

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

DEPARTAMENT D'ENGINYERIA ELECTRÒNICA

Desenvolupament de tècniques de mesura d'impedància elèctrica aplicades a la caracterització de sòls

Tesi presentada per a
l'obtenció del títol de doctor

Autor: Josep M. Torrents Dolz
Director: Dr. Ramon Pallàs Areny

Setembre, 1996

Als meus pares,
en Joan i la Blanca.

AGRAÏMENTS

En primer lloc, agraeixo als pares el seu suport diari i callat, fent costat i sense esperar cap agraïment. Són les persones a les que aquesta dedicatòria els farà més il·lusió.

En segon lloc, agraeixo a en Ramon, la direcció d'un mestre. No seré jo qui descobreixi les seves qualitats, tant professionals com sorprenentment humanes. Només seré una mica egoïsta i us diré que si tornés a nàixer i em decidís a fer una feina com aquesta m'agradaria que em tornés a acceptar com alumne seu.

Dels amics i els companys, de l'escola, de la universitat, els sempre pocs que esmentaré amb la por de caure en el oblit, i no els faria justícia. Gràcies de tot cor, sense el suport vostre en alguns casos, l'ajut o el consell en altres, no hauria arribat a aquest moment de certa dolçor. Blanca, un petó. Albert, Alfonso, Àngel, Anna, Carles, Carme, Clemente, David, Edu, Esther, Fidel, Javier, Joan, Joana, Jordi, Josep, Judith, Manel, Mariona, Miguel, Mireia, Montse, Ores, Óscar, Pau, Pere, Ramon, Sílvia, Sònia, Viki...

Finalment, el reflex d'un bocí del meu cor i de la meva memòria cap als meus avis, i tiet Josep M. La bondat feta persona de la "iaia" i el model d'intel·ligència que vols imitar de l'avi meu.

RESUM DE LA TESI DOCTORAL

DESENVOLUPAMENT DE TÈCNiques DE MESURA D'IMPEDÀNCIA ELÈCTRICA APLICADES A LA CARACTERITZACIÓ DE SÒLS

Autor: Josep M. Torrents Dolz

Director: Dr. Ramon Pallàs Areny

La humitat és un dels paràmetres més característics del sòl i el seu coneixement té interès des de diversos àmbits de la enginyeria. Conèixer la humitat mitjançant la impedància elèctrica planteja un estudi acurat de les tècniques de mesura per determinar quins factors o components es mesuren realment. Cal saber, a més, si corresponen a la presència i quantificació de la humitat o a interferències com fenòmens de transducció iònico-electrònica, fenòmens en el si del material o limitacions pròpies de la instrumentació, sovint poc aprofundits per la bibliografia.

L'estudi teòric de les propietats elèctriques, conductivitat i permitivitat, de les barreges estableix unes directrius o punts de partida. El sòl és un sistema de partícules amb tres fases: la sòlida, l'electrolítica i els buits, que es comporta com un dielèctric compost amb moltes pèrdues. La interacció entre fases modifica les propietats elèctriques de les barreges teòriques i ens porta a l'estudi detallat de diverses lleis pseudoempíriques i al plantejament d'un model propi.

S'han analitzat les tècniques clàssiques de mesura d'impedància elèctrica, abast, validesa i limitacions quan s'estudia el medi sòl. La no consideració dels punts febles o el seu oblit pot portar a interpretacions errònies. Aquesta anàlisi de tècniques de mesura i l'estudi elèctric de materials ha portat al desenvolupament de cèl·lules adaptades a diferents estratègies de mesura, a la combinació de diversos instruments i a la connexió adient de les parts amb diverses solucions originals.

La conductivitat dels sòls no depèn de la freqüència en el marge estudiat (1 Hz a 100 MHz); sí que depèn dels continguts de sals dissoltes en l'electròlit. A partir d'un llindar, hi ha una relació lineal entre conductivitat i humitat en sòls de tipus sorrenc. En canvi, la relació en sòls llimosos i argilosos és de tipus potencial fins a una saturació. A freqüència baixa, no és possible mesurar la permitivitat de sòls atesa la influència de la conductivitat. A freqüències superiors a 1 MHz, la relació permitivitat-humitat és aproximadament lineal en sòls sorrencs i potencial en sòls llimosos i argilosos. Aquests resultats s'han contrastat amb els models bibliogràfics, que s'han adaptat o modificat.

L'anàlisi i desenvolupament de les tècniques de mesura i els models elèctrics de sòls permeten conèixer el contingut d'humitat dels sòls, tot i que cal un coneixement del tipus de sòl de què es tracta i de la concentració inicial de l'electròlit. Les tècniques desenvolupades complementen de forma ràpida i barata les tècniques clàssiques no elèctriques i poden substituir-les si s'accepta una incertesa del 5%.

ÍNDIX

1	Introducció	1
1.1	La mesura d'impedància elèctrica, 3	
1.2	Interès per la caracterització de sòls, 4	
1.3	Mètodes convencionals de caracterització de sòls, 6	
1.4	Algunes característiques dels sòls, 10	
1.5	Antecedents dels mètodes elèctrics aplicats a mesures en sòls, 14	
1.6	Objectius de la tesi, 17	
1.7	Organització d'aquest treball, 19	
2	Els sòls com materials elèctrics compostos	21
2.1	Propietats elèctriques dels materials homogenis, 23	
2.1.1	Conductivitat, 23	
2.1.2	Permitivitat, 25	
2.2	Propietats elèctriques dels materials heterogenis, 27	
2.2.1	Lleis de barreges sobre la conductivitat i permitivitat, 27	
2.2.2	Fenòmens interfacials: relaxació, partícules col·loïdals, doble capa, 33	
2.3	Teories i models elèctrics de materials compostos aplicades a sòls, 41	
2.4	Resum i conclusions, 47	
3	Mesura d'impedància elèctrica de sòls: mètodes clàssics	49
3.1	Especificacions per a un sistema de mesura d'impedància elèctrica per a caracterització de sòls, 51	
3.1.1	Especificacions dels errors i limitacions en les mesures d'impedància elèctrica en el domini freqüencial, 52	
3.1.2	Representació gràfica d'errors en la mesura d'impedància complexa, 55	

3.1.3	Marges de mesura i incertesa acceptada, 57	
3.2	Mètodes convencionals de mesura d'impedància aplicats a sòls, 59	
3.2.1	Mesures genèriques de la bibliografia, 59	
3.2.2	Mesures amb dos fils, 61	
3.2.3	Mesures amb quatre fils, 62	
3.3	Error en sistemes de mesura conjunta de conductivitat i permitivitat, 65	
3.3.1	Propagació d'errors en mesures de magnituds complexes, 65	
3.3.2	Aplicació a les mesures de permitivitat, 68	
3.4	Conclusions, 71	
4	Mesura d'impedància elèctrica de sòls: mètodes desenvolupats 73
4.1	Descripció de cèl·lules, 74	
4.1.1	Cèl·lula de secció constant per mesurar conductivitat, 74	
4.1.2	Cèl·lula capacitiva amb guarda per mesurar permitivitat: descripció mecànica i fonts d'error, 78	
4.1.3	Cèl·lules capacitives sense guarda per mesurar permitivitat: cèl·lula adaptada i cèl·lula capacitiva simètrica petita, 86	
4.1.4	Cèl·lules de camp no uniforme per mesurar permitivitat: línia de transmissió coaxial en circuit obert i monopòl curt, 94	
4.2	Descripció bàsica i consideracions sobre els aparells a emprar, 98	
4.2.1	Electròmetre, 98	
4.2.2	Analitzadors d'impedàncies de freqüència baixa, 101	
4.2.3	Analitzadors d'impedàncies de radiofreqüències, 106	
4.2.4	Instruments de propòsit general, 107	
4.3	Topologia, disposicions i calibratge dels sistemes de mesura, 109	
4.3.1	Mesura en continua, mesura de conductivitat, 109	
4.3.2	Mesura a freqüència baixa amb dos i quatre fils, 110	
4.3.3	Mesura a freqüència mitjana, 120	
4.3.4	Mesura a freqüència alta, 128	
4.4	Conclusions, 129	
5	Resultats experimentals i anàlisi de dades 131
5.1	Consideracions prèvies, 132	
5.1.1	Sobre els sòls, 132	
5.1.2	Sobre la conductivitat, 133	
5.1.3	Sobre la permitivitat, 137	
5.2	Relacions conductivitat-humitat, 140	

5.3	Relacions permitivitat-humitat, 144	
6	Conclusions	159
6.1	De la revisió de la bibliografia, 160	
6.2	Dels models teòrics, 160	
6.3	Dels mètodes clàssics de mesura d'impedància elèctrica de sòls, 161	
6.4	Dels mètodes de mesura desenvolupats, 162	
6.5	De l'anàlisi de dades, 163	
7	Referències	167
Annex I	Permitivitat	I.1
Annex II	Expressions de la llei d'Archie per a diferents tipus de roques	II.1
Annex III	Gràfiques d'errors en la caracterització de dielèctrics amb pèrdues	III.1
Annex IV	Fitxes de recollida de dades experimentals	IV.1
Annex V	Imatges de les cèl·lules de mesura	V.1
Annex VI	Deducció de la relació de tensions que proporciona l'etapa prèvia a l'analitzador d'impedàncies hp 4192A	VI.1
Annex VII	Definicions i relacions físiques entre les fases del sòl	VII.1

1 INTRODUCCIÓ

com·po·si·tion n 3 [U] "the parts of which something is made up: *Scientist study the ~ of the soil*".

A.S. Hornby. Oxford Advanced Learner's Dictionary of Current English.

L'home és un ser curiós. Fins i tot moltes vegades, l'afany de coneixement el porta a la frontera de la seva intel·ligència. Antigament, els quatre elements considerats bàsics eren sòl, cel, aigua i foc. Com a entorn més immediat, foren els primers elements a conèixer. De segur, el mètode no era científic, definible, mesurable o reproduïble, ni tant sols trobaríem un criteri clar del perquè aquests eren els quatre elements bàsics. No obstant el temps transcorregut i el coneixement adquirit, se segueix fent recerca sobre els temes perquè encara no se sap tot. Avui però, la cerca parteix de patrons establerts, d'una construcció teòrica, d'unes hipòtesis i d'una verificació experimental i, amb aquesta informació, d'una correcció de les hipòtesis primeres per procedir a noves verificacions que milloren el coneixement, i així successivament.

La hipòtesi d'aquest treball de tesi és si podem conèixer la humitat de sòls a través de la mesura d'impedància elèctrica. A priori podem pensar que a les mesures d'impedància influiran altres paràmetres a més de la humitat, però aquesta serà el paràmetre principal. Aquest coneixement té repercussions econòmiques molt importants en diferents àmbits d'enginyeria i resulta engrescador obtenir-lo amb una propietat intrínseca a qualsevol material, la impedància elèctrica. Obviament, el coneixement de la impedància elèctrica en funció de la seva humitat té interès en sí mateixa en aquells casos en els que el sòl forma part d'un sistema elèctric com per exemple les aplicacions d'electrotècnia.

Per això, aquest treball haurà de buscar uns models elèctrics dels sòls i haurà d'establir els marges de validesa d'aquestes mesures. Amb aquesta informació,

caldrà trobar les especificacions necessàries dels sistemes que mesuraran els sòls. El resultat de les mesures criticarà i modificarà els models per validar-los o no i respondre a les hipòtesis inicials.

Aquest capítol conté set apartats introductoris. El primer introdueix de forma breu la mesura d'impedància elèctrica. El segon apartat explica quin interès general tenim per caracteritzar sòls. El tercer esmenta mètodes convencionals, alguns dins les ciències químiques, de caracterització de sòls. L'enumeració es converteix en descripció quan els mètodes físics de caracterització tenen prestacions susceptibles de comparació amb les d'aquest treball. El quart apartat introdueix algunes característiques dels sòls que són d'utilitat al llarg del treball. El cinquè apartat resumeix la història dels mètodes elèctrics aplicats a mesures en sòls. Finalment, l'apartat sisè planteja els objectius de la tesi i el darrer apartat descriu com s'organitza aquest treball. Donem pas a les tècniques de mesura d'impedància elèctrica.

1.1 La mesura d'impedància elèctrica

La mesura es considera una ciència perquè conté unes regles definides i ordenades, un coneixement exacte, un procés sistemàtic en concepció i en realització, un cert grau d'automatització, etc. També es considera un art perquè abans de mesurar cal escollir el mètode, comptar amb diferents aspectes com repetibilitat, incertesa, adequació a les necessitats, ergonomia, etc., i una bona part d'aquest coneixement és difícil de quantificar, de manera que moltes decisions semblen més fruit de l'experiència que del raonament. Moltes vegades cal esbrinar si existeix un altre mètode que fa el mateix de manera millor i resulta aplicable. Tanmateix, el procés de mesura també té part d'artesanía, doncs cal tenir cura dels detalls, mantenir els instruments i els altres estris en bones condicions i fer-ne un ús intel·ligent.

La impedància elèctrica és una propietat intrínseca a qualsevol material, que relaciona una variable d'esforç (tensió elèctrica) amb una variable de flux (corrent elèctric). La mesura d'aquestes dues variables planteja una problemàtica específica. Molts cops es mesura la tensió produïda pel flux d'un corrent sobre la impedància que es vol conèixer. La tensió o diferència de potencial entre dos punts pot ser unipolar o diferencial segons que uns dels punts tingui o no un potencial constant. El corrent que travessa el material sovint es calcula a través de la mesura de tensió en un element sèrie de característiques conegudes. Aquest element de referència comporta un procés de calibratge. Si la mesura feta indica quant s'aparta d'un valor original es parla de mesura per deflexió. En canvi, si la mesura actua en algun punt, compensa les diferències creades i torna al valor original, es parla de mesura per comparació. La mesura d'impedància elèctrica és no invasiva i no destructiva, i pot resultar d'un cost netament inferior a d'altres mesures que cobreixen part del ventall de possibles aplicacions de la mesura d'impedància.

1.2 Interès de la caracterització de sòls

La caracterització és un recull de qualitats d'una cosa. Una caracterització complerta d'un sòl inclou aspectes físico-químics, morfològics i mineralògics. L'interès en la caracterització de sòls ve d'àrees de coneixement molt disperses. Un enginyer civil vol conèixer el seu comportament mecànic i de fonamentació [Lambe, 1994], la qualitat de terraplens o la localització i cubicatge de materials de construcció. Un enginyer elèctric necessita conèixer l'efectivitat dels sòls per a postes a terra [Carpenter, 1993]. Un enginyer agrònom té interès per establir el nivell de fertilitat [Bartolini, 1989] o mesurar el contingut d'humitat per al control d'infiltració en regadius. Des del punt de vista científic, la geologia estudia la gènesi, evolució, hidrologia i aprofitament per a l'extracció [Orellana, 1982], l'estudi del medi ambient vol caracteritzar els sòls per al seu grau de contaminació o per si serveixen per al reciclatge de diferents tipus de residus industrials.

Per a un químic, la caracterització dels principals components inorgànics dels sòls pot resultar força àmplia. A més, també pot interessar la interacció dels ions a la capa pel·licular que envolta les partícules de sòl. Els ions apareixen per l'efecte de descomposició de matèria orgànica, reg amb aigües que els contenen, meteorització, fertilització i alliberament dels ions continguts en argiles (partícules col·loïdals). Els ions queden retinguts per precipitacions, atraccions electrostàtiques o intercanvi.

Per a un enginyer civil, la caracterització del sòl fa incidència a tot allò que modifica la mecànica del sòl, on Terzaghi n'és considerat el pare. Vist com sistema de partícules de diferents mides on es defineixen paràmetres com la distribució granulomètrica, el coeficient d'uniformitat, o els límits d'Atterberg en relació al seu grau d'humitat, el sòl juga un paper capital en les obres d'enginyeria, bé com a element clau en la fonamentació o bé com a material de construcció o farciment en preses o paviments.

Per a un geòleg, que fa prospecció geoelectrica (sondejos i cales), la caracterització dels diferents horitzons o falles del sòl passa pel coneixement de les característiques resistives (elèctriques) dels diferents formadors d'aquests sòls, si està humit o sec i per la seva contaminació (contingut de sals dissoltes, congènites o adquirides, que puguin emascarar dades i falsejar interpretacions).

Per a un enginyer elèctric, que treballa en la branca electrotècnica, el sòl és part del circuit de retorn de la xarxa de distribució d'energia i la resistència elèctrica caracteritza aquesta part de circuit. Quan l'enginyer elèctric treballa en aplicacions de potència com grans motors en indústries o transport, les característiques elèctriques del sòl també influeixen en el resultat de l'aplicació.

Cal distingir entre les possibles caracteritzacions i la seva aplicabilitat. Si el treball treu un rendiment indirecte del sòl, com el cas d'agricultura (fertilitat) o d'aprofitament mediambiental (contaminació o reciclatge), la caracterització és essencialment química. En canvi, si el treball contempla el sòl com a suport, com és a enginyeria civil o a geotècnia, o per treure un rendiment directe com és a prospecció, la caracterització és essencialment física però comptant amb una possible interacció química a través de la fase intersticial que afecta al comportament físic del sòl. Aquest treball s'orienta a una caracterització física en la determinació de la humitat.

1.3 Mètodes convencionals de caracterització de sòls

La caracterització dels sòls implica molts cops un treball preparatori previ, sempre un treball de camp i sovint un treball de laboratori que es pot limitar al processament de les dades obtingudes en el treball de camp o bé a la mesura de les mostres i processament posterior. Les tres etapes poden ser costoses en mitjans humans i materials.

El treball preparatori determina els objectius que cal assolir a través de la caracterització. També es fa càrrec de la recopilació de totes les dades disponibles del sòl, així com dels factors que el condicionen com poden ser éssers vius i clima. Finalment, el treball preparatori planifica el treball de camp.

El treball de camp escull zones representatives dels tipus de sòls, observa les característiques morfològiques, extreu informació sobre el moviment d'aigua i la seva retenció, identifica el material originari i examina els horitzons si s'escau i, finalment, fa mesures i/o pren mostres. La presa de mostres pot ser el punt més delicat, ja que hi han propietats com temperatura, humitat, porositat o pH que es poden veure alterades per una mala manipulació de les mostres.

Els mètodes emprats de forma tradicional en la caracterització química dels sòls són diversos i acostumen classificar-se segons els components que detecten [Page, 1982]. Així, la matèria orgànica que s'oxida amb facilitat es pot detectar amb el mètode de Walkley-Black, la calissa activa amb el de Drouineau, el fòsfor amb els d'Osmond-Bray, Olsen o Burriel-Hernando, el nitrògen amb el mètode semi-micro Kjeldhal. El potassi i el sodi s'extreuen amb acetat amònic i es valoren per fotometria de flama, el calci i el magnesi s'extreuen d'igual forma i es valoren per complexometria. Per a conèixer la capacitat de bescanvi catiònic es disposa del mètode de Mehlich i pel contingut de clorurs s'usa el mètode de Mohr.

Alguns estats d'oxidació produeixen compostos volàtils. L'estudi aïllat d'ions no és suficient per conèixer la química del sòl. L'estat dels ions depèn del pH, una de les propietats químiques més important dels sòls. Generalment es fan dues mesures del pH, una amb aigua i l'altra amb clorur potàssic. La capacitat de bescanvi catiònic és una altra de les determinacions de caracterització fonamentals que va lligada a la determinació de la quantitat total de cations de bescanvi (Ca^{+2} ,

Mg⁺², Na⁺ i K⁺).

L'analítica de sòls implica una preparació prèvia que inclou l'asseccament de les mostres a temperatures inferiors a 30°C i el tamisatge amb sedàs de 2 mm de llum (ASTM 10), procurant no alterar la granulometria de les partícules. L'extracció, que és la primera fase de l'anàlisi, comporta l'elecció de l'extractant segons el constituent que s'analitzi. Si l'extracció és enèrgica s'ataca la mostra amb àcids forts. Cal triar el mètode o la tècnica instrumental segons la concentració del constituent.

De vegades apareixen problemes de variabilitat de les característiques de la mostra. D'altres, la preparació prèvia falseja dades; per exemple, la molturació de mostres a una mida de gra molt petit augmenta el valor del pH. És impossible fer anàlisis complets o assajos de fertilitat en tots els casos. De tota manera, amb una bona informació de camp es pot determinar els tipus de sòls i els indrets on s'han de fer més anàlisis. Tots aquests factors impliquen una limitada automatització del procés. A més, la dispersió de característiques químiques d'un sòl fa que no hi hagi una classificació específica seguint els paràmetres químics.

Les propietats físiques d'un material no poden estudiar-se independentment de la seva estructura i composició química. El sòl és un conglomerat de diversos agregats o fases amb una distribució de propietats texturals i químiques molt disperses. La textura i composició dels agregats o formadors són de gran importància en la determinació de les propietats físiques.

De la relació entre pesos de fases, la humitat és la més important i consisteix en el pes d'aigua dividit pel pes de partícules sòlides seques. Com s'observa és una mesura de relació adimensional i s'acostuma a expressar en percentatge.

El mètode gravimètric és el mètode de referència per a la mesura del contingut d'humitat en sòls, i en general és el mètode més exacte. De tota manera, requereix llevar la mostra i per tant resulta impossible fer una monitorització o diverses observacions repetides. El contingut d'humitat pel mètode gravimètric es calcula a partir de la pèrdua de pes quan sequem la mostra (generalment a 105°C durant 24 hores). Amb una balança adient i una cura moderada es determinen humitats amb una exactitud superior a 0,5%. Comparat amb altres mètodes no és car (espàtula, recipient, guants, balança i forn) però resulta casi impossible fer més de 60 mesures per dia. A més, la mesura és destructiva i comporta molt de temps

d'usuari i cal un equip de perforació per a profunditats superiors a mig metre. Finalment, si s'expressa la humitat per unitat de volum, cal un mètode per saber la densitat del sòl.

Els mètodes nuclears es basen en la utilització de diferents radiacions ionitzants per caracteritzar sòls, [Schmugge, 1980]. Els més emprats són el mètode de la dispersió de neutrons i el mètode d'atenuació de radiacions gamma. El primer determina la humitat de forma indirecta. Estima el contingut d'humitat del sòl mitjançant la mesura de la densitat de neutrons lents. Un emissor radioactiu enterrat emet neutrons d'energia alta ($\geq 10^6$ eV) que s'alenteixen per colisions amb els nuclis d'àtoms. La mitjana d'energia perduda és molt més gran en colisions amb àtoms de pes atòmic baix (hidrogen principalment en sòls) que en colisions amb àtoms de pes atòmic més elevat. El núvol de neutrons lents que resulta és funció del contingut d'humitat del sòl que es calcula en funció del percentatge de neutrons lents que arriben al detector enterrat i de la corba de calibratge que depèn de la densitat i composició del sòl. El mètode d'atenuació de raigs gamma, a més, mesura la compactació del sòl en un procés semblant. Transmet els raigs a través de gruixos de material al voltant d'1 cm. El mètode assumeix que la dispersió i absorció de raigs és funció de la densitat de la mostra i del pes específic del sòl sec que es considera constant per a cada sòl. Ambdós mètodes nuclears permeten monitorització, aconseguen exactituds pràctiques de l'ordre de l'1%, tenen un cost més gran que el mètode gravimètric, tant per la instrumentació com per la preparació dels operaris, però també permeten una presa de mostres més ràpida.

Hi ha d'altres mètodes clàssics que mesuren diferents magnituds indirectes relacionades amb la humitat de sòls. La mesura del potencial de capilaritat de l'aigua continguda en el sòl informa de l'energia de retenció d'aquesta aigua per part del sòl. Una aplicació directa d'aquest mètode a l'agricultura és saber quant costarà a una arrel obtenir l'aigua que hi ha en el sòl. La mesura de la humitat relativa d'alguna petita cavitat produïda en el sòl es relaciona amb la humitat d'aquest sòl. O la mesura de la resistència elèctrica o tèrmica de blocs de guix o d'un altre material porós en contacte íntim amb el sòl humit. L'exactitud de tots ells és bastant inferior respecte el mètode gravimètric tot i que no cal esperar un dia per l'altre per saber-ne el resultat.

Per a la mesura indirecta de la densitat s'empra el piconament normalitzat Proctor (NTL-107/76) que consisteix en la mesura del volum per comparació relatiu al d'una sorra calibrada.

Tot i les limitacions que imposen les característiques químiques, és raonable plantejar-se la cerca de mètodes de mesura d'humitat alternatius que siguin ràpids, sense perill per a l'usuari o el medi ambient i amb una exactitud acceptable. Atès que la impedància elèctrica dels materials depèn de la seva composició, pot ser una opció vàlida.

1.4 Algunes característiques dels sòls

Tot i que existeixen classificacions de sòls adaptades a cada tipus de problema, des del 1952 la classificació més amplament acceptada en l'àmbit de l'enginyeria civil és el sistema unificat proposta per Casagrande basada en les característiques físiques de granulometria i plasticitat. De tota manera, les correlacions empíriques entre les propietats característiques i el comportament d'un sòl poden presentar grans dispersions.

Els sòls es consideren com un sistema de partícules de grans independents, tot i que de vegades calgui el microscopi per adonar-se'n. Fins i tot, la ciència que tracta el comportament esforç-deformació del sòl, de vital importància en enginyeria civil, es denomina mecànica de partícules o sistemes discontinus. Tanmateix, el sòl és un sistema de dos fases format per una fase mineral (esquelet mineral) i una fase fluïda (intersticial), constituïda per aire i/o aigua amb o sense material dissolt.

La característica morfològica més evident de les partícules és la grandària. En general, la mida d'una partícula no inclou la forma (esfera, cub, làmina). Els mètodes de mesura de la grandària són el granulomètric amb tamís quan el diàmetre mig és superior a 0,06 mm, o l'hidromètric per sedimentació quan el diàmetre és inferior. Així, i segons el sistema unificat, els sòls es classifiquen en:

Blocs i boles quan el diàmetre mig és superior a 15 cm.

Graves si el diàmetre supera els 2 mm.

Sorres si supera els 0,06 mm.

Llims si supera els 2 μm .

Argila per a mides inferiors (fins a 1 nm).

A més, el sistema unificat especifica barreges entre diferents grups granulomètrics. La paraula argila també descriu els sòls de gra fi amb certa plasticitat. Per evitar aquesta confusió, s'usen els termes fracció argilosa per anomenar les partícules inferiors a 2 μm . Dins aquest grup, cal fer esment dels col·loides, partícules carregades de mides molt disperses amb una amplària que va des d'1 nm fins a 1 μm i un gruix al voltant d'1 nm. Els col·loides interaccionen elèctricament amb les molècules d'aigua, que tenen un diàmetre de 0,2 nm.

La forma de les partícules té una correlació molt alta amb la seva grandària. Llevat d'excepcions com les miques, partícules laminars de mida llim o superior, les partícules fraccions llimoses o sorrenques són esferoides o cúbiques, mentre que la fracció argilosa té forma laminar. Els geòlegs descriuen les formes amb termes com disc, esfera, fulla o barra per posar uns exemples. Aquests termes no s'usen en l'àmbit d'enginyeria civil.

Altres trets morfològics de les partícules de sòl són el grau d'arrodoniment, que fa referència a l'agudesesa de les vores, la textura superficial —amb termes com polida, llisa, rugosa, estriada, mate, independent de la grandària, forma i grau d'arrodoniment—, i color, útil pel geòleg que treballa en mineria.

Si es parla de la composició d'una partícula de sòl, cal dir que existeixen poques relacions útils entre la composició i el seu comportament mecànic o elèctric. En canvi, la naturalesa i composició de les partícules de sòl té molta influència en la permeabilitat, la resistència als esforços i la seva transmissió en els sòls, en especial en els de gra fi. Sense entrar en els sòls orgànics, una partícula de sòl inorgànica pot ser un mineral o una roca, i les roques són d'origen igni, metamòrfic o sedimentari. Una primera classificació divideix els sòls inorgànics en carbonats, fosfats, òxids i silicats. Aquesta classificació té un valor limitat atès que el 90% de l'escorça terrestre són silicats. Molts cops el silicats es classifiquen d'acord amb la disposició d'àtoms en el mineral, tetraedres independents com el zirconi, grups de tetraedres com l'akermanita, anells com el berili, cadenes simples o dobles com l'ensteatita o tremolita, en capa com la pirofilita o retícul tridimensional com el quars.

Les partícules de sòl adjacents interaccionen de forma elèctrica. La càrrega elèctrica de la partícula té el seu origen en diversos factors com la substitució isomòrfica, la dissociació superficial d'ions hidroxil, l'adsorció de cations o la presència de matèria orgànica [Cortés Lucas, 1992]. A més d'una càrrega neta generalment negativa, una partícula pot tenir càrrega de distribució, perquè no coincideixen els centres de càrregues positiva i negativa o per l'asimetria d'enllaços cristal·lins.

Una partícula de sòl atrau ions per neutralitzar la seva càrrega. Els ions atrets que neutralitzen la càrrega neta de la partícula reben el nom d'ions de canvi o intercanviables. Per exemple, una partícula de montmorilonita, mineral argilós dels més petits ($0,1 \mu\text{m} \times 0,1 \mu\text{m} \times 1 \text{nm}$) i més susceptibles a l'aigua, conté catorze mil ions de canvi monovalents.

La magnitud de la càrrega elèctrica està en relació directa amb l'àrea de la partícula. L'àrea per unitat de massa o volum, superfície específica, indica la influència relativa de les càrregues elèctriques sobre el comportament de la partícula. De fet, el terme col·loide descriu una partícula en que les forces elèctriques de tipus superficial superen les forces de massa (gravitatòries).

Una partícula d'argila és un col·loide per la seva mida i forma irregular. Com més petita, més superfície específica ($>1 \text{ m}^2/\text{g}$). Els principis de química col·loïdal són útils per entendre el comportament de l'argila. Si es submergeix l'argila en aigua, les partícules i ions de canvi s'hidraten. Per exemple, l'ió sodi augmenta set cops la seva mida quan s'hidrata. Aquest augment fa un desplaçament a una nova posició d'equilibri entre l'atracció elèctrica i la repulsió per efecte de l'energia tèrmica. Aquesta separació forma el que s'anomena doble capa.

L'aigua més propera a la partícula, o de la doble capa com definirem en el capítol dos, està sotmesa una força d'atracció cap a la partícula del sòl ja que l'aigua és solidària als ions de canvi que, a la vegada, són atrets cap a la superfície del sòl. Així, l'aigua adsorbida és l'aigua de les primeres capes entorn a la partícula. La separació d'aquesta aigua no es possible pels mètodes gravimètrics habituals.

A nivell macroscòpic, s'estudien les característiques dels conjunts de partícules. Ja s'ha establert abans el concepte de fases d'un sòl. Hi ha tres relacions importants entre volum de fases: porositat, relació de buits o índex de porus i grau de saturació. La porositat (n) és la relació entre volum de forats i volum total. L'índex de porus (e) és la relació entre el volum de forats i el de partícules de sòlid. El grau de saturació és la relació entre el volum de la fase líquida i la fluidica total (aigua i aire). L'annex VII descriu i relaciona matemàticament aquests paràmetres.

Les relacions entre pesos de fases les determinen els paràmetres d'humitat —relació entre el pes de l'aigua i el pes del sòl sec—, de pes específic del sòl sec i de pes específic de les partícules sòlides.

Un tercer tipus de relació és el coeficient d'uniformitat que és la relació entre el diàmetre de llum per sota del qual queda el 60% del sòl en pes i el diàmetre de llum per sota del qual queda el 10% del sòl en pes. Un sòl amb aquest coeficient menor a 2 es considera uniforme.

Classificarem els sòls utilitzats en aquest treball segons el sistema unificat

—Casagrande—. Afegirem informació relativa a la grandària de partícula i la seva dispersió de mida, coeficients d'uniformitat i de curvatura; viscositat i plasticitat amb els límits d'Atterberg, límit líquid i índex plàstic; i finalment afegirem la densitat de la fase sòlida.

1.5 Antecedents dels mètodes elèctrics aplicats a mesures en sòls

Els mètodes elèctrics de caracterització o prospecció de sòls contempnen el nivell macroscòpic de la impedància elèctrica, però no el nivell atòmic esmentat en l'apartat anterior.

Històricament, la caracterització elèctrica dels sòls ha estat una eina en l'àmbit de la prospecció geoelectrica amb el propòsit d'ajudar en el desenvolupament i millora dels mètodes prospectius. Això no obstant, la maduresa de la ciència geoelectrica ha vingut acompanyada d'una anàlisi de la naturalesa dels corrents i potencials, així com una descripció de les propietats elèctriques de les roques, on l'escola russa ha jugat un paper important [Iakubovskii, 1980], [Parkhomenko, 1967].

L'exploració elèctrica és un dels mètodes geofísics principals per a l'estudi de l'estructura geològica de la part superior de l'escorça terrestre. Els sòls, en funció de la seva composició, textura i disposició presenten propietats elèctriques diferents: conductivitat, permitivitat dielèctrica i magnètica i altres. Aquestes propietats, juntament amb els paràmetres geomètrics del mitjà (gruix, profunditat, ...) determinen el tall geoelectric, que es característic de l'estructura geològica de la regió que s'estudia.

La mesura del corrent elèctric que passa a través d'un sòl quan se li aplica una diferència de potencial és una tècnica utilitzada en prospecció geoelectrica i ben establerta des de la primera meitat de segle. Com a pioners, Fox, Gray, Watson i Wheeler descobriren l'existència de corrents telúrics i la naturalesa resistiva dels sòls i roques fa més de 200 anys. Més endavant, a les acaballes del segle passat, Barnes, Barus, Brown i Wells utilitzaren elèctrodes impolaritzables per a prospecció de jaciments (patent per a mesura a dos fils de 1883). De tota manera, els primers treballs amb èxit corresponen al científic francès Schlumberger amb el dispositiu tetraelectrodic que porta el seu nom. De forma paral·lela, Wenner desenvolupà una altra configuració de quatre elèctrodes als voltants de 1915, [Orellana, 1982], [Telford, 1990].

Al principi de la dècada dels anys 20, Lundberg i Zundberg inicien l'exploració elèctrica amb camps variables, i a finals de la dècada, Petrovskii

sistematitza l'exploració pel mètode d'ones radioelèctriques. Alguns d'aquests mètodes no utilitzen generadors ja que és la pròpia naturalesa que proporciona els senyals elèctrics.

Finalment, els mètodes temporals com la TDR, atesa la millora dels equips electrònics, prenen força com alternativa actual de mesura. Tanmateix, els problemes d'aplicació al mitjà són els mateixos que pateixen els mètodes freqüencials.

Els mètodes d'exploració elèctrica es classifiquen segons les característiques temporals del camp natural o artificial, ja que aquest fet condiciona la instrumentació que s'utilitza i el tipus de dades que es poden extreure. Així, apareixen els mètodes de camp constant com el mètode de camp elèctric natural, o el mètode de resistivitats (sondejos i cales); els mètodes de camps variables de freqüència baixa com el mètode de potencial induït, o el mètode de sondeig electromagnètic, o el de camp magnetotelúric, o fins i tot l'anomenat TDR (amb reserves perquè cobreix un ampli espectre de freqüències); i els mètodes de camps variables de freqüències radiofòniques.

L'espectroscòpia d'impedància és particularment convenient per a la mesura i l'anàlisi de les funcions que relacionen la impedància (Z , Y , ε , σ) i la representació d'aquestes funcions en el pla complex. Això permet d'analitzar la resposta en petit senyal del sistema material-elèctrode que s'investiga. Cole i Cole (1941) representaren la funció impedància per a dielèctrics amb pèrdues en el pla complex. Més endavant, la representació de Z i/o Y s'ha utilitzat de forma àmplia en tractats teòrics.

En l'àmbit propi de caracterització resistiva de sòls, de seguit s'observà que la resistència que experimenta un corrent elèctric és proporcional al camí que ha de recórrer i no al volum del cos en el que es mesura la resistivitat. Aquest fet el parametritzà Archie (1942) quan definí el factor de formació, vàlid per a un sòl sorrenc saturat, en funció de l'anomenada porositat efectiva. Aquesta llei no és vàlida per a sòls que continguin argila, i diferents autors com ara Waxman (1968, 1974) i Lima (1990) l'han modificat per a casos específics.

Una discussió general de les propietats elèctriques dels materials heterogenis, com ara els sòls, fou establerta ja des de Maxwell (1891), Von Hippel (1995), De Loor (1956), Chernyak (1964), Van Beek (1965), Parkhomenko (1967),

Pearce i altres (1973), Selig (1975), Wobschall (1977) i d'altres. A més, Hasted (1973) experimentà i modelà aspectes dielèctrics concrets de l'aigua.

1.6 Objectius de la tesi

Compta el que és comptable,
mesura el que és mesurable,
i el que no és mesurable,
fes-ho mesurable.

Aquesta màxima atribuïda a Galileo Galilei engloba, en certa manera, els objectius de la tesi. Intentarem fer mesurable la humitat d'un sòl mitjançant la mesura d'impedància elèctrica, la qual cosa mai no s'ha establert amb un èxit absolut. Així, els objectius genèrics de la tesi són:

- L'estudi de models elèctrics de sòls per conèixer els marges de funcionament necessaris de la instrumentació que s'utilitzi, i si cal, la proposta de nous models.
- El disseny de paràmetres que controlin la qualitat de les mesures per determinar-ne la seva validesa en l'àmbit de la instrumentació.
- El desenvolupament de mètodes de mesura adaptats als marges de funcionament necessaris.
- La realització de mesures que validin o rebutgin els models teòrics per a cada situació.

La bibliografia suggereix diferents models elèctrics per a l'estudi de materials heterogenis ([Shutko, 1982], [Hasted, 1973, pàgs. 117-126]). El sòl és un material heterogeni on cada fase es representa per un o varis paràmetres elèctrics. Elements com les roques o altres coses enterrades no les considerarem. A més, haurem de comptar amb tots els fenòmens que modifiquen els models teòrics per establir un model elèctric de sòl propi si cal.

Un cop establerts els models possibles, caldrà desenvolupar els mètodes de mesura adients. De forma prèvia, caldrà definir els paràmetres que controlin la validesa de les mesures i que avisin del seu error. Caldrà determinar el marge de

freqüències més adient per a cada tipus de mesura.

Les mesures han de validar o rebutjar els models segons les circumstàncies, o bé han de permetre adaptar-los a la realitat de les mesures. Caldrà establir un model que serveixi per interpretar les relacions entre humitat i impedància d'un sòl segons la classificació del sistema unificat. Per fer-ho, la contribució dels paràmetres de qualitat de les mesures i el desenvolupament de mètodes d'acord amb aquests paràmetres serà imprescindible.

1.7 Organització d'aquest treball

Després d'aquesta introducció, el capítol dos descriu, comenta i critica els models teòrics de les propietats elèctriques d'un material heterogeni; posa èmfasi especial en els fenòmens interfacials que pertorben les previsions teòriques. Aquests fenòmens d'interfície ens plantejen un model nou que els tingui en compte.

Un cop estudiat el material que es vol mesurar, cal avaluar els mètodes possibles i les limitacions de la instrumentació de la que es disposa per fer-ho. Aquesta crítica es fa en el capítol tercer, on també s'estudia quines millores aportem a la realització de les mesures i quines limitacions o restriccions de mesures hem de tenir en compte.

El capítol quart recull les recomanacions dels capítols precedents i descriu la instrumentació i les diverses cèl·lules de mesura adaptades a cada situació concreta. Planteja una metodologia de connexió per a casos concrets amb l'estudi en profunditat de cèl·lules i instruments.

En el capítol cinquè s'usen les eines subministrades pel capítol quart, s'atenen les recomanacions sobre instrumentació —que és un tret diferencial d'importància capital— fetes en el capítol tercer, es presenten i s'interpreten els resultats de les mesures; llavors s'estudia quin model teòric s'ajusta més a cada tipologia de sòl diferent amb les correccions empíriques possibles que incloguin els fenòmens interfacials.

Finalment, el capítol sisè recull les conclusions de tot aquest treball.

2 ELS SÒLS COM MATERIALS ELÈCTRICS COMPOSTOS

There are two conditions which the distribution of currents must fulfil in general, the condition that the potential must be continuous, and the condition of 'continuity' of the electric currents.

On the Conditions to be Fulfilled at the Surface of Separation between Two Conducting Media. Maxwell, J.C., 1891. "A Treatise of Electricity and Magnetism". 3era edició, vol. 1, part II, cap. IX, pàg. 435. Dover Publications, Inc., 1954.

El comportament elèctric dels sòls és funció de les propietats i estat d'agregació dels formadors. Tanmateix, la suma ponderada de les propietats de partícules, aigües, buits i altres components, no coincideix amb les propietats globals mesurades. És el mateix que passa, per exemple, amb l'acer: la seva duresa no és pas la suma de la duresa del ferro i la del carbó. La causa última d'aquests comportaments és la naturalesa discontinua de la matèria a nivell atòmic. Alguns paràmetres ambientals com la pressió i la temperatura influeixen també en el comportament elèctric dels materials, en particular si s'estudien en situacions extremes com poden ser grans profunditats.

Les propietats elèctriques es descriuen mitjançant tres magnituds físiques: la conductivitat elèctrica (σ) o la seva inversa, resistivitat (ρ), la constant dielèctrica (ϵ) i la permeabilitat magnètica (μ), que en el cas dels sòls se suposa coincident amb la del buit (μ_0).

Maxwell inicià l'estudi del comportament elèctric dels materials heterogenis, un estudi que segueix incomplet i viu atès el gran nombre d'efectes que coincideixen i que molts cops es designen, amb millor o pitjor fortuna, com fenòmens interfacials.

Aquest capítol es divideix en quatre apartats. El primer, sobre propietats elèctriques dels materials homogenis, descriu els conceptes de conductivitat i permitivitat de forma molt breu. Tot seguit s'estudien les propietats elèctriques dels materials heterogenis on cal comptar amb els valors dels formadors, la seva distribució i la relació entre ells. Es descriuen les diverses lleis que parteixen de premisses diferents, on totes queden limitades per la interrelació entre formadors. En el tercer apartat es descriuen teories i models elèctrics dels sòls com materials compostos. Aquest segon capítol finalitza amb les conclusions sobre els models amb els seus avantatges i limitacions.

2.1 Propietats elèctriques dels materials homogenis

El sòl és un material essencialment heterogeni. Primer però, cal conèixer les propietats dels material homogenis perquè serveixen com element bàsic de comparació. La conductivitat, o la seva inversa resistivitat, i la permitivitat o constant dielèctrica són les propietats que es descriuen.

2.1.1 Conductivitat

La conductivitat és una mesura de la facilitat de pas del corrent elèctric en un material. De forma anàloga, la resistivitat és una mesura de la dificultat de pas del corrent elèctric en un material. La resistència al llarg d'un material homogeni de secció constant és

$$R = \rho \frac{l}{A} = \frac{l}{\sigma A} \quad (2.1)$$

on l és la longitud i A la secció. La resistivitat (ρ), o el seu invers la conductivitat (σ), és un paràmetre intensiu, que no depèn del volum o forma del material que es mesura. La unitat de resistivitat en el Sistema Internacional d'unitats (SI) és l'ohm-metre [Ωm]; la unitat de conductivitat és l'invers de la de resistivitat i rep el nom de siemens/metre [S/m].

La conductivitat és una de les magnituds físiques de major amplitud de variació. La conductivitat del coure, per exemple, és 24 ordres de magnitud superior a la del tefló. El fet es degut als diferents mecanismes de conducció, que depenen de l'estructura íntima del cos considerat i que són molt dispars entre ells.

Els materials conductors permeten el pas de portadors de càrrega elèctrica a través seu. Els portadors són electrons o ions que donen lloc a dos mecanismes de conductivitat diferent.

Els nivells energètics dels àtoms individuals, quan s'ajunten, es fonen en bandes contínues. La conductivitat electrònica s'explica per la lliure circulació d'electrons de valència per les bandes de conducció en una mena de núvol en el cas dels metalls o de manera més restringida en el cas dels semiconductors. La banda

de conducció, o de major energia, està plena de forma parcial fins el que s'anomena nivell de Fermi. Un petit camp exterior permet el moviment de grans quantitats de càrrega. La conductivitat dels metalls és d'uns 10^7 S/m.

La conductivitat iònica s'explica per la càrrega que transporten cations i anions en electròlits, moltes vegades dissolucions aquoses. La velocitat dels ions, que depèn de la temperatura, concentració i de la seva mida, és proporcional a la intensitat de camp elèctric aplicat, [Barrow, 1972, pàgs. 717-721]. El factor de proporcionalitat és la mobilitat. La densitat de corrent (J) causada per cada tipus d'ió és

$$J = F \alpha c \mu E \quad (2.2)$$

on F és la càrrega de cada equivalent gram – $F = 1 \text{ mol } q \cdot (N_A q / 1 \text{ mol } q) \cdot (1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C} / 1 q) = 96,5 \text{ kC}$ –, α és el factor de dissociació de les molècules, que es suposa proper a 1 si l'electròlit és fort, c és la concentració en equivalent-gram, μ és la mobilitat dels ions, i E és el camp elèctric que s'hi aplica. Els ions més abundant en aigües naturals són el Na^+ i el Cl^- [Orellana, 1982, pàg. 50].

La resistivitat d'una dissolució aquosa de NaCl es calcula a partir de (2.2), on les mobilitats a 18°C són $\mu_{\text{Na}^+} = 4,47 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 / \text{V s}$ i $\mu_{\text{Cl}^-} = 6,65 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 / \text{V s}$. Si s'aplica un camp elèctric E prou petit (e.g. 1 V/m) perquè no apareguin fenòmens de saturació, resulta

$$\rho = \frac{E}{\sum J} = \frac{1}{96,5 \frac{\text{kC}}{\text{mol}} \alpha c_i \frac{\text{mol}}{\text{m}^3} (\mu_{\text{Na}^+} + \mu_{\text{Cl}^-})} = \frac{93,2}{\alpha C_i} \Omega\text{m}$$

on c_i ve donat en mol/m^3 , o també

$$\rho = \frac{0,0932}{\alpha C_i} \Omega\text{m}$$

on ara c_i ve donat en mol/l , atès que

$$c_i \left[\frac{\text{mol}}{\text{l}} \right] \frac{10^3 \text{ l}}{1 \text{ m}^3} = c_i \left[\frac{\text{mol}}{\text{m}^3} \right] = c_i \left[\frac{\text{g}}{\text{l}} \right] \frac{10^3 \text{ l}}{1 \text{ m}^3} \frac{1 \text{ mol}}{58 \text{ g}}$$

o el que és el mateix 1 mol/m^3 equival a $0,058 \text{ g/l}$, aleshores

$$\rho = \frac{5,41}{\alpha C_i} \Omega\text{m} \quad (2.3)$$

on ara C_i ve donat en g/l.

La conductivitat augmenta amb la temperatura ja que aquesta incrementa la mobilitat dels ions. Si les variacions són petites al voltant de la temperatura de referència, en el cas de l'aigua es pot suposar una variació de conductivitat del 2%/K [Orellana, 1982, pàg. 52], [Parkhomenko, 1967, pàg. 278].

Els aparells de mesura treballen amb corrents electrònics en el seu interior, mentre que la conductivitat de materials pot ser d'origen tant electrònic com iònic. Per tant, cal un parell d'elèctrodes per a la mesura de la diferència de potencial entre dos punts d'un sistema electrolític. D'aquesta manera, cada elèctrode forma una interfície entre el sistema que es mesura, on la conducció és iònica —al menys de forma parcial—, i el sistema de mesura, on la conducció és electrònica. El canvi d'un corrent electrònic a un corrent iònic s'esdevé a la interfície elèctrode-electròlit. En aquest sentit de conversió d'energia, l'elèctrode es considera un transductor i apareix una zona de càrrega d'espai [Cobbold, 1974, pàgs. 412-427]. A més, el procés de transducció iònic-electrònica també es produeix a nivell més petit si la barreja electrolítica conté inclusions metàl·liques o semiconductores. Però les inclusions signifiquen un material heterogeni i les conseqüències d'aquest fet les veurem més endavant en aquest capítol.

2.1.2 Permittivitat

Els fenòmens conductius no són els únics capaços de transportar càrrega. La constant dielèctrica o permittivitat (ϵ) d'un material és una mesura de la capacitat de transport de corrent elèctric de "desplaçament" d'un material sense un moviment efectiu de càrregues que es troben lligades. És a dir, la polaritzabilitat d'aquest material a un camp elèctric. L'estudi de la constant dielèctrica d'una substància simple o composta és una manifestació macroscòpica de l'estructura atòmica dels materials. En l'annex I, es detallen les relacions més importants d'un material dielèctric sotmès a la influència d'un camp elèctric.

De forma genèrica, el paràmetre permittivitat relaciona la densitat de flux elèctric (D) i la intensitat de camp elèctric (E). Aquesta relació es normalitza perquè la permittivitat que esdevé relativa sigui igual a la unitat en el buit i augmenti en presència d'un material polaritzable.

La constant dielèctrica, a més de la polarització de càrregues elèctriques al camp de forma "elàstica", també contempla un terme de pèrdues elèctriques en un dielèctric en el procés de polarització i la conducció en continua atesa la presència de càrregues lliures. Així, quan es consideren aquests factors, la permitivitat relativa esdevé un terme complex,

$$\varepsilon_r^* = \varepsilon_r' - j \varepsilon_r''_{total} = \varepsilon_r' - j \left(\varepsilon_r'' + \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \right) \quad (2.4)$$

$$\sigma^* = j \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r^*$$

on ε_r^* és la permitivitat elèctrica complexa relativa total, que inclou el terme de polaritzabilitat ε_r' , més un terme en quadratura de pèrdues $\varepsilon_r''_{total}$. Aquest darrer terme inclou pèrdues dielèctriques ε_r'' i el terme conductiu en contínua $\sigma/\omega \varepsilon_0$. De forma anàloga, la conductivitat també es defineix com un terme complex σ^* . A freqüències baixes, és més senzill expressar el terme dissipatiu com σ en comptes de com ε_r'' ja que el terme on es troba σ presenta una singularitat a l'origen. En canvi, a freqüències altes les propietats dielèctriques dels materials són més rellevants.

La constant dielèctrica de l'aigua és elevada, ja que les molècules d'aigua són molt polars (vegeu l'annex I). Aquesta és una base teòrica per detectar la presència d'aigua en un sòl atesa la polaritzabilitat baixa del sòl en general. No obstant això, i sota determinades circumstàncies, l'aigua queda lligada amb una constant dielèctrica inferior. Un dels factors que modifiquen la constant dielèctrica de l'aigua no lliure és la freqüència del camp que s'aplica (vegeu annex I). A més, els líquids de polaritat intensa com l'aigua i l'etanol, no tenen aplicació pràctica com a dielèctrics atesa la seva conductivitat gran per ions dissolts i per l'acumulació de càrrega a la interfície conductor-dielèctric.

2.2 Propietats elèctriques dels materials heterogenis

Sota determinades condicions d'interfícies, una barreja de materials no es comporta com la suma parcial de contribucions dels formadors. Per exemple, la permitivitat que és la característica més important de les roques, atesa la seva resistivitat alta, sovint queda emmascarada per la conductivitat de l'electròlit aquós allotjat dins els seus porus. De fet, el marge total de variació de resistivitat de roques causat pel contingut d'aigua és de 10^{10} . No obstant això, les teories generals suposen l'agregació ponderada de contribucions dels formadors en primera aproximació, per matisar després a nivell particular.

2.2.1 Lleis de barreges sobre la conductivitat i permitivitat

Sobre la conductivitat

Maxwell

Maxwell, (1891) [1954, pàgs. 440-441] estudià, potser per primer cop, la resistivitat de mitjans heterogenis (ρ) formats per dos materials un dels quals és la matriu o mitjà dispersant (e.g. roca porosa de resistivitat ρ_1) i l'altre les partícules o mitjà dispers (e.g. porus saturats d'electròlits amb resistivitat ρ_2 i fracció de volum Φ),

$$\rho = \frac{2\rho_2 + \rho_1 + \Phi(\rho_2 - \rho_1)}{2\rho_2 + \rho_1 - 2\Phi(\rho_2 - \rho_1)} \rho_1 \quad (2.5)$$

L'equació val per a partícules aïllades, sense interacció entre elles, —és el cas paral·lel al de la permitivitat de la figura 2.1—. La conductivitat d'algunes roques pot disminuir de forma considerable si contenen aquests o d'altres elements conductors disseminats. Orellana (1982), [pàg. 57] esmenta diversos autors, molts de l'escola russa, que ampliaren la relació deduïda per Maxwell quan les inclusions (mitjà dispers) no eren esferes i prenen formes allargades. La conclusió més destacable fou que aquestes barreges presentaven anisotropia en els valors de resistivitat, i això s'ha aplicat en sondejos.

Macdonald-Esposti

Macdonald, (1987) troba les equacions que governen el comportament dielèctric o conductor d'un material a partir de diferents funcions de distribució estadístiques dels temps de relaxació o de les energies d'activació. **Esposti** (1990) proposa circuits elèctrics equivalents a partir de les funcions de distribució dels temps de relaxació. No considera fenòmens interfacials.

Moltes vegades, les equacions que relacionen els paràmetres elèctrics de la barreja i de les parts que la formen inclouen el comportament de conductivitat i permitivitat alhora mitjançant expressions complexes de l'estil de l'equació 2.4. Atès que molts articles mesuren a freqüències de microones on el paràmetre més rellevant és el de permitivitat trobarem més expressions sobre la permitivitat de forma explícita.

Sobre la permitivitat

La permitivitat sovint es calcula amb la solució de l'equació de Poisson amb unes condicions de contorn determinades. Paradoxalment, una fórmula deduïda mitjançant consideracions geomètriques n'abasta la majoria de la resta. Nogensmenys, Landau i Lifshitz, (1975), [pàgs. 55-56] justificaren la fórmula mitjançant les lleis de Maxwell en un cas concret.

Maxwell-Wagner-Fricke

Wagner per una banda i **Fricke** per una altra, basant-se en les equacions de **Maxwell** i considerant partícules disperses, deduïren la permitivitat d'una barreja heterogènia de medi dispers (ϵ_2 , esferes molt disperses) i medi dispersant (ϵ_1) com el que es representa a la figura 1, on v_2 representa la fracció volumètrica de la fase dispersa.

$$\epsilon = \epsilon_1 \left(1 + \frac{v_2}{\frac{1-v_2}{3} + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1}} \right) \quad (2.6)$$

De vegades, el mateix resultat es designa com fórmula de **Maxwell-Lewin**.

Posteriorment, Clausius-Mosotti, Lorenz-Lorentz, Odelevsky (en la versió que parteix de les fórmules de Maxwell), Rayleigh, i Wiener n'han ampliat alguns aspectes [Backer, 1976], [Kobranova, 1989, pàg. 150], [Shutko, 1982]. Si es consideren partícules elipsoidals orientades en qualsevol direcció, la fórmula presenta anisotropia segons la direcció presa [Arulanandan, 1991], [Hasted, 1973, pàg. 123], [Sihvola, 1988]. La mateixa fórmula també es designa com de **Hashin-Shtrikman** [Giraud, 1984].

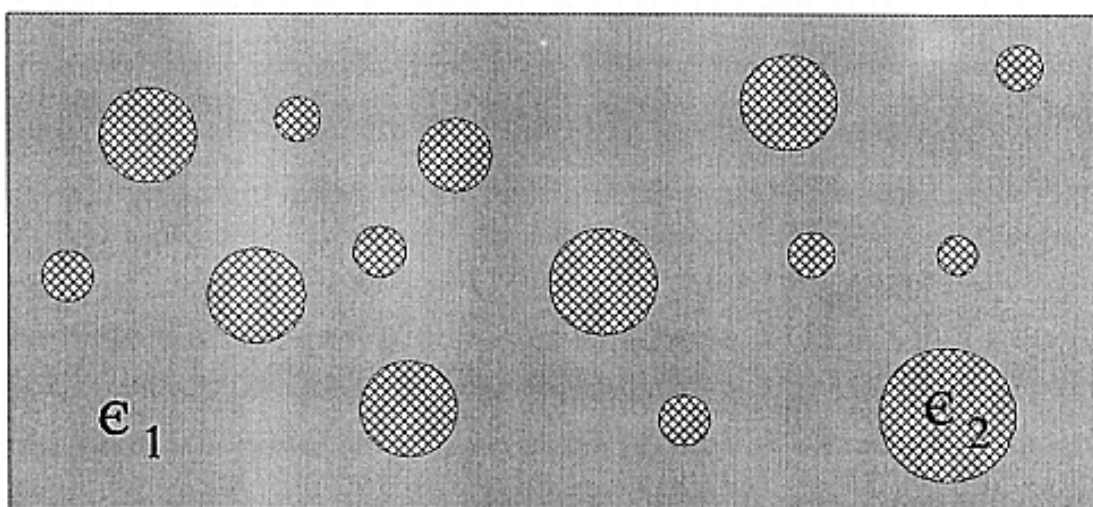


Figura 2.1 Dielèctric heterogeni format per un medi dispersant (ϵ_1) on el camp elèctric es suposa constant amb petites inclusions de permittivitat (ϵ_2).

Bruggeman-Hanai

L'equació 6 suposa que no hi ha interacció entre partícules perquè estan prou disperses. A partir d'aquest resultat, **Bruggeman** modificà les condicions de camp al voltant de la fase dispersa quan hi ha interacció i deduí el següent resultat, que **Hanai** generalitzà a variable complexa [Hanai, 1961], [Pethig, 1979, pàg. 160], [Shutko, 1982]:

$$\frac{\epsilon^* - \epsilon_2^*}{\epsilon_1^* - \epsilon_2^*} \left(\frac{\epsilon_1^*}{\epsilon^*} \right)^{1/3} = 1 - v_2 \quad (2.7)$$

Hanai desenvolupà aquesta equació complexa per a casos molt específics, com ara la barreja de fluids en prospecció petrolífera. L'aparició de fenòmens interfacials i de conducció, que es descriuen en el següent apartat, limiten el seu abast. Pearce

(1973), aplicà l'equació (2.7) i donà la conductivitat i permetivitat respecte el contingut d'aigua com fase dispersa tant a freqüències d'àudio com de banda P (225 a 390 MHz).

En una barreja de materials és raonable suposar una distribució geomètrica dels formadors tal que un envolta l'altre, com la closca d'un fruit sec que l'envolta. En els sòls, aquest fet s'esdevé en partícules col·loïdals (fase argilosa). La partícula o fase dispersa es forma d'una substància dielèctrica que embolcalla un nucli d'una altra substància. Aquesta partícula composta formada es submergeix en un altre dielèctric que actua de fase dispersant. Per exemple, Tinga (1973) aplicà la idea a un compost de cel·lulosa-aire-aigua en la fusta. Aquesta distribució geomètrica pot portar a casos límits d'apantallament si les permetivitats entre el que envolta (closca) i l'envoltat (fruit) són molt diferents. Així, tot i que les fraccions volumètriques siguin les mateixes, no és el mateix fer de closca o fer de fruit.

Odelevski (estadística)

Quan la diferència entre constants dielèctriques dels elements que componen la barreja (ϵ_1 i ϵ_2) és molt gran, les consideracions fetes sobre els camps als voltants de la fase dispersa no són tant acurades. **Odelevski** [Parkhomenko, 1967, pàg. 20], [Shutko, 1982] deduí la següent equació a partir de consideracions estadístiques de la distribució geomètrica de fases,

$$\epsilon = A + \sqrt{A^2 + \epsilon_1 \epsilon_2 / 2}$$

éssent

$$A = [(3 v_1 - 1) \epsilon_1 + (3 v_2 - 1) \epsilon_2] / 4 \quad (2.8)$$

on v_1 i v_2 són les respectives fraccions de volum de les fases que componen el dielèctric compost.

Lleis de distribució geomètrica

De tota manera, la llei més coneguda i deduïda de la disposició geomètrica dels constituents és la que es coneix amb el nom de **llei de distribució geomètrica sèrie-paral·lel** o de **Wiener**. El nom prové del càlcul de la permitivitat per a un model de condensador en el que el dielèctric es compon de dos dielèctrics homogenis diferents, ja sigui connectats en sèrie o en paral·lel. Les figures 2.2a i 2.2b il·lustren aquests dos casos amb el model circuital en la part inferior. La llei és certa sempre que no es considerin les interfícies [Tinga, 1973]. Segons aquest mètode, la permitivitat dels sòlids complexos, que és una altra manera de designar les barreges, respon a una equació de la forma, [Bogoróditski, 1979, pàg. 35], [Dobson, 1985, pàg. 44],

$$\varepsilon^x = \sum_i v_i \varepsilon_i^x \quad (2.9)$$

on $x \in [-1,1]$, és una variable d'ajust. Els valors extrems d' x corresponen a les cotes superior i inferior del valor de la permitivitat de la barreja [Taréiev, 1978, pàg. 207]. En particular, la figura 2.2a correspon a $x = -1$ i la figura 2.2b correspon a $x = 1$. Finalment, Pearson (1990) a través de l'aplicació de les condicions de contorn adjacents pel cas d'un condensador pla infinit de plaques paral·leles i del teorema de Gauss, trobà una equació integral per a ε per a barreges binàries. Aquesta equació coincideix amb 2.9 pels dos casos extrems $x = -1$ o 1. El mateix autor limita la validesa d'aquestes equacions a barreges sense pèrdues. Com a exemples, les equacions de V.T. **Renné** són una aplicació per a pel·lícules flexibles (determinació de ε del paper impregnat), mentre que la permitivitat d'un sòl humit considerades tres fases o la fórmula de **Falkenhagen** [Parkhomenko, 1967, pàg. 44] són aplicacions per a electròlits aquosos.

Si els sòlids es distribueixen de forma aleatòria i la barreja és força homogènia, quan el paràmetre x en la llei de distribució geomètrica (2.9) tendeix a 0, esdevé la **llei logarítmica** de barreges representada a la figura 2.2c si suposem els bocins prou petits, també coneguda com fórmula de **Lichtenecker-Rother** [Moreau, 1993],

$$\ln \varepsilon = \sum_i v_i \ln \varepsilon_i \quad (2.10)$$

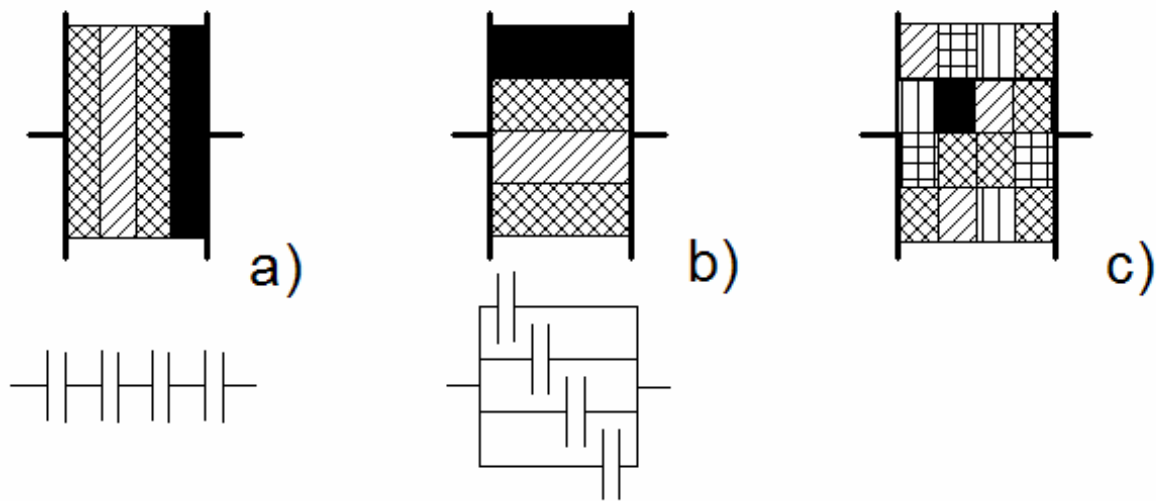


Figura 2.2 Models geomètrics i circuitals de les lleis de distribució geomètrica amb els valors del paràmetre $x=-1$, 1 i 0 en a, b i c respectivament.

El nexce entre fórmules deduïdes d'equacions d'electromagnetisme i de fórmules deduïdes de consideracions geomètriques el fan **Landau-Lifshitz**, (1975) [pàg. 55-6]. Cal suposar una barreja finament dispersa (emulsió, barreja de pols, ...), on es considera un camp elèctric mig en un volum molt més gran que la grandària del gra. Es demostra que si hi han petits increments de permitivitat local, i per tant de camp elèctric, la permitivitat total de la barreja esdevé l'equació (2.9) particularitzada per a $x=1/3$. **Looyenga** arribà al mateix resultat [Campbell, 1990], [Hasted, 1973, pàg. 122].

A manera de resum, Pethig, (1979) [pàg. 158] dedueix les expressions per a la permitivitat de barreges amb distribució aleatòria o ordenada de constituents.

2.2.2 Fenòmens interfacials: relaxació, partícules col·loïdals, doble capa

Un sistema de partícules senzill el formen partícules, interstícies —que són espais entre partícules—, i contactes intangibles o interfícies partícula-partícula i partícula-interstici. Des d'aquesta òptica, un sistema de partícules és un sistema heterogeni tot i que totes les partícules siguin iguals. Si es parla de característiques elèctriques, l'element més important sovint és la interfície [Backer, 1976]. Quan entren en joc càrregues elèctriques, els efectes que tenen sobre les interfícies modifiquen les prediccions de les lleis de barreges, segons es descriu en les casos següents.

La bibliografia bàsica d'electromagnetisme explica que la capacitat d'un condensador pla de plaques paral·leles, separades una distància d , augmenta si s'insereix un dielèctric convencional a l'espai de separació. Quan s'aplica un camp en el dielèctric, aquest es polaritza i una càrrega de desplaçament (lligada) neutralitza part de la càrrega elèctrica acumulada entre les plaques i disminueix la tensió per a una mateixa càrrega acumulada, amb el consegüent augment de la capacitat. Si es substitueix un gruix b en el centre del dielèctric per una placa conductora, el camp elèctric induïx una càrrega en un costat de la placa conductora del centre i una altra de signe contrari en l'altra, de tal manera que no hi ha camp en l'interior del conductor. El camp en la resta de l'espai és el mateix que en absència del conductor. La integral del camp en un espai més petit ($d-b$), en comptes de d , disminueix la diferència de potencial entre plaques

$$V = \frac{\sigma (d - b)}{\epsilon_0}$$

en comptes de

$$V = \frac{\sigma d}{\epsilon_0} \quad (2.11)$$

on σ és la densitat de càrrega. Com que es conserva la càrrega, la capacitat del nou dispositiu augmenta en la mateixa mesura que la tensió baixa, en un factor que depèn de la fracció de volum ocupada pel conductor. Si en l'interior del dielèctric s'insereixen petites esferes conductores en comptes d'una placa conductora, com indica la figura 2.3a, l'efecte és semblant. De fet, i a causa del camp exterior, s'indueix un dipol en cadascuna de les esferes [Feynman, 1972, pàg. 10-2-3].

En una barreja que conté una fracció (v_2) d'elements conductors, Giraud,

(1984) defineix el llindar de percolació (v_{2c}) com la concentració d'elements conductors a la qual el medi, aïllant per a petits valors de v_2 , esdevé macroscòpicament conductor. La permitivitat calculada a prop d'aquest llindar tendeix a infinit, de la mateixa manera que hi tendeix el valor de la capacitat quan el conductor tendeix a ocupar tot el volum ($b \rightarrow d$).

Molts sistemes heterogenis que contenen aigua, per exemple sòls, sistemes biològics, etc., tenen una permitivitat i unes pèrdues molt elevades a freqüències baixes. Tot i que les partícules o inclusions siguin conductores, valors tan alts de permitivitat no es poden justificar. Looor, (1983) resumeix les diferents causes de pèrdues en sistemes que contenen aigua en funció de la freqüència (relaxació del gel, relaxació de l'aigua lligada, relaxació de Maxwell-Wagner, doble capa i conductivitat superficial).

Dispersió de Maxwell-Wagner

La **relaxació** o **dispersió de Maxwell-Wagner**, també coneguda com conductivitat interfacial i polarització per càrrega espacial [Foster, 1989], [Rose, 1968, pàg. 266], consisteix en una dependència freqüencial de les propietats dielèctriques i conductores d'un material heterogeni que difereix de les dels seus components [Hasted, 1973, pàgs. 126-131], [Hippel, 1995b, pàgs. 228-231], [Pethig, 1979, pàgs. 150-158]. La relaxació s'il·lustra en la figura 2.3b com una generalització d'un condensador pla amb dos dielèctrics paral·lels a les plaques metàl·liques, en el que un té pèrdues per conducció, vist com la combinació sèrie de dos capacitats C_1 i C_2 ,

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

on

$$C_1 = \frac{A \varepsilon_0 (\varepsilon_1 - j \sigma_1 / \omega \varepsilon_0)}{d_1}$$

i

$$C_2 = \frac{A \varepsilon_0 \varepsilon_2}{d_2}$$

aleshores

$$C = \frac{A \varepsilon_0 \varepsilon_2 (\varepsilon_1 - j \sigma_1 / \omega \varepsilon_0)}{d_2 (\varepsilon_1 - j \sigma_1 / \omega \varepsilon_0) + d_1 \varepsilon_2} \quad (2.12)$$

on A és la superfície de les plaques metàl·liques i dielèctric, ε_1 i ε_2 són les constants dielèctriques relatives d'ambdós dielèctrics, d_1 i d_2 els gruixos respectius i σ_1 la conductivitat del dielèctric amb pèrdues.

Si es defineixen ε_s i ε_∞ com les permitivitats relatives en els límits de freqüència baixa i alta respectivament, resulten:

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_2 d}{d_2}$$

i

$$\varepsilon_\infty = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 d}{d_2 \varepsilon_1 + d_1 \varepsilon_2} \quad (2.13)$$

Atès que $\varepsilon_s > \varepsilon_\infty$, això significa que en un sistema de dos interfícies es produeix una dispersió dielèctrica, on s'apliquen les fórmules de Debye [Hippel, 1995, pàgs. 37-38], [Hasted, 1973, pàgs. 16-18] tant per a la constant dielèctrica com per a la conductivitat.

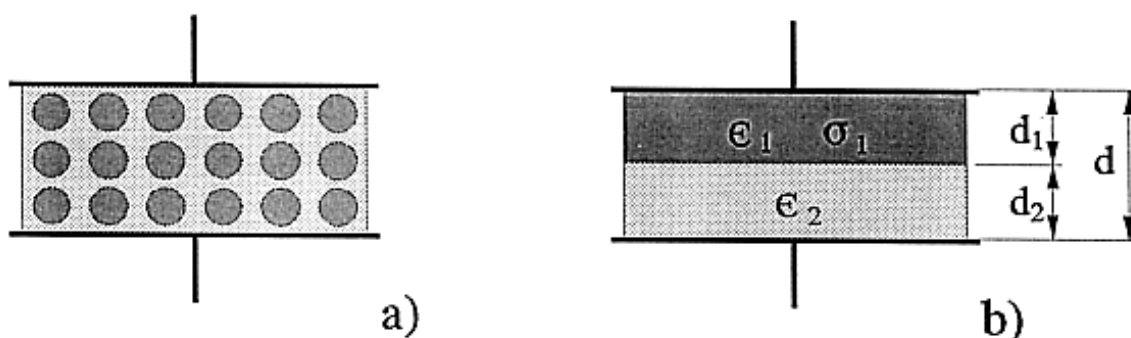


Figura 2.3 Condensadors amb dielèctrics contaminats amb elements conductors. a) esferes conductores. b) làmina amb pèrdues.

Un model circuital de la figura 2.3b que tingui $\sigma_1 // \varepsilon_1$ sèrie amb ε_2 , indica

que ε_s pot ser molt elevada però no correspon a un emmagatzematge real d'energia elèctrica que només seria la part corresponent a ε_2 . A més, si el model circuital es limita a $(\sigma_1//\varepsilon_1)$, llavors la part real de ε_s es manté constant però la part en quadratura de ε_s^* tendeix a infinit ja que té una singularitat a l'origen.

Aquesta dispersió freqüencial és possible quan una de les fases presents té molta més resistivitat que l'altra. Pethig (1979) [pàg. 153] ho matitza pel cas particular d'un sistema de doble capa (exemple generalitzat a que els dos tinguin pèrdues) quan es compleix que $\varepsilon_1 \cdot \sigma_2 \neq \varepsilon_2 \cdot \sigma_1$, és a dir, quan les constants de temps "intrínseques" d'ambdós dielèctrics difereixen. Campbell, (1990) explica aquests fenòmens de relaxació si es suposa una conductivitat superficial. Tanmateix, Giraud (1984) i col. comenten que si la configuració geomètrica és senzilla, o si la concentració d'una fase és petita o les permitivitats són semblants, aleshores les lleis de barreges que nomena "basades en medi efectiu i homogeneïtzat", descriuen de forma correcta el comportament del material.

L'exemple que es descriu a la figura 2.3 considera el comportament de dues llesques de dielèctrics diferents posades en sèrie. De forma anàloga, es pot analitzar el comportament de dues porcions de dielèctrics diferents posades en paral·lel. En aquest cas però, no hi ha dispersió ni que es considerin les pèrdues dels dielèctrics. Si es fa una combinació dels dos casos, resulta una porció primera que és el dielèctric 1 ($\varepsilon_1//\sigma_1$) i a sota el dielèctric 2 (només ε_2), i una porció segona que és al revés, la llesca de sobre de la porció és del dielèctric 2 (només ε_2) i la de sota del dielèctric 1 ($\varepsilon_1//\sigma_1$). Apareix una interfície que creua de dalt a baix les dues plaques de condensador, la qual cosa possibilita un camí conductiu (dielèctric 1, $\varepsilon_1//\sigma_1$) que emmascara el coneixement del corrent de desplaçament si la freqüència és prou baixa. Així, un cas real és l'extensió d'aquesta compartimentació a un nombre molt elevat de bocins [Macdonald, 1987, pàgs. 194-197].

Per a **Jonscher**, (1990) la susceptibilitat (o del decrement de la polarització) de materials polars es caracteritza per dos lleis de potència fraccionària en el marge freqüencial al voltant de la freqüència de ressonància, una per sota i l'altra per sobre. La relació entre part real i part imaginària de la susceptibilitat és independent de la freqüència en cada marge. També resulten constants diverses relacions de energia emmagatzemada i perduda en els mateixos marges. La relació val per a polímers i es basa en la interacció entre dipols i les cadenes polimèriques.

Partícules col·loïdals

Un altre efecte que es sobreposa als anteriors és la presència de **partícules col·loïdals en un electròlit**. Un col·loide és defineix com una substància formada per partícules o molècules grans, a nivell microscòpic, carregades i en suspensió d'aigua. La repulsió mútua de les càrregues fa que les partícules no precipitin. Un electròlit és una solució iònica, com una sal dissolta en aigua o un sòl humit [Wang, 1980]. La distribució d'ions atrets a la superfície de la partícula col·loïdal crea una densitat de càrrega ρ i un potencial ϕ . Aquests ions que neutralitzen la càrrega del col·loide s'anomenen "*counterion*" (ions contraposats). Pel cas unidimensional, l'equació de Poisson s'escriu com

$$\frac{d^2 \phi}{d x^2} = - \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.14)$$

i l'objectiu és saber com es distribueixen els ions sota l'acció d'aquest potencial. Per mecànica estadística s'arriba a una solució per al potencial de la forma exponencial —per al cas particular d'una solució diluïda— [Feynman, 1972, pàg. 7-11],

$$\phi(x) = A e^{-x/D}$$

on

$$A = \frac{\sigma D}{\epsilon_r \epsilon_0}$$

i

$$D^2 = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 k T}{2 n_0 q^2} \quad (2.15)$$

σ és la densitat de càrrega superficial del col·loide, k és la constant de Boltzmann, T és la temperatura en kelvins, n_0 és la densitat d'ions inicials i q és la càrrega d'un ió.

Segons l'equació (2.15), el potencial disminueix en un factor $1/e$ cada cop que la distància augmenta en D . La D s'anomena longitud de Debye i és una mesura del gruix iònic que envolta a les grans partícules carregades d'un electròlit. Si aquest gruix és fi, les partícules poden xocar, coagular i precipitar —si s'afegeix sal a un col·loide, floclula—. En aquest cas, les molècules d'aigua als voltants d'aquesta distància D es troben lligades i cal una energia d'activació per alliberar-les [Dekker, 1957, pàgs. 152-153]. Aquest concepte de relació entre dos substàncies no s'ha de

confondre amb el concepte d'energia d'activació que els llibres d'estat sòlid (e.g. [Taréiev, 1978, pàg. 69]) defineixen com l'energia necessària per a que apareguin diferents defectes (Schottky, Frénkel) en un cristall.

En un dielèctric format per unes partícules carregades dissoltes en un dissolvent que conté certa quantitat d'ions, Schwarz (1962) justifica la dispersió a freqüència baixa per la polarització de l'atmosfera d'ions (o doble capa elèctrica) contraposats al voltant de les partícules per acció d'un camp elèctric extern. El mateix autor comenta que si les partícules no són de mides uniformes, apareix un efecte de relaxació d'acord amb la distribució de mides de les partícules.

Doble capa

Els fenòmens anomenats de **doble capa** o d'**Stern** i **Gouy-Chapman** es manifesten en sòls de fase argilosa on les partícules (col·loïdals) tenen una càrrega negativa neta. Quan l'argila està eixuta es troben ions contraposats adsorbits fins a neutralitzar la càrrega. Si s'immergeix l'argila en aigua, la seva permitivitat elevada relaxa, és a dir, baixa la intensitat del camp elèctric creat prèviament. Així, es dissocien alguns ions adsorbits que tendeixen a difondre's cap a l'interior del líquid. S'hi oposen les càrregues negatives de la superfície argilosa i queden més concentrats als voltants de la paret on fan d'escut. L'estrat de cations en contacte directe amb la superfície argilosa s'anomena estrat de Stern. Després, amb una densitat menor de cations s'estén l'estrat difús o de Gouy-Chapman. El conjunt de cations adsorbits "lligats" en l'estrat de Stern o en el de Gouy-Chapman pren el nom de doble estrat elèctric.

Sen (1987) arriba a unes conclusions molt interessants sobre un model d'agrupació de cilindres carregats (partícules de sòl) immerses en un electròlit com per exemple una solució de clorur sòdic. Atesos els fenòmens elèctrics sobre la doble capa, demostra la relació no lineal entre la conductivitat del material compost i la conductivitat de l'electròlit, excepte el cas particular que la salinitat sigui molt alta (cas que s'extrapola en general i dóna resultats erronis) o que hi hagi una densitat o mobilitat superficial baixa que depèn de la densitat superficial d'ions contraposats, del coeficient de difusió a la doble capa, de la densitat d'ions llunyans

de la doble capa i del radi de les partícules.

Pethig, (1979) [pàg. 182] comenta que l'origen de la doble capa és el contacte de dos materials amb diferent afinitat pels electrons, i per tant l'equilibri termodinàmic s'obté pel desplaçament de les càrregues mòbils d'una fase a una altra, amb els corresponents increments de potencial, el que en física d'estat sòlid s'anomena nivell de Fermi.

Dobson, (1985) té en compte l'energia necessària per deslligar l'aigua de les proximitats de les partícules. Per aquest autor, la proporció d'aigua lligada i aigua lliure és funció de la relació entre volum i superfície de les partícules (màxima en partícules esfèriques i mínima en partícules tipus disc o tipus agulles).

Pethig, (1979) [pàg. 163] i Feynman, (1972) [pàg. 7-11-12] dedueixen la longitud de la doble capa en funció de temperatura i permitivitat. Bahaj, (1985) dóna un model elèctric que es basa en els models Cole-Cole.

Tot i el concepte únic que es dóna al terme aigua lliure i aigua lligada, aquest té matisos diferents segons els autors que es miri. D'una banda hi ha el concepte d'aigua que ajuda a deslligar el col·loide de les càrregues de signe contrari que l'envolten (doble capa), la qual cosa permet una interpretació físico-química del que passa. D'altra banda hi ha el concepte de molècules d'aigua que queden atrapades en argiles (adsorbida), o bé l'aigua que queda al voltant immediat de grans de sorra i no se sap exactament el perquè té una constant dielèctrica menor [Moreau, 1993].

Interfície elèctrode-electròlit

Finalment, el contacte de mesura **elèctrode-dielèctric** també és un fenomen interfacial. Així, Cobbold, (1974) [pàgs. 326-328] fa una descripció històrica de les diferents contribucions fins a arribar a les conclusions de Stern (sempre que es consideri el dielèctric compost com a electròlit). De fet, la interfície metall-electròlit actua com un condensador amb pèrdues [Wait, 1982]. Els models més senzills o més complicats acaben sempre amb algun paràmetre d'ajust segons les mesures realitzades [Macdonald, 1987, pàgs. 64-132].

2.3 Teories i models elèctrics de materials compostos aplicades a sòls

Llei d'Archie i altres lleis de potències sobre la conductivitat

Per calcular la resistivitat d'una roca (ρ) en funció de la resistivitat de l'aigua (ρ_w) que omple els porus i de la fracció de volum d'aquests (Φ), s'utilitza la llei empírica d'**Archie**,

$$\frac{\rho}{\rho_w} = A \phi^{-n} \quad (2.16)$$

on A i n , o paràmetre de cimentació, són constants d'ajust per a materials diversos. De fet, **Archie** proposà la llei sense A , que afegí Winsauer a posteriori. El valor d' A sembla que depèn de la textura de la roca i acostuma a valdre entre 0,5 i 1,5, i n entre 1,3 i 2,3. En l'annex II es detallen alguns valors d'aquestes constants per a diversos tipus de roques; les diferències entre valors depenen de les tortuositats dels camins conductius a l'interior de roques i sòls que il·lustra la figura 4. Els paràmetres de la llei d'Archie s'ajusten amb aquestes consideracions. La llei només val per a sòls saturats d'electròlit. Si l'aigua està parcialment desplaçada per un fluid no conductor —aplicació directa a prospecció petrolífera— s'observa que la resistivitat de la roca augmenta amb l'invers del quadrat de la fracció de porus (S) plena d'aigua si suposem que l'aigua envolta les partícules de sòl de forma completa [Parkhomenko, 1967, pàg. 277],

$$\rho = \frac{A \rho_w \phi^{-m}}{S^2} \quad (2.17)$$

Per tant, la resistivitat disminueix amb el quadrat del grau de saturació fins a un valor mínim.

La llei d'Archie es proposa per a l'estudi de roques. Nosaltres intentarem fer-la extensiva a l'estudi de sòls atès el seu caràcter empíric. L'equació (2.17) coincideix en forma amb un model empíric de Wang, (1980). En canvi, Hanai, (1961) proposa un model on la resistivitat disminueix amb el grau de saturació elevat a tres mitjos. En totes les fonts consultades, aquest exponent sempre és major que la unitat. Orellana (1982), [pàg. 70] analitza la validesa d'aquestes equacions ja que la resistivitat d'una roca, que depèn només de la resistivitat de l'electròlit que conté, és funció de set paràmetres d'ajustament; i Smith, (1981) que

troba una expressió racional entre conductivitats de roques i conductivitat de l'electròlit contingut té sis paràmetres aleatoris implicats en l'ajustament de corbes.

Malauradament, la llei d'Archie i variants no són vàlides quan les roques contenen argiles a causa de fenòmens de conducció superficial i ionització dels col·loides d'argila. Si disminueix la salinitat de l'aigua, la relació de la llei d'Archie (2.16) o (2.17) també disminueix. Lima i col. (1990) l'amplien per al cas d'argiles en funció de la seva distribució al voltant d'altres partícules minerals, ja que consideren la conductivitat superficial d'argiles com una conductivitat efectiva del volum equivalent. En sòls parcialment argilosos, diferencien les argiles que recobreixen unes altres partícules de les que en són fase dispersa.

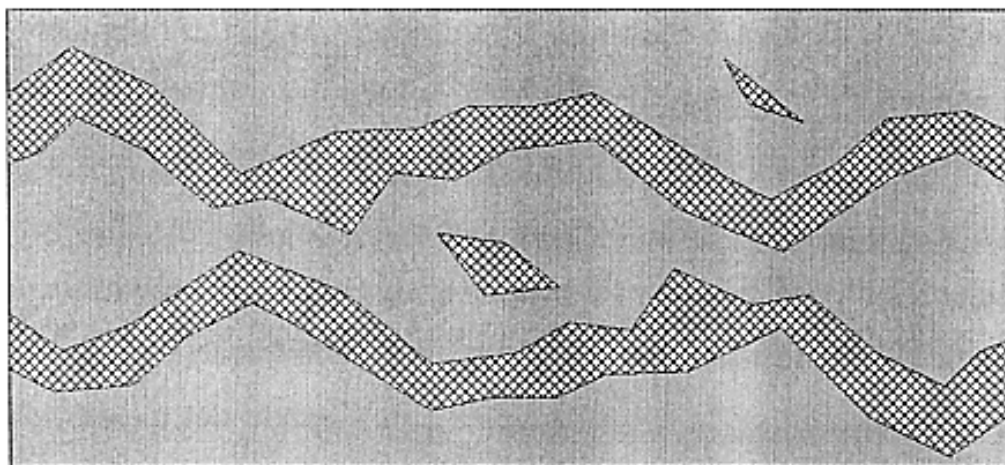


Figura 2.4 Secció d'un sòl rocós on la conductivitat és funció de la conductivitat de l'electròlit dins els porus i les fisures, i de la tortuositat d'aquestes.

La conductivitat està fortament influenciada per la composició química del sòl i no pas tant per la presència o absència d'aigua. Selig, (1975) formalitza un model en xarxa que simula el comportament circuital del sòl. Observa que la capacitat aparent canvia amb la freqüència encara que ϵ i σ dels constituents no canvii; la causa és la dispersió de Maxwell-Wagner que es descriurà més endavant en aquest mateix apartat.

Aquesta component "aleatòria" entre conductivitat i composició dels sòls, i la dificultat en la verificació experimental de les lleis [Katsube, 1973], fan que hi hagi molt poca bibliografia amb fórmules que relacionin conductivitat i fases del sòl. De fet, Maxwell (1891) descriví les condicions necessàries, com es veu en el text d'inici del capítol.

Finalment, Campbell (1990) observa una dependència gran entre part real i part imaginària —relacionada amb la conductivitat— de la permitivitat en el marge freqüencial de 1 MHz a 50 MHz.

Models d'inclusions conductores

Wait, (1982) modela un mineral amb partícules metàl·liques disseminades, com un medi homogeni d'una certa conductivitat, o fase dispersant, amb partícules esferoidals com a fase dispersa. La fase dispersa són les partícules metàl·liques recobertes d'un dielèctric amb pèrdues. L'autor troba les polaritzabilitats d'aquest model de material heterogeni. Té en compte la dimensió i forma de les partícules i els efectes de doble capa de la interfície partícula-solució. D'aquesta forma, dedueix les freqüències de dispersió de resistivitat complexa del material.

Giraud, (1984) introdueix el concepte de percolació com la fracció de volum dels elements conductors dins un dielèctric que fa que macroscòpicament el dielèctric esdevingui conductor.

Dobson, (1985) relaciona la permitivitat total amb les fórmules de dispersió de Debye i afegeix la conductivitat basant-se en la llei de barreges (2.9) amb tres fases que són el sòl i les aigües lligada i lliure mitjançant un model semiempíric.

Models d'humitat molt baixa

A una freqüència única, Parkhomenko (1967) [pàg. 45] descriu una relació gairebé lineal entre permitivitat de roques i grau de saturació d'aigua quan el percentatge d'humitat és inferior al 0,1%. En general, aquesta relació tendeix a un límit per a continguts majors, [Orellana, 1982, pàg. 89]. No obstant això, **Tarkhov** troba una relació exponencial entre contingut d'aigua (ω) i permitivitat de roques sedimentàries molt poroses (ε) quan la humitat és inferior a l'1%,

$$\varepsilon = \varepsilon_r \omega^n \quad (2.18)$$

on ε_r és la permitivitat de la roca seca i n un coeficient exponencial d'ajust empíric amb valors propers a 1/3.

Quan el contingut d'aigua és baix, **Alharthi** (1987) troba una relació racional entre el contingut d'aigua i la rel quadrada de les permitivitats dels constituents.

Models polinomials entre permitivitat de la barreja i fracció de volum d'aigua

Alharthi (1987) proposa un model polinomial de primer ordre quan el contingut d'aigua és elevat.

Topp (1980) relaciona de forma empírica mitjançant un polinomi de tercer ordre la permitivitat relativa (ϵ_r) i la fracció de volum d'aigua (ϕ),

$$\epsilon_r = 3,03 + 9,3 \phi + 146,0 \phi^2 - 76,7 \phi^3 \quad (2.19)$$

o

$$\phi = -0,053 + 0,0292 \epsilon_r - 0,55 \cdot 10^{-3} \epsilon_r^2 + 4,3 \cdot 10^{-6} \epsilon_r^3 \quad (2.20)$$

Tot i que treballa mitjançant reflectometria, aquestes equacions s'han utilitzat força en la bibliografia tant en el domini temporal com en el freqüencial a freqüències altes —iguals o superiors a VHF—.

Wang, (1980) proposa un model empíric per descriure el comportament dielèctric de les barreges sòl-aigua. Treballa a freqüències de microones on els paràmetres del model són els índexs de refracció del gel, l'aigua, el sòl i l'aire. Defineix la humitat de transició com el valor d'humitat a partir del qual la permitivitat varia significativament amb l'augment del contingut d'aigua (*Wilting Point*). Finalment, considera la humitat de transició com un paràmetre d'ajust que depèn del tipus de sòl i de la textura. Fa èmfasi a l'aplicació agrícola perquè l'aigua lligada —de constant dielèctrica més baixa— també està lligada per a les plantes, i per tant a les arrels els resulta difícil absorbir aquesta aigua.

Model semidispers

El **model semidispers** de **Wobschall**, (1977) considera el sòl no argilós compost com una barreja de diverses fases de partícules sòlides, aigua i buits en la

qual calcula la permitivitat complexa. Es basa en la teoria de barreges Hanai/Bruggelman/Wagner i la consideració que la conducció iònica de l'aigua com part medi dispers i part medi dispersant. Observa que el comportament de la constant dielèctrica a freqüència alta no depèn del tipus de sòl. Sí, en canvi, augmenta amb el contingut d'aigua. El sòl amb partícules amb esquerdes i porus fa de fase dispersa i dispersant respecte a l'aigua lligada o no. És un sistema multifase. Els càlculs es realitzen en quatre passes i sempre es consideren sistemes bifàsics:

- 1 -Càlcul de ε de les partícules conductores que consisteixen en una partícula no conductora amb esquerdes que contenen aigua.
- 2 -Càlcul de ε del material humit que consisteix en la partícula anterior amb aigua dispersa en els porus.
- 3 -Es dispersa el material anterior en l'aigua remanent.
- 4 -Finalment, es dispersen els buits que contenen aire en el resultat previ.

De tota manera, la validesa del procediment es limita a sòls sorrencs o llimosos. L'autor proposa un procediment en cinc passes per a argiles. Tran, (1981) detalla un càlcul iteratiu per seguir les passes proposades per en Wobschall.

Smith, (1981) descriu un model iteratiu que té en compte com es distribueix l'electròlit a l'interior i entre els grans o partícules de sòls. El model és similar al de Wobschall (1977), que a més considera les esquerdes de les roques que formen els sòls saturats, plenes d'aigua lligada. El model iteratiu parteix de les dades inicials de variació de ε i σ d'argiles saturades en el marge de radiofreqüència. El model elèctric equivalent té en compte la disposició física de les inclusions agrupades (*clusters*) dins de la fase dispersant, [Macdonald, 1987, pàgs. 194-197].

Model que es proposa

El **model** que es **proposa** aquí es basa en la llei de distribució geomètrica sèrie-paral·lel (2.9), que té simetria entre tots els formadors i té un paràmetre d'ajust, tot i que l'origen no són les lleis d'electromagnetisme de Maxwell.

La bibliografia suposa que la fracció inicial d'aigua que conté el sòl en

contacte íntim amb les roques està lligada i la seva permitivitat és semblant a la del gel, [Moreau, 1993], [Loor, 1983]. La permitivitat del gel és inferior a la de l'aigua líquida. Per tant, hauria de disminuir la permitivitat total de la barreja respecte al cas que tota l'aigua és deslligada. No obstant això, els fenòmens interfacials tendeixen a augmentar la permitivitat total i emmascaren aquest fenomen. Atès que el model que es proposa és empíric, no es considera la contribució de l'aigua lligada.

El model que proposem és doncs,

$$\varepsilon_r^x = \frac{\left[\sum_i^{\text{roques}} (v_i \varepsilon_{r_i}^x) \right] + v_{\text{buit}} + v_{\text{aigua}} \varepsilon_{r_{\text{aigua}}}^x}{k} \quad (2.21)$$

on hi ha un terme per a cada tipus de sòl present, es considera la fracció de volum que ocupa els buits (on $\varepsilon_r=1,0$) i la fracció de volum de l'aigua ($\varepsilon_{r_{\text{aigua}}}$). A més d'aquests termes, la ε_r total de la barreja conté un terme corrector "fictici" k per causa de fenòmens d'acumulació de càrrega (que depèn molt de la freqüència), per causa del possible efecte closca-fruit i la possible interfície amb els sensors. Finalment, el paràmetre d'ajustament k depèn de la presència de sals, on v són les fraccions parcials, ε_{r_i} són les permitivitats relatives dels formadors i ε_r és la permitivitat relativa de la barreja. A més de k , x també és un paràmetre d'ajustament suplementari.

2.4 Resum i conclusions

La conductivitat és una mesura del transport de càrregues en un material. Les càrregues són electròniques o iòniques. Atès que els sòls humits són electròlits, s'estudia el pas d'electricitat iònica a través d'un electròlit de referència com són les solucions salines. Això no obstant, la conductivitat està fortament influenciada per la composició química del sòl i no pas tant per la presència o absència d'aigua.

La permitivitat és la capacitat d'orientació elèctrica d'un material però sense transport efectiu de càrregues. Permitivitat i conductivitat es representen de forma conjunta mitjançant expressions complexes respectives. Això no obstant, la conductivitat causa una singularitat a la permitivitat complexa en continua.

Els materials compostos modifiquen les característiques elèctriques dels seus formadors o fases, no sols per la ponderació de les característiques de cada fase, sinó també per l'aparició d'interfícies i de la seva ubicació i distribució en el sí del material.

Per estudiar la conductivitat, es suposa que la conductivitat global només és funció de l'electròlit —aigua amb sals dissoltes en els porus del sòl— i que la fase sòlida és aïllant. La llei d'Archie és una llei empírica amb dos paràmetres d'ajust que relaciona la conductivitat d'una roca i la de l'electròlit interior si aquest satura tots els porus. Algunes modificacions posteriors permeten treballar amb roques parcialment saturats. Altres lleis empíriques potencials relacionen conductivitat d'un sòl amb la conductivitat de l'electròlit que conté.

La permitivitat d'una barreja s'estudia de dues formes diverses. La primera considera una fase dispersant on s'insereixen partícules de fase dispersa i s'estudia com modifica el camp elèctric a nivell global. La segona considera la barreja com un conglomerat de cèl·lules petites amb un paràmetre d'ajust geomètric que abasta totes les combinacions possibles.

Els fenòmens interfacials, a causa de les acumulacions de càrrega, limiten la validesa de les dues formes anteriors. En general, els fenòmens interfacials van lligats al transport o fixament de càrrega, més importants a freqüències baixes, que tendeixen a presentar un augment fictici de permitivitat. Looor (1983), conclueix que el comportament de sistemes heterogenis que contenen aigua és força

complicat a freqüències per sota les microones.

Amb aquest conjunt d'efectes microscòpics, es pot concloure que els models teòrics de característiques elèctriques de materials obtinguts de les lleis d'electromagnetisme són poc acurats quan no es consideren els efectes interfacials associats a les pèrdues. Els models que apareixen a la bibliografia i inclouen aquests efectes, són empírics amb justificacions més o menys teòriques. Per aquest motiu, proposem un model empíric amb una base teòrica que inclou un nombre ampli d'efectes —que s'originen en els fenòmens interfacials— en una variable d'ajust. Els resultats experimentals del capítol cinquè permetran validar o modificar aquest model.

3 MESURA D'IMPEDÀNCIA ELÈCTRICA DE SÒLS: MÈTODES CLÀSSICS

Para entender bien la historia [de l'abat Vallet, un autor menor que interpretà l'obra de *Santo Tomás* i que a través d'un llibre seu, Umberto Eco arribà a la solució dels seus problemes] tendria que explicaros cuál era el problema de mi tesis y cuál el escollo interpretativo en el que llevaba casi un año encallado. Como el problema no puede interesar a todos, digamos sucintamente que para la estética contemporánea el momento de la percepción de lo bello es por lo general un momento intuitivo, pero en Santo Tomás la categoría de intuición no existe. ... La solución estaba (y llegué a ella un mes antes de terminar la tesis) en el descubrimiento de que la contemplación estética correspondía al acto, mucho más complejo, del juicio.

Eco, U. (1977). Cómo se hace una tesis. 11ena edició, Gedisa, pàg. 174, 1992.

El mesurament d'impedància en electròlits presenta problemes d'acció química i tensió de polarització. La conducció d'electricitat en sòls és majoritàriament electrolítica [Harris, 1966, pàg. 297]. Tanmateix, tot i que cal emprar mètodes d'alterna, els mètodes de mesura d'impedància d'electròlits que s'utilitzen no difereixen dels emprats de forma habitual per a la mesura d'impedància elèctrica, això sí, amb una cura especial de la cèl·lula de mesura.

Els sòls es componen d'una fase sòlida (roques o partícules minerals), una fase fluïda (aigua) i buits. Les roques es classifiquen segons el seu origen en ígnies, metamòrfiques i sedimentàries. Però conèixer el comportament elèctric de les roques no significa conèixer o tenir una pista del comportament elèctric dels sòls, ja que intervé la fase fluïda i l'agregació de la roca (la granulometria o forma comú de classificació de sòls). Així doncs, cal mesurar els sòls com a tals, tot i que la interpretació de les mesures resulti difícil. Per exemple, Orellana (1982), [pàg. 76] presenta la paradoxa dels sòls que consisteix en sòls més molls (més saturats), i per tant susceptibles a tenir més ions dissolts, són menys conductors que sòls de llocs secs que tenen més ions per evaporació d'aigües subterrànies i que no pateixen tant arrossegament d'ions per pluges abundoses habituals com per exemple en la regió gallega.

De l'origen, de les relacions granulomètriques i del contingut d'ions, es justifica en part la dispersió de valors de paràmetres elèctrics d'un mateix sòl segons la bibliografia consultada [Orellana, 1982, pàg. 75], [Parkhomenko, 1967, pàgs. 24-29, 38-41, 88, 95, 104, 106, 108-113, 116, 122, 134], [Kobranova, 1989, pàgs. 184, 185]. L'altra part de la dispersió, es deu a la incertesa pròpia dels mètodes de mesura [Katsube, 1973]. És per això que cal plantejar la mesura d'impedància elèctrica de sòls des de l'òptica d'un enginyer elèctric de sistemes o d'equips de mesura i no tant sols des de la vessant geofísica com s'ha fet tradicionalment fins ara.

Aquest capítol conté quatre apartats. El primer descriu, de forma molt breu, les especificacions necessàries per a un sistema que mesura algunes característiques de sòls mitjançant impedància elèctrica. L'apartat, tot i que és genèric, s'enfoca cap a la mesura en el domini freqüencial. L'apartat segon presenta els mètodes de mesura d'impedància convencionals aplicats a sòls. L'apartat tercer presenta els errors de mesura que poden sortir quan es mesura conductivitat i permitivitat de forma conjunta. Finalment, l'apartat darrer presenta les conclusions de tot el capítol i fa èmfasi en aspectes prou importants que caldrà considerar en els mètodes de mesura que desenvolupem.

3.1 Especificacions per a un sistema de mesura d'impedància elèctrica per a caracterització de sòls

El mètode de mesura descriu la situació ideal mentre que el procés de mesura descriu la realització física del mètode. Els senyals de tensió i corrent elèctric són magnituds variables en el temps. De forma general, els mètodes de mesura es classifiquen segons el tipus de senyal amb que es treballa. Cada tipus de senyal té característiques diferents i provoca respostes diferents en el sistema que es mesura. Segons el conjunt o tipus de senyals excitadores, es treballa millor en el domini temporal o bé en el freqüencial. Idealment, cada domini caracteritza de forma completa el sistema que es mesura, i la solució és única.

Fins ara, l'ús del domini freqüencial en mesures tals com impedància, amplificació-atenuació, fase-quadratura, retard de grup i, fins i tot, distorsió no lineal, s'ha utilitzat més perquè, en general i per a una certa exactitud de mesura, resulta més econòmic a costa d'un temps major per fer-la. Actualment, tècniques com la TDR (reflectometria en el domini temporal) són una alternativa a les espectroscòpies en el domini freqüencial (EIS).

Les mesures amb sinusoidals caracteritzen de forma completa i exacta un sistema lineal, tot i que la caracterització no s'aconsegueix amb una sola mesura. A més, inferir una resposta transitòria a través de la transformada de Fourier de la resposta freqüencial, requereix més temps que fer una mesura directa del transitori i, en teoria (absència d'errors, interferències i soroll), contenen la mateixa informació. A la pràctica, aquesta afirmació no és certa del tot, els diferents pros i contres dels dos dominis de mesura fan cadascun d'ells més adient segons les circumstàncies. L'àmbit d'aquest treball es situa en el domini freqüencial pels temes esmentats d'exactitud i disponibilitat d'instrumentació en el laboratori.

3.1.1 Especificació dels errors i limitacions en les mesures d'impedància elèctrica en el domini freqüencial

La permitivitat elèctrica és una magnitud complexa, amb part real i part imaginària si es treballa en el domini freqüencial (vegeu equació 2.4). Si per mesurar la permitivitat d'un material s'usa una excitació (tensió o corrent) sinusoidal, cal desmodular de forma síncrona o coherent per preservar la informació de mòdul i fase. La part imaginària de la permitivitat predomina a freqüència baixa atesa la singularitat que té a l'origen.

Durant molts anys, la mesura en alterna d'un pont d'immitàncies ha estat el sistema amb major grau d'exactitud. Aquesta tècnica, que data dels principis dels anys 40, és lenta i requereix un cert grau d'entrenament per part de l'operari. Els ponts poden treballar segons el mètode de deflexió o segons el mètode de nul. La introducció d'altres tècniques, com ara nous analitzadors de xarxes que treballen fins a freqüències de VHF i UHF, competeixen amb els ponts en quant a exactitud i són molt menys costosos en temps i dedicació d'usuari.

En general, en aquest treball s'utilitzen instruments comercials autosuficients (*standalone*) que fan la desmodulació coherent mitjançant desmoduladors de fase amb detecció homodina, heterodina o bé superheterodina. A més, a freqüència baixa, la desmodulació síncrona o coherent es podria realitzar, de forma més econòmica mitjançant detectors de fase commutatats o basats en la tècnica de condensador flotant [Pallás-Areny 1993, 1994, 1995], tot i que no s'implementen en aquest treball.

Les rutines de calibratge [Honda, 1989, pàgs. C1-C2], [Suzuki, 1991], [Bao, 1993], [Ridler, 1993] corregeixen els errors habituals que té un sistema de deflexió respecte d'un de nul. Així, errors de linealitat, desplaçament i derives, típics d'un sistema de deflexió, es minimitzen si s'escolleixen de forma adient unes impedàncies de referència per al calibratge [Ridler, 1993], [Bragós, 1995].

Per raons de simplicitat en la descripció de les especificacions d'un sistema, les característiques d'exactitud i relacionades (e.g. linealitat) acostumen a especificar-se com un sol nombre. L'exactitud depèn dels errors sistemàtics i de la incertesa d'una mesura, i un sol descriptor no és suficient. Moltes vegades s'assumeix de forma implícita i errònia que l'instrument té les mateixes

característiques en tots els trams del marge de mesura. La forma en que l'error varia dintre del marge s'expressa com una no linealitat de les característiques de l'instrument. La desviació respecte d'una línia recta indica la linealitat del sistema. Aquesta desviació respecte la línia teòrica es mesura amb algun mètode conegut com el de mínims quadràtics, amb la imposició o no de que la línia recta passi per l'origen, o bé que passi pels extrems mesurats. La linealitat d'un instrument és el resultat d'un calibratge on es determina la resposta a un nombre limitat de valors de la magnitud que es mesura.

La resolució és el canvi més petit a l'entrada del sistema que és capaç de processar. La sensibilitat és la relació entre un canvi a la sortida i el canvi a l'entrada que l'ha produït. El marge dinàmic és la relació entre els nivells màxims i mínims de senyal que treballen amb una exactitud determinada. Aquestes especificacions varien amb el temps, fet que es descriu mitjançant les derives.

Una forma habitual de representar l'exactitud en alguns catàlegs tècnics és mitjançant un pla cartesià. Unes corbes de nivell, generalment concèntriques, són els límits d'exactitud segons una cota. Molts cops, l'eix d'abcises són freqüències i l'eix d'ordenades el paràmetre de mesura d'interès (e.g. mòdul d'impedància).

Els tres tipus de limitacions que influeixen en la configuració d'un diagrama d'exactitud són soroll, saturació i el que anomenem **emascarament**. El soroll és una font d'error que es defineix com un senyal present a la mesura que no porta cap informació útil. Pertorbacions estranyes, generades pel propi sistema o provinents de l'exterior, constitueixen un senyal de fons en el que està immers el senyal desitjat que es detecta. El soroll imposa una limitació d'exactitud quan el nivell de senyal és comparable (detecció de pic) o sensiblement inferior (detecció homodina) al nivell de soroll.

La saturació i els fenòmens no lineals són una font d'error inherent a qualsevol sistema lineal real, que es poden definir com la progressiva degradació de la resposta lineal en un sistema quan s'incrementa el senyal d'entrada per sobre un nivell superior a l'especificat.

L'**emascarament** és la interferència que es produeix entre un senyal de magnitud gran proper en algun sentit a un altre senyal d'informació diferent de magnitud petita. Dit d'altra forma, un senyal que porta una determinada informació es presenta com si portés informació d'un altre senyal. Per exemple,

l'emascament és un fenomen típic en el sistema auditiu humà que depèn de la forma que treballa l'oïda interna i que consisteix en un so que deixa d'escoltar-se per l'addició d'un segon so que és l'emascarador. En el cas present, es treballa amb dos senyals, senyal en fase i en quadratura, i pot passar que si tenen una amplitud molt diferent el gran emmascari el petit.

Tot i que el nom **emmascament** per descriure aquest problema és original d'aquesta tesi, alguns autors han tractat el tema quan el senyal en fase és molt major que el senyal en quadratura. Ploeg (1991), per exemple, mesura les propietats dielèctriques de sistemes conductors i es troba aquest problema. La solució que proposa és un calibratge amb un material de naturalesa física semblant al material que es mesura i d'igual conductància. Altres autors, en canvi, estudien la situació quan el senyal en fase és despreciable front el senyal en quadratura. Per exemple, Hill (1993) mesura la constant dielèctrica de materials amb pèrdues molt baixes ($\tan\delta \leq 0,001$), i s'interessa per la mesura complexa de fase i quadratura.

3.1.2 Representació gràfica dels errors en la mesura d'impedància complexa

Un sistema de representació gràfica d'exactituds resulta pràctic ja que la lectura d'informació és ràpida i es pot millorar l'exactitud mitjançant un desplaçament de la mesura cap a una zona del pla cartesià més favorable. Atès que aquí es mesuren magnituds complexes, el mateix tipus de representació esdevé un volum definit en un espai cartesià on els tres eixos són part real, part imaginària i freqüència ω , de forma alternativa, senyal en fase, senyal en quadratura i freqüència, i on les corbes de nivell són esferoides d'exactitud constant. Aquesta representació tridimensional, però, tot i que resulta possible, no és pràctica. És millor fixar un paràmetre i representar els altres dos com si dels talls d'esferoides es tractés. Si es parametriza la part real o la imaginària, o el mòdul i la fase, es tenen les representacions habituals. En canvi, si es parametriza la freqüència resulta interessant fer una representació IQ (I=fase, Q=quadratura), tal i com es mostra a la figura 3.1. El component de senyal en fase es representa en l'eix d'abcises i el component de senyal en quadratura en el d'ordenades.

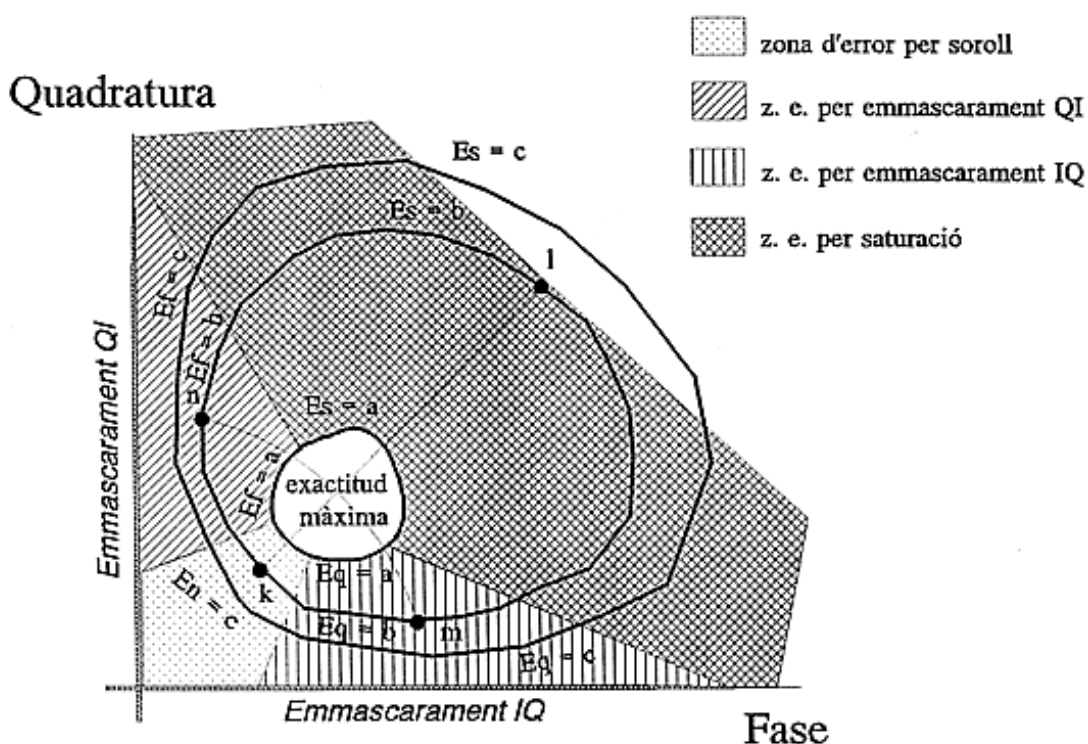


Figura 3.1 Factors d'errors en el pla complex. Les corbes de nivell de cotes arbitràries $a < b < c$ són projeccions dels esferoides d'exactitud.

La zona d'exactitud major és la zona de menor influència de les limitacions. El senyal més desafavorit marca els límits d'exactitud. Així, el senyal en quadratura marca els límits d'exactitud en la regió de domini del senyal en fase que és la regió delimitada per l'eix s'abcises i la bisectriu de l'eix d'abcises i el d'ordenades. De forma anàloga, el senyal en fase marca els límits en la regió de domini del senyal en quadratura –vegeu la figura 3.1–. Els símbols a , b o c ($a < b < c$) són diverses cotes d'error projeccions de l'ombra dels esferoides d'exactitud quan es parametriza la freqüència. L'error causat pel soroll (E_n), l'error causat per la saturació (E_s), l'error causat per la fase (E_f) i l'error causat per la quadratura (E_q) en cada un dels dominis del senyal conformen les cotes d'error esmentades.

El soroll i la saturació limiten l'exactitud i també el marge dinàmic. Establim un nivell d'exactitud " b " per a una freqüència de mesura determinada com es veu a la figura 1. Aleshores, definim el marge dinàmic com la distància $l-k$ expressada en decibels, on k i l són els punts d'intersecció de la bisectriu amb la corba isoerror " b ". Per a la mateixa exactitud " b ", proposem la definició del paràmetre **marge d'obertura** com la distància $m-n$ expressada en graus. El marge d'obertura indica el conjunt de valors d'un i altre component de la impedància que es poden mesurar amb incertesa menor o igual que " b ". Si hem definit el marge dinàmic en una condició favorable de mesura tant del senyal en fase com del senyal en quadratura, llavors el segment kl passa per la zona d'exactitud màxima. Cal procedir d'igual manera en la definició del marge d'obertura, i el segment curvilini mn també passa per la zona d'exactitud màxima. En certes circumstàncies molt desafavorides, el marge d'obertura pot ser insuficient.

3.1.3 Marges de mesura i incertesa acceptada

Si es consulten les dades de resistivitat o conductivitat de sòls a la bibliografia [Orellana, 1982, pàgs. 74-76], [Parkhomenko, 1967, pàgs. 111-113], la conclusió més evident és que el marge de resistivitats és amplíssim. Tot i si es descompten els minerals amb interès prospectiu (metalls, carbons), la presència o absència d'aigua salada provoca marges de resistivitat des de $10^{-1} \Omega\text{m}$ fins a $10^6 \Omega\text{m}$. Per exemple, la solució salina fisiològica —NaCl 0,154 N— té una resistivitat de l'ordre de $0,6 \Omega\text{m}$ a temperatura ambient —vegeu l'equació 2.3—; una aigua es considera dolça quan és al menys dos ordres de magnitud més resistiva. Aquesta dependència entre resistència elèctrica i concentració salina de l'electròlit que conté el sòl és la causa principal que fa que la mesura de resistivitat no s'utilitzi com indicador d'humitat d'un sòl.

La constant dielèctrica de les fases dels sòls sense interès prospectiu tenen una dispersió molt menor. La fase sòlida comprèn uns valors d'entre 1 i 10 [Orellana, 1982, pàg. 89], [Parkhomenko, 1967, pàgs. 38-41], i la fase líquida —aigua— té una permitivitat relativa als voltants de 80 [Stogryn, 1971]. No obstant això, l'aparició de fenòmens interfacials originats per acumulació de càrregues augmenta la permitivitat relativa de la barreja a límits molt superiors, fins a tres ordres de magnitud més, a freqüència baixa. De fet, l'augment de permitivitat és proporcional a una potència fraccionària negativa de la freqüència [Macdonald, 1987, pàgs. 75-78].

Un experiment mental mitjançant una cèl·lula capacitiva fa d'exemple i detalla els valors esmentats. La cèl·lula capacitiva plana de plaques paral·leles és prou gran per despreciar els efectes de vores. L'admitància d'aquesta cèl·lula plena d'un dielèctric de permitivitat relativa (ϵ_r) i amb una conductivitat (σ) és,

$$Y = G + jB = \sigma \frac{A}{l} + j\omega \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{l} \quad (3.1)$$

on A és l'àrea de les plaques i l la seva separació. La relació entre part real i part imaginària és independent de la geometria,

$$\frac{B}{G} = \frac{\omega \epsilon_0 \epsilon_r}{\sigma} \quad (3.2)$$

Aquesta relació porta conseqüències importants com es detalla tot seguit. La zona d'error per soroll o el nivell de senyal a la figura 3.1, k, no és molt important ja que sempre es pot injectar més senyal; en canvi, el segment kl o marge dinàmic de l'instrument de mesura sí que és important perquè limita el **marge d'obertura**. Suposem que es mesura un dielèctric amb una conducció apreciable i que a una freqüència determinada l'equació (3.2) pren el valor 10^{-3} . Si el marge dinàmic és inferior a 60 dB, o el conversor A/D no té 10 bits o més i no hi ha cap mecanisme de compressió, el **marge d'obertura** d'aquest instrument serà insuficient per poder determinar ε_r .

Si es quantifica l'exemple, la conductivitat pren un valor proper a la de l'electròlit que conté els sòls governat per la llei d'Archie ($\sigma \sim 1$ S/m). La freqüència de mesura és 18 kHz. La permitivitat relativa és de l'ordre de 10^2 si es suposa pocs efectes interfacials. Per tant, el marge dinàmic ha de ser com a mínim de,

$$\arctan\left(\frac{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r}{\sigma}\right) \cong \frac{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r}{\sigma} \cong 10^{-4} \Rightarrow 80 \text{ dB} \quad (3.3)$$

i el marge d'obertura,

$$\frac{180}{\pi} \left[\frac{\pi}{2} - 2 \arctan\left(\frac{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r}{\sigma}\right) \right] \cong 89,988^\circ \quad (3.4)$$

condicions molt restrictives però possibles en la pràctica si l'exactitud que es demana del senyal menor no és molt gran.

3.2 Mètodes convencionals de mesura d'impedància aplicats a sòls

La impedància elèctrica és una propietat fonamental inherent a qualsevol material. Això no obstant, la mesura d'impedància és indirecta i es calcula com la relació entre la tensió al llarg de la mostra i el corrent que la travessa. Hi ha diversos mètodes de mesura d'impedància o admitància que varien segons la mostra, el cost, l'exactitud requerida i les condicions de la prova. Les mesures en versions automatitzades de diferents ponts ofereixen exactituds de mitjanes a grans, simplicitat en el procés de mesura i sistematització.

L'avaluació quantitativa d'impedància d'un electròlit sovint s'aproxima per una combinació d'elements circuitalment ideals, [Macdonald, 1987, pàgs. 12-26, 84-132], que s'anomena circuit equivalent. El circuit equivalent s'usa en caracterització de sistemes, components electrònics o fins i tot cèl·lules electroquímiques. Això no obstant, no existeix l'equivalent d'un material de conducció iònica mitjançant elements passius habituals RLC (de conducció electrònica). En aquest cas, les corbes que es mesuren s'ajusten mitjançant funcions de transferència de potències fraccionàries. Així, cal afegir un element fictici anomenat CPE *constant phase element*, [Macdonald, 1987, pàg. 13], que aglutina tots els efectes interfacials i de transducció iònico-electrònica. Finalment, cal esmentar que els efectes de transducció tenen un comportament no lineal. Les mesures d'impedància d'un electròlit sòl amb qualsevol mètode -pont, mesura de constant de temps, circuit ressonant, TDR- cal que compti amb aquests efectes.

3.2.1 Mesures genèriques de la bibliografia

Les mesures de paràmetres elèctrics dels sòls es realitzen, en general, en marges de freqüències determinats. A freqüències baixes (<10 MHz) domina la polarització iònica. A freqüències majors (10 MHz-10 GHz) aquesta polarització tendeix a disminuir. A freqüències de microones i superiors (>10 GHz) es troben les relaxacions de la molècula d'aigua.

Els fenòmens interfacials microscòpics en electròlits heterogenis no són constants a totes les freqüències, tot i que sospitem que es noten més enllà del que diuen alguns autors [Arulanandan, 1991]. La prospecció geoelectrica es fa a freqüència baixa per problemes d'interferència i perquè no s'estudien els fenòmens de propagació d'ones en l'interior del sòl.

Gran part de la prospecció geoelectrica es fa amb senyal continu, [Orellana, 1982, pàgs. 104-141]. Parkhomenko, (1967) [pàgs. 79-184] realitzà un extens treball de recull i mesura de conductivitats en contínua de la fase sòlida dels sòls. El paràmetre mesurable en senyal continu és la conductivitat, [Brand, 1982]. Hayward (1984) mesura a freqüència molt baixa, amb el que detecta migracions electroquímiques, fenòmens interfacials (no massa ben estudiats encara) i el rovellament d'elèctrodes en produir-se reaccions redox en un sol sentit. Maruska (1988), trobà els valors de relaxacions amagades per dades amb soroll d'aquesta mena i fenòmens interfacials, però el sistema que proposà només valia per a materials amb un bon contacte amb l'elèctrode i poc conductor (cas dels líquids poc conductors).

Els mètodes capacitius aprofiten la relació de capacitats entre el condensador en buit i ple de dielèctric sòl que és el valor de la constant dielèctrica relativa d'aquest sòl, [Gaudu, 1993], [Katsube, 1973]. Alguns autors mesuren a freqüències més o menys fixes i suposen que les propietats dels sòls no depenen de la freqüència dins un cert marge, [Arulanandan, 1991], [Selig, 1975]. Altres autors mesuren en escombrats de freqüència més o menys amplis [Campbell, 1990], [Wobschall, 1977] per sota les ones centimètriques.

Finalment, alguns autors han estudiat els marges de radiofreqüències i freqüències de microones amb clares aplicacions a temes relacionats amb els ràdars [Birchak, 1971], [Hoekstra, 1974], [Schmugge, 1980], [Scott, 1992] o [Wang, 1980]. En aquestes freqüències, se suposa que no es produeixen fenòmens conductius i d'acumulacions de càrrega en el sí de materials heterogenis. Així, les mesures amb dos fils detecten la impedància de radiació d'algun element que actua com antena i que es basa en el teorema de Deschamps, [Deschamps, 1962].

3.2.2 Mesura amb dos fils

La forma més senzilla de mesura d'impedància és mitjançant dos fils o elèctrodes de contacte. L'exactitud de la mesura és funció de la relació entre la impedància que es mesura en front les impedàncies de contacte. No sempre és possible minimitzar les impedàncies de contacte. Un cop controlada la impedància de contacte, cal triar la topologia de les connexions. Es mesura per separat el corrent que passa a través de la mostra de material i la tensió que es desenvolupa pel pas d'aquest corrent. La figura 3.2 mostra les alternatives topològiques senzilles:

- la mesura de tensió en paral·lel a la mostra i tot en sèrie amb la mesura de corrent
- la mesura de corrent primer en sèrie i en paral·lel la mesura de tensió.

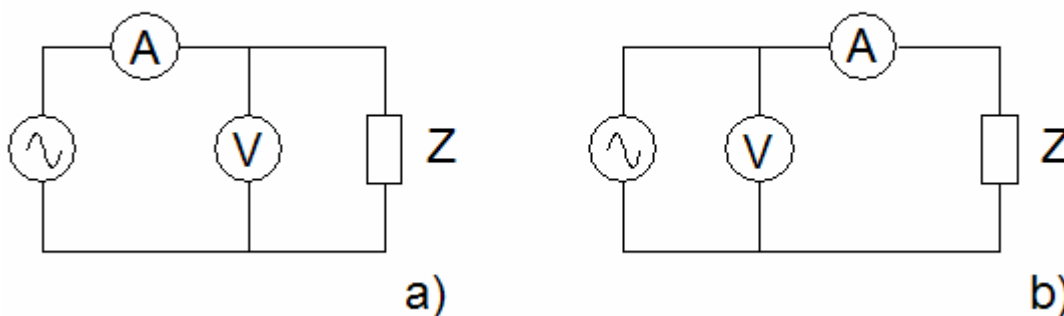


Figura 3.2 Alternatives de connexió de la mesura de corrent i tensió en una mesura amb dos fils.

La topologia en pont de Wheatstone, d'operació manual o automàtica [Coombs, 1995, pàg. 27.12], també és una mesura a dos fils i cal considerar-la com a tal. Quan es sospita que el corrent passa per un volum o superfície que no correspon a la mostra, molts cops brutícia, unes guardes asseguren l'encaminament del corrent (o del camp elèctric si es mesura permetivitat), [Parkhomenko, 1967, pàgs. 80-83]. També cal assegurar un bon contacte elèctrode-mostra, [Parkhomenko (1967), pàg. 79], [Orellana, 1982, pàg. 60-61].

Arulanandan, (1991), Giraud, (1984), Hayward (1984), Katsube, (1973) i Selig, (1975), per esmentar-ne uns quants, mesuren amb dos fils. Afirment que cal mantenir la conductivitat molt baixa ja que així eviten els fenòmens de transducció iònic-electrònica que augmenten la impedància d'elèctrode i falsegen les mesures,

[Katsube, 1973], [Maruska, 1988], [Gabrielli, 1990, pàg. 13], [Barlow, 1995, pàg. 22]. De fet, la mesura de permitivitat pura és una mesura del corrent de desplaçament que no comporta transducció iònico-electrònica. Aquestes propietats dielèctriques de materials a freqüències per sota 100 MHz es mesuren com la relació entre la capacitat d'un condensador amb dielèctric buit i dielèctric el material que s'estudia [Hippel, 1995, pàg. 47]. Si la mesura de permitivitat s'aïlla del corrent de conducció, no presenta problemes rellevants [Backer, 1975], [Hayward, 1984]. Aquest cas, però, només es produeix en alguns sòls molt secs que difícilment es troben en estat natural; per exemple, les sorres agafen aigua de la humitat ambient. En sòls naturals, la presència de corrent de conducció [Giraud, 1984] força un augment espectacular del marge d'obertura definit en l'apartat anterior. Lima (1990) no esmenta els mètodes utilitzats per mesurar i Looor (1983) obté unes propietats dielèctriques d'interpretació difícil a causa del paper de la conductivitat.

Com s'observa, la tècnica a dos fils només serveix per a sòls molt aïllants i per conèixer el corrent de desplaçament, dit d'altra forma la permitivitat, o per a electròlits líquids conductors homogenis amb la impedància d'elèctrode controlada. O el que és el mateix, en absència de fenòmens interfacials o acumulació de càrrega, tant a nivell de contacte en l'elèctrode com a nivell microscòpic.

Hi ha tècniques o topologies més sofisticades que eviten el fenomen de transducció electrònica-iònica en el contacte de mesura tot i que no eviten els fenòmens interfacials a nivell microscòpic o d'acumulació de càrrega en el sí del sòl electròlit heterogeni. Aquestes tècniques són les mesures amb quatre fils i derivades.

3.2.3 Mesures amb quatre fils

El mètode a quatre fils separa físicament els elèctrodes per on s'injecta i drena el corrent dels que mesuren la diferència de potencial que provoca el pas del corrent a través de la mostra. Els elèctrodes de potencial, en alliberar-se del transport de corrent, s'estalvien els problemes de transducció iònico-electrònica en la interfície de contacte elèctrode-mostra [Cogger, 1993]. El pont de Kelvin és una estructura a quatre fils pensada per a la mesura de resistències. Evolucions d'aquesta topologia es materialitzen en instruments comercials tipus bastidor,

[Honda, 1989]. Aquests instruments mesuren amb un pseudopont amb control digital de forma automàtica. L'inconvenient d'aquests analitzadors d'impedàncies, com per exemple el Hewlett-Packard 4192A o l'Schlumberger 1260, és que no permeten treballar amb impedàncies de contacte elevades —e.g. superiors a les impedàncies de mesura—.

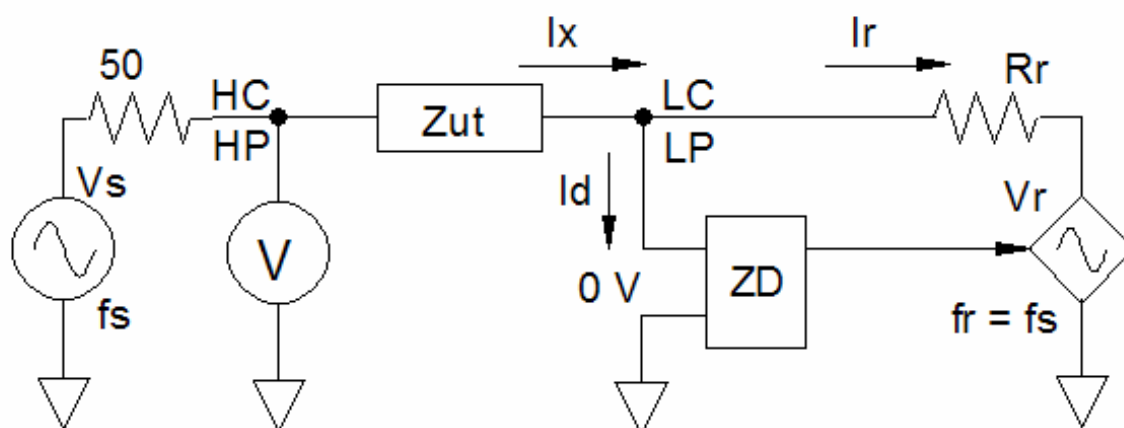


Figura 3.3. Esquema simplificat de funcionament de l'hp 4192A.

El principi de funcionament i configuració bàsica d'un d'aquests instruments, l'hp 4192A, es mostra a la figura 3.3. La font de senyal principal de freqüència f_s aplica una tensió de prova (V_s) a través del terminal HC (*High Current*) cap a la impedància que es mesura (Z_{ut}). El voltímetre (V) sensa una tensió a través del terminal HP (*High Potencial*) en un extrem de la Z_{ut} . Aquesta tensió crea un corrent (I_x) a través de la Z_{ut} . Part d'aquest I_x travessa la resistència de referència interna (R_r) cap a una font de tensió (V_r) enganxada en freqüència amb la font de senyal principal V_s . La resta del corrent, (I_d), es drena cap a un detector de zero (ZD) a través del terminal LP (*Low Potencial*). El ZD controla V_r . El conjunt que formen R_r i la font controlada V_r configuren el terminal LC (*Low Current*). El pseudopont funciona de la manera següent: el ZD varia el mòdul i la fase de V_r fins que la tensió a l'entrada del terminal LP i el corrent I_d s'anul·len, on la referència de tots els terminals és l'apantallament. Si la tensió a l'entrada LC és zero, el voltímetre V mesura directament la tensió que cau a Z_{ut} . Si I_d també és nul, tot el corrent que travessa la Z_{ut} , I_x , va a parar al terminal LC on es sensa com la relació entre V_r i R_r .

En general, aquests instruments de la generació de l'hp 4192A que es basen en pseudoponts presenten inconvenients quan les impedàncies de contacte són grans. En particular, quan la impedància de contacte del terminal LC és apreciable, respecte la R_r , les mesures estan fora d'especificacions de l'instrument. Aquest fet no l'adverteix el fabricant.

Per demostrar-ho, mesurarem una resistència d'1 k Ω amb una impedància de contacte al terminal LC de 0, 10, 100 i 1 k Ω . Presentem el resultat de les mesures a la taula 3.1. El catàleg de l'instrument especifica un error inferior a l'1% en tot el marge de mesures. L'experiment es repetí amb els altres terminals, LP, HP i HC i, com era d'esperar, els resultats de les mesures foren dins especificacions.

Rut	Mesura d'1 k Ω en mòdul (col. esqu. en k Ω) i fase (col. dreta en graus)									
	10 Hz		100 Hz		1 kHz		10 kHz		100 kHz	
Re\freq										
0 Ω	0,99	0	0,99	0	0,99	0	0,99	0	0,99	0
10 Ω	0,99	-3	0,99	-1	0,99	0	0,98	0	0,98	0
100 Ω	0,92	-30	0,97	-5	0,98	-2	0,98	-1	0,98	-1
1 k Ω	0,19	-88	0,86	-30	0,92	-5	0,93	-2	0,94	-7

Taula 3.1 Resultat de les mesures d'una resistència d'1 k Ω , R_{ut} , a varies freqüències quan a l'entrada LC connectem una resistència de contacte, R_e , de valors 0, 10, 100 i 1 k Ω .

Per resoldre aquest problema, cal assegurar que la impedància de contacte del terminal LC sigui sempre zero. Quan no sigui possible, com és el cas general de la mesura d'un electròlit, caldrà intercalar una etapa prèvia que logri que la impedància de contacte amb LC s'anul·li. El tema es tracta amb més profunditat en el capítol següent.

3.3 Errors en sistemes de mesura conjunta de conductivitat i permitivitat

Un aspecte que ha rebut molt poca atenció a la bibliografia sobre caracterització elèctrica de sòls, i en general en les mesures d'impedància complexa, és la influència que tenen els errors en la mesura d'una component de la impedància sobre l'altra.

3.3.1 Propagació d'errors en mesures de magnituds complexes

El desenvolupament teòric que es presenta tot seguit val tan quan es mesura la conductivitat d'un material dielèctric amb molt poques pèrdues (e.g. en geometria tipus condensador pla) com quan es mesura la constant dielèctrica d'un material molt conductiu com és el cas del sòl humit.

Si es mesura una magnitud complexa qualsevol

$$\overline{W} = W_R + j W_I \quad (3.5)$$

amb un instrument vectorial, on es mesura per separat la component real W_R i la component imaginària W_I , s'obté un resultat

$$\overline{W}_M = W_{RM} + j W_{IM} \quad (3.6)$$

on W_{RM} i W_{IM} són els valors respectius per a cada component. Per reduir la incertesa en W_{RM} i en W_{IM} , es mesura prèviament una magnitud de referència coneguda W^C i s'obté un resultat W_M^C

$$\overline{W}_M^C = W_{RM}^C + j W_{IM}^C \quad (3.7)$$

Es suposa que els errors de l'instrument no varien si el valor de W^C i el de W esperat són semblants i l'interval de temps entre les dues mesures es breu.

En magnituds escalars, la relació entre la mesura de la magnitud que es busca i la mesura de la magnitud de referència és la base del mètode de comparació per a la cancel·lació d'errors multiplicatius. Nogensmenys, per a una magnitud complexa es té,

$$\overline{W} = \overline{W_M} \cdot \frac{\overline{W^C}}{W_M^C} = (W_{RM} + j W_{IM}) \cdot \frac{W_R^C + j W_I^C}{W_{RM}^C + j W_{IM}^C} \quad (3.8)$$

i d'aquí, el càlcul dels seus components real i imaginari resulta

$$W_R = \frac{W_{RM} a_1 - W_{IM} a_2}{a_3} \quad (3.9a)$$

$$W_I = \frac{W_{RM} a_2 + W_{IM} a_1}{a_3} \quad (3.9b)$$

on els coeficients a_i prenen els valors

$$a_1 = W_R^C W_{RM}^C + W_I^C W_{IM}^C \quad (3.10a)$$

$$a_2 = W_I^C W_{RM}^C - W_R^C W_{IM}^C \quad (3.10b)$$

$$a_3 = (W_{RM}^C)^2 + (W_{IM}^C)^2 \quad (3.10c)$$

De fet, a_3 és pot veure com la particularització de a_1 quan $W_R^C = W_{RM}^C$ i $W_I^C = W_{IM}^C$. Les equacions (3.9) mostren una proporcionalitat (a_1/a_3) entre el resultat i la mesura, llevat d'un terme proporcional a la part respectiva en quadratura multiplicada pel factor a_2 . Aquest terme demostra que W_R depèn de W_{IM} i de W_{IM}^C , i que W_I depèn de W_{RM} i de W_{RM}^C . Aquest fet transcendeix quan el marge d'obertura és insuficient.

Llevat d'una qüestió de signe a (3.9a) i (3.9b), hi ha una simetria formal entre el valor de W_R i el de W_I . En un sistema de mesura conjunta de part real i part imaginària, aquesta simetria implica que les conclusions sobre les mesures de W_R són les mateixes que les conclusions sobre les mesures de W_I .

En absència d'errors de mesura, $a_1 = a_3$ i $a_2 = 0$, i els resultats de la mesura W_{RM} i W_{IM} coincideixen amb els valors reals W_R i W_I respectivament. En la pràctica, les mesures contenen errors tant per a la part real (e_R) com per a la part imaginària (e_I), i en principi tindrem $a_1 \cong a_3$

$$W_{RM}^C = W_R^C (1 + e_R) \quad (3.11a)$$

$$W_{IM}^C = W_I^C (1 + e_I) \quad (3.11b)$$

Si aquests errors fossin sistemàtics, es corregirien quan mesuréssim el material de referència. Però de fet, e_R i e_I poden ser cadascun d'ells aleatoris. Aleshores, la propagació d'errors fa que,

$$a_1 = (W_R^C)^2 (1 + e_R) + (W_I^C)^2 (1 + e_I) \quad (3.12a)$$

$$a_2 = W_I^C W_R^C (e_R - e_I) \quad (3.12b)$$

$$a_3 = (W_R^C)^2 (1 + e_R)^2 + (W_I^C)^2 (1 + e_I)^2 \quad (3.12c)$$

Per a qualsevol parella de nombres reals, com ara W_R^C i W_I^C , s'acompleix que

$$2|W_R^C W_I^C| \leq (W_R^C)^2 + (W_I^C)^2 \quad (3.13)$$

Per tant, per a qualsevol combinació raonable d'error ($|e_R|, |e_I| < 0,5$) tindrem $|a_2| < |a_1|$ sempre. És raonable que sigui així, perquè a_2 ideal és igual a zero, i si els errors són infinitèsims, aleshores $|a_2| \ll |a_1|$. Tanmateix, si hi ha força desequilibri entre W_R i W_I , W_{IM} pot dominar el resultat per a W_R , equació (3.9a), si $W_I \gg W_R$ i viceversa, W_{RM} pot dominar el resultat per a W_I , equació (3.9b), si $W_R \gg W_I$. En canvi, si $e_R = e_I = e$ és té que $a_2 = 0$ i $a_3 = a_1(1+e)$, i per tant

$$W_R = \frac{W_{RM}}{1 + e} \quad (3.14a)$$

$$W_I = \frac{W_{IM}}{1 + e} \quad (3.14b)$$

És a dir, només si hi ha el mateix error en la mesura de la part real i de la part imaginària, el resultat per a la part real no depèn del valor de la part imaginària, i recíprocament.

3.3.2 Aplicació a les mesures de permitivitat

En la mesura de permitivitat en un material molt conductiu, com pot ser un sòl, s'hi donen les condicions esmentades abans quan els nombres teòrics W esdevenen admitància (funció de les pèrdues del dielèctric i de la conductivitat) i susceptància (funció de la permitivitat). El marge d'obertura cal que sigui prou gros perquè l'admitància no emmascari el senyal que porta la informació de la permitivitat. Si prenem la formulació desenvolupada en l'equació (3.9b), en els casos on el resultat sigui una relació de valors complexos, quan $|a_2| \ll |a_1|$ però $W_R \gg W_I$, una petita desviació respecte el valor ideal pot produir resultats aberrants.

Suposem una cèl·lula capacitiva que s'omple d'un dielèctric que té una conductivitat gran. De vegades resulta complex conèixer la constant de proporcionalitat de la cèl·lula per càlcul o simulació ja que apareixen efectes geomètrics de segon ordre, fenòmens conductius [Ploeg, 1991] que emmascaren les dades, o efectes de transducció iònic-electrònic [Giraud, 1984]. En aquests casos, es calibra de forma prèvia la cèl·lula mitjançant un material de permitivitat coneguda ε^{*C} , que pot ser el buit. Aleshores, la constant de cèl·lula (k) és

$$k = \frac{\varepsilon^{*C}}{Y^C} \quad (3.15)$$

on Y^C és l'admitància mesurada amb aquest material de referència.

L'objectiu principal és conèixer la permitivitat del material que es caracteritza. De les equacions (2.4) i (3.15) es dedueix que la permitivitat és,

$$\varepsilon' - j\varepsilon'' = \frac{\varepsilon^{*C}}{Y_S} Y = \frac{\varepsilon'^C - j\varepsilon''^C}{Y_R^C + jY_I^C} (Y_R + jY_I) \quad (3.16)$$

on els subíndex R i I fan referència a part real i part imaginària del paràmetre que es considera, llevat de la part real i imaginària de la permitivitat que es designen d'acord amb el conveni més acceptat en la bibliografia ($\varepsilon' \triangleq \varepsilon_R$; $\varepsilon'' \triangleq -\varepsilon_I$).

Atès que l'objectiu és la mesura de ε' , si operem l'equació anterior de la mateixa manera que l'equació (3.9a) queda,

$$\varepsilon' = \frac{\varepsilon'^C a_1 + \varepsilon''^C a_2}{a_3} \quad (3.17)$$

on les magnituds complexes mesurades en aquest cas són admitàncies. No resulta estrany que ε' sigui funció de ε''^C ja que, en variable complexa, part real i imaginària estan relacionades, i els errors de mesura d'una de les parts influeix a l'altre com s'ha demostrat.

Un exemple numèric teòric il·lustra la problemàtica possible quan es determina la permitivitat en un material amb moltes pèrdues. Es mesura la permitivitat de solució salina NaCl 1,00 N a 20°C amb una cèl·lula capacitiva de 10 pF en buit, a una freqüència de 10 MHz. S'usa la solució salina fisiològica (NaCl 0,154 N) a 20°C com a material de referència (permitivitat ε^{*C}), [Stogryn, 1971],

$$\varepsilon^{*C} = 77,07 - j 2648$$

L'admitància teòrica d'aquesta solució amb aquesta cèl·lula és,

$$Y^C = 1,664 + j 48,43 \cdot 10^{-3}$$

La permitivitat de la solució salina 1,00 N

$$\varepsilon^* = 63,26 - j 14,79 \cdot 10^3$$

L'admitància teòrica d'aquesta solució amb dins la cèl·lula,

$$Y = 9,293 + j 39,75 \cdot 10^{-3}$$

Si es calcula $\varepsilon^{*C} Y / Y^C$, la solució coincideix amb ε^* .

Però si es considera l'error a les mesures, tant la de calibratge Y^C , com la de la mesura en sí, Y , llavors la solució és diferent. Un 10% és una cota d'error raonable a aquestes freqüències, per desajustaments dels models (efectes de segon ordre no considerats) i exactituds dels instruments comercials de mesura [Hippel,

1995, pàg. 300], [Yokogawa-Hewlett-Packard, 1987, pàg. 3-17]. Per exemple, si la incertesa és -10% de la lectura per a la component real i +10% de la lectura per a la component imaginària de l'admitància resulta,

$$Y_M = 0,9Y_R + j1,1Y_I$$

$$Y_M^C = 0,9Y_R^C + j1,1Y_I^C$$

Si es calcula $\varepsilon^* Y_M^C / Y_{MC}$, es podria inferir un error del mateix ordre que els errors de mesura, si no s'analitza el problema amb més cura. La solució és,

$$\varepsilon^* \text{"mesurada"} = -18,30 - j14,79 \cdot 10^3$$

S'obté, doncs, una permitivitat relativa (ε') negativa que no té sentit físic a aquestes freqüències. L'annex III descriu un experiment amb resultats de mesura reals que il·lustra la gravetat d'aquest problema.

3.4 Conclusions

El coneixement dels paràmetres elèctrics de les fases del sòl per separat no permet conèixer directament els paràmetres elèctrics del sòl. El sòl és un electròlit heterogeni i aquest fet condiciona el sistema per mesurar la seva impedància elèctrica. La mesura de forma conjunta de la part real i part imaginària de la impedància és un dels condicionaments més notables que imposa.

Si la part de la impedància governada per la conducció electrolítica, com és el cas d'un sòl humit, és molt més gran que la part de la impedància governada per la permitivitat, el sistema de mesura haurà de tenir un marge dinàmic superior a la relació entre ambdues parts. Aquest marge dinàmic l'hem anomenat marge d'obertura, ja que comparem dues quantitats que estan en quadratura.

En general, la bibliografia descriu mètodes genèrics de mesura d'impedància elèctrica de sòls sense comptar amb aquesta problemàtica específica de dispersió gran entre la component en fase i la component en quadratura de la impedància. El fet limita el nombre d'instruments o tècniques que mesuren de forma correcta les dues components al mateix temps. Aquesta omisió porta a resultats erronis si es produeix un emmascarament del senyal minoritzat.

La tècnica de mesura amb dos fils només serveix per a sòls molt aïllants i per conèixer el corrent de desplaçament, dit d'altra forma la permitivitat, o per a electròlits líquids conductors homogenis amb la impedància d'elèctrode controlada. O el que és el mateix, en absència de fenòmens interfacials o acumulació de càrrega, tant a nivell de contacte en l'elèctrode com a nivell microscòpic.

Sense comptar amb els problemes d'emascarament, la mesura de conductivitat amb quatre fils soluciona l'aparició d'una impedància de contacte a la interfície entre conducció iònica i electrònica. Malgrat tot, no pot compensar els efectes interfacials a l'interior del material.

Sempre que es mesuri amb un instrument no ideal conclourem que, segons les equacions (3.9a) i (3.9b), el resultat de la mesura pot ser aberrant si $W_{RM} \gg W_{IM}$ o bé si $W_{RM} \ll W_{IM}$, tot i que $|a_2| \ll |a_1|$ per a un cas habitual de mesura.

Finalment, cal avaluar amb molta cura la propagació d'errors en les mesures de magnituds complexes per relació —e.g. la mesura d'impedància elèctrica és indirecta i és la relació entre una tensió i un corrent—, on es determinen parts reals i parts imaginàries de forma conjunta. Si hi ha valors molt diferents entre ambdues parts i es consideren els errors de mesura, la component major emmascara la component menor i no es pot calibrar a menys que la part major sigui constant. Cal doncs, plantejar una acurada propagació d'errors abans d'analitzar els resultats.

4 MESURA D'IMPEDÀNCIA ELÈCTRICA DE SÒLS: MÈTODES DESENVOLUPATS

De cuantos manjares hay en esta mesa
cuál me hará más provecho y cuál menos
daño

Cervantes, M. de, (1615). Segunda parte del Ingenioso Caballero Don Quijote de la Mancha. Capítol 47. Donde se prosigue cómo se portaba Sancho Panza en su gobierno. Edició commemorativa del quart centenari del naixement de Miguel de Cervantes, Biblioteca Cúspide, Joaquín Gil. Editor, pàg. 973, 1947.

Per caracteritzar elèctricament els sòls amb independència de factors incontrolables, com passa quan es mesuren *in situ*, cal ficar les mostres dins les cèl·lules o contenidors específics, i connectar-les als instruments de mesura. Els instruments marquen els límits de les mesures, però de fet són les cèl·lules que, juntament amb les connexions i els procediments de calibratge, defineixen els mètodes de mesura i la idoneïtat a cada cas. El millor instrument real no combina bé amb una cèl·lula que el porta fora o en els límits del marge de mesura.

Aquest capítol es divideix en quatre apartats. En el primer es descriuen les diverses cèl·lules que hem dissenyat i construït per a la mesura de conductivitats i permitivitats, els seus avantatges i desavantatges, els termes d'error i els marges de funcionament de cadascuna d'elles. El segon apartat descriu els diferents instruments emprats per mesurar i incideix en aquells aspectes claus per a una aplicabilitat posterior de les mesures. El tercer apartat és el fil que uneix els instruments amb les cèl·lules i valora diverses possibilitats de connexionat i calibratge dels sistemes de mesura desenvolupats. Finalment, el darrer apartat presenta les conclusions del capítol.

4.1 Descripció de cèl·lules

La cèl·lula és un contenidor on es posa la mostra de sòl per tal de mesurar la seva impedància. De fet, hi ha cèl·lules comercials que mesuren dielèctrics líquids, però el seu preu elevat i la dificultat d'adaptar-les a les mesures de sòls ens porta a desenvolupar cèl·lules pròpies, adaptades a les diferents bandes de freqüència de mesura. En aquest apartat es descriuen: una cèl·lula de secció constant per a mesura de conductivitat en contínua i a freqüència molt baixa; una cèl·lula capacitiva amb guarda; la mateixa cèl·lula adaptada per treballar sense guarda; una altra cèl·lula capacitiva simètrica més petita; i dues cèl·lules de camps oberts per determinar la permitivitat complexa de la mostra. Les cèl·lules construïdes resulten òptimes amb alguna de les configuracions possibles de mesura. Tot i que siguin construïdes per mesurar conductivitat o permitivitat de forma específica, els papers són intercanviables en alguns casos.

4.1.1 Cèl·lula de secció constant per mesurar conductivitat

La cèl·lula que hem construït per determinar la conductivitat de materials és una secció de cilindre de poliuretà —figura 4.1— on $l_i=84,0$ mm és la distància entre elèctrodes injectors de corrent; l_v , de 20, 40 o 59 mm, és la distància entre elèctrodes detectors de tensió —punts no representades a la figura 4.1—; i $r=36,1$ mm és el radi de curvatura dels sectors circulars que fan d'elèctrodes injectors. Vegeu una imatge de la cèl·lula a l'annex V. La geometria és arrodonida en direcció transversal, amb un mínim nombre d'arestes internes per facilitar la mecanització i neteja de la cèl·lula. Aquesta cèl·lula portamostres aguanta els elèctrodes injectors i la mostra, mentre que les dues puntes detectores s'aguanten en una plaqueta de clorur de polivinil (pvc) que sura sobre la mostra.

El volum de la cèl·lula és un compromís entre una mida suficient per a que la mostra resulti homogènia i una mecanització no gaire pesada. La grandària del suport, que és un producte comercial adaptat a aquesta aplicació, fixa les dimensions de la cèl·lula, que són:

- distància elèctrodes injectors: $l_i = 84,0 \text{ mm} \pm 0,3 \text{ mm}$
- radi elèctrodes injectors (forma semicercle): $r = 36,1 \text{ mm} \pm 0,3 \text{ mm}$
- àrea elèctrodes injectors: $A = 2,0 \text{ cm}^2 \pm 0,1 \text{ cm}^2$
- distància elèctrodes detectors:
 - $l_{v1} = 20 \text{ mm}$
 - $l_{v2} = 40 \text{ mm}$
 - $l_{v3} = 59 \text{ mm}$.

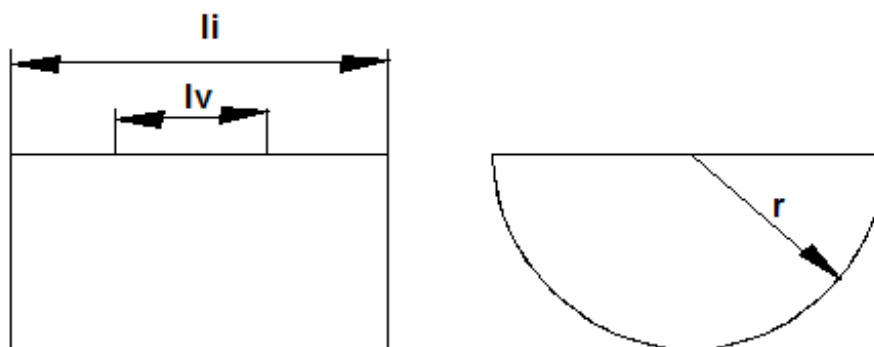


Figura 4.1 Esquema de la cèl·lula de mesura de conductivitat de forma semicilíndrica; $r = 36,1 \text{ mm}$, $l_i = 84,0 \text{ mm}$ i $l_v = 20, 40$ o 59 mm .

La resolució en la distància de separació dels elèctrodes detectors és baixa perquè les puntes d'elèctrode tenen una secció apreciable de $2,7 \text{ mm}$. Així, els elèctrodes injectors són el més grans possibles i els detectors tenen una superfície gravada que assegura el contacte entre elèctrodes i material.

La conductivitat (σ) de la mostra és funció de la conductància o resistència R que es mesura entre els elèctrodes injectors i detectors, i de la constant de cèl·lula,

$$\sigma = \frac{l}{R} \frac{l_v}{\pi r^2} = \frac{l}{R} [S] \cdot 28,8 \left[\frac{l}{m} \right] \quad (4.1)$$

on el factor de més a la dreta esdevé la constant de cèl·lula teòrica. El valor numèric que s'obté és pel cas particular $l_{v3} = 59 \text{ mm}$. En realitat, l'ús més estès d'aquesta cèl·lula és en continua i a freqüències baixes, on només es considera la relació de mòduls entre corrent injectat i tensió detectada.

Les fonts d'error mecàniques són: la tolerància de les dimensions físiques, les dilatacions i deformacions per efectes tèrmics i de pressió, el desviament de les

línies de corrent de l'eix de revolució, i l'error d'operari. A més, cal afegir la discrepància entre l_v física i l_v elèctrica efectiva atesa la secció no negligible de les puntes. Aquests errors sistemàtics fan necessari un calibratge d'aquesta cèl·lula de secció constant amb solucions salines de conductivitat coneguda.

Per calibrar, s'omple primer la cèl·lula amb aigua desionitzada i s'observa el límit pràctic inferior de mesura. El resultat que s'obté és $R=51 \text{ k}\Omega$, i per tant

$$\sigma = \frac{l}{R} \frac{l_v}{\pi r^2} = \frac{l}{51 \text{ k}\Omega} \frac{59 \text{ mm}}{\pi (36 \text{ mm})^2} = 0,57 \text{ mS/m} = 5,7 \text{ }\mu\text{S/cm} \quad (4.2)$$

Es preparen després dues solucions salines de KCl d'1,00 M i de 0,10 M. S'escull KCl en comptes de NaCl perquè la sal KCl no és higroscòpica i no cal assecar-la abans de pesar-la per fer la dissolució.

S'utilitza primer la solució 0,10 M per tenir una conductivitat elevada, i es suposa una dissolució de la sal del 100% a una temperatura de calibratge de 25°C. Per a aquesta solució es troba $R=27,6 \text{ }\Omega$, i per tant

$$\sigma = \frac{l}{R} \frac{l_v}{\pi r^2} = \frac{l}{27,6 \text{ }\Omega} \frac{59 \text{ mm}}{\pi (36 \text{ mm})^2} = 0,0105 \text{ S/cm} = 1,05 \text{ S/m} \quad (4.3)$$

La conductivitat teòrica d'una dissolució 0,100 M de KCl a 25°C és 1,29 S/m, com es comprova amb l'equació (2.3) si apliquem les dades de mobilitat del potassi [Orellana, 1982, pàg. 51]. Per tant, cal afegir un terme de correcció de $1,29/1,05 = 1,23$. Així, la constant de cèl·lula resulta,

$$\sigma = \frac{l}{R} \frac{l_v}{\pi r^2} 1,23 = \frac{l}{R} \frac{59 \text{ mm}}{\pi (36 \text{ mm})^2} 1,23 = 35,6 \frac{l}{R} [\text{SI}] \quad (4.4)$$

En l'extrem superior del marge dinàmic es mesura la solució 1,00 M a 25°C. La conductivitat teòrica és 11 S/m i obtenim $R=3,6 \text{ }\Omega$. Així doncs,

$$\sigma = \frac{l}{R} \frac{35,6}{\alpha} = \frac{l}{3,6 \text{ }\Omega} \frac{35,6}{\alpha} = \frac{7,9 \text{ S/m}}{\alpha} \quad (4.5)$$

Per tant, la constant de dissociació $\alpha = 7,9/11 = 0,72 = 72\%$ si assumim que el comportament de les interfícies es manté.

Les mides d'aquesta cèl·lula de secció constant fan que el component en quadratura del senyal detectat a freqüència baixa sigui molt petit, tot i que els fenòmens interfacials augmenten aquest component. Per aquesta raó, les capacitats paràsites presents en el circuit emmascaren la mesura de la part capacitiva de la impedància de la mostra. Aquest problema comporta que a freqüència baixa pràcticament només es detecta la conductivitat fruit de les sals amb ions dissolts gràcies a la presència d'humitat. No obstant això, el valor exacte de la conductivitat depèn també del tipus de sal dissolta en l'aigua així com de la presència de sals higrosolubles en el sòl sec.

Si es mesuren sorres, a l'hora d'omplir aquesta cèl·lula de secció constant cal compactar el material de manera uniforme per evitar que quedi cap esquerda que desvirtuaria la mesura.

Per finalitzar, cal mencionar que la conductivitat es pot mesurar amb dispositius i disposicions d'elèctrodes diferents on es calcula la constant de cèl·lula per a cada cas i es fa un calibratge posterior. Hi ha una taula amb informació addicional a la norma ASTM D257-92 (pàg. 6).

4.1.2 Cèl·lula capacitiva amb guarda per mesurar permetivitat: descripció mecànica i fonts d'error

Descripció mecànica de la cèl·lula

Una manera de determinar la constant dielèctrica de materials consisteix en mesurar la capacitat d'una cèl·lula de geometria coneguda, generalment plana. En la cèl·lula de la figura 4.2, l és el diàmetre de l'elèctrode intern –guardat–, l_g és el costat exterior de la guarda, g és la distància de separació elèctrode intern-guarda, l_c és el costat de l'elèctrode sense guarda i t és la separació entre elèctrodes –gruix del dielèctric que caracteritzem–, que en cap cas ha de ser superior a la meitat de l'ample de la guarda, on l'ample de la guarda és $(l_g - l)/2$. Aquesta configuració té una dimensió crítica t , ja que un error en aquest paràmetre repercuteix força en l'exactitud de les mesures. Vegeu una imatge de la cèl·lula amb guarda a l'annex V. Tanmateix, una topologia del tipus Thompson-Lampart [Thompson, 1959], més robusta a toleràncies mecàniques, no és una alternativa bona atès que la seva relació capacitat per volum de material és de només, 1,95 pF/m [Oliver, 1975, pàg. 312].

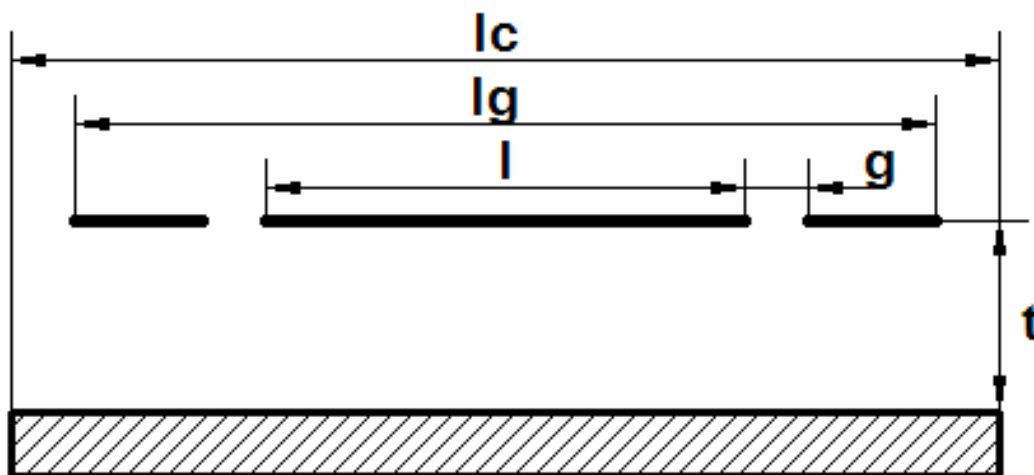


Figura 4.2 Secció transversal de la cèl·lula capacitiva amb guarda.

Aquesta cèl·lula amb guarda o conjunt d'elèctrodes entre els que es posa la

mostra, s'apantalla elèctricament i es connecta amb l'exterior a través de V_L i V_H tal com s'indica a la figura 4.3. Físicament, V_L i V_H són els vius de connectors BNC femella de panell. Per a cada tensió hi ha dos connectors en paral·lel; això permet fer una connexió directa amb un analitzador d'impedàncies, segons es veurà més endavant en l'apartat 4.3. La malla del cable coaxial que porta el senyal es connecta a la caixa metàl·lica que fa d'apantallament. En la figura 4.3, C_{ut} (*under test*) és la capacitat que es mesura; C_g (*gap*) és la capacitat associada a la que es mesura i, juntament amb ella, determina la superfície efectiva de l'elèctrode de mesura guardat; C_{gs} (*guard shield*) és la capacitat paràsita que hi ha entre l'elèctrode de guarda i l'apantallament; C_{ms} (*measured shield*) és la capacitat paràsita que hi ha entre l'elèctrode de mesura (guardat) i l'apantallament; C_{gu} (*guard unguarded*) és la capacitat paràsita que hi ha entre l'elèctrode de guarda i l'elèctrode sense guarda (no guardat); i finalment, C_{us} (*unguarded shield*) és la capacitat paràsita que hi ha entre l'elèctrode sense guarda i l'apantallament.

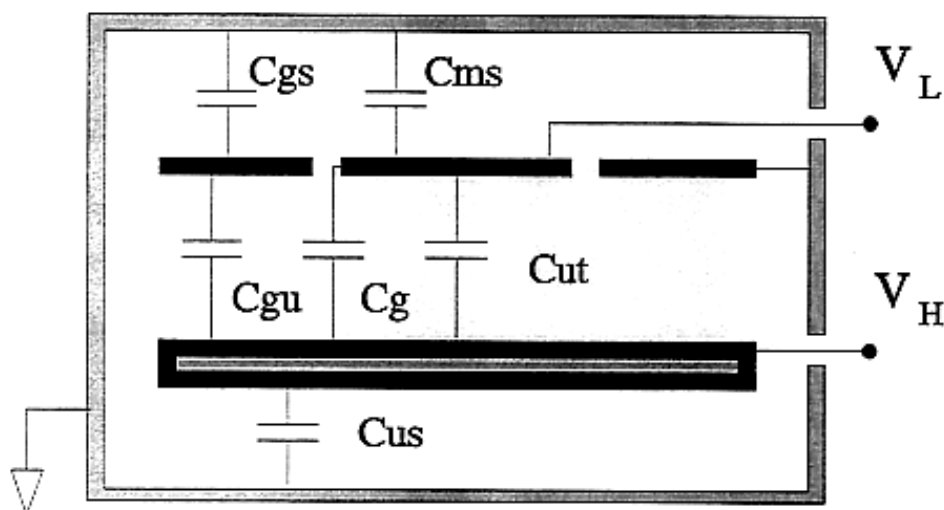


Figura 4.3 Esquema mecànic-elèctric de la cèl·lula capacitiva amb guarda, on s'indiquen l'apantallament i diferents capacitats modelades.

La construcció d'una guarda al perímetre exterior de la cèl·lula capacitiva —figures 4.2 i 4.3— evita l'efecte de vores. Els termes d'error a causa d'aquesta construcció s'analitzen més endavant en aquest apartat mateix. La capacitat entre elèctrodes és, [Hippel, 1995, pàg. 48]

$$C_{ut0} (+C_{g0}) = \varepsilon_0 \frac{\pi (l_{ef}/2)^2}{t} \quad (4.6)$$

on, C_{ut0} és la capacitat que es mesura en buit, C_{g0} és la capacitat equivalent en buit

de l'espai que s'afegeix a la capacitat que es mesura, ϵ_0 és la constant dielèctrica del buit (8,8542 pF/m) i l_{ef} és el diàmetre efectiu de la superfície del condensador pla; l_{ef} satisfà un valor numèric entre l i $l+g$.

La figura 4.4 mostra l'esquema mecànic d'aquesta cèl·lula capacitiva amb guarda. Els dos gruixos possibles de la peça central que permeten variar C_{ut} es dibuixen en el despeçament. Augmentar el gruix de la peça central és interessant quan mesurem partícules de mides comparables al gruix més petit —graves—. Els cargols metàl·lics de les cantonades subjecten les peces; els dels costats —en el centre de les cares— subjecten a la tanca lateral la tapa superior, que conté dos elèctrodes. Les parts que componen aquesta cèl·lula són:

- l'elèctrode sense guarda fet de planxa de llautó de 5 mm de gruix, rectificada i amb un bany de níquel de 10 μm que n'evita la oxidació.
- les tanques laterals de gruixos diferents que són de planxa de clorur de polivinil —pvc— buidada i fressada en l'interior per confinar el dielèctric.
- l'elèctrode guardat i l'elèctrode de guarda fets de placa de circuit imprès amb coure de gruix 30 μm i amb un bany de níquel de 10 μm , sobre fibra de vidre de 1,6 mm.
- una contra-tapa de "baquelita" de 5 mm de gruix per augmentar la rigidesa mecànica dels dos elèctrodes del circuit imprès.

Finalment, una gàbia de Faraday envolta completament tota la cèl·lula capacitiva amb guarda. La gàbia s'ha construït a partir d'una caixa d'alumini comercial de 205x205x105 mm.

La guarda evita l'efecte de vores que es manifesta en una curvatura de les línies de camp elèctric i en la influència de la zona on el dielèctric no és el material que es caracteritza. Perquè sigui efectiva, la guarda ha de tenir una amplada superior al doble de la distància entre plaques de la cèl·lula i el perímetre de l'elèctrode sense guarda ha de ser major que el de la guarda [Hippel, 1995, pàg. 48].

Les dimensions s'escullen per a què a 10 kHz la impedància màxima d'aquesta cèl·lula amb guarda buida quedi al voltant d'1 $\text{M}\Omega$, que és l'ordre de magnitud màxim que mesura l'analitzador d'impedàncies hp 4192A. Les dimensions emprades són:

- diàmetre elèctrode interior —guardat—: $l = 84,7 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$.
- distància elèctrode amb guarda-guarda —gap—: $g = 1,0 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$.
- diàmetre o costat exterior guarda: $l_g = 131,5 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$.

- costat —és quadrat— elèctrode sense guarda: $l_c = 163,0 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$.
 - gruix de la metal·lització de l'elèctrode guardat: $a = 4 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$.
 - gruix material —es pot triar—: $t = 4,05 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$ o $10,22 \text{ mm} \pm 0,07 \text{ mm}$.
- El cas de referència és per a $t=4,05 \text{ mm}$, si no s'esmenta el contrari.

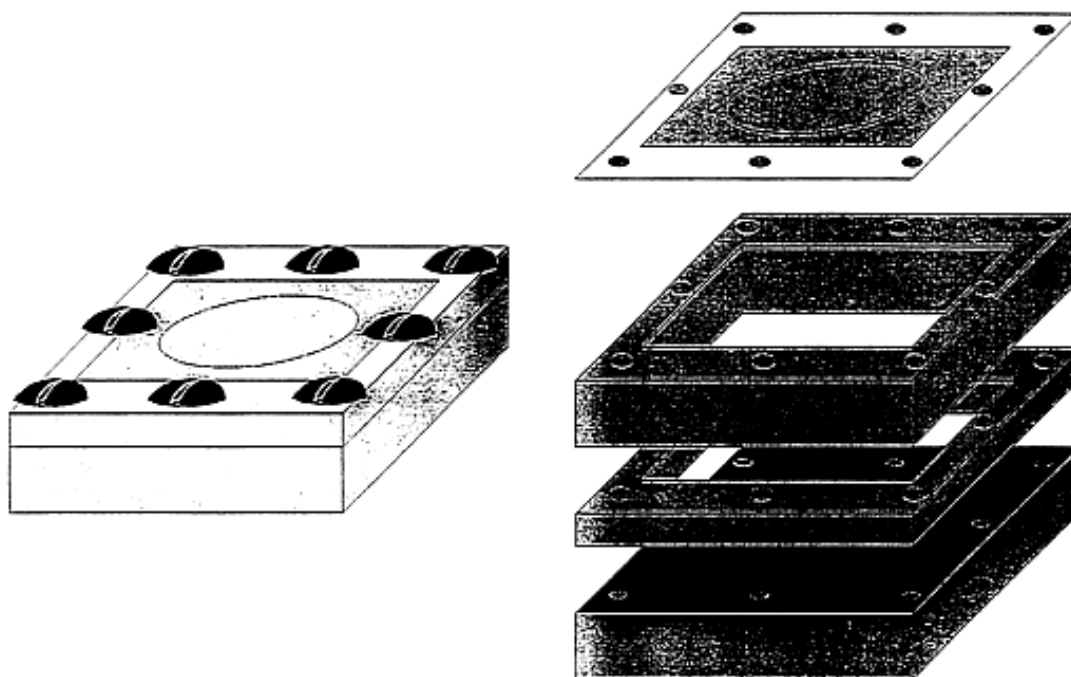


Figura 4.4 Perspectiva i despeçament de la cèl·lula capacitiva amb guarda sense l'apantallament.

La indeterminació en la mesura dels termes l i g prové de la resolució màxima del peu de rei. En canvi, les toleràncies de lg i lc no són crítiques ja que no incideixen en el resultat de la mesura. Tanmateix, la indeterminació en la mesura de t és la més crítica i prové de les consideracions següents:

- s'ha mesurat vuit vegades el gruix t en diferents zones de la superfície amb un resultat mig $m=4,05 \text{ mm}$ i una desviació ajustada [Pallàs, 1995, pàgs. 33, 34] $s=0,04$ per al gruix nominal de 4 mm , i $m=10,22 \text{ mm}$ i $s=0,06 \text{ mm}$ per al gruix nominal de 10 mm .
- si es considera un nivell de confiança del 99%, mitjançant els valors d'Student (3,50) [Cunningham, 1981], [Pallàs, 1995, pàg. 84] s'obtenen les desviacions esmentades dels valors mitjos.

Així, quan $t=4,05 \text{ mm}$, aleshores $C_{ut0} (+C_{g0}) \cong 12,61 \text{ pF}$ i quan $t=10,2 \text{ mm}$, $C_{ut0} (+C_{g0}) \cong 5,00 \text{ pF}$, valors que coincideixen amb les previsions [Goad, 1990].

Quan la separació g entre l'elèctrode i la seva guarda és comparable a la distància entre elèctrodes, t , Goad (1990) recomana elèctrodes gruixuts o un contraelèctrode per tenir C_g –capacitat equivalent de l'espai de separació– coneguda. Aquest no és el nostre cas. Albella (1993) i Hippel (1995) descriuen cèl·lules que es consideren un cas particular de la de Goad, (1990) i avaluen la capacitat deguda a l'espai entre l'elèctrode i la seva guarda.

Per evitar l'efecte de Maxwell-Wagner o fenòmens interfacials cal assegurar el contacte entre elèctrodes i material. De vegades es pulveritza la superfície del material que es caracteritza amb pintura conductora o es diposita una làmina fina rugosa conductora que elimina la capacitat paràsita en sèrie amb el que es mesura com a resultat del mal contacte entre elèctrode i material. La solució que hem adoptat nosaltres com a primera precaució per facilitar aquest contacte és rebaixar 0,1 mm la vora inferior de la fibra de vidre de la placa on hi ha l'elèctrode amb guarda.

Fonts d'error

Una cèl·lula capacitiva sempre porta associat termes d'error per molt ben construïda que estigui. En el nostre cas n'hem identificat els següents:

- 1- La tolerància de les dimensions físiques és un problema que admet calibratge. Malauradament, la manca de rigidesa dels materials de la cèl·lula no. Per aquesta raó, cal afegir una planxa dura a la de fibra de vidre o altre material aïllant per donar més rigidesa mecànica als elèctrodes.
- 2- Les dilatacions tèrmiques dels materials. En conseqüència, cal mesurar a temperatura constant. Les mesures es realitzen al voltant de 20°C.
- 3- El diàmetre efectiu de la cèl·lula amb guarda [IEC 250 69, pàg. 45], [ASTM D257-92, pàg. 14], [ASTM D150-92, pàg. 36]. A més, Goad, (1990) contempla i amplia les dues referències anteriors i suggereix unes equacions aproximades. Aquest autor calcula una capacitat afegida causada per l'espai entre l'elèctrode guardat i la guarda, equació 4.6, en comptes de considerar la presència d'aquest espai mitjançant la definició d'un radi efectiu.

- 4- L'amplada de la guarda no és una font d'error en sí, però és més fàcil quantificar el valor de C_g si l'ample de la guarda és gran en comparació a g .
- 5- El desviament de la trajectòria recta de les línies de camp en els extrems de la guarda. Heerens, (1975) descriu un cas semblant de desviació de línies de camp.
- 6- La presència d'aire en comptes de buit, ja que la ϵ_r de l'aire no és exactament 1. L'aire sec a 23 °C i 101,3 kPa té $\epsilon_r=1,000536$ [Feynman, 1972, pàg. 11-12].
- 7- Les capacitats paràsites C_{gs} , C_{ms} , C_g i C_{us} . Hippel, (1995) les formula i descriu el seu apantallament i connexió a massa. S'avalua el seu valor en ASTM D150-92 (pàg. 26).
- 8- La inductància paràsita sèrie que apareix en els connectors físics i que pertorba la mesura a freqüència alta. Es documenta a ASTM D150-92 (pàg. 35).
- 9- La rigidesa mecànica dels materials de suport, tant la planxa de llautó com la planxa de "baquelita". Es suposa una corbatura efectiva no superior a 0,01 mm sobre 4 mm d'alçada de material. Cal tenir molta cura d'aquest factor si es prem fort el dielèctric entre els elèctrodes. Aquesta corbatura màxima porta un error de 0,25% en la mesura de la capacitat, que és la contribució d'error major vista fins ara.
- 10- Els fenòmens interfacials indesitjats. Per aquesta raó, cal assegurar el contacte elèctrode-material.
- 11- Finalment, cal considerar el propi error humà. Aquest error es minimitza amb un procediment de realització normalitzat, i amb unes fitxes de dades per a cada mesura, com es descriu en la norma IEC 250 69 (pàg. 29). Aquestes fitxes han d'incloure,
 - tipus, designació, adquisició i descripció de la mostra
 - mètode de condicionament de la mostra
 - configuració d'elèctrodes
 - aparell de mesura

- condicions externes de temperatura, i humitat i temperatura de la mostra
- tensió aplicada
- freqüència de mesura: escombrat o una de sola
- ϵ_r esperada i mesurada, cota d'error
- $\tan \delta$ esperada i mesurada
- data de l'experiment.

A l'annex IV hi ha el model de fitxa que s'ha utilitzat en aquest treball.

Un cop detallades les possibles fonts d'error cal agrupar-les i quantificar-les, com veurem a l'apartat 4.3. A més, convé avaluar per sobre la capacitat paràsita total (C_p) mitjançant la mesura de capacitat de la cèl·lula amb la massa connectada a V_L —figura 4.3—.

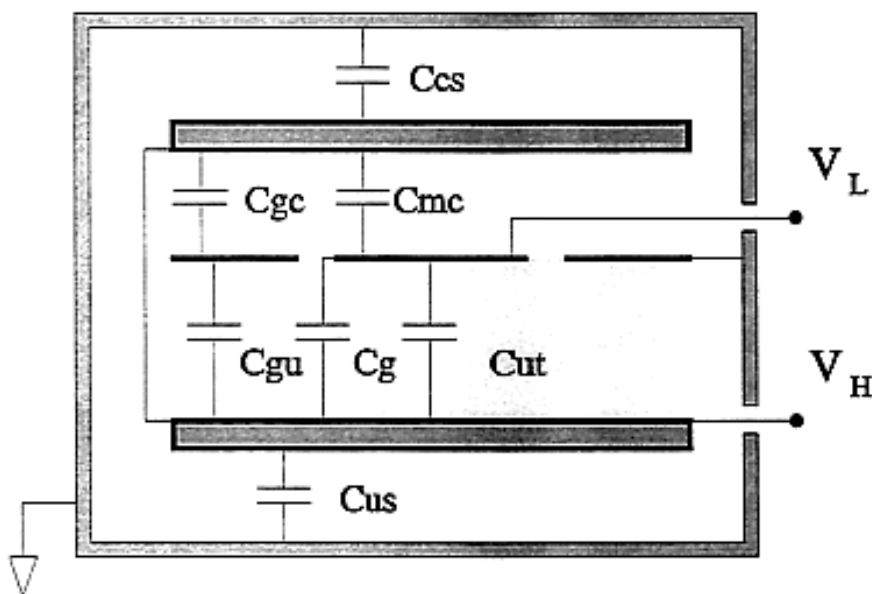


Figura 4.5 Esquema elèctric i capacitats paràsites de la cèl·lula de mesura capacitiva amb guarda i contra-elèctrode.

En general, es recomana que les capacitats paràsites siguin inferiors al 25% de la capacitat que es mesura. Goad, (1990) recomana uns elèctrodes gruixuts respecte de les dimensions g i t per controlar de forma més acurada C_g . També esmenta que si això no és possible es mecanitzi un elèctrode contraposat, com s'indica a la figura 4.5. Tanmateix, aquest elèctrode fa aparèixer tres capacitats paràsites suplementàries: C_{gc} (*guard counterelectrode*), capacitat paràsita que hi

ha entre l'elèctrode de guarda i el contraposat; C_{mc} (*measured counterelectrode*), capacitat paràsita que hi ha entre l'elèctrode de mesura i el contraposat; i C_{cs} (*counterelectrode shield*), capacitat paràsita que hi ha entre l'elèctrode contraposat i l'apantallament. L'ús d'un elèctrode contraposat aporta una millora inapreciable en la determinació de C_g ja que $g \ll t$ i en canvi C_{mc} s'afegeix directament a $C_{ut} + C_g$, i tot i que és aproximadament constant i es pot restar, afegeix un error de zero, que cal corregir mitjançant calibratge.

Una altra solució connectaria l'elèctrode contraposat a l'apantallament, que en el fons és la primera alternativa –sense contraelèctrode– però amb dificultats mecàniques afegides ja que l'elèctrode sense guarda i el contraelèctrode es subjectarien a la resta de la cèl·lula amb cargols aïllats perquè elèctricament estarien a tensions diferents.

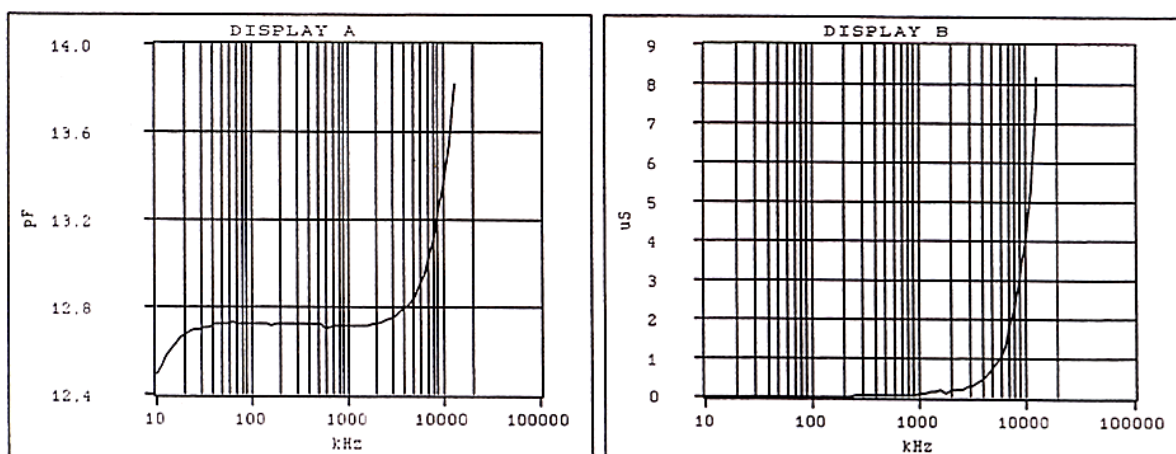


Figura 4.6 Mesura de la capacitat de la cèl·lula capacitiva amb guarda quan $\epsilon_r=1$: capacitat –display A– i conductància paral·lel equivalent –display B–.

La figura 4.6 mostra la mesura en buit –aire– de la capacitat d'aquesta cèl·lula capacitiva amb guarda quan $t=4,05$ mm amb una inductància sèrie equivalent de $0,4 \mu\text{H}$ deguda als terminals de connexió i a la dimensió física de la cèl·lula. Els valors obtinguts s'ajusten als valors previstos segons es demostra en l'apartat 4.3. A freqüència alta, l'error en l'avaluació de la capacitat augmenta a causa de la inductància paràsita sèrie.

La permitivitat i conductivitat d'un material són característiques que no es poden separar, segons es demostra a l'apartat 3.1.3. Així doncs, tot i que s'ha construït aquesta cèl·lula per a la mesura de permitivitat, es pot aprofitar la

mecanització de la mostra per mesurar conductivitat doncs la guarda evita els corrents superficials que podrien influir en la mesura [ASTM D257-92, pàg. 9]. La cèl·lula de secció constant –vegeu apartat 4.1.1– no té aquest avantatge, si bé és més fàcil de netejar, mecanitzar la mostra i mesura amb quatre fils.

4.1.3 Cèl·lules capacitives sense guarda per mesurar permitivitat: cèl·lula adaptada i cèl·lula simètrica petita

Les aproximacions que s'accepten en circuits de paràmetres concentrats no són vàlides a freqüències més altes. Determinar la freqüència a partir de la qual cal pensar en circuits de paràmetres distribuïts és un problema. La solució no és única, sinó que depèn de l'exactitud de la mesura, –e.g. el retard que es produeix en una connexió d'una longitud determinada es veu com un desfasatge del senyal respecte a un punt de referència si no es considera la línia de transmissió creada–.

Aquest problema es soluciona, amb una exactitud raonable a la mesura i una complexitat mínima, si es modela la cèl·lula de mesura de paràmetres concentrats i les connexions al generador i detectors de senyal mitjançant paràmetres distribuïts –línies de transmissió–. En aquest context però, la guarda perd la seva funció ja que les longituds de les connexions fan que elèctrode de guarda i elèctrode guardat no estiguin al mateix potencial.

D'altra banda, per fer mesures amb escombrats de freqüència de forma fàcil, cal treballar amb càrregues adaptades tant en generació com en detecció de senyal. L'elecció d'una impedància característica diferent de 50Ω fora possible, però 50Ω és un patró industrial per qüestions relacionades amb la màxima potència que porta la línia, i això permet interconnectar instrumentació comercial de forma directa.

Cèl·lula adaptada

La cèl·lula adaptada construïda és la mateixa cèl·lula capacitiva amb guarda; així es pot mesurar el material sense una mecanitzar-lo de nou. No obstant això, el connexionat de la cèl·lula varia de forma sensible. Precisament, el nom de la cèl·lula prové de l'adaptació de les connexions de la cèl·lula capacitiva amb guarda per treballar amb la guarda com part de l'elèctrode guardat de mesura. La guarda ja no aconsegueix la funció com a tal i s'ha de considerar l'efecte de vores. Per mesurar la capacitat es curtcircuita l'elèctrode guardat de mesura amb l'elèctrode de guarda i es mesura de forma convencional amb dos fils, tot i que la cèl·lula té les plaques paral·leles desiguals. Finalment, l'apantallament de la cèl·lula és el mateix de la figura 4.3.

Cal preguntar-se per què no es mesura dins un pont autobalancejat on es gaudeix dels avantatges de la guarda que simplifica els càlculs —en desaparèixer els efectes de vores—. La raó és que els elements circuïtals que alimenten la guarda —com ara transformadors— a freqüència alta, e.g. 100 MHz, i permeten un muntatge amb pont autobalancejat, no permeten un escombrat de freqüència fàcil.

Així doncs, la cèl·lula de mesura queda com a les figures 4.2 i 4.3 però amb un curtcircuit entre les plaques superiors. El valor de la nova capacitat en buit l'hem estimat segons diversos càlculs teòrics i simulació numèrica, i l'hem comparat amb el valor que es mesura amb l'analitzador hp 4192A. Hem considerat tres models.

Model 1

Segons **Elliott** (1966, pàg. 189) la capacitat d'un condensador pla de plaques rectangulars paral·leles iguals i enfrontades, si els costats dels rectangles l_g i $l_{g'}$ són molt més grans que la separació entre plaques t , és,

$$\frac{C}{\varepsilon} = \frac{l_g l_{g'}}{t} \left[1 + \frac{\ln\left(\pi \frac{l_g}{t}\right)}{\pi \frac{l_g}{t}} + \frac{\ln\left(\pi \frac{l_{g'}}{t}\right)}{\pi \frac{l_{g'}}{t}} \right] \quad (4.7)$$

Però en el nostre cas, les dues plaques no són iguals. Una aproximació raonable, ja que els camps en l'exterior decàuen molt ràpid —més encara si $\varepsilon_r \gg 1$ — [Rao, 1979], suposa la placa més gran com infinita i aplica el mètode d'imatges. Així resulta,

$$\frac{C}{\varepsilon} = \frac{l_g^2}{2t} \left[1 + 2 \frac{\ln\left(\pi \frac{l_g}{2t}\right)}{\pi \frac{l_g}{2t}} \right] = \frac{l_g^2}{2t} 1,154 \quad (4.8)$$

Un problema suplementari és que el dielèctric no és uniforme: en la zona central de la cèl·lula és buit i en la zona perifèrica és pvc —suport físic—. La constant dielèctrica relativa del pvc presenta una dispersió gran segons el tipus de pvc, que va des de 2,3 a 9,1 [Flinn, 1989, pàg. 654]. Per aquesta raó, hem mesurat la permitivitat relativa d'una planxa del pvc amb que s'ha mecanitzat la cèl·lula amb el sistema amb guarda a 1 i 10 MHz. El resultat és $\varepsilon_{r \text{ pvc}} = 2,83$ i no depèn de la freqüència en aquest marge.

L'increment de capacitat deguda als camps perifèrics de la cèl·lula adaptada són

$$\Delta C = (1,154 - 1) \frac{l_g^2}{t} \varepsilon_0 \varepsilon_{r \text{ ef pvc}} = 0,154 \cdot 37,8 \text{ pF} \cdot 2,72 = 15,8 \text{ pF} \quad (4.9)$$

on la $\varepsilon_{r \text{ ef pvc}}$ és [Gunston, 1972, pàg. 44],

$$\varepsilon_{r \text{ ef pvc}} = \frac{\varepsilon_{r \text{ pvc}} + 1}{2} + \frac{\varepsilon_{r \text{ pvc}} - 1}{2 \sqrt{\left(1 + \frac{10t}{l_g}\right)}} \quad (4.10)$$

Per tant, segons aquest model, el valor estimat de la capacitat total en buit de la cèl·lula adaptada és 54 pF.

Model 2

Segons **Gunston** (1972, pàg. 43), la impedància característica d'una línia de transmissió microtira (*microstrip*) és,

$$Z_0 \sqrt{\epsilon_r} = \frac{119,9}{\frac{l_g}{t} + 2,42 - 0,44 \frac{t}{l_g} + \left(1 - \frac{t}{l_g}\right)^6} \quad (4.11)$$

La capacitat d'un condensador pla de plaques rectangulars paral·leles iguals i enfrontades, si els costats dels rectangles l_g i l_g' són molt més grans que la separació entre plaques t , s'assimila a un tall de línia de transmissió. Per tant,

$$C_{(buit)} = \frac{l}{c Z_0 \sqrt{\epsilon_r}} = 316 \text{ pF/m} \quad (4.12)$$

on c és la velocitat de la llum. La cèl·lula adaptada és la composició d'aquest tall de línia de transmissió microtira amb dielèctric pvc menys la diferència de capacitat d'un condensador pla sense efecte de vores quan és ple de pvc respecte quan és buit (316 pF/m - 288 pF/m), vegeu figura 4.7. Així,

$$\Delta C = \epsilon_r \epsilon_0 \epsilon_f 28 \text{ pF/m} (l_g + l_g') = 20 \text{ pF} \quad (4.13)$$

Per tant, segons aquest model, el valor estimat de la capacitat total en buit de la cèl·lula adaptada és 58 pF.



Figura 4.7 Secció de la cèl·lula adaptada feta de la diferència entre la capacitat d'un segment de línia de transmissió i un condensador de plaques paral·leles.

Model 3

Hem simulat la geometria de la cèl·lula adaptada amb el programa **Coulomb** versió 2.3 –"Integrated Engineering Software Inc"– de simulació de camps elèctrics per elements de contorn. Hem obtingut una capacitat de $55,4 \pm 0,2$ pF, on el terme d'imprecisió el causa el nombre limitat d'elements de la simulació.

A manera de resum, la taula 4.1 compara les diverses formes de càlcul de la capacitat de la cèl·lula de mesura respecte el valor mesurat en el laboratori amb l'analitzador d'impedàncies hp 4192A. S'observa que els millors resultats s'obtenen amb la simulació i que els mètodes aproximats són força bons. En particular cal destacar el primer, doncs és conceptualment més senzill i el resultat és més proper a la mesura que el que es basa en línies de transmissió.

Font	valor (pF)	error respecte mesura
Elliot (transf. conforme + imatges)	54	-2 %
Gunston (l.t. microtira)	58	+6 %
Coulomb (el. contorn)	55	<1 %

Taula 4.1 Comparació entre capacitats calculada, simulada i mesurada de la cèl·lula adaptada sense guarda en buit.

Cèl·lula capacitiva simètrica petita

El desenvolupament d'una cèl·lula nova sense guarda no és redundant per tres raons. Primera i segona, si es mesura a unes freqüències on la cèl·lula adaptada té una capacitat en buit massa gran i els elements paràsits inductius són elevats per la seva grandària. I tercera, si es mesuren dielèctrics líquids, la construcció de la cèl·lula adaptada presenta fuïtes i cal embolicar-la de forma convenient per a cada mesura. Tot i que aquest treball es dedica a la mesura de sòls, la mesura de dielèctrics líquids té interès quan formen part dels sòls, com ara l'aigua, i també els dielèctrics líquids com a materials de calibratge.

Les premisses de disseny i de construcció per a aquesta cèl·lula simètrica petita són:

- plaques rectangulars d'amplada doble a l'alçada per facilitar la col·locació del material que es mesura.
- distància entre plaques major o igual a 3 mm per poder omplir amb líquids la cèl·lula de forma fàcil amb una pipeta.
- mòdul d'impedància, amb dielèctric de $\epsilon_r=80$ a 10 MHz, aproximada de 50Ω per tenir màxima exactitud amb un analitzador d'impedàncies de radiofreqüències.

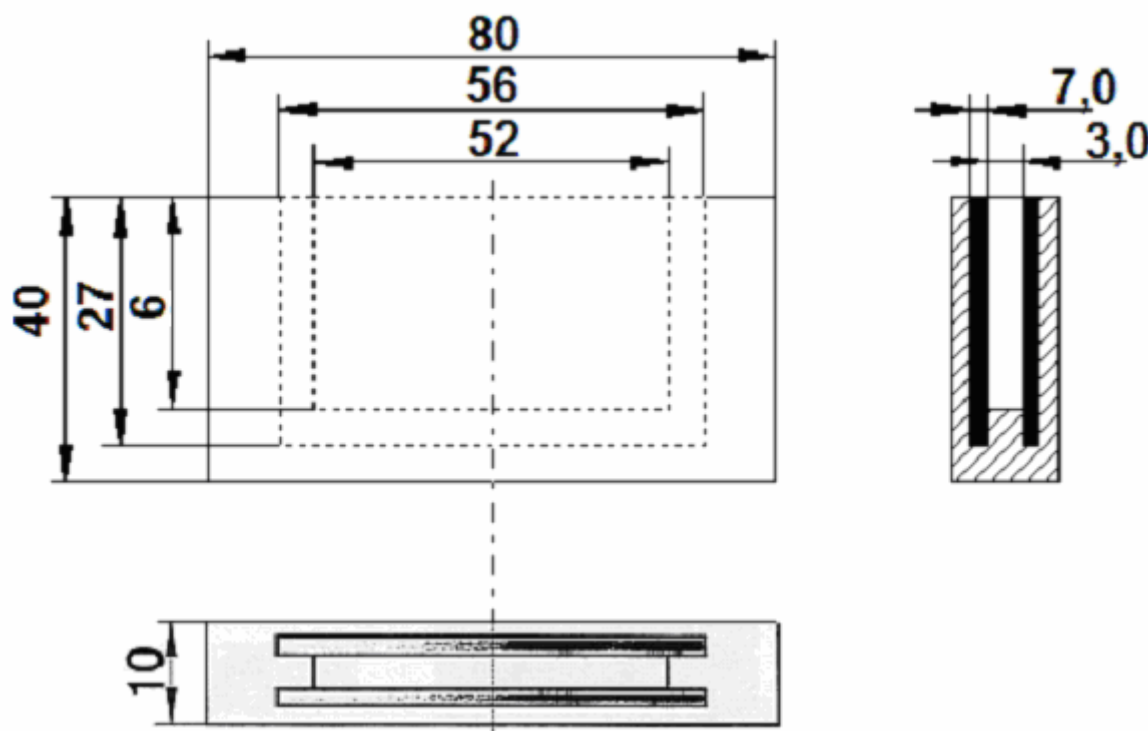


Figura 4.8 Alçat, planta i secció de la cèl·lula capacitiva simètrica petita de plaques paral·leles.

La cèl·lula capacitiva simètrica petita s'ha construït amb planxes d'acer de 2 mm de gruix amb un suport de làmines de fibra de vidre encolades tal com es mostra a la figura 4.8 i a la imatge corresponent de l'annex V. Les dimensions de l'espai susceptible d'omplir-se de material que es caracteritza són: llargada 52,35 mm, alçada 26,35 mm i separació entre plaques 3,1 mm. La capacitat en buit total, que inclou la del condensador "útil", els efectes de vores i la capacitat paràsita, és 8,9 pF. Les connexions a l'instrument són dues planxes de coure de 1 mm de gruix, 2 cm d'ample i 5 cm de llarg, que a més aguanten la cèl·lula simètrica en posició

vertical per a la manipulació de mostres líquides.

Fonts d'error

Comentem els termes d'error previsibles en aquesta cèl·lula, així com unes desviacions sistemàtiques en el valor mesurat de la permitivitat respecte la teòrica en líquids polars. Molts cops comparem el terme d'error amb el respectiu de la cèl·lula capacitiva adaptada. Els principals errors són:

- 1- La tolerància en les dimensions físiques, que admet calibratge. Un avantatge d'aquesta cèl·lula simètrica respecte la cèl·lula adaptada és que les planxes d'acer de 2 mm, més petites, són més rígides; l'error per manca de rigidesa és inapreciable.
- 2- Les dilatacions tèrmiques exigeixen precaucions similars.
- 3- El desviament de la trajectòria de les línies de camp és una font important d'error com capacitat paràsita que admet calibratge però cal fer-lo amb un dielèctric de referència de permitivitat similar a la que es mesura.
- 4- L'error que introdueix la presència d'aire quan es considera la cèl·lula en buit està per sota la resolució dels instruments de mesura.
- 5- La manca d'apantallament, que fa que aquesta estructura és sensible a pertorbacions si s'atansa la mà prop de la cèl·lula.
- 6- La inductància paràsita sèrie com a conseqüència de les connexions físiques, que té un efecte calibrable. Només afecta la diferència de longitud i superfície que encerclen els cables de mesura i els cables de les càrregues de calibratge. Hem avaluat aquesta diferència de "topologia" en 1 mm que provoca, de forma aproximada, una inductància paràsita d'1 nH. Aquest efecte a freqüència alta provoca un augment fictici de capacitat —e.g. si suposem una capacitat de 100 pF, constant amb la freqüència, i una inductància sèrie d'1 nH el condensador equivalent que veurem a 100 MHz serà un 10% major que el valor que s'observa a freqüències molt inferiors—.
- 7- Finalment, la descripció d'una font d'error mecànic-física. Les mesures de calibratge amb dos dielèctrics polars, si es prenien com a referència el dielèctric de permitivitat menor, la capacitat associada al dielèctric de

permitivitat major —e.g. aigua— sortia entre un 5 i 10% major que el valor esperat. La causa era uns petits buits per on s'infiltrava l'aigua que tocava les cares exteriors de les plaques d'acer —figura 4.8—. Unes simulacions realitzades amb Coulomb confirmen la tendència com ara veurem. Quan segellarem els petits espais amb un material plàstic el problema va desaparèixer encara que el seu origen teòric resta desconegut.

Es simulà una cèl·lula de plaques paral·leles d'àrea $52 \times 26 \text{ mm}^2$ de gruix despreciable separades $3,1 \text{ mm}$ amb l'interior ple de dielèctric aigua amb el Coulomb, figura 4.9a. La capacitat total trobada fou 315 pF . En canvi, si el gruix de les plaques es canviava a 2 mm , figura 4.9b, aleshores la capacitat total baixà a 310 pF . També resultà 310 pF la simulació on es substituï el gruix d'acer per un gruix d'aigua també de 2 mm , figura 4.9c.

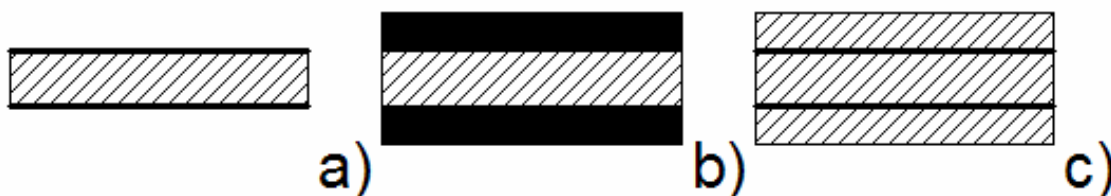


Figura 4.9 Seccions d'una cèl·lula capacitiva de plaques paral·leles: a) plaques de sense gruix, b) gruix de plaques apreciable i c) modificació en la composició de les plaques.

4.1.4 Cèl·lules de camp no uniforme per mesurar permetivitat: línia de transmissió coaxial en circuit obert i monopòl curt

Les cèl·lules descrites fins el moment confinaven el camp elèctric en una zona determinada on es situava la mostra, és a dir, es treballava amb cèl·lules de paràmetres discrets. Les cèl·lules que es descriuen a continuació mesuren en el material on són immerses i els camps que es creen no es confinen. Aquestes cèl·lules de paràmetres distribuïts són les línies de transmissió i les seves terminacions. Hi ha una extensa bibliografia sobre el tema, com per exemple [Andrawis, 1992], [Bianco, 1979], [Burdette, 1980], [Bussey, 1980], [Stuchly, 1980] o [Xu, 1993]. En essència, s'avaluen els coeficients de la matriu S (*Scattering*), molts cops el coeficient de reflexió, de diferents línies de transmissió acabades o alterades amb la cèl·lula en contacte amb el material que es caracteritza.

Les expressions que es dedueixen són relacions polinòmiques o racionals, de vegades d'exponents fraccionaris, entre impedància i permetivitat. Aquestes expressions depenen de la geometria de la línia de transmissió a la que se li acobla la cèl·lula o porció d'espai que conté el material i el tipus d'ona –TEM, TE o TM– que viatja per ella. El teorema de Deschamps, (1962) relaciona la impedància d'una antena en el buit amb la impedància d'aquesta línia immersa en un altre dielèctric.

El mètode de la línia de transmissió acabada en circuit obert que esdevé la cèl·lula consisteix, tal com indica el seu nom, en la mesura del coeficient de reflexió d'una línia coaxial acabada en un tall perpendicular a l'eix de la línia i posada en contacte amb el material que es caracteritza.

La línia de transmissió utilitzada es basa en les proporcions del cable coaxial RG-58 per ample de banda i adaptació d'impedàncies. D'aquesta manera, una anàlisi completa dels camps electromagnètics a la discontinuïtat línia de transmissió-material –pla de referència– relaciona el coeficient de reflexió i la permetivitat complexa del material que es caracteritza.

Les línies de transmissió coaxial, atesa la seva geometria de revolució, propaguen el mode TEM des de continua fins l'excitació de modes superiors TM. Tot i que no es propaguen però sí que s'exciten, aquests modes superiors modifiquen l'anàlisi electromagnètica de la línia a la discontinuïtat. Si a més, es consideren els fenòmens interfacials i de polarització que es creen a la

discontinuitat quan el material té pèrdues apreciables, la solució analítica resulta impossible.

Si es consideren unes simplificacions és possible un estudi analític o una combinació d'estudi analític i numèric. La simplificació més important suposa la no manifestació dels fenòmens interfacials, transduccions electroquímiques justificades sovint com potencials de contacte o l'efecte de Maxwell-Wagner. La instrumentació comercial que utilitza aquesta mena de cèl·lules (e.g. Hewlett-Packard 85070m *Dielectric Probe Measurement System*) mesura a freqüència molt alta per minimitzar el problema. Una altra simplificació, no necessària de forma estricta [Baker-Jarvis, 1994], suposa que el material s'estè completament en un semiespai.

En les relacions entre camp elèctric i magnètic amb les simplificacions esmentades, atesa la geometria de revolució del problema i una excitació de senyal tipus sinusoidal [Bedford, 1993, pàgs. 103-116], [Mosig, 1981], apareixen funcions de Bessel de primera i segona espècie. La solució amb les condicions de contorn imposades pel material que es caracteritza és una integral sense solució analítica, on la permitivitat que es vol conèixer és un paràmetre més dins la integral.

Diversos autors han desenvolupat models que relacionen coeficient de reflexió i permitivitat a partir de diferents aproximacions. És habitual relacionar admitància-permitivitat en comptes de coeficient de reflexió-permitivitat. En una línia de transmissió amb impedància característica, la relació admitància-coeficient de reflexió és una transformació bilineal. A fi de comptes, l'anàlisi d'una línia coaxial en circuit obert en contacte amb l'aire té un comportament bàsicament capacitiu atesa l'acumulació d'energia elèctrica a l'interfície de la línia, [Kraszewski, 1983] [Deschamps, 1962], de manera que es pot escriure

$$Y = k_1 + k_2 \varepsilon^* + k_3 \varepsilon^{*2} \quad (4.14)$$

on el valor de les constants k_1 , k_2 i k_3 es calcula mitjançant calibratge amb tres materials de referència coneguts.

Misra, (1987) fa un anàlisi aproximat amb només el mode TEM, on si l'obertura és petita respecte la longitud d'ona, s'arriba a una expressió de la forma

$$Y = k_1 \varepsilon^* + k_2 (\varepsilon^*)^2 + k_3 (\varepsilon^*)^{5/2} \quad (4.15)$$

Llavors es procedeix de forma anàloga al cas anterior.

L'anàlisi d'una línia coaxial en circuit obert on tot el dielèctric és uniforme es troba solucionat a Marcuvitz, (1964). Tot i que no és ben bé cert perquè el dielèctric de l'interior de la línia és diferent al de l'exterior, si a l'extrem de la línia s'aplica l'aproximació quasi-estàtica i el teorema de Deschamps, la relació entre admitància i permitivitat és,

$$Y = k_1 + k_2 \varepsilon^* + k_3 (\varepsilon^*)^{5/2} \quad (4.16)$$

També s'ha analitzat la relació quan l'acabament és un monopòl curt —longitud $< \lambda/10$ —, el resultat del qual és una relació racional d'exponents fraccionaris entre admitància i permitivitat [Smith, 1985], [Burdette, 1980].

L'admitància o impedància d'aquests models que relacionen permitivitat i admitància és també funció racional de polinomis on la variable és la rel quadrada de la permitivitat. L'origen d'aquesta relació polinòmica de coeficients fraccionaris són les equacions de propagació d'una ona electromagnètica i la manera com es modifiquen quan passen d'un medi conegut aïllant a un medi desconegut, que depèn de la relació entre les velocitats de propagació d'ambdós medis.

La primera cèl·lula d'aquest tipus que hem construït consisteix en un coaxial en circuit obert, que s'ha mecanitzat a partir d'un cable comercial RG-58 d'impedància característica 50Ω amb un tall perpendicular a l'eix de la línia per formar el circuit obert. Es considera la línia coaxial com un element radiant en un espai semi-infinit. En conseqüència, es comporta com una capacitat proporcional a la ε^* del mitjà on radia i de valor aproximat de 0,04 pF si el medi és buit, més una altra de valor fix de 0,04 pF [Marcuvitz, 1964].

La segona cèl·lula de camp no uniforme que hem construït consisteix en un altre coaxial en circuit obert. Bedford (1993, pàgs. 96-98) considerà les dimensions mínimes de la obertura —secció del coaxial— per evitar heterogeneïtats del sòl que es caracteritza, ja que si la mida de les partícules de grava del sòl fos major que el diàmetre de la cèl·lula coaxial es mesuraria una part del sòl i no la seva totalitat. També considerà les dimensions màximes que no exciten un mode superior —TE₁₁ a una freqüència inferior a $0,3 \cdot v/(a+b)$ on a i b són els radis del coaxial i v és la velocitat de propagació de l'ona—. Amb aquestes consideracions, Bedford (1993, pàg. 98) assignà 1,625 cm al radi exterior i una impedància característica de la línia de 50Ω . Atès que no hi ha cap cable comercial amb aquests requeriments, construï un eixamplament des d'un RG-58. A més, considerà la línia coaxial nova com un

element radiant en un espai semi-infinit. Amb tot això, la capacitat proporcional a la permitivitat (ε^*) augmenta un ordre de magnitud respecte una cèl·lula sense eixamplament.

La tercera cèl·lula de camp no uniforme que hem construït consisteix en un monopol curt mecanitzat a partir d'un cable RG-58 on el pla de massa és la malla del cable i el conductor central del coaxial esdevé el monopol curt amb una longitud no inferior a 1 cm pels motius esmentats d'homogeneïtat. El calibratge es realitza amb tres líquids coneguts —e.g. aigua desionitzada, metanol o propanol i solució salina fisiològica—. Tanmateix, cal esmentar que aquesta cèl·lula només és vàlida per a sòls de viscositat gran i que convé que el monopol es realitzi amb cable multifilar per augmentar la superfície de contacte monopol-sòl.

Un model que relaciona la impedància amb la ε^* , [Smith, 1985] és

$$Z(\varepsilon^*) = \frac{jk}{\varepsilon^{* \frac{l}{2}}} \left(\frac{1 + jb_1 \varepsilon^{* \frac{l}{2}} + b_2 \varepsilon^*}{1 + jb_1 \varepsilon^{* \frac{l}{2}} + b_3 \varepsilon^*} \right) \quad (4.17)$$

on k , b_1 , b_2 i b_3 són constants que es determinen per calibratge.

4.2 Descripció bàsica i consideracions sobre els aparells a emprar

Un dels objectius d'aquest treball és obtenir uns paràmetres elèctrics. Per conèixer aquests paràmetres cal mesurar-los i per mesurar fan falta aparells adients. Doncs bé, en aquest apartat descrivim i considerem algunes particularitats dels instruments o aparells que mesuren els paràmetres elèctrics dels sòls. De fet, instruments genèrics que mesuren impedància elèctrica dels sòls no n'hi ha. Agafem instruments com ara un electròmetre, uns analitzadors d'impedància o bé un generador de funcions i un oscil·loscopi per adaptar-los per a la mesura d'impedància de sòls. Tots tenen en comú la generació d'una forma de corrent que apliquen a la mostra i la detecció de la tensió que s'hi desenvolupa. En aquest apartat veurem les característiques essencials i alguna particularitat de cada instrument per conèixer l'estratègia òptima d'ús per als objectius marcats.

4.2.1 Electròmetre

Una forma habitual de conèixer la resistència d'un element és mesurar el corrent que el travessa i la caiguda de tensió que s'hi desenvolupa, com ja hem esmentat. Els multímetres de propòsit general, sense acostar-se als límits teòrics de sensibilitat, són indicats actualment en mesures per sobre $1 \mu\text{V}$ o $1 \mu\text{A}$ o per sota $100 \text{ M}\Omega$. El soroll que generen les resistències involucrades en el circuit de mesura determinen aquests límits. A major valor òhmic de resistència de font, major quantitat de soroll per a un ample de banda determinat, ja que la densitat de tensió de soroll és proporcional a la rel quadrada de la resistència —e.g. $1 \mu\text{V}$ amb una resistència de font d' $1 \text{ M}\Omega$ està prop dels límits teòrics de sensibilitat—. Altres factors que limiten la sensibilitat són els corrents de polarització i desplaçament, la resistència d'entrada —limitada a uns $10 \text{ M}\Omega$ — quan funciona com voltímetre, i la mínima tensió d'entrada apreciable quan funciona com amperímetre. L'electròmetre és un instrument que supera els multímetres convencionals i s'apropa als límits teòrics.

El laboratori disposa de l'electròmetre Keithley model 616. La funció d'òhmetre, seleccionable mitjançant un commutador rotatiu, conté una font de

corrent de valor nominal la xifra impresa en la rodeta amb l'exponent canviat de signe. La figura 4.10 mostra el funcionament d'aquest aparell quan es mesura una resistència R_{ut} . Les connexions són a través d'un cable triaxial –model 6011– on Lo –entrada baixa, negre– i $Ground$ –massa de la caixa, verd– es connecten a un terminal de R_{ut} i Hi –entrada alta, roig– es connecta a l'altre. La connexió $x1$ de la part posterior, en aquest cas la tensió V_o , connecta una possible guarda activa. La pantalla numèrica indica la tensió que cau en R_{ut} – V_o en la figura 4.10, on l'amplificació $A \gg 1$ –. L'electròmetre mesura resistències de 10Ω fins a $10^{14} \Omega$.

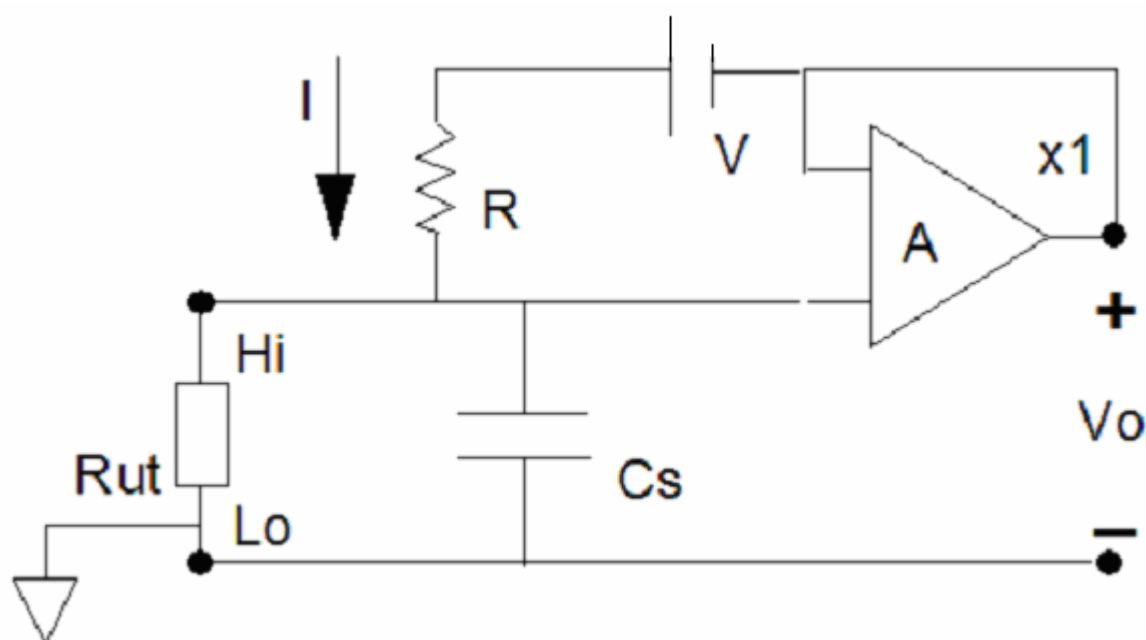


Figura 4.10 Esquema de l'electròmetre que funciona com òhmetre en mode normal.

L'origen de C_s a la figura 4.10 són els diversos apantallaments que té l'electròmetre. Si la resistència que es mesura és força elevada, aquesta capacitat paràsita alenteix el temps d'establiment fins que la mesura és correcta. Un sistema de primer ordre com aquest de càrrega d'un condensador (C_s) en paral·lel amb una resistència (R_{ut}) mitjançant una font de corrent constant (I) ve governat per,

$$v_o(t) = I R_{ut} \left(1 - e^{-\frac{t}{R_{ut} C_s}} \right) \quad (4.18)$$

D'aquí es desprèn que el temps de càrrega del condensador no depèn del valor del corrent que s'injecta i sí de la constant de temps $\tau = R_{ut} C_s$.

Per avaluar el valor de C_s —dada que no apareix en catàleg perquè depèn de la longitud del cable triaxial que es connecta— hem endollat una R_{ut} de prova de valor $100\text{ G}\Omega$ i hem mesurat una constant de temps (τ) de 10 s aproximadament; d'aquí es dedueix un valor de C_s d'aproximadament 100 pF . Per comprovar la dada es permuta la resistència de mesura amb resistències menors; el valor de C_s calculat resulta similar.

Si es mesura resistències superiors a $0,1\text{ T}\Omega$ cal reduir el valor de C_s per a que la mesura no sigui tan llarga. Atès que C_s és una capacitat paràsita d'apantallaments, no es pot eliminar. Tanmateix, l'electròmetre permet una connexió sense aquests apantallaments (*mode fast*). La figura 4.11 mostra els canvis que es realitzen per a aquesta configuració. La resistència desconeguda R_{ut} es troba ara en el llaç de retroacció de l'amplificador. Amb aquesta connexió, C_s queda en paral·lel amb l'entrada de tensió baixa d'un picoamperímetre i no afecta al temps de mesura; com a contrapartida, la mostra queda flotant. La connexió física es realitza mitjançant el terminal Hi del triaxial i el terminal de guarda (*Guard*) connectat per darrera de l'instrument. Mitjançant la mesura de la constant de temps amb una $R_{ut} = 1\text{ T}\Omega$, es pot avaluar la capacitat paràsita que queda en paral·lel amb aquesta connexió nova. Hem obtingut $C_p \leq 1\text{ pF}$. Per comprovar els resultats, si es posa una capacitat en paral·lel amb la resistència de realimentació R_{ut} , la constant de temps augmenta com era de preveure.

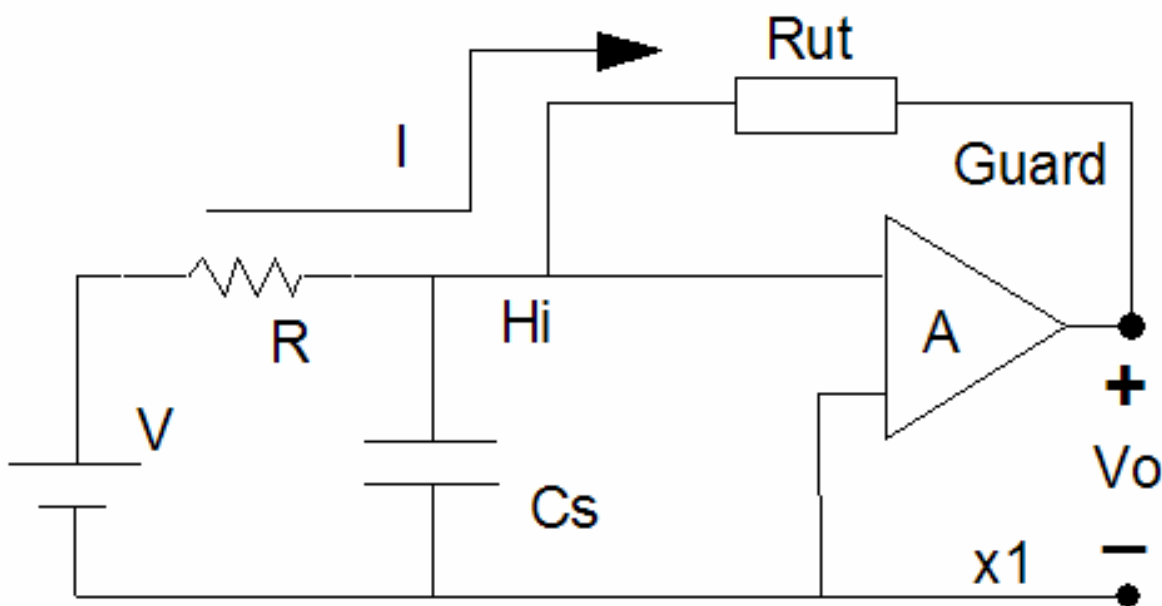


Figura 4.11 L'electròmetre quan funciona en mode Fast disminueix el problema de la capacitat d'entrada paràsita (C_s).

Tot i els avantatges de l'electròmetre, cal desaconsellar la mesura de sòls en senyal continu per dos factors. El primer és que si el sòl és sec, —per tant té una resistència molt elevada—, cal mesurar en mode *Fast* i això obliga a tenir la mostra flotant i sense apantallament, i llavors qualsevol pertorbació exterior afecta el resultat de la mesura. El segon factor, i més important, és la polarització dels elèctrodes: creació i migració d'ions cap als elèctrodes injector i drenador de corrents, que es veu agreujada si el sòl és humit.

Amb tot, si el sòl és prou sec i no s'aprecien fenòmens de migració iònica, es pot avaluar la permitivitat del sòl a través de la càrrega i descàrrega a corrent constant de la cèl·lula amb el connexionat indicat a la figura 4.10, sempre que es calibri l'efecte de Cs.

4.2.2 Analitzadors d'impedància de freqüència baixa

L'analitzador d'impedàncies de freqüència baixa hp 4192A, mesura amb quatre fils. Això no obstant, quan les impedàncies d'elèctrode són comparables a les impedàncies que es mesuren, l'aparell surt d'especificacions, segons s'ha explicat a l'apartat 3.2.3 El fet no és únic d'aquest aparell. L'analitzador d'impedància, i de guany i fase, Schlumberger 1260 presenta dificultats similars.

Utilització de l'analitzador de mòdul i fase

No obstant aquesta limitació, l'analitzador d'impedàncies es pot aplicar a les nostres mesures si s'utilitza de forma diferent. S'aprofita la generació de senyal sintetitzat de l'analitzador d'impedàncies, es dissenya una etapa d'entrada (*front-end*) com la que es mostra a la figura 4.12 i s'usa les entrades de comparació de guany i fase de l'analitzador. La part central del dibuix correspon al model elèctric de la mostra que es mesura, amb les impedàncies dels quatre elèctrodes.

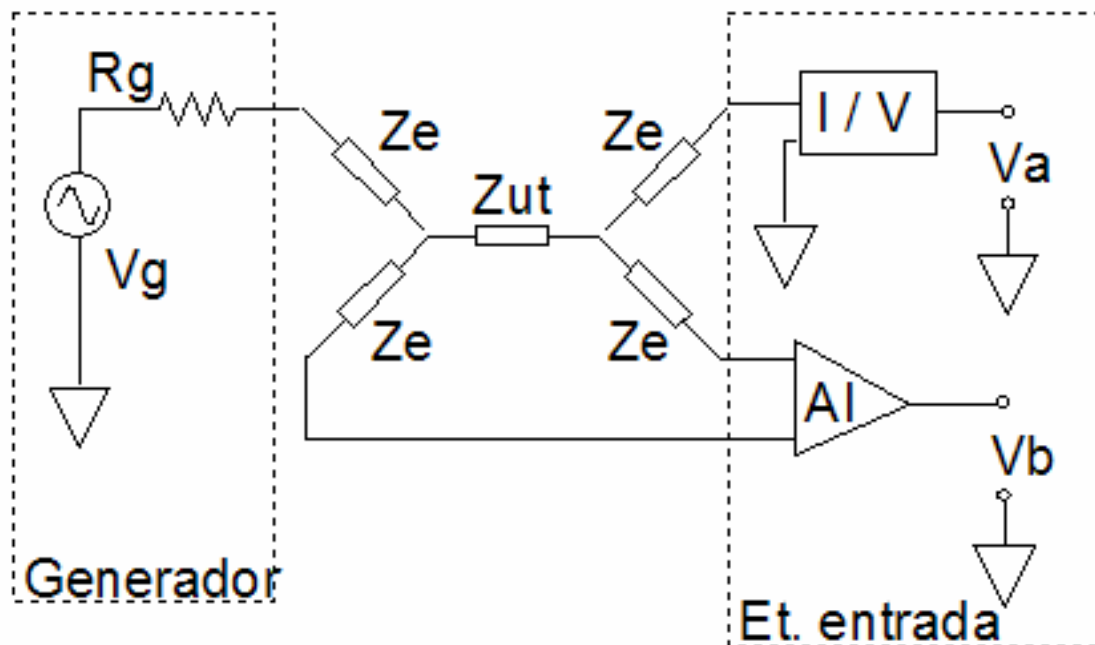


Figura 4.12 Sistema de mesura amb quatre fils basat en l'analitzador d'impedància hp 4192A. Generació de senyal i etapa d'entrada dissenyada.

El convertidor corrent-tensió (I/V) té una resistència d'entrada, R , petita respecte les impedàncies presents en el circuit de mesura. La tensió en borns d' R és proporcional a la tensió de sortida del convertidor I/V, V_a . Per altra banda, l'amplificador d'instrumentació (AI) caracteritza la seva etapa d'entrada amb la impedància diferencial (Z_d) i dues impedàncies de mode comú (Z_c), i la seva funció de transferència amb un guany diferencial i una relació de rebuig de mode comú ($CMRR$). La figura 4.13 mostra el circuit de mesura equivalent amb totes les càrregues presents [Bayona, 1994, pàgs. 53,54]. A efectes pràctics, R_g es considera despreciable front $Z_e l$.

La relació de tensions, que trobareu demostrada a l'annex VI, és

$$\frac{V_b}{V_a} \propto \frac{a Z_{ut} + b}{c Z_{ut} + d} \quad (4.19)$$

on aquest resultat prové d'aïllar la relació entre V_a i V_b , en particular si es resol el sistema d'equacions,

$$\begin{aligned}
 a &= \text{CMRR} Z_d Z_c (Z_c + Z_{e2} + Z_{e4} + R) + Z_c Z_d (0,5 Z_{e4} + 0,5 Z_c + Z_{e2} + R) + Z_c^2 (Z_{e4} + Z_{e2} + R) \\
 b &= Z_c (Z_{e2} + R)(Z_{e3} + Z_{e4})(\text{CMRR} Z_d + 0,5 Z_d + Z_c) + Z_c^2 Z_d (Z_{e2} + R) \\
 c &= \text{CMRR} Z_c^2 \\
 d &= \text{CMRR}(Z_c^2 (Z_d + Z_{e3} + Z_{e4}) + Z_c Z_d (Z_{e3} + Z_{e4}) + Z_{e3} Z_{e4} (2 Z_c + Z_d))
 \end{aligned}$$

Per fer una mesura absolutament exacta caldria quatre impedàncies de referència per aïllar els quatre paràmetres de la constant de cèl·lula. Però, això és impossible ja que a cada mesura de referència les Z_{ei} canvien.

Sota determinades circumstàncies de disseny, com ara impedància d'entrada de l'AI elevada -tant en mode diferencial com en mode comú-, CMRR elevat i impedància d'entrada del convertidor I/V baixa esdevé una relació aproximadament lineal –constant de cèl·lula– proporcional a la relació entre les dos tensions que es mesuren, si el coeficient c és zero i els coeficients a , b i d són constants.

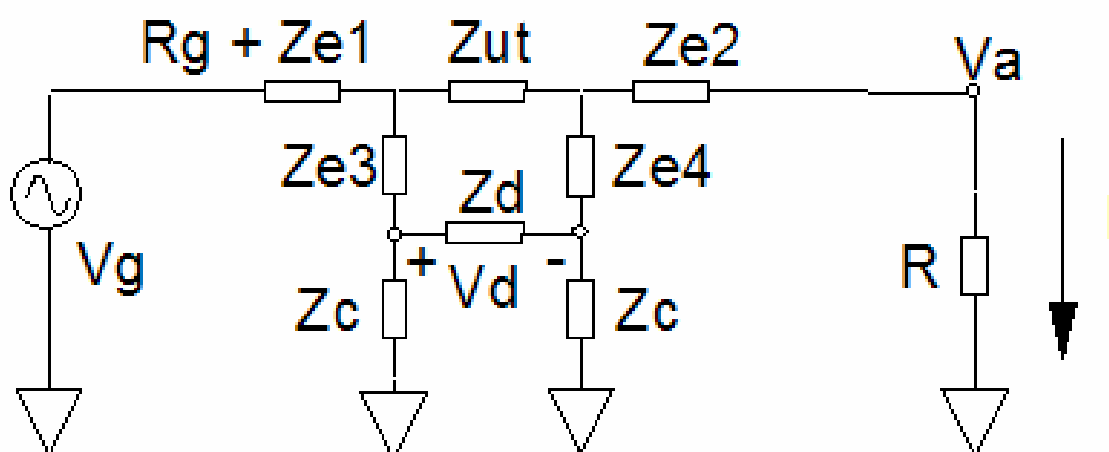


Figura 4.13 Circuit equivalent de mesura amb les impedàncies d'entrada de l'AI i el I/V.

Si desenvolupem en sèrie de Taylor l'equació (4.19), els termes d'ordre zero, un i dos valen,

$$\begin{aligned}
 a_0 &= \frac{b}{d} \cong 0 \\
 a_1 &= \frac{ad - cb}{d^2} \cong \frac{a}{d} \\
 a_2 &= \frac{2c(cb - ad)}{d^4} \cong 0
 \end{aligned}$$

Això vol dir que Va i Vb són gairebé proporcionals i per tant a (4.19) es pot suposar $c=0$, i el quocient de les tensions és proporcional a Z_{ut} . L'error relatiu de considerar els termes a_0 i a_2 nuls és

$$e_r = \frac{R + Z_{e2}}{Z_{ut}} \left(\frac{Z_{e4} - Z_{e4}}{Z_c} + \frac{1}{cmrr} \right)$$

Així doncs, per tenir un error petit caldrà que Z_c i el $CMRR$ siguin grans.

Utilització de l'analitzador d'impedàncies

La funció de mesura d'impedàncies de l'analitzador hp 4192A relaciona de forma vectorial tensió i corrent –vegeu la figura 3.3–. La tensió de prova s'aplica pel terminal HC, si s'utilitza la terminologia del fabricant, i el corrent que passa a través de la impedància que es mesura es recull pel terminal LC, segons s'ha explicat a l'apartat 3.2.3. El valor d'impedància és, V_s/I_x , i com $I_x=I_r$, aleshores

$$Z_x = R_r \frac{V_s}{V_r} \quad (4.20)$$

D'aquesta manera, la impedància que es mesura és la relació de dues tensions, V_r i V_s .

La impedància d'elèctrode que apareix en sèrie amb R_r , en el terminal LC, falseja totalment la mesura com s'ha demostrat amb la taula 3.1 de l'apartat 3.2.3. Gersing, (1991) planteja una millora en l'etapa d'entrada quan mesura en presència d'impedàncies de contacte elevades, que consisteix en intercalar, entre aparell de mesura i mostra el circuit preamplificador de la figura 4.14. L'amplificador d'instrumentació és pot fer amb la topologia clàssica de 3 amplificadors operacionals. Per gaudir d'un bon ample de banda, l'etapa d'entrada es fa a partir de dos EL2224CN, col·locats a mil·límetres escassos de la mostra, i l'etapa diferencial, una mica més allunyada, es basa en un AD830, [Bragós, 1995].

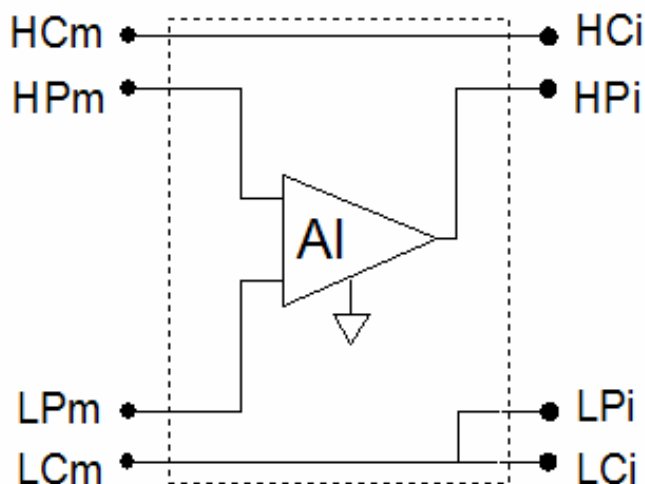


Figura 4.14 Esquema del circuit d'entrada que s'intercala entre la mostra –subíndex m– i l'instrument –subíndex i– per disminuir la influència de la impedància dels contactes d'elèctrodes.

Aquest preamplificador canvia la tensió diferencial, deguda al pas de corrent per la impedància que es mesura i que apareix entre els terminals HP i LP de l'esquerra, HPm i LPm –m de mostra–, en la tensió unipolar que hi hauria en aquests terminals si les impedàncies de contacte fossin nul·les o quasi nul·les. Els terminals amb subíndex m connecten la mostra com si es tractés d'una mesura a quatre fils amb pont autobalancejat, mentre els de subíndex i es connecten a l'instrument de mesura directament. Tal com havíem dit a l'apartat 3.2.3, la impedància de contacte que veu l'entrada LC de l'instrument és nul·la, cosa que permet treballar dins especificacions.

La resposta de l'amplificador, el cablejat d'interconnexió entre la mostra que es mesura i l'etapa frontal, i entre l'etapa frontal i l'aparell, fan que la resposta global no sigui plana en la freqüència, i que canviï a cada mesura. Per tal de tenir una resposta freqüencial plana, és necessària una equalització de tot el sistema, que s'estudia a l'apartat 4.3.2.

4.2.3 Analitzador d'impedància de radiofreqüències

Els analitzadors d'impedàncies de freqüència de ràdio mesuren el coeficient de reflexió en una línia de transmissió. El coeficient de reflexió és la relació vectorial entre l'ona que incideix a la mostra i la que es reflexa. D'aquesta manera, el coeficient de reflexió és funció de la longitud de la línia de propagació. Si se sap la impedància característica de la línia de transmissió, hi ha una relació biunívoca entre coeficient de reflexió i admitància del final de la línia.

L'analitzador hp 4191A mesura entre 1 MHz i 1 GHz i permet programar diversos escombrats en freqüència. El nivell de sortida per a càrrega adaptada -50Ω és de -20 dBm amb una terminació APC-7 per minimitzar reflexions. La resolució en freqüència és de 100 kHz per a freqüències menors a 500 MHz, i 200 kHz per a freqüències superiors. El temps d'escalfament és de 40 minuts. A més, cal saber la posició del pla de referència que s'aconsegueix amb un procediment de calibratge de tres càrregues de referència -0Ω , $0 S$ i 50Ω connexió APC-7— que s'ha de fer a la mateixa temperatura que la mesura ($\pm 5^\circ C$).

El fabricant subministra, de forma addicional, un equipament de suport a proves (*test fixture* 16092a). Aquesta plataforma mecànica amb pinça permet la connexió d'un element discret que es caracteritza amb el pla de referència de l'instrument —terminal APC-7—. El fabricant recomana mesurar per sota 500 MHz atesa la influència dels elements paràsits. Això no obstant, el procediment de calibratge és convenient que es realitzi sobre la plataforma, pla nou de referència, amb tres càrregues de referència de connexió adient.

Si es realitza un canvi de pla de referència, per una transició d'un connector APC-7 a qualsevol altre connector, per una extensió del cable o per una combinació d'ambdues, també convé calibrar en el pla de mesura per eliminar reflexions i pèrdues al llarg de la línia de transmissió i transicions.

La major exactitud de mesura d'aquests analitzadors és per a càrregues properes —en mòdul— a la impedància característica. Aquest fet és important perquè limita l'exactitud en cèl·lules que varien la impedància amb la mostra o amb la freqüència quan es fa un escombrat.

En el cas particular de l' hp 4191A, el fabricant subministra gràfiques que relacionen exactitud i resolució de l'instrument en funció de la freqüència per a una

càrrega determinada [Hewlett-Packard, 1987, pàgs. 1-10, 1-11, 3-16, 3-17]. Com a aproximació a aquestes gràfiques, es pot establir la següent regla empírica,

L'exactitud en una mesura propera a 50Ω és al voltant del 0,1% i independent de la freqüència –si és inferior a 100 MHz–. Cada cop que augmenta o disminueix la impedància un ordre de magnitud, la incertesa també es degrada un ordre de magnitud. Així per exemple, quan la impedància sigui de l'ordre de $5 k\Omega$ o l'admitància de l'ordre de $2 S$ –les gràfiques són simètriques respecte la càrrega–, la incertesa de l'instrument és de l'ordre del 10%. A freqüències superiors la incertesa augmenta fins a un factor de dos.

Finalment, si per motius diversos s'ha de mesurar en zones d'exactitud limitada –llunyanes a 50Ω –, el calibratge en el pla de mesura no és tant necessari si és té en compte la longitud de la línia de transmissió.

4.2.4 Instruments de propòsit general

Els aparells que es referencien en els apartats precedents mesuren impedància de forma específica. Una alternativa per a la mesura d'impedància és l'ús d'aparells de propòsit general controlats mitjançant un bus d'instrumentació –e.g. IEEE-488 o VXI–. Aquesta alternativa realitza els blocs d'un mesurador d'impedàncies de forma més flexible i autònoma. En aquest apartat només es descriu de forma molt breu aquells instruments que, en algun moment d'aquest treball s'han utilitzat per verificar alguna mesura realitzada amb els aparells específics.

El laboratori disposa, entre altres, d'un generador de radiofreqüències Philips PM 5330 per a la generació de senyal tipus sinusoidal en el marge de 100 kHz a 180 MHz amb una resolució de 10 Hz, una puresa espectral superior a 40 dB i una sortida màxima de 13 dBm –1 V a càrrega de 50Ω –. El laboratori també disposa d'un sintetitzador de freqüències de ràdio Hameg HM 8133 que genera senyals tipus sinusoidal en el marge de 1 Hz a 1 GHz amb una resolució de 0,1 Hz, una puresa espectral superior a 30 dB per sota 500 MHz i una sortida màxima de 7

dBm.

El laboratori disposa per a la detecció de senyal d'un oscil·loscopi Tektronix model TDS 420 que té quatre canals iguals de 150 MHz –amb sensibilitat 5 mV/div o inferiors– i sensibilitat màxima d'1 mV/div amb un convertidor analògic-digital de 8 bits i 100 Mmostres per segon per a cada canal, amb una exactitud de $\pm 1,5\%$. Per augmentar la sensibilitat a freqüència baixa i per mesurar una tensió flotant respecte massa, es té el preamplificador diferencial Tektronix ADA400A amb un guany programable de 0,1, 1, 10 i 100, un ample de banda màxim d'1 MHz i un CMRR de 75 dB a guany unitat i 100 Hz.

4.3 Topologia, disposicions i calibratge dels sistemes de mesura

Les cèl·lules contenen els sòls i els instruments mesuren paràmetres elèctrics. Per a que aquests dos elements mesurin impedància de sòls, cal que connectem les cèl·lules plenes de material als terminals d'entrada dels instruments. En aquest apartat esbrinem quina combinació possible entre cèl·lula i instrument és més adient segons el tipus de mesura i el marge de freqüència.

4.3.1 Mesura en contínua, mesura de conductivitat

Cal advertir que la mesura en contínua perjudica qualsevol cèl·lula atesos possibles fenòmens electroquímics en els elèctrodes, i pot fer que la lectura no sigui estable. Un experiment qualitatiu senzill ho demostrà. Vam preparar un sòl de llim argilós saturat del tipus que es descriu al capítol 5. Hi clavàrem quatre elèctrodes d'acer inoxidable i de llautó en forma de piqueta d'uns 5 g cadascun. Dos elèctrodes tancaren un circuit de contínua i els altres dos en tancaren un de alterna d'1 kHz. Vam fer passar 5 mA i 5 mA_{ef} respectivament durant dos dies. L'elèctrode connectat al terminal positiu del circuit de contínua havia perdut gairebé el 10% de pes. Els altres tres elèctrodes, un cop nets, no havien sofert cap canvi apreciable de pes (< 0,1 g).

L'electròmetre només permet mesurar amb dos fils, o com a màxim amb dos fils i un apantallament. Això significa que la cèl·lula de secció constant no és la cèl·lula més indicada per a aquesta mesura.

La figura 13 mostra la connexió de l'electròmetre a la resistència que es mesura, en aquest cas la cèl·lula amb guarda. Es fa servir el cable triaxial –model 6011– on Lo –entrada baixa– i *Ground* –massa de la caixa de l'electròmetre– es connecten a V_H de la cèl·lula, Hi –entrada alta– es connecta a V_L de la cèl·lula, i la connexió x1 del plafó posterior de l'electròmetre, en aquest cas la tensió Vo, es connecta a l'apantallament de la cèl·lula.

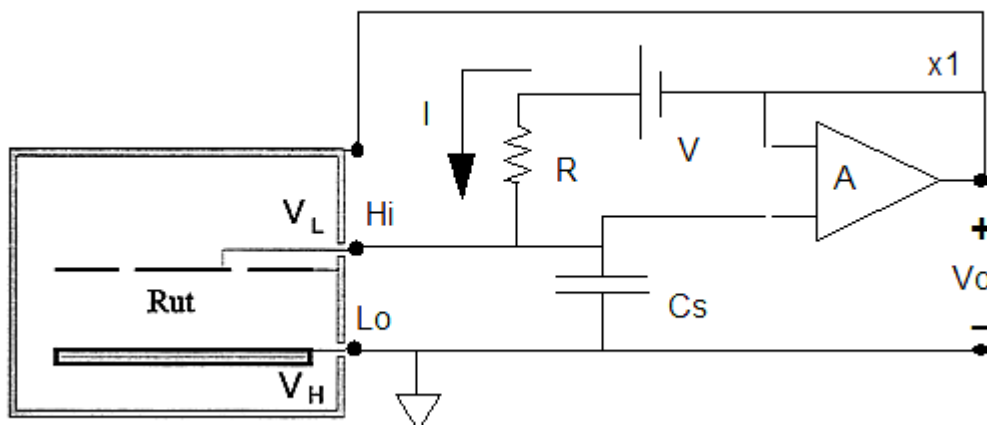


Figura 4.135 Mesura de la conductivitat de sòls mitjançant un electròmetre que funciona com òhmetre en mode normal.

L'apantallament fa que les possibles fuites de corrent pels extrems de la cèl·lula no afectin la mesura. Així, la constant de cèl·lula és la que correspon a l'àrea de l'elèctrode interior circular de diàmetre l dividit per la separació del gruix del material t com s'ha vist en l'apartat 4.1.2.

Quan no hi ha fenòmens de migració iònica que perjudiquin la cèl·lula, es pot avaluar la permitivitat de sòls a través de la càrrega i descàrrega a corrent constant de la cèl·lula (figura 4.13) sempre que es calibri abans l'efecte de C_s o bé s'elimini la guarda curtcircuitant els dos elèctrodes i es realitzi la mesura en mode *Fast*. Ara bé, segons s'ha vist a l'apartat 4.2.1, si bé és cert que C_s no afecta, la mesura és flotant i sense apantallament i això la fa susceptible a interferències.

4.3.2 Mesura a freqüència baixa amb dos i quatre fils

Mesura amb dos fils (amb guarda)

El sistema de mesura a freqüència baixa consta de la cèl·lula capacitiva amb guarda (apartat 4.1.2), l'analitzador d'impedàncies hp 4192A que es basa en un pseudo-pont (apartat 4.2.2) i la connexió adient de tots dos elements.

L'efecte de les capacitats paràsites causades per l'apantallament [Hippel, 1995, pàgs. 50-62], es pot reduir de tres maneres:

- connexió de l'elèctrode de guarda a la mateixa tensió que l'elèctrode guardat però sense l'efecte de càrrega, mitjançant un pont realitzat amb transformador [Hippel, 1995, pàgs. 56-58], [IEC 250 69, pàgs. 33-35].
- connexió de l'elèctrode de guarda a la mateixa tensió que l'elèctrode guardat però sense l'efecte de càrrega mitjançant una guarda activa, facilitada per un amplificador de banda ampla –e.g. un amplificador operacional configurat amb guany unitat–.
- connexió de l'elèctrode de guarda a la mateixa tensió que l'elèctrode guardat però sense l'efecte de càrrega mitjançant l'aprofitament de les característiques especials de l'analitzador d'impedàncies hp 4192A en un sistema de tres terminals –dos elèctrodes més guarda–.

Per senzillesa, s'utilitza aquí la tercera tècnica, i s'adopta una estructura comparable a la del pont amb transformador [Honda, 1989, pàgs. 2-1 a 2-10], on el terminal de l'elèctrode de guarda –al igual que la resta de l'apantallament elèctric– es connecta al terminal de referència del circuit de mesura –comú del pont autobalancejat–. La figura 4.16 mostra l'esquema de la cèl·lula amb guarda on es connecta V_H amb HP i HC, i V_L amb LP i LC. La terminologia és la introduïda a la figura 4.3. Es mesura la capacitat entre els dos elèctrodes de mesura C_{ut} (*under test*) i C_g , i també es mesura la conductivitat –amb dos fils més la guarda–.

L'apartat 4.1.2 descriu les fonts d'error possibles que cal classificar, agrupar i avaluar un cop s'han vist les connexions. La separació entre elèctrodes, de $t=4,05$ mm, serveix de referència. La disposició acurada dels apantallaments ofereix una repetibilitat de les mesures millor que l'exactitud de l'instrument si es garanteix la col·locació sempre igual del material dielèctric que es caracteritza.

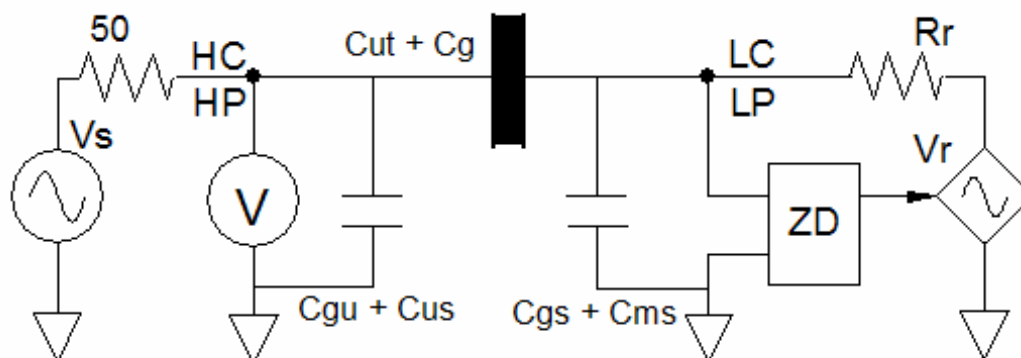


Figura 4.16 Esquema elèctric de la mesura a dos fils a freqüència baixa. Les capacitats paràsites no influeixen teòricament amb aquest connexió.

Tanmateix, per tal de quantificar els errors sistemàtics, es classifiquen en errors de zero, errors de sensibilitat i errors de no linealitat —que es desprecien—.

Errors de zero

1- Desviació de les línies de camp a les proximitats de l'extrem de la guarda. Heerens (1975), per a un cas semblant, troba un error inferior al 0,0002% en el pitjor dels casos, la qual cosa és inferior a la resolució de la instrumentació que es té.

2- Error causat per l'exactitud del detector de zero de l'analitzador. La capacitat paràsita entre l'anella de guarda i l'elèctrode gran —terminal HP a la figura 4.16— és $C_{gu} \cong \epsilon_r \cdot 28 \text{ pF}$, i no contribueix a l'error ja que el senyal d'excitació es mesura un cop connectat, i per tant amb l'efecte de càrrega present. Altres termes com ara $C_{us} \cong 7 \text{ pF}$ i $C_{gs} + C_{ms} \cong 11 \text{ pF}$ tampoc incideixen en el resultat final.

Designem com z_1 el terme d'error que depèn de l'exactitud del detector de zero de l'analitzador d'impedància i de la mesura de la tensió d'excitació (V_s). Per tal de quantificar aquest error, mesurem la tensió que hi ha en el detector de zero de l'analitzador quan connectem un condensador de 100 pF amb una V_s de 3 Vpp i un altre condensador en paral·lel amb l'entrada del detector (LP). Els resultats es mostren a la taula 4.2.

Freqüència	20 kHz	50 kHz	100 kHz	200 kHz	1 MHz	2 MHz	5 MHz	10 MHz
D.z. (mV)	< 1	< 1	< 1	< 1	2	5	12	30

Taula 4.2 Mesura de tensió en borns del detector de zero D (mòdul, mVpp) en funció de la freqüència.

Si es connecta la cèl·lula com element de mesura amb l'analitzador d'impedàncies tal com indica la figura 4.16 i es té en compte l'error de zero que es presenta a la taula 4.2, s'observa que l'element paràsit que contribueix a aquest error és C_{ms} . Mesures posteriors en aquest mateix capítol — $C_{p2}=11$ pF— i consideracions geomètriques — C_{ms} és el 25% de C_{p2} — permeten avaluar una cota superior d'error si es suposa un desfusatge màxim entre el senyal d'excitació V_s de 3 Vpp i la tensió de defecte que hi ha a l'entrada del detector de zero —taula 4.2— tal que tota la contribució d'error sigui capacitiva. Aleshores, l'error en la capacitat mesurada es pot avaluar com la relació entre la tensió d'excitació (V_s) i la d'entrada del detector de zero multiplicat pel valor de C_{ms} ,

$$C_{error} = C_{ms} \frac{V_{zero}}{V_s} \quad (4.21)$$

A 1 MHz, $z_1=2,7$ pF 2 mV / 3 V = $0,002$ pF, i a 10 MHz, $z_1=2,7$ pF 30 mV / 3 V = $0,03$ pF

3- Error causat per la inductància paràsitica sèrie [ASTM D 150-92, pàg. 35] designat com z_2 . En el present cas, hem forçat un comportament similar amb elements discrets i hem observat — $L_s < 0,4$ μ H—, i per tant,

$$z_2 = \Delta C = \omega^2 L_s C_{ut}^2 \quad (4.22)$$

A 1 MHz i en buit $z_2=(2\pi 10^6)^2 \cdot 0,4 \cdot 10^{-6} \cdot (12,6 \cdot 10^{-12})^2=0,0025$ pF. A 10 MHz i en buit $z_2=0,25$ pF. A 13 MHz i en buit $z_2=0,42$ pF.

De tota manera, aquest factor es redueix en l'avaluació total de l'error perquè es realitza un calibratge previ on es té en compte $0,4$ μ H d'inductància sèrie. Per tant, només ens afectarà la indeterminació d'aquest factor, que estimem en un 20% del valor nominal, de manera que a 10 MHz, per exemple, tant sols és $0,05$ pF.

4- Error per toleràncies mecàniques, designat com z_3 . La dimensió més crítica és la separació d'elèctrodes t . Per tant, es suposa que tot l'error per toleràncies en les mesures és atribuïble a t . En conseqüència, l'error és

$$\Delta C = C_0(t=4,05 \text{ mm}) - C_0(t=4,05 \text{ mm} + 0,05 \text{ mm}) \cong 0,15 \text{ pF}.$$

De tota manera, aquesta és una cota molt pessimista d'error ja que la capacitat major de zones amb t més petita compensa les de t majors. Així doncs, cal multiplicar la xifra d'error per un nombre positiu inferior a la unitat. Si agafem $\beta=0,2$, el terme d'error que resulta és $z_3 = \beta \cdot 0,15 \text{ pF} \cong 0,03 \text{ pF}$. La cèl·lula té dos eixos de simetria, per tant l'ensamblament de cada una de les cares amb la separació de gruix t permet quatre combinacions. La dispersió de mesures de la capacitat en buit entre les quatre combinacions és el valor numèric de z_3 . Hem agafat $\beta=0,2$ per aquest motiu.

Errors de sensibilitat

1- s_1 designa, per analogia amb el errors de zero, el terme d'error que correspon a la indeterminació en el valor de C_g . Goad, (1990) dóna unes taules per a C_g amb les premisses de $g \ll t$ i elèctrode de guarda gruixut. La condició $g \ll t$ és la més important, l'altra té un efecte de segon ordre. A partir d'aquestes taules s'obté que quan $t=4 \text{ mm}$, C_g és $0,11 \pi 84,7/100 8,854185 \text{ pF}$ $\varepsilon_r \text{ mostra} = (0,26 \text{ pF} \pm 0,02 \text{ pF}) \varepsilon_r \text{ mostra}$; i quan $t=10 \text{ mm}$, C_g és $(0,12 \text{ pF} \pm 0,02 \text{ pF}) \varepsilon_r \text{ mostra}$.

Els termes $0,26$ i $0,12 \text{ pF}$ corresponen a C_{g0} i per tant es consideren part de la capacitat de la cèl·lula de mesura —equació 4.6—. Els segons termes ($\pm 0,02 \text{ pF}$) no són calibrables ja que depenen de la permitivitat; per tant, s_1 només rep la contribució d'aquest terme no corregible.

2- A causa de les toleràncies de fabricació en les peces, hi ha el mateix valor indeterminat de capacitat de quan s'estudià l'error de zero. Així, el terme total s_2 és, $\beta \cdot 0,15 \text{ pF} \cong 0,03 \text{ pF}$.

L'avaluació total d'error com error quadràtic mig queda, si designem E_z com error de zero i E_s com error de sensibilitat,

$$E_z = \sqrt{z_1^2 + z_2^2 + z_3^2} \cong \begin{cases} z_3 = 0,03 \text{ pF @ 1 MHz} \\ z_2 = 0,25 \text{ pF @ 10 MHz} \end{cases} \quad (4.23)$$

$$E_s = (\varepsilon_r - 1) \sqrt{s_1^2 + s_2^2} \cong (\varepsilon_r - 1) 0,036 \text{ pF @ 1-10 MHz}$$

Òbviament, sigui quin sigui el mètode de mesura que s'utilitza, les exactituds

més elevades s'aconsegueixen només amb una avaluació acurada de totes les fonts d'error.

Fins ara s'ha descrit les connexions dels elements i els errors de zero i de sensibilitat. Ara cal calibrar el sistema de mesura amb la cèl·lula amb guarda plena d'un dielèctric de referència. La figura 4.17 mostra un model circuital del sistema que es mesura amb la cèl·lula amb guarda plena amb aigua desionitzada, on b és la inductància sèrie equivalent que inclou la inductància sèrie física ($<0,1 \mu\text{H}$) més la contribució dels errors de mòdul i fase de l'analitzador. La resistència d' 1Ω representa les pèrdues de cables i connectors, la capacitat d' 1 nF és la capacitat de la cèl·lula amb guarda amb aigua, i els $4 \text{ k}\Omega$ corresponen a la conductivitat de la cèl·lula amb guarda per manipulació de l'aigua. Quan ϵ_r de la mostra és alta (80) el valor que s'observa de b en el model és $0,4 \mu\text{H}$ mentre que quan $\epsilon_r=1$ la b equivalent és $1,1 \mu\text{H}$.

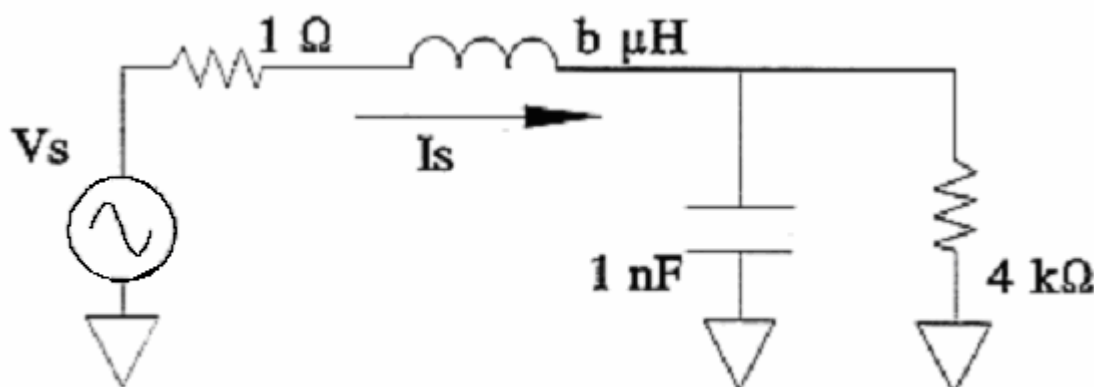


Figura 4.17 Model circuital equivalent de la cèl·lula capacitiva amb guarda quan el dielèctric és aigua desionitzada ($6 \text{ k}\Omega\cdot\text{m}=0,6 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$).

La funció de transferència $V_s(\omega)/I_s(\omega)$ del circuit de la figura 4.17 —com model de condensador amb pèrdues més la inductància sèrie equivalent— es representa a la figura 4.18. Es pot veure que a 8 MHz hi ha la ressonància del circuit LC. No es pot mesurar a freqüències superiors a la de ressonància. En teoria, un dielèctric barreja de sòls i aigua té una permitivitat menor a la de l'aigua, si els efectes interfacials no intervenen, i per tant la freqüència de ressonància és superior.

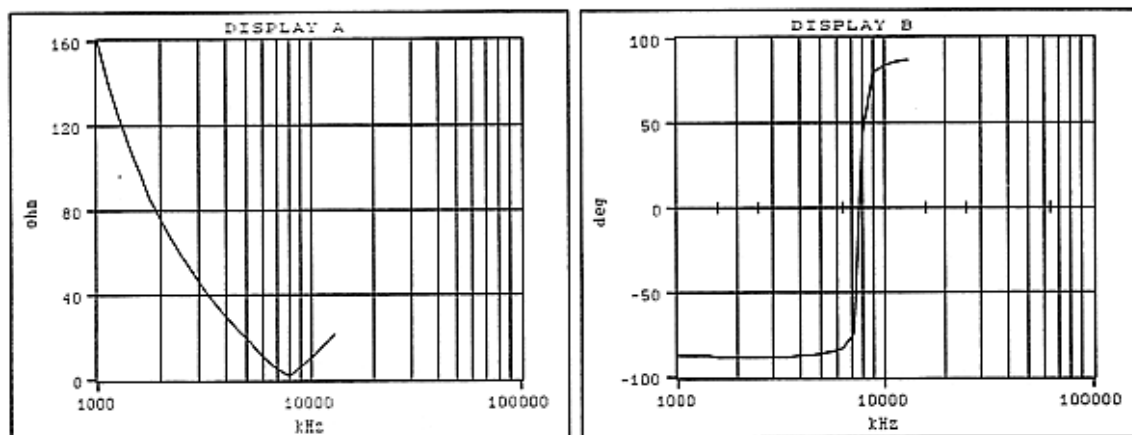


Figura 4.18 Mòdul i fase de la funció de transferència $V_s(\omega)/I_s(\omega)$ mesurada de la cèl·lula amb guarda plena d'aigua.

La constant dielèctrica de l'aigua no varia amb la freqüència si es mesura per sota 100 MHz [Hasted, 1973, pàgs. 37, 38]. Malmberg i Maryott aproximen de forma polinòmica la relació de ϵ_r amb la temperatura,

$$\epsilon_r = 87,740 - 0,40008T + 9,398 \cdot 10^{-4}T^2 - 1,410 \cdot 10^{-6}T^3$$

mentre que Kay utilitza una relació logarítmica,

$$\log(\epsilon_r) = 1,94404 - 1,991 \cdot 10^{-3}T$$

De tota manera, ambdues fórmules difereixen menys de 0,2 en el marge de temperatura on són vàlides. Això no obstant, la imprecisió en la mesura de la temperatura és la font d'error principal per saber la constant dielèctrica de l'aigua. En el nostre cas tenim una incertesa de $0,5^\circ\text{C}$ i això ja implica una incertesa de 0,2. La taula 4.3 indica la mitjana entre la ϵ_r de les equacions de Malmberg i Maryott, i de Kay en funció de la temperatura. La incertesa màxima en ϵ_r és de 0,5.

T(°C)	0	5	10	15	16	17	18	19	20	21
ϵ_r	87,8	85,9	83,9	82,0	81,6	81,3	80,9	80,5	80,2	79,8
T(°C)	22	23	24	25	26	27	28	29	30	35
ϵ_r	79,5	79,1	78,7	78,4	78,0	77,7	77,3	77,0	76,6	74,9

Taula 4.3 Valors de la constant dielèctrica de l'aigua segons Malmberg i Maryott, i Kay, en funció de la temperatura.

La figura 4.19 mostra el resultat de la mesura de la constant dielèctrica de l'aigua a 23,5°C. A freqüència baixa, i amb una conductivitat apreciable, la mesura resulta poc exacta perquè l'instrument treballa amb fases molt petites. En canvi, a freqüència alta, els errors augmenten per la indeterminació de la inductància paràsita sèrie. Per tant, el valor més acurat és el que es dona als voltants d'1 MHz –0,98 nF–. En quant a la mesura de la conductivitat, aquesta està relacionada amb el grau d'ionització de l'aigua. El resultat és 6 k Ω ·m a freqüència baixa i és incorrecte a freqüència alta perquè el model R//C que utilitza l'analitzador per calcular és poc acurat a partir de 5 MHz.

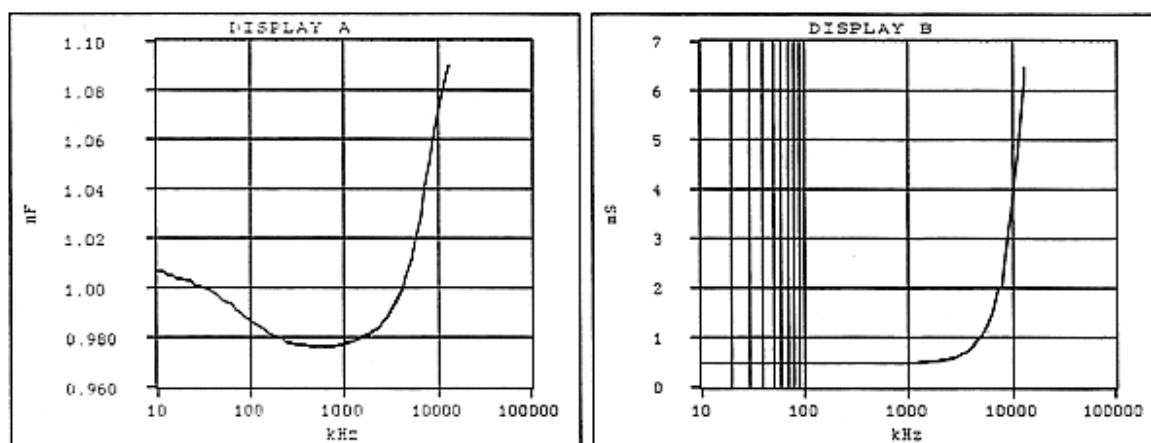


Figura 4.19 Capacitat i conductància equivalents de la cèl·lula capacitiva amb guarda plena d'aigua desionitzada contaminada per manipulació a 23,5°C.

En quant a la mecanització, cal tenir molta cura en la dimensió exacta de t i a l'apantallament de tots els cables per evitar l'efecte de les capacitats paràsites. Les recomanacions de la bibliografia sobre el disseny mecànic de cèl·lules de mesura, generalment per a líquids, és extrapolable al nostre cas, on les dimensions físiques són majors.

Mesura amb quatre fils (Kelvin)

Les impedàncies d'elèctrode elevades plantegen problemes a l'analitzador d'impedàncies, segons s'ha explicat en els apartats 3.2.2 i 4.2.2. Una solució possible per a la connexió de la cèl·lula de secció constant amb l'analitzador d'impedàncies, és fer-la a través de l'etapa amplificadora prèvia que fa que l'analitzador no vegi una impedància de contacte elevada en el terminal LC.

Atès que la resposta freqüencial del preamplificador no és plana, cal fer un calibratge previ a la mesura per tal d'equalitzar el sistema. L'analitzador d'impedàncies contempla la possibilitat d'un calibratge [Honda, 1989, pàg. C1-C2], considerant una xarxa passiva d'interconnexió entre la impedància que es mesura i l'aparell. Aquesta xarxa passiva és un biport que es caracteritza en general mitjançant la matriu de paràmetres de transmissió A , B , C i D . Atès que la xarxa és passiva, i que hi ha certes simetries, per a una caracterització completa del biport, n'hi ha prou amb dues mesures. Les més senzilles són una mesura en circuit obert i una altra en curtcircuit.

Aquest procediment de calibratge queda modificat quan s'insereix un circuit actiu com és el cas del preamplificador. Tot i que el preamplificador dins la xarxa de connexió no és un biport, sinó un quadriport, l'anàlisi del mètode de calibratge es pot fer de manera semblant. Modelem la cadena de connexió mitjançant tres biports connectats en cascada —figura 4.20—: primer, una xarxa passiva entre el dispositiu que es mesura i l'etapa frontal; segon, una etapa frontal activa; i tercer, una xarxa passiva entre l'etapa frontal i l'instrument.

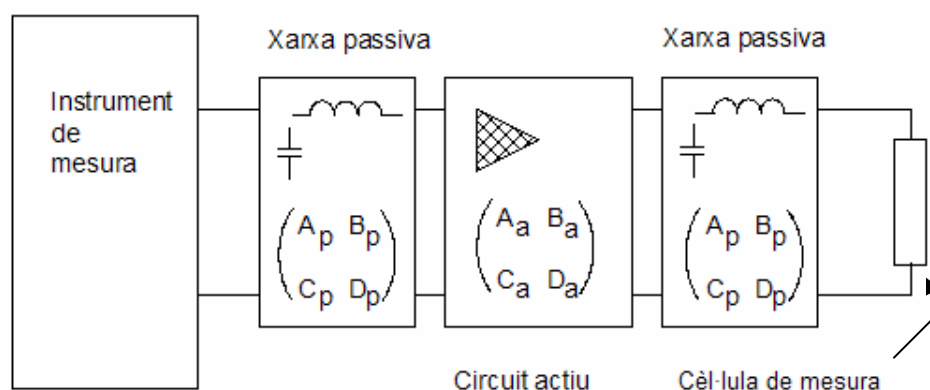


Figura 4.20 Model de connexions entre l'analitzador d'impedàncies i la cèl·lula de secció constant que inclou el model passiu de connexions –xarxes passives– i una etapa activa.

El biport frontal actiu es modela mitjançant impedància d'entrada, guany ideal i impedància de sortida. La matriu de paràmetres de transmissió és,

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \frac{1}{k} \begin{bmatrix} I & Z_o \\ \frac{I}{Z_i} & \frac{Z_o}{Z_i} \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

on Z_i és la impedància d'entrada, Z_o la impedància de sortida i k el guany. La matriu de paràmetres de transmissió d'aquest tipus de circuit actiu, siguin quins siguin els seus valors numèrics, és singular. Això vol dir que només cal tres paràmetres independents, i per tant tres mesures per caracteritzar-lo. És més, la matriu de paràmetres de transmissió de qualsevol sistema més complex que resulti de connectar en cascada aquesta xarxa amb xarxes passives, és també singular. Per demostrar-ho, si calculem primer el determinant

$$A_a D_a - B_a C_a = \frac{1}{k} \left(\frac{Z_o}{Z_i} - \frac{I}{Z_i} Z_o \right) = 0 \quad (4.25)$$

on A_a , B_a , C_a i D_a són els paràmetres de transmissió del biport actiu, veiem que és nul. Els subíndexs indiquen biport actiu. Si ho generalitzem al cas quan s'afegeix una xarxa passiva tindrem

$$\begin{bmatrix} A_t & B_t \\ C_t & D_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_a & B_a \\ C_a & D_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_p & B_p \\ C_p & D_p \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

$$\left. \begin{aligned} A_t &= A_a A_p + B_a C_p \\ B_t &= A_a B_p + B_a D_p \\ C_t &= C_a A_p + D_a C_p \\ D_t &= C_a B_p + D_a D_p \end{aligned} \right\} A_t D_t - B_t C_t \quad (4.27)$$

$$A_t D_t - B_t C_t = A_p D_p (A_a D_a - B_a C_a) + B_p C_p (B_a C_a - A_a D_a) = 0 \quad (4.28)$$

Veiem que el determinant torna a ser nul.

El calibratge final d'aquest sistema es realitza, doncs, mitjançant tres mesures d'impedància sobre tres mostres conegudes. Les mesures es fan a freqüències inferiors a 1 MHz, on els efectes paràsits de resistència i inductància sèrie en borns són negligibles.

4.3.3 Mesura a freqüència mitjana

El sistema de mesura de l'apartat anterior de freqüència baixa emprava un analitzador d'impedàncies basat en un pseudo-pont i les cèl·lules que es podien connectar per mesurar amb dos fils amb guarda si la connexió era directa o amb quatre fils si es feia a través d'una etapa preamplificadora. En aquest apartat s'analitzen les possibles connexions en un sistema de mesura que es basi en connexions directes entre cèl·lules i generador de funcions i oscil·loscopi, que permet una flexibilitat major que el sistema anterior tot i que totes les mesures són amb dos fils i sense guarda.

Calibratge de la cèl·lula adaptada

Seguidament, descrivim el calibratge per a la mesura amb la cèl·lula adaptada –sense guarda– amb dos fils, que en buit té una capacitat de 55 pF. Per calibrar cal conèixer la capacitat paràsita de l'apantallament a 100 kHz, 1 MHz i 10 MHz.

Quan es mesura amb dos fils no es pot destriar entre la capacitat que es busca i les capacitats paràsites que la circumden i que són degudes sobre tot a l'apantallament. Per tant, es realitzen una sèrie de mesures amb diferents topologies que porten a un sistema d'equacions on les variables són les diferents capacitats involucrades –figura 4.21–.

La capacitat de la cèl·lula adaptada en buit que es mesura quan és vol calibrar el sistema és la C_{ut} de la figura 4.21a. L'apantallament necessari provoca les dues capacitats paràsites, C_{p1} i C_{p2} , també representades a la figura 4.21a. La figura 4.21b és l'esquema quan s'incorpora l'analitzador hp 4192A a la mesura. La figura 4.21c és el circuit de mesura quan es connecta l'apantallament i la placa petita de la cèl·lula adaptada al potencial baix de mesura i la placa gran al potencial alt. La figura 4.21d és el circuit anàleg al de la figura 4.21c sense connexió de la placa petita. La figura 4.21e és el circuit anàleg al de la figura 4.21c amb permutació de plaques petita i gran, i la figura 4.21f és el circuit anàleg al de la figura 13d amb permutació de plaques petita i gran.

Hem configurat les cinc topologies descrites a la figura 4.21 i hem mesurat la capacitat respectiva mitjançant l'analitzador d'impedàncies hp 4192A. Els resultats es presenten a la taula 4.4. En les mesures a 10 MHz s'ha comptat amb la inductància paràsita de les connexions.

CAPACITAT: figura 13 \ freqüència	100 kHz	1 MHz	10 MHz
C_{ut} (pont autobalancejat) (b)	56 pF	55 pF	54 pF
$C_{ut} + C_{p1}$ (c)	83 pF	82 pF	93 pF
$C_{ut}/C_{p2} + C_{p1}$ (d)	36 pF	36 pF	37 pF
$C_{ut} + C_{p2}$ (e)	67 pF	66 pF	73 pF
$C_{ut}/C_{p1} + C_{p2}$ (f)	29 pF	29 pF	30 pF

Taula 4.21 Valors mesurats de capacitats de la cèl·lula adaptada segons les diferents connexions indicades a la figura 13.

Les cinc mesures independents ens donen cinc equacions. Atès que només hi ha tres incògnites (C_{ut} , C_{p1} i C_{p2}), el sistema és sobredeterminat. Els resultats de cada mesura són,

$$\begin{aligned}
 C_{ut} &= 55 \text{ pF} & (a) \\
 C_{ut} + C_{p1} &= 83 \text{ pF} & (b) \\
 C_{ut} + C_{p2} &= 66 \text{ pF} & (c) \\
 \frac{C_{ut} C_{p2}}{C_{ut} + C_{p1}} + C_{p1} &= 36 \text{ pF} & (d) \\
 \frac{C_{ut} C_{p1}}{C_{ut} + C_{p1}} + C_{p2} &= 29 \text{ pF} & (e)
 \end{aligned}
 \tag{4.29}$$

Si es resolen les tres incògnites amb les tres equacions primeres *a*, *b* i *c* els valors que s'obtenen són $C_{ut} = 55 \text{ pF}$, $C_{p1} = 27 \text{ pF}$ i $C_{p2} = 11 \text{ pF}$. Si s'opera a *d* i *e* amb aquests valors obtinguts els resultats són $36,2 \text{ pF}$ i $29,1 \text{ pF}$ respectivament la qual cosa prova el valor correcte de les mesures.

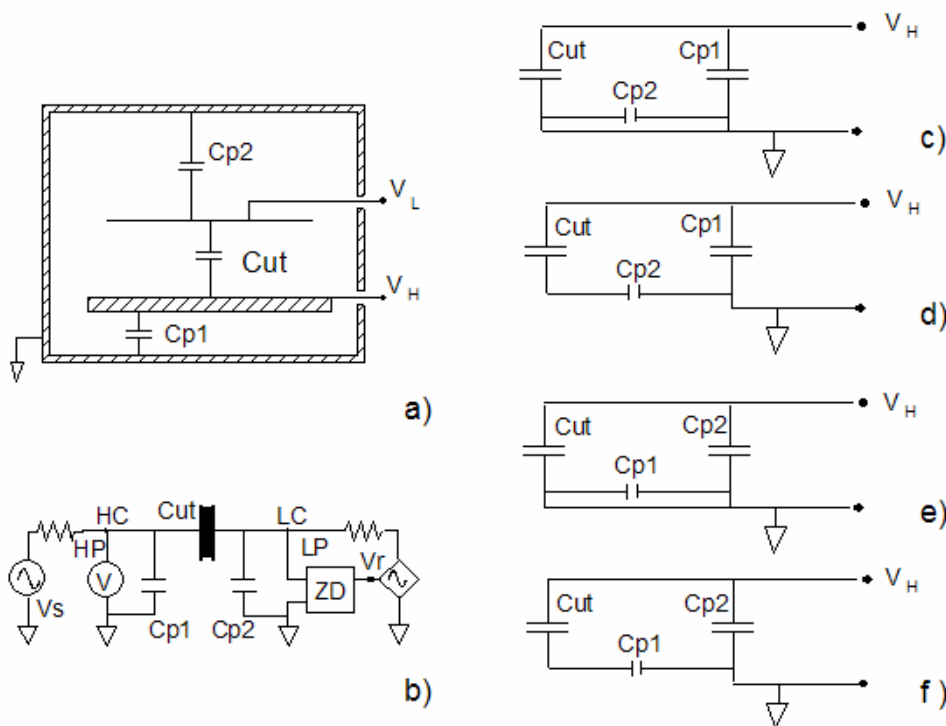


Figura 4.21. a esquema de la cèl·lula. b circuit de mesura equivalent quan es mesura C_{ut} . c-f diverses combinacions possibles que permeten obtenir 5 equacions i 3 incògnites.

Aquests valors relativament grans de capacitats paràsites són fixos i per tant el seu valor no depèn dels paràmetres elèctrics del sòl que es mesuri; per això, es descomptaran quan es mesurin sòls.

Cèl·lula adaptada amb càrregues adaptades

La figura 4.22 mostra el circuit que resulta quan es connecta la cèl·lula adaptada al generador i l'oscil·loscopi. No és aconsellable permutar la connexió de C_{p1} per C_{p2} ja que, atès que C_{p1} és més gran que C_{p2} , interessa C_{p1} en paral·lel amb el generador i C_{p2} en paral·lel amb un canal amb càrrega adaptada de l'oscil·loscopi. La capacitat paràsita en paral·lel amb el generador de funcions, en aquest cas C_{p1} que és la major, no afecta la relació de tensions que es mesuren amb els dos canals de l'oscil·loscopi en la figura 4.22. La capacitat en sèrie amb la cèl·lula, en aquest cas C_{p2} que és la menor, sí que afecta la relació de tensions ja que fa de filtre passa baixes només en un canal. Si invertíssim les connexions estaríem en el cas contrari i l'efecte de filtre passa baixes es notaria a freqüència inferior.

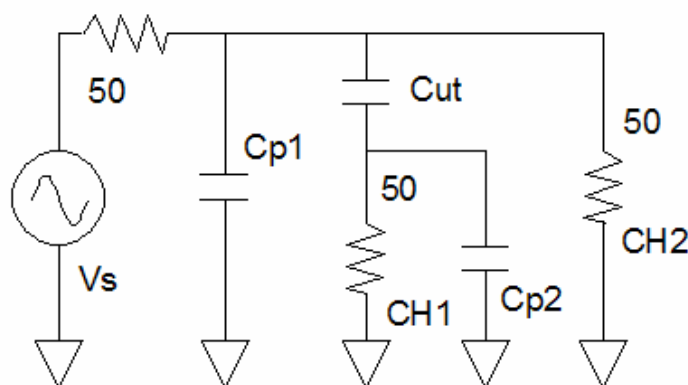


Figura 4.142 Esquema de circuit elèctric que resulta del connexionat de la cèl·lula adaptada, generador i oscil·loscopi.

Fins ara s'han considerat els efectes paràsits de l'apantallament amb C_{p1} i C_{p2} . Cal afegir els efectes paràsits inductius de les pròpies connexions, que a més poden ajudar a explicar les petites discrepàncies de valors obtinguts de les capacitats paràsites a diverses freqüències.

Per tal de determinar quin tipus de connexions tenen menor inductància, s'han calculat, mecanitzat i mesurat quatre espiras planes de forma diferent [Paul, 1992, pàg. 504], [Grover, 1973, pàg. 60] i [Walker, 1990, pàg. 10]. S'ha confeccionat la taula 4.5 afegint les mesures de l'analitzador d'impedàncies hp 4192A a 1 MHz i 10 MHz.

Les espire mecanitzades, totes amb fil de coure de 1 mm de diàmetre, són:

- a) una circumferència de 21,0 cm de perímetre; designada com La
- b) una circumferència de 11,0 cm de perímetre; designada com Lb
- c) un rectangle de costats 9,5 i 1,0 cm; designada com Lc
- d) un rectangle de costats 10,0 i 0,3 cm; designat Ld.

Referència \ inductàncies (nH)	La	Lb	Lc	Ld
Paul	-	-	114	72
Grover	190	85	-	-
Walker	180	80	-	-
mesurades (hp 4192A)	167	62	136	88

Taula 4.5 Relació entre inductàncies de diferents espire segons diferents bibliografia i mesures.

Els resultats de la taula 4.5 mostren els ordres de magnitud de les inductàncies paràsites inevitables degudes a les connexions físiques de la cèl·lula adaptada amb els instruments de generació i mesura.

Finalment, la figura 4.23 mostra el circuit que resulta quan es connecta la cèl·lula adaptada al generador i l'oscil·loscopi amb tots els efectes paràsits. L'anàlisi d'aquest circuit permet definir la funció de transferència de tensió mesurada en els dos canals de l'oscil·loscopi. L'anàlisi s'ha realitzat amb ajut del programa d'anàlisi de circuits simbòlics Isaac versió 4.0, de la Universitat Catòlica de Lovaina.

La funció de transferència entre els dos canals de mesura és,

$$H(s) = \frac{g_0 + g_{ut} + A s + B s^2 + C s^3 + D s^4}{g_{ut} + C_{ut} s} \quad (4.30)$$

on s'ha designat els coeficients

$$\begin{aligned} A &= g_{ut} g_0 (L_{p1} + L_{p2}) + C_{ut} + C_{p2} \\ B &= g_{ut} L_{p1} (C_{p1} + C_{p2}) + C_{ut} g_0 (L_{p1} + L_{p2}) + C_{p1} L_{p1} g_0 + C_{p2} L_{p2} g_0 \\ C &= L_{p1} [C_{p1} (C_{p2} + C_{ut} + g_{ut} L_{p2} g_0) + C_{p2} (C_{ut} + g_{ut} L_{p2} g_0)] \\ D &= g_0 L_{p1} L_{p2} (C_{p2} C_{ut} + C_{p1} C_{ut} + C_{p1} C_{p2}) \end{aligned}$$

on g_0 és la admitància característica de la línia $-1/50 \Omega-$, de font i càrrega de generador i oscil·loscopi, g_{ut} és la conductància que presenta la mostra confinada a la cèl·lula, C_{ut} la capacitat de la cèl·lula amb el dielèctric que s'analitza i el valors amb subíndex p els diferents elements paràsits.

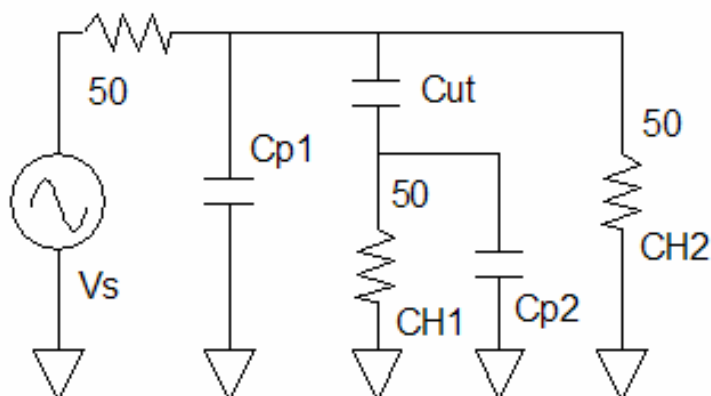


Figura 4.23 Circuit elèctric equivalent del connexionat de la figura 4.22 quan es consideren els efectes paràsits.

Mitjançant diferents mesures de la cèl·lula adaptada en buit $-55 \text{ pF}-$, hem trobat que $L_{p1} = 50 \text{ nH}$ i $L_{p2} = 65 \text{ nH}$ són els valors que millor ajusten la funció de transferència de l'equació (4.30).

Extensió de freqüència

El sistema que acabem de veure de cèl·lula adaptada i línies de transmissió adaptades cap a generador i oscil·loscopi podem ampliar-li el marge de freqüències de mesura en el seu extrem inferior. L'objectiu pot ser obtenir més informació o per comprovar-ne la seva validesa. En tot cas, es possible descriure la cèl·lula adaptada mitjançant paràmetres concentrats i les connexions mitjançant línies de transmissió adaptades.

Si g_{ut} és petita, per exemple quan es mesura un sòl poc conductor i sec, el mètode de mesura amb generador i oscil·loscopi ve limitat per la sensibilitat de l'oscil·loscopi, ja que el corrent que es drena en un dels canals es fa molt petit. Una forma poc recomanable d'augmentar la sensibilitat del oscil·loscopi és mitjançant un preamplificador diferencial d'alta sensibilitat amb un dels seus canals posat a

massa. S'observa una interferència conduïda si la resistència de retorn de la sonda diferencial no és estrictament nul·la. Com exemple, suposem que la connexió de massa de la sonda té una resistència de 10 mΩ. Suposem també que un dels canals de l'oscil·loscopi es detecten 5 V d'un senyal que prové del generador, que dona aproximadament 10 V en circuit obert. La interferència resistiva (V_i) tindrà una amplitud

$$V_i \cong 5V \frac{R_{\text{malla}}}{g_o} = 1 \text{ mV}$$

Aquesta interferència és del mateix ordre que el senyal que es mesura amb la sonda diferencial. Per tant, els dos canals de l'oscil·loscopi han de tenir una impedància d'entrada alta.

Mesures amb l'analitzador d'impedàncies hp 4191A

La mesura amb aquest aparell necessita la cèl·lula capacitiva simètrica petita ja que interessa un mòdul d'impedància de l'ordre dels 50 Ω a les freqüències d'interès. Si la part conductiva no domina, la permitivitat relativa del sòl humit és de l'ordre de 10 i la capacitat en buit entre plaques és de 4 pF. Les freqüències de mesura òptimes són per sota 100 MHz.

Es mesura amb la cèl·lula simètrica petita esmentada, muntada sobre la placa de proves hp 16092A. La connexió elèctrica entre placa i cèl·lula petita fa de suport mecànic. El procés de calibratge necessita tres referències. És important que les càrregues de calibratge reproduïxin de la forma més fidel possible les condicions de mesura. En aquest context, la referència curtcircuit és la pròpia cèl·lula capacitiva plena amb una malla metàl·lica de coure —que es mecanitza a partir de malla d'un cable RG-58—. Es pot utilitzar també una solució salina força saturada. A més, la referència circuit obert és una reproducció dels fils de connexió cèl·lula petita-placa de proves però sense la cèl·lula; només es conserva la posició de les connexions. Finalment, la càrrega adaptada és un resistor de 50 Ω, de l'1% de tolerància, de pel·lícula metàl·lica i de 1/4 W, muntat en una disposició de cables igual a la de la cèl·lula de mesura.

Un efecte inductiu paràsit sèrie fa que la capacitat mesurada augmenti a partir de 100 MHz. Aquest augment el causa el fet que l'admitància d'una combinació sèrie de capacitat (C) i inductància paràsit (L) s'associa a una capacitat (C') sense element paràsit, $Y(\omega) = (j\omega L + (j\omega C)^{-1})^{-1} = j\omega C(1 - \omega^2 LC)^{-1} \triangleq j\omega C'$ que és

el mateix efecte que causava el terme d'error 6 de la cèl·lula capacitiva simètrica –apartat 4.1.3–. Així, a mida que es puja en freqüència sembla que la capacitat augmenti. Hem avaluat aquesta inductància en 2 nH, valor molt petit però que a 100 MHz modifica el valor real de la mesura. La inductància de les connexions és major de 2 nH però aquí només es manifesta l'increment o decrement d'inductància respecte la connexió de càrrega adaptada i curtcircuit de calibratge. Per exemple, un increment d'1 mm respecte la connexió de calibratge comporta una inductància d'1 nH que pot ser positiva o negativa.

La mateixa relació de combinació sèrie de capacitat i inductància paràsita si considerem les pèrdues de la capacitat (R) real i (R') mesurada, queda

$$Y = \frac{I}{R'} + j\omega C' = \frac{I}{R} \frac{I}{(1 - \omega^2 CL)^2 + \left(\omega \frac{R}{L}\right)^2} + j\omega C \frac{1 - \omega^2 CL - \frac{L}{R^2 C}}{(1 - \omega^2 CL)^2 + \left(\frac{\omega L}{R}\right)^2} \quad (4.31)$$

on el terme imaginari –de capacitat– té un petit error de desplaçament i pateix les variacions més fortes fins a un canvi de tendència quan es puja en freqüència.

4.3.4 Mesura a freqüència alta

Les mesures es realitzen amb el analitzador d'impedàncies hp 4191A i alguna de les cèl·lules de camps oberts. El procediment de mesura és independent de la cèl·lula escollida. Els calibratges de les cèl·lules un cop connectades a l'analitzador defineixen els paràmetres que caracteritzen el sistema.

Si necessitem una sensibilitat alta i el sòl conté partícules grans —sempre mides inferiors o iguals a les de les graves—, la cèl·lula més recomanable és la línia de transmissió coaxial en circuit obert de 1,625 cm de radi exterior en la boca; en canvi, si el sòl és molt homogeni i plàstic —llims i argiles— es pot utilitzar el monopòl curt.

La sortida de l'analitzador es realitza mitjançant un connector APC-7. S'estableix una cadena d'adaptadors d'APC-7 a N i d'N a BNC on es connecta el coaxial RG-58 i a continuació la cèl·lula. Previ a la connexió de la cèl·lula de mesura, cal informar a l'analitzador que aquesta unió és el pla de referència amb la connexió seqüencial de tres càrregues de referència amb la terminació BNC i mesura de les càrregues a les freqüències d'interès. Les tres càrregues de referència són un circuit obert, un curtcircuit i una càrrega adaptada de 50Ω .

La longitud elèctrica de la cèl·lula s'introdueix a l'analitzador per programa. Aquest procediment permet intercanviar les cèl·lules sense recalibratge de l'instrument amb les càrregues de referència.

El calibratge necessari de la cèl·lula per determinar les k_i de l'equació 4.14 es realitza amb tres materials de constant dielèctrica coneguda. El model d'admitància quadràtic determina la constant dielèctrica complexa tant sols resolent una equació de segon grau. S'han de conèixer primer els tres paràmetres de calibratge mitjançant la mesura de tres materials de constant dielèctrica coneguda. Els tres materials són tefló —politetrafluoretilè $\epsilon_r = 2,05$ —, aigua desionitzada i solució salina fisiològica —NaCl 0,154 N— [Stogryn, 1971].

4.4 Conclusions

Per mesurar la impedància elèctrica de mostres de sòls, és necessària la construcció de diverses cèl·lules de mesura que s'adaptin a les configuracions dels sistemes de mesura en quant al marge d'impedàncies i al marge de freqüències.

Les cèl·lules que mesuren la conductivitat a quatre fils, en general no serveixen per a la mesura de permitivitat. En canvi, les cèl·lules per a mesura de permitivitat amb dos fils i amb o sense guarda, sí que són sensibles a la conductivitat, la qual cosa pot ser un inconvenient.

Atesa la possibilitat de migracions iòniques en els sòls, la mesura en senyal continu resulta difícil, pot ser errònia per acumulació de productes de reacció en els elèctrodes i malmet les cèl·lules de mesura.

Sempre que es pugui, a freqüència baixa o en continua, es preferible mesurar amb la cèl·lula amb guarda, ja que, segons el cas, evitarem que afectin les capacitats paràsites o les fuïtes de corrent per brutícia superficial de la cèl·lula.

A mida que pugem en freqüència, les cèl·lules tendeixen a ser més petites, no sols perquè valguin les aproximacions quasi-estàtiques sinó per adaptar les impedàncies als marges de funcionament millor dels instruments. Els analitzadors d'impedància actuals automatitzen les mesures. De tota manera, alguns instruments automàtics, atès el seu principi de mesura, tenen marges de mesura d'impedància força limitats. Aquest fet comporta dues limitacions importants. Per una banda, demana la construcció de cèl·lules adients per a cada segment de conductivitat, i per l'altra banda, redueix els escombrats de freqüència si les cèl·lules de mesura són de tipus capacitiu.

Si pugem de freqüència en excés, cal afegir els elements paràsits a les nostres cèl·lules capacitives, en especial la inductància sèrie equivalent. En particular, la cèl·lula adaptada amb dielèctric aigua presenta una ressonància del circuit equivalent LC a 8 MHz que impossibilita mesurar a freqüències superiors a la de ressonància. En teoria, un dielèctric barreja de sòls i aigua té una permitivitat menor a la de l'aigua, si els efectes interfacials no intervenen, i per tant la freqüència de ressonància és superior, però totes les cèl·lules tenen aquesta limitació.

Una xarxa passiva d'interconnexió entre les cèl·lules capacitives i un analitzador d'impedàncies com l'hp 4192A es caracteritza només amb dues mesures ateses les simetries. Les més senzilles són una mesura en circuit obert i una altra en curtcircuit. Aquest fet no evita que, sota determinades circumstàncies d'impedància d'elèctrode, alguns analitzadors d'impedància no puguin mesurar.

Cal un preamplificador actiu per resoldre el problema d'impedància de contacte elevada. Existeixen varies configuracions possibles que es descriuen per guany, impedància d'entrada, i impedància de sortida. El calibratge final del sistema complet es realitza mitjançant tres mesures d'impedància, que són suficients, sobre tres mostres conegudes. Les mesures es fan a freqüències inferiors a 1 MHz, on els efectes paràsits de resistència i inductància sèrie en borns són negligibles.

5 RESULTATS EXPERIMENTALS I ANÀLISI DE DADES

- Non. C'est trop compliqué. Mais on exige de l'explorateur qu'il fournisse des preuves. S'il s'agit par exemple de la découverte d'une grosse montagne, on exige qu'il en rapporte de grosses pierres.

Saint-Exupéry, Antoine de. Le Petit Prince. Editions Gallimard, 1946, pàg. 55.

En un treball científic experimental, cal aportar proves que validin o neguin les hipòtesis que s'hagin formulat. Les proves poden ser de diversa mena i no sempre s'aporta la prova més evident o directa però sempre se n'aporta alguna. La confiança en els resultats donats, en les proves, i la seva descripció acurada asseguren la reproducció dels experiments quan en calgui.

Els mètodes desenvolupats en el capítol precedent són les eines que permeten mesurar i fer les comparacions entre les dades obtingudes i els valors teòrics trobats en els sòls com materials elèctrics compostos.

Aquest capítol es divideix en tres apartats. El primer apartat fa les consideracions prèvies que marquen l'abast de les mesures posteriors, mesura els materials de calibratge i en treu conclusions. Els altres dos apartats relacionen els dos paràmetres elèctrics que estudiem, conductivitat i permitivitat, amb la humitat de diferents tipus de sòls.

5.1 Consideracions prèvies

Hi ha diversos paràmetres i materials que cal conèixer abans d'exposar els resultats. En aquest apartat caracteritzem els materials que estudiem com sistemes de partícules, i la facilitat o dificultat d'obtenció i ús dels paràmetres elèctrics que hi apliquen.

5.1.1 Sobre els sòls

Els sòls es consideren sistemes de partícules formats per grans independents, tot i que de vegades calgui el microscopi per assabentar-se'n. Aquest sistema consta d'una fase sòlida del conjunt de partícules i d'una fase fluïdica de buits parcialment plens d'aigua amb un cert contingut de sals dissoltes. La granulometria o coneixement de la mida de les partícules és una de les dades principals a tenir en compte des del punt de vista de mecànica dels sòls.

Casagrande classifica els sòls en diversos grups segons les mides de les partícules que els formen –e.g. SP de sorra amb poques partícules fines, o CL d'argiles inorgàniques o llimoses–. Els paràmetres que caracteritzen i delimiten cada grup són: el coeficient d'uniformitat (cu) o relació entre diàmetres majors i menors de les partícules; el coeficient de curvatura (cc) que també relaciona diàmetres; els límits d'Atterberg basats en el concepte que en un sòl de gra fi existeixen quatre estats de consistència segons la seva humitat –els límits més utilitzats són el límit líquid (ω_L) i l'índex plàstic (IP)–; i el pes específic de les partícules.

Els sòls emprats en aquest treball són sorra de Castelldefels com representació de sorres, també usarem sorra de Horstung (París) per repetir algun experiment, llim argilós del campus nord (UPC) i argila de Sant Sadurní. Els paràmetres de les partícules dels sòls usats es resumeixen a la taula 5.1.

Sòl	Símbol	CU	CC	ω_L	IP	Tamís 200 (ASTM)	pes específic (g/cm^3) sòl sec partícules	
Castelldef	SP	1,75	1,1	-	-	-	1,5	2,68
Horstung	SP	2,5	0,9	-	-	-	1,4	2,68
UPC	CL	-	-	30,5%	11,5%	71%	1,0	2,69
Sant Sadur	CL	-	-	42,5%	21,5%	90%	1,1	2,70

Taula 5.1 Paràmetres de les partícules de sòls utilitzats en aquest treball.

5.1.2 Sobre la conductivitat

Primer mesuram solucions salines perquè sabem que la seva conductivitat és plana respecte la freqüència del senyal, i que referenciem mitjançant la taula 5.2 segons diversos autors.

Mesuram tres solucions salines de clorur sòdic de conductivitat coneguda amb la cèl·lula de secció constant i l'analitzador d'impedàncies. Per tant, es tracta d'una mesura amb quatre fils. Les tres solucions tenen 0,154 N, 0,0154 N i 0,00154 N de concentració. A partir d'una solució salina fisiològica que té una concentració 0,154 N i que s'adquireix en farmàcies, és molt fàcil preparar dissolucions diluïdes mitjançant aigua desionitzada. Les mesures s'han realitzat a 26°C de temperatura dels electrolits.

Solucions salines aquoses	(σ) Orellana	(σ) Stogryn	(ϵ_r) Stogryn
aigua desionitzada	-	< 1 nS/m	80,85
aigua desionitzada (25°C)	-	< 1 nS/m	78,35
solució NaCl 0,000154 N	1,6 mS/m	1,46 mS/m	80,85
solució NaCl 0,00077 N	8,2 mS/m	7,29 mS/m	80,84
solució NaCl 0,00154 N	16 mS/m	14,6 mS/m	80,82
solució NaCl 0,00154 N (1 MHz)	-	14,6 mS/m	80,82
solució NaCl 0,00154 N (25°C)	18 mS/m	16,8 mS/m	78,32
solució NaCl 0,00616 N	66 mS/m	58,3 mS/m	80,72
solució NaCl 0,0154 N	160 mS/m	145 mS/m	80,53
solució NaCl 0,0308 N	-	290 mS/m	80,22
solució NaCl 0,154 N	-	1,41 S/m	77,77
solució NaCl 0,154 N (25°C)	-	1,63 S/m	75,36
Altres líquids	(ϵ_r o σ) Hippel	(σ) Debye	(ϵ_r) Debye*
metanol	-	< 1 nS/m	32,6
metanol (25°C, 1 MHz)	31	-	-
etanol	-	< 1 nS/m	25,3
etanol (25°C, 1 MHz)	24,5	-	-
propanol	-	< 1 nS/m	20,6
etilen glicol	-	< 1 nS/m	43
etilen glicol (25°C, 100 kHz - 1 MHz)	41	-	-
solució NaCl 0,1 N (25°C, 100 kHz)	1,0 S/m	-	-

Taula 5.2 Conductivitats i constant dielèctrica relativa de diversos líquids de referència a 1 kHz i 18°C si no es diu el contrari, segons diversos autors. * Les dades són d'autors diversos basats en l'equació de Debye, [Burdette, 1980], [Jenkins, 1990].

La figura 5.1 mostra els valors teòrics –en traç discontinu– i els valors mesurats de les tres solucions –en traç continu–. El lleuger augment del valor mesurat a freqüència baixa és segurament a causa de l'error introduït per l'augment de senyal en mode comú causat per la impedància d'elèctrode. El petit desplaçament de la solució més concentrada –fisiològica– és causat segurament per algun fenomen de saturació. I, l'inici de davallada a freqüències properes a 1 MHz per l'aparició d'elements paràsits ja que aquesta cèl·lula està dissenyada per treballar a freqüència baixa.

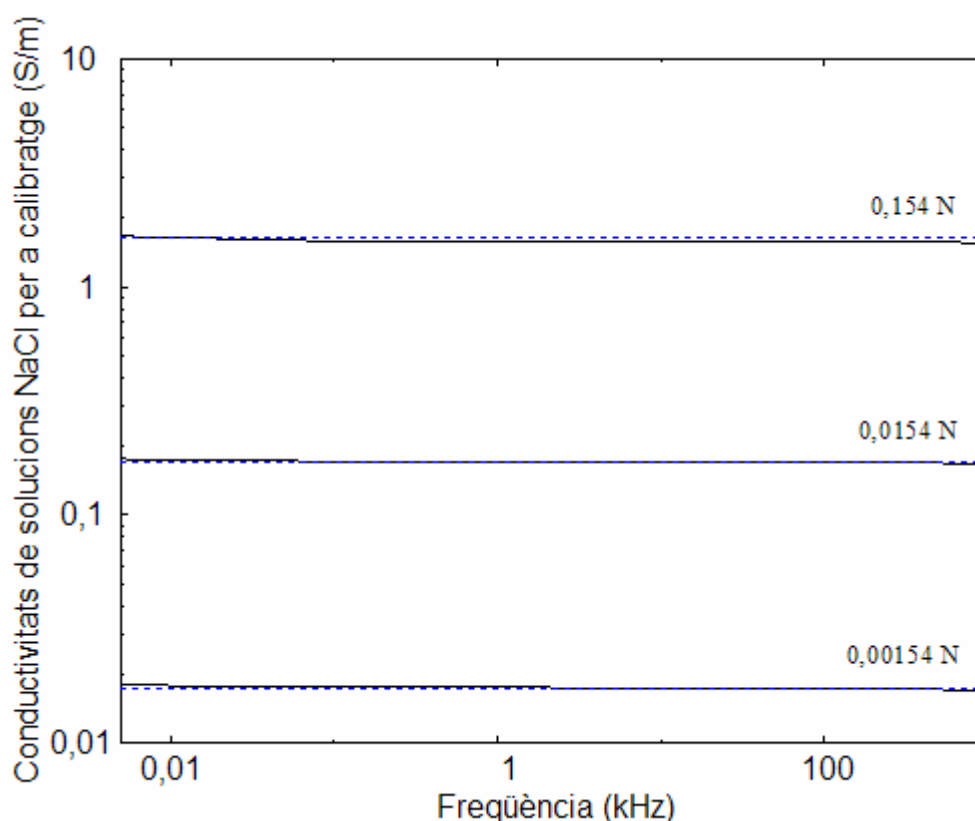


Figura 5.1 Representació teòrica segons Stogryn –traça discontinua– i mesurada –traça contínua– de tres solucions salines NaCl de concentració 0,154 N (fisiològica), 0,0154 N i 0,00154 N a 26°C.

També mesurem quatre solucions salines de clorur sòdic de conductivitat coneguda amb la cèl·lula capacitiva amb guarda. Per tant, tot i que la secció ve determinada per la guarda de forma molt exacta, es tracta d'una mesura amb dos fils amb les limitacions que porta per impedància d'elèctrodes. Les quatre solucions també s'han obtingut a partir de la solució salina fisiològica però les dissolucions són diferents. Les solucions teòriques tenen una concentració de 0,0308 N (0,154/5), 0,00616 N (0,0308/5), 0,000770 N (0,00616/8) i 0,000154 N (0,000770/5) també obtingudes a partir d'una solució salina fisiològica i aigua desionitzada. Les mesures s'han realitzat a 30°C.

La figura 5.2 mostra els valors teòrics –en traç discontinu– i els valors mesurats de les quatre noves solucions –en traç continu–. El resultat de les mesures porta informació completament diferent respecte el cas anterior. Els fenòmens interfacials es manifesten com error per impedància de contacte. Atesa la naturalesa de transducció iònico-electrònica d'aquesta impedància, l'error és més greu a freqüències baixes amb una disminució del corrent. A freqüència alta els efectes paràsits inductius fan recomanable una calibratge per a qualsevol mesura posterior. Per altra banda, comprovem que l'efecte d'impedància d'elèctrode és un fenomen no lineal. Totes les mesures s'han fet amb una tensió d'un volt eficaç sobre una càrrega adaptada de 50Ω . La solució més conductora (0,0308 N) té problemes de saturació metre que la menys conductora (0,000154 N) condueix més del previst per brutícia de la solució per manipulació.

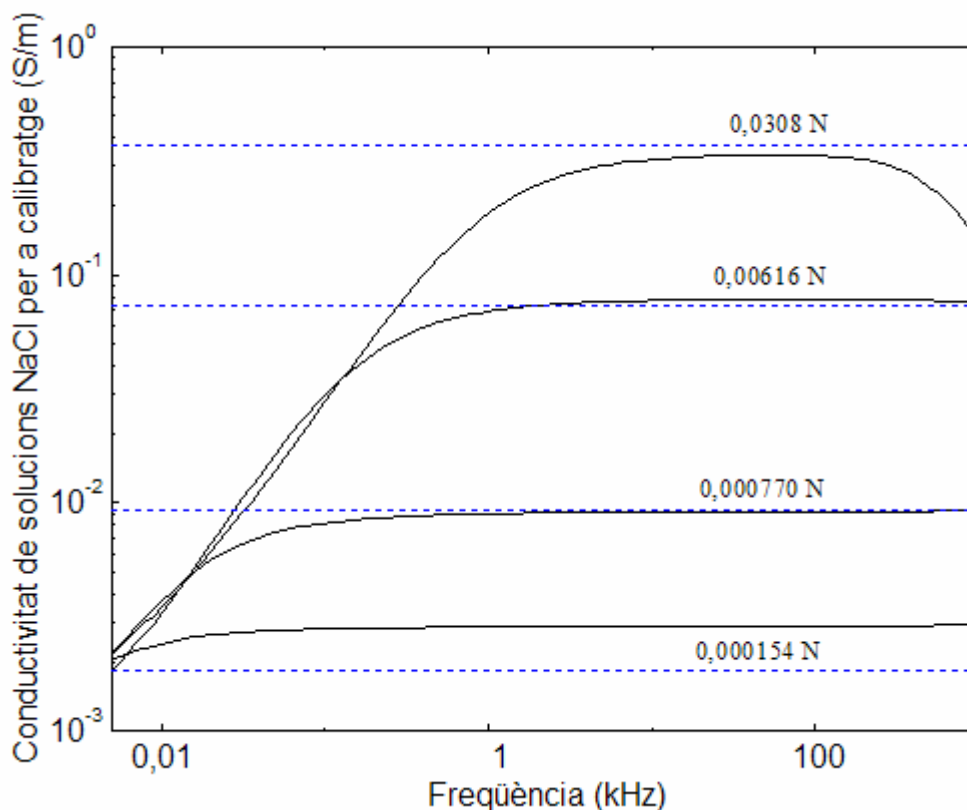


Figura 5.2 Representació teòrica segons Stogryn –traça discontinua– i mesurada –traça contínua– de quatre solucions salines NaCl de concentració 0,0308 N, 0,00616 N, 0,000770 N i 0,000154 N a 30°C. A freqüència baixa la impedància d'elèctrode és una font d'error important i a freqüència alta ho són els efectes inductius paràsits. La solució més conductora té problemes de saturació i la menys conductora està contaminada.

5.1.3 Sobre la permitivitat

De forma prèvia al processament de les mesures, ja siguin de calibratge o no, comprovem que els marges d'obertura, és a dir les relacions entre parts en quadratura de la impedància, estiguin en un marge que l'instrument pugui mesurar de forma conjunta. Els propis fenòmens de contacte augmenten la part imaginària de forma que la relació entre parts en quadratura de la impedància, B/G , és sempre superior a 10^{-3} que és el límit experimental pràctic de l'analitzador d'impedàncies (taula 5.3).

Solució \ freqüència	10 Hz	100 Hz	1 kHz	10 kHz	100 kHz	1 MHz
0,0308 N	2,5	1,9	0,6	0,1	-	-
0,00616 N	2	0,9	0,2	0,03	-	-
0,00077 N	1	0,2	0,03	0,01	0,03	0,3
0,00015 N	0,3	0,05	0,01	0,02	0,01	1,2

Taula 5.3 Relació entre parts reals i imaginàries de les admitàncies mesurades de les solucions abans de tenir en compte les constants de cèl·lules.

Els valors al voltant de la unitat a freqüències per sota 1 kHz tant sols demostren que els fenòmens interfacials, en aquest cas de contacte elèctrode-electròlit, predominen sobre el valor real de capacitat de la cèl·lula com s'observa a la figura 5.3. Els efectes paràsits inductius dels valors de relació que corresponen a conductivitats elevades $-0,006$ N i $0,031$ N– i freqüències de 100 kHz i 1 MHz invaliden les dades. En traç discontinu es sobreposen els valors teòrics de les permitivitats a la figura 5.3; la diferència és tant petita que no s'aprecia en l'escala gràfica dibuixada.

Els fenòmens de contacte són de naturalesa no lineal i una disminució de la tensió d'excitació de la mostra d'un 10% provoca un augment superior al 100% en la permitivitat relativa a freqüències baixes. La mesura de la cèl·lula amb guarda s'ha realitzat amb una tensió eficaç d'excitació de l'analitzador d'impedàncies d'1 V tal com ja s'ha esmentat anteriorment.

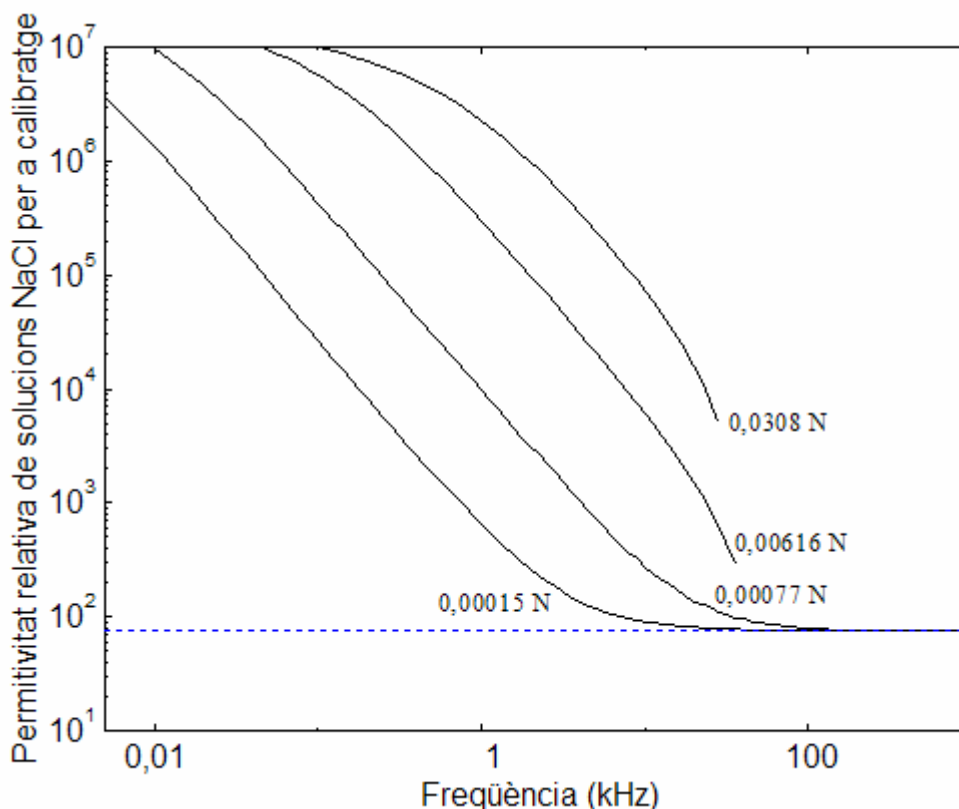


Figura 5.3 Permittivitat relativa de les solucions salines 0,0308 N, 0,00616 N, 0,00077 N i 0,00015 N a 30°C de temperatura. El traç puntejat o discontinu representa els valors teòrics segons Stogryn i els valors mesurats estan en traç continu i el seu valor és major quan major és la conductivitat de la solució.

A més, quan la mostra és força conductora, els efectes paràsits a freqüències altes provoquen uns resultats numèrics sense sentit físic perquè estem per sobre la freqüència de ressonància de la combinació de la capacitat que es mesura amb la inductància paràsita sèrie –vegeu els errors de sensibilitat de l’apartat 4.3.2–. En aquest cas particular, no és possible calibrar.

Finalment, es suposa que les solucions salines són homogènies. Per tant els efectes interfacials són només a nivell d’impedància d’elèctrode i no existeixen relaxacions Maxwell-Wagner en el sí de la mostra.

5.2 Relacions conductivitat-humitat

La mesura de la conductivitat amb la cèlula de secció constant –amb quatre fils– no depèn de la freqüència. Per tant, els efectes interfacials de la part conductiva no es manifesten a les freqüències de mesura o estan per sota l'exactitud del mètode.

Correlem les mesures de conductivitat amb les possibles equacions teòriques de conductivitat de materials compostos. El problema inherent a les propietats elèctriques descrites en el capítol segon és que la conductivitat dels sòls depèn de la salinitat de l'electròlit que conté. Per tant, la llei que respon a les nostres necessitats és aquella que contempla la conductivitat de l'electròlit com paràmetre. Les lleis de potències –e.g. la llei d'Archie, equacions 2.16 i 2.17–, aconsegueixen aquest requisit. La llei d'Archie és per a roques saturades i la seva aplicació a les diverses mostres de sòls amb la modificació quan la mostra no està saturada [Parkhomenko, 1967, pàgs. 277 i 278] només val per alguns casos.

Per al cas de les sorres mesurades la relació entre conductivitat i humitat és lineal per sobre un cert llindar. Aquest llindar podria ser el llindar de percolació descrit per Giraud (1984). Per sota aquest valor no hem validat cap llei a causa de la manca de dades de mesura per la dificultat d'homogeneïtzació de la barreja sòl-aigua.

El pendent de la recta afí que relaciona conductivitat i humitat –elevada– de sorres depèn molt de paràmetres força incontrolables. Per demostrar-ho, realitzarem el següent experiment atès que el paràmetre c_u de les partícules de la sorra de Castelldefels és petit. La humitat sempre l'afegim mitjançant aigua desionitzada sobre una mostra de sòl seca. Això no obstant, alterarem el sòl respecte l'estat natural fent passar 5 litres d'aigua desionitzada a través d'una mostra de sorra de Castelldefels de 200 g posada sobre un embut i un paper de filtre de 60 g/m² amb una retenció del 98% sobre partícules de 11 µm de mida –norma BS 6410–. El pendent de la recta disminuï un 30%. Les dades de la figura 5.4 són d'una mostra sense alterar.

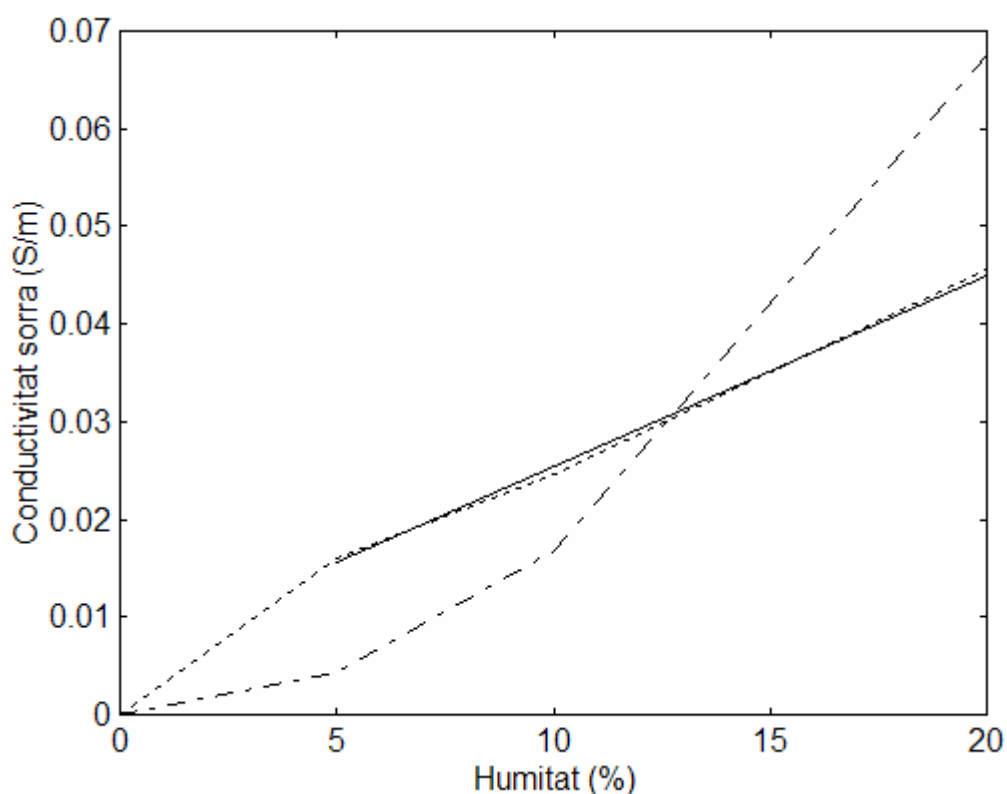


Figura 5.4 Relació entre conductivitat de la sorra de Castelldefels i humitat, en traça discontinua petita. La corba no depèn de la freqüència. S'ha intentat ajustar, sense fortuna, la corba experimental a la llei d'Archie, en traça discontinua gran. Per a humitats grans s'ajusta la relació conductivitat i humitat mitjançant una recta en traça contínua.

La traça discontinua petita de la figura 5.4 mostra la relació entre conductivitat de la sorra de Castelldefels i humitat. Hem mesurat la mostra de sorra amb la cèl·lula de secció constant. La relació no depèn de la freqüència del senyal injectat de 5 Hz a 1 MHz en la cèl·lula de secció constant amb l'analitzador d'impedàncies. Hem intentat ajustar les dades a l'equació 2.17 on els paràmetres d'ajust són A , ρ_w i l'exponent de la porositat n . El resultat és negatiu: la sorra no segueix l'equació 2.17 ni cap altra llei de potències (superiors a 1) sobre la conductivitat ja que són de tipus còncaves. La traça contínua de la figura 5.4 és la recta que minimitza l'error quadràtic.

El comportament de llims i argiles és completament diferent. Les traces discontinues de la figura 5.5 mostren la conductivitat del llim, traça inferior, i la

conductivitat de l'argila, traça superior, en funció de la humitat. Les relacions, com en el cas precedent, no depenen de la freqüència del senyal injectat.

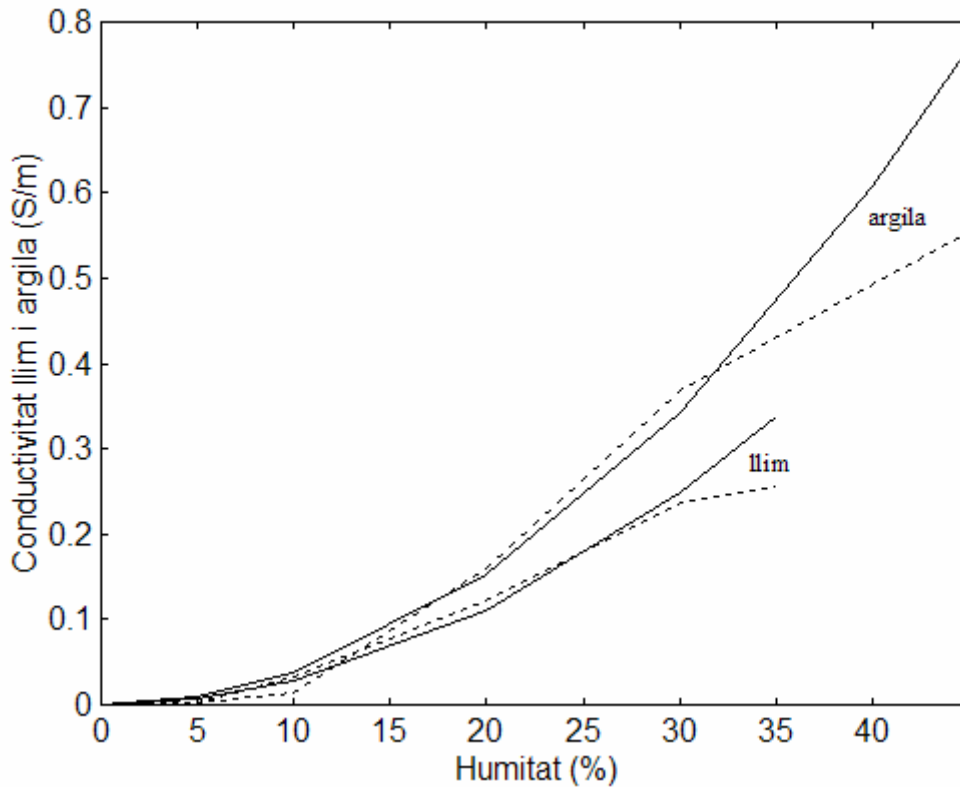


Figura 5.5 Relacions entre conductivitat i humitat de les mostres de llim, traça discontinüa inferior, i argila, traça discontinüa superior. La relació no depèn de la freqüència. Amb traça contínua es dibuixen les corbes que corresponen a l'ajust de la llei d'Archie amb els valors de la taula 5.4.

Hem ajustat les dades a l'equació 2.17 on els paràmetres d'ajust són A , ρ_w i l'exponent de la porositat n . Si donem un pes inferior a la darrera dada experimental que correspon al sòl del què sobresurt l'aigua, la relació entre la llei d'Archie i les dades experimentals ajusta fins a l'exactitud en la humitat que és del 5%. La taula 5.4 mostra els valors ajustats mitjançant el mètode simple de mínims quadràtics que s'ha programat amb la funció *fmins* de Matlab. Les traces contínues ajusten la llei d'Archie aplicada al llim i a l'argila. Tot i que la llei d'Archie és monòtona creixent sense cap inflexió, és físicament creïble que la conductivitat real arriba a una mena de saturació, més si es suposa que l'aigua abans envolta totes les partícules, i després omple els buits grans entre partícules.

tipus de sòl \ paràmetre llei d'Archie	$1/(A\rho_w)$	n
llim Campus Nord	0,64	-0,55
argila Sant Sadurní	1,1	-1,8

Taula 5.4 Paràmetres que millor ajusten la llei d'Archie, per a la relació conductivitat-humitat, a les dades obtingudes per als sòls indicats.

5.3 Relacions permitivitat-humitat

La figura 5.6 mostra la permitivitat dels sòls secs obtinguda mitjançant la cèl·lula capacitiva amb guarda i l'analitzador d'impedàncies. La dispersió de valors a freqüència baixa existeixen a causa del soroll en l'instrument ja que estem en el límit de resolució.

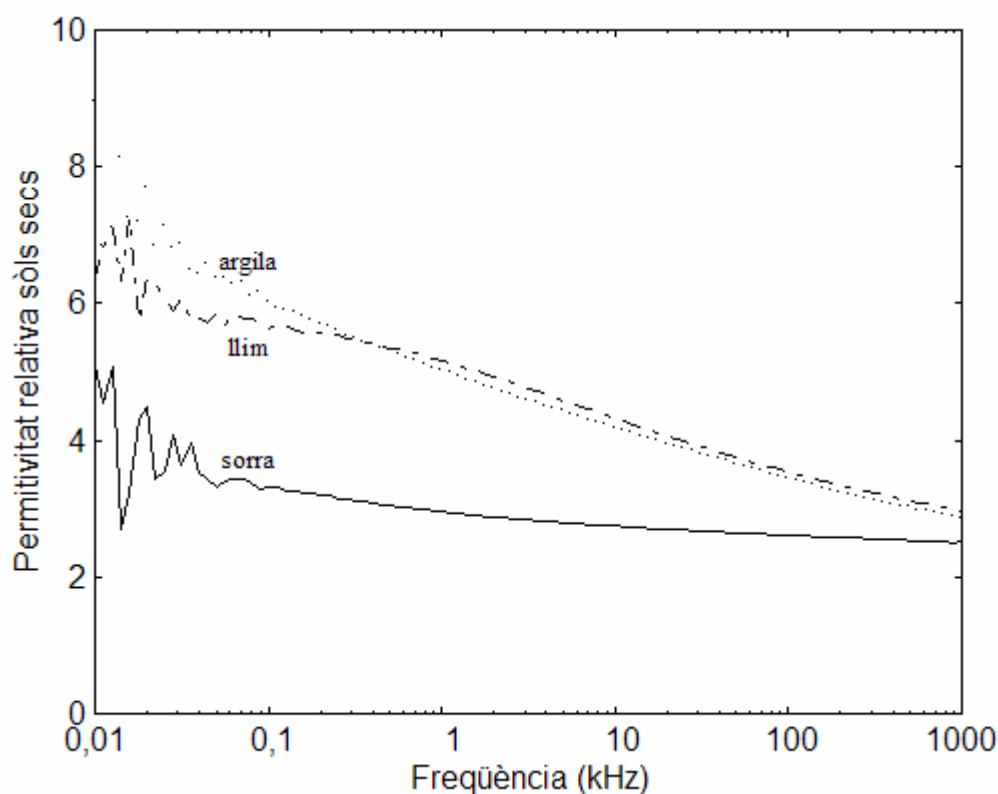


Figura 5.6 Permitivitats relatives de sorra de Castelldefels seca en –traç continu–, de llim del Campus Nord sec –en traç punt-raïlla– i argila de Sant Sadurni seca en –traç puntejat–.

El pendent suau es deu als fenòmens interfacials de transducció iònico-elèctrica que es manifesten ja que la conductivitat, tot i el sòl sec, no és nul·la. En aquest aspecte, la retenció major d'aigua per part dels sòls de partícules menors fan que els fenòmens interfacials augmentin més la permitivitat relativa. Un senzill experiment ho demostrà. Mesuràrem la sorra tret del forn on havia estat a una temperatura de 110°C durant 24 h. El resultat el mostra la figura 5.6. La humitat ambiental del laboratori era al voltant del 50%. Al cap de 30 min repetírem la prova amb el mateix sòl que havíem tret 30 min abans i la tapa de la

cèl·lula oberta durant el temps d'espera. La permitivitat en freqüències inferiors a 1 kHz augmentà més del 10%.

Els fenòmens interfacials són majors en els sòls amb contingut d'aigua superiors. Cal algun calibratge que resti la diferència entre la mesura real i les dades que s'observen, com és el cas sense calibratge de les solucions salines de la figura 5.3. El calibratge amb solucions salines, però, no és massa efectiu perquè la naturalesa del problema interfacial és diferent en solucions salines respecte materials als compostos.

La figura 5.2 mostra la conductivitat de les solucions salines mesurades amb la cèl·lula amb guarda. Usarem les solucions de 0,000154 N i 0,000770 N com solucions calibradores. En cada cas la solució que s'escolleix per al calibratge és la que té una conductivitat més propera a la conductivitat de la mostra de sòl obtinguda amb la cèl·lula amb guarda a 10 kHz. També es repetí aquest procés de calibratge amb una contribució ponderada de les diverses solucions i arribarem a resultats semblants. La taula 5.5 dóna les conductivitats de les solucions salines i de les mostres de sòl a 10 kHz mesurades amb la cèl·lula amb guarda. Els resultats de les mesures es dibuixen a les figures 5.7, 5.8 i 5.9.

solucions salines	0,000154 N	0,000770 N	0,00616 N	0,0308 N		
$\sigma_{10 \text{ kHz}}$ (mS/m)	3,0	9,5	90	320		
sorra Castelldefels	5%	10%	20%	22%		
$\sigma_{10 \text{ kHz}}$ (mS/m)	1,1	2,4	4,5	13		
l·lim Campus Nord	5%	10%	20%	30%	40%	45%
$\sigma_{10 \text{ kHz}}$ (mS/m)	2,5	11	20	27	32	65
argila Sant Sadurní	5%	10%	20%	30%	40%	45%
$\sigma_{10 \text{ kHz}}$ (mS/m)	5	8	22	60	130	220

Taula 5.5 Conductivitats de les solucions salines i dels sòls amb diverses humitats, mesurades amb la cèl·lula amb guarda a 10 kHz.

La figura 5.7 mostra la permitivitat relativa de la sorra de Castelldefels per a diferents humitats calibrada amb la solució salina NaCl de 0,000154 N per a totes les humitats. El traç continu correspon a la humitat del 5%, el traç de ratlla discontinú correspon a la humitat 10%, el traç puntejat correspon a la humitat del 20% i el traç en creu correspon al sòl que no pot contenir més aigua, humitat 22%.

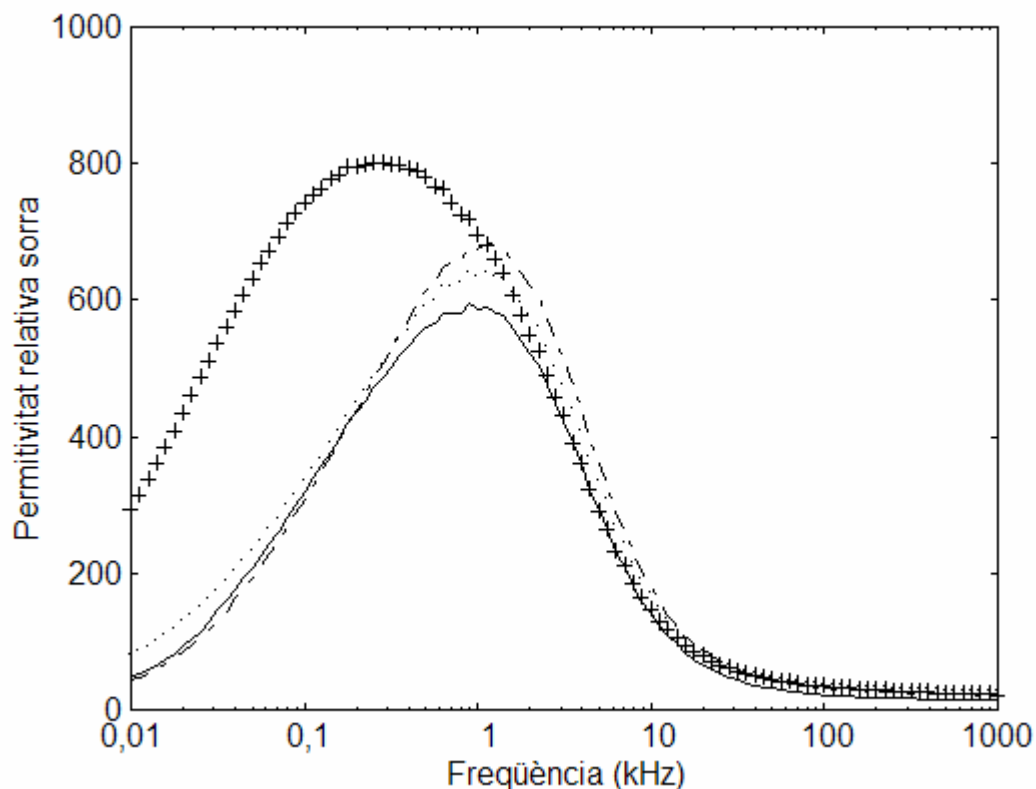


Figura 5.7 Permitivitat relativa de la sorra de Castelldefels en funció de la freqüència per a diferents humitats. S'ha utilitzat la solució salina NaCl de 0,000154 N. El traç continu correspon a la humitat 5% i el traç en creuetes al sòl amb humitat màxima.

La figura 5.7 demostra que si bé a freqüència baixa els fenòmens interfacials com possibles potencials de contacte entre líquid de calibratge i mostra de sòl poden ser semblants, en canvi a les freqüències als voltants d'1 kHz apareixen fenòmens diferenciats entre líquid de calibratge i mesures. Quan es puja més en freqüència, el comportament s'assembla més entre els dos tipus de materials i les solucions salines s'acosten més al comportament teòric com demostra la figura 5.3.

La figura 5.8 mostra la permitivitat relativa del llim del Campus Nord per a diferents humitats, calibrat amb la solució salina NaCl de 0,000154 N per a la humitat del 5% i amb la solució salina NaCl amb concentració 0,000770 N per a humitats majors. El traç continu correspon a la humitat del 5%, el traç de ratlla discontinua representa la humitat 10%, el traç de ratlla i punt correspon a la humitat del 20%, el traç puntejat és per a la humitat 30%, el traç de punts fins correspon a la humitat del 40% i el sòl que no pot contenir més aigua, humitat 45%, s'ha dibuixat amb el traç en creu. Els resultats són semblants al cas de la sorra. La permitivitat del llim del 5% queda per sobre en algunes freqüències a les d'humitats superiors pel canvi en la solució de calibratge.

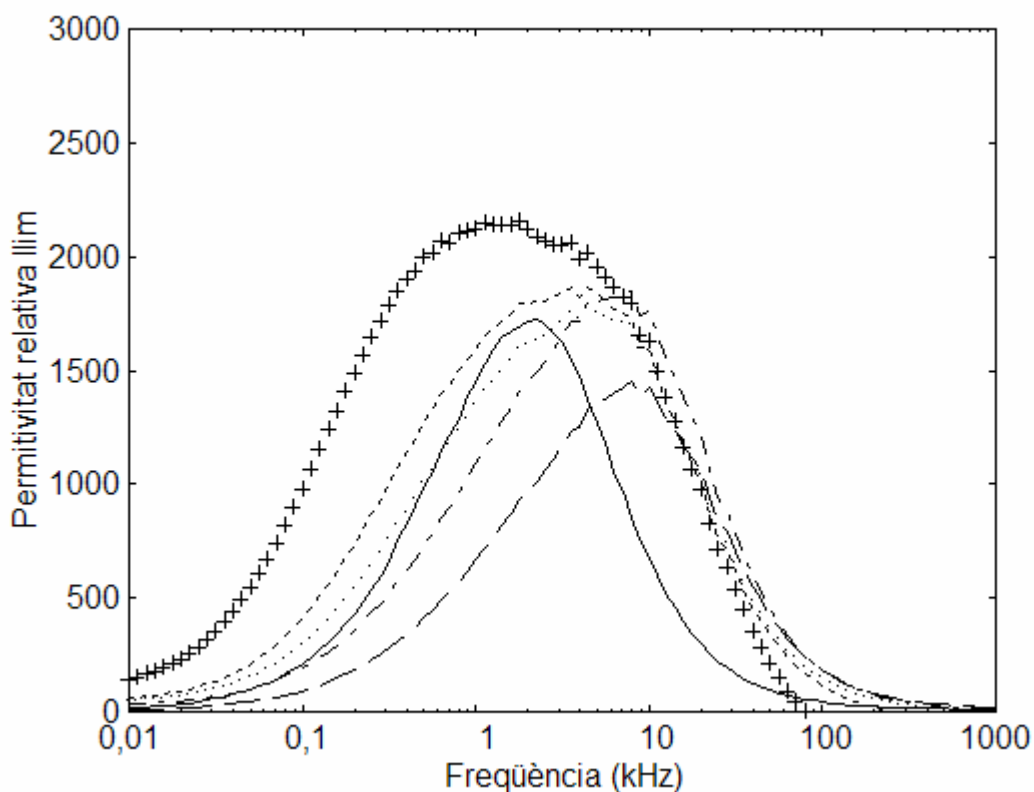


Figura 5.8 Permitivitat relativa del llim del Campus Nord per a diferents humitats, calibrat amb la solució salina NaCl de 0,000154 N per a la humitat del 5% i amb la solució salina NaCl amb concentració 0,000770 N per a humitats majors. El traç continu correspon a la humitat 5% i el traç en creuetes al sòl amb humitat màxima.

La figura 5.9 mostra la permitivitat relativa de l'argila de Sant Sadurní per a diferents humitats, calibrada amb la solució salina NaCl de concentració 0,000770 N. El traç continu correspon a la humitat del 5%, el traç de ratlla discontinúua representa la humitat 10%, el traç de ratlla i punt correspon a la humitat del 20%, el traç puntejat és per a la humitat 30%, el traç de punts fins correspon a la humitat del 40%, i el sòl que no pot contenir més aigua, humitat 45%, s'ha dibuixat amb el traç en creu. Els resultats són semblants als casos de sorra o llim. No s'ha usat la solució de concentració 0,00616 N com a calibratge atès que els efectes paràsits inductius amb conductància elevada són més importants de forma relativa. Això no obstant, els efectes interfacials semblen més importants en el cas d'argiles com insinua la figura 5.10 tot i que la solució usada com referència tingui una conductivitat més dispar respecte el sòl.

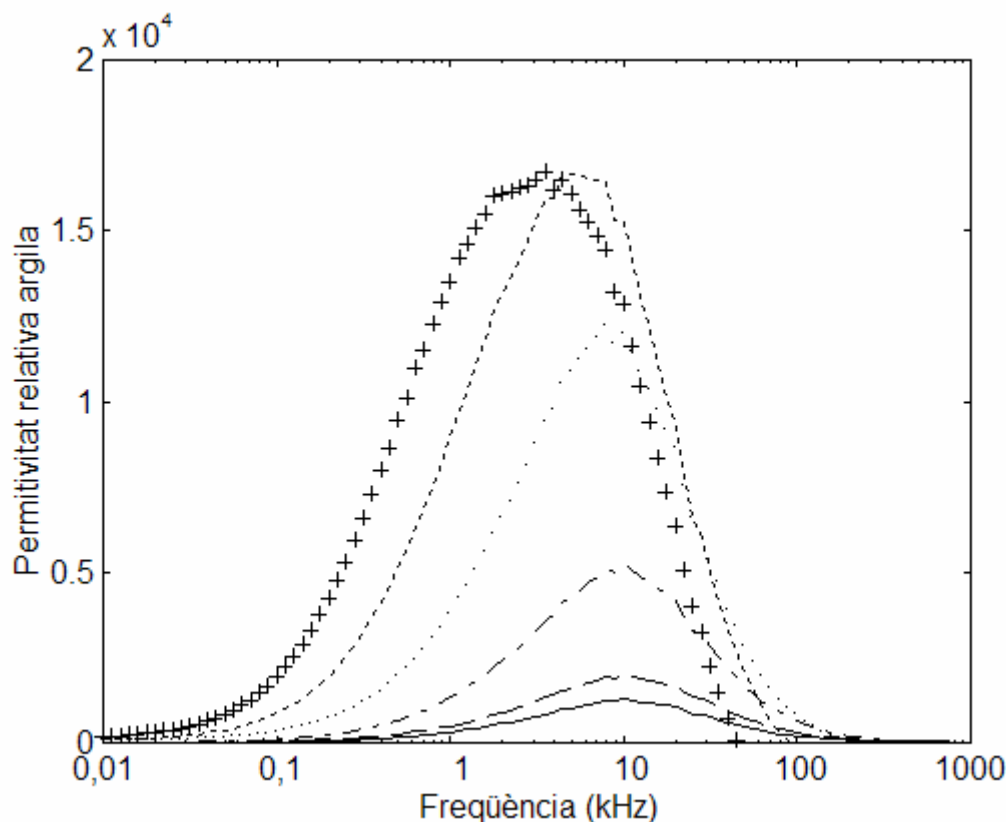


Figura 5.9 Permitivitat relativa de l'argila de Sant Sadurní per a diferents humitats calibrat amb la solució salina 0,000770 N. El traç continu correspon a la humitat 5% i el traç en creuetes al sòl amb humitat màxima.

La figura 5.10 compara les permitivitats relatives dels tres tipus de sòls quan contenen el màxim d'humitat possible. La solució de calibratge és la 0,000770 N. Com més petita és la partícula que compona el sòl, més importants semblen els fenòmens interfacials. De fet, la interfície creix i això no és

atribuïble a l'increment de permitivitat per l'augment en el contingut d'aigua. Potser es podria interpretar com una mesura de la tortuositat que segueix el camí de corrent.

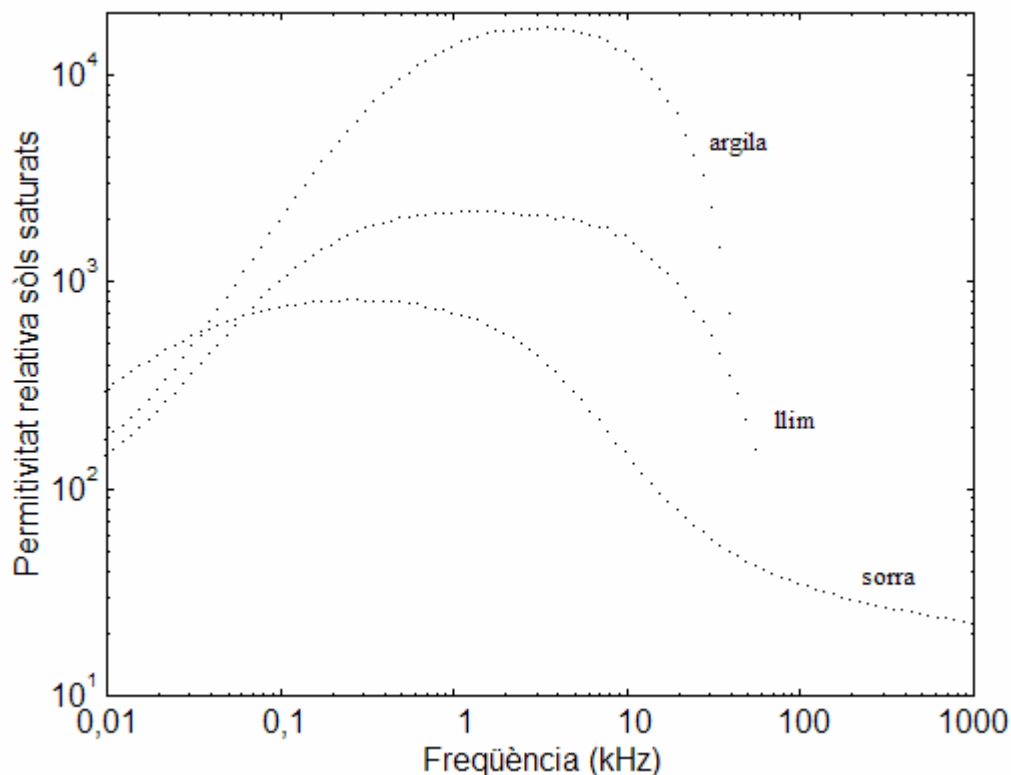


Figura 5.10 Permitivitat relativa dels tres tipus de sòls amb un contingut màxim d'aigua. S'ha calibrat amb la solució salina 0,000770 N. El traços, de baix a dalt, corresponen a sorra, llim i argila.

Malgrat totes aquestes perturbacions que dificulten la mesura, els fenòmens interfacials disminueixen quan pugem en freqüència en tots els casos. Aquesta observació planteja l'alternativa de mesurar a freqüència més alta. La cèl·lula amb guarda presenta limitacions a freqüències superiors a 1 MHz. El comportament de la cèl·lula adaptada tampoc és millor en aquest aspecte. Per tant cal mesurar amb la cèl·lula simètrica o la cèl·lula de camp no uniforme que tenen una mida menor i en el calibratge de l'anàlitzador d'impedàncies es contabilitza la inductància paràsita de les connexions. Els resultats que

presentem són de la cèl·lula simètrica, tot i que els de la cèl·lula de camp no uniforme són equivalents.

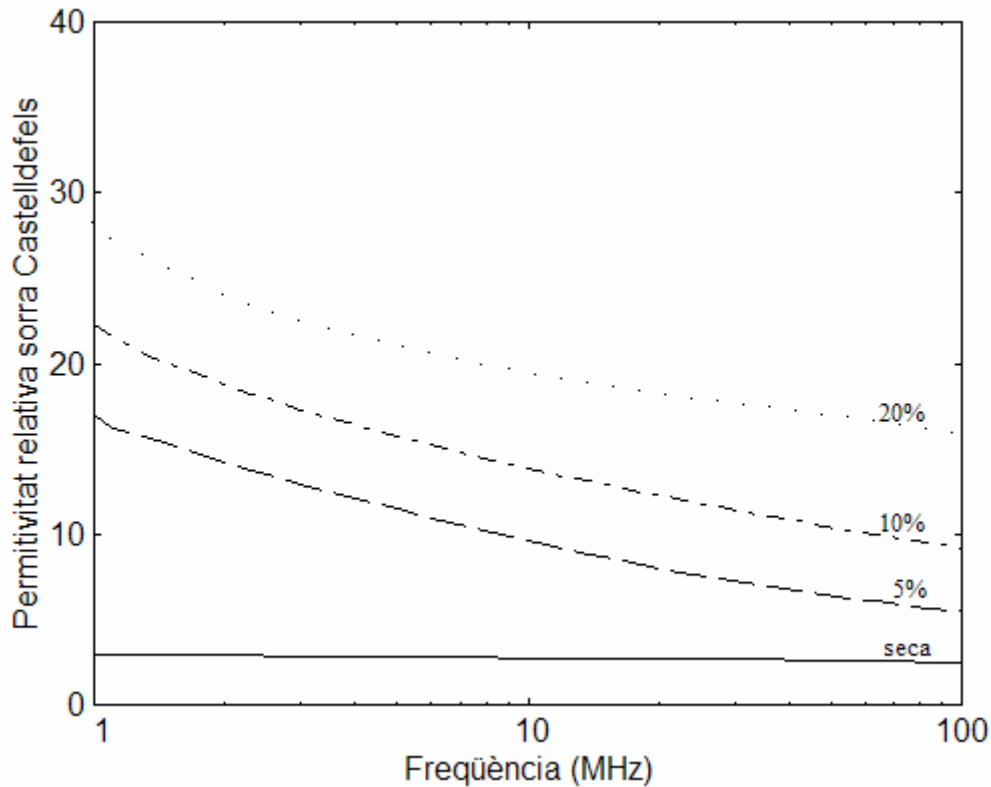


Figura 5.11 Permitivitat relativa de la sorra de Castelldefels. En traç continu, sòl sec; en traç de ratlla discontinua, humitat 5%; en traç de ratlla i punt, humitat 10%, i en traç puntejat, humitat 20%.

La figura 5.11 mostra les permitivitats relatives de la sorra de Castelldefels en funció de la freqüència. Apreciem fenòmens interfacials en un grau menor al que passava a freqüències inferiors. Això no obstant, aquests fenòmens no s'anul·len ni tenen un comportament que es pugui descriure mitjançant una funció de transferència racional. La figura 5.12 mostra les permitivitats de la sorra de Horstung de forma anàloga a la figura precedent. No sabem l'origen estrany del pendent de la gràfica del 10% d'humitat però podria ser una certa falta d'homogeneïtzació de la humitat de la mostra. La sorra de Horstung es mesura com a contrast dels resultats que s'obtidran en la sorra de Castelldefels.

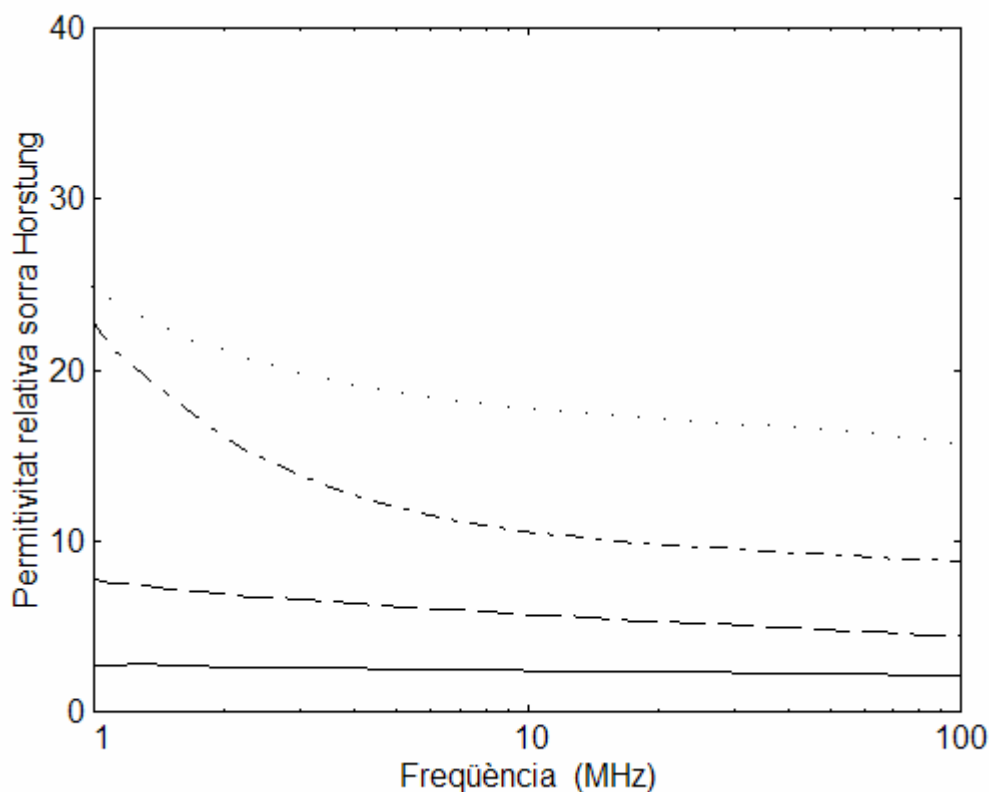


Figura 5.12 Permitivitat relativa de la sorra de Horstung. En traç continu, sòl sec; en traç de ratlla llarga, humitat 5%; en traç de ratlla discontinua, humitat 10%, i en traç puntejat, humitat 20%.

La figura 5.13 mostra les permitivitats relatives del llim del Campus Nord en funció de la freqüència. El traç continu més pla correspon al sòl sec; la humitat del sòl va creixent del 5%, al 10%, 20%, 30% i 40% d'aparença molt humida que correspon al traç puntejat fi. Els traços superiors continus i puntejat són quan el sòl no admet més aigua i regalima pels costats de la cèl·lula.

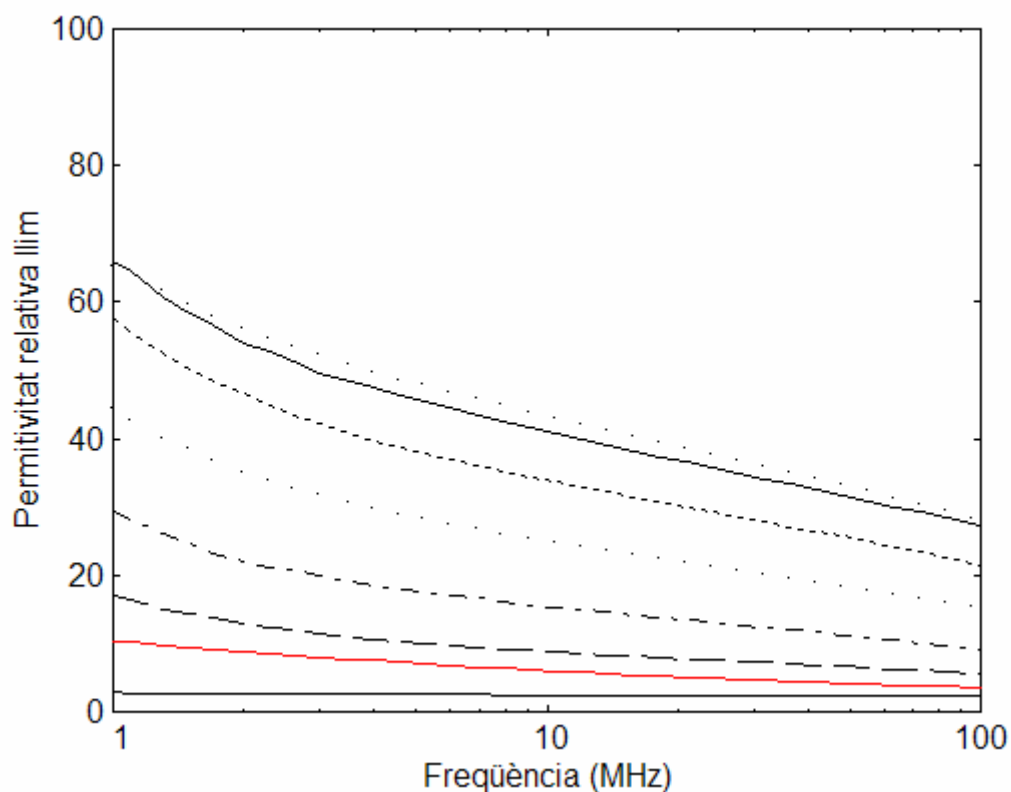


Figura 5.13 Permittivitats relatives del llim del camp nord en funció de la freqüència. El traç continu més pla correspon al sol sec; la humitat del sol va creixent del 5%, al 10%, 20%, 30% i 40%, d'aparença molt humida, que es representa amb el traç puntejat fi. Les dues darreres traces corresponen al sol quan no admet més aigua.

La figura 5.14 mostra les permitivitats relatives de l'argila de Sant Sadurní en funció de la freqüència. El traç continu més pla correspon al sol sec; la humitat del sol va creixent del 10%, al 16%, %, 33% i 39% d'aparença bastant humida que correspon al traç ratllat curt. El traç superior continu correspon a quan el sol no admet més aigua i regalima pels costats de la cèl·lula. Segurament s'ha produït un efecte de rentat de les sals que contenia l'argila i els efectes interfacials a freqüència baixa han disminuït.

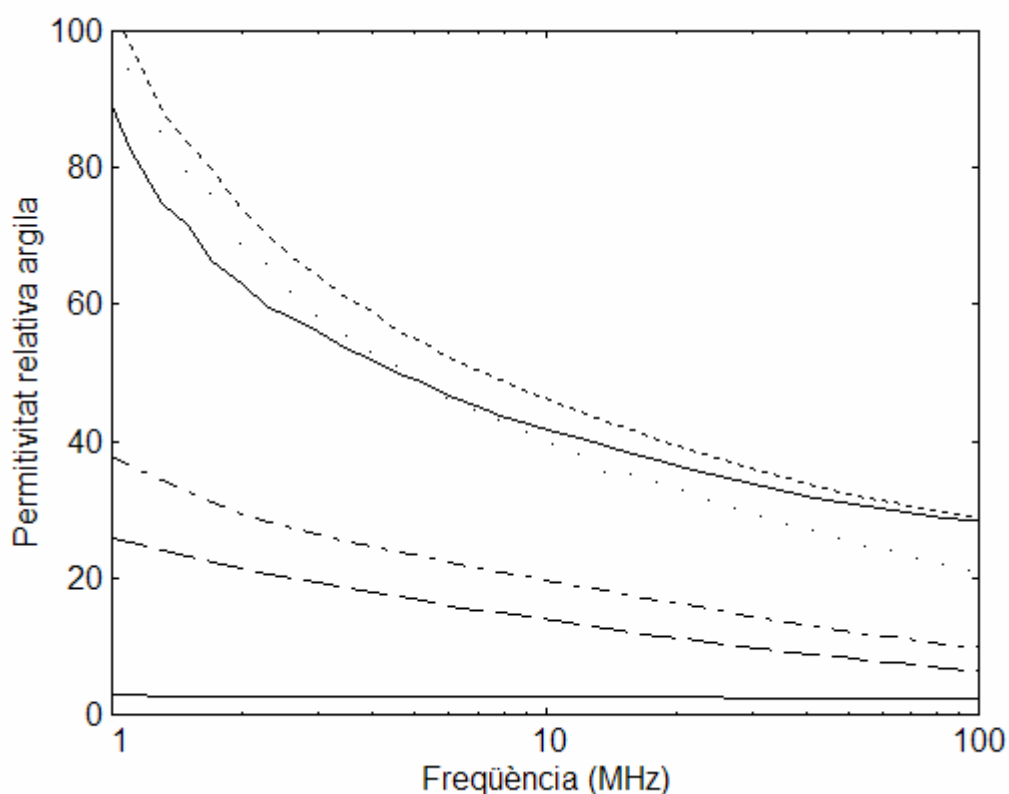


Figura 5.14 Permitivitats relatives de l'argila de Sant Sadurní en funció de la freqüència. El traç continu pla correspon al sol sec, la humitat del sol va creixent del 10%, al 16%, 33% i 39% d'aparença bastant humida que correspon al traç puntejat fi. El traç superior continu és quan el sòl no admet més aigua i regalima pels costats de la cèl·lula.

En el capítol segon avançàvem la relació entre permitivitat i fracció de volum dels formadors mitjançant les equacions de distribució geomètrica de barreges amb una modificació. Consideràvem que els efectes interfacials afectaven tots els formadors per un igual. A cada freqüència, hi hauria un paràmetre k que compensava l'augment de la constant dielèctrica. Aquest paràmetre seria funció de la freqüència, de les acumulacions de càrrega, de les interfícies, de la distribució de l'aigua en el sí del sistema de partícules i de la presència de sals que es dissolen.

Com recordatori, a la figura 5.15 dibuixem la permitivitat relativa en funció de la fracció de volum d'una barreja de dos formadors de permitivitats relatives 4 i 80. Apliquem la llei de distribució geomètrica representada per l'equació 2.9 pels casos particulars d' x igual a -1 , $-1/2$, $-1/3$, 0 , $1/3$, $1/2$ i 1 (línia recta). Els casos extrems corresponen als models sèrie i paral·lel, respectivament, i el cas que tendeix a 0 coincideix amb la llei logarítmica.

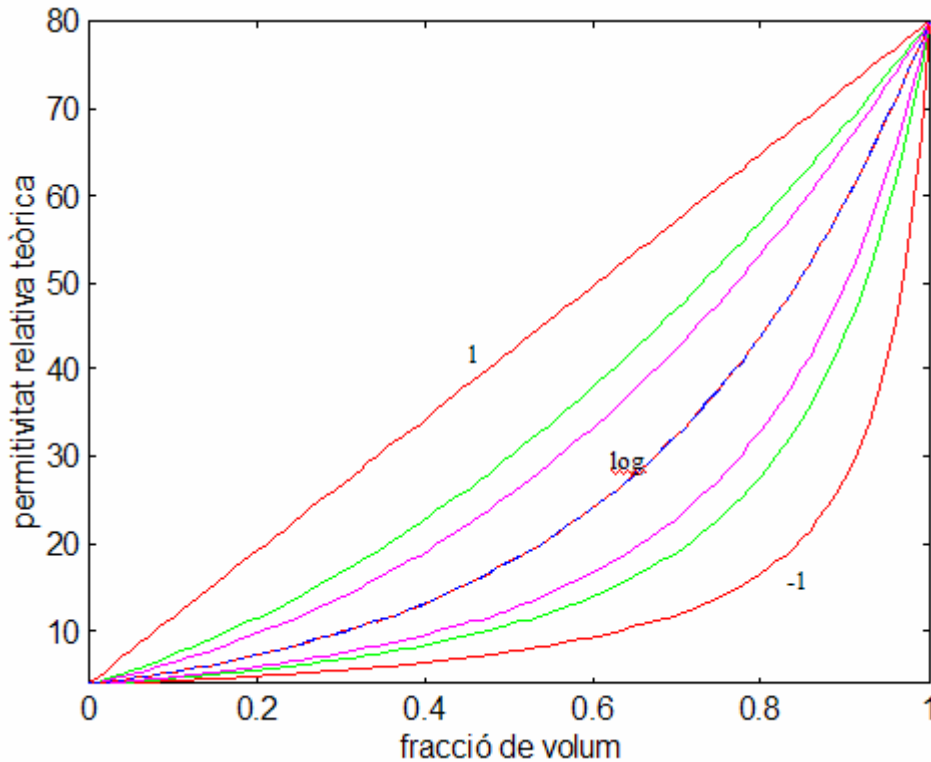


Figura 5.15 Llei de distribució geomètrica pels casos d' x igual a -1 –model sèrie, corba inferior–, $-1/2$, $-1/3$, 0 –lei logarítmica–, $1/3$, $1/2$ i 1 –model paral·lel, línia recta–.

La figura 5.16 mostra, en traç discontinu les relacions entre permitivitat i humitat de les sorres de Castelldefels i Horstung mesurades i ajustades al model, en traç continu, que es proposa a l'equació 2.21 amb error quadràtic mínim realitzat mitjançant l'ajut de la funció *fmins* de Matlab. Els valors ajustats es mostren a la taula 5.6. L'observació d'aquests valors demostra que el model que es proposa no és vàlid per a les sorres –la mesura de la sorra de Horstung és complementària a la de Castelldefels per refermar aquesta observació– ja que k és inferior a la unitat i x queda fora dels marges $(-1,1)$. A més, el cas d'ajust de la sorra de Castelldefels és més convexa que la corba de mesures, la qual cosa augmenta x .

En canvi, Alharthi (1987) proposa un model polinomial de primer ordre quan el contingut d'aigua és elevat. En aquest cas, i si admetem un error del 10% el model d'Alharthi (1987) és vàlid. A més, com el pes específic de la sorra de Castelldefels seca és un 7% major que el pes específic de la sorra de Horstung, si mesurem la permitivitat en funció de la fracció de volum les dues “rectes” pràcticament es sobreposen.

La relació empírica de Topp (1980) no s'ajusta amb els coeficients que trobà en el seu treball basat en TDR. Això no obstant, s'ha ajustat un polinomi d'ordre dos que minimitza l'error quadràtic respecte les mesures; el resultat de l'ajust es mostra a la taula 5.6.

sòl \ paràmetre	model polinomial $\epsilon_r = a_3 \phi^3 + a_2 \phi^2 + a_1 \phi + a_0$				model potencial $\epsilon_r = \sum \phi_i \epsilon_{ri}^x / k$	
	a_3	a_2	a_1	a_0	k	x
Topp (empírics)	-76,7	146	9,3	3,03	-	-
sorra Castelldefels	-	-75,6	77,9	2,87	0,54	1,52
sorra Horstung	-	-11,6	58,4	2,25	0,71	1,05
llim argilós campus nord	211	-61,5	70,6	3,23	1,35	0,67
argila Sant Sadurní	-272	187	72,7	3,02	1,46	0,85

Taula 5.6 Valors ajustats d'un polinomi de segon grau en el cas de sorres i de tercer grau en el cas de llims i argiles. També s'ajusten els paràmetres del model que es proposa en aquest treball que es basa en la llei de distribució geomètrica sèrie-paral·lel amb el paràmetre afegit k que té en compte l'augment de la permitivitat per efecte interfacial.

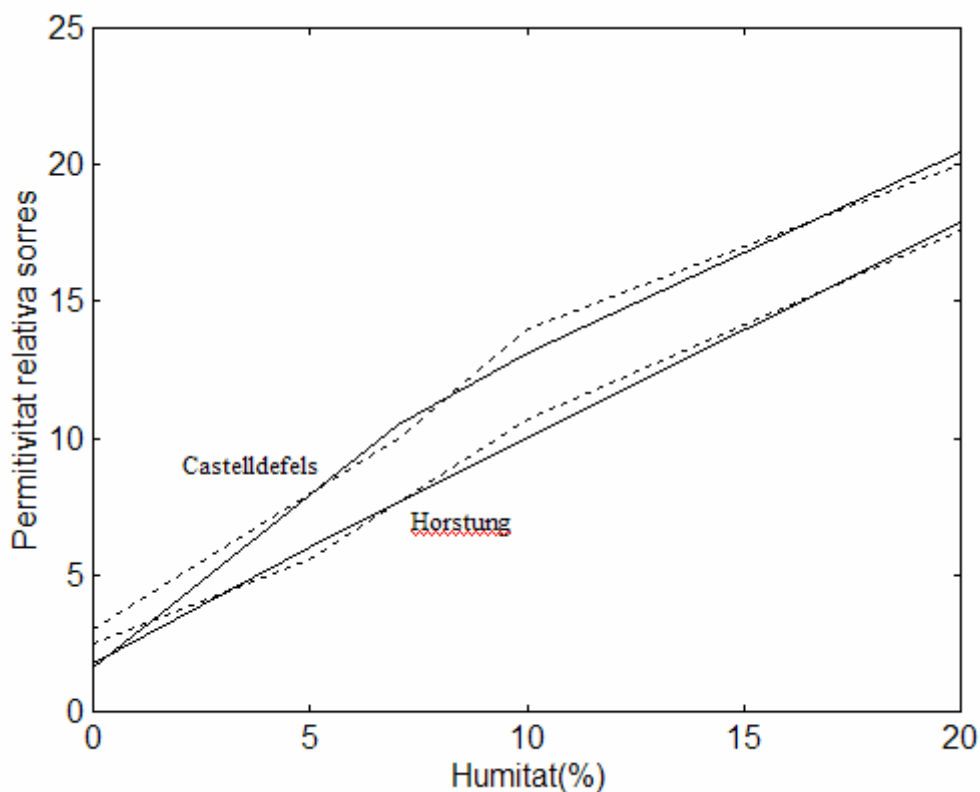


Figura 5.16. Permitivitat de les sorres de Castelldefels (superior) i de Horstung (inferior) en funció de la humitat. Les mesures són en traç discontinu i l'ajust al model que es proposa en aquest treball és en traç continu. De tota manera, el model que millor ajusta de forma senzilla és el model polinomi de primer ordre com el proposat per Alharthi (1987).

La figura 5.17 mostra les relacions entre permitivitat i humitat del llim i l'argila mesurades en traç discontinu curt, ajustades al model que es proposà a l'equació 2.21 en traç continu i ajustades a un polinomi de tercer ordre en traç discontinu llarg. Els valors ajustats també es mostren a la taula 5.6. Per a aquests sòls, el model que es proposa és vàlid. El paràmetre k és superior a la unitat i per tant descompta els diversos efectes interfacials i x queda dins del segment $[-1,1]$. El model polinomial de tercer ordre té uns coeficients diferents respecte el model empíric de Topp (1980) que es poden justificar perquè les condicions de mesura són molt diferents.

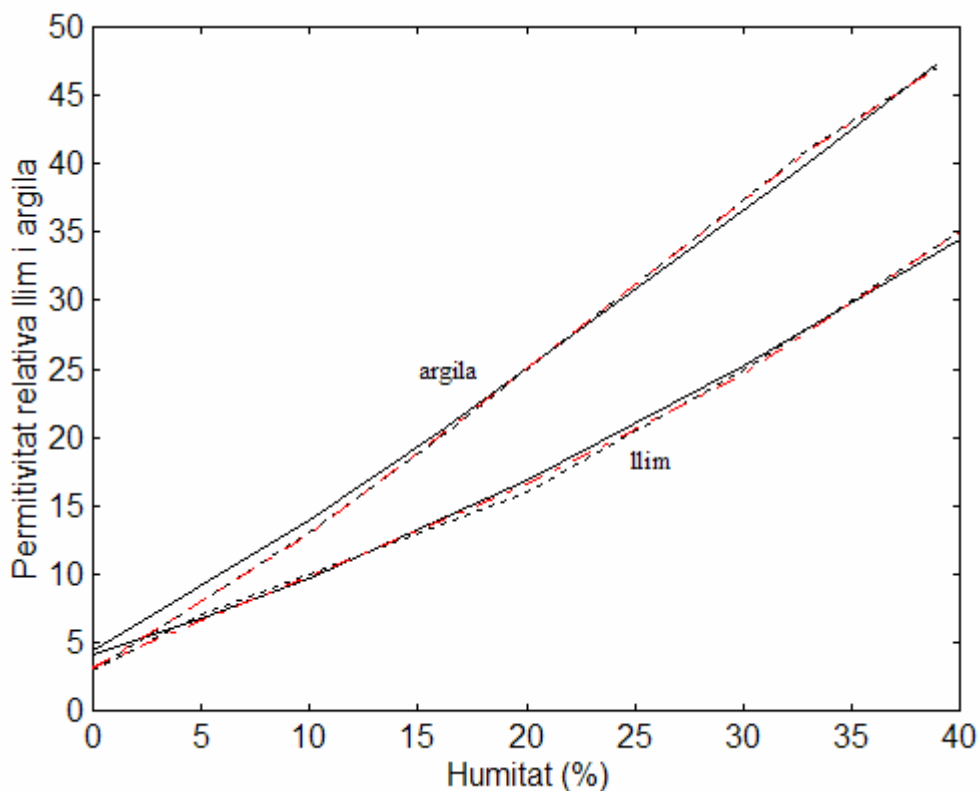


Figura 5.17. Permitivitat del llim del campus nord –traces inferiors– i de l'argila de Sant Sadurní –traces superiors– en funció de la humitat les mesures –en traç discontinu curt–, l'ajust al model que es proposa en aquest treball –en traç continu– i ajustades a un polinomi de tercer ordre –en traç discontinu llarg–.

A part del nivell menor de permitivitat del model de Topp (1980) respecte les nostres mesures segurament per efectes interfacials, la concavitat de la seva corba també és major.

6 CONCLUSIONS

Tot és en tot, delimitat, tangible,
i a poc a poc, amb mots de cada dia,
pot concretar-se en signes, en
paraules.

Miquel Martí i Pol, 17-VI-1976. Tot
és en tot. Poemes del llibre inèdit
"Les clares paraules".

Les conclusions, la pedra clau de les catedrals gòtiques, amb modèstia la d'aquest treball. La que dóna sentit a les parts, les relliga i les ajunta vers un objectiu comú de validació o modificació de les hipòtesis prèvies.

Hem dividit les conclusions en diferents apartats segons els capítols previs per qüestions d'homogeneïtat en aquest treball de caire interdisciplinari.

6.1 De la revisió de la bibliografia

Els mètodes habituals en la caracterització de materials —e.g. [Harris, 1966], [Von Hippel, 1995]— que contemplen una espectroscòpia d'impedància en el domini freqüencial són també uns dels més utilitzats en la caracterització dels sòls [Parkhomenko, 1967]. Malauradament, s'ha deixat un paper poc rellevant a la instrumentació, ja que gairebé sempre s'ha estudiat i s'ha mesurat per a l'enginyeria civil o per a les ciències geològiques, és a dir, des de l'òptica de l'aplicació.

Assignar un paper secundari a la instrumentació pot dificultar la interpretació dels resultats. Per exemple, Katsube (1973) dubta d'algun resultat obtingut per investigadors reconeguts com Parkhomenko (1967), per problemes relacionats amb la impedància d'elèctrode, és a dir, de la transducció de corrent iònic-electrònic. Cal doncs, especificar i limitar l'abast dels instruments i veure quines mesures són realitzables amb unes garanties d'exactitud determinades. Això no significa que la instrumentació sigui el més important en la mesura elèctrica de sòls, però sí que és fonamental i cal situar-la en el punt que li correspon. De fet, podria justificar part de la dispersió de resultats que apareixen a la bibliografia, tot i que la major part d'aquesta dispersió es cregui deguda a les diferents circumstàncies dels sòls.

6.2 Dels models teòrics

La conductivitat en sòls és, eminentment, iònica i està fortament influenciada per la composició química del sòl i no pas tant per la presència o absència d'aigua. Això fa que les possibles lleis que descriu aquest comportament tindran la conductivitat de l'aigua com a paràmetre.

La conductivitat causa una singularitat a la permitivitat complexa en contínua. Els materials compostos modifiquen les característiques elèctriques dels seus formadors o fases, no sòls per la ponderació de les característiques de cada fase, sinó també per l'aparició d'interfícies i de la seva ubicació i distribució en el sí del material. Així, la constant dielèctrica total és funció de les permitivitats dels elements constituents, de la seva fracció de volum i d'unes variables, desconegudes de forma senzilla, que relacionen camps extern i intern.

Hem trobat en alguns casos que els efectes interfacials actuen de forma proporcional a les quantitats d'humitat i aquest fet ens ha permès desenvolupar un model amb una base teòrica i una constant multiplicativa empírica per descomptar-los —els efectes interfacials—.

6.3 Dels mètodes clàssics de mesura d'impedància elèctrica de sòls

El coneixement dels paràmetres elèctrics de les fases del sòl per separat no permet conèixer directament els paràmetres elèctrics del sòl. El sòl és un electròlit heterogeni i aquest fet condiciona el sistema per mesurar la seva impedància elèctrica. La mesura de forma conjunta de la part real i part imaginària de la impedància és un dels condicionaments més notables que imposa. Per tant s'han dissenyat uns paràmetres per conèixer la bondat de les mesures.

Definim *emascament* com el fenomen de pèrdua de la informació a causa de la presència d'un senyal d'amplitud gran en quadratura respecte el senyal que volem mesurar. Sempre que es mesuri per relació amb un instrument vectorial no ideal, el resultat de la mesura pot ser aberrant si les amplituds del senyal en fase i del senyal en quadratura són molt diferents. Si la part de la impedància governada per la conducció electrolítica, com és el cas d'un sòl humit, és molt més gran que la part de la impedància governada per la permitivitat, el sistema de mesura haurà de tenir un marge dinàmic superior a la relació entre ambdues parts. Aquest marge dinàmic l'hem anomenat *marge d'obertura*, perquè comparem dues quantitats que estan en quadratura.

Així, el *marge d'obertura* juntament amb el nivell de soroll i de saturació defineixen les *zones d'exactitud*. En general, la bibliografia descriu mètodes genèrics de mesura d'impedància elèctrica de sòls sense comptar amb aquesta problemàtica específica de dispersió gran entre la component en fase i la component en quadratura de la impedància. El fet limita el nombre d'instruments o tècniques que mesuren de forma correcta les dues components al mateix temps. Aquesta omisió porta a resultats erronis si es produeix un emascament del senyal minoritzat.

Hem comprovat que la tècnica de mesura amb dos fils només serveix per a sòls molt aïllants i per conèixer el corrent de desplaçament, dit d'altra forma la permitivitat, o per a electròlits líquids conductors homogenis amb la impedància d'elèctrode controlada. O el que és el mateix, en absència de fenòmens interfacials o d'acumulació de càrrega, tant a nivell de contacte en l'elèctrode com a nivell microscòpic.

Finalment, cal observar que les parts reals i imaginàries que resulten de la relació de quantitats mesurades complexes són funció, a més de la component que li correspon, de la component que està en quadratura. Aquestes parts en quadratura s'anul·len en mesures teòriques. Però en mesures reals, on els valors mesurats tenen una cota d'error, i quan hi ha un marge dinàmic gran entre parts reals i imaginàries, la mesura més gran —e.g. la part real— pot *emascarar* el valor obtingut de la mesura més petita —e.g. part imaginària—. Així, cal plantejar una acurada propagació d'errors en mesures d'aquesta mena abans d'analitzar els resultats.

6.4 Dels mètodes de mesura desenvolupats

El nombre elevat de cèl·lules: de secció constant, capacitiva amb guarda, adaptada, simètrica i de camps no uniformes, obeeix a que la mesura de conductivitat i permitivitat està condicionada a altres factors. Hem concebut la cèl·lula de secció constant per mesurar conductivitat amb la mecanització més senzilla possible. Hem realitzat la resta de cèl·lules, fins arribar a les cèl·lules de camps no uniformes, per mesurar permitivitat. Malauradament, la conductivitat present en les mostres de sòl amb humitat apreciable *emascara* el senyal. Hem adaptat els diferents models de cèl·lules als instruments, marges d'impedància i marges freqüencials per mesurar en les *zones d'exactitud* major de cada instrument.

Tota cèl·lula capacitiva té una freqüència de ressonància causada per la inductància sèrie equivalent. Aquesta freqüència de ressonància és funció de la cèl·lula, de les connexions i de la impedància de la mostra. No es pot mesurar a freqüències superiors a la de ressonància. En teoria, un dielèctric barreja de sòls i aigua té una permitivitat menor a la de l'aigua, si els efectes interfacials no intervenen, i per tant la freqüència de ressonància és superior a la de la cèl·lula plena d'aigua. En la pràctica, hem comprovat que l'augment de permitivitat atesos

els fenòmens interfacials fan davallar aquest límit de mesures. Amb aquests efectes paràsits i ateses les mides de les partícules de sòl de gra fi resulta difícil construir una cèl·lula capacitiva que treballi per sobre 100 MHz.

Una xarxa passiva d'interconnexió entre les cèl·lules capacitives i un analitzador d'impedàncies com l'hp 4192A es caracteritza només amb dues mesures, ateses les simetries. Les més senzilles són una mesura en circuit obert i una altra en curtcircuit. Aquest fet no evita que, sota determinades circumstàncies d'impedància d'elèctrode, alguns analitzadors d'impedància no puguin mesurar.

Cal un preamplificador actiu per solucionar el problema d'impedància de contacte elevada. Existeixen varies configuracions possibles que es descriuen per guany, impedància d'entrada, i impedància de sortida. L'anàlisi de la xarxa que resulta ens porta a proposar que el calibratge final del sistema complet es realitzi mitjançant tres mesures d'impedància, que són suficients, sobre tres mostres conegudes. Les mesures es fan a freqüències inferiors a 1 MHz, on els efectes paràsits de resistència i inductància sèrie en borns són negligibles.

6.5 De l'anàlisi de dades

Sobre la conductivitat

La conductivitat, mesurada amb quatre fils, de solucions salines i de sòls humits és independent de la freqüència. En tots els casos de sòls mesurats es detecta una tendència monòtona creixent entre conductivitat i humitat; i per a una humitat, més conductivitat com més fase argilosa posseeix el sòl.

Les sorres no s'ajusten a les lleis potencials tipus la llei d'Archie modificada per quan el sòl no està saturat. A partir d'una certa quantitat d'humitat, potser un llindar de percolació, la relació entre humitat i conductivitat és aproximadament lineal. El pendent d'aquesta recta depèn de la conductivitat de l'electròlit dissolt. Observem que la saturació del contingut d'humitat també comporta una disminució en l'augment de l'increment de conductivitat.

Els llims i les argiles sí que s'ajusten a una equació potencial com la llei d'Archie modificada per a sòls no saturats. Evidentment si emprem de forma estricta la llei d'Archie, la constant de proporcionalitat i el paràmetre de cimentació són diferents dels casos habituals de roques ja que apliquen a sòls amb fase col·loïdal.

Sobre la permitivitat

S'observa un augment entre permitivitat i humitat per a tots els sòls com era d'esperar. Aquest comportament té moltes diferències segons el sòl i el marge de freqüències que es mesura.

Els efectes interfacials ajuden a tenir un *marge d'obertura* suficient en tots els casos mesurats. Els potencials de contacte i efectes interfacials causats per la presència de conductivitat, augmenten la permitivitat relativa de solucions salines i sòls a freqüència baixa.

De fet, els fenòmens interfacials fan irrealitzable les mesures de permitivitat a freqüència baixa. Per tant, qüestionem la utilitat de les cèl·lules capacitives que mesuren permitivitats relatives de dielèctrics amb moltes pèrdues a freqüència baixa, siguin amb guarda o no. Tant sols podem tenir informació de relació entre permitivitats.

L'aparició de fenòmens interfacials en la representació de la permitivitat és una mesura indirecta de la conductivitat, en particular, per a sòls assecats de manera física. Com més fase argilosa té un sòl, apareixen més fenòmens interfacials –les superfícies augmenten per un mateix volum– encara que sigui sec. Aquest fet pot tenir una clara aplicació a postes a terra, ja que per una mateixa quantitat d'aigua vessada els sòls argilosos són més efectius.

Atès que hi ha una forta relació entre permitivitat i conductivitat segurament per fenòmens interfacials caldria un calibratge previ del sòl humit en la mesura de permitivitat a les freqüències d'interès. Tot i conductivitats similars de les mostres de sòls respecte les solucions salines, els fenòmens interfacials es manifesten de forma molt diferent respecte les solucions. La màxima diferència és entre un i deu kilohertz en tots els tipus de sòls que s'han provat i resulta més gran com més fase argilosa conté el sòl.

Les lleis de permitivitats de materials compostos no serveixen quan es manifesten efectes interfacials. Si suposem que són proporcionals en totes les humitats i els descomptem, podem relacionar de forma unívoca permitivitat i humitat per a sòls amb fase argilosa elevada mitjançant la llei semiempírica que proposem amb un paràmetre d'ajust.

Els fenòmens interfacials es manifesten menys a freqüències més elevades. Això no obstant, l'aparició d'elements inductius sèrie limiten la freqüència d'ús. El valor d'aquesta freqüència depèn de la cèl·lula, el calibratge de les connexions i de la *impedància de la mostra*. Les sorres presenten una relació pràcticament lineal entre permitivitat i humitat. No obstant això, la constant de proporcionalitat resulta menor que la que esperaríem si es suposés un model circuital paral·lel de les lleis de distribució geomètrica. Els llims i les argiles s'ajusten a un model com el que es proposa de forma aproximada i a un polinomi de tercer ordre de forma més exacta.

És possible conèixer la humitat d'un sòl mitjançant impedància elèctrica sempre que es conegui el tipus de sòl i es tingui una idea de la concentració inicial de sals en el si del sòl. Així, les tècniques de mesura desenvolupades poden ser un complement ràpid i barat de les tècniques clàssiques i poden donar una informació útil si s'accepta una incertesa del 5%.

7 REFERÈNCIES

Albella Martín, J.M. i Martínez Duart, J.M., 1984. Física de dieléctricos. Marcombo, s.a., Barcelona.

Albella Martín, J.M. i altres, 1993. Introducción a la ciencia de materiales. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid.

Alharthi, A. i Lange, J. 1987. "Soil Water Saturation: Dielectric Determination". Water Resources Research, vol. 23, núm. 4, pàg. 591-595, abril.

ASTM D 150-92. "Standard test methods for AC loss characteristics and permittivity (dielectric constant) of solid electrical insulating materials".

ASTM D 257-92. "Standard test methods for DC resistance or conductance of insulating materials".

ASTM, 1984. "Standard Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method". Committee G-1, designation: G57-58, març 1978.

ASTM, 1993. ASTM standards on SOIL compaction. 2a ed., patrocinat pel comitè "D-18 on Soil and Rock". Filadèlfia.

Anderson, L.S., Gajda, G.B., Stuchly, S.S., 1986. "Analysis of an open-ended coaxial line sensor in layered dielectrics". IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. IM-35, pàg. 13-18, març.

Andrawis, M.Y. i altres, 1992. "Dielectric loss determination using perturbation". Proceedings Instrumentation and Measurement Technology Conference, pàg. 425-429, maig.

Ansault, M. i altres, 1984. "Statistical relationship between apparent dielectric constant and water content in porous media". Soil. Sci. Soc. Am. J., vol. 48, pàg. 47-50.

Arulanandan, K., 1991. "Dielectric Method for Prediction of Porosity of Saturated Soil". Journal of Geotechnical Engineering, vol. 117, núm. 2. ASCE, pàg. 319-330, febrer.

Asch, G., 1987. Les Capteurs en instrumentation industrielle. "Capteurs d'humidité", pàg. 705-732. Ed. Bordas, Dunod, París.

Askeland, D.R., 1987. La ciencia e ingeniería de los materiales, pàg. 421-433. Grupo Ed. Iberoamérica, México.

Athey, T.W., Stuchly, M.A. i Stuchly, S.S., 1982. "Measurement of Radio Frequency Permittivity of Biological Tissues with an Open-Ended Coaxial Line: Part I". IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, vol. MTT-30, núm. 1, pàg. 82-86, gener.

Australian Water Resources Council, 1977. "Soil Moisture Measurement and Assessment". Hydrological series núm. 9, Canberra.

Backer, R. de i Watillon, A., 1976. "Dielectric Relaxation of Heterogeneous Systems II. Dielectric Dispersion of Spherical Particles Surrounded by an Electrical Double Layer, Theoretical Approach". Journal of Colloid and Interface Science, vol. 54, núm. 1, pàg. 69-79,

gener.

Badía Villas, D., 1992. Ciència i tecnologia dels sòls. X trobada, Prada, agost 1991. "Suelos afectados por sales", pàg. 609-629. Butll. Soc. Cat. Cièn., vol. XIII. Institut d'Estudis Catalans, Barcelona.

Bahaj, A.S. i Bailey, A.G., 1985. "The Relationship Between Dielectrophoretic and Impedance Response of Dielectric Particles Immersed in Aqueous Media". IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 21, núm. 5, pàg. 1300-1305, setembre-octubre.

Balabanian, N. i Bickart, T.A., 1972. Teoría de redes eléctricas. Ed. Reverté, s.a., Barcelona.

Baker-Jarvis, J. i altres, 1994. "Analysis of an Open-Ended Coaxial Probe with Lift-Off for Nondestructive Testing". IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 43, núm. 5, pàg. 711-717, octubre.

Bao J.Z., Davis C.C. i Schmukler R.E., 1993. "Impedance Spectroscopy of Human Erythrocytes: System Calibration and Nonlinear Modeling". IEEE Trans. Biomed. Engineer., vol. 40, núm. 4, pàg. 364-377, abril.

Barlow, R.K. i Williams, R.A., 1995. "Impedance Spectroscopy of Mineral Suspensions - A Review". Process Tomography. Implementation for industrial processes. UMIST, pàg. 16-28.

Barrow, G.M., 1972. Química Física. Ed. Reverté, s.a., Barcelona.

Bartolini, R., 1989. La fertilidad de los suelos: terreno, planta, fertilizantes. Mundi-Prensa. Madrid.

Bedford, D.J., 1993. Desenvolupament d'un sistema de mesura de la constant dielèctrica complexa per a la caracterització de sòls d'1 MHz a 1 GHz. Projecte de final de carrera, Departament Enginyeria Electrònica, Universitat Politècnica de Catalunya, desembre.

Van Beek, L.K.H., 1967. "Dielectric behavior of heterogeneous systems". Progr. Dielec. vol. 7, pàg. 69-114.

Bianco, B. i altres, 1979. "Measurements of complex dielectric constant of human sera and erythrocytes". IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. IM-28, pàg. 290-295.

Birchak, J.R., Gardner, C.G., Hipp, J.E. i Victor, J.M., 1974. "High dielectric constant microwave probes for sensing soil moisture". Proceedings of the IEEE, vol. 62, núm. 1, pàg. 93-98, gener.

Bogoróditski, N.P. i d'altres, 1979. Materiales electrotécnicos. Ed. Mir, Moscou. Traduït per Antonio Molina Garcia.

Bolk W.T., 1985. "A General Digital Linearising Method for Transducers". J. Phys. E. Sci. Instrum., vol. 18, pàg. 61-64.

Boscolo, A. i altres, 1993. "On Line Moisture Expert Measurement System for Concrete Mixing Plant". International Symposium on Intelligent Instrumentation fo Remote and On-Site Measurements, Brusseles, IMEKO, pàg. 33-39 maig.

Bragós, R. i altres, 1995. "Applicability of the three-coefficient calibration technique to EIT". Comunicació interna de la Divisió d'Instrumentació i Bioenginyeria, Departament d'Enginyeria Electrònica, UPC.

Bragós, R. i altres, 1995. "On-Line Estimation of Biomass in Free and Immobilized Cell Cultures Using Two-Frequency Measurements". IX International Conference on Electrical Bio-Impedance, pàg. 59-62, Heidelberg.

Bragós, R. i altres, 1995. "Sistema de monitorización de biomasa mediante espectroscopía de impedancia eléctrica". XIII Congreso anual de la AEB, pàg. 137-138, Barcelona.

Brand, E.W. i Premchitt, J., 1981. "A Note on the Conductivity of Electrolytes for Analog Models". ASTM Geotech. Testing Journal, vol. 4 núm. 3, pàg. 123-125, setembre.

Brophy, J.H, Rose, R.M. i Wulff, J., 1978. Propiedades termodinámicas. Limusa, México.

Bucci, O.M. i altres, 1972. "Time-Domain Techniques for Measuring the Conductivity and Permittivity Spectrum of Materials". IEEE Trans. on Instrum. Meas., vol. IM-21, núm. 3, pàg. 237-243, agost.

Buck, N.L., 1996. "Calibration of Dielectric Constant Probes Using Salt Solutions of Unknown Conductivity". IEEE Trans. on Instrum. Meas., vol. 45, núm. 1, pàg. 84-88, febrer.

Burdette, E.C., Cain, F.L., Seals, J., 1980. "In vivo probe measurement technique for determining dielectric properties at VHF through microwave frequencies". IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, vol. MTT-28, núm. 1, pàg. 414-427, gener.

Bussey, H.E., 1980. "Dielectric measurements in a shielded open circuit coaxial line". IEEE Trans. on Instrum. Meas., vol. IM-29, pàg. 120-124, juny.

Cagniard, L., 1953. "Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting". Geophysics, vol. 18, pàg. 605-635.

Campbell, E.C. i altres, 1973. Agricultural Meteorology, 12. "A dewpoint hygrometer for water potential measurement", pàg. 113-121. Elsevier Scientific Publishing, Amsterdam.

Campbell, J.E., 1990. "Dielectric Properties and Influence of Conductivity in Soils at One to Fifty Megahertz". Soil Sci. Soc. Am. J., vol. 54, pàg. 332-341, març-abril.

Castle, G.S.P. i Roberts, J., 1974. "A Microwave Instrument for the Continuous Monitoring of the Water Content of Crude Oil". Proceedings of the IEEE, vol. 62, núm. 1, pàg. 103-108, gener.

CEDEX, 1972. "Norma de ensayo del laboratorio del transporte y mecánica del suelo 'José Luis Escario'". Centro de estudios de experimentación de obras públicas.

Chen, C.H., 1988. "Signal Processing and Pattern Recognition in Nondestructive Evaluation of Materia". Springer-Verlag Berlin, Heidelberg.

Chew, W.C. i altres, 1991. "Design and Calibration of a Large Broadband Dielectric Measurement Cell". IEEE Trans. Geos. Rem. Sens., vol. GE-29, núm. 1, pàg. 42-47, gener.

- Cobbold, R.S.C., 1974. *Transducers for Biomedical Measurements: Principles and Applications*. John Wiley and Sons, Inc., Nova York.
- Cogger, N.D., 1993. "The Dynamic Analysis of Chemical and Bio-Chemical Phenomena by Frequency Response Analysis". Solartron Instruments, document 0008G/0345G, Hampshire.
- Cole, K.S. i Cole, R.H., 1941. "Dispersion and Absorption in Dielectrics. I. Alternating Current Characteristics". *J. Chem. Phys.*, vol. 9, pàg. 341-351.
- Cole, R.H., 1977. "Time Domain Reflectometry". *Ann. Rev. Phys. Chem.*, núm. 28, pàg. 283-300.
- Cortés Lucas, A., 1992. *Ciència i tecnologia dels sòls. X trobada, Prada, agost 1991. "Caracterització de sòls"*, pàg. 573-587, *Butll. Soc. Cat. Cièn.*, vol. XIII. Institut d'Estudis Catalans, Barcelona.
- Cunningham, M.J., 1981. "Measurement errors and instrument inaccuracies". *Instrument Science and Technology. J. Phys. E: Sci. Instrum.*, vol. 14, pàg. 901-908.
- Daily, W., Ramírez, A., LaBrecque, D i Nitao, J., 1992. "Electrical Resistivity Tomography of Vadose Water Movement". *Water Resources Research*, vol. 28, núm. 5, pàg. 1429-1442.
- Dalton, F.N., Herkelrath, W.N., Rawlins, D.S. i Rhoades, J.D., 1984. "Time-Domain Reflectometry: Simultaneous Measurement of Soil Water Content and Electrical Conductivity with a Single Probe". *Science*, vol. 224, pàg. 989-990, juny.
- Dekker, A.J., 1959. *Electrical Engineering Materials*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs (New Jersey).
- Dekker, A.J., 1957. *Solid State Physics*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs (New Jersey).
- Deschamps, G.A., 1962. "Impedance of an Antenna in a Conducting Medium". *IRE Trans. Antennas and Propagation*, pàg. 648-650, setembre.
- Dobson, M.C., 1985. "Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil - Part II: Dielectric Mixing Models". *IEEE Trans. Geos. Rem. Sens.*, vol. GE-23, núm. 1, pàg. 35-46, gener.
- Drago, G.P., Marchesi, M. i Ridella, S., 1984. "The Frequency Dependence of an Analytical Model of an Electrically Stimulated Biological Structure". *Bioelectromagnetics*, 5, pàg. 47-62.
- Elela, M.A. i Alturaigi, M., 1995. "Switched Capacitor Digital Phase Meter". *IEEE, Instr./Meas. Techn. Conf. Proceedings*, pàg. 516-519, abril.
- Elliott, R.S., 1966. *Electromagnetics*, pàg. 189. McGraw-Hill Book Company, Nova York.
- Esposti, G. degli i Tommasini, D., 1990. "A Model for the Simulation of Relaxation Phenomena in Dielectrics". *IEEE Trans. Electrical Insulation*, vol. 25, núm. 4, pàg. 617-621, agost.
- Feynman, R.P., 1972. *Lectures on Physics. Mainly Electromagnetism and Matter*. Fondo

Educativo Interamericano, s.a., Bogotá.

Flinn, R.A. i Trojan, P.K., 1989. *Materiales de ingeniería y sus aplicaciones*, pàg. 652-664. McGraw-Hill, Bogotá.

Foster, K.R. i Schwan, H.P., 1989. "Dielectric Properties of Tissues and Biological Materials: A Critical Review". *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, vol. 17, núm. 1, pàg. 25-104.

Franco, S., 1988. *Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits*, pàg. 85-87. McGraw-Hill International Ed., Singapur.

Freundorfer, A. i altres, 1984. "A method of determining electrical properties of geophysical media". *J. Appl. Phys.* 55(1), pàg. 218-222, 1 de gener.

Fricke, H., 1925. "A mathematical treatment of the electric conductivity and capacity of Disperse Systems". *Phys. Rev.* 26, pàg. 678-681.

Fuller, B.D. i Ward, S.H., 1970. "Linear System Description of the Electrical Parameters of Rocks". *IEEE Trans. Geoscience Electronics*, vol. GE-8, núm. 1, pàg. 7-18, gener.

Gajda, G. i Stuchly, S.S., 1983. "An Equivalent Circuit of an Open-Ended Coaxial Line". *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-32, núm. 4, pàg. 506-508, desembre.

Gabrielli, G., 1990. "Use and Applications of Electrochemical Impedance Techniques. Technical Report". Schlumberger, París, març.

Gaudu, J.C. i altres, 1993. "Mesure de l'humidité des sols par une méthode capacitive: analyse des facteurs influençant la mesure". *Agronomie* 13, Elsevier/INRA, pàg. 57-73.

Gersing, E., 1991. "Messung der elektrischen Impedanz von Organen - Apparative Ausrüstung für Forschung und klinische Anwendung". *Biomed. Technik*, 36, pàg. 6-11.

Gee, G.W. i Dodson, M.E., 1981. "Soil water content by microwave drying: a routine procedure". *Journal Soil Science Society of America*, vol. 45, núm. 4, pàg. 1234-1237.

Gianzero, S.C., 1977. "Characteristic responses of resistivity tools in elliptical boreholes". *IEEE Trans. Geoscience Electronics*, vol. GE-15, núm. 4, pàg. 251-256, octubre.

Giraud, G. i altres, 1984. "AC Conductivity of a Random Medium: A Percolation Approach". *IEEE Trans. Electrical Insulation*, vol. EI-19, núm. 3, juny.

Goad, D.G.W. i Wintle, H.J., 1990. "Capacitance corrections for guard gaps". *Meas. Sci. Technol.*, vol. 1, núm. 9, pàg. 965-969, setembre.

Göpel, W., Hesse, J. i Zemel, J.N. (ed.), 1991. *Sensors. A Comprehensive Survey. Volum 2. Chemical and Biochemical Sensors. Part I.* VCH, Weinheim (Alemanya).

Grant, J.P. i altres, 1989. "A critical study of the open-ended coaxial line sensor technique for RF and microwave complex permittivity measurements". *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, vol. 22, pàg. 757-770.

Grover, F.W., 1973. Inductance Calculations. Working Formulas and Tables. Instrument Society of America, Nova York.

Guillemin, E.A., 1959. Introducció a la teoria de los circuits. Traducció de Batlle Gayán, José. Ed. Reverté, s.a., Barcelona. Obra original, Introductory Circuit Theory. John Wiley & Sons, Inc. Nova York.

Gunston, M.A.R., 1972. Microwave Transmission-line Impedance Data. Van Nostrand Reinhold Company, Londres.

Hanai, T., 1961. "Dielectric Theory on the Interfacial Polarization for Two-Phase Mixtures". Inst. Chem. Res., Kyoto Univ., vol. 39, pàg. 341-368.

Haraoubia, B. i altres, 1990. "Nouvelle technique de mesure des propriétés de matériaux en très haute fréquence (1-300 MHz)". Meas. Sci. Technol., núm. 1, pàg. 231-237.

Hardin, B., 1989. "Effect of Rigid Boundaries on Measurement of Particle Concentration". Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, vol. 12, núm. 2, pàg. 143-149, juny.

Harris, F.K., 1966. Electrical Measurements. John Wiley & Sons, inc. 6ena ed., Nova York.

Hasted, J.B., 1973. Aqueous dielectrics. Chapman and Hall, Londres.

Hayward, D. i altres, 1984. "Low-frequency dielectric measurements (10^{-4} to 6×10^4 Hz): a new computer-controlled method". J. Phys. E: Sci. Instrum., vol. 17, pàg. 683-690.

He, Y.D. i Shen, L.C., 1992. "Measurement of Complex Permittivity of Materials Using a Monopole Antenna". IEEE Trans. Geos. Rem. Sens., vol. 30, núm. 3, pàg. 624-627, maig.

Heerens, W.C. i Vermeulen, F.C., 1975. "Capacitance of Kelvin guard-ring capacitors with modified edge geometry". Journal of Applied Physics, vol. 46, núm. 6, pàg. 2486-2490, juny.

Heimovaara, T.J. i Bouten, W., 1990. "A Computer-Controlled 36-Channel Time Domain Reflectometry System for Monitoring Soil Water Contents". Water Resources Research, vol. 26, núm. 10, pàg. 2311-2316, octubre.

Henneberg, KA. i Plonsey R., 1991. "Boundary Element Anàlysis of Directional Sensitivity of Bioelectrodes: - A Model Comparison". Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, vol. 13, núm. 2, pàg. 504-505.

Hewlett-Packard, 1986. Operation and Service Manual. Model 4192A LF Impedance Analyzer. Tokio, Yokogawa-Hewlett-Packard LTD., desembre.

Hewlett-Packard, 1991. Test & Measurement Catalog. pàg. 310.

Hewlett-Packard, 1991. Microwave Test Accessories Catalog, pàg. 13-14. Hewlett-Packard, 1992-1993. Microwave Test Accessories Catalog, pàg. 9.

Hill, G.J., 1993. "Traceable dielectric measurements by resonance methods in the frequency

range 1-30 MHz". IEE Proceedings-A, vol. 140, núm. 5, pàg. 382-384, setembre.

Hipp, J.E., 1974. "Soil Electromagnetic Parameters as Functions of Frequency, Soil Density, and Soil Moisture". Proceedings of the IEEE, vol. 62, núm. 1, pàg. 98-103, gener.

Hippel, A.R. von (ed.), 1995. Dielectric Materials and Applications. Artech House Boston London.

Hippel, A.R. von (ed.), 1995. Dielectric and Waves. Artech House Boston London.

Hoekstra, P. i Delaney, A., 1974. "Dielectric Properties of Soils at UHF and Microwave Frequencies". Journal of Geophysical Research, vol. 79, núm. 11, pàg. 1699-1708, 10 d'abril.

Honda, M., 1989. The Impedance Measurement Handbook. A Guide to Measurement Technology and Techniques. Tokio: Yokogawa-Hewlett-Packard LTD.

Hopirtean, E. i altres, 1994. "Impedance spectroscopy on non-conventional conductivity cell". Sensors and Actuators B, 18-19 pàg. 389-391.

Howard, A.K., 1989. "Minimum Test Specimen Mass for Moisture Content Determination". Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, vol. 12, núm. 1, pàg. 39-44, març.

Hu, M-Q., Hua, P. i Webster, J.G., 1987. "Measurement error in an electrical impedance tomography system". IEEE/Ninth Annual Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society, pàg. 1425-1426.

Huelsman, L.P., 1963. Circuits Matrices and Linear Vector Spaces, McGraw-Hill Book Company, Inc., pàg. 57-73.

Iakubovskii, I.V. i Liajov, L.L., 1980. Exploración eléctrica. Ed. Reverté, s.a., Barcelona. Original rus ed. Nedra, Moscou.

IEC 250 69. "Recommended methods for the determination of the permittivity and dielectric disipation factor of electrical insulating materials at power, audio and radio frequencies including metre wavelengths".

Ide, J., 1994. "Estimating the electrical compatible connectors". Microwave Engineering Europe, pàg. 39-41, agost/setembre.

Iglesias, T.P., Fuente, M.R. de la, Seoane, A. i Pérez Jubindo, M.A., 1993. "Temas de física: Espectroscopía dieléctrica por reflexión en el dominio temporal". Revista Española de Física 7 (4), pàg. 25-29.

Jacobs, P., Varlan, A. i Sansen, W., 1995. "Design optimisation of planar electrolytic conductivity sensors". Med. & Biol. Eng. & Comput., 33, pàg. 802-810, novembre.

Jay, F. (ed.), 1984. IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms. 3a ed., John Wiley & Sons, Nova York.

Jenkins, S. i altres, 1990. "Dielectric Measurements on Reference Liquids Using Automatic

- Network Analysers and Calculable Geometries". *Meas. Sci. Technol.*, 1, pàg. 691-702.
- Jonscher, A.K., 1990. "Dielectric Response of Polar Materials". *IEEE Trans. Electrical Insulation*, vo. 25 núm. 4, pàg. 622-629, agost.
- Kalenov, E.N., 1974. Interpretación de curvas de sondeos eléctricos verticales. M.O.P. Secretaría General Técnica, Servicio de Publicaciones, Madrid.
- Katsube, T.J. i Collett, L.S., 1973. "Measuring Techniques for Rocks with high Permittivity and high Loss". *Geophysics*, vol. 38, núm. 1, pàg. 92-105, febrer.
- Katz, A.J. i Thompson, A.H., 1985. "Fractal Sandstone Pores: Implications for Conductivity and Pore Formation". *Physical Review Letters*, vol. 54, núm. 12, pàg. 1325-1328, 25 de març.
- Kaufman, B.K., 1994. "H₂O for Instrumentation". *Measurements & Control*, abril, pàg. 128-129.
- Keithley, 1984. *Low Level Measurements*, Cleveland.
- King, R.J., 1992. "Microwave Moisture Measurement of Grains". *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 41, núm. 1, pàg. 111-115, febrer.
- King, R.J., 1992. "Microwave sensors for process control. Part I: transmission sensors". *Sensors*, pàg. 68-72, setembre.
- Klein, L.A. i Swift, C.T., 1977. "An Improved Model for the Dielectric Constant of Sea Water at Microwave Frequencies". *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. AP-25, núm. 1, pàg. 104-111, gener.
- Kobranova, V.N., 1989. *Petrophysics*. Mir Publishers, Moscou.
- Kraszewski, A., Stuchly, S.S., Stuchly, M.A. i Symons, S.A., 1983. "On the Measurement Accuracy of the Tissue Permittivity In Vivo". *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-32, núm. 1, pàg. 37-42, març.
- Kraszewski, A. i Stuchly, S.S., 1983. "Capacitance of open-ended dielectric-filled coaxial lines-experimental results". *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-32, pàg. 517-519, desembre.
- Kuráz, V., 1981. "Testing of a Field Dielectric Soil Moisture Meter". *Geotechnical Testing Journal*, vol 4., núm. 3, pàg. 111-116, setembre.
- Laine, E.F. i Lytle, R.J., 1976. "A Computer Program for Four Probe Resistivity Measurements in a Horizontally Layered Earth". *IEEE Trans. Geoscience Electronics*, vol. GE-14, núm. 4, pàg. 232-235, octubre.
- Lambe, T.W., Whitman, R.V., 1994. *Mecánica de suelos*, Ed. Limusa, México, D.F.
- Landau, L.D. i Lifshitz, E.M., 1975. *Electrodinàmica de los medios continuos*. Ed. Reverté, s.a., Barcelona.
- Langhe, P. De, Martens, L. i Zutter, D. De, 1994. "Design Rules for an Experimental Setup Using

an Open-Ended Coaxial Probe Based on Theoretical Modelling". *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 43, núm. 6, pàg. 810-817, desembre.

Libby, H.L., 1971. *Introduction to Electromagnetic Nondestructive Test Methods*. Wiley-Interscience, Nova York.

Lima, O.A.L. de i Sharma, M.M., 1990. "A grain conductivity approach to shaly sandstones". *Geophysics*, vol. 55, núm. 10, pàg. 1347-1356.

Lipt, K. i Bla, G., 1969. "Instrument engineers' handbook (volume I)". Radnor, Pennsylvania, pàg. 842-880.

Littwitz, C. i altres, 1990. "Cell constant of tetrapolar conductivity cell". *Med. & Biol. Eng. & Comput.*, 28, pàg. 587-590, novembre.

Llaverías Sanmartín, J., 1987. "Aportación al cálculo preciso de los potenciales en las redes de toma de tierra de los grandes centros de transformación". *Tesi ETSEIB*.

Lloret, A., 1988. *Aguas subterráneas. Instrumentación, medida y toma de muestras*. Prensa XXI, s.a., Barcelona.

Lloor, G.P. de, 1983. "The dielectric properties of wet materials". *IEEE Trans. Geos. Rem. Sens.*, vol. GE-21, núm. 3, pàg. 364-369, juliol.

Lortz, W. i altres, 1989. "High-temperature cell for automated low-frequency impedance measurements of solids". *J. Phys. E: Sci. Instrum.* 22, pàg. 293-296.

Lowell, J., 1983. "The role of surface conduction in absorption currents". *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 16, pàg. 2223-2227.

Lozano, A., 1994. *Monitorización no invasiva de desplazamiento de fluidos corporales mediante impedancia eléctrica*. *Tesi DEE-UPC*.

Luebbers, R., 1993. "Lossy Dielectrics in FDTD". *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 41, núm. 11, pàg. 1586-1588, novembre.

Luebbers, R., Hunsberger, F.P., Kunz, K.S., Standler, R.B. i Schneider, M., 1990. "A Frequency-Dependent Finite-Difference Time-Domain Formulation for Dispersive Materials". *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol. 32, núm. 3, pàg. 222-227, agost.

Lytle, R.J., 1974. "Measurement of Earth Medium Electrical Characteristics: Techniques, Results and Applications". *IEEE Trans. Geoscience Electronics*, vol. GE-12, pàg. 81-101, juliol.

Macdonald, J.R., 1987. "Relaxation in systems with exponential or Gaussian distributions of activation energies". *J. Appl. Phys.* 61(2), 15 de gener.

Macdonald, J.R., 1987. "Linear relaxation: Distributions, thermal activation, structure, and ambiguity". *J. Appl. Phys.* 62(11), pàg. R51-R62.

Macdonald, J.R., (ed.), 1987. *Impedance Spectroscopy, emphasizing solid materials and systems*.

John Wiley & Sons, Inc., Nova York.

Major, J. i Silic, J., 1981. "Restrictions on the use of Cole-Cole dispersion models in complex resistivity interpretation". *Geophysics*, vol. 46, núm. 6, pàg. 916-931, juny.

Marcuvitz, N., 1964. *Waveguide Handbook*. Technical Publishers, Inc., Boston.

Marshall, S.L. i Redey, L., 1990. "Mathematical analysis of a four-point conductivity probe for cylindrical samples". *Rev. Sci. Instrum.* 61 (10), pàg. 2659-2665, octubre.

Marsland, T.P. i Evans, S., 1987. "Dielectric measurements with an open-ended coaxial probe". *IEE Proceedings*, vol. 134, Pt.H, núm. 4, pàg. 341-349, agost.

Maruska, H.P. i Stevens, J.G., 1988. "Technique for Extracting Dielectric Permittivity from Data Obscured by Electrode Polarization". *IEEE Trans. Electrical Insulation*, vol. 23, núm. 2, pàg. 197-200, abril.

Materials Selector Guide, 1973. *Materials and Methods*, Reinhold Publishing Corp., Nova York.

Matko, V. i Donlagic, D., 1995. "Humidity Measurement Using the Procedure of Capacitive-Dependent Crystals". *IEEE, Instr./Meas. Techn. Conf. Proceedings*, pàg. 169-170, abril.

Maxwell, J.C., 1954. *A Treatise on Electricity and Magnetism*, pàg. 435-441, vol. 1. Dover Publications, Inc., Nova York. Obra original de 1891.

McAdams, E.T. i Jossinet, J., 1995. "Tissue impedance: a historical overview". *Physiol. Meas.* 16, pàg. A1-A13.

Misra, D.K. i altres, 1990. "Noninvasive Electrical Characterization of Materials at Microwave Frequencies Using an Open-Ended Coaxial Line: Test of an Improved Calibration Technique". *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 38, núm. 1, gener.

Misra, D.K., 1987. "A quasi-static analysis of open-ended coaxial lines". *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-35, pàg. 925-928, octubre.

Moreau, J.M. i Aziz R., 1993. "Dielectric study of granular media according to the type of measurement device: coaxial cell or open ended probe". *Meas. Sci. Technol.* 4, pàg. 124-129.

Moreau, M.R., (ed.), 1982. *Essais et moyens d'essais au laboratoire et dans l'industrie. Technique et Documentation*. Lavoisier, París.

Mosig, J.R. i altres, 1981. "Reflection of an Open-Ended Coaxial Line and Application to Nondestructive Measurement of Materials". *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-30, núm. 1, pàg. 46-51, març.

Nagaraj, T.S. i altres, 1987. "Liquid Limit Determination - Further Simplified". *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, vol. 10, núm. 3, pàg. 142-145, setembre.

Nastuk, W.L., (ed.), 1963. *Physical Techniques in Biological Research. Volume VI*. Academic

Press, Inc. Nova York.

Neema, D.L. i altres, 1990. "Physical and Statistical Models for Bulking of Sand". *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, vol. 13, núm. 2, pàg. 115-133, juny.

Nelson, S.O., 1992. "Measurement and Applications of Dielectric Properties of Agricultural Products". *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 41, núm. 1, pàg. 116-122, febrer.

Nicolson, A.M. i Ross, G.F., 1970. "Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques". *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-19, núm. 4, pàg. 377-382, novembre.

Niininen, H. i Kelh , V., 1979. "Construction of a wide-range specific resistivity meter with logarithmic output". *Journal of Physics E, Scientific instruments*, vol. 12, pàg. 261-263.

Norton, H.N., 1982. *Sensor and analyzer handbook*, Prentice Hall, Englewood Cliffs.

Oliver, B.M. i Cage, J.M. (ed.), 1975. *Electronic Measurements and Instrumentation*. McGraw Hill, Tokio.

Olphen, H. van, 1963. *An Introduction to Clay Colloid Chemistry*. Wiley, Nova York.

Orellana, E., 1982. *Prospecci n geol ctrica en corriente continua*. Biblioteca T cnica Philips. Ed. Paraninfo, s.a., Madrid.

Orellana, E., 1974. *Prospecci n geol ctrica por campos variables*. Biblioteca T cnica Philips. Ed. Paraninfo, s.a. Madrid.

Otto, G.P. i Chew, W.C., 1991. "Improved Calibration of a Large Open-Ended Coaxial Probe for Dielectric Measurements". *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 40, núm. 4, pàg. 742-746, agost.

Page, A.L. (ed.), 1982. *Methods of Soil Analysis. Vol. II. Chemical and Microbiological Properties*. 2a ed., Agronomy series no. 9. American Society of Agronomy, Madison Wisconsin.

Pall s Areny, R., 1995. *Teoria b sica d'errors*. Ed. UPC, Barcelona.

Pall s-Areny, R. i Webster, J.G., 1993. "Bioelectric impedance measurements using synchronous sampling". *IEEE Trans. Biomed. Engineer.*, vol. 40, núm. 4, pàg. 824-829, agost.

Pall s-Areny, R. i Casas, O., 1994. "Analog Front End for Bioimpedance Measurements Based on the Floating Capacitor Technique". *Innov. Tech. Biol. Med.*, vol. 15, n m. especial 1, pàg. 109-115.

Pall s-Areny, R. i Casas, O., 1996. "A Novel Differential Synchronous Demodulator for AC signals". *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 45, núm. 2, pàg. 413-416, abril.

Paquet, J., 1971. "Mesure d'humidité in situ par les méthodes dielèctriques. Application au b ton". *Matériaux et Constructions*, vol. 4, núm. 20.

Pardini, G., 1992. "Les argiles en el sòl: Processos físico-químics". *Butll. Soc. Cat. Ci n.*, vol.

XIII. (Ciència i tecnologia dels sòls, pàg 639-652, X trobada, Prada, agost 1991), Institut d'Estudis Catalans, Barcelona.

Parkhomenko, E.I., 1967. *Electrical Properties of Rocks* (monographs in geoscience). Rhodes W. Fairbridge, ed. Plenum Press, Nova York.

Pascoe, K.J., 1973. *Properties of Materials for Electrical Engineers*. John Wiley and Sons Ltd., Bristol.

Paul, C.R., 1992. *Introduction to Electromagnetic Compatibility*. John Wiley & Sons, Inc., Nova York.

Paul, C.R., 1994. *Analysis of Multiconductor Transmission Lines*. John Wiley & Sons, Inc., Nova York.

Pearce, D.C., 1973. "The Application of the Theory of Heterogeneous Dielectrics to Low Surface Area Soil Systems". *IEEE Trans. Geosci. Electron.*, vol. 11, pàg. 167-170.

Pearson, R.K., 1990. "Microstructural Effects in Capacitive Composition Measurements". *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 39, núm. 2, pàg.421-423, abril.

Pelton, W.H. i altres, 1978. "Mineral Discrimination and Removal of Inductive Coupling with Multifrequency IP". *Geophysics*, vol. 43, pàg. 588-609, abril.

Pethig, R., 1979. *Dielectric and Electronic Properties of Biological Materials*. John Wiley and Sons, Chichester.

Piwinskii, A.J. i Weed, H.C., 1976. "A Study of Rock-Solution Interaction and Its Effect on Archie's Law". *IEEE Trans. Geoscience Electronics*, vol. GE-14, núm. 4, pàg. 221-223, octubre.

Ploeg, J.P.M. van der i Mandel, M., 1991. "A low frequency relative permittivity meter for electrically conducting liquids". *Meas. Sci. Technol.* 2, pàg. 389-395.

Plonsey, R. i Collin, R., 1977. "Electrode guarding in electrical impedance measurements of physiological system-a". *Med. & Biol. Eng. & Comput.*, pàg. 519-527, setembre.

Pollak, V., 1974. "An equivalent diagram for the interface impedance of metal needle electrodes". *Medical and Biological Engineering*, pàg. 454-459, juliol.

Pollak, V., 1974. "Computation of the impedance characteristic of metal electrodes for biological investigations". *Medical and Biological Engineering*, pàg. 460-464, juliol.

Pollak, V., 1974. "Impedance measurements on metal needle electrodes". *Medical and Biological Engineering*, pàg. 606-612, setembre.

Pournaropoulos, C.L. i Misra, D., 1994. "A Study on the Coaxial Aperture Electromagnetic Sensor and Its Application in Material Characterization". *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 43, núm. 3, abril.

Putten, A.F.P. van, 1988. *Electronic Measurement Systems*. Prentice Hall, pàg. 82-87, 91-94,

Nova York.

Quincy, E.A. i Moore, D.F., 1976. "Remote Sensing of an Underground Coal-Burn Cavity with a Wide-Band Induction System". *IEEE Trans. Geosc. Electronics*, vol. GE-14, núm. 4, pàg. 236-243, octubre.

Ragan, G.L., 1965. *Microwave Transmission Circuits*. Dover Publications, Inc., pàg. 304-311, Nova York.

Ramírez, A. i altres, 1993. "Monitoring an Underground Steam Injection Process Using Electrical Resistance Tomography". *Water Resources Research*, vol. 29, núm. 1, pàg. 73-87, gener.

Ramírez, F., 1970. "Evaluación de la corrosión mediante métodos de ensayo no destructivos". *Ingeniería Aeronáutica y Astronáutica*. Año XXII núm. 111 pàg. 27-39, gener-febrer.

Ramírez, F., 1977. *Introducción a los métodos de ensayos no destructivos de control de la calidad*, INTA, Madrid.

Ramo, S., Whinnery, J.R. i Duzer, T. Van, 1965. "Field and Waves in Communication Electronics". John Wiley and Sons, Inc. 2a. ed. 1984, pàg. 333, 623-624, 671.

Rao, J.S. i Das, B.N., 1979. "Analysis of asymmetric strip line by conformal mapping". *IEEE Trans. on Microwave Theory and Technology*, vol. MTT-27, pàg. 299-303, abril.

Richards, M.G.M. i Sheppard, R.J., 1991. "A precision waveguide system for the measurement of complex permittivity of lossy liquids and solid tissues in the frequency range 29 GHz to 90 GHz. II. The liquid system for 90 GHz; high-frequency cell design". *Meas. Sci. Technol.*, vol. 2, pàg. 663-667, febrer.

Ridler, N., 1993. "Improved RF calibration techniques for network analyzers and reflectometers". *Microwave Engineering Europe*, pàg. 35-39, octubre.

Rodier, J. i altres, 1991. *Análisis de las aguas, aguas naturales, aguas residuales, agua de mar*. Ed. Omega, s.a., Barcelona.

Rose, R.M. i altres, 1968. *Propiedades electrónicas*. Colección: *Introducción a la ciencia de materiales*. Limusa-Wiley, s.a. Mèxic.

Roth, K. i altres, 1990. "Calibration of Time Domain Reflectometry for Water Content Measurement Using a Composite Dielectric Approach". *Water Resources Research*, vol. 26, núm. 10, pàg. 2267-2273, octubre.

Ruprecht, J.K. i Schofield, N.J., 1989. "Unsaturated Soil Water Dynamics on a Jarrah Forest Hillslope, Western Australia". *Water Authority of Western Australia*, núm. WS 39, gener.

Ruygrok, P.E., 1988. "Evaluation of the Gamma and Neutron Radiation Scattering and Transmission Methods for Soil Density and Moisture Determination". *American Society for Testing and Materials*, pàg. 3-19.

Sai, J.O. i Anderson, D.C., 1990. "Field Hydraulic Conductivity Tests for Compacted Soil

- Liners". *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, vol. 13, núm. 3, pàg. 215-225, setembre.
- Sarabandi, K., 1994. "A Technique for Dielectric Measurement of Cylindrical Objects in a Rectangular Waveguide". *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 43, núm. 6, pàg. 793-798, desembre.
- Saxena, S.C. i Tayal, G.M., 1981. "Capacitive Moisture Meter". *IEEE Trans. Industrial Electronics and Control Instrumentation*, vol. IECI-28, núm. 1, febrer.
- Scaife, B.K.P., 1989. "Principles of Dielectrics (monographs on the physics and chemistry of materials)". Trinity College, Dublin. Clarendon Press, Oxford.
- Schmugge, T.J., Jackson, T.J. i McKim, H.L., 1980. "Survey of Methods for Soil Moisture Determination". *Water Resources Research*, vol. 16, núm. 6, pàg. 961-979, desembre.
- Schmugge, T.J., 1984. "Effect of Texture on Microwave Emissions from Soils". *IEEE Trans. Geos. Rem. Sens.*, vol. GE-18, núm. 4, octubre.
- Schoenwetter, H.K., 1978. "An RMS Digital Voltmeter/Calibrator for Very-Low Frequencies". *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-27, núm. 3, pàg. 259-268, setembre.
- Schwan, H.P., 1985. "Analysis of Dielectric Data: Experience Gained With Biological Materials". *IEEE Trans. Electrical Insulation*, vol. EI-20 núm. 6, desembre.
- Schwarz, G., 1962. "A Theory of the Low-Frequency Dielectric Dispersion of Colloidal Particles in Electrolyte Solution". *J. Phys. Chem.*, 66, pàg. 2636-2642.
- Slater, N., 1991. *Wire & Cable for Electronics. A User's Handbook*. McGraw-Hill, Inc., Nova York.
- Scott, W.R. i Smith, G.S., 1992. "Measured Electrical Constitutive Parameters of Soil as Functions of Frequency and Moisture Content". *IEEE Transaction on Geos. Rem. Sens.*, vol. 30, núm. 3, pàg. 621-623, maig.
- Seagar, A.D., Barber, D.C. i Brown, B.H., 1987. "Theoretical limits to sensitivity and resolution in impedance imaging". *Clin. Phys. Physiol. Meas.*, vol. 8, Suppl. A, pàg. 13-31.
- Selig, E.T. i Mansukhani, S., 1975. "Relationship of Soil Moisture to the Dielectric Property". *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, vol. 101, núm. GT8, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, pàg. 755-770, agost.
- Sen, P.N., 1981. "Dielectric anomaly in inhomogeneous materials with application to sedimentary rocks". *Appl. Phys. Lett.*, vol. 39 (8), pàg. 667-668, 15 d'octubre.
- Shutko, A.M. i Reutov, E.M., 1982. "Mixture Formulas Applied in Estimation of Dielectric and Radiative Characteristics of Soils and Grounds at Microwave Frequencies". *IEEE Trans. Geos. Rem. Sens.*, vol. GE-20, núm. 1, pàg. 29-32, gener.
- Sihvola, A.H. i Kong, J.A., 1988. "Effective Permittivity of Dielectric Mixtures". *IEEE Trans. Geos. Rem. Sens.*, vol. 26, núm. 4, juliol.

- Smith, G.S. i Nordgard, J.D., 1985. "Measurement of Electrical Constitutive Parameters of Materials Using Antennas". IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol. AP-33, núm. 7, pàg. 783-792, juliol.
- Smith, S.S. i Arulanandan, K., 1981. "Relationship of Electrical Dispersion to Soil Properties" Journal of the Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, vol. 107, núm. GT5, maig.
- Solymar, L. i Walsh, D., 1984. Lectures on the Electrical Properties of Materials. Oxford University Press, Oxford.
- Stogryn A., 1971. "Equations for calculating the dielectric constant of saline water". IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, vol. MTT-19, pàg. 733-736, agost.
- Straub, A., 1994. "Boundary Element Modeling of a Capacitive Probe for in Situ Soil Moisture Characterization". IEEE Transaction on Geos. Rem. Sens., vol. 32, núm. 2, pàg. 261-266, maig.
- Strassberg, D., 1993. "Time-Domain Reflectometry. In >50-MHz digital design, measurements are a must". EDN, pàg. 65-74, 19 agost.
- Streetman, B.G., 1990. Solid State Electronic Devices. Prentice-Hall, Inc., 3a ed., capítol 3, pàg. 53-95.
- Stuchly, M.A., Athey, T.W., Samaras, G.M. i Taylor, G.E., 1982. "Measurement of Radio Frequency Permittivity of Biological Tissues with an Open-Ended Coaxial Line: Part II - Experimental Results". IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, vol. MTT-30, núm. 1, pàg. 87-92, gener.
- Stuchly, M.A. i altres, 1982. "Equivalent Circuit of an Open-Ended Coaxial Line in a Lossy Dielectric". IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. IM-31 núm. 2, pàg. 116-119, juny.
- Stuchly, M.A. i Stuchly, S.S., 1980. "Coaxial Line Reflection Methods for Measuring Dielectric Properties of Biological Substances at Radio and Microwave Frequencies - A Review". IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. IM-29, núm. 3, pàg. 176-183, setembre.
- Sun, H.H. i Onaral, B., 1983. "A Unified Approach to Represent Metal Electrode Polarization". IEEE Trans. Biomed. Eng., vol. BME-30, núm. 7, pàg. 399-406, juliol.
- Sun, H.H. i altres, 1984. "Linear Approximation of Transfer Function with a Pole of Fractional Power". IEEE Trans. Automatic Control, vol. AC-29, núm. 5, pàg. 441-444, maig.
- Sun, H.H., Wang, X. i Onaral, B., 1988. "Onset of Nonlinearity in Fractal Dimension Systems: An Application to Polarized Bioelectrode Interfaces". Annals of Biomedical Engineering, vol. 16, pàg. 111-121, Pergamon Press, Filadèlfia.
- Sunde, E.D., 1968. Earth Conduction Effects in Transmission Systems. Dover Publications, Inc., Nova York. Versió corregida de l'original publicat per D. Van Nostrand Company Inc. el 1949. Part del capítol III, Resistance of Grounding Arrangements, pàg. 66-80.
- Suzuki, K., 1991. "A New Universal Calibration Method for Four Terminal-Pair Admittance

Standards". IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 40, núm. 2, pàg. 420-422, abril.

Suzuki, K., Aoki, T. i Yokoi, K., 1993. "A Calibration Method for Four-Terminal-Pair High-Frequency Resistance Standards". IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 42, núm. 2, pàg. 379-384, abril.

Sydenham, P.H. (ed.), 1982. Handbook of measurement science. Vol. 1: Theoretical Fundamentals. Vol. 2: Practical Fundamentals. John Wiley & Sons Ltd., Londres.

Taréiev, B.M., 1978. Física de los materiales dieléctricos. Ed. Mir, Moscou.

Telford, W.M. i altres, 1990. Applied Geophysics. Capítol 8, Cambridge University Press., Cambridge.

Thompson, A.M., 1959. "The Cylindrical Cross-Capacitor as a Calculabe Standard". The Institution of Electrical Engineers, article núm. 2887 M, pàg. 307-310, maig.

Thomas, H.R. i Rees, S.W., 1990. "Modeling Field Infiltration into Unsaturated Clay". Journal of Geotechnical Engineering, vol. 116, núm. 10, ASCE, pàg. 1483-1501, octubre.

Tinga, W.R. i altres, 1973. "Generalized approach to multiphase dielectric mixture theory". J. Appl. Phys., vol. 44, núm. 9, setembre.

Tobazéon, R., 1984. Techniques de l'ingénieur, 6. "Liquides diélectriques", pàg. D 224 a-1, D 225,1-9.

Topp, G.C., Davis, J.L. i Annan, A.P., 1980. "Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurement in Coaxial Transmission Lines". Water Resources Research, vol. 16, núm. 3, pàg. 574-582, juny.

Topp, G.C., Yanuka, M., Zebchuk, W.D. i Zegelin, S., 1988. "Determination of Electrical Conductivity Using Time Domain Reflectometry: Soil and Water Experiments Coaxial Lines". Water Resources Research, vol. 24, núm. 7, pàg. 945-952, juliol.

Toth, F.N., Bertels, D. i Meijer, G.C.M., 1995. "A Low-Cost, Highly Stable Reference Capacitor For Capacitive Sensor Systems". IEEE, Instr./Meas. Techn. Conf. Proceedings, pàg. 412-415, abril.

Toth, F.N., Meijer, G.C.M. i Kerkvliet, H.M.M., 1995. "Ultra-linear, low-cost measurement system for multi-electrode pF-range capacitors". IEEE, Instr./Meas. Techn. Conf. Proceedings, pàg. 512-515, abril.

Tran, S.M. i McPhun, M.K., 1981. "Obtaining Unique Solutions to Hanai's Equation as Used in Wobschall's Semidiscrete Model of Moist Soil". IEEE Trans. Geos. Rem. Sens., vol. GE-19, núm. 1, pàg. 69-70, gener.

Treitel, S. i Robinson, E.A., 1977. "Deconvolution - homomorphic or predictive". IEEE Trans. Geoscience Electronics, vol. GE-15, núm. 1, pàg. 11-13, gener.

Vlack, L.H. Van, 1964. Physical ceramic for engineers. Adison-Wesley, Nova York.

Varma, R. i Selman, J.R. (ed.), 1991. Techniques for characterization of electrodes and electrochemical processes. John Wiley & Sons, Inc., Nova York.

Verbrugge, J.C., 1978. "Emploi d'une méthode psychrométrique dans des essais triaxiaux sur un limon rema". Can. Geotech. J., vol. 15. National Reseach Council of Canada, pàg. 501-509.

Wait, J.R., 1983. "A simple view of i.p. influence in an inductive e.m. prospecting system". IEEE Trans. Geos. Rem. Sens., vol. GE-21, núm. 4, pàg. 505-506, octubre.

Wait, J.R., 1983. "Resistivity response of a homogeneous earth with a contained vertical conductor". IEEE Trans. Geos. Rem. Sens., vol. GE-21, núm. 1, pàg. 109-113, gener.

Wait, J.R., 1982. "Electromagnetic Response of a Medium Loaded with Coated Conductive Particles". IEEE Trans. Geos. Rem. Sens., vol. GE-20, núm.4, octubre.

Walker, C.S., 1990. Capacitance, Inductance and Crosstalk Analysis. Artech House, Inc., Boston.

Wang, J.R. i Schmutge, T.J., 1980. "An Empirical Model for the Complex Dielectric Permittivity of Soils as a Function of Water Content". IEEE Trans. Geos. Rem. Sens., vol. GE-18, núm. 4, pàg. 288-295, octubre.

Wang, J.R., 1980. "The Dielectric properties of soil-water mixtures at microwave frequencies". Radio Science, vol. 15, núm. 5, pàg. 977-985, setembre-octubre.

White, D.R. i Clare, J.F., 1992. "Instrument Science and Technology. Noise in measurements obtained by sampling". Meas. Sci. Technol. vol. 3, pàg. 1-16.

Whittington, H.W. i Wilson, J.G., 1986. "Low-frequency electrical characteristics of fresh concrete". IEE Proceedings, vol. 133, Pt.A, núm. 5, pàg. 265-271, juliol.

Wilson, J.G. i Whittington, H.W., 1990. "Variations in the electrical properties of concrete with change in frequency". IEE Proceedings, vol. 137, Pt.A, núm. 5, pàg. 246-254, setembre.

Whinnery, J.R., Jamieson, H.W. i Robbins, T.E., 1944. "Coaxial-line discontinuities". IRE Proceedings, pàg. 695-709, novembre.

Wobschall, D., 1977. "A Theory of the Complex Dielectric Permittivity of Soil Containing Water: The Semidisperse Model". IEEE Trans. Geoscience Electronics, vol. GE-15, núm. 1, pàg. 49-58, gener.

Wobschall, D., 1978. "A frequency shift dielectric soil moisture sensor". IEEE Trans. Geoscience Electronics, vol. GE-16, núm. 2, pàg. 112-118, abril.

Wylie, C.R., 1982. Matemáticas superiores para ingeniería. Cuarta ed. (2a en castellà), traducció de J. Hernán Pérez Castellanos de l'original Advanced Engineering Mathematics, 1975, Mc Graw Hill, México.

Xu, Y. i Bosisio, R.G., 1993. "Analysis of Different Coaxial Discontinuities for Microwave Permittivity Measurements". IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 42, núm. 2, abril.

Yates, J., 1996. "Conductivity Measurement". *Measurements & Control*, núm. 176, pàg. 127-130, abril.

Yee, K.S., 1966. "Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media". *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. AP-14, núm. 3, maig, pàg. 302-307.

Yokogawa-Hewlett-Packard, 1987. Operation and service manual, 4191A RF Impedance Analyzer, Tokio.

Yong, R.N. i Hoppe, E.J., 1989. "Application of electric polarization to contaminant detection in soils". *Can. Geotechn. J.*, vol. 26, pàg. 536-550.

Zonge, K.L. i Wynn, J.C., 1975. "Recent Advances and Applications in Complex Resistivity Measurements". *Geophysics*, vol. 40, núm. 5, pàg. 851-864, octubre.

Annex I Permittivitat

En el present annex s'analitzen les propietats dels dielèctrics sota la influència d'un camp elèctric. L'interès en l'anàlisi d'aquestes propietats és veure l'origen físic de la permittivitat o constant dielèctrica ja que es tracta d'un paràmetre fonamental per determinar la humitat de sòls mitjançant la mesura d'impedància elèctrica.

La llei de Gauss diu que el flux elèctric (Φ) és la integral del vector desplaçament elèctric,

$$\Phi = \iint D \, dS \quad (\text{I.1})$$

on

$$D = \varepsilon E$$

i ε és un factor de conversió fonamental entre D (desplaçament elèctric, densitat de flux elèctric, de dimensions $[C/m^2]$) i E (camp elèctric, intensitat de camp, *electric field strength*, de dimensions $[V/m=N/C]$). D s'interpreta com la combinació lineal d' E i P (vector polarització) i representa l'equivalent a la llei de Gauss en presència de càrregues de polarització, [Feynman, 1972, pàgs. 10-8,9],

$$\Delta \left(E + \frac{P}{\varepsilon_0} \right) = \frac{\rho_{lliure}}{\varepsilon_0} \quad (\text{I.2})$$

on ρ_{lliure} és la densitat de càrrega que es pot moure i ε_0 la permittivitat en el buit. Si no es diu el contrari, es suposen dielèctrics isotròpics i homogenis. La permittivitat relativa és defineix com la relació $\varepsilon_r = \varepsilon / \varepsilon_0$. Si la cèl·lula de mesura és un condensador, la ε_r és la relació entre capacitats de la cèl·lula quan conté el material i quan és buida $\varepsilon_r = C / C_{buit}$.

La polarització es relaciona amb la densitat superficial de càrregues lligades en el material dielèctric,

Els mecanismes de polarització a nivell microscòpic, que anomenem (α), es deuen

$$P = \varepsilon_0 (\varepsilon_r - 1) E \quad (\text{I.3})$$

als diferents tipus de partícules. A nivell atòmic, la polaritzabilitat esdevé per un núvol d'electrons desplaçat per l'efecte del camp elèctric. A nivell molecular, un terme suplementari de polarització esdevé pel desplaçament relatiu dels centres de càrrega positiva i negativa de la molècula poliatòmica, i un altre terme suplementari de polarització orientacional que fou estudiat per Langevin [Hasted, pàg. 6]. Finalment, a nivell supramolecular, apareix un terme de polarització per càrrega d'espai atesa la presència del camp elèctric,

$$\alpha \Leftrightarrow P = N E \sum \alpha_i \quad (\text{I.4})$$

Els diferents tipus de polarització es descriuen a [Rose, 1968, pàgs. 263-267], [Hippel, 1954 a, pàgs. 18-21], [Askeland, 1987, pàgs. 421-433], [Kobranova, 1989, pàgs. 112-120] i de forma molt resumida a [Flinn, 1989, pàgs. 652-664].

La interacció elèctrica de partícules properes en sòlids i líquids fa que el camp intern i extern no coincideixin. Aquest fet porta tota una sèrie d'estudis que tracten d'esbrinar quin camp elèctric envolta cadascun dels dipòls. L'anomenat camp de Lorentz, [Albella, 1993, pàgs. 58-61] [Feynman, 1972, pàgs. 11-6-11], mostra el valor del camp a l'interior d'un material,

$$E_i = E + \frac{P}{3 \varepsilon_0} \quad (\text{I.5})$$

Quan és un dielèctric elemental (constituït per un sol tipus d'àtoms on es contempla la polaritzabilitat electrònica α_e), E_i és el camp trobat per Lorentz que dona lloc a l'equació de Clausius-Mosotti, [Barrow, 1972, pàgs. 297-301], [Hasted, 1973, pàgs. 11,12]

$$\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} = \frac{N \alpha_e}{3 \varepsilon_0} \quad (\text{I.6})$$

Tanmateix, aquesta fórmula no és massa exacta per a líquids densos ja que la constant dielèctrica és funció de la intensitat de camp, i per a camps elevats l'aigua lligada presenta fenòmens no lineals o de saturació. Resulta que

$$\varepsilon_{H_2O} \approx 80 \Big|_{E=100 \text{ V/m}} \quad (\text{I.7})$$

i en canvi,

$$\varepsilon_{H_2O} \approx 20 \Big|_{E=1MV/m}$$

Si el camp elèctric aplicat és prou petit, la polaritzabilitat de les molècules d'aigua a temperatures i pressions normals equival a una constant dielèctrica relativa de 80 aproximadament. Hasted, (1973) [pàg. 12] identifica la permitivitat de l'aigua a camps elevats amb el mateix valor numèric que la del gel.

Bogoróditski, (1979) [pàgs. 21-25] classifiquen els tipus fonamentals de polarització dels dielèctrics (a freqüències electrotècniques habituals) en dos:

- instantània, elàstica i sense dissipació d'energia: electrònica (amb temps de relaxació de 10^{-15} s) i iònica (10^{-13} s)
- de relaxació, no instantània i amb dissipació d'energia: la resta, que es caracteritza pel temps de relaxació: orientacional i per càrrega d'espai o migració.

La polaritzabilitat electrònica depèn de la freqüència. Hippel, (1995) [pàg. 101] modela el sistema atòmic (nucli-electrons) com un oscil·lador lineal harmònic de segon ordre amb un desplaçament en la direcció de l'eix x del seu equilibri en una quantitat x_0 . En absència de fregament, l'electró descriu una oscil·lació sostinguda a una freqüència de ressonància $\omega_0 = \sqrt{a/m}$ on a és la constant de proporcionalitat entre força i desplaçament, i m és la massa de l'electró. A més, cal incloure un factor de pèrdues ($2b$) en el model mecànic de 2on ordre,

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -a x - 2b \frac{dx}{dt} \quad (I.8)$$

on

$$2b = \frac{\mu_0 e^2 \omega_0^2}{6 \pi m c}$$

Aquí, c és la velocitat de la llum i e la càrrega de l'electró, [Feynman, 1972, pàg. 11-3]¹. La polaritzabilitat esdevé variable complexa,

$$\alpha_e^* = \alpha_e' - j \alpha_e'' \quad (I.9)$$

¹ Molts autors designen el factor de fregament $2b$ amb el símbol 2α amb el perill de confusió amb la polaritzabilitat.

on el terme (α_e) representa l'absorció d'energia i compleix la relació de Cauchy-Riemann per a variable complexa. La polarització iònica i la orientacional (Boltzmann, Langevin) admeten un raonament semblant. A fi de comptes, l'equació de Clausius-Mosotti 6, vàlida per a sòlids no polars estesa a variable complexa, queda així

$$\frac{\varepsilon_r^* - 1}{\varepsilon_r^* + 2} = \frac{N}{3 \varepsilon_0} (\alpha_e^* + \alpha_i^*) \quad (\text{I.10})$$

Quan la longitud d'ona del camp elèctric (λ) és comparable a les dimensions atòmiques, no és possible una descripció macroscòpica del camp, perd sentit la distinció metall-dielèctric i la polarització no segueix les variacions del camp, (ε_r tendeix a 1), [Landau, 1975, pàg. 298].

La funció continua de variable complexa ε_r^* varia amb la freqüència del senyal de camp. Molts cops, interessa escombrar en freqüència, i la transformada de Fourier o la seva inversa són les eines que ofereixen una interpretació física en els dos dominis, físic i transformat [Varma, 1991, pàg. 586], [Nastuk, 1963, pàg. 327], [Rose, 1968, pàg. 275].

Es pot definir D com [Landau, 1975, pàg. 297]:

$$D(t) = E(t) + \int_0^\infty f(\tau) E(t-\tau) d\tau \quad (\text{I.11})$$

on es separa $E(t)$ per a que $f(\tau)$, funció de convolució que conté informació de la polaritzabilitat, no tingui una singularitat a l'origen. Així, per analogia amb electrostàtica, la permitivitat és un operador integral lineal. Si es realitza una transformació de Fourier resulta

$$D(\omega) = \varepsilon(\omega) E(\omega) \quad (\text{I.12})$$

on

$$\varepsilon(\omega) \triangleq 1 + \int_0^\infty f(\tau) e^{j\omega\tau} d\tau$$

D'altra banda, $\varepsilon(\omega)$ a compleix unes relacions entre les parts reals i imaginàries, sempre que la relació entre material i camp aplicat sigui causal, lineal i estable. Aquestes relacions les interpretaren H.A. Kramers i R. de L. Krönig en 1926 [Landau, 1975, pàg. 309], [Macdonald, 1987, pàg. 154], [Varma, 1991, pàg. 571], [Hasted, 1973, pàg. 17] i són conseqüència de les relacions de Cauchy-Riemann de variable complexa [Balabanian, 1972, pàgs. 420-425].

Un camp elèctric E constant des de temps menys infinit, que en l'instant $t=0$ deixa d'aplicar o aplica a un material crea un canvi de polarització respectiu,

$$P_0(t) = P_0 e^{-t/\tau} \quad (\text{I.13})$$

o

$$P_0(t) = P_0 (1 - e^{-t/\tau})$$

on el tractament clàssic en sòlids o líquids considera molècules polars que es mouen en un medi de molta fricció,

$$\frac{d P_0(t)}{d t} = -\frac{P_0}{\tau} e^{-t/\tau} = \frac{P_0(\infty) - P_0(t)}{\tau} \quad (\text{I.14})$$

on

$$P_0(\infty) = \varepsilon_0 (\varepsilon_r - 1) E_0 \cos(\omega t)$$

i

$$\tau = \frac{h}{k T} e^{\frac{\Delta S^*}{R} - \frac{\Delta H^*}{k T}}$$

Aquí, E_0 és l'amplitud del camp aplicat, h és la constant de Plank, k és la constant de Boltzmann, R és la constant dels gasos ideals, ΔS^* és l'entropia molar i ΔH^* és l'entalpia molar, [Hasted, 1973, pàg. 20]. D'aquesta manera, el desfasatge entre orientació dipolar i camp aplicat esdevé una pèrdua d'energia (escalfor). Llavors, una representació de la constant dielèctrica mitjançant variable complexa és

$$\varepsilon_r^* = \varepsilon_r' - j \varepsilon_r'' \quad (\text{I.15})$$

La pèrdua d'energia ve donada per

$$W(t) = \frac{I}{2 \pi} \int_0^{2\pi} J(t) E(t) d(\omega t) \quad (\text{I.16})$$

on

$$J(t) = \frac{d D(t)}{d t}$$

$W(t)$, l'energia dissipada en forma d'escalfor, no és nul·la i la densitat de corrent i camp elèctric ja no estan en quadratura.

L'equació 14 porta a les fórmules de dispersió de Debye, on el temps per

arribar a l'orientació d'equilibri és el temps de relaxació [Rose, 1968, pàg. 267], [Solymar, 1984, pàg. 268-269],

$$\varepsilon = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + j \omega \tau} \quad (\text{I.17})$$

si es considera només una relaxació. ε_{∞} és la permitivitat a freqüències molt superiors a les del marge de relaxació i ε_s ho és a freqüències molt més baixes. Taréiev, (1978) [pàg. 167] dedueix un valor de la constant de temps τ per a un cas particular de molècula.

Alguns autors fan una equivalència mecànica (massa-fregament) elèctrica (R-C) [Foster, 1989] amb les mateixes expressions matemàtiques.

Cole-Cole ajusten experimentalment la fórmula de Debye pel cas de que es produeixi més d'una relaxació properes en freqüència (models de petites esferes en temps lleugerament diferents). El seu model és

$$\varepsilon = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{(1 + j \omega \tau)^{\beta}} \quad (\text{I.18})$$

on $\beta \in (0,1]$

Si es treballa en el domini temporal en comptes del domini freqüencial, s'arriba als mateixos resultats [Hasted, 1973, pàg. 20], on es calcula la transformada de Fourier canviada de signe de la resposta impulsional $\mathcal{O}(t)$.

Finalment, quan es consideren les pèrdues elèctriques en un dielèctric, cal tenir també en compte la conductivitat del material en contínua i l'existència de fenòmens de dispersió de la conductivitat [Hasted, 1973, pàg. 29], que es poden descriure mitjançant una permitivitat elèctrica complexa relativa modificada,

$$\varepsilon_r^* = \varepsilon_r' - j \varepsilon_r''_{total} = \varepsilon_r' - j \left(\varepsilon_r'' + \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \right) \quad (\text{I.19})$$

$$\sigma^* = j \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r^*$$

De tota manera, a freqüències baixes és més senzill expressar el terme dissipatiu com σ en comptes de com ε'' ja que presenta una singularitat a l'origen. En canvi, a freqüències altes les propietats dielèctriques dels materials són més rellevants.

Annex II Expressions de la llei d'Archie per a diferents tipus de roques

Les lleis d'Archie són relacions empíriques entre la resistivitat d'una roca (ρ), la resistivitat de l'electròlit allotjat en els seus porus (ρ_w) i la seva fracció de volum (Φ) suposat el sòl saturat. Reproduïm diversos valors segons els tipus de roques, [Parkhomenko, 1967, pàg. 277].

Sòls poc cimentats com sorres i algun llims amb porositats compreses entre el 25 i 45%

$$\frac{\rho}{\rho_w} = 0,9 \phi^{-1,4} \quad (\text{II.1})$$

Sòls sedimentaris mitjanament cimentats a base de sorres i llims amb porositats compreses entre el 18 i 35%

$$\frac{\rho}{\rho_w} = 0,6 \phi^{-1,7} \quad (\text{II.2})$$

Sòls molt cimentats amb porositats entre el 5 i 25%

$$\frac{\rho}{\rho_w} = 0,6 \phi^{-2,0} \quad (\text{II.3})$$

Roques volcàniques amb porositats en el marge del 20 al 80%

$$\frac{\rho}{\rho_w} = 3,5 \phi^{-1,4} \quad (\text{II.4})$$

Sòls poc porosos (menys del 5%) que inclouen roques ígnies i sedimentàries metamòrfiques

$$\frac{\rho}{\rho_w} = 1,4 \phi^{-1,6} \quad (\text{II.5})$$

Annex III Gràfiques d'errors en la caracterització de dielèctrics amb pèrdues

El present annex mostra les mesures realitzades amb l'analitzador d'impedàncies hp 4191A i la cèl·lula simètrica petita plena quan utilitza dielèctrics de referència aigua desionitzada o metanol.

Primer determinem la permitivitat relativa d'una solució salina NaCl 0,0154 N i d'una altra 0,01 N, i com dielèctric de referència l'aigua desionitzada, mesurades a 23°C. El resultat es mostra a la figura III.1. A freqüència baixa, la permitivitat relativa és sensiblement inferior a 80 fet que s'explica amb l'anàlisi de l'apartat 3.3.2. La inductància paràsita sèrie i l'apropament a la freqüència de ressonància de la cèl·lula són la causa dels errors a freqüència alta.

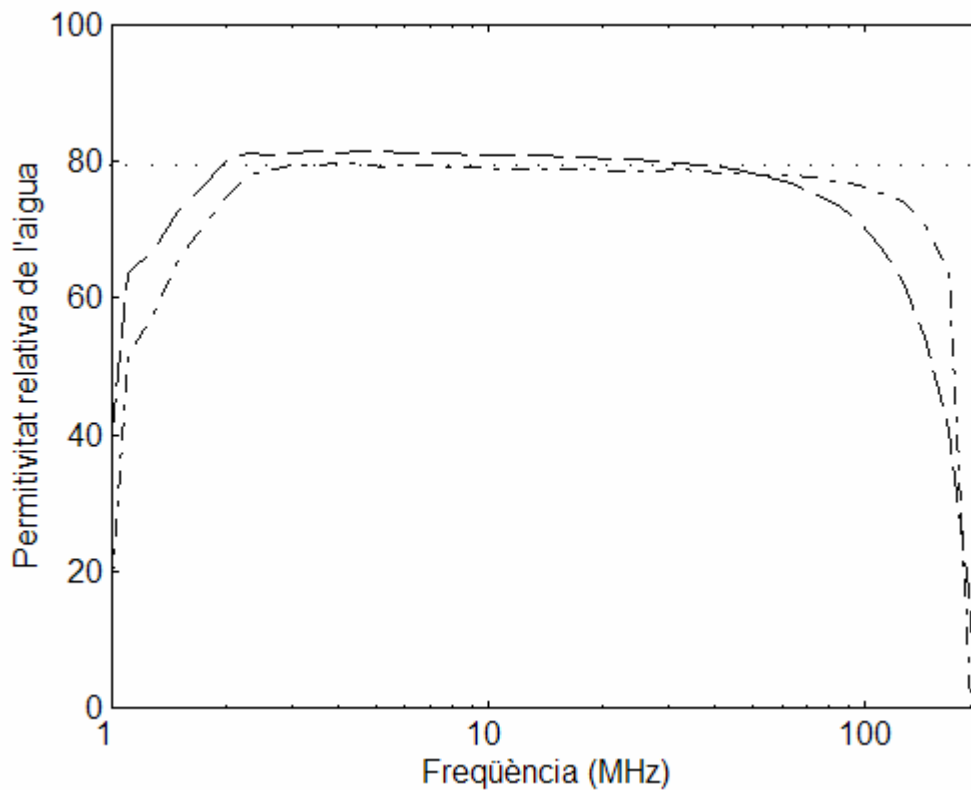


Figura III.1 Permitivitat relativa de les solucions salines NaCl 0,0154 (-) i 0,010 N (--) quan la referència és aigua desionitzada manipulada (amb una conductivitat equivalent a una dissolució NaCl 0,00025 N). El traç puntejat és el valor teòric.

Després determinem la permitivitat relativa de l'etanol usant el metanol com dielèctric de referència. El resultat es mostra a la figura III.2 amb les mateixes consideracions que en el cas precedent.

La relació entre la mesura de la magnitud que es busca i la mesura d'una magnitud de referència propera és la base del mètode de comparació per a cancel·lació d'errors multiplicatius en magnituds escalars. En canvi, la relació entre la mesura de la magnitud que es busca i la mesura d'una magnitud de referència propera "vectorialment" no és suficient per a la cancel·lació d'errors multiplicatius en magnituds vectorials com s'ha demostrat en l'apartat 3.3.2. Propera "vectorialment" significa que són semblants tant les parts reals com les parts imaginàries, o de forma alternativa, els mòduls i les fases, de la magnitud que es busca i de la magnitud que s'usa com a referència. Si els errors associats

a les parts reals i a les parts imaginàries de les mesures no són estrictament iguals, vegeu equacions 3.9 i 3.12, la mesura de la part real distorsiona el resultat de la part imaginària.

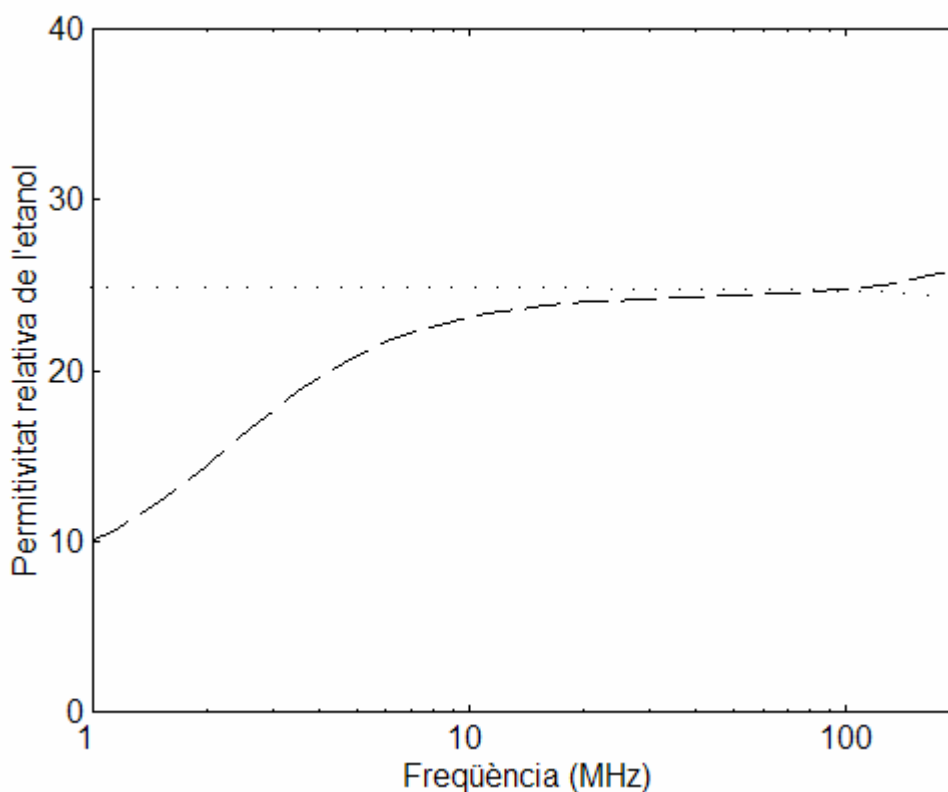


Figura III.2 Permitivitat relativa de l'etanol quan la referència és metanol. El traç puntejat és el valor teòric.

A més, cal afegir problemes pràctics d'instrumentació a les mesures presentades. S'ha esmentat en l'apartat 4.2.3 que l'exactitud dels analitzadors d'impedàncies tipus l'hp 4191A són funció del valor de la impedància que es mesura. La impedància d'una cèl·lula capacitiva, com la cèl·lula simètrica petita, varia en un escombrat de freqüències. Tot i un disseny acurat de la cèl·lula, l'error és major en els extrems de la banda i aquests errors fan aberrant el resultat del mètode de comparació en magnituds vectorials per la diferència de valors de mesura entre parts real i imaginària, o components del vector.

Annex IV Fitxes de recollida de dades experimentals

Incloem un model de fitxa registre utilitzada per a recollida de dades en aquest treball.

mètode		
mostra tipus		pes
condicionament	aigua	
	criba	
	compactació	
config. elèctrodes		
aparells de mesura		
T_a	HR	T_s
tensió aplicada	frequència	
ϵ_r teòrica	ϵ_r mesurada	cota d'error
$\tan \delta$ teòrica	$\tan \delta$ mesurada	cota d'error
fitxer mesures		data
operari/lloc		
comentaris		

Fitxa 1. Model per al registre de les mesures en el laboratori.

mètode mesura en continua		
mostra tipus llim argilós UPC		pes 400 g
condicionament	aigua aigua (80 g)	
	criba ASTM 16 (1,18 mm)	
	compactació 1,7 g/cm ³	
config. elèctrodes	lv = 59 mm	
aparells de mesura	font d'alimentació i voltímetre	
T_a 25°C	HR 65%	T_s 22°C
tensió aplicada 0,5 V; 10 V	frequència ---	
ε_r teòrica ---	ε_r mesurada ---	cota d'error ---
tan δ teòrica (σ= 1,0 S/m)	tan δ mesurada (σ= 1,0 S/m)	cota d'error ---
fitxer mesures	c:\mesures\dc\llim20.dat	data 7-IX-95
operari/lloc Josep M. Torrents/lab 3a planta edifici C4		
comentaris això és un exemple		

Fitxa 2. Exemple de mesura enregistrada en el model de fitxa anterior.

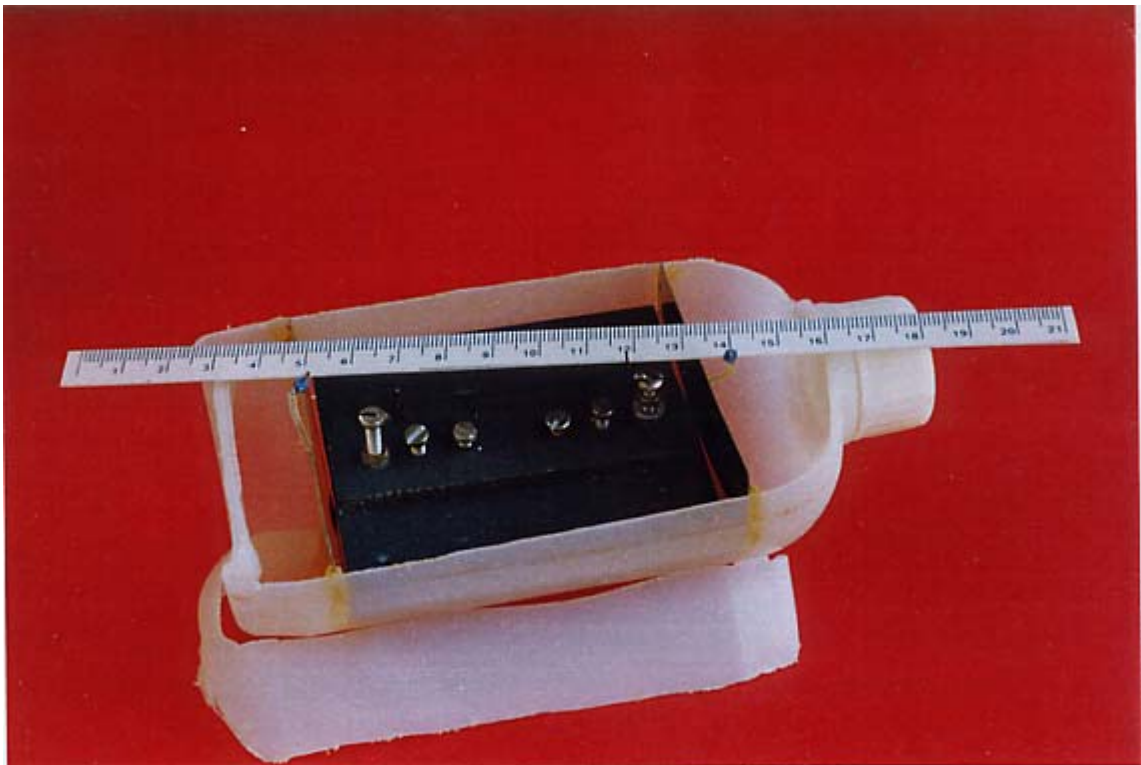
mètode freqüència baixa, condensador amb anell de guarda		
mostra tipus sorra Horstung		pes 200 g
condicionament	aigua 2 %	(ASTM 10 (2,00 mm))
	criba diam= 0,35 mm	
	compactació 1,5 g/cm ³	
config. elèctrodes	t= 4,05 mm, guarda activa	
aparells de mesura	hp 4192A	
T_a 22°C	HR 55%	T_a 20°C
tensió aplicada 1 V _{ef}	frequència 5 Hz - 13 MHz	
ε_r teòrica fen. interfacial	ε_r mesurada fen. interfacial	cota d'error ---
tanδ teòrica fen. inteficial	tanδ mesurada 0,1 - 3,0 S/m	cota d'error ---
fitxer mesures	c:\mesures\fb\horst2.dat	data 7-IX-95
operari Josep M. Torrents Dolz/lab 3a planta edifici C4		
comentaris això és un exemple		

Fitxa 3. Un altre exemple de fitxa amb la mateixa disposició que les anteriors.

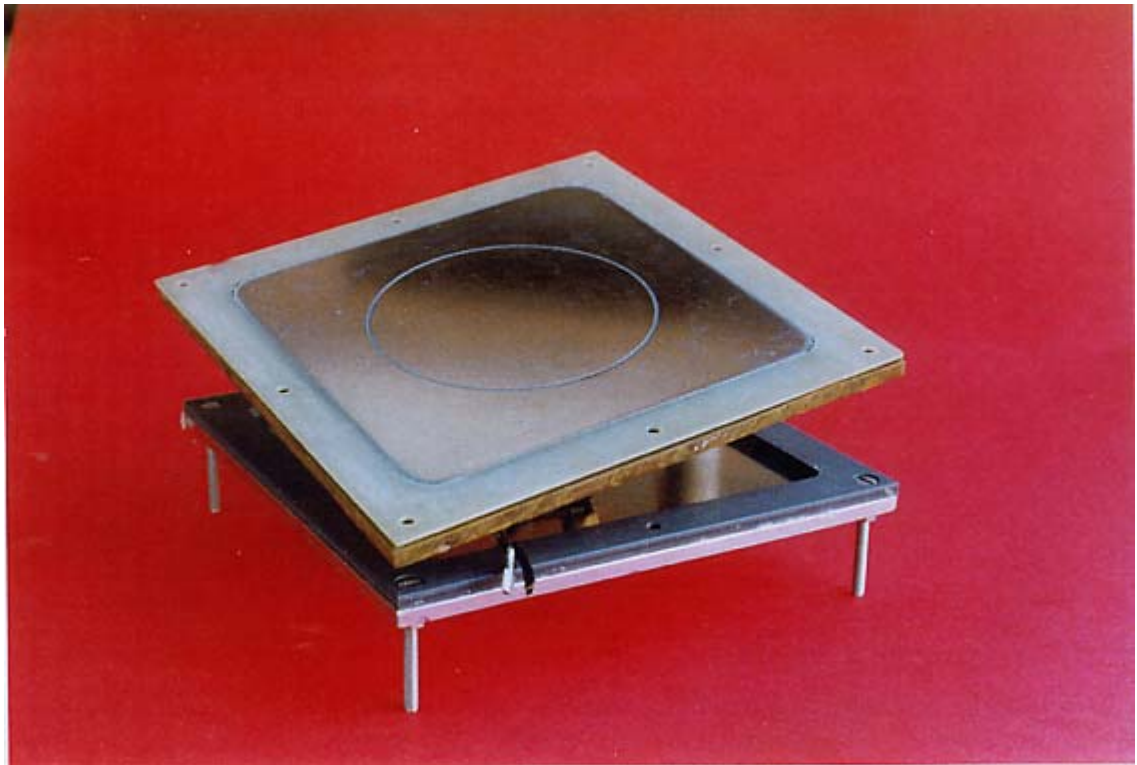
mètode		
mostra tipus		pes
condicionament	aigua	
	criba	
	compactació	
config. elèctrodes		
aparells de mesura		
T_a	HR	T_s
tensió aplicada	frequència	
ϵ_r teòrica	ϵ_r mesurada	cota d'error
tan δ teòrica	tan δ mesurada	cota d'error
fitxer mesures		data
operari/lloc		
comentaris		

Annex V Imatges de les cèl·lules de mesura

Presentem les fotografies de les cèl·lules de mesura. Les dimensions del regle són centímetres.



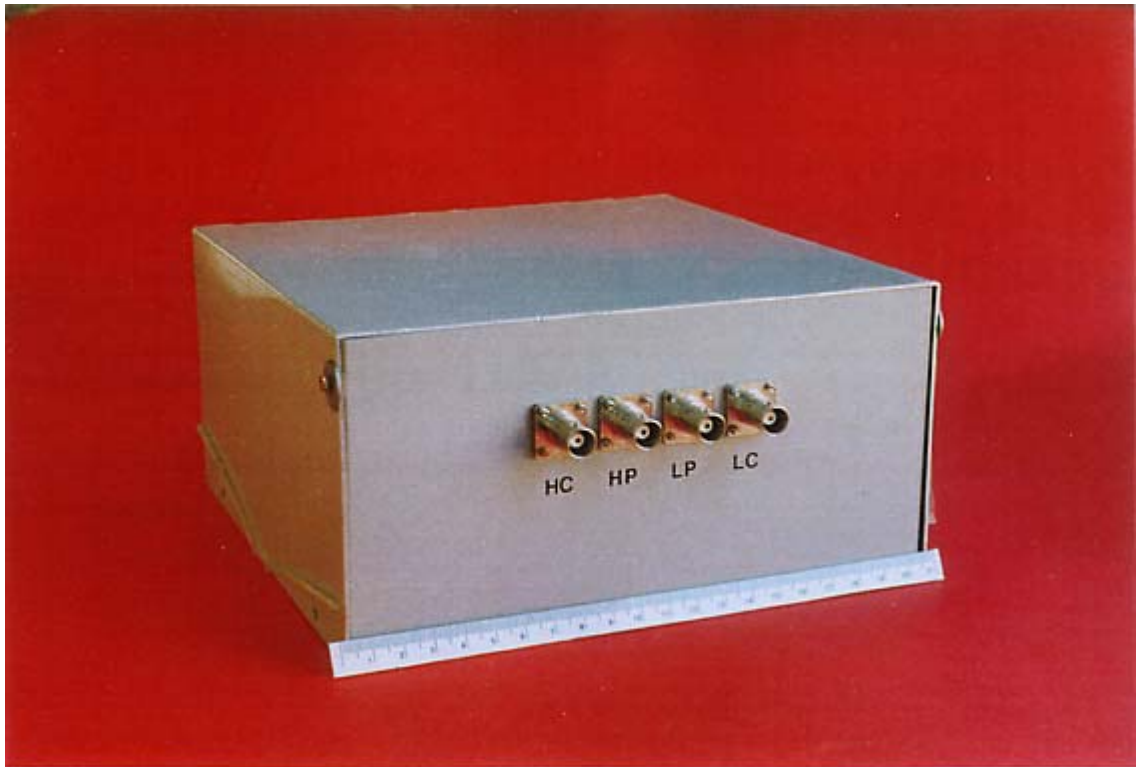
Imatge de la cèl·lula de secció constant per mesurar la conductivitat.



Imatge de la cèl·lula de capacitiva amb guarda. La tapa superior conté l'elèctrode guardat i l'elèctrode de guarda, i s'ha fotografiat invertida per apreciar-ne les parts.



Imatge de la cèl·lula de capacitiva amb guarda. Detall de l'apantallament interior.



Imatge de l'apantallament de la cèl·lula amb guarda i connexions a l'exterior.



Imatge de les cèl·lules capacitiva simètrica petita (esquerra) i una cèl·lula de camp no uniforme.

Annex VI Deducció de les expressions de l'etapa d'entrada prèvia a l'analitzador d'impedàncies hp 4192A

En aquest annex s'analitza el circuit de la figura 4.11 que modela l'esquema de mesura d'impedància amb quatre fils de l'analitzador hp 4192A on s'utilitzen els canals A i B, i s'ha construït una etapa prèvia que consta d'un amplificador d'instrumentació i un conversor corrent-tensió (figura 4.10). S'ha analitzat amb l'ajut del programa Isaac 4.0. El programa MapleV ha ajudat amb les posteriors simplificacions algebraïques.

La primera expressió és la sortida de l'amplificador d'instrumentació, suposant que el guany en mode comú és nul, dividit per la sortida del conversor corrent-tensió i multiplicat per la constant de cèl·lula que dona la impedància mesurada (Z_m),

$$Z_m = \frac{(Z_c Z_{ut} - Z_{e2} Z_{e3} + Z_{e2} Z_{e4} - Z_{e3} R + Z_{e4} R + Z_{e2} Z_{ut} + Z_{e4} Z_{ut} + R Z_{ut}) Z_d Z_c}{Z_d Z_c^2 + Z_{e3} Z_c^2 + Z_{e4} Z_c^2 + Z_{e3} Z_d Z_c + Z_{e4} Z_d Z_c + Z_c^2 Z_{ut} + 2 Z_{e3} Z_{e4} Z_c + Z_{e3} Z_{e4} Z_d}$$

Si suposem una impedància en mode comú (Z_c) infinita, aleshores,

$$Z_m = \frac{Z_{ut} Z_d}{Z_d + Z_{e3} + Z_{e4} + Z_{ut}}$$

Si la impedància d'entrada de l'amplificador d'instrumentació tendeix a infinit el valor mesurat tendeix a Z_{ut} .

Si afegim un CMRR no infinit, aleshores,

$$Z_m = 1/2 (Z_{e4} Z_{ut} Z_d + 2 Z_{e4} Z_c Z_{ut} + Z_c Z_{ut} Z_d + 2 Z_{e2} Z_d Z_c + 2 R Z_d Z_c +$$

$$\begin{aligned}
&+ 2 Ze^4 Ze^2 Zc + 2 Ze^3 Ze^2 Zc + 2 Ze^3 R Zc + 2 Ze^4 R Zc + Ze^4 Ze^2 Zd + Ze^4 R Zd + \\
&+ 2 Zut Ze^2 Zc + Zut Ze^2 Zd + 2 Zut R Zc + Zut R Zd + Ze^2 Ze^3 Zd + Ze^3 R Zd + \\
&+ 2 Zc Zd CMRR Zut - 2 Zd CMRR Ze^2 Ze^3 + 2 Zd CMRR Ze^2 Ze^4 - 2 Zd CMRR Ze^3 R + \\
&+ 2 Zd CMRR Ze^4 R + 2 Zd CMRR Ze^2 Zut + 2 Zd CMRR Ze^4 Zut + 2 Zd CMRR R Zut) Zc
\end{aligned}$$

$$(Zd Zc^2 + Ze^3 Zc^2 + Ze^4 Zc^2 + Ze^3 Zd Zc + Ze^4 Zd Zc + Zc^2 Zut + 2 Ze^3 Ze^4 Zc + Ze^3 Ze^4 Zd) CMRR$$

que coincideix amb l'equació 4.19 de l'apartat 4.2.2.

Annex VII Definicions i relacions físiques entre les fases del sòl

Definicions

-Es defineix humitat (ω) com la relació en tant per cent entre el pes de l'aigua (W_ω) i el pes del sòlid (W_s)

$$\omega = 100 \frac{W_\omega}{W_s} \quad (\text{VII.1})$$

-Es defineix densitat natural (γ_n) com la relació entre el pes total (W_t) i el volum total (V_t)

$$\gamma_n = \frac{W_t}{V_t} \quad (\text{VII.2})$$

-Es defineix pes específic de les partícules (γ_s) com la densitat un cop tretes les fases líquides i gasoses. Aquesta dada es coneix per a cada material i per als sòls més habituals volta 2,7 g/cm³.

-Es defineix índex de porus (e) com el volum del buit o fase fluida dividit pel volum del sòl (sense gens d'aire o aigua)

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (\text{VII.3})$$

-Es defineix grau de saturació (S) com la relació entre el volum d'aigua dividit pel volum del buit

$$S = \frac{V_\omega}{V_v} \quad (\text{VII.4})$$

-Es defineix porositat com la fracció de volum del buit

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (\text{VII.5})$$

on V és el volum total.

Relacions

-Grau de saturació relatiu (quan normalitzem $V_s=1$ i per tant $V=1+e$)

$$S_r = \frac{V_w}{e} \quad (\text{VII.6})$$

-Pes específic del sòl sec (γ_d) –*bulk density*–

$$\gamma_d = \frac{\gamma_n}{1 + \omega} = \gamma_s (1 - n) \quad (\text{VII.7})$$

Exemple

363,0 g d'un sòl de $\gamma_s=2,7 \text{ g/cm}^3$ amb 5% d'humitat confinat en 250 cm^3 , trobeu-ne les característiques.

Solució:

$$\gamma_n = 1,45 \text{ g/cm}^3$$

$$\gamma_d = 1,38 \text{ g/cm}^3$$

$$e = 0,95$$

$$S_r = 0,14$$