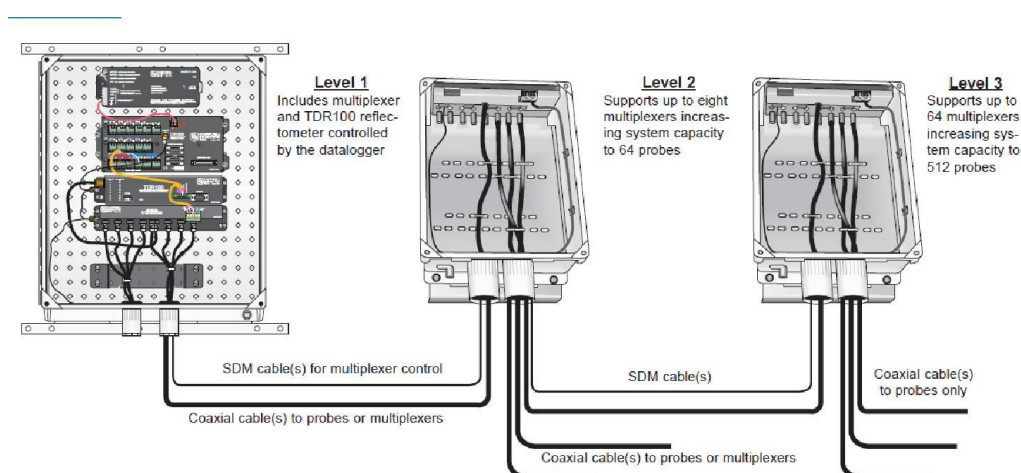


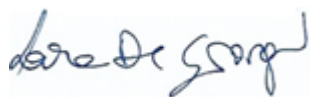
CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE

Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale



STUDIO DI FATTIBILITÀ DI UN SISTEMA MULTICANALE PER LA MISURA PUNTUALE E DISTRIBUITA DELLE CARATTERISTICHE DI IMPEDENZA ELETTRICA DEL SUOLO ATTRAVERSO TECNICA DELLA RIFLETTOMETRIA NEL DOMINIO DEL TEMPO

Lara De Giorgi



Il Direttore
Dott.ssa Costanza Miliani

PREMESSA

Il sistema proposto si basa sulla tecnica della riflettometria a microonde. Un segnale elettromagnetico (EM) generato da un riflettometro viene inviato attraverso un opportuno elemento sensibile (sonda, antenna, ecc.), posta a contatto con l'oggetto che si vuole caratterizzare. Una porzione del segnale EM viene riflesso verso lo strumento e, attraverso un'opportuna elaborazione del segnale riflesso, è possibile risalire alle caratteristiche di interesse. Questa tecnica essenzialmente sulle diverse modalità di risposta (in termini di segnale EM riflesso) associata a sistemi con caratteristiche dielettriche diverse.

INTRODUZIONE

La riflettometria nel dominio del tempo (*time domain reflectometry*, TDR) è una tecnica di indagine elettromagnetica che, grazie alla sua elevata flessibilità, trova applicazione nei più svariati settori, ad esempio

- nel campo dell'idrogeologia, del monitoraggio ambientale e del monitoraggio dei terreni: effettuazione di misure di contenuto di acqua nel terreno [1], conducibilità elettrica del suolo [2], rilevazione della presenza di sostanze inquinanti [3], liquefazione del sottosuolo [4], caratterizzazione dei costituenti del terreno [5].
- per controllo in remoto di liquidi, solidi, granulari o compositi: rilevazione delle quantità di sostanze (livello liquidi, granulari, ecc.) [6], individuazione di interfasi presenti (fanghi depositati, sedimenti, emulsioni superficiali, presenza di acqua, ecc.), rilevazione di parametri associabili alla qualità delle sostanze [7], la conducibilità elettrica [8].
- nelle applicazioni di monitoraggio di deformazioni strutturali: localizzazione e caratterizzazione di sollecitazioni e deformazioni presenti [9], con applicazione anche negli strati rocciosi, per esempio al fine di prevedere frane [10].
- nel campo delle telecomunicazioni e dell'impiantistica elettrica: localizzazione spaziale di guasti nei cavi [11] e per la caratterizzazione di dispositivi elettronici.
- Nel settore della ricerca perdite in condotte idriche e fognarie interrato [12].

Come comune denominatore, alla base di tutti i sistemi di misura TDR relativi alle suddette applicazioni, ci sono misure di impedenza elettrica (Z). Infatti, come sarà chiarito nel seguito di questo documento, l'output diretto di una misura TDR è un parametro detto coefficiente di riflessione nel dominio del tempo (ρ) che è intrinsecamente legato all'impedenza elettrica.

Come sarà dettagliato nel seguito del presente documento, i sistemi di misura basati sulla TDR garantiscono un trade off ottimale tra accuratezza di misura, costi di implementazione e facilità d'utilizzo. Essi sono caratterizzati da una struttura modulare che permette di adattarli alle specifiche esigenze applicative. Inoltre, la possibilità di impiegare sonde appositamente progettate e realizzate ad-hoc per l'applicazione desiderata permette di adattare i sistemi TDR alle specifiche condizioni operative (ad esempio, si possono realizzare sonde adatte a resistere in ambienti aggressivi o sonde per monitoraggi non invasivi, ecc.).

Un'altra caratteristica molto utile nei sistemi TDR consiste nella possibilità di automatizzazione e controllo da remoto, attraverso rete GSM/GPRS (o rete satellitare) o via internet. Infine, attraverso

NAPOLI

Sede centrale

Via Cardinale Guglielmo Sanfelice, 8 - 80134 NA

Email segreteria.ispc@ispc.cnr.it - segreteria.direzione@ispc.cnr.it

www.ispc.cnr.it

sistemi di multiplexing, è possibile controllare/impiegare contemporaneamente fino a 512 sonde indipendenti con un singolo strumento di misura, permettendo un notevole abbattimento dei costi di implementazione di un sistema di misura TDR.

Alla luce delle considerazioni di cui sopra, nel presente brevetto, si è individuata e descritta dettagliatamente – con specifica definizione di tutte le componenti hardware e software- una soluzione tecnologica ottimale, per la misura ed il monitoraggio puntuale e distribuito delle proprietà impedenziometriche del suolo e di materiali costituenti i beni culturali, attraverso la tecnica TDR.

Nello specifico, dopo aver fornito una dettagliata descrizione del principio di funzionamento del sistema, verranno descritti gli elementi tipici di un sistema di misura basato sulla TDR. Si passerà quindi a descrivere la configurazione individuata per la realizzazione di un sistema per la misura puntuale e distribuita delle caratteristiche di impedenza elettrica del suolo e di materiali costituenti i beni culturali. Infine, saranno presentati dei casi studio relativi all'impiego della tecnica TDR per misure di resistività elettrica di terreni, per misure di umidità dei terreni e per misure non invasive per la caratterizzazione dielettrica di materiali.

PRINCIPI E MODALITÀ DI FUNZIONAMENTO DELLA TECNICA TDR

La TDR è una tecnica di indagine e diagnostica che sfrutta l'interazione tra campo elettromagnetico (EM) e materia. Tipicamente, nelle misure TDR, un segnale EM viene fatto propagare attraverso una sonda (sensing element o elemento sensibile) inserita o posta in prossimità nel materiale/sistema che si vuole analizzare. Le variazioni di impedenza elettrica (Z) incontrate dal segnale EM lungo il proprio "percorso" (dovute, ad esempio, alla variazione delle caratteristiche dielettriche del sistema), provocano la riflessione di parte del segnale stesso. L'analisi del segnale riflesso consente di ricavare informazioni oltre che sull'impedenza elettrica del materiale, anche sulle caratteristiche dielettriche/elettriche del materiale/sistema in esame (permittività dielettrica, conducibilità elettrica, etc.), nonché su altre proprietà (non necessariamente di natura elettrica) del materiale/sistema investigato.

Dal punto di vista hardware, gli elementi fondamentali di un sistema di misura TDR sono due: riflettometro (è lo strumento di misura vero e proprio) e sonda. A questi elementi, va aggiunto un pc/elaboratore per la gestione e/o l'elaborazione dei dati di misura. Inoltre, come si vedrà nel prosieguo di questo documento, un sistema di misura TDR può essere dotato con "accessori" dedicati a specifici task, quali ad esempio multiplexer (per usare contemporaneamente più sonde indipendenti con un unico strumento di misura), moduli per la telegestione (es. moduli di connessione wi fi), etc. Dal punto di vista software, generalmente gli strumenti TDR sono forniti dal costruttore già dotati di un software per l'acquisizione dei dati. Di solito, l'output "diretto" di una misura TDR è un riflettogramma, ovvero una curva che riporta il coefficiente di riflessione (ρ) in funzione del tempo t , analogamente, della distanza apparente percorsa dal segnale EM di test (d^{app}). Pertanto, al fine di risalire alle informazioni di interesse sul sistema in esame, è necessario eseguire una elaborazione sui dati di misura acquisiti dallo strumento TDR. A tal fine, è opportuno sviluppare algoritmi ad hoc (adatti alla specifica esigenza applicativa), che elaborano automaticamente il riflettogramma e restituiscono in tempo reale il valore della grandezza di interesse.

NAPOLI

Sede centrale

Via Cardinale Guglielmo Sanfelice, 8 - 80134 NA

Email segreteria.ispc@ispc.cnr.it - segreteria.direzione@ispc.cnr.it

www.ispc.cnr.it

IL RIFLETTOMETRO

Il riflettometro, generalmente, contiene sia l'elettronica preposta alla generazione del segnale EM di test, sia quella preposta all'acquisizione del segnale EM riflesso (in alternativa, è possibile utilizzare un generatore di segnale per la generazione del segnale EM di test ed un oscilloscopio per la misura del segnale EM riflesso). Il segnale di test generato dal riflettometro è, tipicamente, un segnale di tensione a gradino (come quello schematizzato in Fig. 1), caratterizzato da un tempo di salita (rise time, t_r) che è direttamente associato al contenuto in frequenza (BW) del segnale stesso secondo la seguente relazione:

$$BW \approx \frac{0.35}{t_r} \quad (1)$$

Negli strumenti TDR, t_r è dell'ordine dei picosecondi o dei nanosecondi: a tempi di salita minori, corrispondono prestazioni migliori e costi maggiori. Nelle misure TDR è molto importante tenere conto della relazione (1); infatti, attraverso un'opportuna elaborazione dei dati TDR (basata sulla ben nota trasformata di Fourier), è possibile risalire ad informazioni e grandezze definite nel dominio della frequenza. Pertanto, conoscere la BW del riflettometro utilizzato, permette di definire la banda in frequenza in cui è possibile ottenere dei risultati significativi.

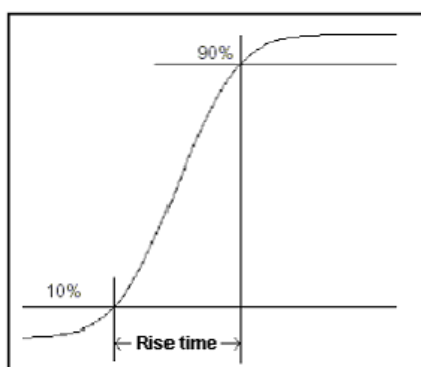


Figura 1 – Schematizzazione del segnale EM di test generato da uno strumento TDR.

In commercio, sono disponibili diverse tipologie di strumenti TDR ed una classificazione generale può essere fatta distinguendo tra strumenti da banco (generalmente strumenti dalle prestazioni più elevate e dedicati a misure da laboratorio) e strumenti portatili (generalmente adatti ad essere impiegati per misure in situ). Inoltre, fanno parte della categoria di riflettometri portatili, i riflettometri ruggedized (ovvero, irrobustiti), adatti a resistere in condizioni ambientali e/o operative "ostili".

Chiaramente, la scelta di quale tipologia di riflettometro impiegare dipende dalle specifiche esigenze applicative. A titolo esemplificativo, la Fig. 2 mostra l'immagine uno riflettometro da banco e di uno portatile.

NAPOLI

Sede centrale

Via Cardinale Guglielmo Sanfelice, 8 - 80134 NA

Email segreteria.ispc@ispc.cnr.it - segreteria.direzione@ispc.cnr.it

www.ispc.cnr.it



Figura 2 – Immagine di un riflettometro da banco (modello Tektronix DSA8200 con moduli TDR) e di un riflettometro portatile(modello HyperLabs HL8200).

LA SONDA

La sonda (o elemento sensibile o sensing element) è l'elemento responsabile dell'interazione tra il segnale EM di test ed il sistema che si vuole analizzare. Una classificazione generale delle sonde può essere fatta distinguendo tra strutture elettromagnetiche guidanti (ad esempio, sonde coassiali inserite nel sistema da caratterizzare) e strutture elettromagnetiche radianti (ovvero antenne, poste in prossimità del sistema da caratterizzare). A titolo esemplificativo, la Fig. 3 mostra alcune tipologie di sonde tipicamente utilizzate per la caratterizzazione dielettrica di materiali.

A seconda del tipo di applicazione, è necessario utilizzare elementi sensibili diversi (in geometria, materiali, ecc.). In commercio sono disponibili diverse tipologie di sonda (spesso vendute insieme ai riflettometri). Tuttavia, per specifiche applicazioni e per ottenere prestazioni migliori in termini di accuratezza di misura, è necessario progettare e realizzare sonde specificamente adatte all'applicazione considerata. Poiché la tecnica TDR misura variazioni di impedenza elettrica (Z), è opportuno utilizzare sonde con un profilo di impedenza noto. In questo modo, infatti, si può essere certi che eventuali variazioni di impedenza rilevate nelle misure TDR siano attribuibili alle caratteristiche di impedenza del materiale/sistema in esame. Anche nel progettare e realizzare sonde TDR, è indispensabile scegliere una configurazione geometrica adatta alle esigenze e dimensionare opportunamente la sonda. La configurazione di sonda TDR di tipo coassiale è molto semplice da progettare e realizzare. Si tratta di una struttura simile a quella di un condensatore cilindrico (Fig. 4): infatti, anche in questo caso, si fa sì che il materiale da caratterizzare riempia lo spazio presente tra due cilindri conduttori concentrici (per questo motivo, questa tipologia di sonda è impiegata soprattutto per misure su liquidi).

NAPOLI

Sede centrale

Via Cardinale Guglielmo Sanfelice, 8 - 80134 NA

Email segreteria.ispc@ispc.cnr.it - segreteria.direzione@ispc.cnr.it

www.ispc.cnr.it

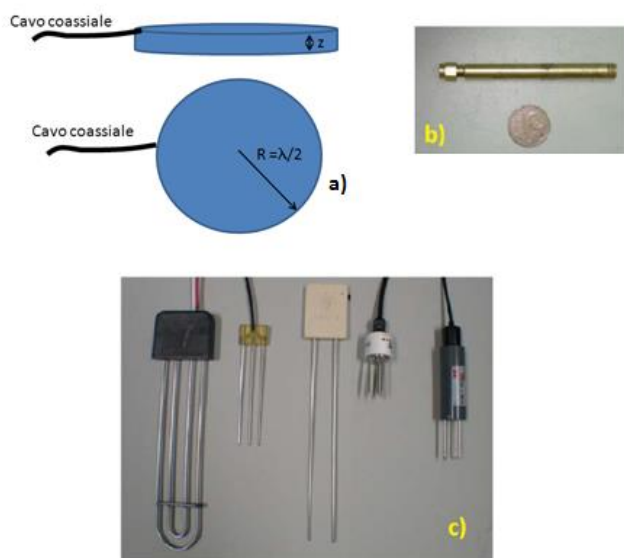


Figura 3 - Esempi di sonde utilizzate nelle misure TDR: a) sonda radiativa usata per misure non invasive; b) sonda coassiale usata per misure su materiali liquidi; c) sonde a barra usate per misure su materiali granulari.

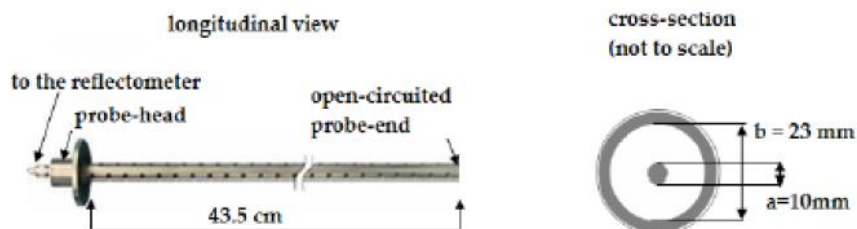


Figura 4 – Vista longitudinale e sezione trasversale di una sonda coassiale, in cui i diametri dei conduttori sono stati scelti in modo da garantire un'impedenza elettrica della sonda (in aria) pari a 50Ω .

Il profilo di impedenza di una sonda coassiale in aria (ovvero non inserita in alcun materiale) può essere ricavato facilmente dalla teoria delle linee di trasmissione:

$$Z = 60 \cdot \ln \frac{b}{a} \quad (2)$$

dove b è il diametro interno del conduttore esterno della sonda ed a è il diametro esterno del conduttore interno della sonda (come mostrato in Fig. 4).

Per misure su materiali granulari (come ad esempio terreni), per la sonda viene di solito preferita una configurazione di tipo multi barra (o a barre o multifilare). Infatti, questa geometria rende più agevole l'inserimento della sonda dentro il materiale oggetto d'esame. In particolare, è molto utilizzata la sonda a tre barre (ogni barra è un elettrodo), poiché questa configurazione ha un comportamento elettromagnetico riconducibile a quello di una struttura di propagazione di tipo coassiale [14]. La Fig.

NAPOLI

Sede centrale

Via Cardinale Guglielmo Sanfelice, 8 - 80134 NA

Email segreteria.ispc@ispc.cnr.it - segreteria.direzione@ispc.cnr.it

www.ispc.cnr.it

5 mostra la schematizzazione di una tipica sonda a tre barre e la corrispondente distribuzione del campo EM. Per sonde con geometrie diverse da quella coassiale, in letteratura, non sono disponibili modelli esatti per il profilo di impedenza. Tuttavia sono disponibili alcune relazioni empiriche che descrivono l'impedenza di sonde multi filari, permettendo di fare un'adeguata progettazione. In particolare per la sonda a tre barre vale la seguente semplificazione [7]:

$$Z = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cdot \ln \left[\frac{1 - \left(\frac{g}{s}\right)^4}{2\left(\frac{g}{s}\right)^3} \right] \quad (3)$$

Dove s è l'interasse tra due barre vicine; g è il raggio di ciascuna barra; μ_0 è la permeabilità magnetica dell'Aria; ed ϵ_0 è la permittività dielettrica dell'aria.

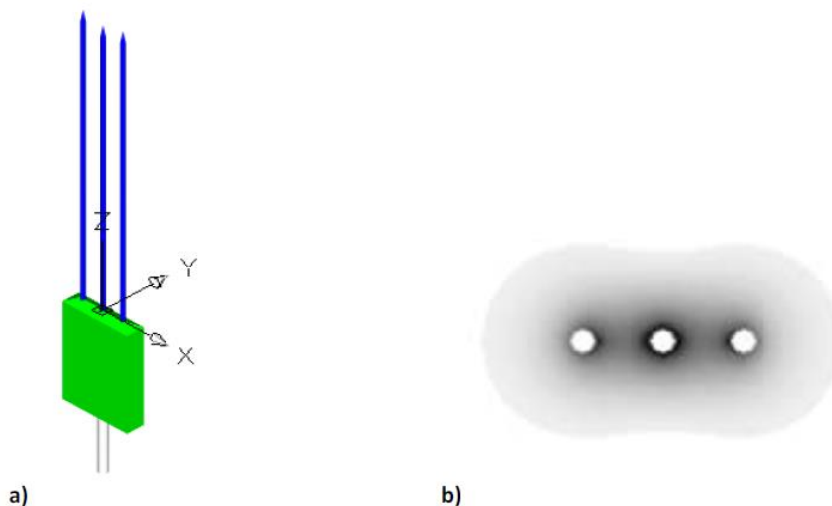


Figura 5 – a) Schematizzazione di una sonda trifilare; b) corrispondente distribuzione del campo EM generato.

ESEMPIO DI MISURE TDR

Come già anticipato, l'output diretto di una misura TDR è un riflettogramma, ovvero un grafico che riporta il coefficiente di riflessione (ρ) in funzione della distanza apparente (o di distanza elettrica), d_{app} , percorsa dal segnale EM. La quantità d_{app} è definita come la distanza che il segnale EM percorrerebbe, nello stesso intervallo di tempo, se si stesse propagando nel vuoto. La distanza reale (fisica) è legata a d_{app} attraverso la costante di elettricità del mezzo (è opportuno precisare che, a seconda del tipo di strumento TDR utilizzato, l'ascissa del riflettogramma può riportare la distanza apparente (come nel caso riportato in Fig. 4) oppure il tempo di volo (t_v). Le due quantità sono legate dalla seguente espressione: $d_{app} = (c \times t_v) / 2$ dove $c = 3 \times 10^8$ m/s è la velocità della luce nel vuoto):

NAPOLI

Sede centrale

Via Cardinale Guglielmo Sanfelice, 8 - 80134 NA

Email segreteria.ispc@ispc.cnr.it - segreteria.direzione@ispc.cnr.it

www.ispc.cnr.it

$$d = \frac{d^{app}}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (4)$$

dove ϵ_{eff} è detta costante dielettrica efficace ed è un parametro (deducibile da misure TDR) che tiene conto delle caratteristiche dielettriche del mezzo in cui si sta propagando il segnale EM. La Fig. 6 mostra la schematizzazione di un riflettogramma relativo ad una sonda a due barre che si trova in parte in aria (mezzo con costante dielettrica relativa pari a $\epsilon_r=1$) ed in parte inserita in un materiale diverso ($\epsilon_r>1$).

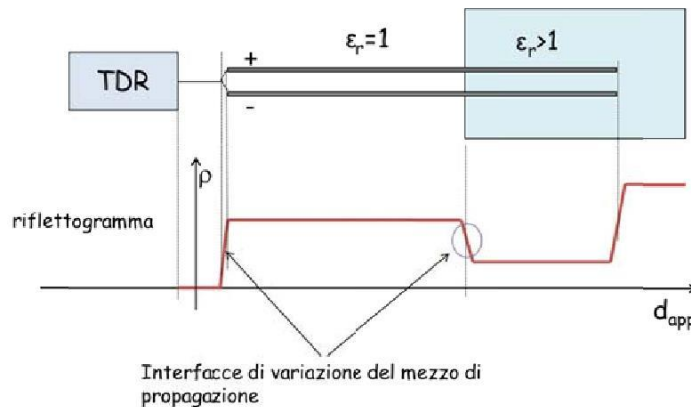


Figura 6 Schematizzazione di un elemento sensibile bifilare inserito in materiali con diversa permittività dielettrica relativa (ϵ_r). Man mano che il segnale EM generato dal TDR viaggia attraverso la sonda, il corrispondente riflettogramma evidenzia le variazioni di ρ in corrispondenza dei diversi mezzi.

Dal riflettogramma, si nota che il valore di ρ (nominalmente compreso tra -1 e +1) varia al variare delle caratteristiche dielettriche del mezzo in cui si propaga il segnale EM (viceversa, rimane costante nei tratti in cui non ci sono variazioni delle caratteristiche dielettriche). Dalla Fig. 6, si nota che ad ogni sezione trasversale della sonda corrisponde un valore di ρ .

Il coefficiente di riflessione, ρ , misurato attraverso la tecnica TDR, è direttamente legato all'impedenza elettrica Z della linea di trasmissione lungo la quale si sta propagando il segnale EM, secondo la seguente relazione:

$$\rho \cong \frac{Z-Z_0}{Z+Z_0} \quad (5)$$

NAPOLI

Sede centrale

Via Cardinale Guglielmo Sanfelice, 8 - 80134 NA

Email segreteria.ispc@ispc.cnr.it - segreteria.direzione@ispc.cnr.it

www.ispc.cnr.it

dove Z_0 è l'impedenza di riferimento (tipicamente 50 ohm). Invertendo l'equazione (5), è possibile quindi ricavare il profilo d'impedenza della sonda inserita nel materiale in esame, e risalire alle caratteristiche dielettriche (permettività dielettrica) ed elettriche (resistività, conducibilità) del materiale in esame.

SPECIFICHE DEL SISTEMA TDR A 256 CANALI PER MISURE DI IMPEDENZA ELETTRICA

La soluzione individuata prevede un sistema modulare che comprende i seguenti elementi:

- Riflettometro;
- Sonde;
- Software di controllo e gestione;
- Cavi di connessione;
- Unità multiplexer, per il controllo di molteplici sonde;
- Unità di gestione e controllo in remoto via GSM/GPRS (o rete satellitare) interfacciabile alla rete internet.

Nel sistema di misura proposto è possibile individuare due livelli architetturali, come schematizzato in Fig. 7.

NAPOLI

Sede centrale

Via Cardinale Guglielmo Sanfelice, 8 - 80134 NA

Email segreteria.ispc@ispc.cnr.it - segreteria.direzione@ispc.cnr.it

www.ispc.cnr.it

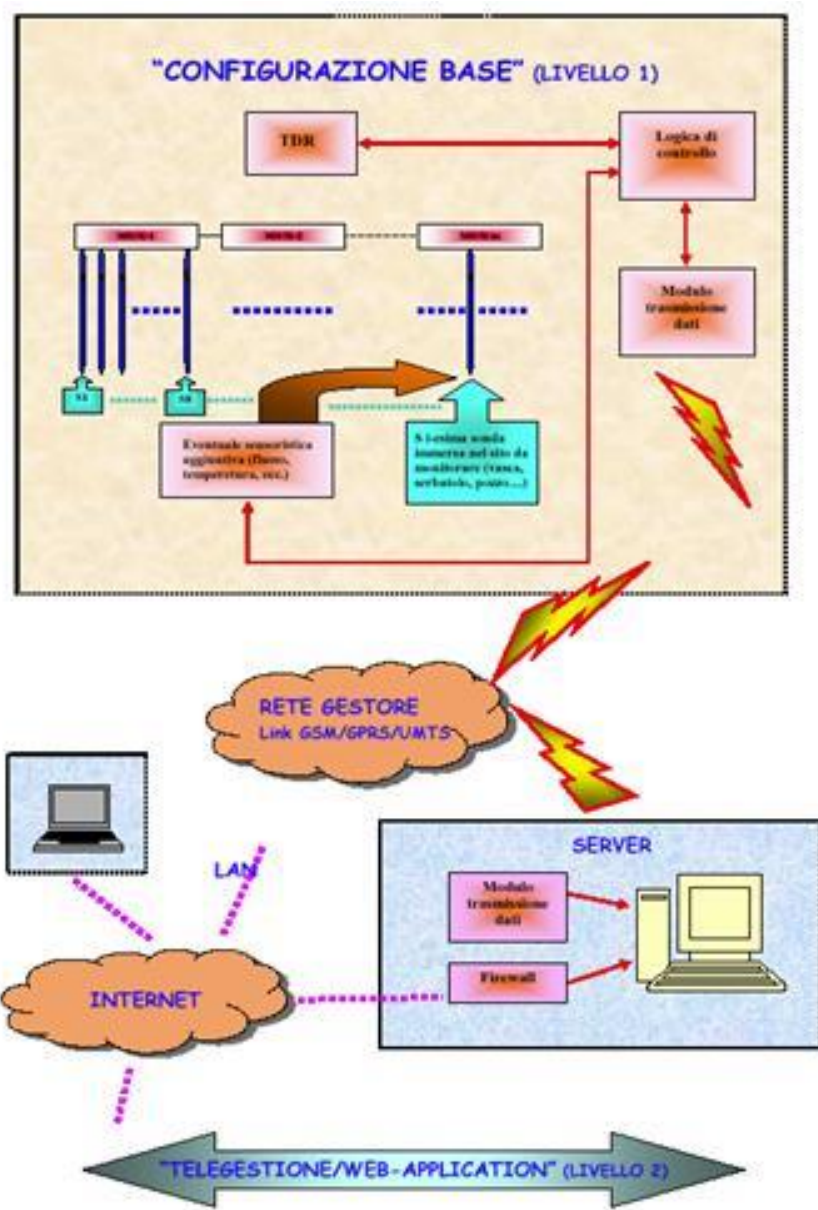


Figura 7 – Schema generale di un sistema di misura TDR.

Il primo livello comprende lo strumento TDR, le sonde, i multiplexer e moduli di trasmissione dati. Il secondo livello è invece costituito dall'unità di telegestione, controllo e trasmissione dati, che può essere realizzata attraverso una web-application dedicata, dove transitano tutte le informazioni

NAPOLI

Sede centrale

Via Cardinale Guglielmo Sanfelice, 8 - 80134 NA

Email segreteria.ispc@ispc.cnr.it - segreteria.direzione@ispc.cnr.it

www.ispc.cnr.it

provenienti dai singoli dispositivi afferenti al primo livello di sistema. Si tratta quindi di tutte le informazioni provenienti dagli ambienti oggetto di indagine e convogliate verso una o più unità remota di telegestione e controllo.

Nelle seguenti sezioni, viene fornita una descrizione dettagliata delle singole componenti del sistema. Come sarà dettagliato nelle sezioni seguenti, il "cuore" del sistema di rivelazione è costituito dall'apparato elettronico TDR che, collegato tramite opportuni livelli di multiplexing, può effettuare misure attraverso 512 canali ed altrettante sonde indipendenti, distribuite nelle zone d'interesse ricoprendo aree molto estese. Tali sonde possono quindi essere collegate tramite uno o più livelli di multiplexing, peculiarità che consente un notevole abbattimento dei costi di strumentazione.

SCELTA DEL RIFLETTOMETRO

Attraverso un'indagine conoscitiva del mercato e tenuto conto delle caratteristiche tecniche richieste al sistema oggetto dello studio di fattibilità, si è individuato il riflettometro più adatto alla specifica esigenza applicativa. L'individuazione dello strumento ottimale è stata operata tenendo conto della necessità di avere uno strumento robusto (tale da resistere anche in condizioni operative relativamente ostili, come possono essere quelle di misure sul campo) e che permettesse di implementare la modalità di utilizzo in multiplexing. A valle della ricognizione effettuata, lo strumento che risulta più adatto all'applicazione considerata è il riflettometro HyperLabs HL1500 (Fig. 8).



Figura 8 – Immagine dello strumento TDR HL1500.

Si tratta di uno strumento compatto, che garantisce un trade off ottimale tra costo, prestazioni, possibilità di gestire contemporaneamente 256 canali (ed oltre). Alla data di redazione del presente documento, il costo approssimativo di un riflettometro HL1500 è di circa 3500 €. L'HL1500 genera un segnale a gradino con un tempo di salita pari a circa 200 ps; pertanto, il suo contenuto in frequenza è pari a circa 1.75 GHz.

Lo strumento funziona con una batteria da 12 V (tuttavia, il sistema può anche essere alimentato direttamente dalla rete elettrica qualora fosse disponibile). La Tabella 1 riassume le principali specifiche tecniche del riflettometro HL1500.

NAPOLI

Sede centrale

Via Cardinale Guglielmo Sanfelice, 8 - 80134 NA

Email segreteria.ispc@ispc.cnr.it - segreteria.direzione@ispc.cnr.it

www.ispc.cnr.it

Tabella 1
Specifiche tecniche dello strumento HL1500.

<i>Tempo di salita del segnale incidente</i>	< 200 ps
<i>Durata del segnale</i>	14 μ s
<i>Ampiezza del segnale</i>	250 mV
<i>Risoluzione nella base dei tempi</i>	12.2 ps
<i>Massimo numero di punti acquisibili per ogni forma d'onda</i>	2048
<i>Impedenza d'uscita</i>	50 $\Omega \pm 1\%$
<i>Numero di medie automatiche massimo</i>	2048
<i>Dimensioni</i>	235 mm x 110 mm x 55 mm
<i>Alimentazione</i>	Batteria da 12 V

Un'altra caratteristica molto utile dello strumento individuato è che il suo sistema di controllo è "aperto", ovvero è possibile sviluppare ed implementare software di controllo sulle piattaforme desiderate (LabVIEW etc.).

Inoltre, per questo strumento, sono già disponibili commercialmente una serie di sonde a barre adatte a misure su terreni con diverse caratteristiche. Infine, come sarà descritto nelle sezioni seguenti, è possibile dotare questo strumento di opportuni "accessori" che massimizzano l'efficienza nell'implementazione del sistema di misura.

ESEMPI DI SONDE TDR PER LE MISURE SU TERRENI

Come già anticipato, tipicamente, per le misure TDR su terreni vengono impiegate sonde multibarra: la sonda agisce come una guida d'onda e l'impedenza misurata (tramite TDR) lungo la sonda varia in funzione delle caratteristiche dielettriche del terreno.

Spesso queste sonde hanno delle barre che terminano a punta (per facilitare l'inserimento nel terreno) ed una testa (in teflon o altro materiale plastico) che racchiude la transizione della connessione elettrica cavo coassiale/barre e mantiene fissa la distanza mutua tra le barre. La Fig. 9 mostra la schematizzazione di una sonda a tre barre.

NAPOLI

Sede centrale

Via Cardinale Guglielmo Sanfelice, 8 - 80134 NA

Email segreteria.ispc@ispc.cnr.it - segreteria.direzione@ispc.cnr.it

www.ispc.cnr.it

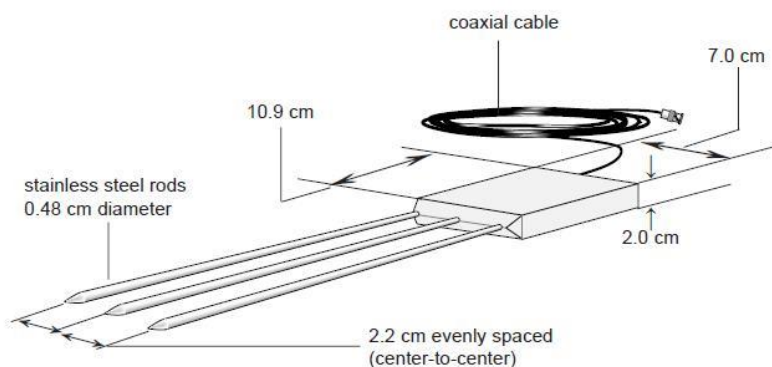


Figura 9 – Schematizzazione di una sonda trifilare per le misure TDR in terreni.

Per lo strumento HL1500, l'azienda Campbell Scientific propone sei tipi di sonde a tre barre, in funzione della tipologia di terreno che si intende ispezionare. Ad esempio, la sonda CS605 è adatta a misure su terreni con bassa conducibilità elettrica di bulk (≤ 1.4 dS/m). Questa sonda ha un cavo coassiale RG58, e le barre hanno diametro di 0.48 cm e lunghezza pari a 30 cm; questa sonda va collegata al riflettometro con un cavo coassiale di lunghezza massima pari a 15 m. Per lunghezze di cavo superiori (fino a 25 m), è opportuno utilizzare la sonda CS610 (anch'essa con barre di diametro di 0.48 cm e lunghezza di 30 cm).

La sonda trifilare CS630 è adatta a misure su terreni con più elevata conducibilità elettrica (comunque minore di 3.5 dS/m). Questa sonda ha barre di lunghezza di 15 cm e diametro 0.318 cm; ha un cavo coassiale RG58 e va utilizzata con cavi lunghi fino a 15 m. Per lunghezze di cavo superiori (fino a 25 m), è consigliata la sonda CS635 (che monta un cavo LMR200DB, piuttosto che RG58).

Infine, per terreni con conducibilità ancora più elevata (comunque inferiore a 5 dS/m), è consigliato l'uso della sonda CS640 (con barre di lunghezza 7.5 cm e diametro pari a 0.159 cm, con cavo RG58 e da utilizzare con cavi lunghi fino a 15 m). In alternativa, per lunghezze di cavo maggiori di 15 m (fino a 25 m), è consigliata la sonda CS645 (che, a differenza della sonda CS640, ha un cavo LMR200DB).

SONDA PER MISURE DISTRIBUITE

Le sonde descritte nella sezione precedente hanno, generalmente, una lunghezza inferiore a 0.5 m; pertanto, esse forniscono una misura locale delle proprietà del terreno. Se la zona da monitorare è estesa e si vuole risalire ad un profilo "distribuito" dell'impedenza del terreno devono essere impiegate più sonde, da dislocare opportunamente nella zona di interesse, come schematizzato in Fig. 10.

NAPOLI

Sede centrale

Via Cardinale Guglielmo Sanfelice, 8 - 80134 NA

Email segreteria.ispc@ispc.cnr.it - segreteria.direzione@ispc.cnr.it

www.ispc.cnr.it



Figura 10 – Schematizzazione di una ipotetica distribuzione di un numero n di sonde a tre barre per la ricostruzione del profilo di impedenza elettrica di una porzione estesa di terre non (schema non in scala).

La configurazione prevede l'impiego di una sonda a due conduttori filiformi e paralleli (separati da una guaina in materiale plastico), da disporre nel terreno, lungo la direzione nella quale si vuole misurare il profilo di impedenza elettrica. La Fig. 11 mostra una sezione trasversale della sonda.

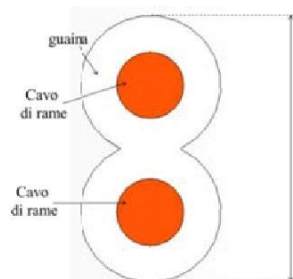


Figura 11 – Schema della sezione trasversale di una sonda bifilare distribuita. La dimensione di 4 mm si riferisce ad una dimensione trasversale "tipica" di questo tipo di sonde

La Fig. 12 mostra una schema del sistema di misura e il corrispondente riflettogramma in presenza di una variazione di impedenza elettrica dovuta, ad esempio, ad una composizione diversa del terreno in una certa zona). Il riflettogramma così acquisito fornisce direttamente il profilo puntuale dell'impedenza elettrica del terreno nella zona considerata. Infatti, grazie al fatto che sull'asse delle ascisse del riflettogramma è riportata la distanza percorsa dal segnale EM, impiegando questa sonda distribuita è possibile individuare velocemente anche la posizione in cui si trova la variazione di impedenza misurata. La risoluzione spaziale del profilo di impedenza misurata dipende dalle caratteristiche dello strumento TDR impiegato. Per l'HL1500 si può arrivare ad avere una risoluzione spaziale dell'ordine di meno di qualche centimetro, ottenendo così quello che può essere considerato un profilo "continuo" di impedenza elettrica del terreno.

Questa soluzione fornisce direttamente il profilo di impedenza del terreno lungo tutta la lunghezza

NAPOLI

Sede centrale

Via Cardinale Guglielmo Sanfelice, 8 - 80134 NA

Email segreteria.ispc@ispc.cnr.it - segreteria.direzione@ispc.cnr.it

www.ispc.cnr.it

dell'elemento sensibile. Questo tipo di sonde bifilari possono avere una lunghezza che supera i 200 m; con evidente risparmio di tempo nell'effettuazione delle misure.

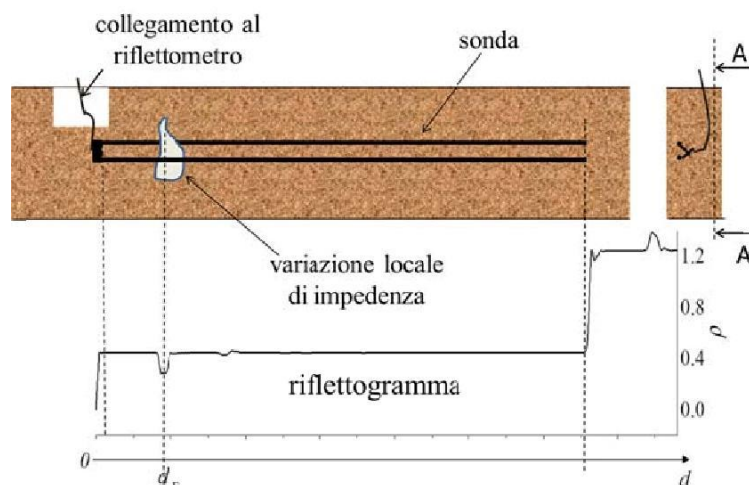


Figura 12 – schematizzazione dell'apparato di misura TDR con una sonda bifilare distribuita (disegno in scala). È riportata anche la schematizzazione del corrispondente riflettogramma.

La sonda può essere interrata ad una qualunque profondità, eventualmente anche con microtunnelling. Come si vede dalla figura, per effettuare la misura, basta lasciare "emergere" dal terreno un cavo coassiale per il collegamento allo strumento TDR.

Questo tipo di sonda è estremamente a basso costo, e può anche rimanere permanentemente interrata, sempre già "pronta all'utilizzo" e l'operatore dovrebbe solo collegare il riflettometro al cavo coassiale e procedere con l'acquisizione del riflettogramma.

SISTEMA DI MULTIPLEXING

L'aspetto cruciale di cui si è tenuto conto è la possibilità di garantire la presenza di più canali di misura, al fine di poter gestire contemporaneamente più sonde (corrispondenti ad altrettanti punti di misura). Attraverso un idoneo sistema di multiplexing, è possibile gestire contemporaneamente fino a 512 sonde indipendenti con un singolo riflettometro. In particolare, con lo strumento HL1500 individuato nelle sezioni precedenti, è possibile utilizzare i multiplexer della serie SDMX50 della Campbell Scientific. Si tratta di multiplexer del tipo 8:1; ovvero, ad ogni multiplexer possono essere collegate fino a otto sonde, come schematizzato in Fig. 13. Come l'HL 1500, questo multiplexer richiede un'alimentazione di 12 V in continua.

NAPOLI

Sede centrale

Via Cardinale Guglielmo Sanfelice, 8 - 80134 NA

Email segreteria.ispc@ispc.cnr.it - segreteria.direzione@ispc.cnr.it

www.ispc.cnr.it

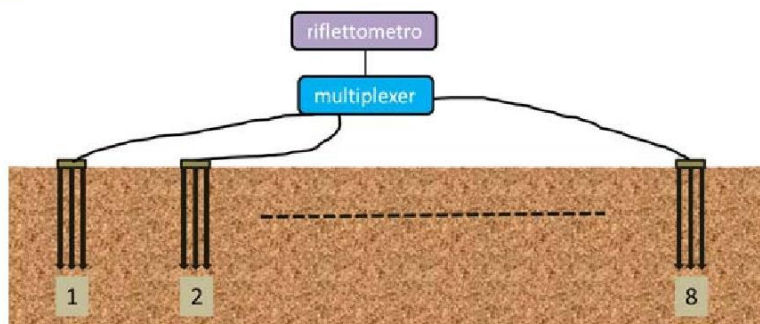


Figura 13 – Schematizzazione della gestione di otto sonde attraverso un'unità multiplexer ed un singolo riflettometro (disegno non in scala).

Tra i multiplexer della serie su menzionata, l'SDMX50S P (Fig. 14) consiste in una scheda elettronica multiplexer montata all'interno di una cassetta metallica di protezione e di un sostegno per ridurre lo sforzo sui cavi. Il multiplexer è portatile ed ha dimensioni molto contenute (le dimensioni della cassetta metallica sono 22.3 x 1.2.2 x 2.5 cm, mentre quelle del sostegno per i cavi sono 20.3 x 4.3 x 1.5 cm).

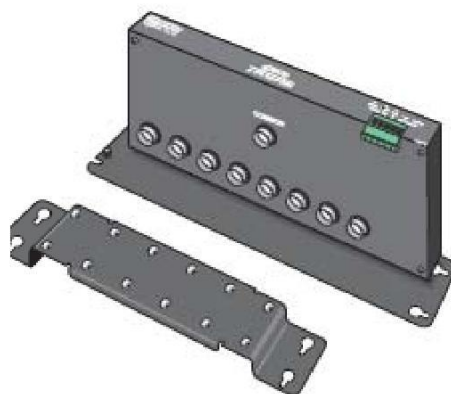


Figura 14 – Immagine del multiplexer SDM50SP.

Il sistema di misura può impiegare tre livelli di multiplexing, come schematizzato in Fig. 15. Si nota che il primo livello include un'unità HL1500 e un multiplexer. Ad ogni multiplexer possono essere collegate fino a otto cavi coassiali. Ciascuno dei cavi può essere collegato ad una sonda oppure ad un altro multiplexer di livello successivo, arrivando (in totale) a controllare un massimo di 512 sonde. In questo modo, è possibile ottenere una consistente riduzione dei costi.

NAPOLI

Sede centrale

Via Cardinale Guglielmo Sanfelice, 8 - 80134 NA

Email segreteria.ispc@ispc.cnr.it - segreteria.direzione@ispc.cnr.it

www.ispc.cnr.it

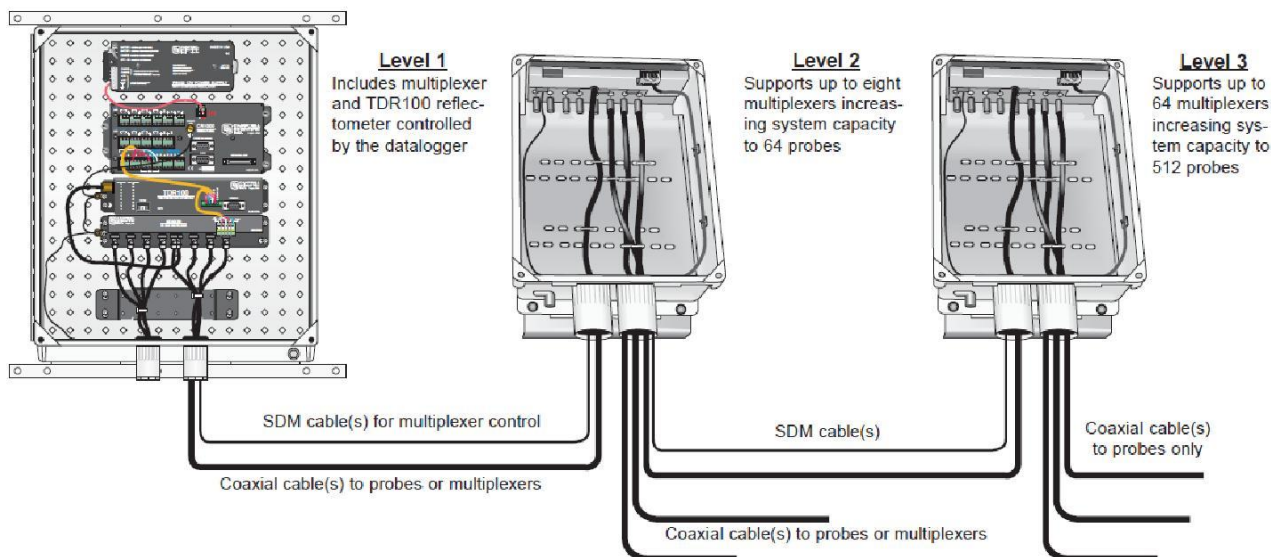


Figura 15 – Raffigurazione schematica della combinazione di multiplexer in cascata (su più livelli), per massimizzare il numero di sonde indipendenti controllabile con un singolo strumento TDR.

NOTA

Per l'utilizzo in ambiente esterno, il sistema di misura può essere protetto inserendo il tutto all'interno di una cassetta di protezione (E NCTDR100 Environmental Enclosure). Questa cassetta permette di alloggiare un riflettometro, un datalogger, un multiplexer e una batteria. Le dimensioni interne sono circa 16" x 18" x 8".

MODALITÀ DI IMPLEMENTAZIONE DEL SOFTWARE DI GESTIONE

I dati acquisiti attraverso il sistema di misura TDR devono essere elaborati al fine di risalire alla grandezza di interesse. L'elaborazione va adattata in funzione della grandezza che si vuole ricavare. Una volta che è stato esso a punto l'algoritmo di elaborazione, si può fare in modo che l'elaborazione sia fatta in tempo reale ed automaticamente. Scegliendo uno strumento TDR con un protocollo di comunicazione aperto (come l'HL1500), è possibile implementare l'algoritmo di elaborazione nell'ambiente di sviluppo più adatto alle specifiche esigenze. Un ambiente di sviluppo particolarmente adatto alla gestione di strumenti TDR ed alla elaborazione delle misure acquisite è

NAPOLI

Sede centrale

Via Cardinale Guglielmo Sanfelice, 8 - 80134 NA

Email segreteria.ispc@ispc.cnr.it - segreteria.direzione@ispc.cnr.it

www.ispc.cnr.it

LabVIEW, un ambiente di sviluppo avanzato che offre integrazione hardware e compatibilità ad ampio raggio con una vasta gamma di strumenti. LabVIEW coniuga la flessibilità di un linguaggio di programmazione con la potenza di strumenti ingegneristici avanzati per il rapido sviluppo di ogni tipo di applicazione.

LabVIEW è un linguaggio di programmazione di tipo grafico basato su di una filosofia Data-Flow. Un linguaggio di tipo grafico si differenzia dai linguaggi a riga di comando per il fatto che le istruzioni da eseguire non sono esplicitate per mezzo di una sintassi precisa e complicata, ma da icone e linee di collegamento, le quali opportunamente collegate tra loro, costituiscono il codice. Ogni icona racchiude in sé tutto il necessario per l'esecuzione di una particolare funzione, rendendo la gestione del programma più intuitiva e gestibile, anche se più complicata da modificare. Filosofia Data-Flow, invece, significa che è il flusso dei dati a determinare l'ordine di esecuzione del codice: mentre nei linguaggi a riga di comando è l'ordine in cui sono scritte le istruzioni a dettare l'esecuzione, in LabVIEW nessuna istruzione viene eseguita se prima non vengono presentati in ingresso alla funzione tutti gli input.

Essendo dedicato alla creazione di interfacce con strumenti di misure, LabVIEW mette a disposizione due fogli elettronici che permettono la visualizzazione delle due facce dell'applicazione che si sta realizzando:

il pannello di controllo: permette la visualizzazione dell'interfaccia con l'utente, con il conseguente set di pulsanti, label, .etc

il diagramma a blocchi: contenente il codice vero e proprio dell'applicazione, cioè il codice sorgente grafico.

I criteri progettuali che motivano la scelta di LabVIEW come ambiente di sviluppo software risiedono, principalmente, nella possibilità di creare uno strumento virtuale il cui aspetto e le cui operazioni emulano gli strumenti fisici reali, rendendo così il software di facile comprensione ed estremamente user friendly.

Un aspetto molto importante dell'utilizzo di LabVIEW è che questo ambiente di sviluppo dà la possibilità di creare gli eseguibili dei programmi, permettendo così di superare il problema relativo all'acquisizione di licenze. A titolo esemplificativo, in Fig. 16, si riporta uno screenshot di un software sviluppato in LabView per la ricerca perdite in condotte idriche interrate.

NAPOLI

Sede centrale

Via Cardinale Guglielmo Sanfelice, 8 - 80134 NA

Email segreteria.ispc@ispc.cnr.it - segreteria.direzione@ispc.cnr.it

www.ispc.cnr.it

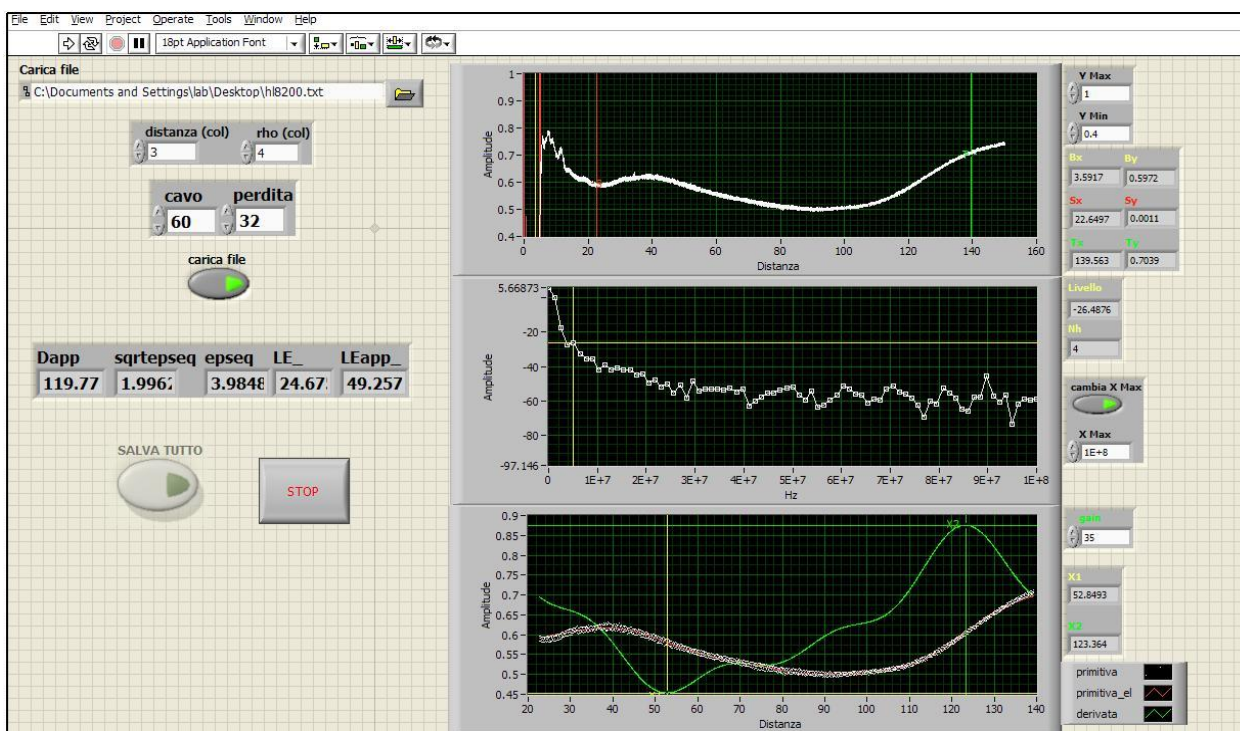


Figura 16 – Esempio dell’interfaccia grafica di un applicativo sviluppato in ambiente LabView dedicato alla localizzazione di perdite in condotte idriche interrattate attraverso un sistema di misura TDR.

DESCRIZIONE DEL SISTEMA DI TELEGESTIONE E DELLA WEB-APPLICATION

Il sistema di misura può essere completato con un sistema di telegestione ed una web application che permettano di avere informazioni aggiornate in tempo reale, riguardo ad un qualsiasi ambiente monitorabile da un’unità elettronica remota, in qualunque momento e luogo, tramite una semplice connessione ad internet. Un datalogger può essere programmato per il controllo automatizzato del riflettometro HL1500 e dei multiplexer. Inoltre, può essere programmato per funzioni di telecomunicazioni che permettano la gestione del sistema di misura da remoto. Una volta effettuata l’interrogazione da

remoto, l’applicazione consente all’utente di analizzare i dati ricevuti in modo da poter ottenere misure significative e reali relative al sito monitorato.

L’applicazione permette anche, all’utente amministratore, di gestire completamente da remoto diversi profili utente. Ad ogni profilo possono essere associati dei permessi relativi alle diverse unità remote (apparato TDR) installate e gestite dall’applicazione. Ad esempio, i profili utente presenti possono essere di due tipi: Amministratore ed Utilizzatore. L’utente Utilizzatore ha la possibilità di interrogare

NAPOLI

Sede centrale

Via Cardinale Guglielmo Sanfelice, 8 - 80134 NA

Email segreteria.ispc@ispc.cnr.it - segreteria.direzione@ispc.cnr.it

www.ispc.cnr.it

i sistemi di rivelazione remoti ricevendo quindi i dati. Una volta ricevuti tali dati, l'utente è in grado di analizzarli in maniera estremamente intuitiva e generare, ad esempio, dei reports o aggiornare database. E' possibile prevedere inoltre la possibilità di ripetere più volte l'interrogazione sullo stesso dispositivo (più campionamenti), visualizzare sullo stesso piano grafico i dati ricevuti e selezionare il campionamento sul quale effettuare le misure. Questo consente di verificare i cambiamenti di stato in tempo reale dell'ambiente monitorato. I parametri specifici della strumentazione remota (ad esempio, parametri di setting dello strumento, come lunghezza della finestra di acquisizione) sono anch'essi direttamente impostabili da remoto. L'utente Amministratore può usufruire, oltre a tutte le funzionalità dell'utente Utilizzatore, di tutte le funzionalità che permettono l'inserimento, la modifica e la cancellazione delle risorse in remoto e di eventuali ulteriori utenti utilizzatori.

SONDE NON INVASIVE

Importante risulta la caratterizzazione dielettrica di materiali attraverso misure TDR effettuate impiegando un'antenna realizzata ad oc in tecnologia planare come sonda. Un siffatto sistema risulta non esistente in commercio, non distruttivo e non invasivo, e pertanto adatto ad analisi su strutture murarie e su beni di interesse monumentale/architettonico. Nelle misure effettuate attraverso antenne, la grandezza che viene osservata è il parametro di scattering in riflessione dell'antenna, S11 (definito in modulo e fase) e, dalla misura di questa quantità, è possibile risalire alle grandezze di interesse. Ad esempio, attraverso misure riflettometriche è possibile risalire al contenuto di umidità di strutture o individuare l'eventuale presenza di specifici materiali presenti oltre la superficie.

La sonda è l'elemento responsabile dell'interazione tra il segnale EM di test ed il sistema che si vuole analizzare. A seconda del tipo di applicazione, è necessario utilizzare sonde diverse (in geometria, materiali, etc.). Spesso, per ottenere prestazioni migliori in termini di accuratezza di misura, è utile progettare e realizzare sonde specificamente adatte all'applicazione considerata. Una classificazione generale delle sonde prevede sonde che siano strutture elettromagnetiche guidanti (ad esempio, sonde coassiali inserite nel sistema da caratterizzare) e strutture elettromagnetiche radianti (ovvero antenne, poste in prossimità del sistema da caratterizzare).

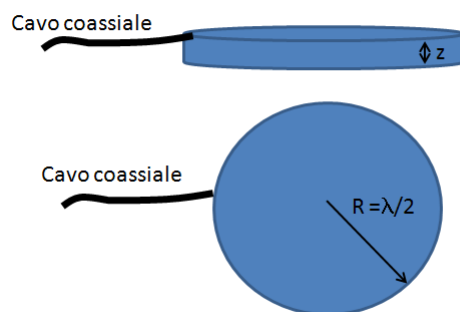


Fig. 17 Esempio di antenna impiegata come sonda per le misure riflettometriche a microonde.

NAPOLI

Sede centrale

Via Cardinale Guglielmo Sanfelice, 8 - 80134 NA

Email segreteria.ispc@ispc.cnr.it - segreteria.direzione@ispc.cnr.it

www.ispc.cnr.it

Impiegando delle antenne in tecnologia planare come sonde, è possibile garantire la non-invasività della misura, rendendola adatta ad analisi su strutture murarie e su beni di interesse monumentale/architettonico. Nelle misure effettuate attraverso antenne, la grandezza che viene osservata è il parametro di scattering in riflessione dell'antenna (definito in modulo e fase) e, dalla misura di questa quantità, è possibile risalire alle grandezze di interesse. Ad esempio, attraverso misure riflettometriche è possibile risalire al contenuto di umidità di strutture o individuare l'eventuale presenza di specifici materiali presenti oltre la superficie. La figura seguente schematizza un sistema riflettometrico per misure non invasive.

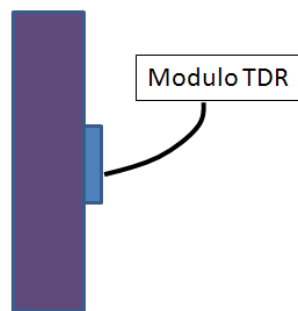


Fig. 18. Esempio di un sistema di misure non invasiva basato sulla riflettometri a microonde.

Inoltre, il sistema di misura sarà dotato di una unità multiplexer che permette al singolo strumento di **gestire contemporaneamente** fino a 256 sonde.

ASPETTI INNOVATIVI

Dopo un'attenta valutazione dei principi alla base delle misure TDR e dopo una ricerca sulla strumentazione disponibile in commercio e sulle relative prestazioni, sono stati individuati gli elementi necessari per realizzare un sistema TDR multicanale per le misure di impedenza elettrica dei terreni.

Il sistema proposto offre la possibilità di controllare fino a 512 canali (sonde) indipendenti con un singolo strumento di misura, funzionalità utile ad esempio per avere una veloce "mappatura" di superfici estese o siti "distribuiti". Inoltre, il sistema può essere completamente automatizzato e gestito da remoto (funzionalità utile, ad esempio, per monitoraggi continuativi in siti remoti).

Grazie all'intrinseca flessibilità della tecnica TDR, un siffatto sistema può essere facilmente adattato per applicazioni diverse dalla misura dell'impedenza elettrica.

Infine, vale la pena di osservare che un altro punto di forza del sistema descritto risiede nel fatto che, integrando strumenti disponibili commercialmente e sonde specificatamente progettate (non esistenti in commercio) e realizzate, si potrebbe sviluppare e realizzare un sistema di misura riflettometrico multicanale e soprattutto multiparameter. Infatti, diversamente dai sistemi disponibili commercialmente (che sono generalmente dedicati alla misura di un singolo parametro, in maniera locale), il sistema di monitoraggio così come descritto (non esistente in commercio) permette di

NAPOLI

Sede centrale

Via Cardinale Guglielmo Sanfelice, 8 - 80134 NA

Email segreteria.ispc@ispc.cnr.it - segreteria.direzione@ispc.cnr.it

www.ispc.cnr.it

misurare una molteplicità di parametri (conducibilità, impedenza, caratteristiche dielettriche, contenuto di acqua, etc.) in maniera "distribuita", ottenendo con una singola misura una "mappatura" delle caratteristiche investigate.

Bibliografia

- [1] K. O'Connor, C. H. Dowding, *Geomeasurements by Pulsing TDR Cables and Probes*. Boca Raton, FL: CRC, 1999.
- [2] D. A. Robinson, S. B. Jones, J. M. Wraith, D. Or, S. P. Friedman, "A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry", *Vadose Zone J.*, vol. 2, pp. 444–475, 2003.
- [3] M. Kim, D. Kim, J. C. M. Kim, D. Kim, J. Choi, H. Kim, C. Kim, "Detection of inorganic chemicals in a sandy soil using TDR: Effect of probe geometry and water content", *Geosciences Journal*, vol. 14, no. 3, pp. 321–326, 2010.
- [4] A. Scheuermann, C. Hubner, H. Wienbroer, D. Rebstock, G. Huber, "Fast time domain reflectometry (TDR) measurement approach for investigating the liquefaction of soils", *Meas. Sci. Technol.*, vol. 21, 2010.
- [5] R. Friel, D. Or, "Frequency analysis of time-domain reflectometry (TDR) with application to dielectric spectroscopy of soil constituents", *Geophys.*, vol. 64, no. 3, pp. 707–718, 1999.
- [6] C. P. Nematich, "Time domain reflectometry liquid levels sensors", *IEEE Instrum. Meas. Mag.*, vol. 4, no. 4, pp. 40–44, 2001.
- [7] A. Cataldo, E. Piuze, G. Cannazza, E. De Benedetto, L. Tarricone, "Quality and anti adulteration control of vegetable oils through microwave dielectric spectroscopy measurement," *Measurement*, vol. 43, no. 8, pp. 1031-1039, 2010.
- [8] J. A. Huisman, C. P. Lin, L. Weihermüller, H. Vereecken, "Accuracy of bulk electrical conductivity measurements with time domain reflectometry", *Vadose Zone J.*, vol. 7, no. 2, pp. 426–433, 2008.
- [9] A. Scheuermann, C. Huebner, "On the feasibility of pressure profile measurements with time domain reflectometry", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, no. 2, pp. 467–474, Feb. 2009.
- [10] W. F. Kane, T. J. Beck, and J. Hughes, "Applications of time domain reflectometry to landslide and slope monitoring", in *Proc. 2nd Int. Symp. Workshop on Time Domain Reflectometry for Innovative Geotechnical Appl.*, pp. 305–314, 2001.
- [11] P. Smith, C. Furse, J. Gunther, "Analysis of spread spectrum time domain reflectometry for wire fault location, *IEEE Sensors Journal*, vol. 5, no.6, pp. 1469–1478, 2005.
- [12] A. Cataldo, E. De Benedetto, G. Cannazza, N. Giaquinto, M. Savino, F. Adamo, 'Leak detection through microwave reflectometry: From laboratory to practical implementation', *Measurement*, vol. 47, pp. 963-970, 2014.

NAPOLI

Sede centrale

Via Cardinale Guglielmo Sanfelice, 8 - 80134 NA

Email segreteria.ispc@ispc.cnr.it - segreteria.direzione@ispc.cnr.it

www.ispc.cnr.it