

# LA RIFLETTOMETRIA NEL DOMINIO DEL TEMPO (TIME DOMAIN REFLECTOMETRY, TDR)

## Programma della lezione

1. Definizione e proprietà dielettriche
2. Riflettometro TDR
3. Un po' di storia
4. Applicazioni in campo agricolo e agroalimentare

### 1. Definizione e proprietà dielettriche

La riflettometria nel dominio del tempo (TDR, *Time Domain Reflectometry*) è una tecnica basata sulla generazione di un segnale elettromagnetico e l'analisi nel dominio del tempo del segnale riflesso da un generico carico (campione in esame). Le differenze tra segnale inviato e segnale riflesso contengono informazioni circa le proprietà dielettriche del campione stesso.

*Materiale dielettrico* → materiale con diverso potere di isolante. Il suo comportamento dipende dalla particolare configurazione elettronica.

Sotto l'azione di un campo elettrico gli elettroni e i protoni si orientano nella direzione del campo. La "nube elettronica" tende a spostarsi verso le zone del campo a potenziale maggiore, mentre il nucleo rimane dalla parte rivolta verso il potenziale minore. Ogni molecola del materiale assume tutte le caratteristiche di un dipolo.

*Polarizzazione elettrica* → Fenomeno fisico che consiste nell'orientamento delle cariche elettriche di un materiale isolante, quando questo viene sottoposto all'azione di un campo elettrico esterno. Il fenomeno riguarda i materiali classificati come dielettrici, vale a dire caratterizzati da proprietà isolanti, che li rendono cattivi conduttori di elettricità.

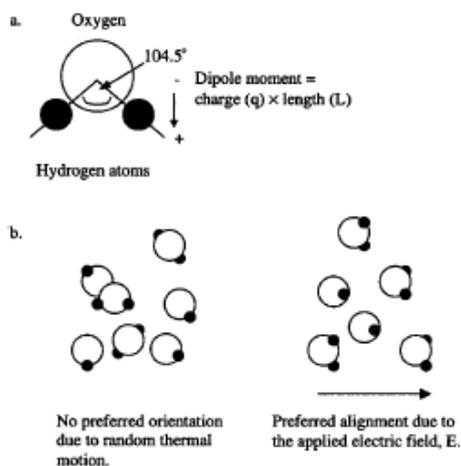
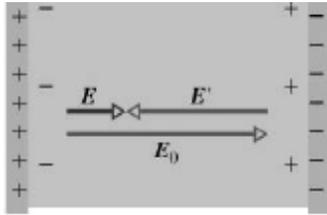


Fig. 1. (a) The dipole moment of a water molecule. (b) Water molecules randomly aligned (left) and being aligned by an external field (right). This alignment causes the storage of energy described as the real part of the permittivity.

### Polarizzazione della molecola dell'acqua

Dato che l'ossigeno ha una elettronegatività maggiore, il vertice della molecola ospita una parziale carica elettrica negativa, mentre le estremità recano una parziale carica elettrica positiva.

Un materiale dielettrico, posto all'interno di un campo elettrico, si polarizza → dipolo.



Si crea un **campo E' minore del campo esterno E<sub>0</sub>** ed in **verso opposto** ad esso, pertanto,

l'effetto finale è di ottenere un **campo E minore di quello di partenza E<sub>0</sub>**.

Un dielettrico polarizzato immagazzina una quantità di energia che si rende disponibile quando il campo elettrico esterno viene rimosso.

Proprietà dielettriche di un materiale (permittività elettrica)

1.1 La **permittività elettrica** o impropriamente **costante dielettrica** (nel linguaggio comune), è una grandezza fisica che descrive come un campo elettrico influenza ed è influenzato da un mezzo dielettrico, ed è determinata dalla capacità di un materiale di polarizzarsi in presenza del campo e quindi ridurre il campo elettrico totale nel materiale.

Si misura in farad su metro →  $\frac{F}{m} = \frac{C^2}{m^2 \cdot N}$

Nel vuoto prende il nome di permittività elettrica nel vuoto  
 →  $\epsilon_0 = 8,8541878176 \cdot 10^{-12} \frac{C}{m^2 N}$

Negli altri mezzi →  $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$

$\epsilon$  = permittività elettrica assoluta del materiale

$\epsilon_r$  = permittività elettrica relativa (**costante dielettrica relativa**) ed è un numero adimensionale sempre maggiore di 1 (aria, 1; vetro-porcellana, 2-9).

La costante dielettrica o permittività relativa  $\epsilon_r$  dipende essenzialmente dal grado di polarizzazione (o spostamento del baricentro delle cariche positive e negative) che può avvenire nel materiale.

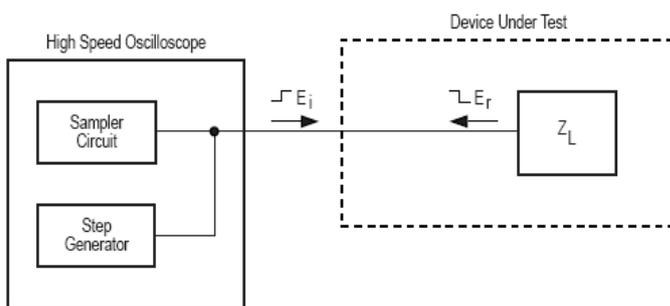
Minore è la costante dielettrica di un mezzo, più esso presenterà caratteristiche isolanti, dato che, se si collocano due corpi di carica opposta alle estremità di una barretta di materiale dielettrico (quindi con costante dielettrica bassa) insorge un campo elettrico lungo la barretta, dando così una forza di Coulomb alta.

$$F = \frac{1}{\epsilon_r} \cdot k \frac{|q_1| |q_2|}{d^2}$$

$$k = 8,99 \cdot 10^9 Nm^2 C^{-2}$$

Costante dielettrica dei liquidi a temperatura ambiente	
Liquido	Costante dielettrica
Pentano	1,84
Esano	1,89
Eptano	1,92
Octano	1,95
Diclorometano	9,08
Triclorometano	4,81
Tetraclorometano	2,24
Dibromometano	7,73
Acqua	80,10
Carbonio	2,64
Etanolo	25,70
1-propanolo	20,10
Benzene	2,28
Cicloesano	2,02
Anilina	6,89
Acido Acetico	6,15
Acetone	21,30
Etere	4,34
Trementina	2,30

## 5. Riflettometro TDR



Il generatore di impulsi, contenuto all'interno dell'oscilloscopio, genera un'onda incidente di verso positivo che è applicata al sistema di trasmissione in esame. L'oscilloscopio è uno strumento di misura che consente di visualizzare, l'andamento temporale dei segnali elettrici e di misurare tensioni, correnti, potenze.

oscilloscopio



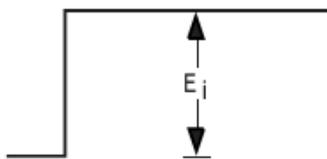
generatore di impulsi

L'impulso percorre la linea di trasmissione alla velocità di propagazione della linea. Se l'impedenza del carico è uguale all'impedenza caratteristica della linea, nessun'onda viene riflessa e il segnale che viene visualizzato sul display dell'oscilloscopio è la tensione incidente registrata come onda passante nel punto della linea monitorato dall'oscilloscopio.

L'**impedenza** è una grandezza fisica vettoriale che rappresenta la forza di opposizione di un bipolo al passaggio di una corrente elettrica alternata. E' esprimibile come numero complesso.

Essa tiene conto dei fenomeni di consumo di energia elettrica e dei fenomeni di accumulo di energia elettromagnetica. L'impedenza è descritta matematicamente da un numero complesso, la cui parte reale rappresenta il fenomeno dissipativo e corrisponde alla resistenza,  $R$ , nella schematizzazione con elementi in serie; la parte immaginaria, detta reattanza,  $X$ , è associata ai fenomeni energetici di accumulo.

$$Z = R + jX$$



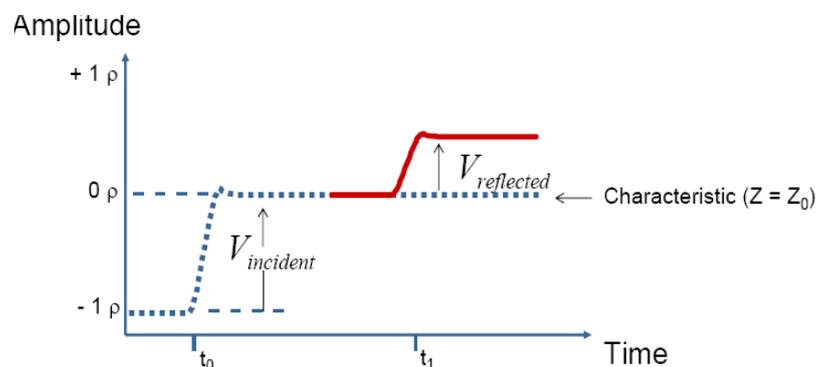
Segnale visualizzato dall'oscilloscopio quando la tensione riflessa  $E_r = 0$

Quando la tensione riflessa  $E_r \neq 0$

$$\rho = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0}$$

Se vi è un disadattamento tra l'impedenza caratteristica della linea ( $Z_0$ ) e l'impedenza del carico ( $Z$ ), parte dell'onda incidente viene riflessa.

La tensione riflessa apparirà sul display dell'oscilloscopio addizionata algebricamente all'onda incidente.



### 3. Un po' di storia

La riflettometria nel dominio del tempo (TDR) è utilizzata fin dagli anni '30 dall'industria delle telecomunicazioni per la valutazione delle caratteristiche delle linee di trasmissione e la localizzazione spaziale di difetti lungo i cavi.

$$D = v \frac{T}{2} = \frac{vT}{2}$$

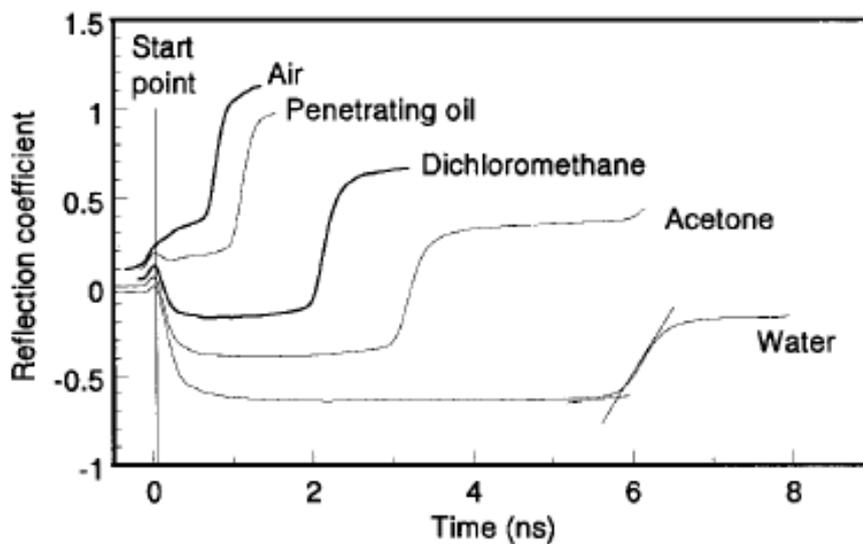
Dove  $v$  = velocità di propagazione

$T$  = tempo di transizione dal punto di monitoraggio fino al punto di disadattamento (D) e ritorno, misurato dall'oscilloscopio.

Nel 1969 Hugo Fellner-Feldegg estese l'uso della TDR alla misura della costante dielettrica di soluzioni.

Lo studio mise in evidenza una corrispondenza nel dominio del tempo tra il coefficiente di riflessione  $\rho$  e la permittività  $\epsilon_r$  del materiale:

$$\epsilon_r = \left( \frac{1 - \rho}{1 + \rho} \right)^2$$



**Fig. 28.** A series of waveforms collected in a coaxial cell demonstrating how the waveform travel time increases as the permittivity increases. Tangent lines are fitted to the water waveform, the intersection being the point from which the time is measured.

L'utilizzo della tecnica TDR per misure di permittività è basata sulla valutazione della velocità dell'impulso elettromagnetico che viaggia lungo una linea di trasmissione parzialmente inserita nel campione sotto test. La velocità di propagazione del segnale TDR è legata alla permittività dielettrica relativa ( $\epsilon_r$ ) del mezzo.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad c \rightarrow \text{velocità della luce (3 x 10}^8 \text{ m/s)}$$

$$v = \frac{2L}{T}$$

$$\epsilon_r = \left( \frac{ct}{2L} \right)^2$$

dove  $L$  rappresenta la lunghezza del percorso e  $t$  il tempo di percorrenza (tempo di transizione dal punto di monitoraggio fino al punto di disadattamento e ritorno, misurato dall'oscilloscopio).

#### 4. Applicazioni in campo agricolo e agroalimentare

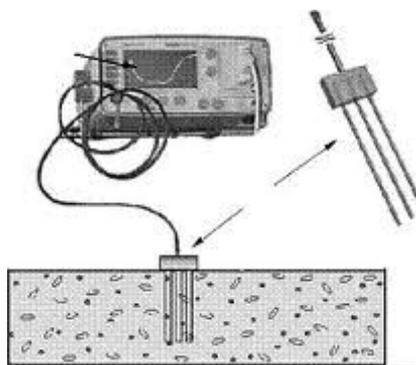
##### 4.1 Misura del contenuto idrico e salino del suolo

→ Si basa sulla forte relazione tra la permittività del materiale e il suo contenuto d'acqua

La costante dielettrica dell'acqua è molto più grande di quella degli altri costituenti del suolo.

Dielectric constants of soil constituents and major textures of soils (Curtis and Defendorf, 1929)

Material	Dielectric constant
Air	1
Water	80 at 20°C
Ice	3 at -5°C
Basalt	12
Granite	7-9
Sandstone	9-11
Dry loam	3.5
Dry sand	2.5



Sono stati studiati vari modelli per il calcolo del contenuto idrico del suolo. a titolo d'esempio si riporta quello elaborato da Topp et al., nel 1980:

$$\theta = (-530 + 292k - 5,5k^2 + 0,043k^3) / 10000$$

dove  $\theta$  rappresenta il contenuto di acqua nel suolo per unità di volume e  $k$  indica la permittività ( $\epsilon_r$ ) calcolata in funzione della velocità di propagazione del segnale TDR.

Un altro esempio è fornito dall'equazione di Malicki et al., (1996) che incorpora la densità apparente del suolo:

$$\theta = \frac{(k^{0.5} - 0.819 - 0.168\rho_b - 0.159\rho_b^2)}{7.17 + 1.18\rho_b}$$

$\rho_b$  è la densità apparente del suolo

Stima della conduttività elettrica (funzione del contenuto salino) dalle forme d'onda TDR (Dalton et al., 1984)

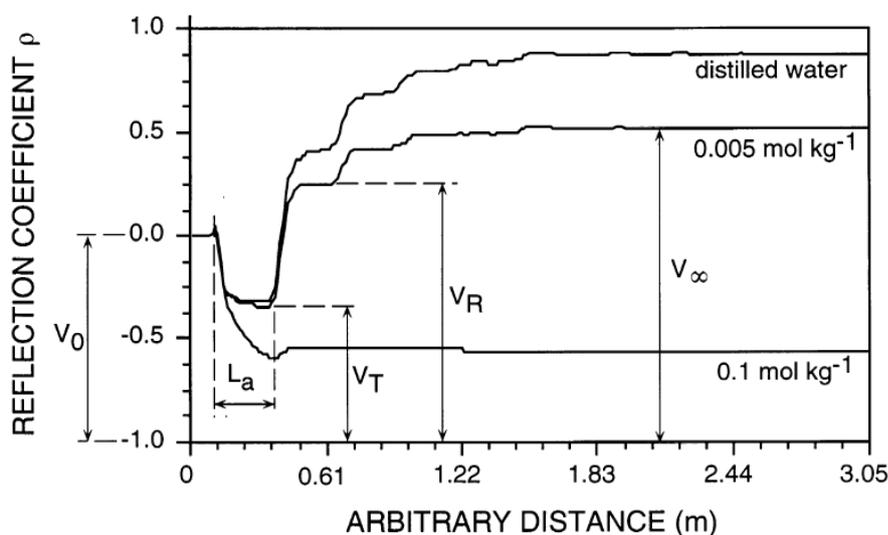


Fig. 3. TDR waveforms in NaCl solution and distilled water with a three-wire type probe ( $L = 0.045$  m). As concentration of the solution increased, the amplitude of reflected signals decreased due to attenuation of electromagnetic waves. There were no final reflections for concentrations  $> 0.1$  mol kg $^{-1}$  of NaCl solution.]

$$\sigma_D = \frac{k^{0.5}}{(120\pi L) \ln[V_T / (V_R - V_T)]}$$

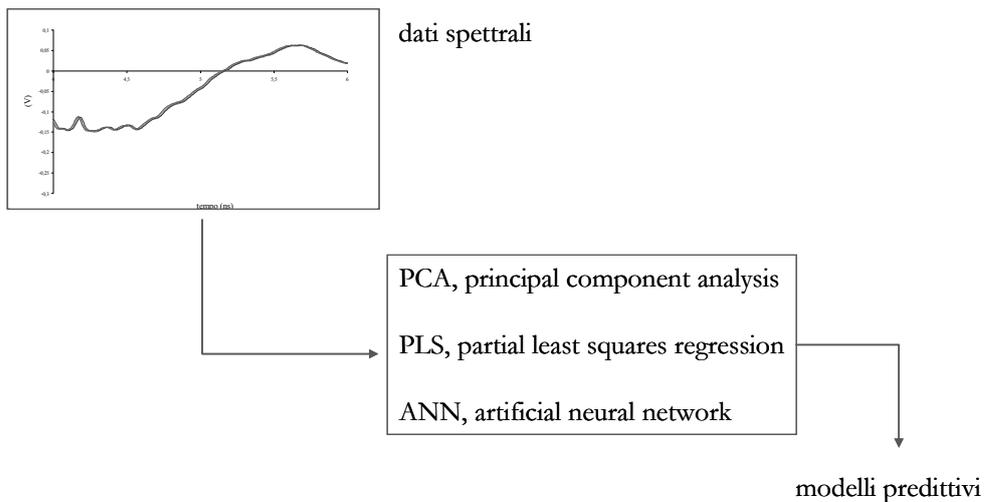
$\sigma_D$  = conducibilità elettrica

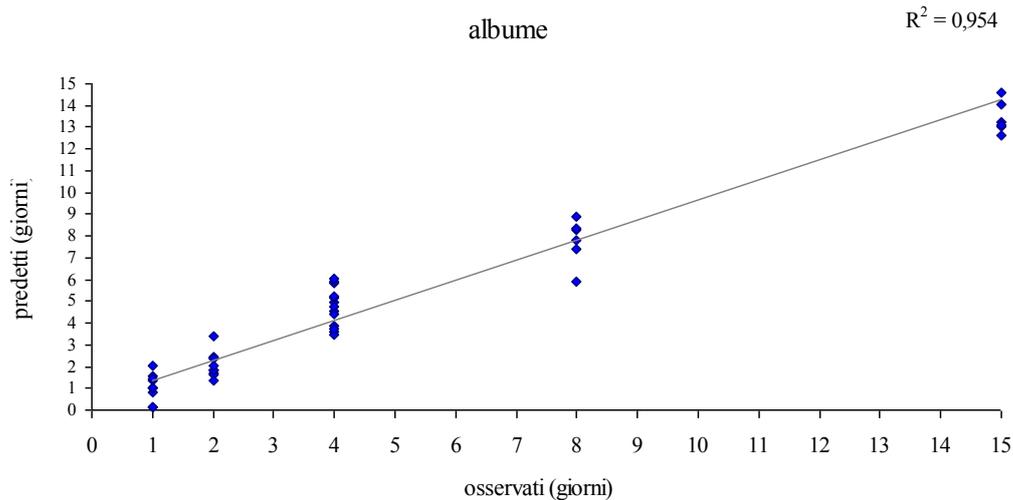
#### 4.2 Caratterizzazione dielettrica di prodotti agroalimentari (recente applicazione)

Le proprietà dielettriche dei materiali alimentari dipendono da diversi fattori: il contenuto di umidità, la densità, la composizione e la struttura del materiale, l'attività dell'acqua.

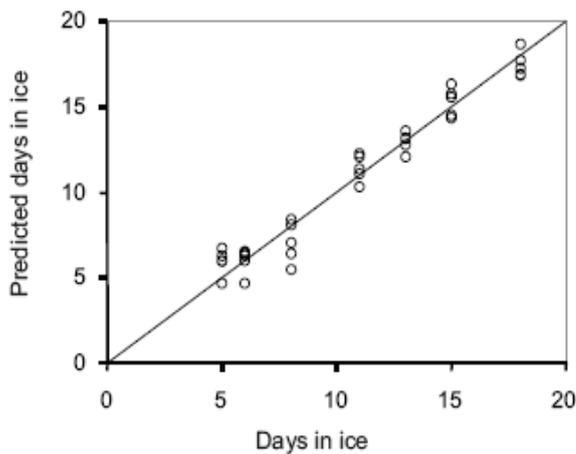
L'analisi del comportamento dielettrico degli alimenti consente di monitorare in modo semplice e rapido la freschezza, la presenza di composti chimici indesiderati e la qualità durante la trasformazione industriale.

Recentemente → abbandono della teoria classica e analisi del segnale TDR con analisi multivariata per la stima di diversi parametri →





*Giorni di conservazione dell'uovo*



*Giorni di conservazione di filetti di merluzzi ottenuti combinando l'analisi TDR con le reti neurali artificiali (ANN)*

## Bibliografia

Dalton, F.N., Herkelrath, W.N., Rawlins, D.S., Rhoades, J.D., 1984. Time-domain reflectometry: simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. *Science* 224, 898–990.

Malicki, M.A., Plagge, R., Roth, C.H., 1996. Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil. *Eur. J. Soil Sci.* 47, 357–366.

Topp, G.C., Davis, J.L., Annan, A.P., 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.* 16, 574–582.