

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI
BOLOGNA

Scuola di Ingegneria e Architettura
Sede di Cesena
Corso di Laurea in Ingegneria Biomedica

**Spettroscopia di impedenza per la
misura dell'umidità in applicazioni
“green-bio”**

Elaborato in
Elettronica

Relatore:
Dott. Ing. Marco Crescentini

Candidato:
Chiara Ruva

Correlatori:
Ph. D. Giulia Luciani
Dott.ssa Annachiara Berardinelli
Prof. Luigi Ragni
Prof. Marco Tartagni

Sessione III
Anno Accademico 2015/2016

16 Marzo 2017

*...Alla mia famiglia perché
senza di loro tutto questo
non sarebbe mai stato possibile.*

Abstract

Il presente lavoro di tesi ha l'obiettivo di sperimentare un sensore di nuova concezione basato su una spettroscopia di impedenza complessa a microonde che rileva lo stato di idratazione del terreno, mediante l'uso di una guida d'onda appoggiata su di esso. L'indagine è stata svolta coinvolgendo tre tipologie di terreno e cinque livelli di umidità, su campioni omogenei e su campioni stratificati, utilizzando dei criteri basati sul rimescolamento del terreno e riassetto del dispositivo, al fine di valutare la ripetibilità della misura.

I dati raccolti sono stati utilizzati per la costruzione di modelli statistici in grado di stimare l'umidità con accuratezza. Sebbene queste siano da considerarsi delle prove preliminari ed esplorative, il sistema sembra vantaggioso nella prospettiva di essere implementato successivamente con le opportune migliorie, validando ulteriori indagini su campo.

Indice

Introduzione.....	1
1. Introduzione.....	3
1.1 Campi elettromagnetici	3
1.1.1 Proprietà dielettriche dei materiali	4
1.1.2 Propagazione delle onde elettromagnetiche	9
1.2 Il terreno	13
1.2.1 Il potenziale idrico del terreno	14
1.2.2 Umidità del terreno.....	17
1.2.3 Proprietà dielettriche del terreno	18
1.3 Spettroscopia di impedenza	22
1.4 Tecniche tradizionali per la misura dell'umidità.....	24
1.4.1 Il tensiometro.....	25
1.4.2 Il blocchetto di gesso	26
1.4.3 Il sensore Watermark	26
1.4.4 Sensori TDR.....	27
1.4.5 Sensori FDR	28
2. Materiali e Metodi	30
2.1 Generalità	30
2.2 Strumentazione.....	32
2.2.1 Generazione del segnale.....	33
2.2.2 Guida d'onda rettangolare	33
2.2.3 Rivelatore di guadagno e fase	35
2.2.4 Acquisizione dei dati.....	37

2.3	Piano sperimentale	38
2.3.1	Preparazione dei campioni	38
2.4	Procedura.....	39
2.4.1	Test su Terreno argilloso, Argilla Espansa e Sabbia.....	40
2.4.2	Test su stratificazioni	42
2.4.3	Manipolazione dei dati	44
2.5	Analisi statistica dei dati.....	45
2.5.1	Analisi delle Componenti Principali (PCA).....	45
2.5.2	Analisi della Regressione (PLS)	48
3.	Risultati e Discussione.....	51
3.1	Risultati sui campioni omogenei	51
3.2	Risultati sui campioni eterogenei	60
4.	Conclusioni e Sviluppi futuri.....	63
	Bibliografia	65

Introduzione

Nell'ultimo secolo uno dei fenomeni che ha contraddistinto l'evoluzione della specie umana è l'aumento demografico: tuttavia questo fenomeno necessita, per la sua conservazione e per il suo progresso, l'ottimizzazione di diversi fattori, come l'accesso alle cure mediche o l'alimentazione garantita, che rappresentano una sfida di urgenza immediata. Essere in grado di garantire l'alimentazione al crescente numero di persone è compito non solo dell'agricoltura ma anche delle tecnologie che la supportano: pertanto lo sviluppo di tecniche più avanzate e l'introduzione di nuovi dispositivi più efficienti contribuiscono a migliorare la produttività e la qualità di un settore nevralgico. L'obiettivo di questa tesi è di analizzare e valutare lo sviluppo di un dispositivo innovativo per la misura dell'umidità del terreno, che potrebbe rivelarsi di notevole importanza sia per migliorare le tecniche agricole, sia per risolvere il non indifferente problema ecologico degli sprechi d'acqua d'irrigazione.

Le diverse generazioni di strumenti, alcuni attualmente in commercio, hanno sempre dedotto il contenuto di acqua nel terreno avvalendosi di tecnologie riconosciute ma non per questo prive di problematiche, come il disadattamento alle diverse condizioni climatiche o ai cambiamenti delle caratteristiche del terreno. Sfavorevoli prerogative di questi strumenti sono anche la necessità di una costante manutenzione e la relativa difficoltà di utilizzo.

Il nuovo sistema invece viene concepito con lo scopo di limitare tali problematiche e di realizzare una misura basata su una spettroscopia di impedenza complessa a microonde in grado, mediante una guida d'onda affacciata sul terreno, di compiere un rilevamento non invasivo e di discriminare i diversi livelli di umidità, significativi per ogni tipologia di terreno scelta.

Da questa implementazione, nell'ipotesi che la misurazione riporti dei risultati ottimistici, ci si aspetta di poter valutare, risolvendo il problema dell'aderenza delle sonde comunemente usate, l'umidità presente, anche in diversi livelli di profondità.

Dopo aver fornito una panoramica degli argomenti teorici che sussistono dietro le prove sperimentali, l'elaborato prosegue con un'esposizione delle principali caratteristiche di questo nuovo sistema, dal setup di misura ai trattamenti statistici dei dati (mediante analisi PCA e PLS), delineandone vantaggi e limiti.

La collaborazione interdisciplinare di alcuni docenti partecipanti al progetto ha fatto sì che la presente sperimentazione fosse condotta presso il laboratorio di Ingegneria Alimentare del Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari della facoltà di Scienze degli Alimenti da novembre 2016 a febbraio 2017.

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Campi elettromagnetici

La previsione dell'esistenza delle onde elettromagnetiche costituisce il risultato più importante della Teoria Elettromagnetica ideata da J.C.Maxwell alla fine del secolo scorso. Adottando il punto di vista originariamente introdotto da Faraday, Maxwell attribuì l'interazione a distanza fra corpi carichi, polarizzati o percorsi da corrente ad un particolare stato di sollecitazione prodotto nell' ambiente dagli stessi corpi interagenti. Per descrivere la sollecitazione egli introdusse il "campo elettromagnetico", un'entità teorica di cui definì le leggi su basi puramente fenomenologiche. [1]

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\delta \mathbf{D}}{\delta t} + \mathbf{J}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\delta \mathbf{B}}{\delta t}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0$$

In cui:

$\mathbf{E} = \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ Campo Elettrico

$\mathbf{H} = \mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$ Campo Magnetico

$\mathbf{D} = \mathbf{D}(\mathbf{r}, t)$ Spostamento Elettrico

$\mathbf{B} = \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$ Induzione Magnetica

$\mathbf{J} = \mathbf{J}(\mathbf{r}, t)$ Densità di corrente

$\rho = \rho(\mathbf{r}, t)$ Densità di carica

Il modello di Maxwell pertanto diventa un generale ed efficace strumento per la descrizione di fenomeni del campo elettromagnetico, come la conservazione di carica e di energia.

Tuttavia, nello studio di propagazione è necessario associare alle equazioni di Maxwell ulteriori formule dipendenti dalla natura del mezzo: vengono dette relazioni costitutive

del mezzo e riassumono una molteplicità di fenomeni microscopici di polarizzazione e conduzione, dipendendo a loro volta da un gran numero di parametri.

La formulazione generale è:

$$\mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = \varepsilon(\mathbf{r}, t) \cdot \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) + \mathbf{P}$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \mu(\mathbf{r}, t) \cdot \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) + \mathbf{M}$$

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}, t) = \sigma(\mathbf{r}, t) \cdot \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$$

In cui:

$\varepsilon = \varepsilon(\mathbf{r}, t)$ Permettività elettrica

$\mu = \mu(\mathbf{r}, t)$ Permettività magnetica

$\sigma = \sigma(\mathbf{r}, t)$ Conducibilità elettrica

\mathbf{P} = Polarizzazione elettrica

\mathbf{M} = Polarizzazione magnetica

Il problema fondamentale dell'elettromagnetismo risulta, pertanto, l'analisi dei mezzi di propagazione delle onde e delle loro caratteristiche intrinseche affinché siano delineate esplicitamente e risolte le relazioni costitutive dei mezzi, e si possano, così, modellare al meglio i fenomeni di trasmissione di energia e informazione in forma elettromagnetica. La definizione della reazione di un mezzo materiale ad una sollecitazione elettromagnetica è, innanzitutto, mediata da fenomeni atomici meccanici e termici i quali permettono la suddivisione dei mezzi di propagazione in diverse categorie a seconda delle caratteristiche.

Le caratteristiche intrinseche che, invece, giocano un ruolo principale e deterministico nello studio della propagazione del campo elettromagnetico vengono anche definite "proprietà dielettriche" e sono la permittività elettrica, magnetica e la conducibilità, e generalmente dipendono da fenomeni atomici elettrici e magnetici che modificano la reazione del materiale al campo elettromagnetico.

1.1.1 Proprietà dielettriche dei materiali

Conducibilità e permittività elettrica e magnetica sono le principali proprietà dielettriche dei materiali e, riassumendo fenomeni molecolari elettromagnetici, forniscono valori per la caratterizzazione dei mezzi di trasmissione del campo elettromagnetico.

Per quanto riguarda i fenomeni di magnetismo propagati dal campo, la permittività magnetica è una grandezza fisica che esprime l'attitudine del materiale a magnetizzarsi in presenza di un campo magnetico e viene misurata in henry al metro (H/m). Quasi tutti i mezzi omogenei hanno una permittività magnetica che può essere considerata costante, eccezion fatta per gli altissimi valori delle sostanze ferromagnetiche (minerali come il ferro che potrebbero verosimilmente trovarsi nella composizione del terreno), e vengono suddivisi in diamagnetiche (permittività relativa minore dell'unità) e paramagnetiche (permittività relativa maggiore dell'unità). La permittività magnetica del vuoto è una costante fisica fondamentale di riferimento per i valori relativi dei diversi materiali ed è:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$\mu = \mu_r \mu_0$$

Fondamentalmente, pertanto, la differenza sostanziale tra un materiale ferromagnetico (altissima permittività) e un materiale diamagnetico (bassa permittività) è il grado di polarizzazione magnetica raggiunta dagli atomi a seguito della somministrazione di un campo magnetico: un'alta polarizzazione assicura una propagazione migliore del campo magnetico.

Conducibilità e permittività elettrica interessano, invece, i fenomeni elettrici. La conducibilità è una grandezza fisica che esprime l'attitudine di un materiale ad essere attraversato da corrente elettrica: in termini ohmici si tratta della conduttanza specifica di un mezzo.

La sua formulazione è legata alle caratteristiche del conduttore di corrente elettrica in questione:

$$\sigma = \frac{IL}{SV}$$

I= corrente elettrica

L=tratto conduttore attraversato da corrente

S=sezione conduttore

V=differenza potenziale ai capi del tratto

La conducibilità inoltre, descritta mediante una semplificazione al primo ordine, è altamente influenzata dalla temperatura.

La permittività è invece una grandezza fisica che esprime l'attitudine di un materiale ad immagazzinare carica elettrica qualora sollecitato da un campo elettromagnetico, quindi, in altre parole, il grado di polarizzazione elettrica. La permittività elettrica, infatti, è fortemente legata alla suscettibilità elettrica, una proprietà del materiale che parametrizza la capacità di polarizzarsi una volta sottoposto ad un campo elettrico.

La permittività elettrica del vuoto è una costante fisica fondamentale di riferimento per i valori relativi dei diversi materiali ed è:

$$\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$$

A seconda delle caratteristiche del materiale di cui viene misurata la permittività elettrica, essa viene espressa in forme diverse: qualora il mezzo avesse caratteristiche anisotrope, la sua permittività si rappresenta con un tensore in cui i valori riflettono una descrizione locale dipendente dalle coordinate; solamente, invece, in condizioni di materiale lineare, omogeneo e isotropo tutte le componenti del tensore, avendo lo stesso valore, possono essere annullate e la permittività diviene una caratteristica scalare, chiamata talvolta costante dielettrica.

Sul valore di permittività di un materiale, qualora si tratti di mezzo dispersivo, un parametro che incide sensibilmente è la frequenza del campo elettrico, a tal punto che per alcuni materiali le caratteristiche di propagazione cambiano in modo drastico. Questa dipendenza si descrive mediante una relazione complessa, funzione della frequenza, grazie alla quale è possibile valutare la propagazione del campo elettromagnetico in mezzi dissipativi (cioè a conducibilità finita) o dispersivi.

$$\varepsilon_c = \varepsilon_0 \varepsilon_r + \frac{\sigma}{j\omega} = \varepsilon_0 \left(\varepsilon_r + j \left(-\frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} \right) \right) = \varepsilon_0 (\varepsilon_r' + j\varepsilon_r'')$$

Come si può quindi osservare, il primo termine della permittività complessa rappresenta il valore di permittività elettrica, fornendo informazioni sull'accumulo di energia del materiale attraversato da campo elettromagnetico.

Il secondo termine, espresso in campo complesso, rappresenta un fattore di perdita del mezzo, responsabile della dissipazione. È un termine che dipende dalla conducibilità poiché solo in un mezzo ad alta conducibilità (conduttore) si generano alla propagazione del campo elettromagnetico correnti indotte.

Nella rappresentazione grafica in figura 1.1 è opportuno notare un altro parametro di interesse derivante dal secondo termine della formulazione della permittività complessa: l'angolo che si forma tra il vettore permittività e il vettore parte reale viene chiamato *angolo di perdita* (δ) e la sua tangente misura il comportamento dispersivo del materiale come rapporto tra l'energia persa e l'energia immagazzinata [2] affinché si possa valutare se si tratta di un materiale conduttivo (che riflette completamente il campo magnetico che lo stimola e dissipa energia a causa delle correnti indotte) o dielettrico (che risulta trasparente alla propagazione elettromagnetica ma può immagazzinare energia). Ecco di seguito:

$$\delta = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega}$$

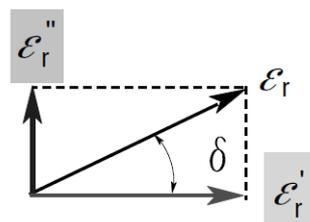


Fig. 1.1 - Diagramma vettoriale della permittività complessa [2].

La permittività è strettamente legata ai fenomeni fisici di *polarizzazione*. Tali fenomeni possono interessare i materiali dielettrici polari, ovvero i materiali costituiti da molecole elettricamente asimmetriche, assimilabili a *dipoli elettrici*, nelle quali possono essere riconosciute due regioni a polarità differenti anche se il materiale è neutro nel suo complesso. In particolare siamo in presenza di un fenomeno chiamato *polarizzazione*

per orientamento (o dipolare) quando, sottoposte le molecole a campo elettrico, i dipoli (normalmente orientati in maniera casuale) tendono ad orientarsi in maniera parallela al campo stesso (vedi figura 1.2).

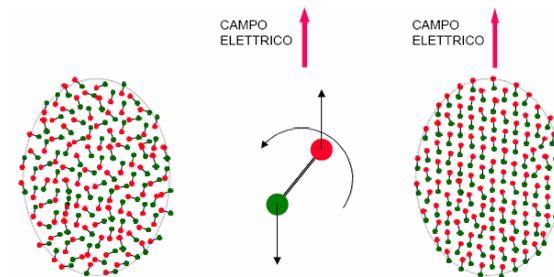


Fig. 1.2 - Rappresentazione della polarizzazione dipolare [3].

L'applicazione del campo elettrico può determinare dispersione di energia sotto forma di calore per effetto dell'agitazione termica dei dipoli costretti a muoversi.

La permittività complessa di un materiale dielettrico tuttavia è data dal contributo totale di più meccanismi dielettrici di polarizzazione a livello microscopico [4] essendo nella formulazione presente un termine di conducibilità. In particolare si riconoscono tre meccanismi fondamentali di polarizzazione: *polarizzazione atomica*, *polarizzazione elettronica*, *polarizzazione ionica*.

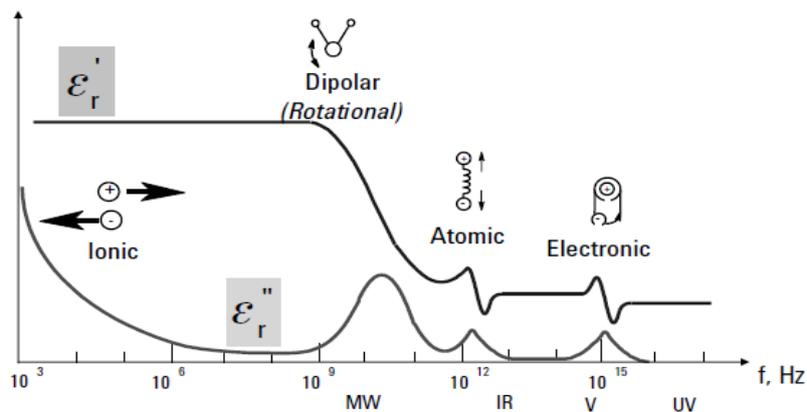


Fig. 1.3 - Spettro in frequenza della permittività elettrica di un generico materiale [2].

Come è evidente dalla figura 1.3, ε' ed ε'' presentano degli andamenti diversi al variare della frequenza e al variare del tipo di meccanismo di polarizzazione per ragioni legate alla struttura interna del materiale. La polarizzazione elettronica e la polarizzazione atomica, per esempio, per molti solidi secchi sono i meccanismi di polarizzazione dominanti a frequenze delle microonde [2] e descrivono rispettivamente l'instaurarsi di un momento di dipolo tra cariche sollecitate da un campo elettrico a livello atomico e tra due atomi a livello molecolare. La polarizzazione ionica invece si manifesta dalle basse frequenze ad una frequenza caratteristica e descrive spostamenti limitati legati a cariche con mobilità debole. Si parla dunque di τ_0 *rilassamento dielettrico*, fenomeno per il quale è associata una costante di tempo che descrive il tempo necessario affinché le cariche ritornino ad orientarsi casualmente dopo la rimozione del campo elettrico [3]. A tal proposito, è opportuno considerare il *modello di Debye* che offre una rappresentazione della permittività in funzione della frequenza esplicitando la parte reale e la parte immaginaria come segue:

$$Re[\varepsilon_r(\omega)] = \varepsilon_r'(\omega) = \varepsilon_r^\infty + \frac{\varepsilon_r^s - \varepsilon_r^\infty}{1 + \omega^2\tau_0^2}$$

$$Im[\varepsilon_r(\omega)] = -\varepsilon_r''(\omega) = -[(\varepsilon_r^s - \varepsilon_r^\infty) \frac{\omega\tau_0}{1 + \omega^2\tau_0^2} + \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}]$$

1.1.2 Propagazione delle onde elettromagnetiche

Una volta studiate e note le proprietà dielettriche dei materiali occorre contestualizzarle nella propagazione di onde elettromagnetiche. Sono, difatti, i parametri principali da considerare poiché indicano il comportamento che assumono le onde mano a mano che incontrano mezzi materiali diversi.

Prima di tutto la propagazione delle onde è spesso studiata tramite la semplificazione delle onde piane: si tratta di un modello introdotto da Helmholtz che, considerando mezzi di trasmissione omogenei, e ponendosi in posizione sufficientemente distante dalla sorgente (campo lontano), è in grado di fornire equazioni separate per il campo

elettrico e per il campo magnetico (considerati perpendicolari tra loro), abbandonando la formulazione di Maxwell in cui non vi è il disaccoppiamento dei contributi.

Così facendo il campo elettromagnetico viene rappresentato tridimensionalmente tramite onde infinite a frequenza costante con piani paralleli infiniti perpendicolari alla direzione di propagazione in cui le onde hanno ampiezza costante.

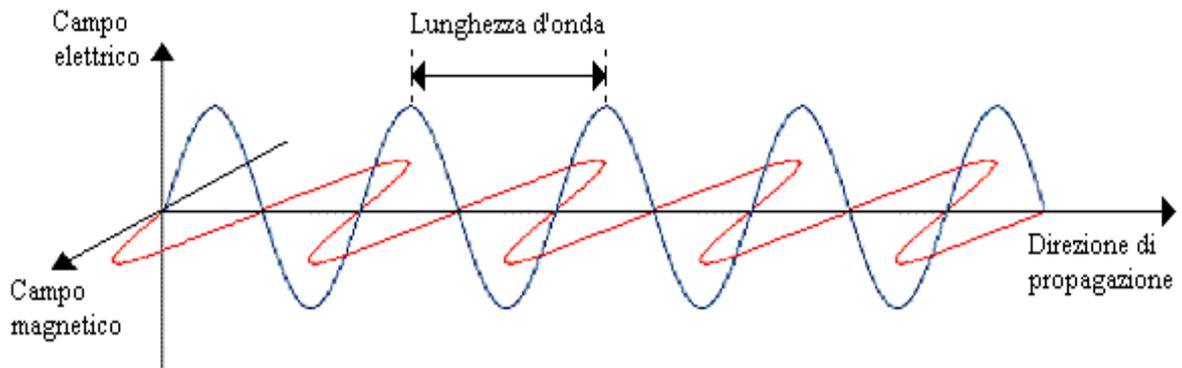


Fig. 1.4 – Propagazione dell'onda elettromagnetica elementare.

Questo modello pertanto fornisce una formulazione sinusoidale che, qualora il mezzo di propagazione non sia il vuoto (o un ottimo dielettrico), presenta un contributo di smorzamento progressivo dipendente esclusivamente dalle caratteristiche dielettriche del materiale:

$$u(z, t) = Ae^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z)$$

$$\alpha = \frac{\omega \sqrt{\epsilon_c \mu}}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\sqrt{1 + \delta^2} - 1}$$

$$\beta = \frac{\omega \sqrt{\epsilon_c \mu}}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\sqrt{1 + \delta^2} + 1}$$

In cui:

A = Ampiezza

α = Costante di Attenuazione ampiezza

β = Costante di Fase

z = direzione propagazione sinusoide

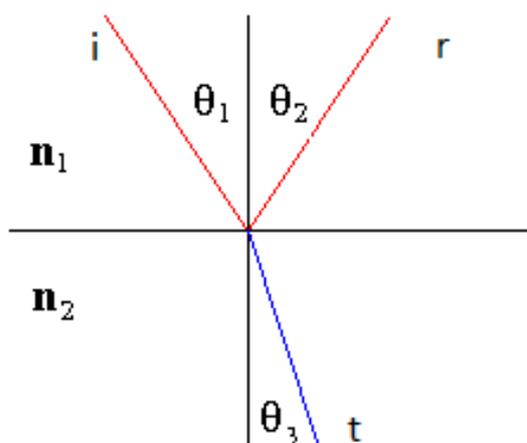
Il modello ad onda piana è utile quindi allo studio della propagazione del campo elettromagnetico, in particolare quando cambiano i mezzi di trasmissione, cioè sono presenti delle discontinuità.

Queste discontinuità sono caratterizzate, qualora i materiali siano diversi, da proprietà dielettriche diverse, pertanto l'onda propagata subirà modifiche proporzionali ai nuovi parametri che, in questo caso, vengono accorpati in costanti diverse:

$$k^2 = -\omega^2 \epsilon_c \mu = \text{costante di propagazione intrinseca del mezzo}$$

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_c}} = \text{impedenza intrinseca del mezzo (nel vuoto circa } 377 \Omega)$$

Generalmente un'onda che incontra una discontinuità, rappresentabile come un'onda incidente ad una superficie, è in parte trasmessa e in parte riflessa a seconda dei coefficienti di trasmissione τ e riflessione ρ , mentre invece le direzioni che prendono queste onde in seguito all'incidenza sul piano di separazione risultano descritte dalle leggi di Snell.



$$\rho = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1}$$

$$\tau = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1}$$

$$\theta_1 = \theta_2$$

$$\text{sen}(\theta_1)\eta_1 = \text{sen}(\theta_3)\eta_2$$

Fig. 1.5 – Interazione delle onde elettromagnetiche con la materia: leggi di Snell.

Nell'analisi delle onde riflesse e trasmesse spesso viene calcolato un parametro importante per la definizione del livello di attenuazione dell'onda trasmessa. Questo parametro, funzione della frequenza, è detto spessore di penetrazione $\delta(\omega)$, e indica a che distanza dopo la discontinuità il campo ha subito una riduzione di 8.86 dB. È detto "effetto pelle" proprio perché solitamente questo spessore di penetrazione è di pochi centimetri e fornisce una veloce e importante informazione su come l'onda reagisce all'interfaccia di un nuovo mezzo:

$$\delta(\omega) = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu(\omega)\sigma(\omega)}}$$

1.2 Il terreno¹

Il concetto di terreno ha subito spesso contrastanti definizioni. Dal punto di vista agronomico è utile prendere in esame il terreno inteso come luogo capace di ospitare la vita delle piante. Esso possiede una propria organizzazione, un insieme di proprietà fisiche, chimiche e biologiche. Tra le principali caratteristiche fisiche ricordiamo la *granulometria*, la *struttura*, l'*umidità*, da cui dipendono altri aspetti come la porosità, la plasticità, la conduttività termica.

Una caratteristica fisica di grande interesse è la *granulometria* o chiamata anche *tessitura*, con la quale si indica la costituzione della parte solida del terreno espressa come percentuale in peso delle particelle elementari che lo compongono [5]. Queste particelle costituenti il terreno si differiscono, oltre che per le dimensioni, anche per la forma e per la massa volumica. La proporzione relativa delle singole frazioni dimensionali determina la *classe granulometrica* del suolo in questione. Esse sono 12, come indicato dall'USDA² (vedi figura 1.6).

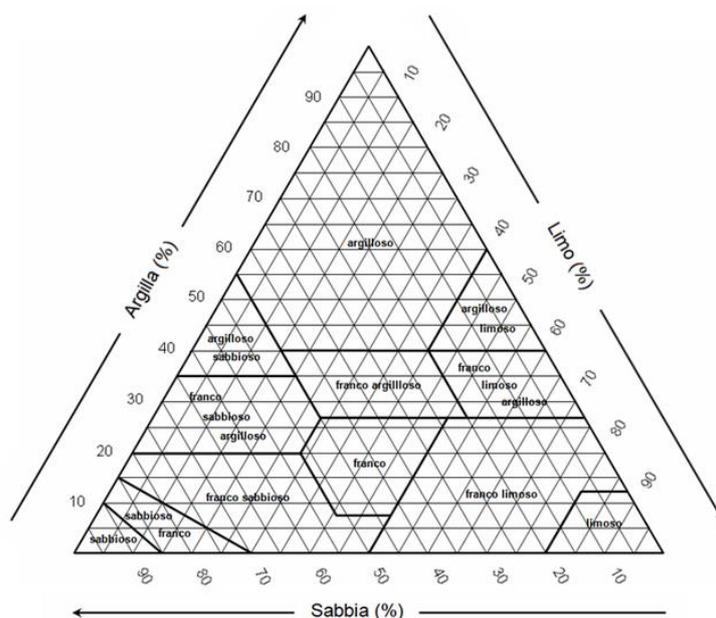


Fig. 1.6 – Triangolo per la classificazione dei terreni in base alla granulometria, USDA.

¹ Questa parte del capitolo si basa sul testo di Luigi Giardini, *Agronomia Generale Ambientale e Aziendale*. Quinta Edizione, Patron, 2002, 103-287.

² Il **Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti d'America** è un Dipartimento Federale degli Stati Uniti, creato nel febbraio 1889.

Questo diagramma è molto utilizzato dagli agronomi i quali possono perciò distinguere tre macro tipologie: argilla, sabbia e limo.

L'argilla è una tipologia di terreno che possiede caratteristiche come la presenza di elementi nutritivi, elevata porosità, forte coesione fra le particelle allo stato secco, notevole plasticità allo stato umido e possibilità di trattenere grandi quantità di acqua. Queste però non sono delle caratteristiche costanti perché le particelle granulometriche hanno un comportamento non omogeneo. Talvolta infatti si fa riferimento a valutazioni empiriche.

La sabbia è invece caratterizzata da frazioni molto fini di tessitura che le conferiscono una minore esposizione superficiale. Questo fa della sabbia un terreno debolmente partecipe alle attività agronomiche, anche se può essere lavorata con il minimo sforzo (da qui il termine di "terreno leggero"). Possiede inoltre un'elevata macroporosità e una capacità idrica di trattenuta molto bassa.

Il limo è infine un tipo di terreno che ha delle caratteristiche intermedie tra sabbia e argilla, ereditando pregi e difetti di una e dell'altra: forma polvere quando è secco e diventa fangoso quando viene bagnato. Il frequente ristagno idrico superficiale inoltre, rende il limo un terreno di non facile coltivazione.

1.2.1 Il potenziale idrico del terreno

L'acqua nel terreno si presenta allo stato liquido, gassoso e solido. L'interesse principale però è per l'acqua intesa come *soluzione circolante*, termine per indicare come essa sia un potente solvente in cui sono disciolte molteplici sostanze. La concentrazione in acqua di tali sostanze è alla base di fenomeni chimici, fisici e biologici che interessano la vita delle piante, favorite quanto più possibile dalla presenza della fase liquida nella zona microporosa del terreno e della fase gassosa nella zona macroporosa di esso.

La *soluzione circolante*, di cui prima, non è semplicemente contenuta nel terreno ma tende ad instaurare un forte legame con quest'ultimo. L'attitudine dell'acqua a rimanere immagazzinata e il lento e graduale assorbimento delle piante sono espressione della

presenza di un insieme di forze capaci di trattenere l'acqua e di resistere a qualsiasi tentativo di estrazione. Si parla infatti di *potenziale idrico totale* (Ψ_t) inteso come lavoro richiesto per trasportare una certa quantità di acqua (in termini di massa, peso o volume) da uno stato standard di riferimento (lo stato standard generalmente usato è quello di un ipotetico serbatoio di acqua pura e libera non influenzata dalla fase solida, a pressione atmosferica e alla stessa temperatura dell'acqua del terreno [2]) a condizioni di acqua nel suolo in un punto considerato (definizione della I.S.S.S.³). Può essere espresso come energia per unità di massa [J/kg], per unità di peso [J/N], per unità di volume [J/m³] e può essere indicato come segue:

$$\Psi_t = \Psi_{pm} + \Psi_o + \Psi_g + \Psi_{pe}$$

dove:

- Ψ_{pm} è *potenziale matriciale* o *potenziale capillare*;
- Ψ_o è *potenziale osmotico*;
- Ψ_g è *potenziale gravitazionale*;
- Ψ_{pe} è *potenziale di inviluppo*.

Il potenziale matriciale è il risultato di due meccanismi: capillarità e adsorbimento colloidale. La capillarità si manifesta attraverso la presenza di un menisco, espressione delle forze di adesione tra l'acqua e il terreno (vedi figura 1.7). La parte concava della curvatura è luogo di forte tensione (*tensione capillare*) che tende ad aumentare se si prova a sottrarre dell'acqua. Osservando sempre la figura 1.7 è infatti possibile rilevare la condizione di repentino abbandono di acqua a seguito di graduali sottrazioni. È una condizione in cui il liquido presente sarà praticamente trattenuto, ad elevata tensione, solo dall'adsorbimento colloidale. Per sottrarre l'acqua adsorbita all'azione dei colloidi occorre applicare una suzione, ovvero una pressione negativa.

³ The International Society of Soil Science.

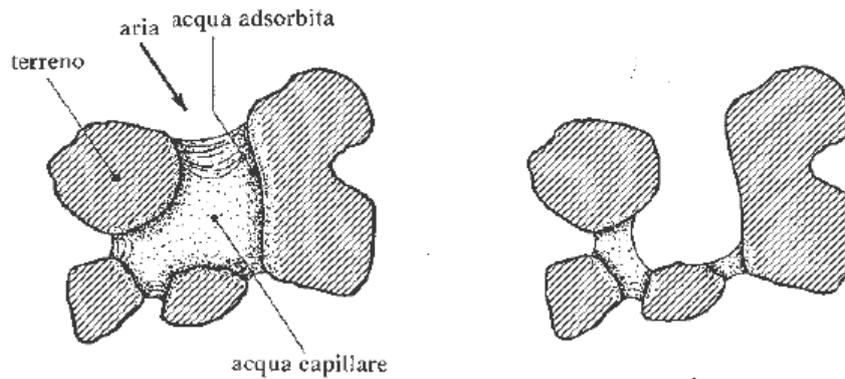


Fig. 1.7 – A sinistra: manifestazione della capillarità. A destra: manifestazione dell’adsorbimento colloidale.

Il potenziale osmotico è invece un parametro che tiene conto della presenza dei soluti in soluzione. Questi ultimi infatti sono responsabili della *tensione osmotica* (π) che si crea in presenza di una membrana semipermeabile. La membrana in questione, anche se in prima approssimazione, si riferisce al tratto interessato all’assorbimento dell’acqua da parte delle piante (interfaccia terreno-pianta). Non è altro quindi che una pressione negativa che aumenta in valore assoluto quando aumenta la concentrazione salina nella soluzione circolante (questo avviene principalmente durante i periodi più caldi) e che diminuisce con l’aumento di umidità del terreno. È pertanto critico per le piante assorbire acqua sufficiente a soddisfare le proprie esigenze in condizioni di elevata pressione osmotica (sempre in valore assoluto).

L’acqua del suolo è inoltre sottoposta ad una serie di forze che derivano dall’azione del campo gravitazionale. Il lavoro che deve essere speso per vincere questa attrazione viene immagazzinato dal corpo (l’acqua) in forma di energia potenziale gravitazionale, che dipende dalla posizione del corpo in tale campo di forza.

Un’altra componente da non trascurare è quella relativa al potenziale di involuppo. Esso sussiste quando consideriamo il terreno ad una certa profondità perché influenzato dalla pressione esercitata dal peso del terreno sovrastante.

1.2.2 Umidità del terreno

Il potenziale matriciale, tra tutti, è il contributo di maggiore interesse per lo sviluppo di questo lavoro di tesi. In particolare la relazione empirica tra esso e l'umidità del terreno. Queste due variabili sono legate dal fatto che il decrescere di una influenza il crescere dell'altra. L'umidità può variare da un minimo di zero (terreno completamente secco) ad un massimo, che dipende dalla porosità del terreno stesso. Il potenziale matriciale invece varia da un valore di 1000 MPa (in valore assoluto) ad un valore pari a zero. Rappresentando graficamente le due grandezze, si può avere un'idea completa del terreno da molto secco a molto umido (vedi fig. 1.8).

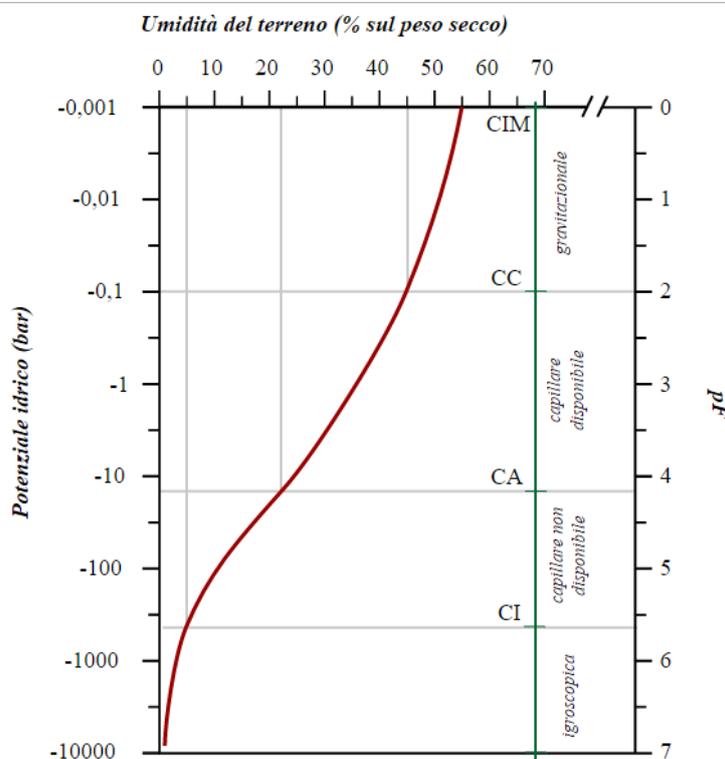


Fig. 1.8 - Esempio di curva di ritenzione idrica di un terreno argilloso.

La curva in figura 1.8, o *curva di ritenzione idrica*, determinata per via empirica, è costruita su scala lineare usando il pF, ovvero il cologaritmo del valore assoluto del potenziale idrico.

Si possono individuare alcuni valori notevoli definiti genericamente come *costanti idrologiche del terreno*. Esse sono:

- capacità idrica massima (CIM);
- capacità di campo (CC);
- coefficiente di appassimento (CA);
- coefficiente igroscopico (CI).

La CIM è il contenuto massimo di acqua che un terreno saturo riesce a trattenere con tensione capillare evitando il fenomeno della percolazione⁴ [6]. A questo valore di umidità il Ψ_{pm} viene considerato pari a zero. Quando questa cosiddetta *acqua di percolazione* viene smaltita dal suolo, l'umidità del terreno ha raggiunto un valore che corrisponde alla piena saturazione dei micro pori del terreno, ovvero la CC. Quando invece le piante non riescono più a vincere la tensione dell'acqua nel terreno, l'assorbimento cessa ed esse muoiono: questo corrisponde al CA. Infine il CI è il valore di umidità al quale corrisponde un valore molto alto in valore assoluto del Ψ_{pm} ed è rappresentativo dello adsorbito dai colloidi. Nonostante siano definite costanti, esse corrispondono a valori di umidità molto diversi nei diversi tipi di terreno. Da questi valori si evince che i terreni leggeri (ricchi di sabbia) hanno una ritenzione idrica minore, mentre i terreni “pesanti” (con maggiore contenuto di limo e argilla) hanno una ritenzione idrica maggiore.

1.2.3 Proprietà dielettriche del terreno

Lo scopo principale in questo elaborato è la caratterizzazione delle proprietà dielettriche di un materiale in particolare, il terreno. La permeabilità magnetica, trascurabile dal momento che molti terreni non sono ferromagnetici, lascia spazio alla permittività e alla conducibilità elettrica. La permittività del suolo è strettamente influenzata da fattori quali l'*umidità*, la “*bulk density*”, la *tessitura* del terreno, la *temperatura* e la *frequenza* [8].

Umidità

Il contenuto di *umidità* è forse la variabile più importante, nonché la variabile di maggiore interesse ai fini di questa tesi.

⁴ In pedologia, con percolazione si intende un movimento dall'acqua che cola attraverso il suolo. Esso è un fenomeno naturale, che accade a causa della gravità, la quale permette all'acqua di infiltrarsi nei pori del terreno.

Gli studi disponibili [8] mostrano che al suo aumentare anche la permittività relativa del terreno aumenta. Questo è prevedibile, in generale, dal momento che la permittività relativa del terreno asciutto è inferiore a 5, mentre quella dell'acqua può essere più di un ordine di grandezza maggiore. Quindi ci si aspetta una modifica percepibile della permittività media al variare dell'umidità del terreno.

Per un basso contenuto di umidità, la parte reale della permittività del terreno ϵ' descrive un andamento quasi costante. Questo andamento, secondo Lundien e Wiebe (1971), deriva dalla limitata mobilità dell'acqua assorbita sulla superficie delle particelle del terreno, fenomeno per il quale la ϵ' , nel caso di un terreno molto argilloso, descriverebbe un andamento quasi costante per un range di umidità più ampio, proprio a causa della forte tendenza a trattenere acqua. Tuttavia, in tal senso, ulteriori studi mostrano come la differenza tra terreni con diversa tessitura sia meno significativa se la costante dielettrica è espressa in funzione del contenuto volumetrico di acqua (vedi sezione *tessitura*). La parte immaginaria della permittività del terreno ϵ'' , sebbene cresca anch'essa con l'aumento del contenuto di umidità, risulta soggetta ad un comportamento variabile e di difficile interpretazione. In particolare, alcuni studi [8] effettuati da Leschanskii et. al. (1971), mostrano come i valori di ϵ'' cambino da un terreno argilloso ad un terreno sabbioso: valori pressoché simili a quelli di ϵ' per un terreno argilloso, valori dieci volte inferiori rispetto alla ϵ' per un terreno sabbioso. Tuttavia, va considerato come questo fenomeno sia trascurabile nel caso delle alte frequenze (ordine dei GHz). A tal proposito, la conduttività (che è direttamente proporzionale alla ϵ'' ad una data frequenza) presenta un comportamento altrettanto difficilmente interpretabile.

Infine, la relazione tra la permittività dielettrica e l'umidità del terreno è stata quantificata da Lundien (1971) per cinque frequenze (tra 1.074 GHz e 1.499 GHz) nella forma seguente:

$$m_v = \frac{\epsilon'}{80} + \frac{0.26}{(\epsilon' - 1)} + 0.11$$

dove m_v è il contenuto di umidità volumetrico. Quindi esiste qualche studio teorico che cerca di legare umidità e permittività.

Bulk Density

Un altro parametro da considerare è quello del *bulk density*, indice di compattezza del suolo. La parte reale della permittività del terreno ϵ' e il bulk density sono legate dalla seguente relazione (Hipp, 1974):

$$\epsilon' = \left(\frac{1 + \rho}{2}\right)^2$$

dove ρ è il bulk density.

Il bulk density ha inoltre un effetto indiretto importante sulla relazione tra la permittività dielettrica e il contenuto di umidità del terreno. La parte reale della permittività del terreno ϵ' descrive un andamento in funzione dell'umidità differente a seconda che quest'ultima sia espressa in forma gravimetrica o in forma volumetrica: quando è usata la forma volumetrica, la permittività assumerà determinati valori terranno conto del grado di compattazione del terreno.

Tessitura

Risultati di vari esperimenti indicano che, ad alte frequenze (sopra i 10 GHz), la permittività dielettrica del suolo sia quasi non influenzata dalla composizione dei terreni. A basse frequenze (minori di 10 GHz), invece, un diverso tipo di tessitura incide sulle proprietà dielettriche: in particolare la perdita dielettrica cresce in funzione della presenza di particelle argillose.

Temperatura

La permittività dielettrica del terreno è fondamentale indipendente dalla temperatura. Quella dell'acqua invece è calcolata in funzione della temperatura. Dal momento che il terreno contiene quasi sempre dell'acqua (salvo che non sia essiccato in forno), la sua permittività dipende dalla temperatura. Questo è stato confermato sperimentalmente da Poe et. al. (1971) i quali osservarono che la parte reale della permittività del terreno secco non cambiava quando la temperatura cresceva da 20°C a 60°C ma cambiava quando era presente anche una piccola quantità di acqua.

Frekuensi

Poiché la ϵ' è legata a fenomeni di tipo dipolare dovuti all'acqua contenuta nel terreno, e tali fenomeni hanno una loro inerzia, un aumento della frequenza delle oscillazioni di un campo elettromagnetico incidente rende più difficili le interazioni dipolari, facendo diminuire gradualmente la ϵ' . La zona di frequenza in cui si manifesta questo fenomeno è tra 1 GHz e 50 GHz. A temperature più alte, ϵ' diminuisce a frequenze leggermente più alte. La parte immaginaria ϵ'' invece fino ai 100 MHz rimane pressoché costante perché gli effetti conduttivi sono effettivamente dominanti, mentre per frequenze più alte si ha un aumento a causa delle perdite dielettriche.

Come si osserva in figura 1.9, i valori della parte immaginaria e della tangente di perdita sono piccoli per frequenze intorno ai 100 MHz e sono massimi alle basse frequenze. La parte reale invece ha un andamento quasi costante nel range 10^7 - 10^9 Hz.

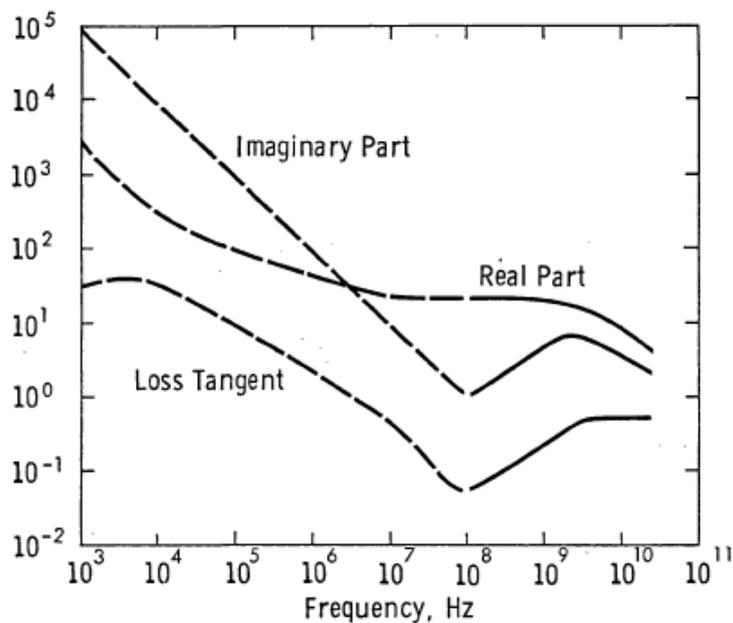


Fig. 1.9 – Parte reale, parte immaginaria e tangente di perdita relative ad un limo argilloso contenente il 15% di umidità gravimetrica.

1.3 Spettroscopia di impedenza

La Spettroscopia di Impedenza (IS) è un metodo relativamente nuovo e potente per la valutazione dell'impedenza di un mezzo materiale e, da essa, la successiva caratterizzazione di molte delle proprietà elettriche.

Si tratta di una tecnica che, opportunamente impostata, consente sia la valutazione dell'impedenza intrinseca di un mezzo attraversato da campo elettromagnetico, quanto lo studio del suo analogo puramente elettrico, l'impedenza elettrica, che rappresenta l'opposizione in un circuito chiuso al passaggio di corrente elettrica.

Difatti, con il termine impedenza elettrica intendiamo una variabile complessa composta da una parte reale e una parte immaginaria. La parte reale (resistenza) è legata alla dissipazione di potenza, mentre la parte immaginaria (reattanza) è legata all'immagazzinamento di energia. Inoltre, com'è noto, l'impedenza può essere rappresentata da modulo e fase. In particolare:

$$Z = Z_0 e^{j\varphi} = Z_0 (\cos\varphi + j\sin\varphi)$$

$$Z_0 = \text{modulo e } \varphi = \text{fase}$$

$$Z_0 \cos\varphi = \text{parte reale e } Z_0 \sin\varphi = \text{parte immaginaria}$$

Quindi, essendo una grandezza in funzione della frequenza, l'impedenza è descritta da coppie di valori complessi lungo l'intero intervallo di frequenze di interesse, che ne costituiscono lo *spettro*.

L'approccio generale consiste nell'applicare uno stimolo al mezzo di analisi e osservare la risposta [12], la quale è solitamente mediata dall'impedenza. Il confronto tra input e output permette pertanto una definizione dell'impedenza e la caratterizzazione completa del mezzo.

Qualora l'analisi preveda l'interesse per l'impedenza intrinseca di un mezzo, cioè la reazione che oppone un materiale alla propagazione del campo elettromagnetico, la tecnica di spettroscopia prevede un irraggiamento del materiale analizzato con uno stimolo elettromagnetico con caratteristiche di modulo e fase note, e la successiva analisi dell'onda riflessa o trasmessa (a seconda del setup) raccolta da un ricevitore. Assumendo infatti che i parametri caratterizzanti il sistema di misura siano considerati costanti o stazionari e che quindi il sistema stesso sia definito lineare, è possibile

garantire, in uscita a quest'ultimo, un segnale altrettanto sinusoidale. Ciò che tuttavia differenzia l'uscita dall'ingresso sono proprio i valori di modulo e fase.

L'enorme vantaggio della tecnica risiede nella possibilità di sfruttare segnali ad alta frequenza. Questo permette di raggiungere sensibilità molto elevate e, in particolare nel campo dei GHz, di ridurre parassiti che incidono sul rumore di misura [13].

1.4 Tecniche tradizionali per la misura dell'umidità

Le misure di umidità del suolo, soprattutto sul campo, hanno sempre presentato notevoli difficoltà, dovute principalmente al fatto che il terreno sia un mezzo alquanto eterogeneo.

Ancora oggi il metodo di riferimento per valutare altri tipi di misura è quello diretto, basato su un campione pesato, sottoposto ad essiccamento in stufa a 105°C, e pesato nuovamente. La differenza di peso fornisce il valore gravimetrico dell'acqua presente prima del passaggio in forno. Tuttavia risulta essere molto dispendioso.

Fino alla fine degli anni '80, un metodo di notevole precisione per misure in campo era rappresentato dalla *sonda a neutroni*, basato sulla stretta correlazione tra l'umidità del suolo e il numero di neutroni "lenti" che tornavano alla sonda in seguito alla collisione con i nuclei di idrogeno presenti nell'acqua del suolo. Ma il costo e le restrizioni legate all'impiego di sostanze radioattive ne hanno limitato l'utilizzo.

Un passo decisivo è stato compiuto all'inizio degli anni '90 con la diffusione delle tecniche di riflettometria largamente impiegate in altri settori. In particolare, la tecnologia TDR (nel dominio del tempo) e la tecnologia FDR (nel dominio delle frequenze) hanno dato il via ad un gran numero di prodotti destinati all'uso agronomico.

Di seguito vengono approfondite alcune tra le metodologie utilizzate per la misura e il monitoraggio del contenuto di umidità del suolo, con riferimento ai relativi strumenti, mettendo in luce vantaggi e svantaggi di ognuno. Nel dettaglio vedremo:

- il tensiometro;
- il blocchetto di gesso;
- il sensore Watermark;
- Riflettometria nel Dominio del Tempo;
- Riflettometria nel Dominio delle Frequenze.

1.4.1 Il Tensiometro

Il tensiometro è uno strumento per la misurazione indiretta del contenuto di umidità nel terreno mediante la determinazione della *tensione capillare* con cui l'acqua è trattenuta nel terreno stesso.

Il tensiometro classico è composto da un tubo in materiale sintetico trasparente (generalmente in plexiglas) chiuso ermeticamente e riempito di acqua, dotato all'estremità di una capsula porosa (generalmente in ceramica). Sul tubo è fissato uno strumento di misura che consiste in un manometro di sottopressione. Il funzionamento è semplice: quando il terreno è secco l'acqua passa dal tensiometro al substrato tramite il setto poroso provocando una pressione negativa visibile sul manometro. Questo valore corrisponderà alla tendenza del terreno a trattenere l'acqua.

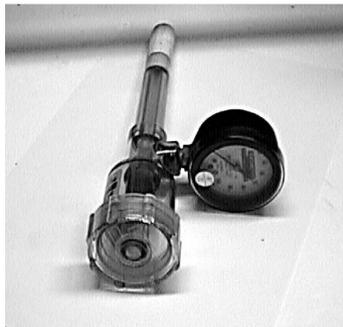


Fig. 1.10 – Esempio di tensiometro.

Sebbene abbia dei pregi come un facile utilizzo, una buona precisione, un costo moderato, il sistema presenta limiti di:

- manutenzione: è necessario ripristinare regolarmente il livello dell'acqua nel tubo;
- installazione: è necessario che il terreno sia ben costipato e che vi sia una certa aderenza tra il setto poroso e il terreno.
- ambito di misurazione: ha un campo di misurazione ristretto che raggiunge valori fino ai -0,85 bar (-85kPa) che non ne permette l'impiego in quelle colture che non necessitano di grandi apporti di acqua [6].

- deareazione: una volta riempito d'acqua, è necessario assicurarsi che all'interno del sistema non vi siano bolle d'aria che altererebbero le misure.

1.4.2 Il blocchetto di gesso

Il blocchetto di gesso è tra i sistemi più antichi per misure di umidità del suolo, sviluppato negli anni 1940-1960. Questo metodo prevede l'utilizzo di due elettrodi disposti in un piccolo blocco di gesso immesso nel terreno per assorbire acqua e permette di risalire al potenziale matriciale attraverso la misura della resistenza elettrica tra di essi: la corrente elettrica alternata immessa nel circuito incontra una resistenza, per passare da un elettrodo all'altro, tanto minore quanto più elevata è l'umidità del mezzo poroso che li separa. L'intervallo di funzionamento può essere compreso tra i -50 ai -1500 kPa.

Questi sensori possono essere relativamente poco costosi e pratici nell'utilizzo ma hanno una precisione media e durata limitata nel tempo in quanto il gesso tende a disintegrarsi, essendo inserito permanentemente nel terreno alla profondità desiderata.

1.4.3 Il sensore Watermark

Il sensore Watermark rappresenta l'evoluzione del blocchetto di gesso. Il miglioramento risiede nel fatto che il sistema sia avvolto da una maglia di acciaio inox che ne aumenta il tempo di durata, vantando anche delle misure più accurate. Il parametro misurato, come per il blocchetto di gesso, è la tensione relativa al potenziale matriciale in un campo di misura tra 0 e -200 kPa.

I sensori Watermark sono inoltre di facile utilizzo, resistenti al gelo, poco costosi, richiedono la minima manutenzione e offrono delle misure in continuo collegando il sistema di lettura ad un datalogger. Di seguito è raffigurato lo strumento.



Fig. 1.11 – Sensore Watermark con lettore manuale [6].

Infine, sebbene fornisca una semplice interpretazione dei dati, il suo tempo di reazione alle variazioni di umidità del terreno è molto lento rispetto ad altri sistemi di misurazione e l'esattezza dei dati può essere minacciata dall'influenza della temperatura.

1.4.4 Sensori TDR

La tecnica di Riflettometria nel Dominio del Tempo (*Time Domain Reflectometry* o TDR) rappresenta una tra le metodologie di misurazione indiretta del contenuto volumetrico di acqua nel terreno, basata sulla variazione della costante dielettrica di quest'ultimo.

Un sensore, costruito implementando la tecnica TDR, è costituito da una parte elettronica in grado di generare un impulso elettromagnetico ad alte frequenze (GHz) e da due o tre aste metalliche parallele tra loro in grado di catturare e riflettere l'onda. Grazie ad un cavo coassiale che connette queste guide d'onda alla strumentazione è possibile propagare il segnale.

Il parametro di interesse è quello relativo al tempo impiegato dall'impulso per giungere da un capo all'altro dell'apparecchiatura immersa nel terreno, in quanto dipendente dalla costante dielettrica di esso: maggiore è la costante dielettrica, più lungo è il tempo di viaggio dell'impulso.

Lo strumento presenta i seguenti vantaggi:

- elevata precisione;
- rilevamento a profondità desiderate;
- risposta rapida alla variazione di umidità.

Tuttavia il contenuto volumetrico di acqua è calcolato calibrando lo strumento per ogni tipologia di terreno. Inoltre il loro impiego non è consigliabile in terreni con una certa salinità, in terreni ricchi di scheletro e in terreni argillosi a causa delle larghe crepe nei periodi troppo secchi e della plasticità che causa aderenza nei periodi molto umidi.

1.4.5 Sensori FDR

La tecnica di Riflettometria nel Dominio delle Frequenze (*Frequency Domain Reflectometry* o FDR), in analogia alla TDR, si presta alla misurazione del grado di umidità nel terreno in percentuale volumetrica mediante valutazione delle proprietà dielettrica di esso. In particolare, un sensore che sfrutta un metodo di questo tipo, definito anche ‘sensore capacitivo’, si serve di un circuito oscillatore in grado di generare un segnale elettromagnetico, ad una frequenza compresa tra i 50 e i 150 MHz, che è propagato attraverso delle coppie di elettrodi, generalmente cilindrici, inseriti nel terreno (vedi fig. 1.12).

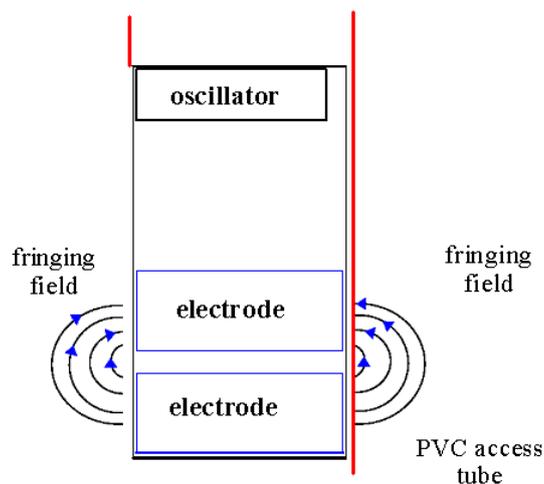


Fig. 1.12 - Quando viene applicato un campo elettrico, il terreno attorno agli elettrodi costituisce il dielettrico del condensatore.

Attraverso una misura capacitiva tra gli elettrodi, lo strumento permette di rilevare la costante dielettrica del terreno la cui variazione è direttamente correlata ad una variazione del contenuto di acqua.

I sensori FDR sono altamente precisi, garantiscono una risposta rapida alle variazioni di umidità e possono servirsi di registratori di dati per la lettura continua del contenuto di acqua con la possibilità di graficare manualmente o trasferire via computer, anche in forma portatile. Purtroppo però anche questi tipi di sensori presentano degli svantaggi non trascurabili: tendono ad essere sensibili alla salinità del terreno, possono falsare le misure a causa dei problemi di contatto con il suolo, necessitano di un'installazione accurata nonché di una calibrazione per ogni tipo di terreno. Inoltre, come anche per la TDR, il costo elevato rappresenta uno dei principali svantaggi.

In conclusione questi strumenti si prestano a misure del contenuto di umidità attraverso principi e implementazioni diversi; nonostante, tuttavia, siano in grado di svolgere il loro compito in modo efficace, si sono evidenziate numerose e disparate problematiche che strumentazioni successive, in particolare il dispositivo utilizzato in questa esperienza, tentano di risolvere.

Capitolo 2

Materiali e Metodi

Le tecniche attualmente in commercio, come puntualizzato nella sezione precedente, deducono l'umidità del terreno riportando tuttavia degli svantaggi. Sulla base di questi svantaggi nasce l'idea di un sistema di nuova concezione, con la necessità di garantire migliori prestazioni. L'idea principale è di realizzare una misura sul terreno, per il rilevamento del contenuto di umidità, sfruttando le interazioni di quest'ultima variabile con la propagazione elettromagnetica.

Pertanto, dopo una descrizione delle competenze teoriche necessarie all'identificazione del contesto di misura, questo capitolo prosegue con un'esposizione delle principali caratteristiche di questo nuovo sistema, dal setup di misura ai trattamenti statistici dei dati, delineandone vantaggi e limiti.

2.1 Generalità

Il sistema di misura, ottenuto dall'adattamento di precedenti configurazioni, è costituito da un blocco hardware, che si occupa della gestione del segnale elettromagnetico, e da un blocco software, che tratta l'elaborazione dei dati provenienti dall'indagine (vedi fig. 2.1).

La componentistica hardware prevede un oscillatore sweep, che genera l'onda elettromagnetica sinusoidale ad alte frequenze, una guida d'onda rettangolare appoggiata sul terreno, che la indirizza ortogonalmente ad esso e che successivamente ne riceve la componente riflessa, grazie ad un'antenna trasmittente ed una ricevente.

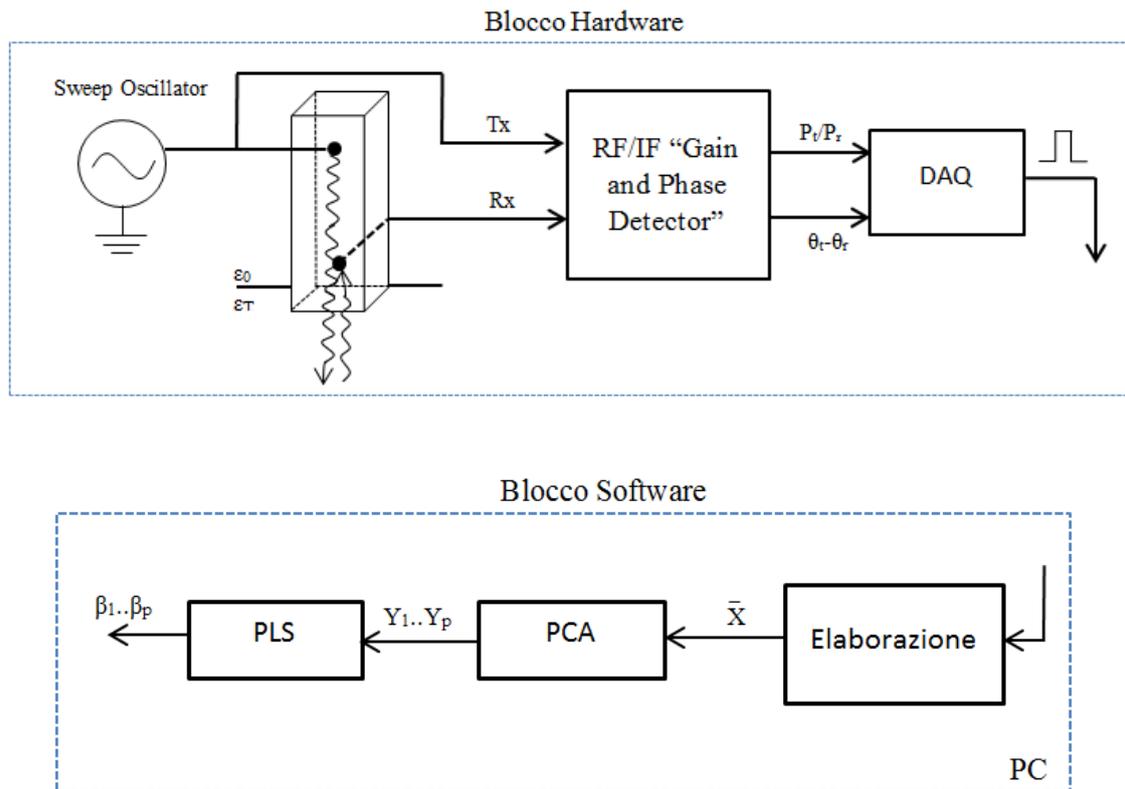


Fig. 2.1 - Schema a blocchi del sistema.

La trasmissione e la parziale riflessione forniscono delle informazioni utili, ottenute mediante un rivelatore di potenza differenziale che ha il compito di confrontare in ampiezza e in fase i due segnali provenienti rispettivamente dal ramo di riferimento e da quello di misura. Infine un componente DAQ prepara i segnali per l'elaborazione al calcolatore.

Il blocco software, invece, integrato nel pc, una volta ricevuti i dati dalla scheda di acquisizione, procede dapprima all'elaborazione e successivamente al trattamento statistico, utilizzando delle tecniche di esplorazione e analisi quali la PCA e la PLS.

I dati memorizzati, a seguito dell'elaborazione, risultano in forma matriciale in modo tale da poter essere processati tramite PCA che si occupa di rilevare le informazioni più utili riducendo il numero di variabili in ingresso. La PLS sfrutta questa informazione per poter costruire dei modelli di predizione, grazie ai quali sarà possibile ottenere dei coefficienti. Ma vediamo meglio nel dettaglio.

2.2 Strumentazione

Il prototipo utilizza un'apparecchiatura da banco presente nel laboratorio di Ingegneria Alimentare del Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari costituita da:

- un generatore d'onda sinusoidale;
- una guida d'onda rettangolare custom (contenente due antenne, una trasmittente e una ricevente);
- un "RF/IF Gain and Phase Detector";
- un sistema di acquisizione.

Il setup di misura è illustrato in figura 2.2 con i vari collegamenti tra i singoli componenti:

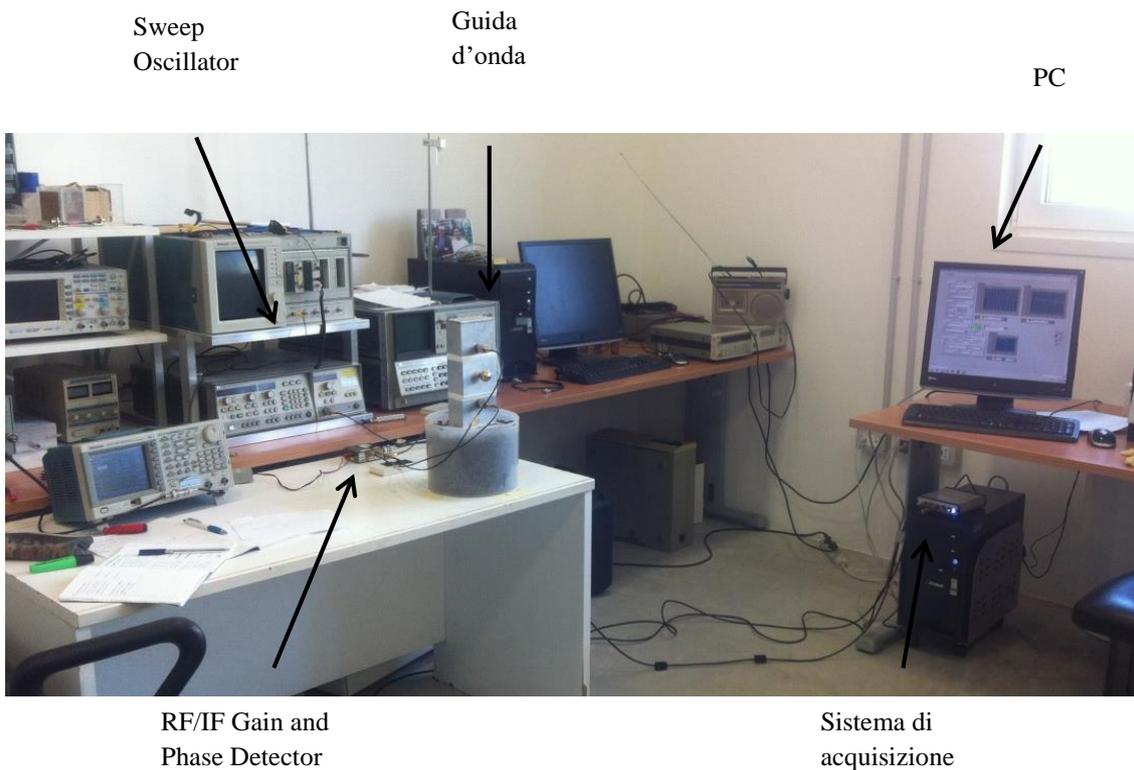


Fig. 2.2: Setup di misura.

2.2.1 Generazione del segnale

La sorgente del segnale è uno *Sweep Oscillator* 8350B dell'HP da banco che ha il compito di generare una sinusoide con uno sweep in frequenza. Le specifiche utilizzate sono le seguenti:

- un range di frequenza di 1.5 GHz- 2.7 GHz;
- una potenza di 13 dBm pari a 4.5 mW;
- un tempo di acquisizione di 60 sec;
- una frequenza che non varia con intervalli di tempo uniformi ma in modo lineare e continuo con un Δf infinitesimo.

La partenza per la scansione viene sincronizzata grazie ad un trigger di start generato da uno strumento esterno.

2.2.2 Guida d'onda rettangolare

La guida d'onda utilizzata è una guida d'onda metallica cava a sezione rettangolare che permette di incanalare l'onda elettromagnetica costringendola ad un percorso obbligato. Al suo interno sono contenute due antenne, centrate lungo il suo asse longitudinale ad una distanza di 12,5 cm. In figura 2.3 vengono riportate le sue dimensioni.

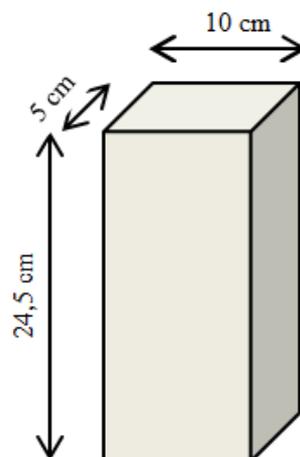


Fig. 2.3 – Dimensioni della guida.

Generalmente chiusa alle estremità, questa guida d'onda veniva impiegata in campo agroalimentare ponendo al suo interno il campione di cui si voleva effettuare l'analisi. Si tratta di un brevetto Unibo del 2015 che utilizza un sistema per la misurazione di parametri relativi alle proprietà dielettriche, utili per determinare alcune caratteristiche chimico-fisiche di un alimento, come l'acidità, la salinità, l'umidità. In quel contesto si sfruttava la rifrazione causata dall'alimento proprio grazie al fatto che questo si trovava tra le due antenne (vedi fig. 2.4).

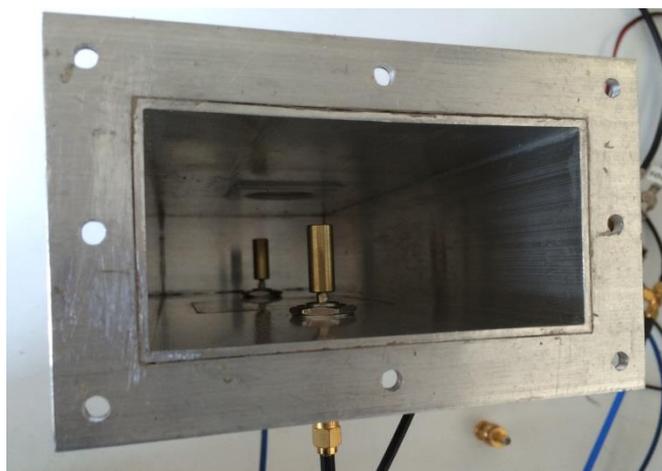


Fig. 2.4 - Visuale interna della guida d'onda. Si possono notare le due antenne: esse sono di tipo “probe”, cilindriche e in ottone.

La guida d'onda a cui si fa riferimento in questo elaborato è invece provvista di un'estremità superiore chiusa ed una inferiore aperta a contatto col campione di terreno. Questa è una specifica alquanto importante: l'idea infatti di una guida semiaperta è vantaggiosa nella prospettiva di realizzare un sistema che sia utilizzabile se appoggiato semplicemente sul terreno.

Questo tuttavia è un sistema che presenta dei limiti. L'onda trasmessa infatti, procedendo lungo la sua traiettoria, può recare disturbi all'antenna ricevente che si trova proprio al di sotto di quella trasmittente. Inoltre, con questa configurazione, è difficile incanalare l'intero contributo dell'onda riflessa che quindi viene captata solo in parte. In conclusione la guida presa in dotazione non è perfettamente adatta allo scopo a causa delle perdite di prestazioni sopraelencate. Esse potrebbero essere migliorate solo in una successiva fase con la progettazione di una nuova guida.

Di seguito, la figura 2.4, la guida d'onda appena menzionata:

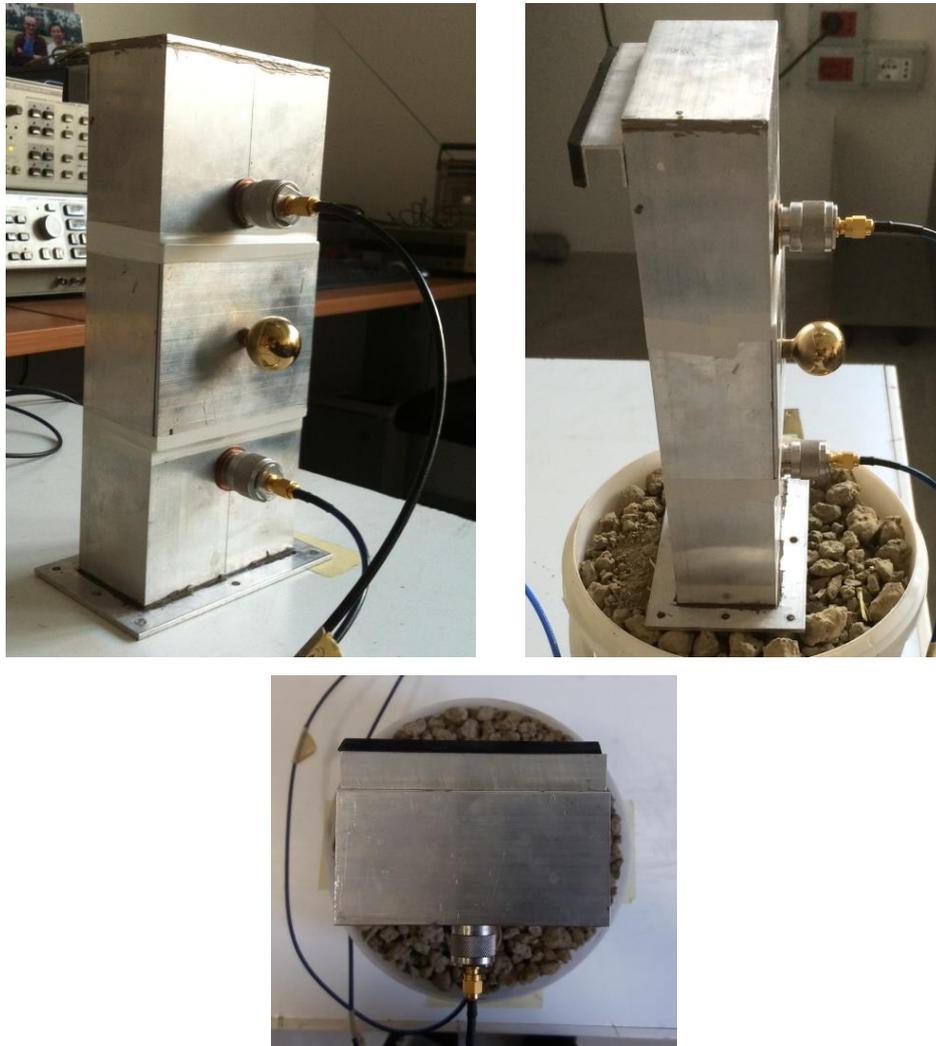


Fig. 2.5 – Tre prospettive di osservazione della guida: frontale, laterale, dall'alto. Essa è caratterizzata da una frequenza di taglio di 1.56 GHz.

2.2.3 Rivelatore di guadagno e fase

Il componente cardine del sistema è l'*analizzatore vettoriale* che ha il compito di confrontare in ampiezza e fase i due segnali provenienti dal sistema trasmittente e dal sistema ricevente. Il sistema scelto è l'AD8302 dell'Analog Devices (vedi figura 2.6), un circuito elettronico integrato richiedente pochi componenti esterni e una singola alimentazione di 2,7 V-5,5 V.

I segnali di ingresso AC possono variare da -60 dBm a 0 dBm in un sistema di 50 Ω , dalle basse frequenze fino a 2.7 GHz. Mentre le uscite forniscono una misurazione accurata del guadagno su un intervallo di ± 30 dB con una scala di 30 mV / dB, e della fase in un range 0 $^\circ$ -180 $^\circ$ con una scala di 10 mV / grado [25].

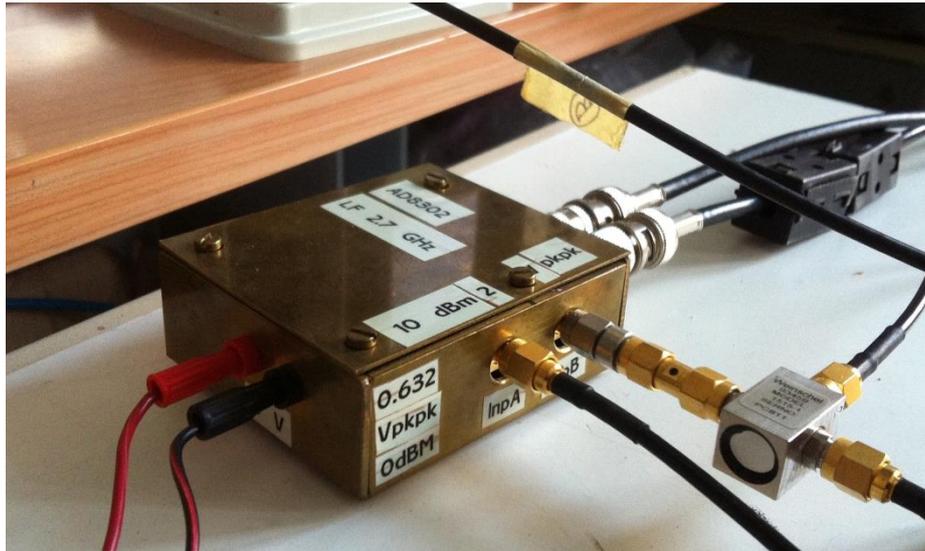


Fig. 2.6 – Rivelatore di potenza AD8302.

Il PCB che supporta il circuito è dotato di due connettori coassiali di tipo SMA per i due segnali di ingresso RF: l'input A è collegato all'antenna ricevente, l'input B è collegato a "T" sdoppiando il segnale tra l'antenna trasmittente e lo sweeper. Possiede inoltre altri due connettori SMA, chiamati "V_{mag}" e "V_{phs}" per i segnali di uscita: V_{mag} descrive il voltaggio relativo al guadagno mentre V_{phs} descrive il voltaggio relativo alla fase come differenza tra i due canali di ingresso. Queste tensioni di uscita di fase e guadagno sono disponibili simultaneamente in un intervallo da 0V a 1,8V.

2.2.4 Acquisizione dei dati

L'hardware DAQ scelto è l'USB-4431 della National Instruments che agisce da interfaccia tra i segnali comparati di ampiezza e fase (chiamati X_{ratio}) e il calcolatore. Questi segnali vengono condizionati e campionati con una frequenza di campionamento di 102.4 kS/s ed una risoluzione di 24 bit. Il suo funzionamento è controllato dal software Labview, programmato per visualizzare e memorizzare i dati di guadagno e fase (X_{ratio}), nonché di trigger di start.

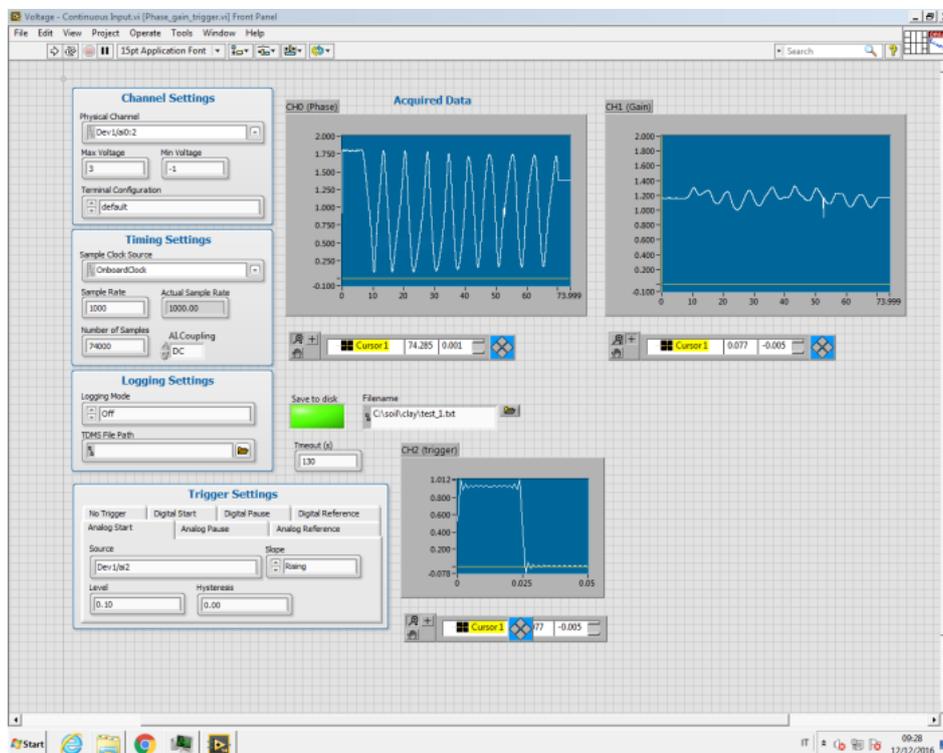


Fig. 2.7 - Screenshot di Labview.

2.3 Piano sperimentale

Nella presente sperimentazione sono state considerate tre tipologie di terreno: terreno argilloso, argilla espansa e sabbia. Con questa scelta si è voluto puntare alla variabilità, in modo da poter validare le misure su più tipi di terreno. Va specificato, inoltre, che l'uso di questi tre tipi di terreno è legato al facile reperimento. Per ogni tipologia di terreno sono stati valutati 5 diversi livelli di umidità. Questo rappresentava un buon compromesso tra la praticità e il fatto che fosse necessario il raggiungimento di un numero sufficiente di livelli di confronto.

2.3.1 Preparazione dei campioni

Il punto di partenza per la preparazione dei campioni è stato quello relativo allo sgretolamento del terreno argilloso, ottenuto mediante l'uso di un martello. Questo è stato fatto al fine di assicurare una certa omogeneità dimensionale delle singole particelle elementari del suddetto e permettere che queste fossero inumidite opportunamente.

I valori di umidità sono stati scelti seguendo dei criteri precisi. In particolare, l'umidità del campione più secco è il risultato di un essiccamento in stufa mentre quella del campione più umido deriva da una valutazione della capacità di campo (vedi Capitolo 1). Questi ultimi valori sono concordi, anche se leggermente più alti, con quelli riportati in letteratura, frutto di medie. Le restanti percentuali di umidità sono state calcolate di conseguenza, in modo tale che fossero intervallate uniformemente.

Le quantità di acqua da aggiungere ad ogni campione sono state determinate eseguendo alcuni procedimenti matematici:

$$U_{bs} = 100 \frac{m_w}{m_s}$$

$$U_{bu} = 100 \frac{m_w}{m}$$

m_w = massa acqua

m_s = massa campione secco

m = massa campione umido

U_{bs} = umidità (%) su base secca

U_{bu} = umidità (%) su base umida

I campioni sono stati poi preparati con soluzione spray d'acqua affinché fossero idratati in modo omogeneo. Di seguito, in tabella 2.1, sono riportate le specifiche dei campioni pronti per la procedura.

Terreno Argilloso		Argilla Espansa		Sabbia	
Umidità (%) su base secca	Massa campione idratato (kg)	Umidità (%) su base secca	Massa campione idratato (kg)	Umidità (%) su base secca	Massa campione idratato (kg)
5,83	5,54	0,23	1,86	0,12	7,20
11,37	5,15	7,17	1,95	5,09	6,39
16,52	4,72	14,12	2,06	10,06	6,83
22,46	4,53	21,06	2,19	15,03	7,25
28	4,04	28	2,27	20	7,77

Tab. 2.1 – Valori di massa dei campioni già contenenti l'acqua corrispondenti ai valori di umidità dei singoli campioni.

2.4 Procedura

Ciascun campione, preparato nel laboratorio di Ingegneria Alimentare, è stato collocato all'interno di un contenitore quasi cilindrico avente le seguenti dimensioni:

- diametro superiore=21 cm;
- diametro inferiore=20 cm;
- altezza=14,4 cm.

Nella seguente sperimentazione sono stati presi in esame i campioni dei singoli terreni (alle umidità specificate in tabella 2.1) e dei campioni organizzati come stratificazioni dei terreni a diverse umidità. Di seguito sono riportate le varie procedure con le quali sono state eseguite le prove.

2.4.1 Test su Terreno Argilloso, Argilla Espansa e Sabbia

Ogni acquisizione è stata eseguita considerando due criteri: il rimescolamento del terreno e la rotazione del contenitore. Tali accorgimenti sono stati adoperati rispettivamente per garantire omogeneità del campione e per testare la ripetibilità nella misura.

In particolare, ogni campione di terreno argilloso è stato sottoposto a quattro rimescolamenti e per ogni rimescolamento, poi, sono state effettuate tre rotazioni. Sono state dunque compiute 60 acquisizioni.

Diversamente da quanto trattato sulle modalità di ripetizione della misura per i campioni di terreno argilloso, per ogni campione di argilla espansa e di sabbia sono state effettuate solo 9 rotazioni del contenitore. In questi due casi infatti è parso superfluo agire mediante rimescolamento a causa delle proprietà fisiche e strutturali del terreno considerato. In particolare per l'argilla espansa, la natura porosa del nucleo interno e la dura consistenza della scorza esterna conferiscono al singolo granulo elementare una certa capacità di trattenere l'acqua. La sabbia, invece, soprattutto per i campioni con percentuale di umidità più alta, risulta notevolmente compatta. Per ognuna delle tipologie di terreno sono state compiute dunque 45 acquisizioni.

Sono mostrati in figura 2.8 i campioni ad una generica umidità di ogni tipologia di terreno pronti per l'acquisizione.



Fig. 2.8 - Da sinistra verso destra: campione di terreno argilloso, di argilla espansa e di sabbia.

2.4.2 Test su Stratificazioni

Per tutte le tre tipologie di terreno sono state effettuate anche delle prove a strati mettendo in relazione due campioni di diversa percentuale di umidità. A tal proposito sono state pensate delle combinazioni in modo tale che si riscontrassero degli abbinamenti di percentuali di umidità molto diverse tra loro e non. In particolare, affinché il riconoscimento di ogni combinazione fosse facilitato, sono state utilizzate delle notazioni tali da considerare la lettera A rappresentativa del campione più secco e la lettera E del campione più umido. Le combinazioni realizzate sono in totale dieci: AB, BA, AD, DA, AE, EA, BC, CB, BD, DB. È possibile comprendere meglio la disposizione degli strati mediante la tabella 2.2 sotto riportata:

	Terreno Argilloso		Argilla Espansa		Sabbia	
	Umidità (%) Strato superiore	Umidità % Strato inferiore	Umidità (%) Strato superiore	Umidità (%) Strato inferiore	Umidità (%) Strato superiore	Umidità (%) Strato inferiore
AB	5,83	11,37	0,23	7,17	0,12	5,09
BA	11,37	5,83	7,17	0,23	5,09	0,12
AD	5,83	22,46	0,23	21,06	0,12	15,03
DA	22,46	5,83	21,06	0,23	15,03	0,12
AE	5,83	28	0,23	28	0,12	20
EA	28	5,83	28	0,23	20	0,12
BC	11,37	16,52	7,17	14,12	5,09	10,06
CB	16,52	11,37	14,12	7,17	10,06	5,09
BD	11,37	22,46	7,17	21,06	5,09	15,03
DB	22,46	11,37	21,06	7,17	15,03	5,09

Tab. 2.2 – Per ogni combinazione sono riportate le umidità relative ai due strati.

A titolo di esempio, nelle figure 2.9 e 2.10, è riportato un campione di sabbia soggetto a stratificazione.



Fig. 2.9 - Guida d'onda appoggiata su un campione di sabbia stratificato.

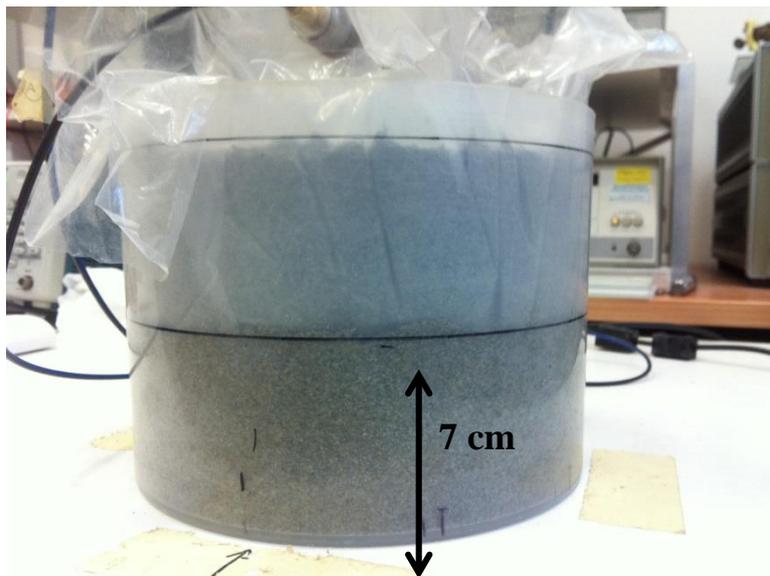


Fig. 2.10 - Vista laterale del campione di sabbia stratificato.

Per invertire facilmente lo strato superiore e inferiore (considerando di dover realizzare ogni combinazione, ad esempio AE ed EA) ci siamo serviti di un sottile foglio di plastica posizionato tra i due strati (vedi fig. 2.10). L'uso di questo foglio di plastica, legato esclusivamente a motivi pratici, potrebbe aver influenzato in qualche modo la misura creando discontinuità nel mezzo ma ad ogni modo sono necessarie future analisi

per verificare l'effettiva influenza. La quantità di terreno di ogni strato è espressa in termini di massa contenuta nel cilindro con un'altezza di 7cm.

Per le prove a strati, però, a differenza delle prove sulle singole tipologie, non sono stati effettuati i rimescolamenti per pura semplicità. Sono state, piuttosto, effettuate 9 rotazioni del contenitore considerando le stesse motivazioni legate alla ripetibilità della misura. Il numero di acquisizioni è dunque pari a 90.

Sostanzialmente, lo scopo di queste prove su strati risiede nella possibilità che si possa effettuare una misura in grado di distinguere livelli di umidità diverse. I risultati ottenuti su queste osservazioni sono alquanto promettenti, soprattutto nella prospettiva che il sensore riesca a percepire prontamente le variazioni di umidità. I campioni stratificati sono infatti un'approssimazione dello stato del suolo, la cui umidità non è costante lungo il suo profilo ma anzi varia gradualmente.

2.4.3 Manipolazione dei dati

Effettuate le prove e ricavate le acquisizioni il passo successivo è stato quello di trattare i dati a partire dall'allineamento delle curve rappresentative di ampiezza e fase (X_{ratio}) di ogni acquisizione.

Le curve contengono sempre del rumore di fondo, il quale porta alla presenza di numerosi micro picchi che interferiscono nell'interpretazione della posizione dei punti in ascissa. In particolare, esiste un range di tempo nel quale viene dato il via alla registrazione mediante Labview e nel quale viene premuto il pulsante per attivare il segnale di comando (*trigger*).

Per poter limitare questo disturbo è stato messo a punto un algoritmo mediante *Matlab* (Math Works Inc, Natick, Massachusetts, USA) per allineare temporalmente le curve in funzione del primo massimo locale.

2.5 Analisi statistica

In questa sperimentazione ci si è trovati di fronte ad un numero elevato di elementi che descrivono il fenomeno oggetto di studio. Mediante un'*analisi multivariata* è stato possibile gestire simultaneamente più variabili, limitando la complessità del problema. Gli obiettivi principali di questa analisi sono stati:

- l'analisi esplorativa dei dati;
- la discriminazione e la classificazione dei dati, basate rispettivamente sulla clusterizzazione e sulla descrizione supervisionata dei dati;
- la regressione, basata sulla stima dei parametri.

A tal proposito esistono diverse tecniche a supporto. In questo elaborato si farà riferimento a due in particolare: l'Analisi delle Componenti Principali (PCA) e l'Analisi della Regressione (PLS).

2.5.1 Analisi delle Componenti Principali (PCA)

L'Analisi delle Componenti Principali (*Principal Component Analysis* o PCA) è un trattamento matematico volto a ridurre una serie di dati che comportano un gran numero di variabili eventualmente correlate in un insieme di variabili non correlate [3]. Lo scopo è rappresentare la variazione presente nelle tante variabili utilizzando un numero molto più piccolo di "fattori" o "componenti principali". Questa conversione è definita in modo tale che la prima componente principale (o PC1) spieghi la massima percentuale della variabilità presente nei dati. Le componenti successive spiegano invece una sempre minore percentuale della variabilità originale, descrivendo principalmente un contributo degli errori nella misura o informazioni irrilevanti, quindi "rumore" [1]. Questa variabilità è spiegata mediante la *varianza*. Quest'ultima infatti è un indice di dispersione dei dati lungo una particolare direzione.

La metodologia deriva da uno studio alquanto rigoroso che si basa sull'estrazione dell'informazione insita in una matrice iniziale X . I dati di partenza infatti sono organizzati (come indicato in "Generalità") sotto forma matriciale:

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{np} \end{pmatrix}$$

dove :

- le righe rappresentano le n osservazioni effettuate, ovvero le acquisizioni compiute.
- le colonne rappresentano invece le p variabili relative al fenomeno analizzato, ovvero i valori in ampiezza dei punti che descrivono lo spettro.

A partire dalla matrice X , l'analisi delle componenti principali permette di individuare un vettore colonna Y , avente lo stesso numero di n righe in cui gli elementi sono corrispondenti alle nuove *variabili latenti*. Ognuna di queste non è altro che la combinazione lineare delle p variabili di partenza. Ma spieghiamo meglio.

Ci troviamo in una distribuzione multivariata che dipende da parametri quali la *media* (μ , intesa come vettore) e la *matrice di covarianza* (Σ). La nostra matrice di covarianza definisce il grado di correlazione tra le variabili X e Y e sarà quindi non diagonale.

L'operazione di diagonalizzazione avviene mediante cambiamento del sistema di riferimento. In questo nuovo sistema di riferimento, a questa matrice di covarianza ormai diagonale corrispondono degli autovettori ad ognuno dei quali sarà associato un autovalore. Quello che fa questa tecnica quindi è estrarre le componenti principali a partire dal calcolo degli autovalori più alti della matrice di covarianza Σ in modo tale che:

$$Var(Y_1) = \lambda_1 \geq Var(Y_2) = \lambda_2 \geq \dots \geq Var(Y_p) = \lambda_p$$

Alla fine di questo procedimento verranno individuate n variabili in cui la prima componente principale, per esempio, va caratterizzata come:

$$Y_1 = \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \dots + \alpha_p X_p$$

dove tutti i coefficienti prenderanno il nome di *loadings*, che corrisponderanno agli *autovettori* associati agli autovalori. Questi coefficienti rappresenteranno il “peso” che la variabile X-esima possiede per determinare la componente principale Y-esima. Quanto maggiore è il coefficiente α -esimo (in valore assoluto), tanto maggiore sarà il suo contributo all’informazione insita nei dati X. Il loro valore varia da -1 a 1 e possono essere rappresentati graficamente. Con questo tipo di grafico è possibile osservare se due variabili principali, descritte dai rispettivi coefficienti, sono simili (e pertanto forniscono la stessa tipologia di informazione) oppure se sono distanti (e quindi non sono simili). L’obiettivo dunque è ricercare questi coefficienti massimizzando la varianza del vettore sopracitato.

Da un punto di vista geometrico la PCA non è altro che una proiezione ortogonale dallo spazio originale allo spazio delle componenti principali, come mostrato in figura 2.11.

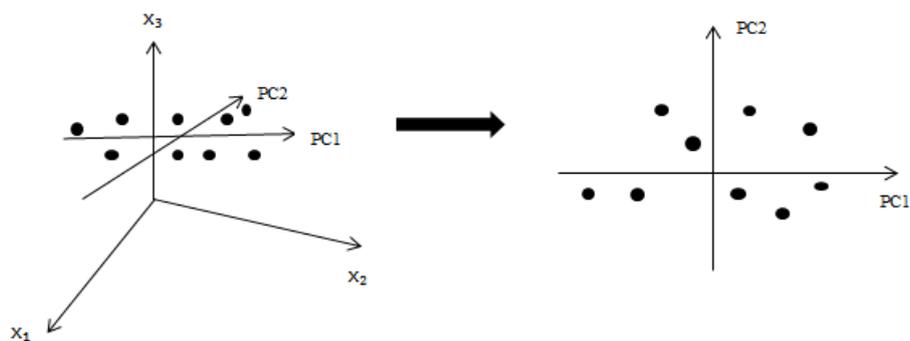


Fig. 2.11 - Modello di componenti principali che consiste in una serie di assi ortogonali, aventi lo stesso origine.

In particolare, nella nuova rappresentazione saranno evidenti le n osservazioni che prenderanno il nome di *scores*, opportunamente numerati o comunque individuabili. Questi “punteggi” danno l’idea di come le osservazioni siano distribuite lungo le componenti principali, quindi di come ognuna venga discriminata o meno dalle altre.

Uno degli obiettivi della PCA è quello di determinare il numero di componenti principali significative, ovvero quelle servono a spiegare la variabilità non legata al

rumore, per visualizzare solo l'informazione rilevante. È opportuno trovare il giusto compromesso per evitare effetti negativi sull'interpretazione. La PLS serve anche a questo.

2.5.2 Analisi della Regressione (PLS)

L'Analisi della Regressione (*Partial Least Squares* o PLS) è una tecnica di analisi che combina le caratteristiche dell'analisi delle componenti principali con la regressione lineare [27]. Essa consiste nel calcolo delle componenti principali sia per la matrice X che per il vettore Y (facendo riferimento alle notazioni riportate nella descrizione della PCA) e procede massimizzando la correlazione tra le componenti principali di Y e le componenti principali di X.

La *regressione* è invece un processo assai più complesso. Con essa si costruisce un modello con il quale si intende predire un insieme di variabili dipendenti (valori del vettore Y) intese come combinazione lineare di un numero elevato di variabili indipendenti (*predittori* o *regressori*, valori della matrice X). La regressione è basata sul fatto che il risultato di ogni misura non è una grandezza deterministica ma una grandezza aleatoria. Il dato sperimentale infatti sarà la somma del modello dello strumento e di un termine aleatorio, che è l'*errore di misura* o *errore statistico* [28], nel modo seguente:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + E$$

dove:

- β_0 è l'intercetta della retta di regressione;
- β_1 è il coefficiente angolare della retta;
- E è l'errore statistico.

La minimizzazione dell'errore può essere compiuta aumentando il grado di complessità della funzione. Ma aumentare il grado di complessità vuol dire aumentare il numero di parametri da stimare. Ecco perché si introduce il concetto di *validazione* con il quale si

intende misurare la capacità di predizione del modello stimato. Il metodo di validazione, chiamato *convalida incrociata* (o *cross-validation*), consiste nel considerare alcuni campioni presi casualmente dal set di dati. Ogni gruppo di campioni, sempre diverso, verrà iterativamente escluso e si cercherà di predire il modello con i gruppi non esclusi [27].

Un caso particolare di validazione è quello relativo alla *Leave-one-out Cross-Validation* che consiste nel ridurre a uno il numero di dati eliminati. Facendo la media degli errori ottenuti si ottiene una buona stima dell'errore di predizione del modello [28]. Si tratta chiaramente di un metodo migliore della semplice *cross-validation*, ma è comunque dispendioso in termini di tempi di calcolo.

Ecco perché nella presente sperimentazione si è effettuata l'analisi dei dati mediante la *k-fold cross-validation*. Con questa metodologia il set di dati è suddiviso, sempre casualmente, in k sottogruppi di uguali dimensioni. Il processo di convalida incrociata viene così ripetuto k volte e ogni volta verrà tolto un sottogruppo. Il valore di k può essere scelto arbitrariamente, considerando che di default vale 10.

Una quantità necessaria per quantificare la bontà del modello di predizione utilizzato è l'*RMSECV* (*Root Mean Square Error of Cross-Validation*), che può cambiare a seconda di quali campioni vengono considerati. Esso si calcola come:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}}$$

dove:

- n indica il numero di dati sui quali si calcola la validazione;
- dove y_i è il valore osservato dell' i -esima osservazione e \hat{y}_i è il valore predetto.

Un altro parametro di cui tener conto è il coefficiente di determinazione R^2 che spiega la proporzione tra la variabilità dei dati e la correttezza del modello utilizzato e si calcola come:

$$R^2 = 1 - \frac{RSS}{TSS}$$

dove:

- $RSS = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$;
- $TSS = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2$, con \bar{y}_i è la media dei dati osservati.

Le regressioni sono state effettuate su alcuni range di frequenza in quanto selezionati sulla base di analisi preliminari condotte esplorando le rappresentazioni dei loadings e degli score e scegliendo il modello più accurato.

Il problema della PLS è quello di scegliere un numero di variabili latenti che eviti l'*overfitting* dei dati, fenomeno che deriva, come detto prima, dal tentativo di minimizzare eccessivamente l'errore. Il numero ottimale di PCs è stato calcolato perciò in accordo con la formula seguente:

$$\text{Numero ottimale di PCs} = \text{Min}[V_0 \times 0.01 \times a + V_a]$$

dove :

- a è la dimensione corrente (numero PC);
- V_a è la varianza residua totale per la dimensione a considerata;
- V_0 è la varianza totale con numero di PC pari a zero.

Capitolo 3

Risultati e Discussione

3.1 Risultati delle prove sui campioni omogenei

Nel seguente capitolo saranno riportati e discussi i principali risultati ottenuti durante le prove sperimentali, dagli andamenti dei segnali registrati in fase di acquisizione ai modelli costruiti con i dati raccolti. Gli spettri di frequenza, in modulo e fase, del rapporto X_{ratio} tra l'onda trasmessa e l'onda riflessa dal terreno, sono mostrati rispettivamente in fig. 3.1 e 3.2 per il terreno argilloso, fig. 3.3 e 3.4 per l'argilla espansa e fig. 3.5 e 3.6 per la sabbia. Come può essere osservato, per tutti i tre tipi di terreno, un differente contenuto di umidità (%) comporta dei cambiamenti in entrambe le curve. Questi cambiamenti possono essere meglio apprezzati in alcuni range di frequenza, selezionati esplorando i parametri di interesse in fase di regressione (loadings e score) e scegliendo quelli che potevano stimare un modello più accurato.

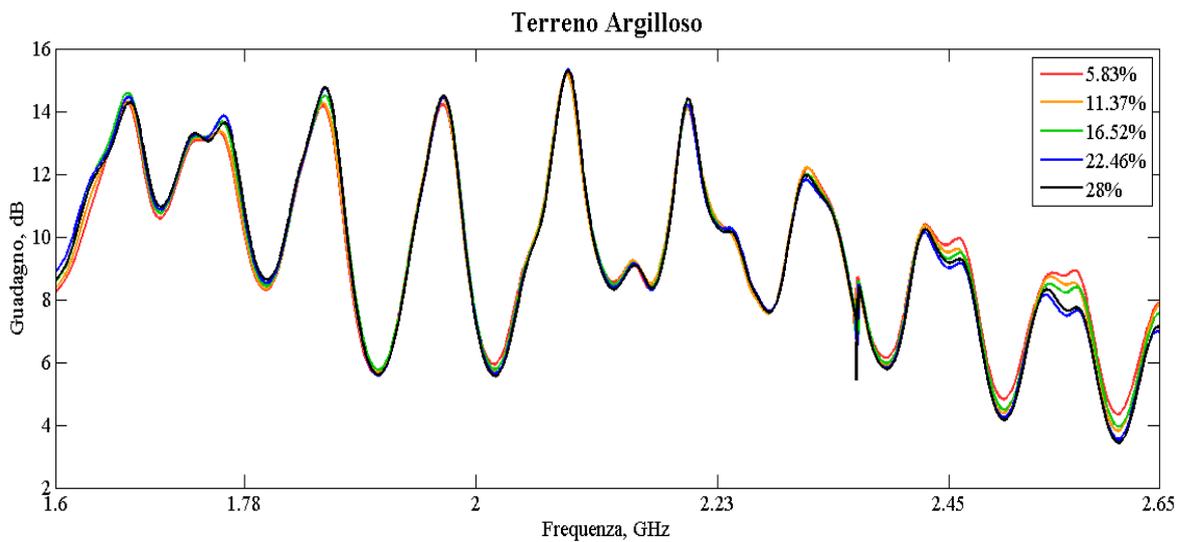


Fig. 3.1 – Spettro di frequenza del modulo del rapporto X_{ratio} del terreno argilloso.

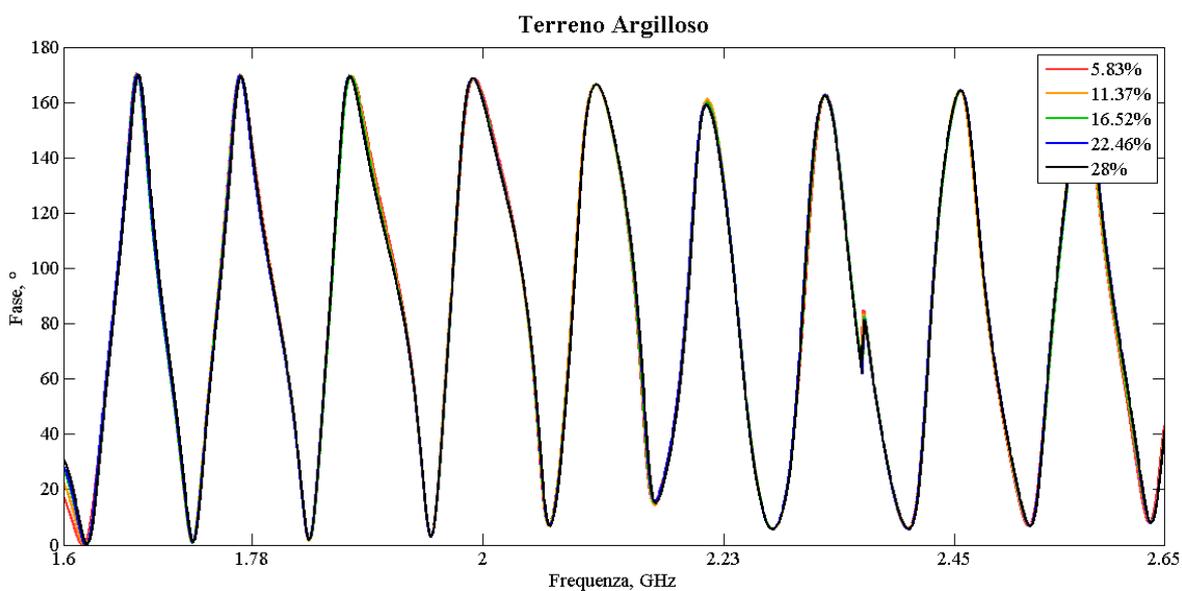


Fig. 3.2 – Spettro di frequenza della fase del rapporto X_{ratio} del terreno argilloso.

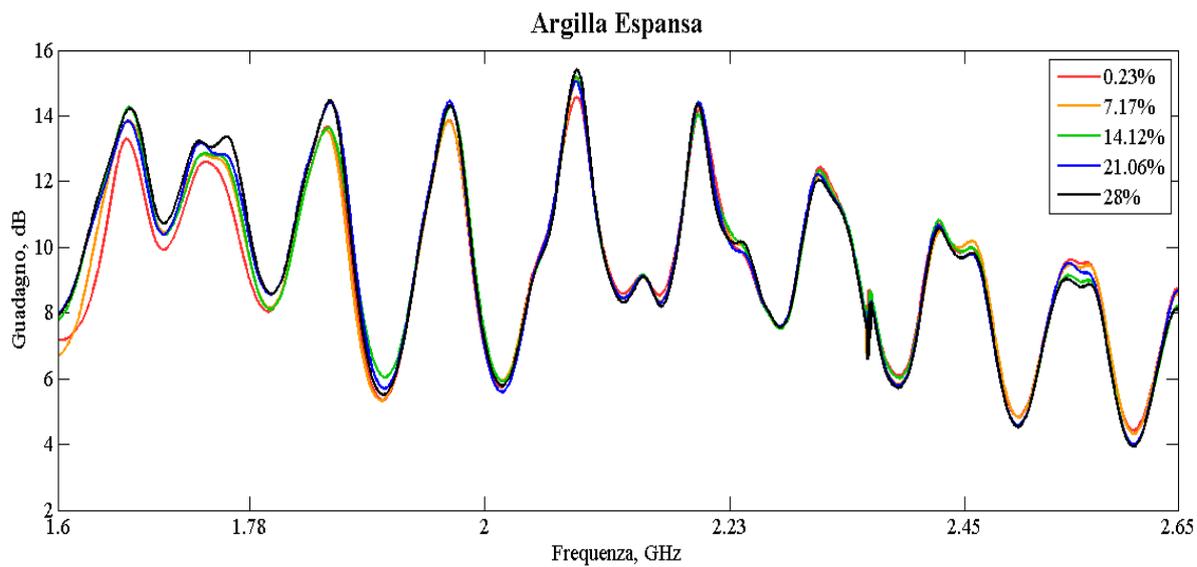


Fig. 3.3 – Spettro di frequenza del guadagno del rapporto X_{ratio} dell'argilla espansa.

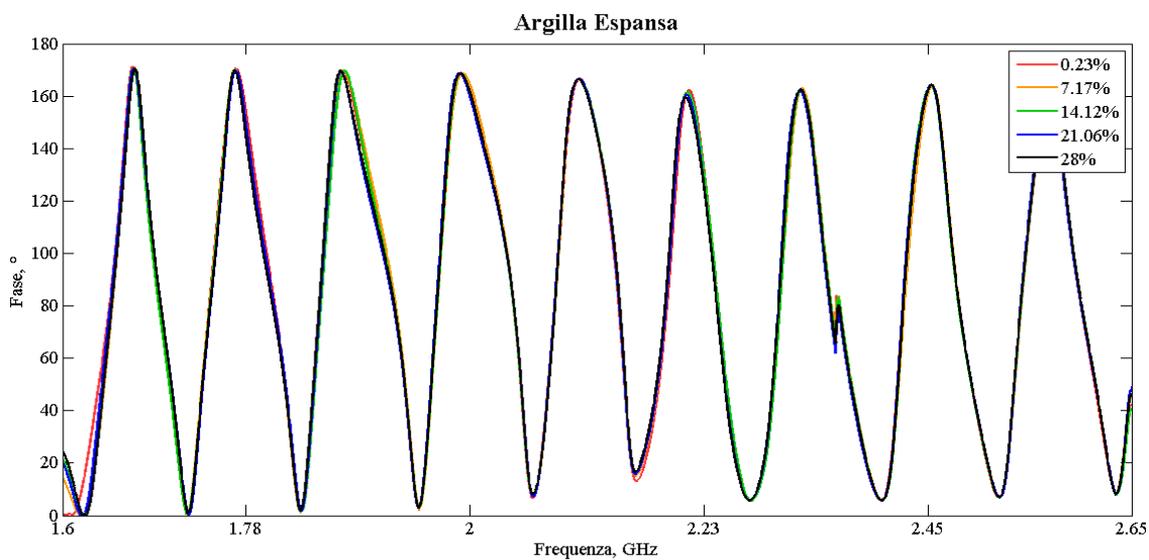


Fig. 3.4 – Spettro di frequenza della fase del rapporto X_{ratio} dell'argilla espansa.

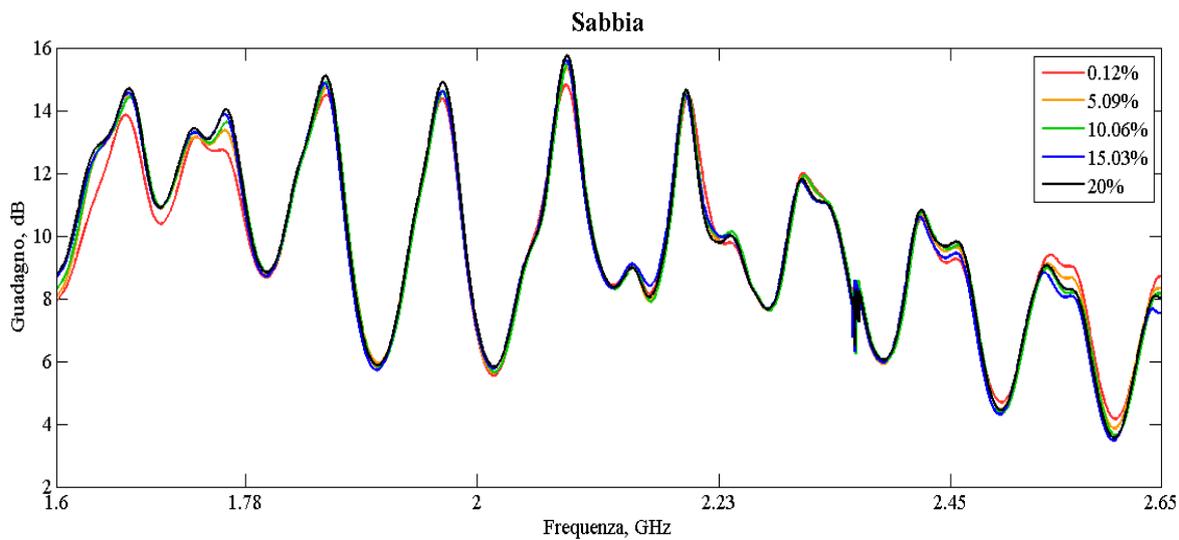


Fig. 3.5 – Spettro di frequenza del guadagno del rapporto X_{ratio} della sabbia.

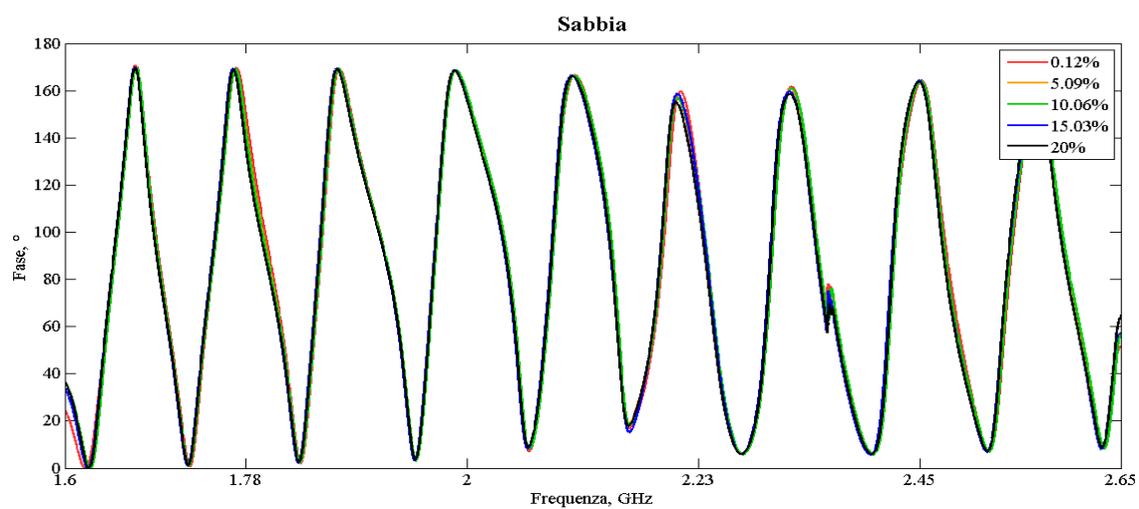


Fig. 3.6 – Spettro di frequenza della fase del rapporto X_{ratio} della sabbia.

I risultati mostrano significative variazioni nell'informazione del modulo del rapporto X_{ratio} su particolari range di frequenza per tutti i tre tipi di terreno. In particolare 1.6-1.8 GHz per l'argilla espansa e la sabbia e 2.4-2.6 GHz per il terreno argilloso (vedi fig. 3.7). E' evidente come le curve siano ben differenziate e disposte secondo un ordine sensato di percentuale di umidità, soprattutto per l'argilla espansa e la sabbia. Per il terreno argilloso il discorso è un po' più complicato: fenomeni di rigonfiamento del terreno ad elevata umidità potrebbero spiegare perché la curva relativa al 28% di umidità (curva nera) sia interposta tra la curva al 22.46% di umidità (curva blu) e la curva al 16.52% di umidità (curva verde).

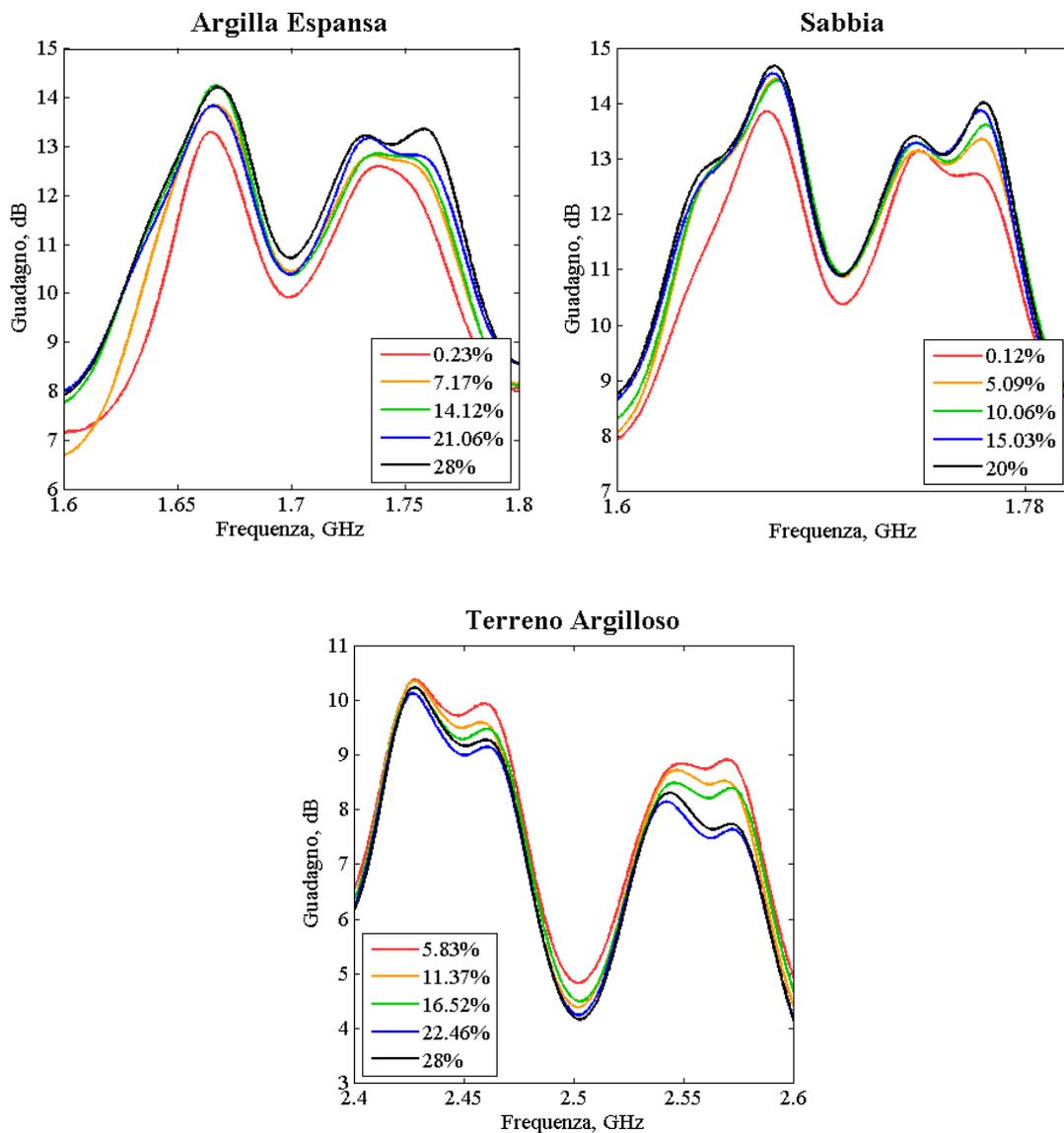


Fig. 3.7 – Modulo di X_{ratio} in range di frequenza selezionati per i tre terreni.

La tabella 3.1 mostra i principali risultati ottenuti mediante l'analisi di regressione (PLS) condotta sugli spettri di ampiezza e fase relativi ad ogni tipologia di terreno. Ad ogni risultato corrisponde un preciso numero di PCs (componenti principali della PLS) scelto in modo tale che la varianza descritta fosse tale da evitare *overfitting*. I più alti valori del coefficiente di determinazione R^2 sono stati registrati per i modelli di predizione di umidità (%) di sabbia e argilla espansa. In particolare, in validazione questi valori di R^2 sono rispettivamente 0.989 (con un RMSE¹ = 0.8%; “guadagno”) e 0.988 (con un RMSE = 1.1%; “fase”). Per il terreno argilloso, sempre in validazione, sono stati invece calcolati dei valori di R^2 leggermente più bassi. Il più alto valore registrato infatti è pari a 0.941 (con un RMSE = 1.9%; “guadagno”), indice di una lieve diminuzione dell'accuratezza. Questo comportamento potrebbe essere attribuito ai fenomeni di rigonfiamento del terreno osservati nei campioni caratterizzati da un elevato contenuto di umidità, come già detto precedentemente.

Tipo di terreno	Parametri	Range di frequenza (GHz)	Regressione PLS					
			Calibrazione			Segmented Cross Validation		
			PCs	R^2	RMSE	PCs	R^2	RMSE
Sabbia	Guadagno	1.55-1.7	4	0.992	0.6	4	0.989	0.8
	Fase	1.55-1.7	4	0.988	0.8	4	0.983	0.9
Argilla espansa	Guadagno	1.55-1.7	4	0.988	1.1	4	0.982	1.4
	Fase	1.55-1.7	5	0.991	0.9	5	0.988	1.1
Terreno Argilloso	Guadagno	1.55-2.68	5	0.982	1.0	5	0.941	1.9
	Fase	1.55-2.68	4	0.953	1.7	4	0.934	2.1

Tab. 3.1 – Risultati della regressione PLS condotta sui terreni analizzati. PCs=Componenti PLS

Il rigonfiamento, in accordo con i risultati rilevati dal modello, potrebbe spiegare degli andamenti anomali rilevati nelle forme d'onda del guadagno come si vede in figura 3.7. Infatti la curva relativa alla media dei campioni più umidi (28%) si trova proprio al di sotto della curva relativa alla media dei campioni umidi al 22.46%.

In figura 3.8 vengono riportati gli andamenti dei *loadings* calcolati mediante analisi delle componenti principali (PCA) relativamente alla matrice X dell'argilla espansa. Le due curve (coefficienti della PC1, coefficienti della PC2) danno un'idea della relazione tra le componenti. Nel range di frequenza compreso tra 1.6 e 1.8 GHz si può evidenziare un discostamento delle curve dovuto all'informazione diversa che le due variabili possiedono.

Relativamente all'argilla espansa, vengono riportati anche gli *scores* (vedi fig. 3.9) in funzione della PC1 e della PC2. Rappresentativi delle osservazioni compiute, questi "punteggi" sono, come si vede dalla figura, distribuiti lungo la prima componente principale secondo un ordine crescente di umidità. Essi risultano inoltre ben differenziati in funzione della loro percentuale di umidità. Questa classificazione, decisamente migliorata con una rappresentazione bi-dimensionale PC1-PC2, è indice di come i campioni siano riconosciuti come tali quasi indipendentemente dai rimescolamenti e dalle rotazioni del contenitore e quindi di come la misura sia ripetibile.

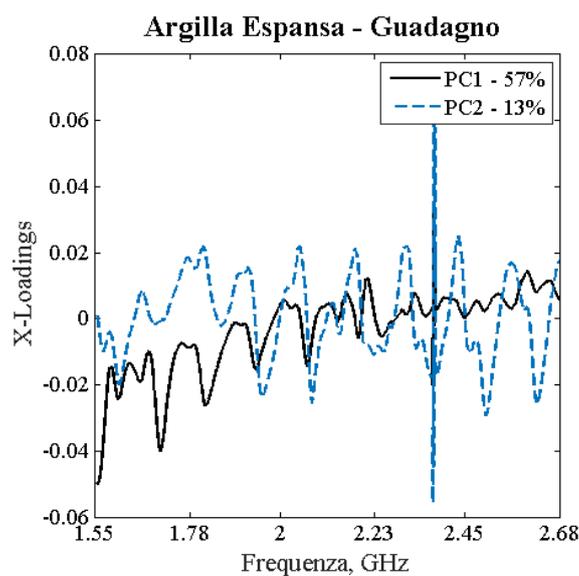


Fig. 3.8 – Spettro dei loadings della matrice X.

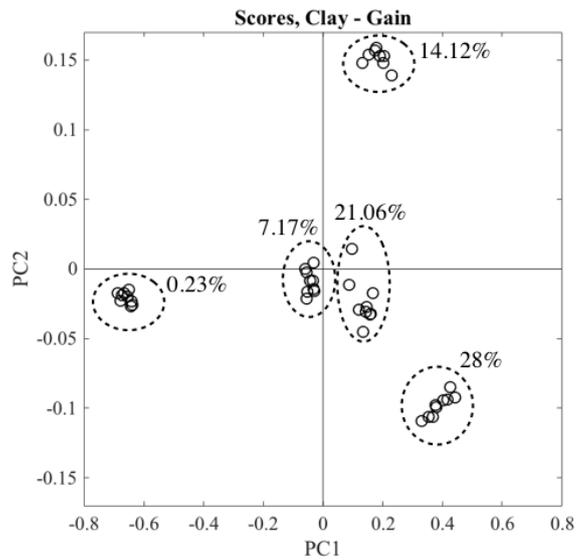


Fig. 3.9 – Distribuzione dei “punteggi” in funzione della PC1 e della PC2 per argilla espansa.

Di seguito le rette di regressione costruite in validazione per stimare il modello di umidità di terreno argilloso, argilla espansa, sabbia. Questi modelli mostrano dei risultati molto promettenti soprattutto per argilla espansa e sabbia per le quali la dispersione dei punti è minore rispetto a quella rilevata per il terreno argilloso.

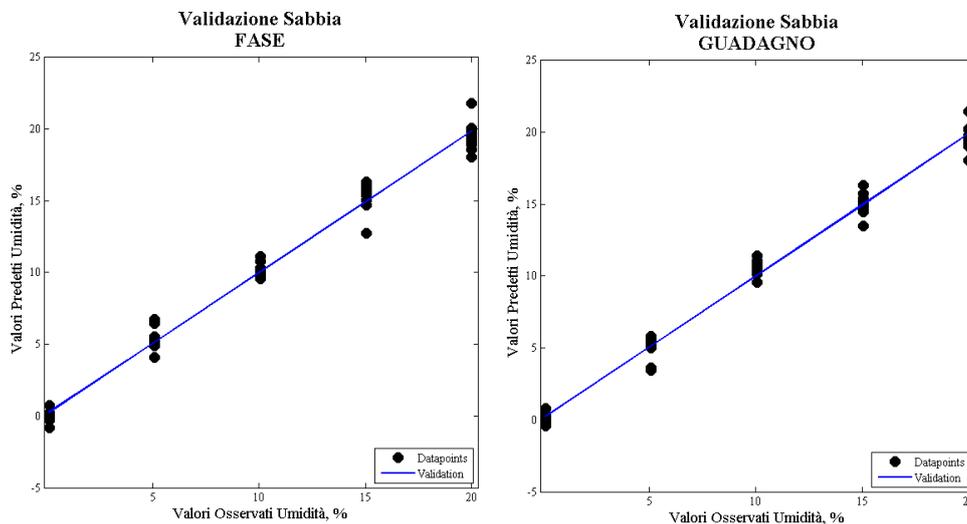


Fig. 3.10 – Rette di regressione con un RMSE non superiore al 0.9% per la sabbia.

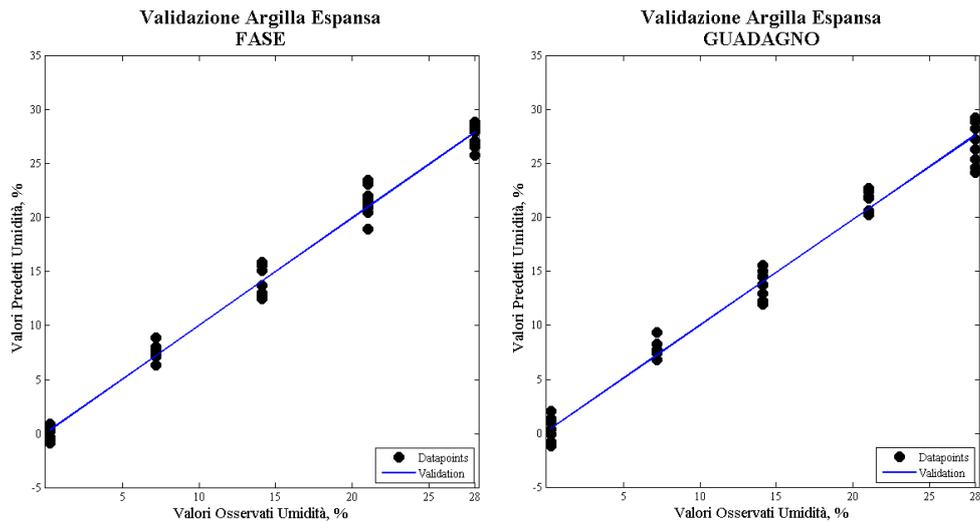


Fig. 3.11 – Rette di regressione con un RMSE non superiore al 1.4% per l'argilla espansa.

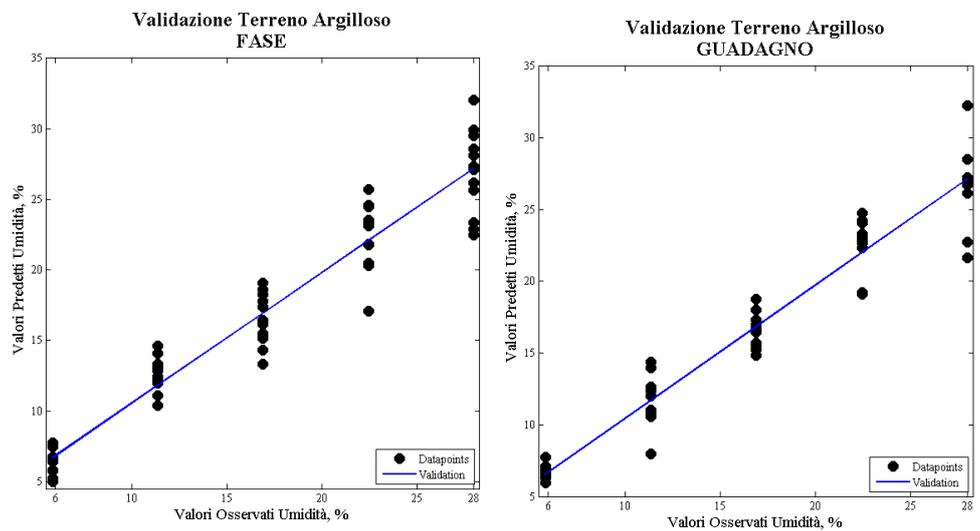


Fig. 3.12 – Rette di regressione con un RMSE non superiore al 2.1% per il terreno argilloso.

La dispersione dei punti, più accentuata per il terreno argilloso, indica comunque una discrepanza accettabile tra i valori dei dati osservati e i valori dei dati predetti.

3.2 Risultati delle prove sui campioni stratificati

Nella tabella 3.2 sono riportati i principali risultati ottenuti conducendo l'analisi in regressione (PLS) sui campioni stratificati.

Per tutti e tre i tipi di terreno, come previsto, le stime migliori sono quelle relative al contenuto di umidità del primo strato. Sono stati osservati in particolare i valori del coefficiente di determinazione R^2 fino a 0.963 (RMSE=1.3%; "fase") 0.979 (RMSE=1.4%; "fase") 0.947 (RMSE=1.7%; "fase") rispettivamente per sabbia, argilla espansa e terreno argilloso.

Il contenuto di umidità del secondo strato di terreno appare poter essere stimato con valori di R^2 inferiori rispetto a quelli osservati per il primo strato: fino a 0.902 (RMSE=2.1%; "guadagno") 0.962 (RMSE=1.9%; "guadagno") 0.906 (RMSE=2.3%; "fase"), rispettivamente per sabbia, argilla espansa e terreno. Tali stime possono essere ritenute accettabili considerando che nella forma d'onda è contenuta anche l'informazione relativa al primo strato. Quest'ultimo infatti prevale sul secondo.

Confrontando le tabelle 3.1 e 3.2, si può notare che i valori di R^2 migliori del primo strato sono leggermente inferiori rispetto ai valori di R^2 osservati sui campioni singoli alla stessa umidità. Questo andrebbe ad indicare una certa influenza del secondo strato sulla stima.

In generale i risultati migliori sono stati ottenuti per l'argilla espansa di cui sono riportate le curve dei "predetti vs osservati" in validazione relative al primo e al secondo strato sia per il guadagno che per la fase (fig. 3.13 per il guadagno, fig. 3.14 per la fase).

Tipi di terreno	Parametri	Strato	Range di frequenza (GHz)	Regressione PLS					
				Calibrazione			Segmented Cross Validation		
				PCs	R ²	RMSE (%)	PCs	R ²	RMSE (%)
Sabbia	Guadagno	1	1.55-1.7	2	0.948	1.5	2	0.942	1.7
		2	1.55-1.7	7	0.933	1.8	7	0.902	2.1
	Fase	1	1.55-1.7	5	0.970	1.2	5	0.963	1.3
		2	1.55-1.7	8	0.940	1.7	8	0.902	2.1
Argilla Espansa	Guadagno	1	1.55-1.7	5	0.982	1.3	5	0.977	1.4
		2	1.55-1.7	4	0.968	1.7	4	0.962	1.9
	Fase	1	1.55-1.7	5	0.982	1.3	5	0.979	1.4
		2	1.55-1.7	3	0.922	2.6	3	0.913	2.8
Terreno Argilloso	Guadagno	1	1.55-2.68	3	0.956	1.6	3	0.946	1.8
		2	1.55-2.68	7	0.952	0.7	7	0.902	2.4
	Fase	1	1.55-2.68	4	0.961	1.5	4	0.947	1.7
		2	1.55-2.68	8	0.954	1.6	8	0.906	2.3

Tab. 3.2 - Risultati della regressione PLS condotta sui terreni stratificati. PCs=Componenti PLS

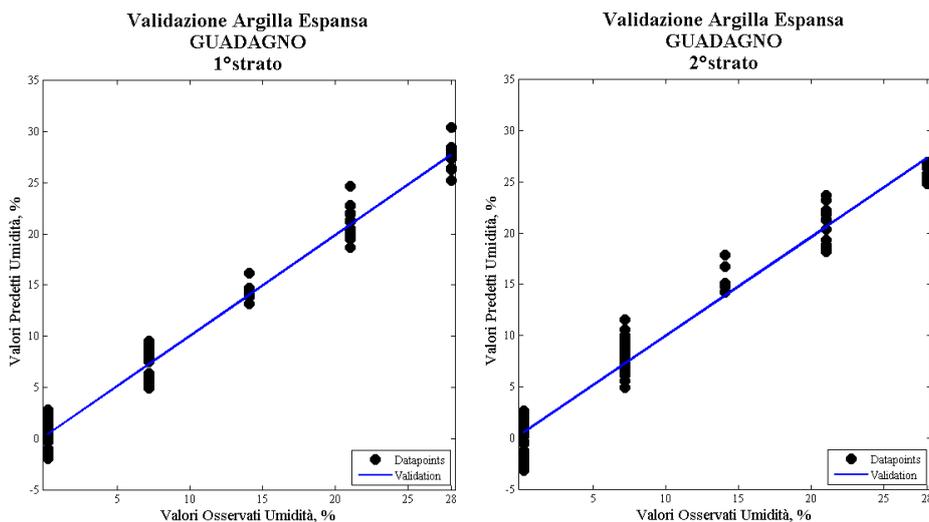


Fig. 3.13 – Rette di regressione per il guadagno dell'argilla espansa stratificata con un RMSE non superiore al 1.9%.

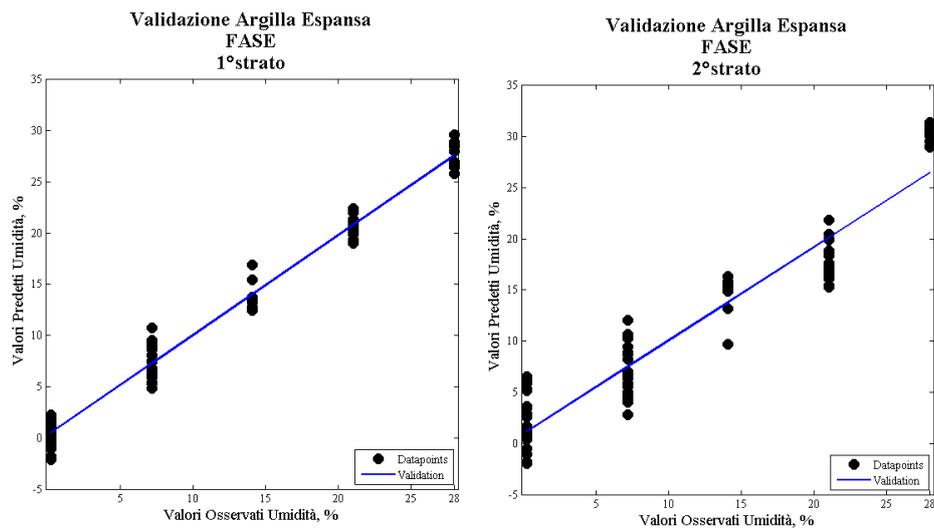


Fig. 3.14 – Rette di regressione per la fase dell'argilla espansa stratificata con un RMSE non superiore al 2.8%.

Sostanzialmente, i risultati ottenuti su queste prove eseguite sui campioni stratificati mostrano una buona stima del grado di umidità lungo una profondità di 14 cm.

Capitolo 4

Conclusioni e Sviluppi Futuri

I risultati sperimentali, discussi in maniera dettagliata nella sezione precedente, hanno evidenziato, già dagli andamenti dei segnali di ampiezza e fase registrati nel corso delle acquisizioni, una buona discriminazione tra terreni aventi un differente contenuto di umidità (%).

L'ipotesi di un buon funzionamento del sensore è stata avvalorata dall'approccio statistico dei dati secondo un'analisi multivariata. Essa ha consentito di ottenere infatti un'informazione significativa mediante la costruzione di modelli lineari, capaci di stimare l'umidità soprattutto per i campioni omogenei. Valori di R^2 come quelli evidenziati in fase di validazione, soprattutto per la sabbia ($=0.989$), sono indicativi di una buona proporzione tra la variabilità dei dati e la correttezza del modello.

Le ulteriori analisi di regressione per le prove eseguite sui campioni stratificati suggeriscono anch'esse una buona predizione del contenuto di umidità principalmente per il primo strato, sebbene si registri un lieve calo in termini di valori di R^2 .

I modelli costruiti con la regressione pertanto permettono di stimare l'umidità come il risultato di una relazione lineare in cui ci sono dei coefficienti moltiplicativi che costituiscono l'informazione necessaria alla costruzione del modello stesso. In tal senso, un approccio di tipo non lineare potrebbe minimizzare l'errore di stima a discapito della semplicità, mentre un approccio di tipo multilineare (ovvero la regressione *N-way Partial Least Squares* o N-PLS) potrebbe ottimizzare il modello grazie alla possibilità di gestire simultaneamente sia l'informazione del guadagno che quella della fase.

Gli obiettivi raggiunti con questo studio sono stati quindi molteplici, dall'approvazione dell'ipotesi di partenza, ovvero la caratterizzazione dell'umidità del terreno, alla messa in atto di buoni presupposti per sviluppi futuri. Infatti, sebbene queste siano da considerarsi delle prove preliminari ed esplorative, il sistema sembra vantaggioso nella prospettiva di essere implementato successivamente con le opportune migliorie. Una fra queste potrebbe essere l'arricchimento del modello con l'esecuzione di prove su campo, per le quali si andrebbero a considerare variabili aggiuntive come la temperatura. Un ulteriore potenziamento potrebbe essere l'integrazione del sistema di generazione del segnale e del sistema di comparazione e acquisizione di ampiezza e fase al fine di rendere il dispositivo autonomo e portatile.

In conclusione, questo elaborato è volto a descrivere un'esperienza verso l'implementazione di un dispositivo per un impiego mirato dell'irrigazione, per un'indagine non invasiva, che sia di facile gestione nonché a costo contenuto.

Bibliografia

- [1] Giuseppe Conciauro, *Introduzione alle onde elettromagnetiche*, McGraw-Hill, 1993.
- [2] Agilent Technologies, *Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials*, Application note, 2006.
- [3] Mario Bon, *Proprietà dielettriche dei materiali*, disponibile su: http://mariobon.com/Glossario/___Materiali/Materiali_Proprieta_Dielettriche.pdf
- [4] Eugenio Bartoletti, *Caratterizzazione sperimentale delle proprietà elettromagnetiche di materiali plastici mediante metodi risonanti*, Tesi di Laurea, 2013.
- [5] Luigi Giardini, *Agronomia Generale Ambientale e Aziendale*. Quinta Edizione, Pàtron, 2002, 103-287.
- [6] Günther Pertoll, *Misurazione dell'umidità del suolo come supporto all'irrigazione in viticoltura*, Centro di Sperimentazione Agraria di Laimburg, 2008.
- [7] Roger Hartmann, *Soil physical properties: Soil Water Potential*, International Centre for Theoretical Physics, Trieste, 2003.
- [8] Cihlar, Josef; Ulaby, Fawwaz Tayssir, *Dielectric properties of soils as a function of moisture content*, 1974.
- [9] Hallikainen, Martti T., et al. *Microwave dielectric behavior of wet soil-part 1: Empirical models and experimental observations*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1985, 1: 25-34.
- [10] Dobson, Myron C., et al., *Microwave dielectric behavior of wet soil-Part II: Dielectric mixing models*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1985, 1: 35-46.
- [11] J. Ross Macdonald, *Impedance Spectroscopy*, Annals of Biomedical Engineering, Vol. 20, pp. 289-305, 1992.

- [12] Evgenij Barsoukov; J. Ross Macdonald, *Impedance spectroscopy: theory, experiment, and applications*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005.
- [13] Emanuele Moretti, *Progetto e realizzazione di un amplificatore integrato a modulazione/demodulazione per spettroscopia di impedenza a banda ampia*, Tesi di Laurea, 2011.
- [14] Giulia Luciani, *Strumento per la diagnosi di carcinoma BCC basato su spettroscopia impedenziometrica*, Tesi di Laurea, 2015.
- [15] Monica Di Prinzio, *Georadar: applicazioni ingegneristiche finalizzate alla difesa idraulica del territorio*, Tesi di Laurea, 2008.
- [16] Elena Pettinelli; Elisabetta Mattei; Andrea Di Matteo, *Metodologie elettromagnetiche per la geofisica: proprietà elettromagnetiche di suoli e rocce*, disponibile su:
https://www.google.it/search?q=METODOLOGIE+ELETTROMAGNETICHE+PER+LA+GEOFISICA&rlz=1C1QJDB_itIT695IT695&oq=METODOLOGIE+ELETTROMAGNETICHE+PER+LA+GEOFISICA&aqs=chrome.69i57.492j0j4&sourceid=chrome&ie=UTF-8
- [17] Eugenio Bartoletti, *Caratterizzazione sperimentale delle proprietà elettromagnetiche di materiali plastici mediante metodi risonanti*, Tesi di Laurea, 2013.
- [18] Giovanni Leucci, *I metodi elettromagnetico impulsivo, elettrico e sismico tomografico a rifrazione per lo studio di problematiche ambientali: sviluppi metodologici e applicazioni*, Tesi di Dottorato, 2003.
- [19] Catalogo web Ecosearch disponibile su:
[http://www.ecosearch.info/sites/default/files/prodotti_documentazione/5.%20Umisuolo%20e%20gas%20dal%20suolo%20\(635KB\).pdf](http://www.ecosearch.info/sites/default/files/prodotti_documentazione/5.%20Umisuolo%20e%20gas%20dal%20suolo%20(635KB).pdf)
- [20] Antonella Marsili, *Analisi statistica della dinamica di campi di umidità del suolo in terreno agrario*, Tesi di Laurea, 2013.
- [21] Hensley, David; Deputy, James., *Using tensiometers for measuring soil water and scheduling irrigation*, Landscape, 1999, 50.10.
- [22] Bittelli Marco, *Measuring soil water content: A review*, HortTechnology (rivista), 2011, 21.3: 293-300.
- [23] Charlesworth Phillip, *Soil Water Monitoring: An information package 2nd Edition*, Irrigation Insights Number 1, National Program for Sustainable Irrigation, 2005.

- [24] *New Dielectric Sensors and Sensing Techniques for Soil and Snow Moisture Measurements*. Condotto da: Markus Stacheder, Franz Koeniger and Rainer Schuhmann presso Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Competence Centre for Material Moisture (CMM), c/o Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Funktionelle Grenzflächen, 2009.
- [25] Analog Devices, AD8302 (RF/IF Gain and Phase Detector) datasheet, 2002, rev.A.
- [26] HP 8350B Sweep Oscillator: Operating and Service Manual, 1992.
- [27] D'Andria P., *Analisi delle componenti principali*, Tesina in Complementi di Probabilità e Statistica, 2006.
- [28] E. Martinelli & iC. Di Natale, *Introduzione al trattamento Statistico dei Dati*, TorVergata.
- [29] *Analizzatore di materiali per spettroscopia nelle microonde*,
Brevettato da: Luigi Ragni, Aldo Romani, Annachiara Berardinelli, Chiara Cevoli, Matteo Filippi, Eleonora Iaccheri; Università di Bologna.
Codice: WO2015107455 A1, 2015.