a = erradioa (m)

μ_0 = hutsaren iragazkortasuna

= $4\pi 10^{-7} N/A^2$

Soilik geometrian eta tentsioan oinarrituz, Elementu Finituen Metodoa (EFM) erabili daiteke eremu elektrikoaren kalkulurako. EFM erabiltzeko dauden softwareak asko dira: Abaqus, ANSYS, Elmer FEM solver, FreeFem++, Nastran, OpenFEM, Patran, RFEM...[24].

Ingurumen-baldintzak aldatu ahal izateko, bi aukera ezberdin daude. Alde batetik Kontarosen (13) ekuazioa erabili daiteke haustura-tentsioa kalkulatzeko. Ekuazio honen haustura-tentsioa tenperatura eta presioaren menpe dagoenez, ingurumen-baldintzak zuzenean alda daitezke. Beste aukera Paschen ekuazioetan (14), (15) eta (19) oinarritzen da. Prozedura horrekin tenperatura eta presioa alda daiteke dentsitate erlatiboan oinarrituz (19), ondoren haustura-tentsioa horren menpe kalkulatzeko (14) ekuazioaz baliatuz.

7. PROPOSATUTAKO IRTENBIDEAREN AUKERAKETA

Atal honetan aukeren analisisan aipatu diren hainbat alternatiben artean hautatutakoak azalduko dira.

Koroa-efektua antzemateko dauden metodoen artean, Meekek proposatu zuen $g(x)$ funtzioen konparaketa metodoa erabili da. Izan ere, Jorgensen eta Pedersenek metodo hori erabili zuten eta GrAL hau haien lanan oinarritzen denez, beste aukerak baztertu dira. $g(x)$ funtzioen kalkuluetarako α ionizazio-koefizientearen balioa beharrezkoa da. Kalkulatzeko erabili den aukera Ver Planckek proposatutako ekuazioa da (1. Taula).

Eremu elektriko uniformeko $g(x)$ funtzioa kalkulatzeko Cigreren datuak Paschen datuekin konparatuz zehatzagoak dira, baina datu esperimentalak direnez ez dute ekuaziorik jarraitzen eta ondoren ingurumen baldintzak ezin izango liriteke aldatu. Gainera Paschen formularekin lortutako emaitzak murriztaileagoak direnez, segurtasun aldetik hobea da datu hauetaz baliatzea.

Eremu-elektrikoa kalkulatzeko EFM erabili da, elementu finituen erabilera baliagarria dela frogatzea GrAL honen helburua baita. EFM erabiltzeko hainbat software desberdin daude. Software batzuk ez dute eremu elektriko kalkulatzeko aukera ematen, beraz, horiek baztertu dira. Ikerketa honetan eremu elektriko kalkulatu nahi da saretea oso konplexua izan gabe, izan ere, sarearen azterketa ez da izango GrAL honen helburua. Beraz, posibilitate hauek ematen duen softwarea COMSOL multiphysics da.

Ingurumen baldintzak aldatzerakoan Paschenen prozedura erabili da. Kontaros eta Paschen haustura-tentsioa kalkulatzeko lortu zuten formulak (13) eta (14) baldintza estandarretan aldaratu dira. Nola (13) ekuazioa dentsitatearen menpe dagoenez, ezinbestekoa da parametro honen kalkulua. Dentsitatea kalkulatzeko erabili den formula (22) izan da:

$$\rho = \left(\frac{P_0}{RT}\right) \exp\left(\frac{-gz}{RT}\right) \quad (22)$$

non:

$P_0=101235$ Pa

$g=9.81$ m/s²

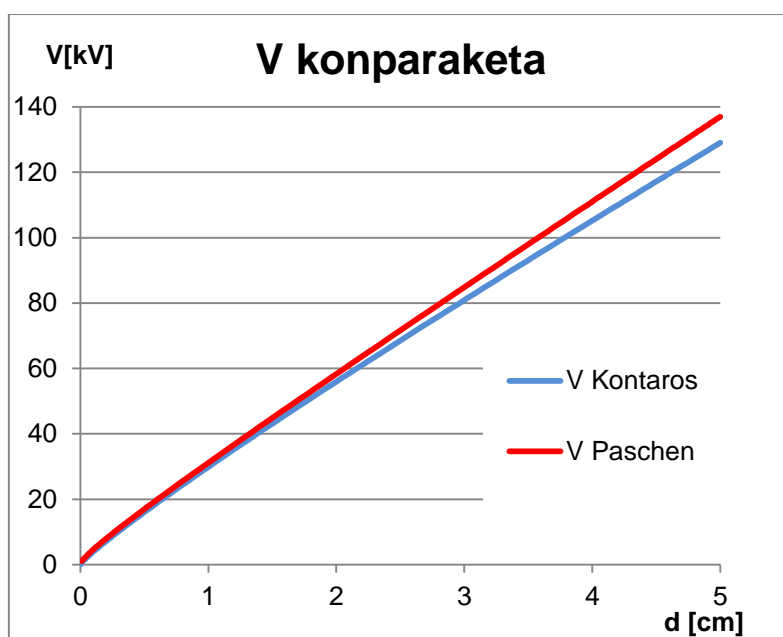
$R=286.9$ J/kg·K

z =altuera (m)

T = temperatura (K)

Dentsitatearen formula altueraren menpe dago, eta ez presioaren menpe. Presioaren eragina aztertu ahal izateko, 2. Taulako datuak erabili dira.

Bi ekuazioen arteko ezberdintasuna nahiko nabarmena da, batez ere kargatutako esferaren eta lurrera konektatuta dagoen esferaren arteko distantzia handitzen doan heinean. Beraz, Kontarosen proposamena alde batera utzi da ingurumen baldintzak aldatzerako orduan.

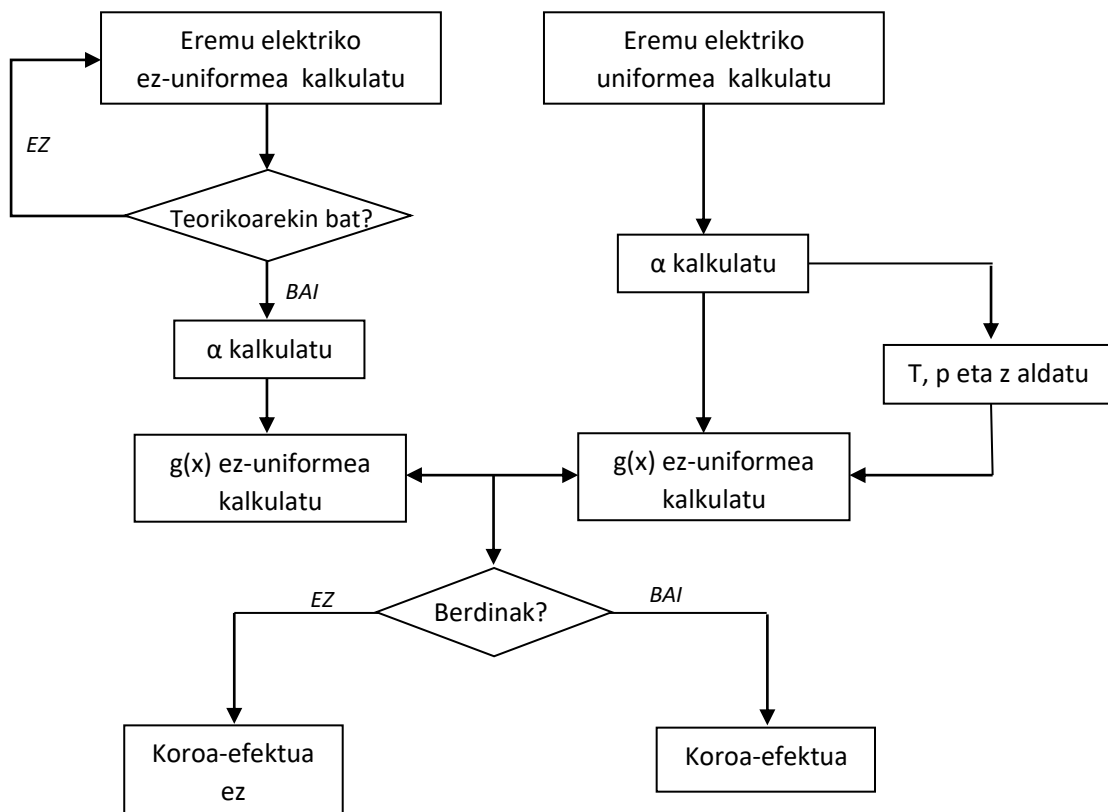


7. Irudia: Kontaros eta Paschen V haustura-tentsioa.

8. METODOLOGIA

8.1. EGINBEHARREKOEN DESKRIBAPENA

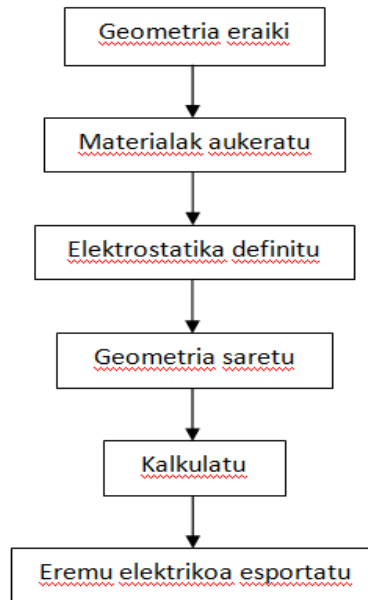
GrAL hau burutzeko eman den lehenengo pausoa planifikazioa izan da. Atal honetan GrAL egituratu da, lanak izango dituen edukiak aztertuz. Ondoren koroa-efektuari buruzko hainbat artikulu irakurri dira, fenomeno honen oinarri teorikoak bereganatzeko. Oinarri teoriko hauek informazio gehigarria bilatuz sakondu dira. Amaitzeko COMSOL multiphysics eta Excel bidezko kalkuluak egin dira, ondoren azalduko diren pausoak jarraituz. Pauso hauek hurrengo fluxugraman laburbildu dira (8.irudia), metodologia era erraz batean jarraitu ahal izateko. Fluxugrama [25] artikuluan oinarrituta dago, metodologia apur bat aldatuz. Izan ere, α -ren kalkulua sinplifikatu da.



8. Irudia: Eginbeharrekoen fluxugrama.

8.1.1. Eremu elektrikoaren kalkulua

Jorgensen eta Pedersen lanetan oinarritutako datu teorikoak lortu behar dira COMSOL multiphysics software bitartez. Horretarako, ondoko pauso hauek eman dira eremu elektriko ez-uniformea lortzeko (9.irudia).



9. Irudia: Eremu elektrikoa lortzeko fluxugrama.

Hasierako pausoa COMSOL multiphysics software bitartez geometria definitzea izango da. 25 cm-ko diametroan bi esfera sortu dira, haien artean 5 cm banatuta. Eremua kalkulatu ahal izateko, bi esferen artean zuzen bat sortu da eta sarea sortu ahal izateko, zuzena zilindro mehe batez inguratu da. Geometria guztia 1 m-ko esfera baten barruan sartuta dago, esfera honek ingurunea simulatzen baitu. Urrats honetan esfera-esfera geometria soilik kontsideratuko da. Beste geometriak ondoren aztertuko dira, hasierako baldintzak aldatzerakoan.

Materiala hautatzerakoan, bai inguruneko gasarena eta bai aztertu den geometriarena airea erabili da.

Behin geometria sortuta eta materiala definituta, baldintza elektrikoak jarri dira. Lehenengo esfera $V=136$ kV-eko tentsiora konektatu da eta bestea, aldiz, tentsio nulura. Ingurunea adierazten duen esfera lurrera konektatu da. Baldintza hauekin Jorgensen eta Pedersen sortu zuten geometria guztiz definituta egongo litzateke [9].

Eremua kalkulatzeko elementu finituen metodoa erabiliko denez, geometria saretzea ezinbesteko pausoa da. Horretarako, geometria dena sare normal batekin

saretu da, baina bi esferen artean eraikitako zilindroa, aldiz, sare oso fin batekin saretu da, zuzen horretan eremua kalkulatzeko zehaztasuna beharrezkoa baita.

COMSOL multiphysics softwarearekin bukatzeko, bi esferen arteko eremua kalkulatu da eta lortutako datuak Excel batera esportatu dira.

Excelan lortutako eremua eta eremu teorikoa konparatu dira, elementu finituen metodoa baliagarria den balioztatzeko.

Eremu elektriko uniformearen kalkulatzeko metodologia guztiz desberdina da. Hasieran haustura-tentsioa kalkulatu da Paschenek formulatutako ekuazioa erabiliz (13). Jorgensen eta Pedersenek ikerketa 1 bar-eko presioan egin zenez, Paschen ekuazioan baldintza berdina jarri da. Presioa 1 bar izanik eta d distantzia ezberdinetara haustura-tentsioak kalkulatu dira. Eremuaren kalkulurako, haustura-tentsio bakoitzak distantziagatik zatitu dira.

8.1.2. Ionizazio-koefizienteen kalkulua

Behin eremu elektriko ez-uniformea baliagarria dela egiaztatuta datu teorikoekin konparatuz, α ionizazio-koefizientea kalkulatu da. Ionizazio-koefizientea Jorgensen eta Pedersenek lortu zutenarekin aldaratu da. Horretarako, Ver Planckek formulatutako ekuazioa erabili da (1. Taula). Ekuazio hori tarteka definituta dago, 5. puntuan azaldu den moduan. Eremu elektriko uniformearen ionizazio-koefizientearen kalkuluetarako, prozedura berdina erabili da.

8.1.3. $g(x)$ kurben kalkulua

Azken pausoa koroa-efektua agertzekotan non agertuko den aztertzea izango da eta, berriz ere, datu teorikoekin bat datorren ikusiko da. Koroa-efektua eremu elektriko ez-uniformearen $g(x)$ kurba eta eremu elektriko uniformearen $g(x)$ kurba elkartzeko direnean emango da.

Eremu elektriko ez-uniformearen $g(x)$ funtzioa kalkulatzeko (7) ekuazioa erabili da. α -ren integrala kalkulatu ahal izateko, trapezioaren erregela erabili da, koefiziente honen formula ezezaguna delako. Eremu elektriko uniformearen $g(x)$ funtzioa kalkulatzeko, berriz, (8) ekuazioa erabili da.

8.1.4. Hasierako baldintzen aldaketa

Urrats honen helburua hasierako baldintzak ($p=1$ bar, $T=20$ °C, $d=5$ cm eta esfera-esfera geometria) aldatzea izango da.

Esferen arteko distantzia aldatzeko COMSOL multiphysics software erabili behar da, eta geometria eraikitzerakoan aldatu. Lortuko den aldaketa eremu elektrikoan emango da, eta datu hori izango da ondoren emaitzak aldatuko dituen. Esfera-esfera geometria aldatzerakoan prozedura berdina izango da.

Presio eta temperatura aldatzeko GrAL hau Paschen δ dentsitate-erlatiboan oinarritu da, eta ez Kontaroseko ekuazioan (14). Horretarako (15), (16), (17), (18) eta (19) ekuazioen prozeduran oinarritu da kalkulua.

Hasieran presioa konstante izanik temperaturak aldatu dira, $g(x)$ uniformea nola aldatzen den ikusteko. Ondoren pauso berdina egin da, temperatura konstante mantenduz eta presio ezberdinak ordezkatzuz. Efektua altitude ezberdinetan nola aldatzen den ikustea ezin daiteke zuzenean egin, presio eta temperatura zehatz batzuetan egin behar da (2. Taula). Temperatura eskualdearen eta urteko sasoiaren arabera aldatzen da, baina taulako datuak batezbesteko temperaturak islatzen ditu.

ALTUERA [m]	PRESIOA [atm]	TENPERATURA [°C]
0	1	15
1000	0,8855	8.5
2000	0,7846	2
3000	0,691	-4,5
4000	0,6081	-11
5000	0,5331	-17,5
10000	0,2606	-50
15000	0,1188	-56,5

2. Taula: Altuera-Presioa-Temperatura [18].

8.2. GANTT DIAGRAMA

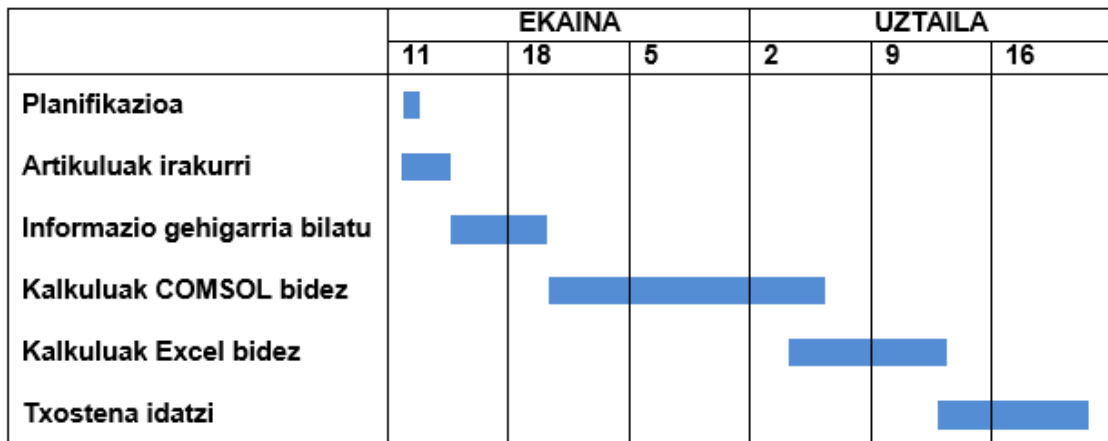
Atal honetan proiektua burutzeko jarraitu diren urratsak denborarekiko azalduko dira.

1. Planifikazioa: GrAL ekainaren 11an hasi zen planifikazioarekin ordu bateko iraupenarekin. Pauso honetan helburuak eta eginkizunak finkatu ziren.
2. Artikuluak irakurri: zuzendariak emandako hainbat artikulu irakurri ziren korroa-efektuari buruzko hainbat teoriari buruz, ikerketaren oinarriak aztertzeko. Atal honek ekainaren 11an hasi zen 14a arte, 10 orduko iraupenarekin.
3. Informazio gehigarria bilatu: artikuluak irakurri ondoren informazio gehigarria bilatu zen Interneten eta liburuetan, korroa-efektuaren inguruan ikasketa sakontzeko. Eginkizun hau ekainaren 14tik 19ra iraun zuen, 15 orduko lana izanik.
4. Kalkuluak COMSOL bidez: kalkuluak ekainaren 19an hasi ziren eta uztailaren 6a arte iraun zuten. Guztira 60 orduko lana izan da COMSOL software erabiliz. Atal honetan eremu elektrikoak kalkulatu ziren geometria ezberdinetan
5. Kalkuluak Excel bidez: COMSOL-eko datuak lortzen ziren bitartean, Excel-a prestatzen hasi zen, ondoren datu denak sartu ahal izateko eta kalkulu guztiak dokumentu batean gordeta izateko. Prozesu hau 59 ordu iraun zuen, uztailaren 3tik uztailaren 11 arte. α eta $g(x)$ funtzioen kalkulua egin zen aurretik lortutako eremu elektrikoa erabiliz. Emaitza guztiak taularatu eta grafikatu ziren, eranskinak atalean ikusten den moduan.
6. Txostena idatzi: azkeneko pausoa txostena idaztea izan da 25 orduko iraupenarekin. GrAL burutzeko azken pauso hau uztailaren 11an hasi zen eta 20an amaitu zen.

Azalduko pauso guztiak 3. Taulan eta Gantt diagraman aurkezten dira pauso bakoitzaren hasiera, amaiera eta iraupena zehaztuz. Diagrama asteka bananduta dago, lehenengo astea ekainaren 11an hasten delarik.

Eginkizuna	Hasiera data	Bukaera data	Iraupena
Planifikazioa	11/06/2018	12/06/2018	1 h
Artikuluak irakurri	11/06/2018	14/06/2018	10 h
Informazio gehigarria bilatu	14/06/2018	19/06/2018	15 h
Kalkuluak COMSOL bidez	19/06/2018	06/07/2018	60 h
Kalkuluak Excel bidez	03/07/2018	11/07/2018	59 h
Txostena idatzi	11/07/2018	20/07/2018	25 h

3. Taula: GrAL planifikazioa

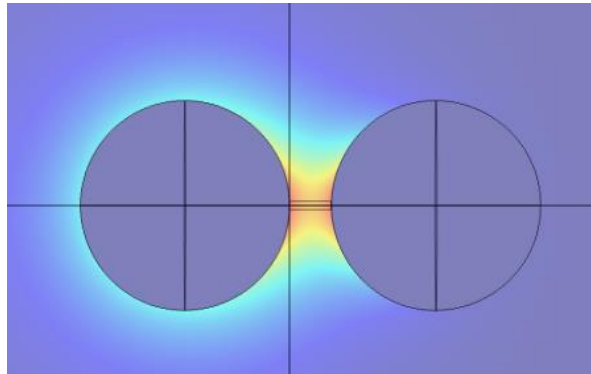


10. Irudia: Gantt diagrama.

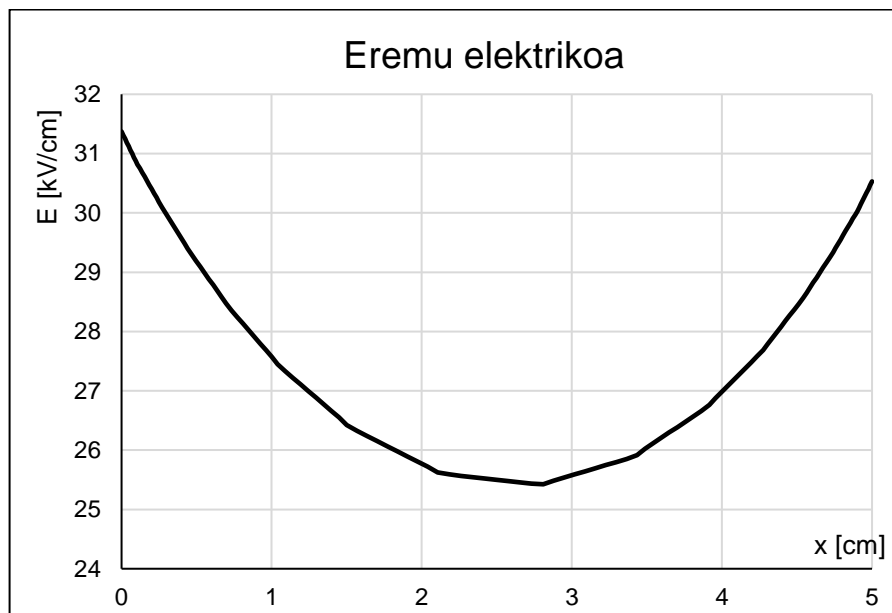
8.3. KALKULUAK

8.3.1. Eremu elektrikoaren kalkulua

GraL honetan lortu diren 11 eta 12. Irudietan EFM bidez lortutako eremu elektrikoa agertzen da. Eremu-elektrikoaren kalkuluan presioa eta tenperatura ez daukate eraginik, beraz, ez dira finkatu.



11. Irudia: Bi esferen arteko eremu elektrikoa EFM bidez lortuta.



12. Irudia: Eremu elektrikoa $V=136$ kV eta $d=5$ cm denean.

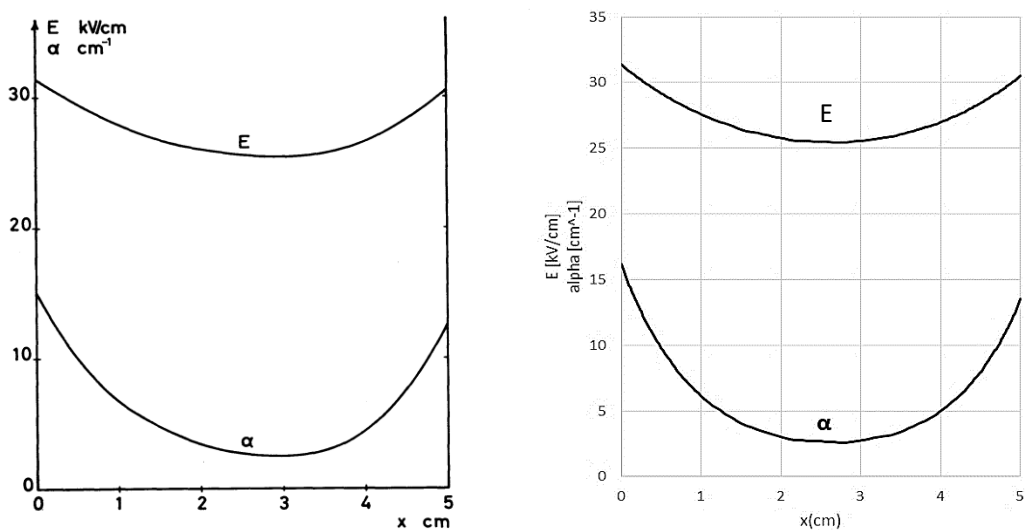
4. Taulan ikusten denez, EFM-ren bidez lortutako emaitzak baliagarriak izango dira, egiten den errorea oso txikia baita.

x [cm]	E [kV/cm] teorikoa	COMSOL-ekin lortutako E [kV/cm]	Errorea (%)
0	31,27	31,37	0,310%
0,5	29,11	29,20	0,307%
1	27,53	27,57	0,172%
1,5	26,43	26,42	0,013%
2	25,75	25,77	0,059%
2,5	25,47	25,50	0,122%
3	25,58	25,58	0,011%
3,5	26,08	26,04	0,160%
4	27,04	26,99	0,188%
4,5	28,49	28,43	0,241%
5	30,58	30,53	0,179%

4. Taula: Eremu teorikoaren eta EFM bidez lortutako eremuaren arteko konparaketa.

8.3.2. Ionizazio-koefizienteen kalkulua

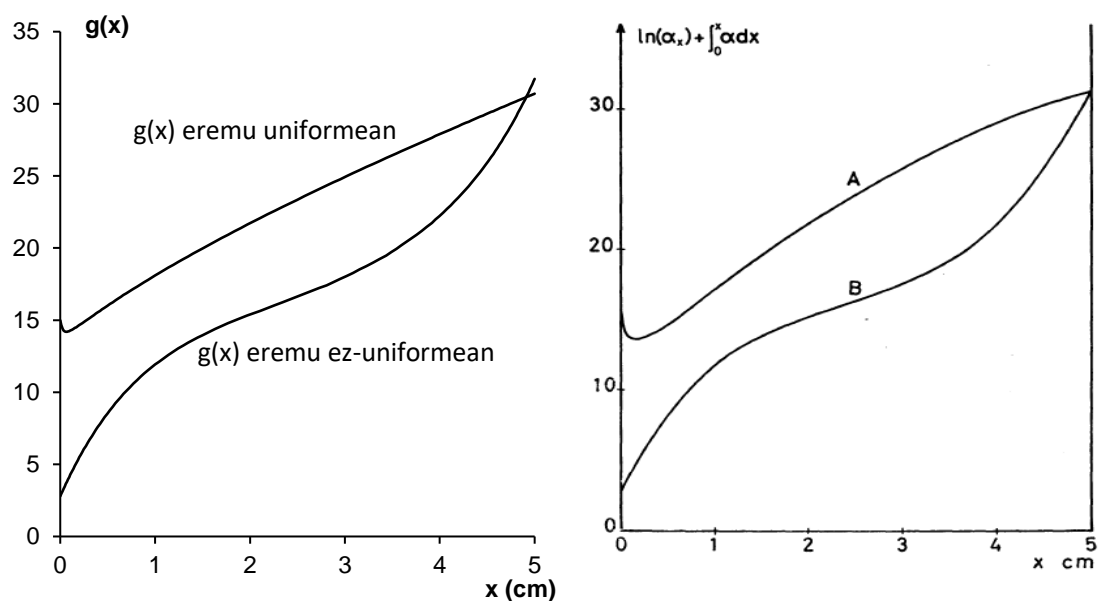
Ondorengo grafikoan ionizazio-koefizientearen konparaketa esleitzen da. Pauso hau beharrezkoa da α -ren kalkulua ondo egin direla egiaztatzeko. α kalkulatzeko erabili den metodologia Ver Plancken proposamena izan da, 8.1.2 atalean azaldu den bezala. 13. Irudiaren ezkerrean eremu-elektrikoaren eta α -ren datu teorikoak ikus daitezke, esfera-esfera geometrian aplikatuta. Eskuinean, aldiz, COMSOL multiphysics eta Ver Plancken formulen bidez lortutakoak esleitzen dira. Beraz, GrAL honetan lortu diren emaitzak eta Jorgensen eta Pedersenek lortu zituzten emaitzak oso antzekoak dira. Hortaz, α kalkulatzeko Ver Plancken formulak (1. Taula) erabil daitezke.



13. Irudia: E eta α teoriko eta lortutakoaren arteko konparaketa.

8.3.3. $g(x)$ kurben kalkulua

Helburua koroa-efektua agertzekotan non agertuko den aztertzea da eta, berriz ere, datu teorikoekin bat datorren ikusiko da. α -ren integrala kalkulatu ahal izateko, trapezioaren erregela erabili da, koefiziente honen formula ezezaguna baita.



14. Irudia: Ezkerrean lortutako $g(x)$ funtzioak, eskuinean $g(x)$ funtzio teorikoak.

Emitza guztiak konparatuz eta errorea oso txikia dela ikusita, erabilitako metodologia baliagarria dela egiaztatuta gelditzen da. Hau da, eremua kalkulatzeko EFM baliagarria dela eta α kalkulatzeko Ver Plancken formula ere baliagarria dela egiaztatzen da. Hortaz, ondoren egingo diren aldaketetan eremua eta α -ren kalkulua baliagarriak izango dira.

8.3.4. Hasierako baldintzen aldaketa

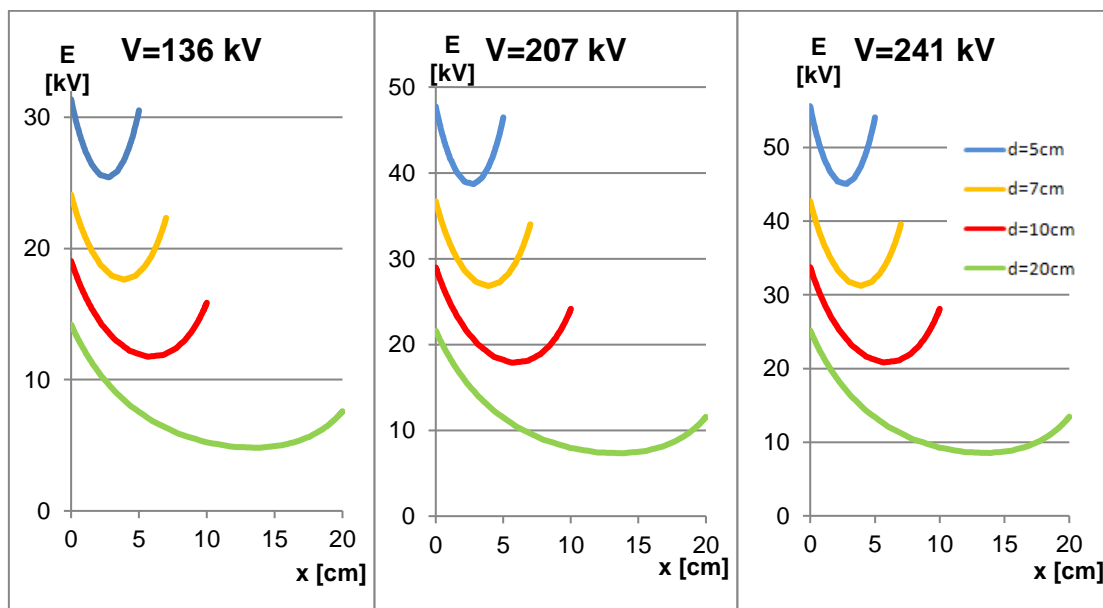
Emitza guztiak konparatuz eta errorea oso txikia dela ikusita, erabilitako metodologia baliagarria dela egiaztatuta gelditzen da. Hau da, eremua kalkulatzeko EFM baliagarria dela eta α kalkulatzeko Ver Plancken formula ere baliagarria dela egiaztatzen da. Hortaz, ondoren egin diren aldaketetan eremua eta α -ren kalkulua baliagarriak dira. Presioa, tenperatura eta geometriak aldatu dira parametro hauen eragina aztertzeko.

8.4. EMAITZEN DESKRIBAPENA

8.4.1. Eremu elektrikoaren kalkulua

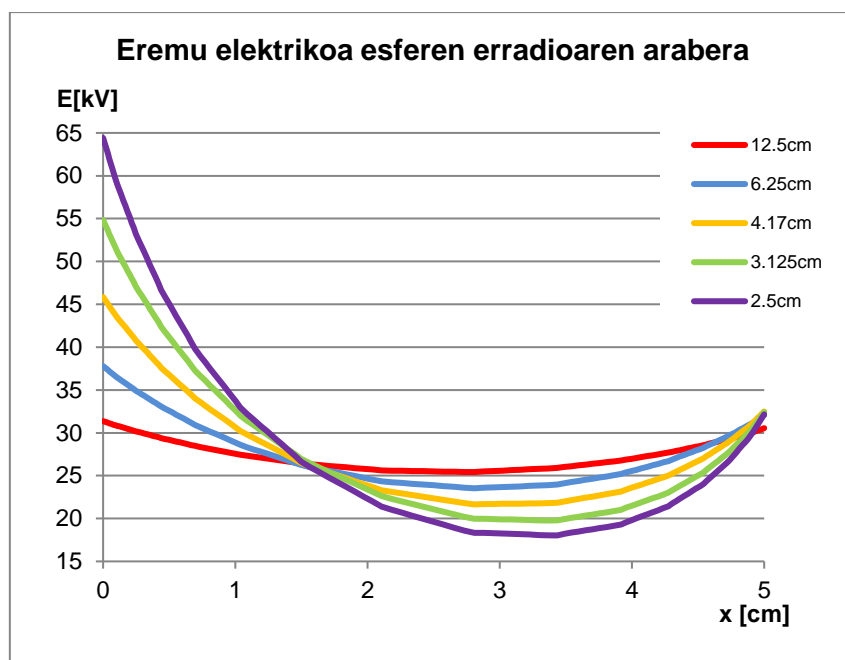
COMSOL multiphysics software bidez bi esferen arteko eremua kalkulatu da, lehenengo esferaren potentzial ezberdinetan eta esferen arteko distantzia ezberdinetan. Hurrengo grafikoetan ikustenenez, potentziala zenbat eta altuagoa izan, $x=0$ puntuko eremua gero eta handiagoa izango da. Aldiz, esferak zenbat eta banatuagoak egon, eremu elektrikoa gutxituko da. Adibidez, esferen arteko distantzia 5 cm denean, eremu maximoa $x=0$ puntuan egonik, 32 kV/cm ingurukoa izango da potentziala 136 kV-ekoa denean eta 55 kV/cm ingurukoa potentziala 241 kV denean.

Aldiz, 136 kV-eko potentzial berdinerako, esferen arteko distantzia 20 cm denean eremu maximoa 13 kV/cm-koa izango da. Dena den, antzeman daiteke nola nahiz eta potentziala aldatu, eremuaren forma ez dela aldatzen. Forma ez aldatzea logikoa da, geometriak ez direlako aldatu, soilik esferen arteko banaketa tartea eta lehenengo esferaren potentziala.



15. Irudia: Eremu elektrikoaren arteko konparaketa.

Aldatzen den aldagai bakarra esferen erradioa baldin bada, ikus daiteke nola erradioa zenbat eta txikiago izan, eremu maximoa gero eta handiagoa izango dela, baina eremu minimoa, aldiz, gero eta txikiagoa (16. Irudia). Nabarmentzekoa da amaierako puntuan eremu guztiak berdinak direla, hau da, lurrera konektatuta dagoen esferaren erpinean eremuak berdina direla esferen edozein erradio balioentzat.

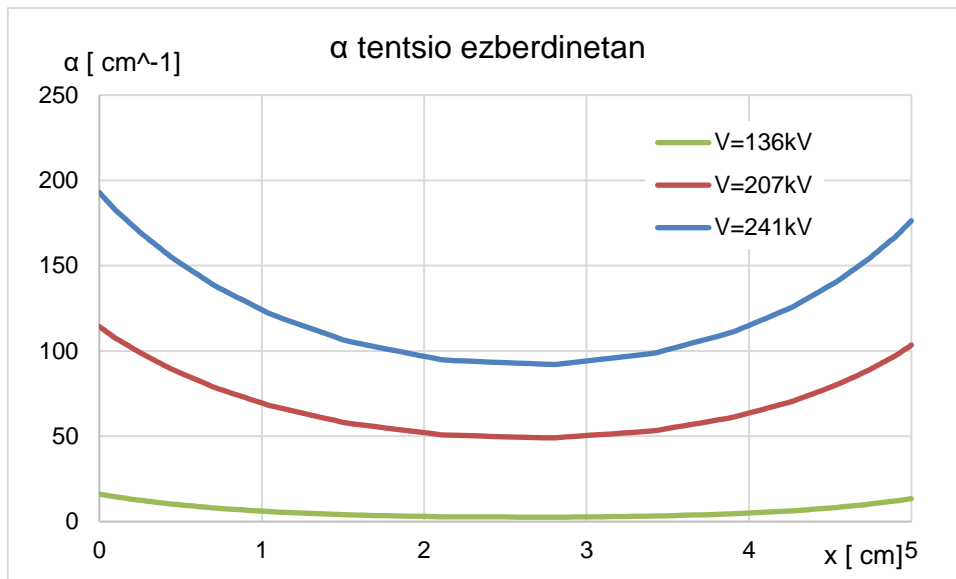


16. Irudia: Eremu elektrikoa esferen erradioaren arabera.

Laburbilduz, esferen arteko distantzia eta erradioa gero eta handiago izan, eremua eremu elektrikoa murrizten da. Horregatik goi tentsioko aireko lineetan eroaleak distantzia zehatz batera kokatu behar dira, eremua oso handia bada koroa-efektua ager daitekeelako.

8.4.2. Ionizazio-koefizienteen kalkulua

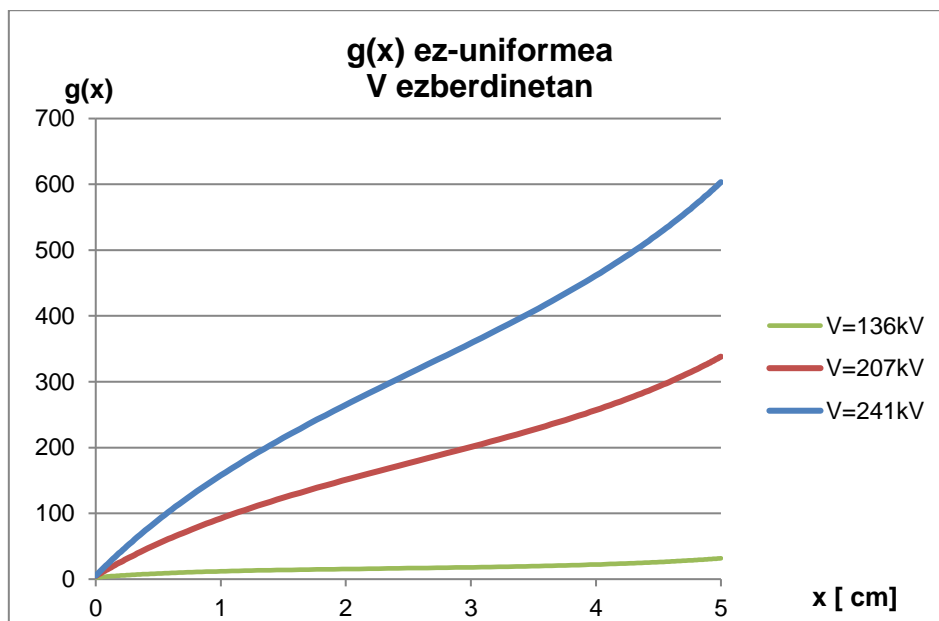
Ionizazio-koefizientea eremu-elektikoaren arabera aldatzen da. Eremu-elektikoa zenbat eta handiago izan, α handiagoa izango da. 17. Irudiko emaitzak logikoak dira. Izan ere, 15. Irudia begiratu, α eremu-elektikoaren forma antzekoa mantentzen du.



17. Irudia: Ionizazio-koefizientea tentsio ezberdinetan

8.4.3. $g(x)$ kurben kalkulua

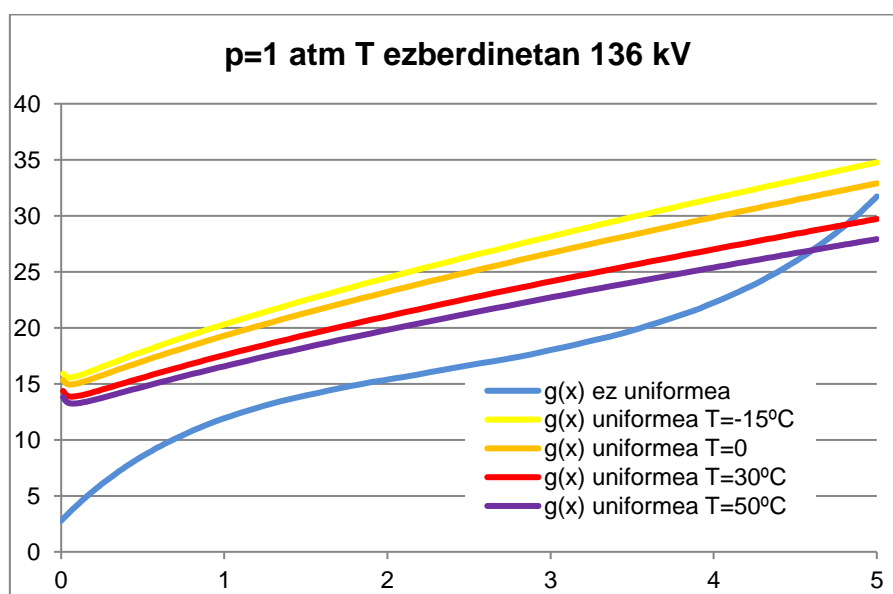
$g(x)$ funtzioa α -ren arabera aldatzen da. α eremu elektrikoarekin erlazionatuta dagoenez, $g(x)$ eta eta eremu elektrikoa zuzenki erlazionatuta daude. Eremu elektriko ez-uniformean frogatuz, 18. Irudian oinarritu daiteke aldaketa ikusteko. Tentsioa zenbat eta handiago izan, eremu elektrikoa handiagoa izango da beste baldintzak konstante mantenduz. Beraz, $g(x)$ ez-uniformearen kurba gorantz desplazatuko da bere balioak handituz.



18. Irudia: $g(x)$ ez-uniformea tentsio ezberdinetan.

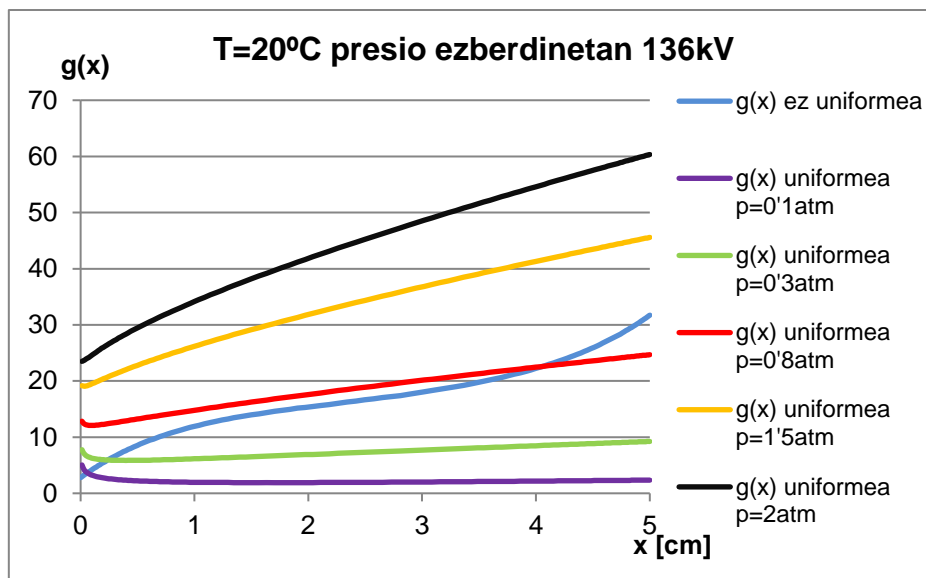
8.4.2. Hasierako baldintzen aldaketa.

Baldintza estandarrak ez diren beste baldintzetan α ionizazio-koefizientea kalkulatzeko, δ dentsitate erlatiboagatik biderkatu behar da (19) ekuazioaren arabera. 19. Irudian $g(x)$ -ren aldaketa ikusten da presioa konstantea izanik temperatura ezberdinetan. Ikus daitekeen moduan, temperatura zenbat eta handiagoa izan, koroa-efektua lehenago agertuko litzateke. Adibidez, temperatura 30 °C edo 50 °C denean koroa-efektua ia ia bigarren esferaren erpinean agertuko da, baina temperatura murrizten doan heinean koroa-efektua desagertzen da



19. Irudia: $g(x)$ temperatura ezberdinetan $V=136$ kV denean.

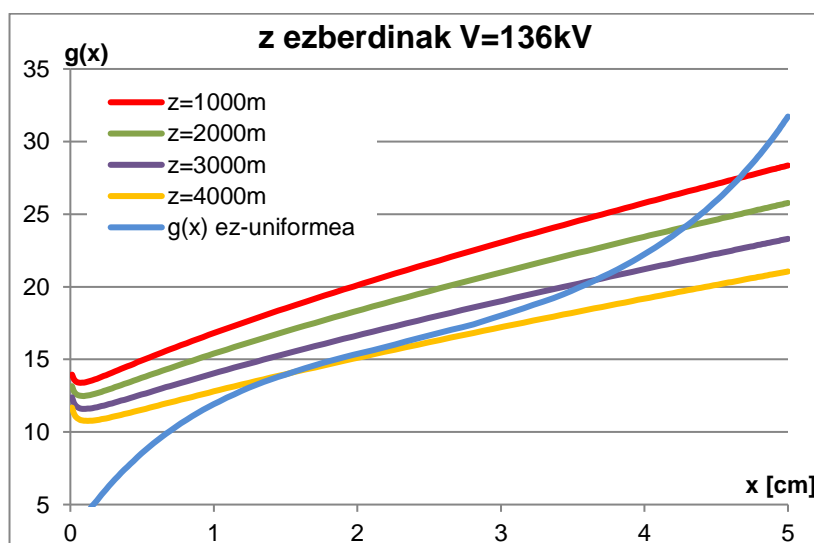
20. Irudiko kasua berdina izango da, baina oraingoan konstantea temperatura izango da eta aldatuko den parametroa, aldiz, presioa. Temperaturarekin gertatzen denaren kontrari, presioa zenbat eta handiagoa izan, koroa-efektua agertzeko probabilitate gutxiago egongo da. Gainera, presio oso txikiekin koroa-efektua hasieran emango da. Presioa 0'1 atm-koa denean $g(x)$ uniforme eta $g(x)$ ez-uniforme elkartzan diren puntua ia ia $x=0$ puntua izango denez, lehenengo esferaren haustura gertatuko litzateke.



20. Irudia: $g(x)$ presioaren arabera $V=136$ kV denean.

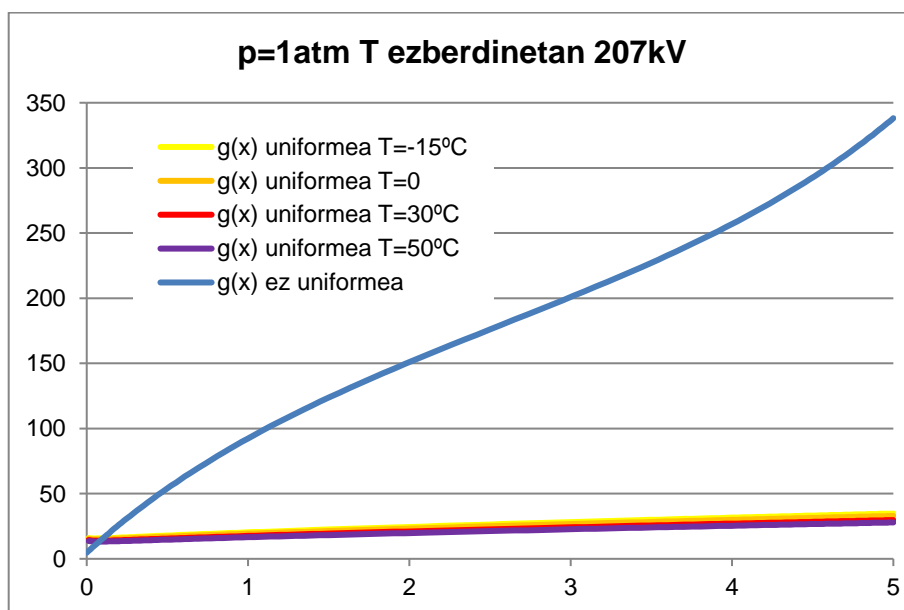
Ionizazio-koefizientea dentsitate erlatiboagatik biderkatzen denez, emaitzak δ -ren arabera aldatuko dira. Temperatura δ -rekiko alderantziz proportzionala denez eta presioa, aldiz, proportzionala, aurretik lortutako ondorioak zentzuzkoak dira. Eranskinetan temperatura eta presioak daukaten eragina beste potentzial eta distantzia ezberdinetan ikus daiteke, azaldutako emaitzak azpimarratuz.

Altitudeari erreparatuz, 2. Taula erabili daiteke. Altitudea zenbat eta handiagoa izan, presioa eta temperatura murrizten dira, baina presioaren eragina temperaturarena baino nabarmenagoa da. Lehen azaldu den bezala, presioa zenbat eta txikiago izan probabilitate gehiago egongo da koroa-efektua agertzeko. Beraz, altitudea zenbat eta handiagoa izan, koroa-efektua lehenago agertuko da (21.irudia).



21. Irudia: $g(x)$ altitudearen arabera $V=136$ kV denean.

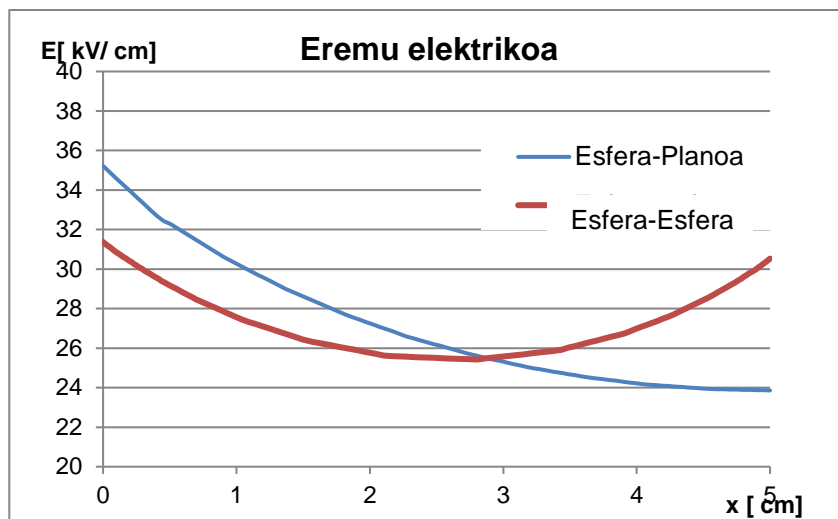
Lehenengo esferaren potentzial desberdinak konparatuz, ikus daiteke nola potentziala zenbat eta handiagoa izan, koroa-efektua lehenago agertuko dela. $V=207$ kV kasurako, koroa-efektua $x=0$ puntutik oso hurbil agertuko da, haustura eraginez (22.irudia). Horren azalpena eremu elektrikoan oinarritzen da. Izan ere, esferen arteko distantzia berdinerako potentziala zenbat eta handiagoa izan, eremua handitzen doa eta eremuarekin batera, α . Koroa-efektua $g(x)$ uniforme eta $g(x)$ ez-uniformea elkartzen diren puntuan ematen da, eta nola $g(x)$ ez-uniformea eremuaren araberakoa denez, bistakoa da lortutako emaitza.



22. Irudia: $g(x)$ temperatura ezberdinetan $V=207$ kV denean.

Beraz, potentzial berdinerako, esferen arteko distantzia zenbat eta handiagoa izan, koroa-efektua eta haustura agertzeko probabilitatea murriztuko da eremua txikitzen delako.

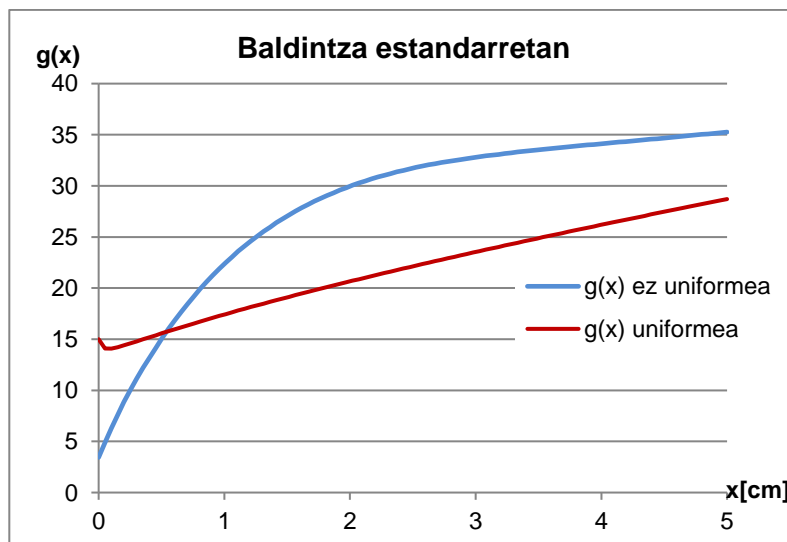
Geometriari dagokionez, 23. Irudian erakusten da eremu elektrikoaren aldaketa distantziarekiko nolakoa den, lurrera konektatuta dagoen geometria esfera eta plano izanik.



23. Irudia: Eremu elektrikoa esfera-esfera eta esfera-plano geometrietan.

Nabarmena da eremu elektrikoa bi geometrietan guztiz desberdina dela, ez du bat egiten ezta balioetan ezta forman ere. Esfera-esfera geometrian eremu elektrikoaren kurba hasieran beherakorra da eta, ondoren, gorakorra. Esfera-planoan, aldiz, eremu elektrikoa distantzia osoan beherakorra da. Ikus daiteke nola esfera-planoan iturritik lurrera konektatuta dagoen geometriara arte eremu elektrikoaren balioak asko aldatzen direla. Beraz, geometria kontuan hartu behar den ezinbesteko parametroa dela ondorioztatuta gelditzen da. Jarraian, esfera-planoa kasua aztertuko da.

Baldintza estandarretan ($p=1$ atm eta $T=20$ °C) eta esfera eta planoaren distantzia 5 cm-koa izanik, koroa-efektua 136 kV-era konektatutako esferatik hurbil agertuko da (24.irudia). Esfera-esfera geometriarekin konparatuz, guztiz kontrakoa gertatuko da.



24. Irudia: $g(x)$ ez-uniformea eta uniforme esfera-plano geometrian $V=136$ kV izanik.

Tenperatura eta presioaren aldaketekin esfera-esfera geometrian gertatu denaren berdina gertatuko da, $g(x)$ uniformeak $\delta=f(T,1/\rho)$ -arekiko proportzionala delako. Hau da, tenperatura igotzean edo presioa txikitzean $g(x)$ uniformeak kurba jaitziko da forma mantenduz eta, hortaz, koroa-efektua gertatuko den puntua mugituz. Eranskinetan teoria hori frogatzen duten irudiak ikus daitezke.

9. AURREKONTUA

Atal honetan burutu den ikerketaren aurrekontua kalkulatu da, alde batetik barne-orduak kalkulatu eta, bestetik, inbertsioa.

9.1. BARNE-ORDUAK

Langilea	Kopurua	Orduko kostua	Orduak	Kostua
Ingeniaria	1	20,00 €/h	160 h	3200,0 €
Ingeniaria	1	20,00 €/h	50 h	1000,0 €
Goi-mailako ingeniaria	1	60,00 €/h	10 h	600,0 €
GUZTIRA				4800,0 €

5. Taula: Barne-orduak.

9.2. INBERTSIOAK

Inbertsioen atal honetan erabilitako softwareak eta ordenagailuak kontuan hartuko dira. Tresna hauek ez dira zehazki proiektu honetarako erosi, aurretik erabili izan diren eta ondoren erabiliko diren aktiboak dira.

Produktua	Hasierako kostua	Bizitza erabilgarria	Proiektuko erabiltze-aldia	Amortizazioa
Asus K550 serie ordenagailua	600,0 €	43800 h	35 h	0,48 €
Dell Precision Tower 5810 ordenagailua	1167,0 €	52560 h	135h	3,0 €
COMSOL multiphysics lizentzia	1795,0 €	8760 h	60 h	19,14 €
Microsoft Office Lizentzia	295,0 €	6000 h	59 h	2,90 €
GUZTIRA				25,52 €

6. Taula: Inbertsioak.

Amortizazioaren kalkulurako, hurrengo formula erabili da:

$$\text{Amortizazioa} = \text{Hasierako kostua} \cdot \frac{\text{Proiektuko erabiltze-aldia}}{\text{Bizitza erabilgarria}} \quad (24)$$

9.3. AURREKONTU OSOA

Barne orduak	4800 €
Inbertsioa	25,52 €
Azpitotala	4825,52 €
Kostu ez-zuzenak (%5)	241,28 €
Azpitotala	5066,8 €
Ezusteak(%10)	506,68 €
GUZTIRA	5573,48 €

7. Taula: Aurrekontua.

10. ONDORIOAK

Korua-efektua tentsio altuko lineen eroale eta elementuen inguruan sortzen da airearen ionizazioaren ondorioz, elektrizitate-galerak eta lineetan kalteak eraginez. Zaratatsua eta urdin kolorekoa izateagatik, fenomeno hau ikustea erraza da. Ikerketa hau Jorgensen eta Pedersen-ek lortutako datu esperimentaletan oinarritzen da, haien kalkuluak Townsenden teorian oinarrituta egonik. Townsenden teoria α ionizazio-koefizientearen oinarritzen da, α eremu elektrikoaren arabera izanik. Eremu elektrikoak kalkulatzeko, COMSOL multiphysics elementu finituen softwarea erabili da eta lortutako emaitzak Excel bidez aztertu dira. Behin datu teorikoak lortuta, presio, temperatura, altitudea eta geometria parametroak aldatu dira korua-efektua baldintza ez-estandarrean aztertzeko ($p=1$ bar, $T=20$ °C, esfera-esfera geometria $d=5$ cm aldenduta).

Atal honetan lana burutzeagatik atera diren ondorioak eztabaidatuko dira.

Eremu elektrikoak EFM bidez kalkulatzeko irtenbide ona da, izan ere, sortzen den errorea ia nulua da. Beraz, COMSOL multiphysics bidez kalkulaturako eremu elektrikoak eta teorikoak berdinak direla esan daiteke.

Eremu elektrikoak ez dago materialaren menpe, baizik eta tentsioa eta geometriaren menpe. Tentsioa eta geometria berdina mantenduz eta geometriaren arteko distantzia soilik aldatuz, eremuaren forma konstante mantenduko da. Hau da, distantzia handitzean eremuaren kurba beherantz desplazatuko da, 10. irudian ikusten den moduan. Geometria eta distantziak mantenduz, tentsioa aldatzerakoan eremu elektrikoaren forma berriz ere ez da aldatzen, soilik gorantz desplazatzen da tentsioa handitzean. Aldiz, parametro guztiak mantenduz geometria izan ezik, ikus daiteke nola eremuaren kurba guztiz aldatzen dela. Laburbilduz, eremu elektrikoaren kurbaren forma geometriaren arabera da soilik, eta bere maximoak eta minimoak tentsioaren eta zuzenaren distantziaren menpekoak.

Gasaren (airea kasu honetan) temperatura eta presioa kontuan izan behar diren bi faktore dira, korua-efektuaren agerpenean garrantzi handia baitute. Aldagai hauek kontuan izateko ezinbestekoa izango da dentsitate erlatiboaren erabilera, ionizazio-koefizientearekin proportzionalki erlazionatuta baitaude. Beraz, temperatura zenbat eta handiago izan, eremu uniformearen $g(x)$ funtzioa gero eta beherago egongo da, eremu ez-uniformearen $g(x)$ funtzioarekin elkartzeko probabilitate gehiago izanez. Presioarekin kontrako gertatzen da, korua-efektua agertzeko probabilitatea handitzen da presioa txikitzean.

Laburbilduz, energia elektrikoa garraiatzeko lineetan agertzen den koroa kantitatea linearen tentsioa, eroaleen diametroa, eroaleen arteko distantzia, eroaleen altuera itsasoaren mailarekiko, ingurumen baldintzen eta abarren menpe dagoela frogatuta dagoenez, koroa-efektua murriztu daiteke linearen diseinuarekin jolastuz.

11. BIBLIOGRAFIA

- [1] “Campo eléctrico - Wikipedia, la enciclopedia libre.” [Online]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Campo_el%C3%A9ctrico.
- [2] “Campo eléctrico uniforme » Blog de Física,” Blog de Física, 22-Nov-2015. [Online]. Available: <https://www.blogdefisica.com/campo-electrico-uniforme.html>.
- [3] “Tensión de ruptura,” Wikipedia, la enciclopedia libre. 06-Apr-2017.
- [4] “Proyecto Definitivo Efecto Corona,” *Scribd*. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/doc/66219948/Proyecto-Definitivo-Efecto-Corona>.
- [5] “Efecto corona,” *Wikipedia, la enciclopedia libre*. 10-May-2018.
- [6] “¿Qué es el efecto corona? – Transmisión Eléctrica.” [Online]. Available: <https://transmisionelectrica.wordpress.com/2014/09/28/que-es-el-efecto-corona/>.
- [7] L. M. Checa, *Lineas de transporte de energia*. Marcombo, 1988.
- [8] B. Ronquillo, J. Lilibeth, J. Layana Chancay, V. Loayza, and M. Fernanda, “Pérdidas por efecto corona en la línea de transmisión de 500 kV quito-Guayaquil,” Oct. 2011
- [9] A. Pedersen, “Calculation of Spark Breakdown or Corona Starting Voltages in Nonuniform Fields.,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-86, no. 2, pp. 200–206, Feb. 1967.
- [10] J. Hernandez-Guiteras, J. r Riba, and P. Casals-Torrens, “Determination of the corona inception voltage in an extra high voltage substation connector,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20, no. 1, pp. 82–88, Feb. 2013.
- [11] “Influence of air pressure and humidity on positive direct current corona discharge performances of the conductor in a corona cage - Hu - 2014 - International Transactions on Electrical Energy Systems - Wiley Online Library.” [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/etep.1732>
- [12] P. B. Sankar, “Measurement of air breakdown voltage and electric field using standad sphere gap method,” *MTech*, 2011.
- [13] C. Ungureanu and L. M. Nemțoi, “Peak Voltage Measurements Using Standard Sphere Gap Method,” *Advances in Electrical Engineering*, 2014. [Online]. Available: <https://www.hindawi.com/journals/aee/2014/980913/>.
- [14] “Uncertainties in the Application of atmospheric and Altitude Corrections as Recommended in Iec Standards | Metre | Insulator (Electricity),” *Scribd*. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/document/55865933/Uncertainties-in->

the-Application-of- atmospheric-and-Altitude-Corrections-as-Recommended-in-
lec-Standards.

- [15] A. N. Kontaratos and S. T. Demetriades, "Electrical Breakdown of Gases at Elevated Temperatures," *Phys. Rev.*, vol. 137, no. 6A, pp. A1685–A1686, Mar. 1965.
- [16] D. W. V. Planck, "Calculation of Initial Breakdown Voltages in Air," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 60, no. 3, pp. 99–104, Mar. 1941.
- [17] Arrieta, M. A. (2003). *Energía eléctrica para la transmisión de potencia*. Euskal Herriko Unibertsitatea.
- [18] Gomez Navazo, M.C. 2. Gaia: Kutsadura atmosferikoa. Bilbo: Bilboko Ingeniaritza Eskola (UPV/EHU Euskal Herriko Unibertsitatea)
- [19] S. Pérez, L. Enrique, H. Choquehuanca, and D. Armando, "Análisis del fenómeno efecto corona en la cadena de aisladores de la línea de transmisión L-1001 Machupicchu - Cachimayo," *Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco*, 2015.
- [20] A. N. Kontaratos, "On the functional dependence of Townsend's first ionization coefficient," *Appl. Sci. Res.*, vol. 12, no. 1, pp. 27–32, Jan. 1965.
- [21] E. Kuffel, J. Kuffel and W.S. Zaengl, "High Voltage Engineering Fundamentals" 2000.
- [22] P. Haefliger and C. M. Franck, "Detailed precision and accuracy analysis of swarm parameters from a pulsed Townsend experiment", *Review of Scientific Instruments* 89 023114
- [23] "Efecto corona en líneas de transmisión y transformadores," *Voltimum España*, 04-May-2017. [Online]. Available: <https://www.voltimum.es/articulos-tecnicos/efecto-corona-lineas>.
- [24] "Categoría:Software de elementos finitos," *Wikipedia, la enciclopedia libre*. 04-Nov-2013.
- [25] J. Hernandez-Guiteras, J. r Riba, and P. Casals-Torrens, "Determination of the corona inception voltage in an extra high voltage substation connector," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20, no. 1, pp. 82–88, Feb. 2013.
- [26] "Campo eléctrico inducido por un cable grueso." [Online]. Available: http://laplace.us.es/wiki/index.php/Campo_el%C3%A9ctrico_inducido_por_un_cable_grueso.

[27] "Modeling Simulation and Testing Research on Corona Discharge of Dampers for AC Transmission Line - IEEE Conference Publication." [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7576030/>.

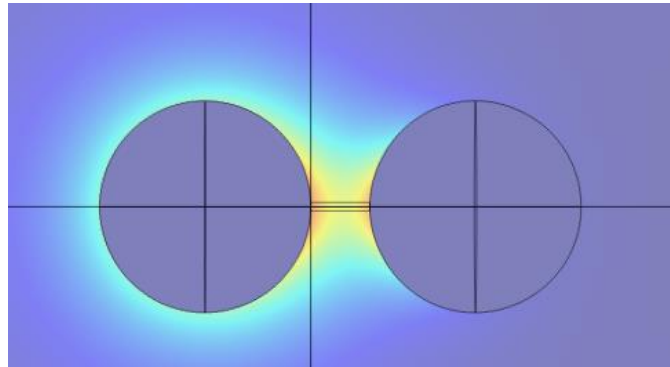
12. ERANSKINA

GrAL honetan egin diren kalkulu guztiak hurrengo grafikoetan esleitzen dira. Atal hau aurretik azaldutako emaitzen deskribapenak hobeto ulertzeko baliagarria da.

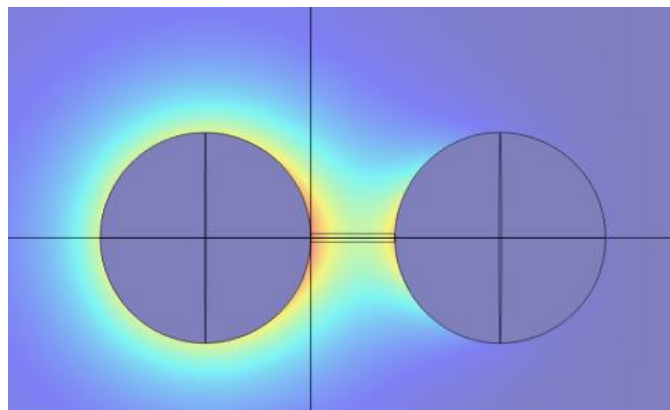
12.1 ESFERA-ESFERA IRUDIAK

12.1.1 Eremu elektrikoa

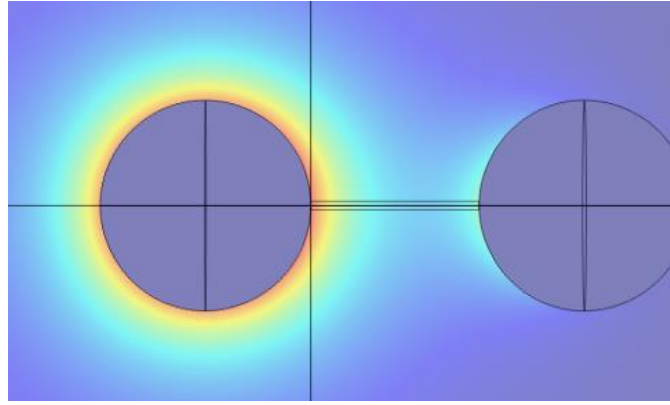
COMSOL multiphysics bidez lortu diren eremu elektrikoaren simulazioen irudiak ikus daitezke esfera-esfera geometrian.



1. E Irudia: Eremu elektrikoa $V=136$ kV eta $d=7$ cm denean.

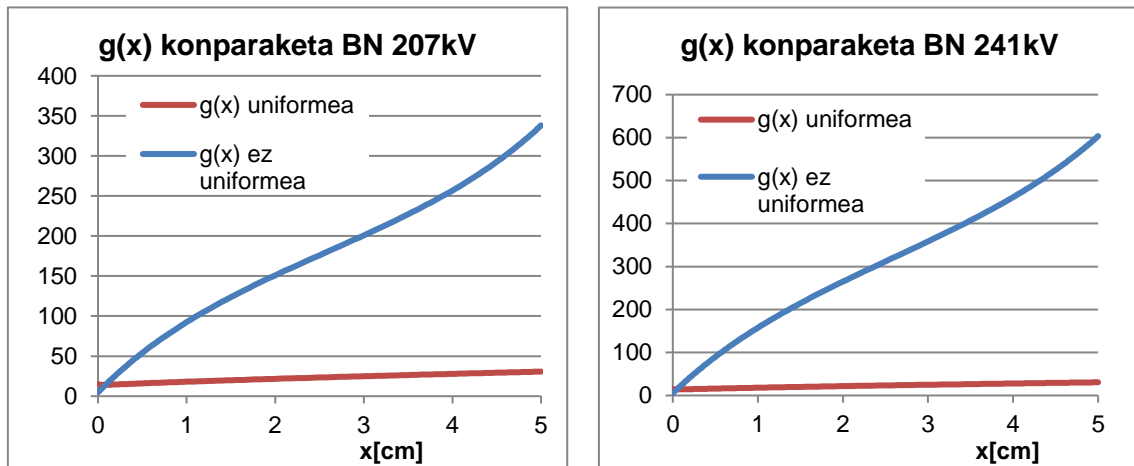


2. E Irudia: Eremu elektrikoa $V=136$ kV eta $d=10$ cm denean.

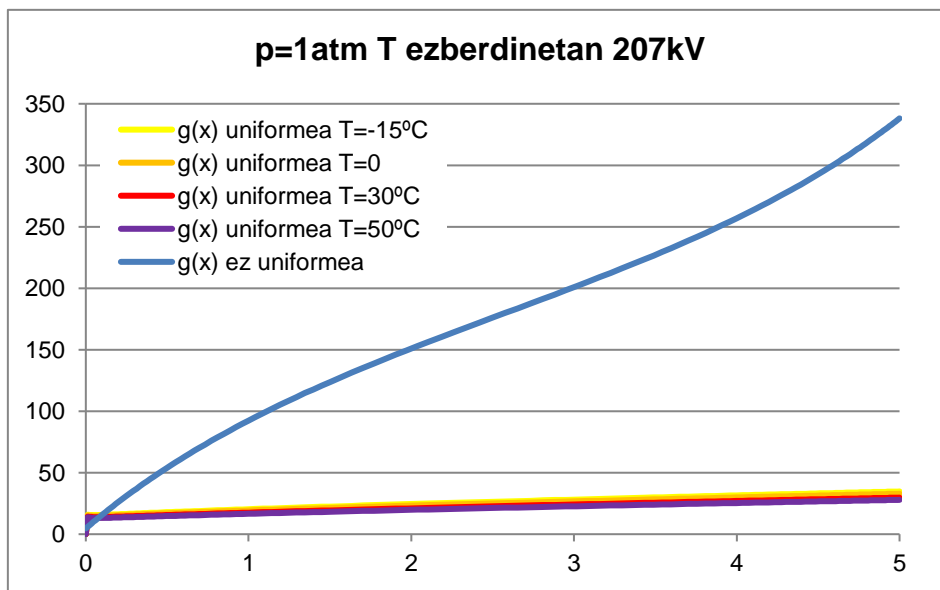


3. E Irudia: Eremu elektrikoa $V=136$ kV eta $d=20$ cm denean.

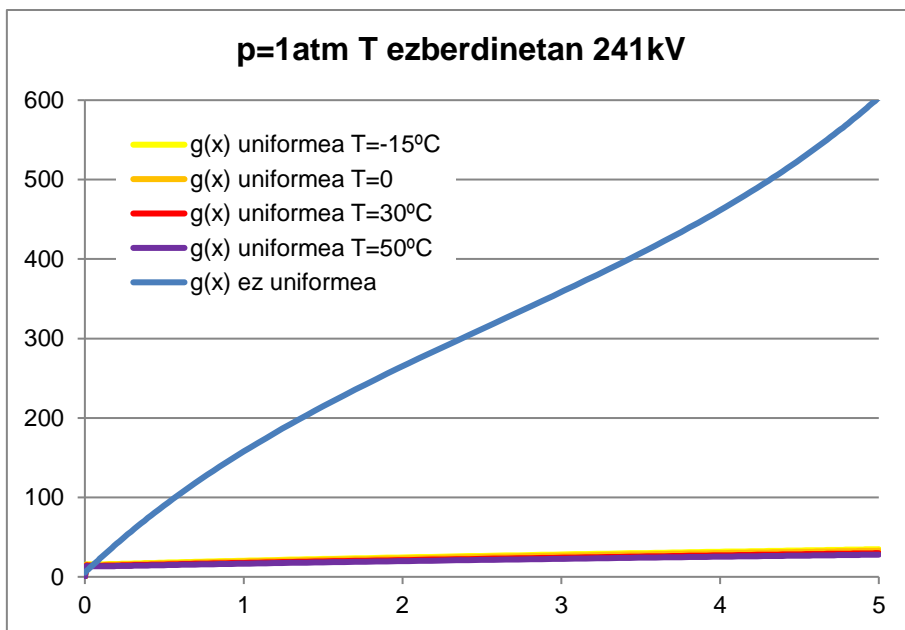
12.1.2 Presioa, temperatura eta altuera ezberdinen $g(x)$ $d=5$ cm izanik



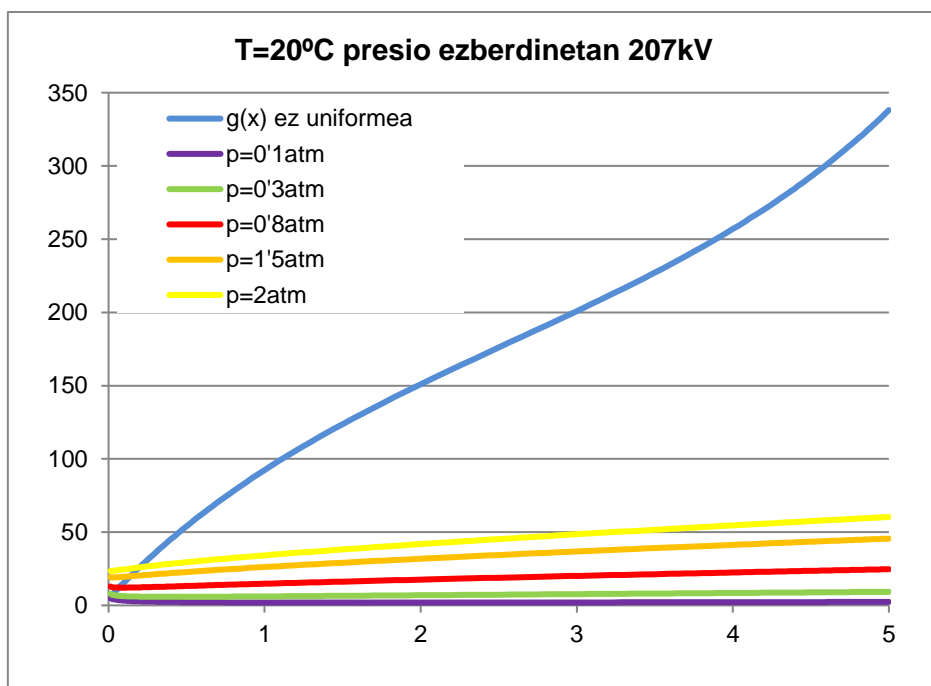
4. E Irudia: $g(x)$ funtzioak $d=5$ cm, $V=207$ kV eta 241 kV denean.



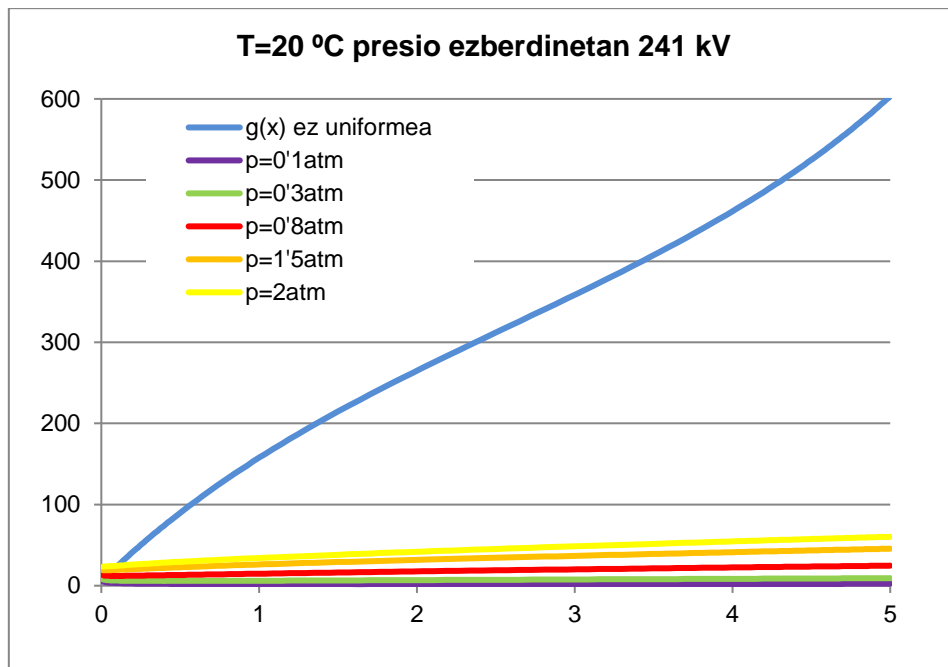
5. E Irudia: $g(x)$ Temperatura ezberdinetan $d=5$ cm eta $V=207$ kV denean.



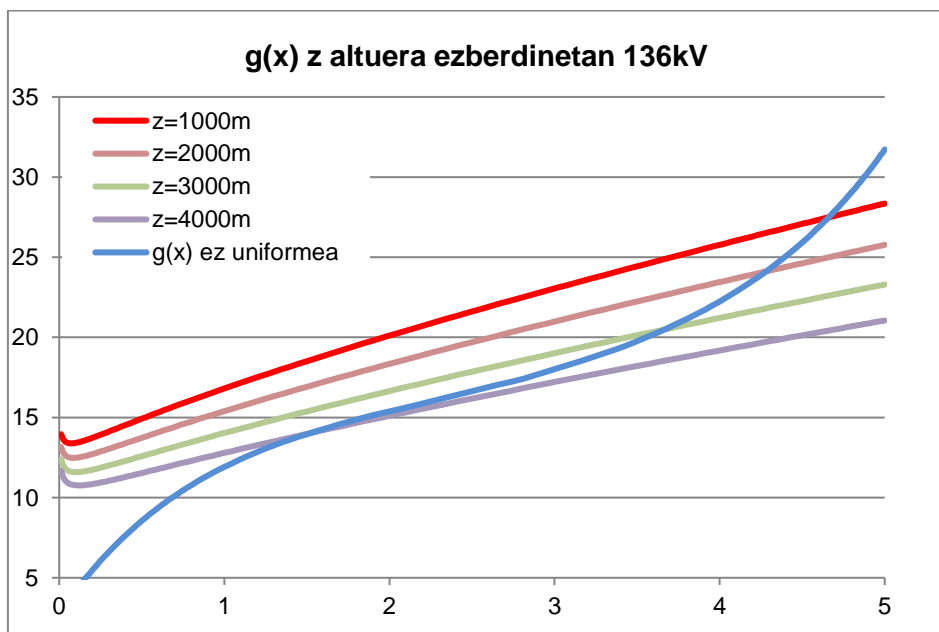
6. E Irudia: $g(x)$ Temperatura ezberdinetan $d=5$ cm eta 241 kV denean.



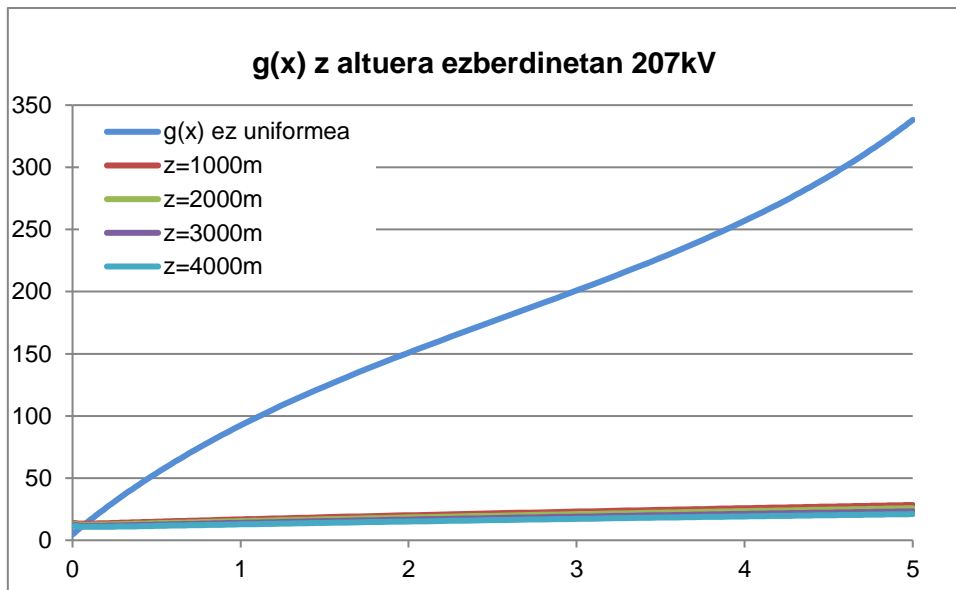
7. E Irudia: $g(x)$ Presio ezberdinetan $d=5$ cm eta $V=207$ kV denean.



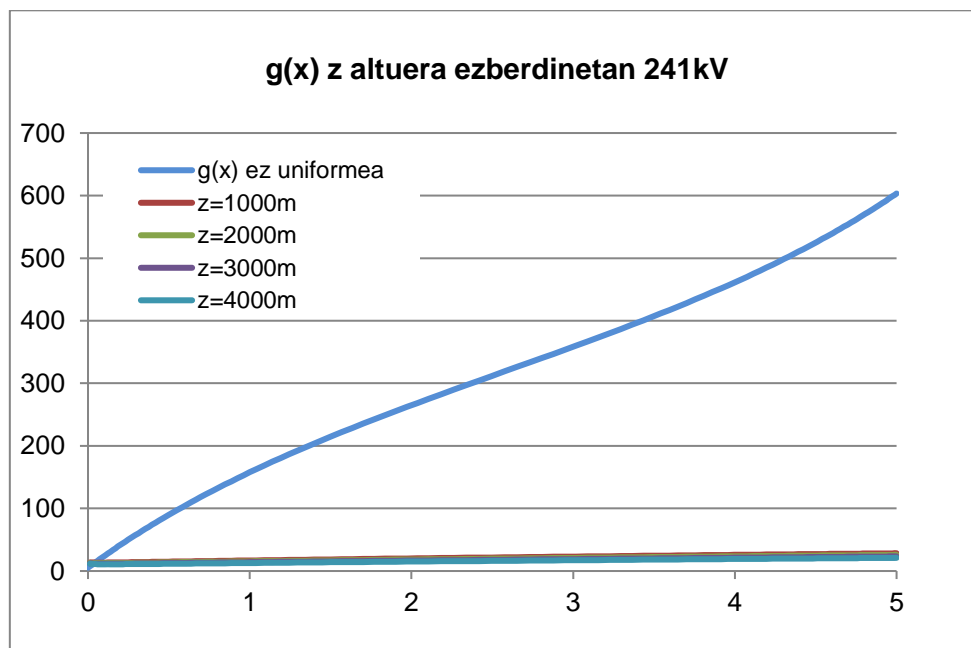
8. E Irudia: $g(x)$ Presio ezberdinetan $d=5$ cm eta 241 kV denean.



9. E Irudia: $g(x)$ altuera ezberdinetan $d=5$ cm eta $V=136$ kV denean.

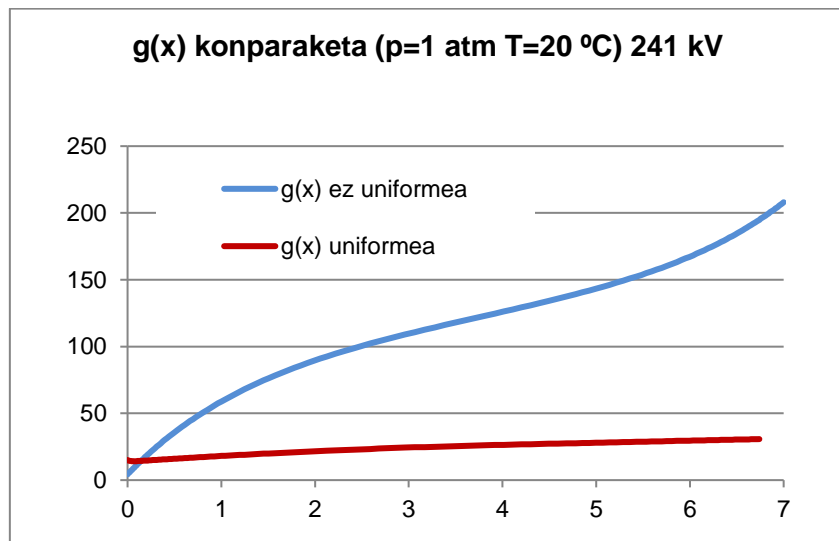
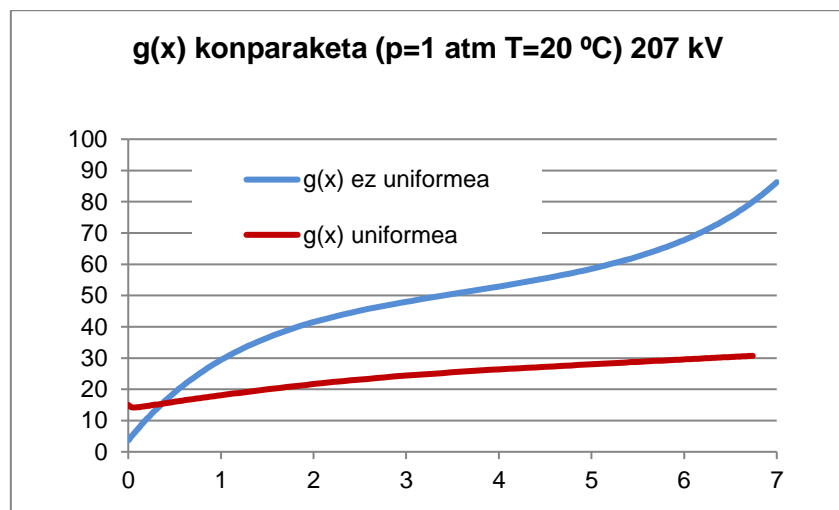
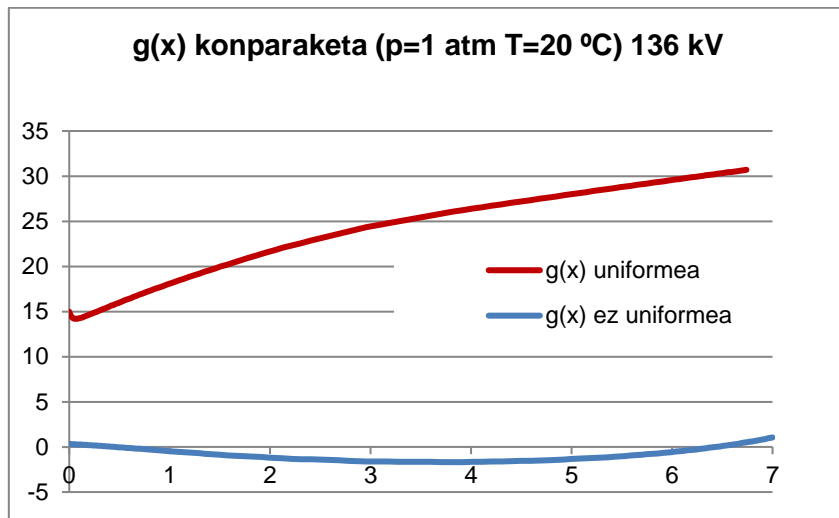


10. E Irudia: $g(x)$ altuera ezberdinetan $d=5$ cm eta $V=207$ kV denean.

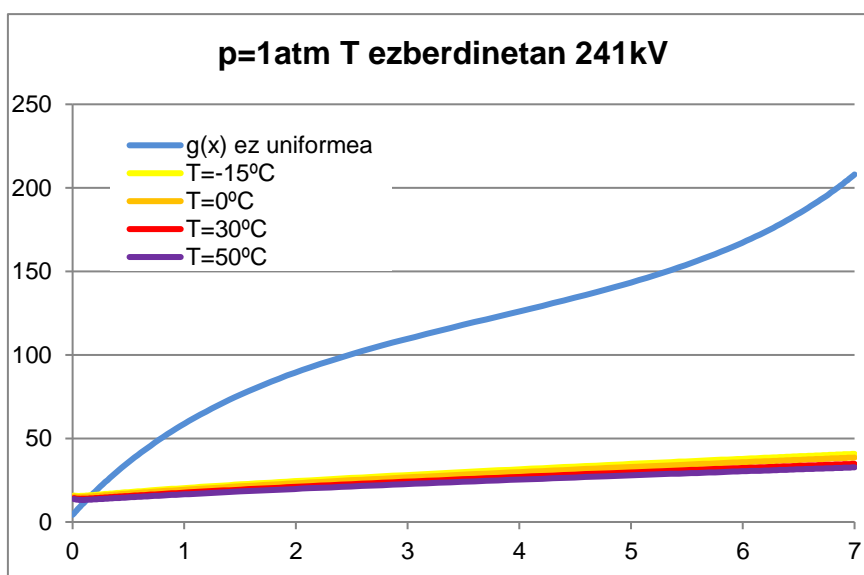
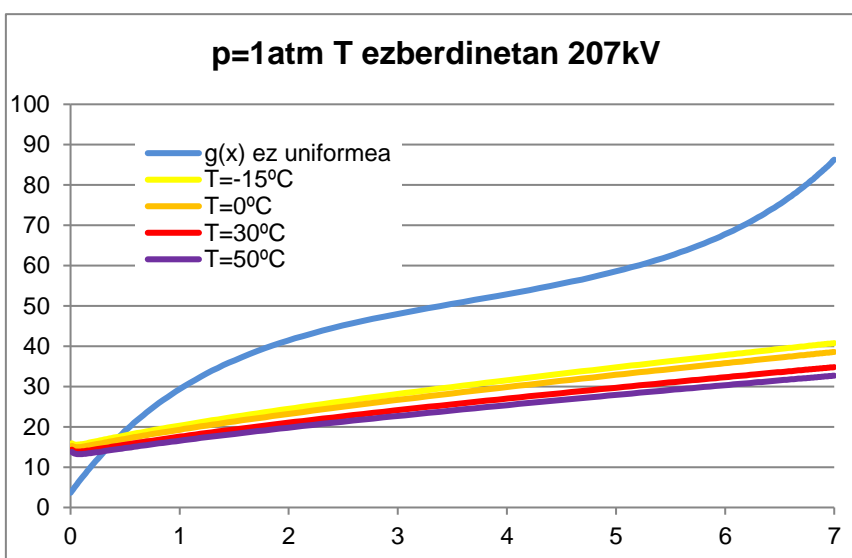
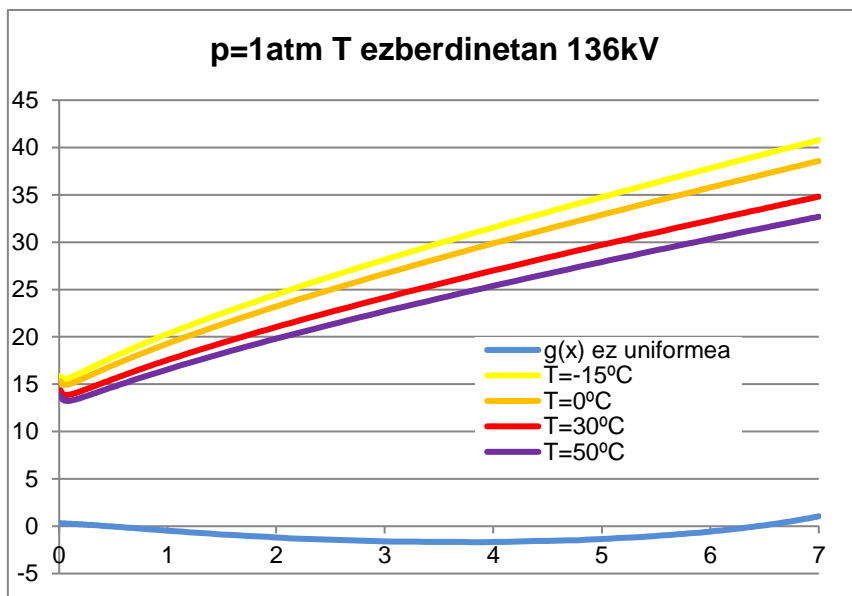


11. E Irudia: $g(x)$ altuera ezberdinetan $d=5$ cm eta $V=241$ kV denean.

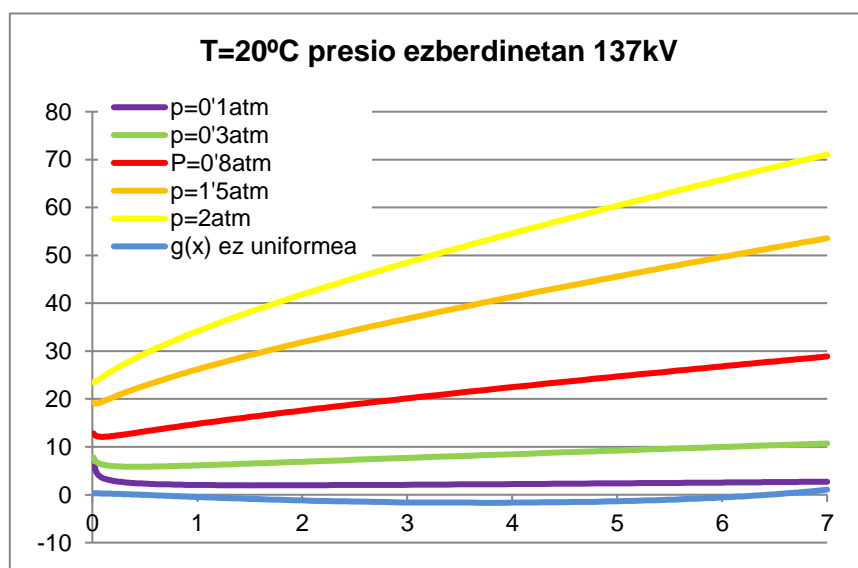
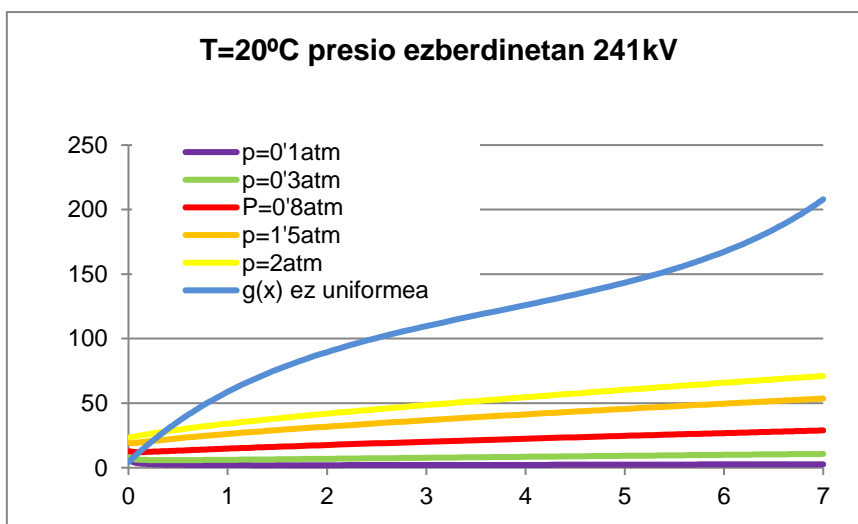
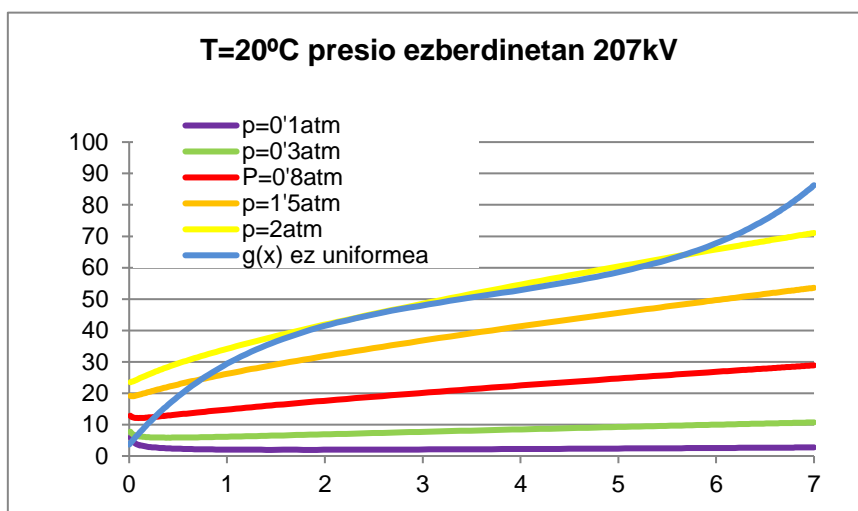
12.1.3 Presioa eta tenperatura ezberdinen $g(x)$ $d=7$ cm izanik



12. E Irudia: $g(x)$ funtzioak $d=7$ cm, $V=136$ kV, $V=207$ kV eta 241 kV denean.

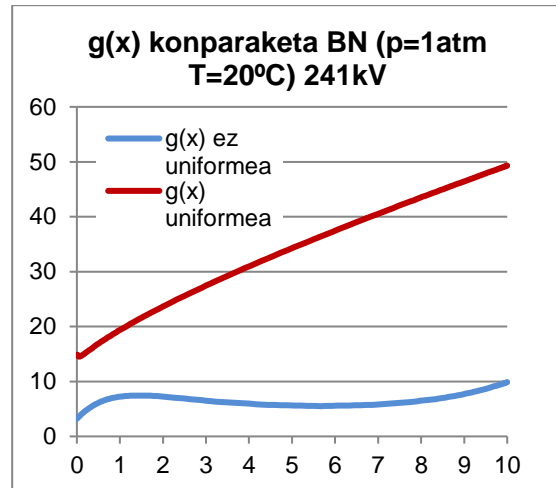
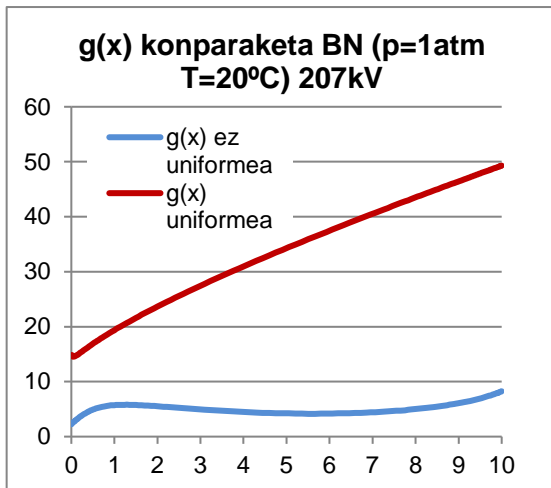


13. E Irudia: $g(x)$ Temperatura ezberdinetan $d=7$ cm, $V=207$ kV eta 241 kV denean.

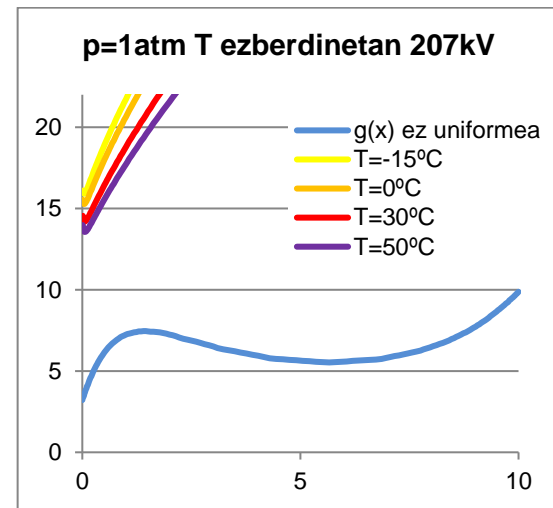
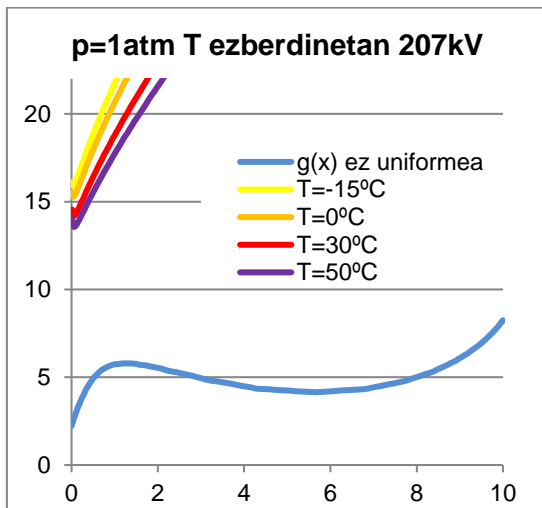


14. E Irudia: $g(x)$ Presio ezberdinetan $d=7$ cm, $V=207$ kV eta 241 kV denean.

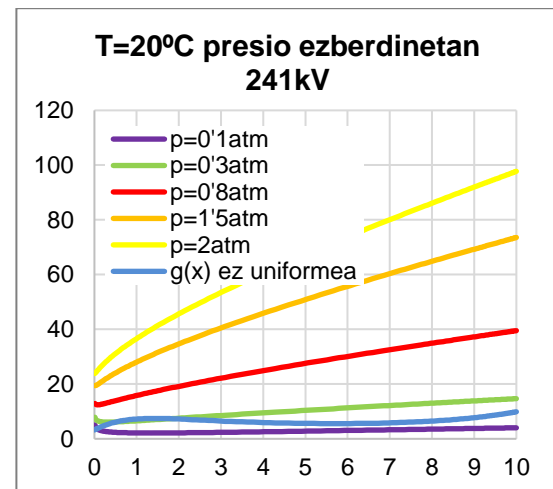
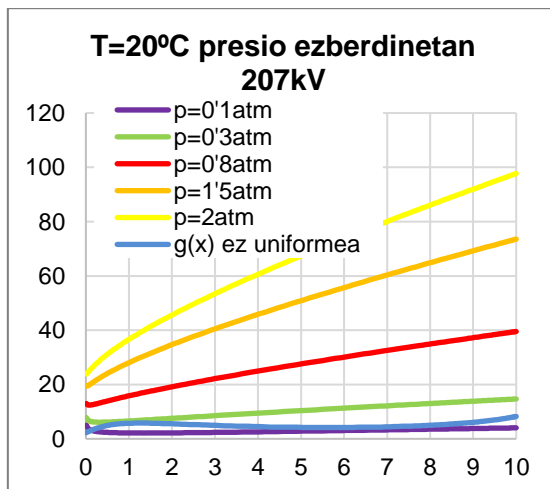
12.1.4 Presioa eta temperatura ezberdinen $g(x)$ $d=10$ cm izanik



15. E Irudia: $g(x)$ funtzioak $d=10$ cm, $V=207$ kV eta 241 kV denean.



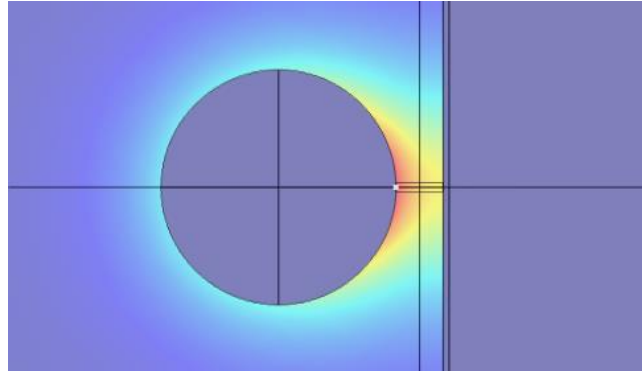
16. E Irudia: $g(x)$ Tenperatura ezberdinetan $d=10$ cm, $V=207$ kV eta 241 kV denean.



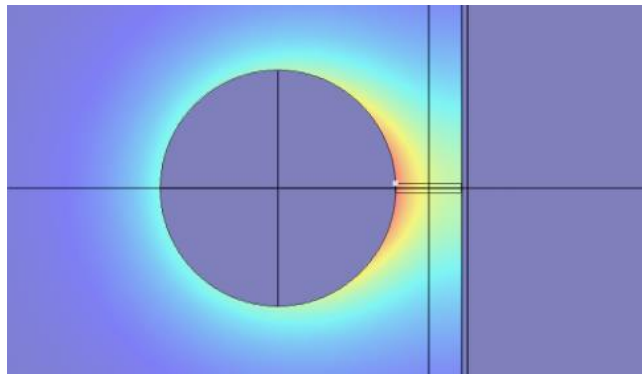
17. E Irudia: $g(x)$ Presio ezberdinetan $d=10$ cm, $V=207$ kV eta 241 kV denean.

12.2 Esfera-plano irudiak

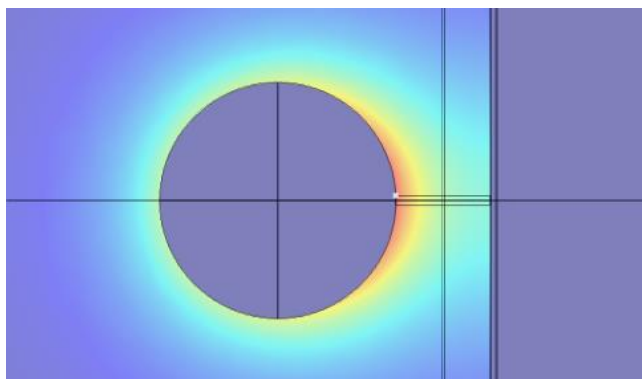
COMSOL multiphysics bidez lortu diren eremu elektrikoaren simulazioen irudiak ikus daitezke esfera-plano geometrian.



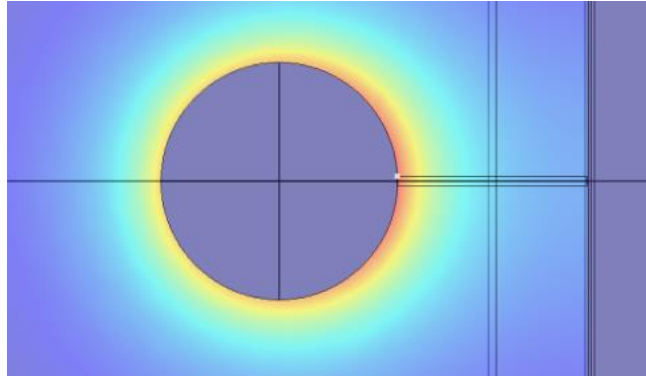
18. E Irudia: Eremu elektrikoa $V=136$ kV eta $d=5$ cm denean.



19. E Irudia: Eremu elektrikoa $V=136$ kV eta $d=7$ cm denean.



20. E Irudia: Eremu elektrikoa $V=136$ kV eta $d=10$ cm denean.



21. *E Irudia: Eremu elektrikoa $V=136$ kV eta $d=20$ cm denean.*