



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Biomedica

A.A. 2022/2023

Caratterizzazione delle proprietà dielettriche di soluzioni saline
mediante tecniche riflettometriche

Characterization of the dielectric properties of saline solutions
using reflectometric techniques

Relatore:

Franco Moglie

Laureando:

Proietti Giampiero

Correlatore:

Valter Mariani Primiani

INDICE

• Introduzione	1
• Abstract	2
• Permittività elettrica	3
• Schema di misura	6
• Strumentazione	8
• Applicazioni	11
• Elaborazione dati	13
• Risultati	16
• Permittività teorica	19
• Metodo teorico e metodo sperimentale	26
• Conclusioni	28
• Bibliografia	29
• Ringraziamenti	30

INTRODUZIONE

Scopo della sperimentazione è quello di progettare un sistema di misurazione atto alla determinazione delle proprietà dielettriche dei materiali ai fini di stimare in termini quantitativi l'interazione della materia con campi elettromagnetici tempo varianti.

Le onde elettromagnetiche sono fenomeni fisici a cui si associa un'energia di trasporto che permea in nostro ambiente quotidiano.

Esse possono provenire da fonti naturali o essere generate artificialmente per una vasta gamma di applicazioni pratiche, inclusi campi come la comunicazione, la tecnologia medica e la ricerca scientifica.

Proprio a causa della grande quantità di onde a cui siamo sottoposti ogni giorno si necessita di studiare come queste interagiscono con il nostro organismo e l'ambiente che ci circonda.

Conoscere la risposta a determinate stimolazioni elettriche, inoltre, può portare allo sviluppo di nuovi metodi di diagnosi e terapia nel trattamento di patologie con tecniche sempre più avanzate e poco invasive.

Il metodo impiegato in questo studio per quantificare tale l'interazione è il calcolo della permittività elettrica di un materiale tramite misure riflettometriche di campi elettromagnetici a frequenza variabile.

Si sono utilizzate soluzioni acquose con aggiunta di sale ottenendo valori di normalità della soluzione a cui è possibile associare tessuti organici di natura diversa quali muscoli o adipe.

L'elaborazione sarà eseguita tramite programmi in codice Python ed i risultati ottenuti saranno confrontati con il modello teorico per il calcolo della costante dielettrica di A. Stogryn illustrati nel suo "Equations for Calculating the Dielectric Constant of Saline Water".

ABSTRACT

The aim of this paper is to design a measurement system suitable for determining the dielectric properties of materials in order to estimate in quantitative terms the interaction of matter with time-varying electromagnetic fields.

Electromagnetic waves are physical phenomena to which we associate a transport energy that permeates our daily environment.

They can come from natural sources or be artificially generated for a wide range of practical applications, including fields such as communication, medical technology and scientific research.

Precisely because of the large quantity of waves to which we are subjected every day, it is necessary to study how these interact with our organism and the surrounding environment.

Furthermore, knowing the response to certain electrical stimulations can lead to the development of new methods of diagnosis and therapy in the treatment of pathologies with advanced and minimally invasive techniques. The method used in this thesis to quantify the interaction is the calculation of the electrical permittivity of a material through reflectometric measurements of variable frequency electromagnetic fields.

Aqueous solutions with the addition of salt were used, obtaining variable normality of the solution to which it is possible to associate organic tissues of a different nature such as muscles or fat.

The processing will be performed using Python code programs and the results obtained will be compared with the theoretical model for calculating the dielectric constant by A. Stogryn in his "Equations for Calculating the Dielectric Constant of Saline Water".

PERMITTIVITÀ ELETTRICA

La permittività elettrica, comunemente indicata con il simbolo ϵ (epsilon), rappresenta una caratteristica fisica dei materiali che quantifica la loro capacità di polarizzarsi in risposta a un campo elettrico applicato, andandone a isolare o schermare gli effetti.

Permette di caratterizzare un materiale in base alla sua propensione a condurre o no elettricità e quindi distinguere tra mezzi isolanti (dielettrici) o conduttivi.

Quando un campo elettrico esterno agisce su un dielettrico i suoi atomi e molecole si polarizzano separandosi parzialmente in cariche positive e negative, orientando i dipoli elettrici che seguono la direzione del campo. La permittività può essere rappresentata attraverso un tensore, una descrizione locale dipendente dalle coordinate del punto.

In condizioni di materiale lineare, omogeneo e isotropo, tutte le componenti del tensore hanno lo stesso valore, consentendo di trattare la permittività come una grandezza scalare: la costante dielettrica.

In tali condizioni è possibile definire una relazione preliminare che descrive questa proprietà.

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$$

Dove il vettore \mathbf{D} rappresenta l'induzione elettrica, il vettore \mathbf{E} il campo elettrico esterno applicato e ϵ la costante dielettrica.

La trattazione seguirà definendo ϵ_r la costante dielettrica relativa del mezzo con $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$ e ϵ_0 quella del vuoto.

Si definiscono inoltre il vettore di polarizzazione \mathbf{P} e χ la suscettività elettrica del mezzo, la costante di proporzionalità tra il campo \mathbf{E} ed il conseguente vettore di polarizzazione \mathbf{P} .

$$\mathbf{P} = (\epsilon_r - 1)\epsilon_0 \mathbf{E} = \epsilon_0 \chi \mathbf{E}$$

Nell'ipotesi di campi tempo varianti tali grandezze saranno funzione della variabile tempo. Volendo effettuare misurazioni a frequenze variabili passiamo nel dominio della frequenza, esprimendo pertanto la costante dielettrica come:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_0 \left[1 + \frac{P(\omega)}{\epsilon_0 E(\omega)} \right]$$

Un campo elettromagnetico applicato è costituito da due componenti principali: un campo elettrico e un campo magnetico, che sono ortogonali tra loro e si propagano nello spazio sotto forma di onde elettromagnetiche. Le onde piane sono un tipo specifico di soluzione dell'equazione delle onde che si propagano in modo uniforme in tutte le direzioni ed è caratterizzata da fronti d'onda piani.

Utilizzeremo questo modello d'onda per il nostro studio andando a trascurare la componente magnetica dell'onda in quanto non di interesse per i materiali in esame.

La permittività elettrica sarà funzione delle caratteristiche del materiale ma anche della pulsazione del campo applicato.

Con l'uso del formalismo complesso, \mathbf{E} può essere espresso in termini del suo fasore con

$$\mathbf{E} = \mathcal{R}e \left[\hat{\mathbf{E}} e^{j\omega t} \right]$$

All'equilibrio all'interno del mezzo sottoposto al campo \mathbf{E} avremo:

$$\mathbf{F}_i + \mathbf{F}_s + \mathbf{F}_r = q \mathbf{E}(t)$$

Con \mathbf{F}_i l'inerzia delle molecole, \mathbf{F}_s la forza di smorzamento che agisce come attrito intermolecolare e \mathbf{F}_r la forza di richiamo elettrostatica.

La soluzione a quest'equazione differenziale in termini di \mathbf{d} distanza di dipolo lega il vettore \mathbf{P} ed il vettore \mathbf{E} nell'ipotesi di campo tempo variante che nel dominio della frequenza diventa:

$$\hat{\mathbf{P}} = \frac{q^2}{m} \frac{\hat{\mathbf{E}}}{(\omega_0^2 - \omega^2) + 2j\alpha\omega}$$

Con ω_0 pulsazione di risonanza e α caratteristica dal materiale.

Pertanto, possiamo ora definire una permittività complessa relativa che dipende sia dalla natura del materiale che dalla pulsazione del campo applicato ad esso.

$$\epsilon'_r - j\epsilon''_r = \epsilon_c$$

La permittività elettrica relativa è quindi formata da una parte reale ed una immaginaria.

Il contributo reale è strettamente legato alle perdite dielettriche del materiale mentre il contributo immaginario dipende dalla sua conducibilità. La conduttività elettrica, o conducibilità elettrica è la conduttanza elettrica specifica di un conduttore dovuta al debole richiamo statico degli atomi nel materiale.

Definita da Stephen Gray nel 1731, il suo strumento di misura è il conducimetro. L'unità di misura del sistema internazionale è siemens su metro (S/m).

$$\sigma = I\ell / S\Delta V$$

Dove:

I = corrente nel tratto

ℓ = lunghezza del tratto

S = area sezione trasversale del tratto

ΔV = d.d.p. ai capi

La conduttività complessiva di un materiale considera non solo il suo contributo statico e intrinseco ma tiene anche conto di un ulteriore apporto generato da un campo elettrico alternato.

La permittività relativa può essere perciò definita in termini di conducibilità equivalente:

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j(\epsilon_r'' + \frac{\sigma_s}{\omega})$$

Nonostante ciò, un materiale dielettrico di buona qualità presenta una bassa conducibilità statica, che può essere considerata trascurabile per misurazioni delle perdite dielettriche.

Pertanto, espressione della permittività dielettrica in un mezzo con le ipotesi di cui sopra sarà:

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j(\frac{\sigma_s}{\omega})$$

SCHEMA DI MISURA

Per quanto riguarda le misure delle proprietà elettriche di materiali biologici è importante tenere conto delle seguenti caratteristiche:

- operare in un largo range di frequenza
- controllo della temperatura del campione
- controllo della dimensione del campione

Le proprietà magnetiche non sono considerate poiché la permeabilità magnetica di sostanze biologiche è uguale a quella dello spazio libero in tutti i casi pratici e le perdite magnetiche sono trascurabili.

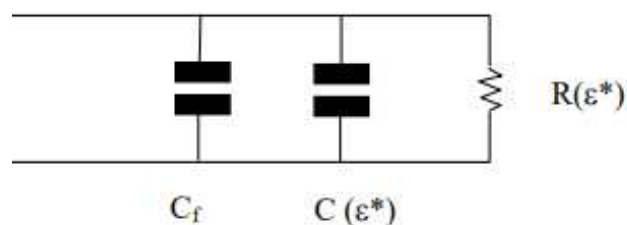
La permittività del materiale campione sarà calcolata tramite misure di riflessione.

Un campo elettrico in un materiale dielettrico produce una corrente di spostamento ed una corrente ohmica di conduzione.

Tale interazione può essere quantificata tramite l'analisi della variazione del coefficiente di riflessione che si crea all'interfaccia tra il mezzo dielettrico e la sonda di misura.

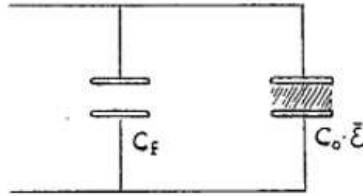
Nell'ipotesi di campi in linee TEM a sonda coassiale aperta possiamo operare in ampi range di frequenza ed ottenere una relazione analitica tra modulo e fase del fasore di riflessione e la permittività dielettrica complessa del mezzo.

Il circuito di sonda può essere così rappresentato:



dove C_f è la capacità di fringing che tiene conto dell'energia reattiva immagazzinata all'interno della linea, $C(\epsilon^*) = \epsilon^* C_0$ è la capacità terminale della linea in presenza di un dielettrico con permittività complessa $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$.

$R(\epsilon^*)$ è la resistenza di radiazione del coassiale aperto nel materiale. Sia R che con C_f variano con la frequenza ma possiamo trascurare la resistenza per frequenze tali che le dimensioni della linea siano piccole rispetto alla lunghezza d'onda così da semplificare il circuito equivalente.



Pertanto, la capacità totale di linea sarà:

$$C_t = C_f + \epsilon^* C_0$$

Con C_f e C_0 caratteristici della sonda, pressoché costanti e calcolabili teoricamente.

Si sono utilizzate linee più piccole in teflon in quanto offrono condizioni di misura quasi ottime per tessuti con alto contenuto d'acqua.

Nel nostro caso per una sonda a 3.6 mm in teflon

$C_f = 0.004$ pF e $C_0 = 0.019$ pF con impedenza di linea di $Z_0 = 50 \Omega$.

Il coefficiente di riflessione prodotto nei confronti di una linea coassiale di impedenza caratteristica Z_0 è pari a

$$\Gamma_L = \frac{1 - j\omega Z_0 [C(\epsilon^*) + C_f]}{1 + j\omega Z_0 [C(\epsilon^*) + C_f]}$$

Potendo così risalire al valore della permittività elettrica:

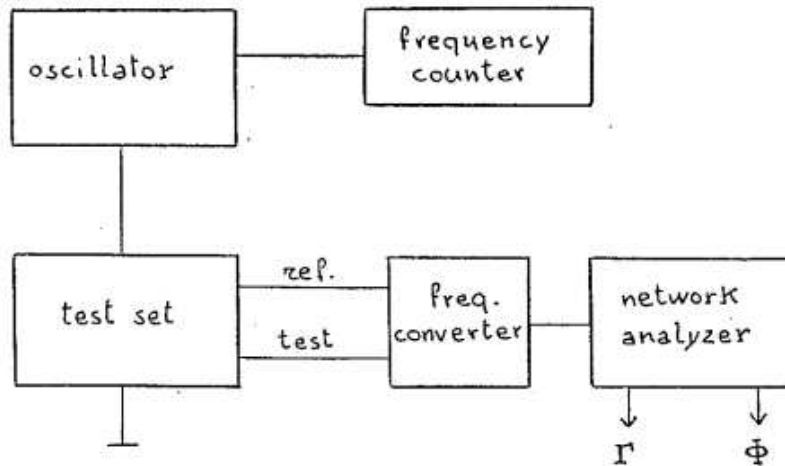
$$\epsilon^* = \frac{1 - \Gamma_L}{j\omega Z_0 C_0 (1 + \Gamma_L)} - \frac{C_f}{C_0}$$

In termini di parte reale e parte immaginaria:

$$\epsilon' = \frac{-2\Gamma \sin(\phi)}{\omega Z_0 C_0 \cdot [1 + 2\Gamma \cos(\phi) + \Gamma^2]} - \frac{C_f}{C_0} \quad \epsilon'' = \frac{1 - \Gamma^2}{\omega Z_0 C_0 \cdot [1 + 2\Gamma \cos(\phi) + \Gamma^2]}$$

STRUMENTAZIONE

Possiamo rappresentare lo schema a blocchi di misura



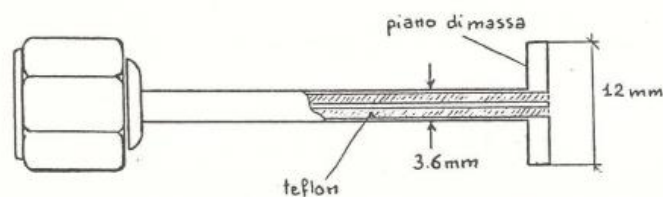
Gli elementi fondamentali sono la sonda terminale e l'analizzatore di rete utilizzato (HP Agilent Keysight della Hewlett-Packard).

L'oscillatore genera un segnale a frequenza variabile da 0.5Ghz a 8Ghz.

L'analizzatore misura l'ampiezza relativa e la differenza di fase fra il canale del segnale di riferimento e quello del segnale riflesso e fornisce l'impedenza terminale di sonda in termini di ampiezza e angolo di fase del coefficiente di riflessione.

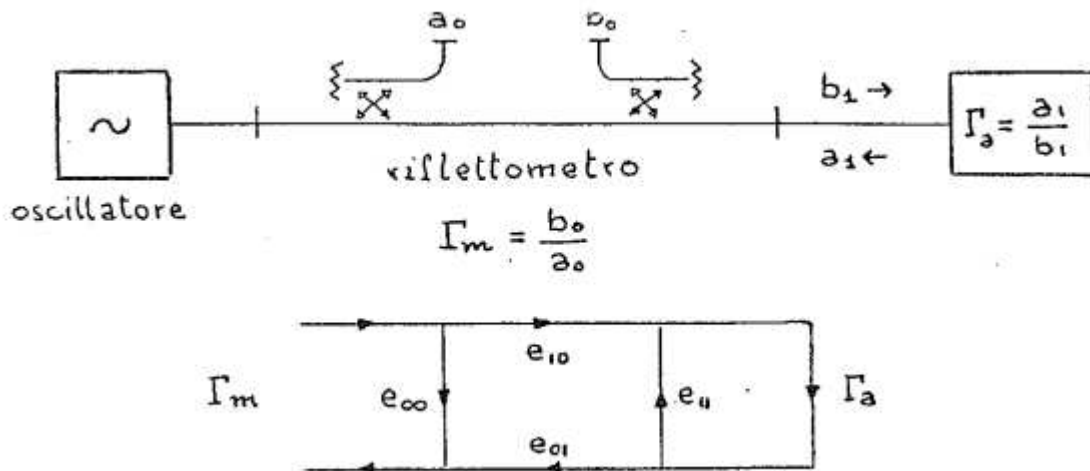
I dati risultanti vengono poi corretti con la rete di correzione ottenuta con una procedura di calibrazione iniziale.

La sonda si compone di un cavo a coassiale aperto da 3.6 mm al quale si è dovuta saldare una flangia metallica del raggio di 12 mm in modo da rendere le misurazioni insensibili alla maggiore o minore penetrazione della sonda nel materiale e quindi minimizzando gli effetti del campo di frangia.



Geometria del sensore

Per quanto riguarda il coefficiente di riflessione, esso non può essere direttamente misurato all'interfaccia cavo-materiale in prova, ma all'ingresso del connettore impiegato per realizzare la sonda; pertanto, bisogna tener conto dell'effetto introdotto da questo tratto di linea supplementare, che viene modellata mediante una rete a due porte fittizia.



Il coefficiente di riflessione misurato è Γ_m . Il sistema di misura non perfetto fa sì che possano riscontrarsi grosse differenze fra l'impedenza posta alla porta 'a' e quella misurata.

La rete due porte adatta il riflettometro e la porta sconosciuta così da poter considerare perfetto il riflettometro.

Il circuito equivalente ha quattro termini d'errore che si riducono a tre per le misure che riguardano rapporti di potenze:

- e_∞ rappresenta la direttività del sistema, cioè quella parte di segnale che non raggiunge il dispositivo testato.
- e_{10} ed e_{01} rappresentano le variazioni della risposta in frequenza dovute ad accoppiatori, cavi, connettori.
- e_{11} rappresenta il non perfetto adattamento della porta test, causato soprattutto dagli accoppiatori.

Le relazioni fra i coefficienti di riflessione misurati e reali sono:

$$\Gamma_m = e_{00} + \frac{(e_{10}e_{01}) \cdot \Gamma_a}{1 - e_{11} \cdot \Gamma_a}$$

$$\Gamma_a = \frac{\Gamma_m - e_{00}}{e_{11} \cdot (\Gamma_m - e_{00}) + (e_{10}e_{01})}$$

Per conoscere i tre parametri suddetti e poter quindi effettuare una correzione delle misure è necessaria una procedura di calibrazione. I risultati ottenuti con materiali di permittività nota (acqua, soluzioni saline) permettono di valutare l'accuratezza del sistema di misura realizzato. Basterà una sola soluzione di calibrazione in quanto gli altri due parametri si possono calcolare effettuando un cortocircuito e un circuito aperto in prossimità della sonda.

Con Γ_L coefficiente di riflessione di linea, otterrò:

- Circuito aperto (sonda in aria)

$$\Gamma_L = \frac{1 - j\omega Z_o [C_o + C_f]}{1 + j\omega Z_o [C_o + C_f]}$$

- Circuito chiuso

$$\Gamma_L = -1$$

- Dielettrico noto

$$\Gamma_L = \frac{1 - j\omega Z_o [C (\epsilon^*) + C_f]}{1 + j\omega Z_o [C (\epsilon^*) + C_f]}$$

La sonda viene successivamente connessa al cavo e si procede alla sua calibrazione mediante le soluzioni campione a salinità nota.

Sono state prese in esame soluzioni con normalità nota pari a

- 0,267 utilizzata per la calibrazione
- 0,85 soluzione a permittività incognita



Analizzatore di reti



Sonda

APPLICAZIONI

In generale partendo da una qualsiasi soluzione a normalità nota si può modificare la normalità con aggiunta di sale in modo da emulare tessuti a caratteristiche simili.

In codice Python:

```
3]: Nx = 0.0057 # Normalità acqua del rubinetto stimata
N = 0.0057 # Normalità acqua iniziale
Nf = 0.01 # Normalità desiderata #0.085 - 0.267 -0.71
L = 50 # Litri di acqua nella vasca
ma = 58.44 # (g/mol) massa molare di NaCl
gs0 = (ma * L * N) / (1 - ma * N * 0.0005)
print('Sale equivalente iniziale = %4.3g g' % (gs0))
gsf = (ma * L * Nf) / (1 - ma * Nf * 0.0005)
print('Sale totale = %4.3g g' % (gsf))
gsa = gsf - gs0 # Grammi di sale da aggiungere
print('Sale da aggiungere = %4.3g g' % (gsa))

Sale equivalente iniziale = 16.7 g
Sale totale = 29.2 g
Sale da aggiungere = 12.6 g
```

A causa dei differenti fenomeni di attenuazione dei dielettrici biologici che dipendono dalle membrane delle cellule del tessuto e dalle proprietà ioniche, risulta impossibile sviluppare un materiale che simuli il tessuto a tutte le frequenze.

Gli ingredienti quali acqua e sale dei "phantom" (fantocci) che simulino tessuti ad alto contenuto d'acqua (muscolo) sono stati determinati nella seguente tabella per frequenze che vanno da 13.56 a 2450 MHz.

f	muscolo 37°	TX-150	PEP	Al	acqua	NaCl
(MHz)	ϵ'	σ	(%)	(%)	(%)	(%)
* 2456	47.0	2.17	8.46	15.01	-	75.48
* 915	51.0	1.28	8.42	15.44	-	75.15
750	52.0	1.25	8.42	15.44	-	75.15
* 434	53.0	1.18	8.42	15.44	-	75.15
300	54.0	1.15	8.42	15.44	-	75.15
200	56.5	1.00	8.39	15.79	-	74.92

Tab. 8.6.1. - Composizione del fantoccio (a 22°C) e caratteristiche del muscolo simulato (a 37°C).

Una volta definito il comportamento dielettrico dei materiali biologici in presenza di campo elettrico esterno, è possibile classificare tali materiali in base alla percentuale di acqua in essi contenuti.

La valutazione degli effetti termici dei campi elettromagnetici nei diversi tessuti si definisce SAR (Specific Absorption Rate) come potenza assorbita dal materiale.

$$SAR(\underline{r}) = \frac{P(\underline{r})}{\rho} = \sigma \frac{|E(\underline{r})|^2}{2\rho}$$

Il SAR è fortemente influenzato dalle caratteristiche della radiazione; infatti, quando la lunghezza d'onda del campo elettromagnetico e le dimensioni del soggetto esposto diventano paragonabili, si verificano fenomeni di risonanza che danno luogo a picchi di assorbimento.

Il massimo del rilassamento delle molecole di piccole dimensioni, come l'acqua, si ha per frequenze intorno al GHz, dove si collocano bande per telecomunicazioni radiomobile.

Gli organi a maggior rischio sono quelli più esposti alla radiazione per la vicinanza alla sorgente ed i tessuti a più alta conducibilità, cioè quelli ad elevato contenuto di acqua, sono da considerarsi i più affetti ad aumenti di temperatura.

Per valutare se l'esposizione è dannosa alla salute si calcola il SAR, medio e di picco mediante misure di laboratorio su fantocci dielettrici equivalenti.

Conoscere le caratteristiche dielettriche del tessuto biologico, inoltre, ci permette di studiare l'effetto della corrente su un'ampia varietà di tessuti, tra cui la pelle stessa.

In base alla frequenza del segnale applicato si possono distinguere tre effetti: faradico, elettrolitico e termico.

Tale proprietà è ampiamente utilizzata in ambito medico diagnostico e terapeutico.

Un esempio è l'elettrobisturi che grazie ad elettrodi applicati al paziente permette una dinamica di taglio-coagulo dosando opportunatamente frequenza, intensità e tempo di applicazione della corrente, minimizzando emorragie e facilitando le operazioni chirurgiche.

ELABORAZIONE DATI

Per l'elaborazione ed il calcolo della permittività elettrica si è programmato in ambiente Jupyter Lab con Python release 3.0

Il programma legge le misure del VNA per la calibrazione con soluzioni saline note e calcola la costante dielettrica di una soluzione incognita dopo che il VNA ha letto il coefficiente di riflessione.

Importo le costanti elettriche utilizzate.

```
import numpy as np
import scipy.constants as scp
import math
import matplotlib.pyplot as plt
print("pi =", scp.pi)
print("eps0 =", scp.epsilon_0)
print("mu0 =", scp.mu_0)
print("c =", scp.c)
```

```
pi = 3.141592653589793
eps0 = 8.8541878128e-12
mu0 = 1.25663706212e-06
c = 299792458.0
```

Definisco i parametri dielettrici del materiale

```
def materiale (epsr, mur, sigma, freq):
    sig = sigma
    omega = 2.0 * scp.pi * freq
    epsilon1 = scp.epsilon_0 * epsr
    epsilon2 = sig / omega
    epsc = epsilon1 - epsilon2 * 1j
    mu = mur * scp.mu_0
    tgd = epsilon2 / epsilon1
    tgd2 = tgd**2
    alfa = omega * np.sqrt (mu * epsilon1 * 0.5 * (np.sqrt (1 + tgd2)
    beta = omega * np.sqrt (mu * epsilon1 * 0.5 * (np.sqrt (1 + tgd2)
    gamma = alfa + beta * 1j
    eta = np.sqrt (mur * scp.mu_0 / epsc)
    return gamma, eta, alfa, beta, tgd, epsc
```

Letture delle misurazioni acquisite dal VNA, si è utilizzata soluzione di calibrazione a normalità 0,267.

```
# Soluzione incognita
filename = './085.txt'
si = np.loadtxt(filename, delimiter='\t', skiprows=0, dtype=float)
# Soluzione di calibrazione
filename = './0267.txt'
sc = np.loadtxt(filename, delimiter='\t', skiprows=0, dtype=float)
# Corto Circuito
filename = './SHORT.txt'
cc = np.loadtxt(filename, delimiter='\t', skiprows=0, dtype=float)
# Circuito Aperto
filename = './OPEN.txt'
ca = np.loadtxt(filename, delimiter='\t', skiprows=0, dtype=float)
*****
```

Impongo i parametri di sonda e di misura

```
# Temperatura ambientale
*****
temperatura = 19
*****
# Normalità della soluzione di calibrazione
*****
normalita = 0.267
*****
# Impedenza caratteristica della Linea (ohm)
Z0 = 50
# Capacità della sonda (per misure soluzioni in acqua)
co=19E-15
cf=4E-15
ct=cf+co
```

L'analizzatore di rete restituisce una misura del coefficiente di riflessione in termini di modulo e fase.

Formatto i dati per l'utilizzo nel programma e definisco nuove variabili.

```
# Array (complex) dei dati Letti nel caso Freq, Mag, Phase (deg)
msi = np.array(10**(si[:,1] / 20) * (np.cos(si[:,2] * pi / 180) + np.sin(si[:,2] * pi / 180) * 1j), dtype=complex)
msc = np.array(10**(sc[:,1] / 20) * (np.cos(sc[:,2] * pi / 180) + np.sin(sc[:,2] * pi / 180) * 1j), dtype=complex)
mc = np.array(10**(cc[:,1] / 20) * (np.cos(cc[:,2] * pi / 180) + np.sin(cc[:,2] * pi / 180) * 1j), dtype=complex)
ma = np.array(10**(ca[:,1] / 20) * (np.cos(ca[:,2] * pi / 180) + np.sin(ca[:,2] * pi / 180) * 1j), dtype=complex)
```


Con la relazione precedentemente descritta trovo i coefficienti della rete due porte fittizia ai fini dell'adattamento di linea e trovo il valore corrispondente della permittività dielettrica complessa della soluzione incognita.

```
# Calcoli
zp1 = - 1 / (2 * pi * freq * ct) * 1j
#print("zp1 = ",zp1)
zp2 = 1 / (2 * pi * freq * (co * epsrc + cf) * 1j)
#print("zp2 = ",zp2)
ta = (zp1 - Z0) / (zp1 + Z0)
#print("ta = ",ta)
ts = (zp2 - Z0) / (zp2 + Z0)
#print("ts = ",ts)
c1 = ((msc - ma) * (ta + 1) - (ma - mc) * (ts - ta)) / ((ma - mc) * (ts - ta) + ts * (msc - ma) * (ta + 1))
#print("c1 = ",c1)
a1 = ma - ((ta * (ma - mc) * (1 + c1)) / (ta + 1))
#print("a1 = ",a1)
b1 = (((ma - mc) * (1 - c1 * ta) * (1 + c1)) / (ta + 1))
#print("b1 = ",b1)
e1 = (msi - a1) / (c1 * (msi - a1) + b1)
#print("e1 = ",e1)
y = 1 / (Z0 * ((1 + e1)/(1 - e1)))
#print("y = ",y)
yr = y.real
yi = y.imag
epsr_i = ((yi / (2 * pi * freq)) - cf) / co - yr / (co * (2 * pi * freq)) * 1j
#epsr_i = 1j * np.conjugate(y) / (co + 2 * pi * freq) - cf / co
```

che restituisce la ϵ_r complessa della soluzione.

RISULTATI

Conoscendo parte reale e parte immaginaria della permittività complessa possono ricavare le perdite dielettriche del materiale nonché la sua conducibilità.

Nel caso della soluzione presa in esame ottengo:

```
print("epsr_i_rel = ", epsr_i)
sigma = - epsr_i.imag * 2 * pi * freq * scp.epsilon_0
print("sigma = ", sigma)

epsr_i_rel = [67.09867015-235.74048397j 67.30773857-232.00482267j
67.51227787-228.28509862j ... 55.03911699 -36.78764011j
54.67180165 -36.83477157j 54.80075377 -37.2055003j ]
sigma = [ 6.55741656 6.55676054 6.55323683 ... 17.36325675 17.40189583
17.59359834]
```

Si noti che già numericamente possiamo osservare il comportamento di questi due parametri elettrici del materiale al variare della frequenza del campo elettrico ad esso applicato.

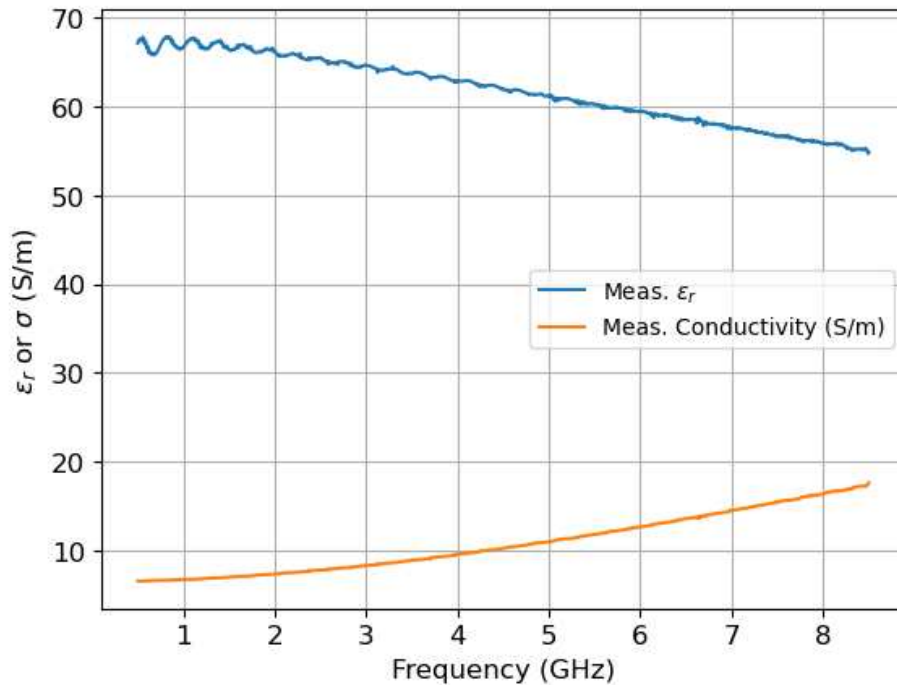
La parte reale della permittività diminuisce all'aumentare della frequenza mentre la conducibilità aumenta.

Ciò dimostra che un materiale dielettrico sottoposto a campi ad elevate frequenze perde parte della sua capacità di polarizzarsi e isolare il campo applicato a favore di un aumento della conducibilità.

Rappresento graficamente l'andamento della parte reale della permittività e la conducibilità ottenuta.

```
plt.rc('xtick', labelsizes=12)
plt.rc('ytick', labelsizes=12)
plt.rc('axes', labelsizes=12)
plt.xlabel('Frequency (GHz)')
plt.ylabel(r'$\varepsilon_r$ or $\sigma$ (S/m)')
x = freq * 1e-9 # in GHz
er_g = epsr_i.real
sig_g = - epsr_i.imag * 2 * pi * freq * scp.epsilon_0
print("Temperatura = ", temperatura, "°")
plt.plot(x, er_g, label=r'Meas. $\varepsilon_r$')
plt.plot(x, sig_g, label='Theo. Conductivity (S/m)')
plt.legend(loc="center right") # upper lower center right left
plt.grid()
plt.show()
```

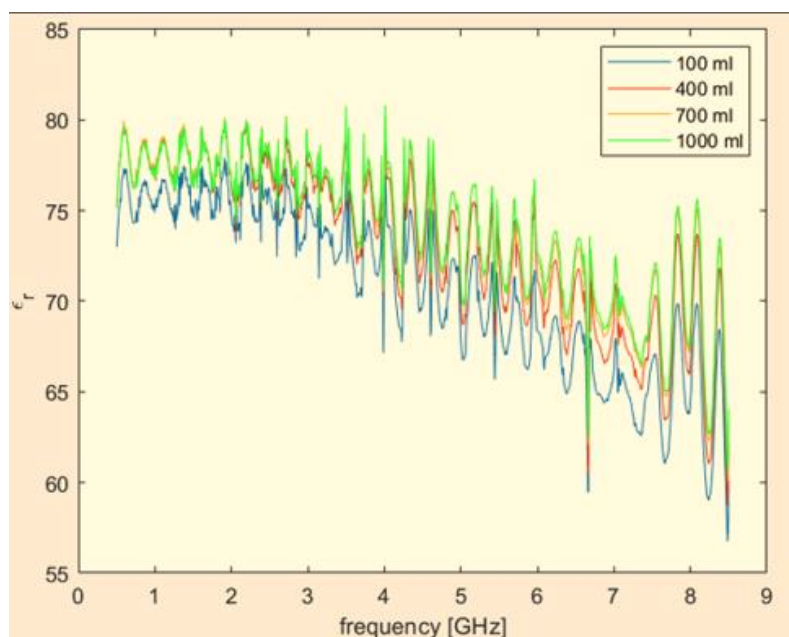
Ed ottengo per $T=19^{\circ}\text{C}$



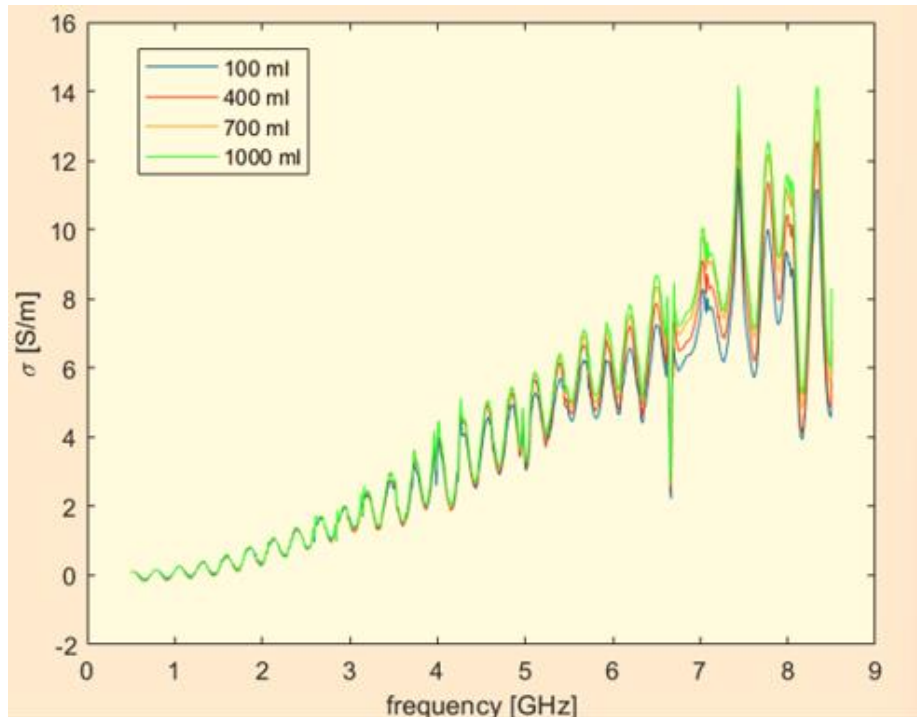
Come ci si aspettava dalla trattazione teorica.

Volendo ora effettuare un controllo sulla quantità di volume del campione in esame, sono state fatte misurazioni per campioni di soluzione salina a volume variabile crescente.

Calcolando ϵ_r e σ per volumi variabili di campione ottengo



Per σ ho



Si può osservare di come la quantità di campione di soluzione non influenzi in maniera significativa la riflessione del campo.

Otteniamo un aumento dei parametri all'aumentare del volume campione con un assestamento graduale in prossimità di ampi volumi.

Ciò potrebbe essere dovuto all'approssimazione circuitale che considera il dielettrico esteso all'infinito.

Ai fini della misurazione si consiglia un campione esteso di soluzione.

PERMITTIVITÀ TEORICA

La permittività elettrica di un materiale è stata oggetto di studi per molti e nel corso del tempo si sono realizzati algoritmi più o meno precisi per la stima della stessa.

Alex Stogryn nel suo astratto "Equations for Calculating the Dielectric Constant of Saline Water" illustra di come la costante dielettrica dell'acqua salina può essere rappresentata in termini di un'equazione nella forma di Debye.

$$K = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_0 - \epsilon_{\infty}}{1 - i2\pi\tau f} + i \frac{\sigma}{2\pi\epsilon_0^* f}$$

Con

- K permittività elettrica
- ϵ_0 e ϵ_{∞} le costanti dielettriche a bassa ed alta frequenza del solvente (modificate dal soluto) rispettivamente.
- f la frequenza elettromagnetica
- τ il tempo di rilassamento che il dielettrico impiega per orientare il dipolo elettrico in direzione del campo applicato
- σ la conducibilità
- ϵ_0^* la permittività nel vuoto

Le equazioni per il calcolo di tali parametri possono essere rappresentate in funzione della temperatura e salinità della soluzione in esame.

Con N normalità della soluzione e T temperatura espressa in gradi centigradi

$$\begin{aligned}\epsilon_0(T, N) &= \epsilon_0(T, 0)a(N) \\ 2\pi\tau(T, N) &= 2\pi\tau(T, 0)b(N, T)\end{aligned}$$

Per $0 < T < 40^\circ\text{C}$ e $0 < N < 3$

Con a e b rispettivamente

$$a(N) = 1.000 - 0.2551N + 5.151 \times 10^{-2}N^2 - 6.889 \times 10^{-3}N^3$$

$$b(N, T) = 0.1463 \times 10^{-2}NT + 1.000 - 0.04896N - 0.02967N^2 + 5.644 \times 10^{-3}N^3.$$

supponendo

$$\epsilon_0(T, 0) = 87.74 - 4.0008T + 9.398 \times 10^{-4}T^2 + 1.410 \times 10^{-6}T^3.$$

$$2\pi\tau(T, 0) = 1.1109 \times 10^{-10} - 3.824 \times 10^{-12}T + 6.938 \times 10^{-14}T^2 - 5.096 \times 10^{-16}T^3$$

Il valore di ϵ_∞ lo si pone costante e uguale a 4.9 in modo da fittare al meglio l'andamento ad alte frequenze in quanto non c'è evidenza che questo sia influenzato dalla salinità dell'acqua mentre varia leggermente con la temperatura.

Per quanto riguarda la conducibilità, il legame tra essa e i parametri di temperatura e normalità è

$$\sigma_{\text{NaCl}}(T, N) = \sigma_{\text{NaCl}}(25, N) [1.000 - 1.962 \times 10^{-2}\Delta + 8.08 \times 10^{-5}\Delta^2 - \Delta N \{3.020 \times 10^{-5} + 3.922 \times 10^{-5}\Delta + N(1.721 \times 10^{-5} - 6.584 \times 10^{-6}\Delta)\}] \quad (12)$$

Con $\Delta=25-T$

Per la conducibilità a 25 gradi ho

$$\sigma_{\text{NaCl}}(25, N) = N[10.394 - 2.3776N + 0.68258N^2 - 0.13538N^3 + 1.0086 \times 10^{-2}N^4].$$

Osservazioni:

L'articolo determina la costante dielettrica relativa complessa come

$K = \epsilon_r' + j\epsilon_r''$ invece di $\epsilon_{rc} = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$ nella trattazione moderna.

Si vuole implementare in codice Python una funzione che restituisca il valore della permittività teorica complessa del materiale note la temperatura e la normalità della soluzione salina.

Utilizzo le formule di A. Stogryn precedente illustrate tenendo conto che la nostra $\epsilon_{rc} = \mathbf{K}^*$ e $\epsilon_r'' = -\Im(\epsilon_{rc})$

```
def kappa(T, N, F):
    eps0 = scp.epsilon_0
    pi = scp.pi
    if T>=0 and T<=40:
        if N>=0 and N<=3:
            A = 1.000-.2551*N+5.151E-2*N**2-6.889E-3*N**3
            B = 1.463E-3*N*T+1.000-.04896*N-.02967*N**2+5.644E-3*N**3
            E0 = 87.74-4.0008E-1*T+9.398E-4*T**2+1.410E-6*T**3
            Tau = (1.1109E-10-3.824E-12*T+6.938E-14*T**2-5.096E-16*T**3)/(2*pi)
            Einf = 4.9
            E0tn = E0*A
            Tautn = Tau*B
            Delta = 25-T
            Si25 = N*(10.394-2.3776*N+.68258*N**2-.13538*N**3+1.0086E-2*N**4)
            Si = Si25*(1.000-1.962E-2*Delta+8.08E-5*Delta**2-Delta*N*(3.020E-5+3.922E-5*Delta+N*(1.721E-5-6.584E-6*Delta)))
            #print('Si = ', Si, "S/m")
            D = 1 - 2*pi*Tautn*F*1j
            enne = E0tn-Einf + 0*1j
            erre = enne/D+Einf
            Ri2 = Si / (2*pi*F*eps0)
            K = erre + Ri2*1j
            epscc = K.conjugate()
        else :
            print('La Normalità deve essere compresa tra 0 e 3')
    else :
        print('La Temperatura deve essere compresa tra 0 e 40')
    return epscc
```

Imposte le dovute limitazioni e gli intervalli di validità di tali formule ottengo la funzione \mathbf{K} che riceve in ingresso i valori di temperatura e normalità di una determinata soluzione salina e ne calcola il valore della permittività dielettrica complessa al variare della frequenza del campo elettrico applicato.

Possiamo utilizzare tale metodo teorico anche a scopo di calibrazione per la misura di permittività dielettrica complessa con strumentazione riflettometrica oppure partendo da essa calcolare i vari parametri elettrici di un materiale nota la sua permittività.

Definito il materiale, la normalità e la temperatura ottengo

```
##### DATI
T = 17 #Temperatura in gradi centigradi
#N = 0.0057 #Normalità della soluzione salina
N = 0.0057 #Normalità della soluzione salina
F = 1.8e9 #Frequenza in Hz
F=3.7e9
epsc = kappa(T,N,F)
print("epsc = ",epsc)
print('Temperatura = ',T,' gradi centigradi')
print('Normalità = ',N,' Q/l')
print('Frequenza = ',F*1e-9,' GHz')
print('Re(Eps_c) = ',epsc.real)
print('Im(Eps_c) = ',epsc.imag)
sig = - epsc.imag * scp.epsilon_0 * 2 * scp.pi * F
print('Conductivity = ', sig , "S/m")
```

```
epsc = (77.09861548990219-17.23902968220996j)
Temperatura = 17 gradi centigradi
Normalità = 0.0057 Q/l
Frequenza = 3.7 GHz
Re(Eps_c) = 77.09861548990219
Im(Eps_c) = -17.23902968220996
Conductivity = 3.548486356379003 S/m
```

e conoscendo la permittività posso ora ottenere

```
mur = 1
gamma, eta, alfa, beta, tgd, epsc1 = materiale (epsc.real, mur, sig, F)
#
delta = 1/alfa
print('Costante dielettrica complessa = %7.3g - j %7.3g F/m' % (epsc1.real,-epsc1.imag))
print('Rapporto = %7.3g' % (tgd))
print('Gamma = %4.3g + j %4.3g 1/m' % (gamma.real,gamma.imag))
print('Characteristic Impendace = %4.3g + j %4.3g ohm' % (eta.real,eta.imag))
print('Penetration Depth = %4.3g m' % (delta))
```

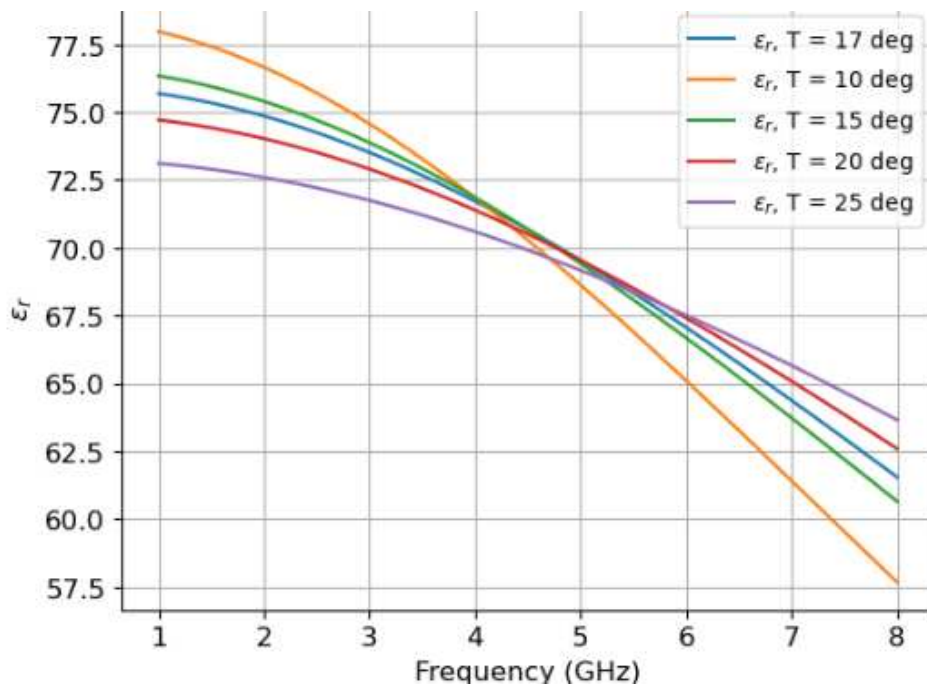
```
Costante dielettrica complessa = 6.83e-10 - j 1.53e-10 F/m
Rapporto = 0.224
Gamma = 75.7 + j 685 1/m
Characteristic Impendace = 42.1 + j 4.65 ohm
Penetration Depth = 0.0132 m
```


Volendo inoltre effettuare un controllo sulla temperatura della soluzione e su come essa influisca sui parametri elettrici del materiale si è operato tramite simulazione teorica con i metodi precedentemente descritti.

In Python

```
import matplotlib.pyplot as plt
import math
xin = 1e9
xfi = 8e9
xstep = 5e6
length = math.trunc((xfi - xin) / xstep + 1)
x = [0]*length
er = [0]*length
sig = [0]*length
pd = [0]*length
mur = 1
plt.rc('xtick', labelsize=12)
plt.rc('ytick', labelsize=12)
plt.rc('axes', labelsize=12)
plt.xlabel('Frequency (GHz)')
plt.ylabel(r'$\varepsilon_r$ or $\sigma$ (S/m) or p. depth (mm)')
freq = 1.8e9
#N = 0.0057
N = 0.267
temp = 17
for ind in range(1, length + 1, 1):
    freq = xin + xstep * (ind - 1)
    epsc = kappa(temp, N, freq)
    x[ind-1] = freq*1e-9 # in GHz
    er[ind-1] = epsc.real
    sig[ind-1] = - epsc.imag * scp.epsilon_0 * freq * 2 * np.pi
    gamma, eta, alfa, beta, tgd, epsc1 = materiale (epsc.real, mur, sig[ind-1], freq)
    pd[ind-1] = 1/alfa * 1e3 # in mm
plt.plot(x, er, label=r'$\varepsilon_r$, T = 17 deg')
```

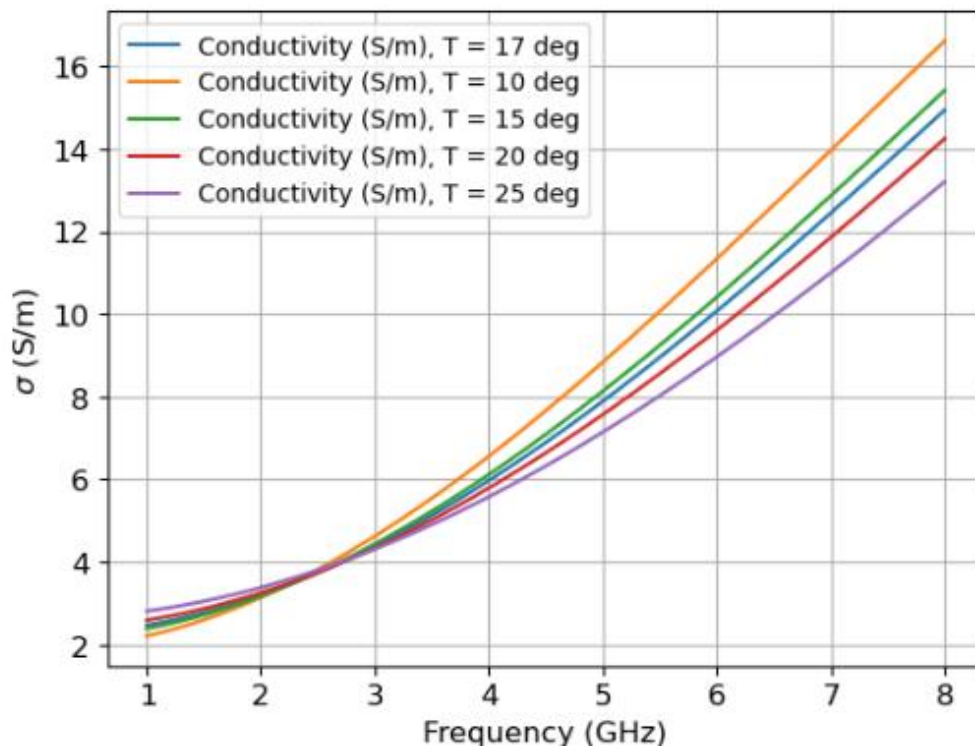
al variare di T ottengo



Per la conducibilità

```
import matplotlib.pyplot as plt
import math
xin = 1e9
xfi = 8e9
xstep = 5e6
length = math.trunc((xfi - xin) / xstep + 1)
x = [0]*length
er = [0]*length
sig = [0]*length
pd = [0]*length
mur = 1
plt.rc('xtick', labels=12)
plt.rc('ytick', labels=12)
plt.rc('axes', labels=12)
plt.xlabel('Frequency (GHz)')
plt.ylabel(r'\varepsilon_r or \sigma (S/m) or p. depth (mm)')
freq = 1.8e9
#N = 0.0057
N = 0.267
temp = 17
for ind in range(1, length + 1, 1):
    freq = xin + xstep * (ind - 1)
    epsc = kappa(temp, N, freq)
    #print("epsc = ", epsc)
    x[ind-1] = freq*1e-9 # in GHz
    er[ind-1] = epsc.real
    sig[ind-1] = - epsc.imag * scp.epsilon_0 * freq * 2 * np.pi
    gamma, eta, alfa, beta, tgd, epsc1 = materiale (epsc.real, mur, sig[ind-1], freq)
    pd[ind-1] = 1/alfa * 1e3 # in mm
#plt.plot(x, er, label=r'\varepsilon_r, T = 17 deg')
plt.plot(x, sig, label='Conductivity (S/m), T = 17 deg')
```

al variare di T ottengo



L'effetto della temperatura sul materiale agisce andando ad ammortizzare le variazioni di perdite dielettriche e di conducibilità al variare della frequenza. La temperatura, infatti, aumenta l'agitazione termica e l'energia cinetica delle molecole nel materiale influenzando l'attrito tra di esse e aumentando la forza di smorzamento.

In ambito di misurazioni in laboratorio possiamo considerare queste variazioni trascurabili in quanto non andiamo ad operare in intervalli di temperatura significativi.

METODO TEORICO E METODO SPERIMENTALE

I metodi teorici, dunque, ai fini del calcolo della permittività elettrica di un materiale sono da tener conto anche in ambito di misurazione sperimentale. Questi descrivono la natura del fenomeno fisico e le leggi che lo governano aiutandoci a validare l'attendibilità delle misurazioni di laboratorio.

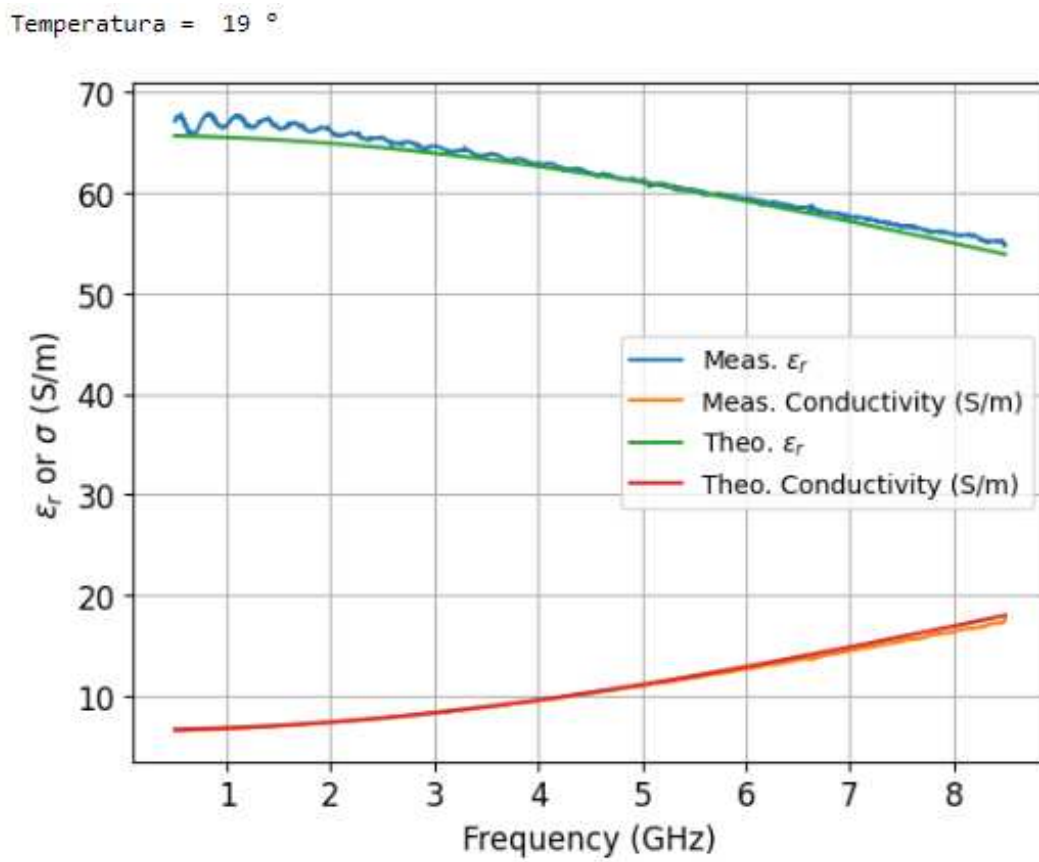
Inoltre, posso essere parte integrante del sistema di misura come nel nostro caso in cui la permittività nota della soluzione di calibrazione è stata calcolata con i metodi teorici precedentemente illustrati.

Un confronto tra i risultati teorici e sperimentali ci permette di quantificare la presenza di errore di misura commesso dandoci un feedback immediato sulla correttezza del codice e il metodo di misura impiegato.

Tramite codice Python si sono sovrapposti graficamente l'andamento della permittività elettrica teorica e quella misurata in termini di epsilon reale e conducibilità.

```
# Costanti dielettriche della soluzione misurata (se note)
#*****
norm = 0.85
#*****
epsrm = np.array(kappa(temperatura, norm, freq[:]), dtype=complex)
#print("epsrm = ", epsrm)
plt.rc('xtick', labels=12)
plt.rc('ytick', labels=12)
plt.rc('axes', labels=12)
plt.xlabel('Frequency (GHz)')
plt.ylabel(r'$\varepsilon_r$ or $\sigma$ (S/m)')
x = freq * 1e-9 # in GHz
er_g = epsr_i.real
sig_g = - epsr_i.imag * 2 * pi * freq * scp.epsilon_0
er_gm = epsrm.real
sig_gm = - epsrm.imag * 2 * pi * freq * scp.epsilon_0
#print("x = ", x)
#print("er_g = ", er_g)
#print("sig_g = ", sig_g)
print("Temperatura = ", temperatura, "°")
plt.plot(x, er_g, label=r'Meas. $\varepsilon_r$')
plt.plot(x, sig_g, label='Meas. Conductivity (S/m)')
plt.plot(x, er_gm, label=r'Theo. $\varepsilon_r$')
plt.plot(x, sig_gm, label='Theo. Conductivity (S/m)')
plt.legend(loc="center right") # upper lower center right left
plt.savefig('myplot.pdf')
plt.grid()
plt.show()
```

Ottenendo nel caso di $T=19^{\circ}\text{C}$ e $N=0.85$ per la soluzione incognita



Un andamento pressoché complementare che ci indica la correttezza dei metodi di misura utilizzati.

CONCLUSIONI

Tra le caratteristiche elettriche di un materiale, la permittività è un parametro fondamentale ai fini dello studio sull'interazione tra l'essere umano e i fenomeni elettromagnetici che lo circondano.

Siamo fatti di materia organica: un insieme di particelle che scambiano in ogni istante energia con l'ambiente esterno.

Le infinite applicazioni e manipolazioni dei fenomeni elettromagnetici dovranno sempre tenere conto della presenza dell'uomo come parte integrante del dispositivo stesso.

L'intensità, i tempi di esposizione e il tipo di radiazione a cui siamo sottoposti sono fattori determinanti nello stimare degli effetti a breve e lungo periodo dei campi elettromagnetici in un contesto storico in cui l'evoluzione tecnologica ci spinge a farne sempre più uso e abuso.

Linee guida internazionali regolano la progettazione di dispositivi wireless e strumentazione radio ai fini di limitare entro certi parametri l'esposizione e l'utilizzo di onde.

.

Le misure riflettometriche sperimentali utilizzate permettono di quantificare tale interazione, dimostrandosi efficaci ed in linea con le trattazioni teoriche più recenti.

BIBLIOGRAFIA

- 1) N. Marcuvitz, "Waveguide Handbook", McGraw-Hill, New York.
- 2) A. Stogryn, "Equations for calculating the dielectric constant of saline water", IEEE Trans. on MTT. Aug. 1971.
- 3) https://cispio.diet.uniroma1.it/marzano/PropagazioneEM/C01_Soluzioni_MacroModelli_CostanteDielettrica.pdf
- 4) "Interazioni tra campi elettromagnetici e sistemi biologici"
bioem.diet.uniroma1.it
- 5) https://it.wikipedia.org/wiki/Permittivit%C3%A0_elettrica
- 6) Corso di "Misure e Strumentazione biomedica" A. Scalise
- 7) Tesi Michele Crognal A.A 2022/2023

RINGRAZIAMENTI

L'università per alcuni è solo un rito di passaggio, una breve tappa che separa l'adolescenza ed il mondo del lavoro.

Per me è stato molto di più.

Un rifugio ed uno stile di vita che mi ha accompagnato in tutti questi anni. Ho conosciuto molte persone, perso molte persone e sono maturato in ogni modo possibile che una persona possa maturare.

Sono stato sempre fortunato nel trovare le giuste compagnie che ringrazio di cuore per tutti i momenti di felicità ma anche di tristezza vissuti insieme.

Devo ringraziare soprattutto la mia famiglia che ha sempre creduto in me fin dal primo giorno e nonostante non trovassi più motivazione nel continuare questo percorso è sempre stata presente in ogni difficoltà.

Questa laurea la dedico a mia madre, un percorso che tanto ci ha unito negli anni e ha permesso di conoscerci sempre di più.

Infine ringrazio me, che nonostante fossi stato ostacolo di me stesso ho realizzato questo obiettivo rendendomi sempre più consapevole delle mie possibilità.