



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di laurea triennale in **Ingegneria Biomedica**

Misura della costante dielettrica complessa di materiali liquidi

Measurements of the complex dielectric constant of liquid materials

Relatore:
Prof. **Valter Mariani Primiani**

Tesi di Laurea di:
Giuseppe Carretta

Correlatore:
Prof. **Franco Moglie**

Correlatore:
Dr. **Alfredo De Leo**

A.A. 2023/2024

INDICE

• Abstact	1
• Introduzione	2
• La costante dielettrica	3
• Permittività elettrica	4
• Strumentazione	6
• Elaborazione dati e risultati teorici	9
• Risultati reali	19
• Conclusione	26
• Bibliografia	27

ABSTRACT

This study focuses on the analysis of the dielectric constant and electric permittivity of materials subjected to electromagnetic fields, emphasizing their dependence on factors such as: frequency, temperature, and solution concentration. Following a theoretical discussion of dielectric properties and mathematical models describing permittivity as a complex function, an experimental investigation was conducted to measure the relative permittivity (ϵ_r) and conductivity (σ) of saline solutions at different temperatures. The experiments were carried out using a terminal probe and an Agilent portable network analyzer, which were carefully calibrated to ensure measurement accuracy. The sample solutions, with varying salt concentrations, were analyzed between 20°C and 40°C. Data processing with Python allowed for the generation of comparative graphs between theoretical and experimental results. The findings revealed a direct relationship between temperature Increases and changes in ϵ_r and σ , confirming the role of salinity in altering the dielectric properties of materials. This study contributes to a deeper understanding of dielectric properties, with practical implications for the design of electronic devices and the development of new materials.

INTRODUZIONE

Questo elaborato affronta l'analisi della costante dielettrica e della conducibilità elettrica, grandezze fondamentali per descrivere il comportamento dei materiali in presenza di campi elettromagnetici. Viene esplorato il concetto di permittività sia in termini assoluti che relativi, evidenziando la loro dipendenza da fattori fisici come le frequenze di lavoro e la temperatura. Particolare attenzione è dedicata ai fenomeni di polarizzazione, con implicazioni pratiche nei condensatori e nella propagazione delle onde elettromagnetiche.

La parte teorica include modelli matematici che descrivono la permittività complessa, permettendo di analizzare sia la componente reale, legata alle perdite dielettriche, ovvero alla conducibilità, sia quella immaginaria, connessa alla costante dielettrica. Questa trattazione fornisce una base per comprendere le interazioni tra i campi elettromagnetici e i materiali, sia in condizioni statiche che dinamiche.

La parte sperimentale si concentra sulla misura della permittività relativa e della conducibilità di diverse soluzioni saline a varie temperature. Gli strumenti utilizzati includono una sonda terminale e un analizzatore di rete vettoriale portatile Agilent, calibrati attraverso procedure specifiche per garantire la precisione delle misurazioni. Le soluzioni campione, preparate con quantità note di sale, sono state analizzate in condizioni controllate per studiare l'evoluzione dei parametri dielettrici in funzione della temperatura.

I dati raccolti sono stati elaborati e confrontati con i modelli teorici utilizzando grafici generati tramite un codice Python, evidenziando le discrepanze e le correlazioni tra i risultati previsti e quelli misurati. Questo confronto ha permesso di validare i modelli teorici e di comprendere meglio il comportamento dei materiali in condizioni variabili.

LA COSTANTE DIELETTICA

La costante dielettrica è una grandezza fisica fondamentale che descrive il comportamento di un materiale quando è soggetto a un campo elettrico. Indica la capacità di un materiale di ridurre l'intensità del campo elettrico al suo interno e, in termini pratici, rappresenta una misura di quanto un materiale può immagazzinare energia elettrica sotto forma di polarizzazione. In pratica la costante dielettrica è una proprietà chiave per comprendere e sfruttare le interazioni tra i campi elettrici e i materiali. Questa proprietà è di particolare importanza in diversi campi con implicazioni sia teoriche che pratiche.

La costante dielettrica, rappresentata spesso con il simbolo ϵ , è definita come il rapporto tra la **permittività del materiale** e la **permittività del vuoto** (ϵ_0).

Esistono due principali modalità di esprimerla:

1. Permittività assoluta (ϵ):

Indica la capacità del materiale di influenzare il campo elettrico al suo interno;

2. Permittività relativa (ϵ_r):

È il rapporto tra la permittività del materiale e quella del vuoto:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

La permittività relativa è un valore adimensionale, poiché rappresenta un rapporto.

La permittività del vuoto (ϵ_0) è una costante fisica universale, il cui valore è:

$$\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

Quando un campo elettrico viene applicato a un materiale dielettrico, le cariche all'interno del materiale si spostano leggermente, generando dipoli elettrici.

Questo fenomeno riduce il campo elettrico totale all'interno del materiale.

La costante dielettrica varia in base alla frequenza del campo elettrico applicato e alla temperatura del materiale. Ad alte frequenze, la risposta del materiale al campo elettrico può diventare meno efficace.

Le applicazioni principali ci sono: nei condensatori, dove i materiali dielettrici sono utilizzati per aumentare la capacità di immagazzinamento dell'energia elettrica, nelle onde elettromagnetiche, dove la costante dielettrica influenza la velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche stesse, nei materiali isolanti, dove un'alta permittività relativa è spesso desiderabile per minimizzare le perdite di energia.

Quando siamo in presenza di un materiale dobbiamo considerare la costante dielettrica del mezzo, detta anche costante dielettrica assoluta del mezzo, che viene indicata con ϵ_m ; a questa viene accostata la costante dielettrica relativa del mezzo indicata come $\epsilon_{r,m}$. In realtà la costante dielettrica di un mezzo non dipende solamente dal materiale ma anche dalle sue condizioni fisiche, e in particolare dalla temperatura

PERMITTIVITA' ELETTRICA

La permittività elettrica è una grandezza fisica che quantifica la tendenza del materiale a contrastare l'intensità del campo elettrico presente al suo interno. Descrive quindi il comportamento di un materiale in presenza di un campo elettrico.

La permittività elettrica è fortemente legata alla suscettività elettrica, ovvero alla predisposizione del materiale a polarizzarsi quando viene applicato un campo elettrico. La polarizzazione di atomi e molecole produce un campo elettrico aggiuntivo nel materiale, descritto attraverso il vettore induzione elettrica, e la permittività elettrica ne quantifica l'entità per unità di carica elettrica.

Normalmente la permittività elettrica è indicata col simbolo ϵ , e il suo valore viene solitamente scritto come prodotto $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ della permittività relativa ϵ_r e della costante dielettrica del vuoto ϵ_0 . In generale ϵ_r non è costante in ogni punto del materiale, in molti casi però (quando il materiale è omogeneo e isotropo) assume un unico valore caratteristico del materiale la permittività può essere trattata come uno scalare, chiamato impropriamente costante dielettrica.

La permittività di un materiale varia anche a seconda della frequenza del campo elettrico. Per descrivere tale dipendenza si utilizza una funzione complessa della frequenza, attraverso la quale è possibile trattare la propagazione del campo elettromagnetico in mezzi dissipativi (cioè a conducibilità finita) o dispersivi (cioè le cui proprietà elettromagnetiche variano al variare della frequenza dei campi incidenti). Il valore in una data direzione della permittività è quindi un numero complesso, che permette di descrivere la proporzionalità e lo sfasamento fra la polarizzazione nel dielettrico e il campo esterno forzante.

Quando si analizza la permittività dal punto di vista della frequenza del campo si nota che essa può presentare un comportamento anomalo in corrispondenza di certe lunghezze d'onda. Infatti, la parte immaginaria della permittività elettrica segue un andamento risonante in corrispondenza dei suoi poli, dove presenta uno o più picchi. In corrispondenza di questi picchi l'assorbimento da parte del materiale dell'energia posseduta dal campo è massimo.

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.

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 totale di un materiale non si limita al contributo statico e intrinseco, ma include anche un apporto aggiuntivo derivante dall'applicazione di un campo elettrico alternato. Di conseguenza, la permittività relativa può essere espressa in relazione alla conducibilità equivalente:

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

Tuttavia, un materiale dielettrico di elevata qualità possiede una conducibilità statica molto bassa, al punto da poter essere trascurata nelle misurazioni delle perdite dielettriche. Di conseguenza, la permittività dielettrica in un mezzo, considerando le ipotesi precedentemente descritte, sarà espressa come:

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\left(\frac{\sigma_s}{\omega\epsilon_0}\right)$$

STRUMENTAZIONE

Gli strumenti fondamentali che sono stati utilizzati sono una sonda terminale e un analizzatore di rete. Per quanto riguarda l'analizzatore di rete, quello utilizzato è un analizzatore vettoriale portatile Agilent FieldFox N9928A che misura l'ampiezza relativa e la differenza di fase fra il segnale di ingresso e quello

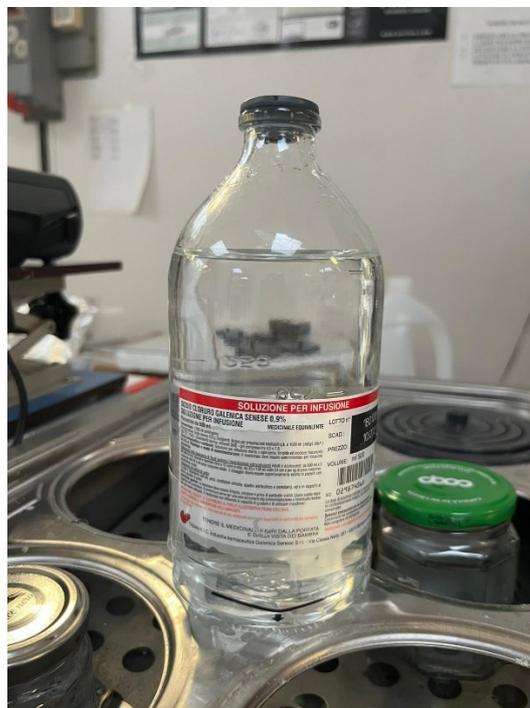
riflesso e fornisce l'impedenza terminale della sonda in termini di ampiezza e angolo di fase del coefficiente di riflessione.

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

La sonda si compone di un cavo coassiale aperto da 3.6 mm al quale si è saldata una flangia metallica del raggio di 12 mm in modo da rendere le misurazioni poco sensibili alla maggiore o minore penetrazione della sonda nel materiale e quindi minimizzando gli effetti del campo di frangia. Dopo aver aspettato alcune ore dall'accensione dello strumento, prima di iniziare le misurazioni vere e proprie si è proceduto con la calibrazione del VNA e della sonda: è stata sufficiente una sola soluzione di calibrazione e la misura di un cortocircuito e un circuito aperto; in particolare per il cortocircuito è sufficiente porre un foglio di alluminio della dimensione di alcuni centimetri quadrati leggermente pressato sulla base della sonda con un dito.



SONDA TERMINALE



Soluzione campione per calibrazione sonda a salinità pari a 0,9%



Analizzatore con sonda attaccata



Bilancino con sale usato nelle soluzioni



Strumento per portare a temperatura le varie soluzioni

ELABORAZIONE DATI E RISULTATI TEORICI

Per le misurazioni sono state prese tre diverse soluzioni che si differenziano tra loro per le diverse quantità di sale presente all'interno:

- Soluzione A, acqua di rubinetto con normalità pari a 0,0057 Ne/L;
- Soluzione B, soluzione acquosa con 2,5g di sale su 10L con normalità pari a 0,01 Ne/L;
- Soluzione C, soluzione acquosa con 5g di sale su 10L con normalità pari a 0,0144 Ne/L.

Le misurazioni sono state fatte a diverse temperature: 20°, 25°, 30°, 35°, 40°.

Tramite un codice Python siamo riusciti a graficare le varie soluzioni considerando la loro normalità, ottenendo grafici teorici anche per la variazione di ϵ_r e di σ .

Utilizzando questo codice Python:

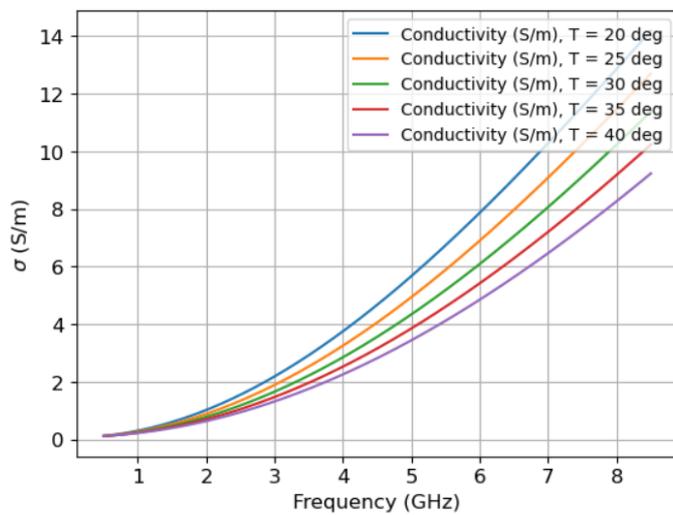
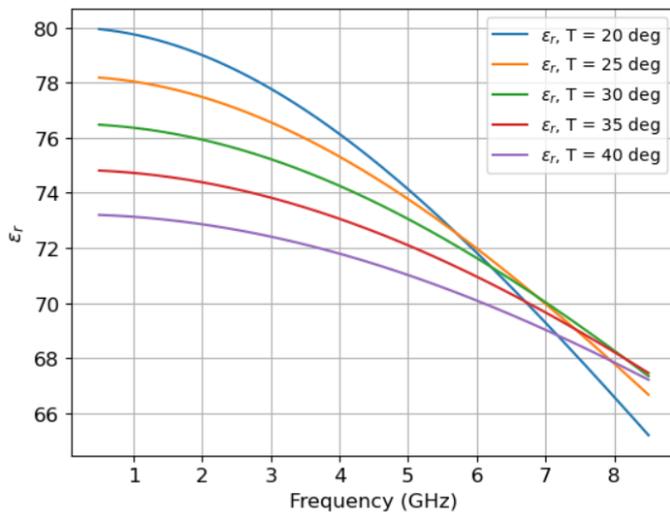
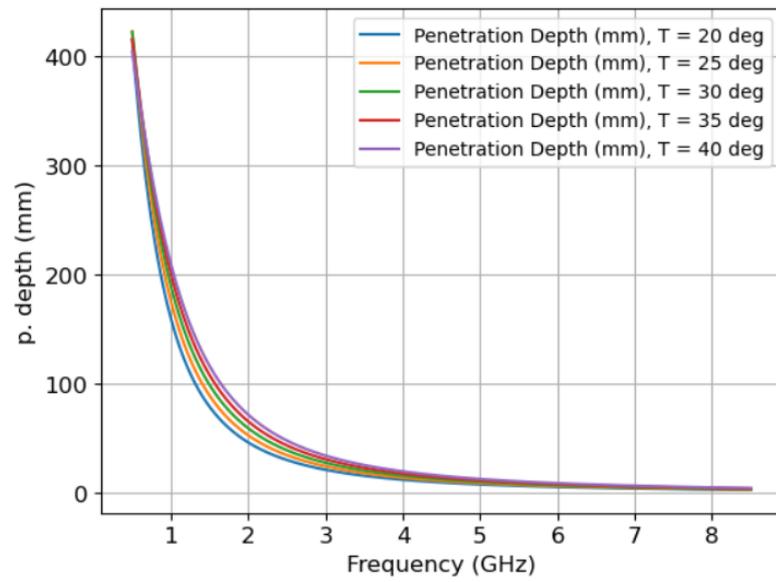
```
import matplotlib.pyplot as plt
import math
xin = 0.5e9
xfi = 8.5e9
xstep = 1e6
length = math.trunc((xfi - xin) / xstep + 1)
x = [0]*length
er = [0]*length
sig = [0]*length
pd = [0]*length
mur = 1
plt.rc('xtick', labelsize=12)
plt.rc('ytick', labelsize=12)
plt.rc('axes', labelsize=12)
plt.xlabel('Frequency (GHz)')
#plt.ylabel(r'$\varepsilon_r$ or $\sigma$ (S/m) or p. depth (mm)')
#plt.ylabel(r'$\varepsilon_r$')
#plt.ylabel(r'$\sigma$ (S/m)')
plt.ylabel(r'p. depth (mm)')
freq = 1.8e9
N = 0.0057
#N = 0.267
temp = 20
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 = 5 deg')
#plt.plot(x, sig, label='Conductivity (S/m), T = 5 deg')
plt.plot(x, pd, label='Penetration Depth (mm), T = 20 deg')
```

```

temp = 25
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 = 10 deg')
#plt.plot(x, sig, label='Conductivity (S/m), T = 10 deg')
plt.plot(x, pd, label='Penetration Depth (mm), T = 25 deg')
temp = 30
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 = 15 deg')
#plt.plot(x, sig, label='Conductivity (S/m), T = 15 deg')
plt.plot(x, pd, label='Penetration Depth (mm), T = 30 deg')
temp = 35
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 = 20 deg')
#plt.plot(x, sig, label='Conductivity (S/m), T = 20 deg')
plt.plot(x, pd, label='Penetration Depth (mm), T = 35 deg')
temp = 40
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 = 25 deg')
#plt.plot(x, sig, label='Conductivity (S/m), T = 25 deg')
plt.plot(x, pd, label='Penetration Depth (mm), T = 40 deg')
#plt.legend(loc="upper left")
plt.legend(loc="upper right")
plt.savefig('variaF.pdf')
plt.grid()
plt.show()

```

Per la soluzione A si ottengono questi risultati:



Con lo stesso codice Python, cambiando le caratteristiche della soluzione

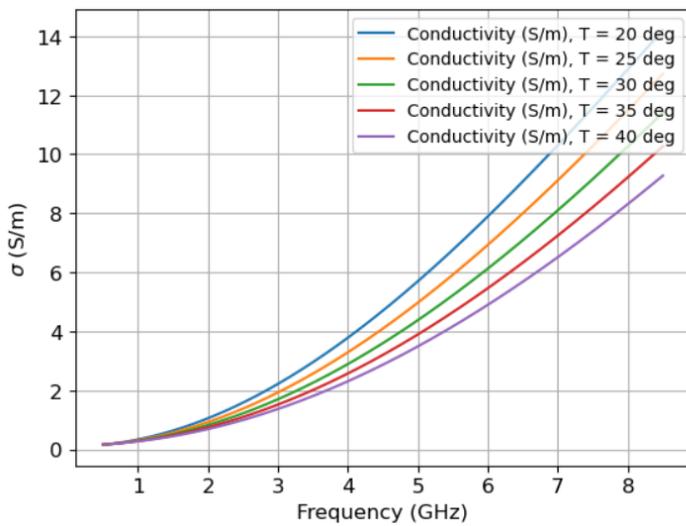
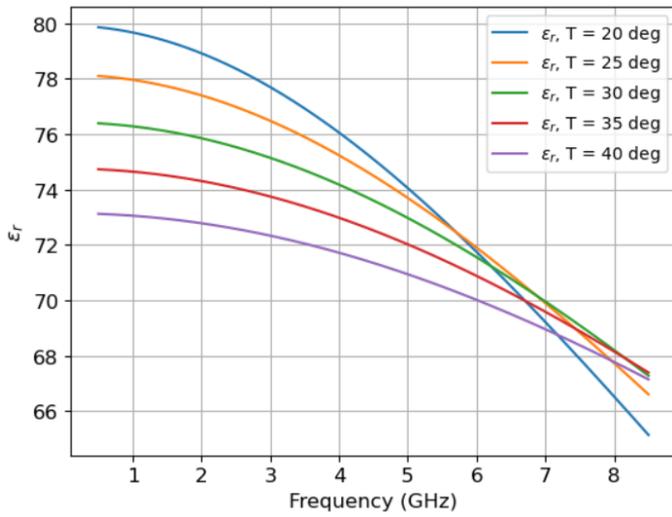
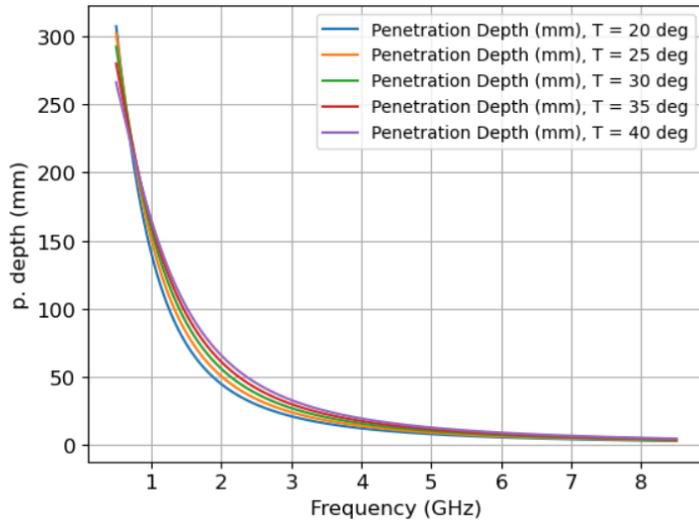
```
import matplotlib.pyplot as plt
import math
xin = 0.5e9
xfi = 8.5e9
xstep = 1e6
length = math.trunc((xfi - xin) / xstep + 1)
x = [0]*length
er = [0]*length
sig = [0]*length
pd = [0]*length
mur = 1
plt.rc('xtick', labelsize=12)
plt.rc('ytick', labelsize=12)
plt.rc('axes', labelsize=12)
plt.xlabel('Frequency (GHz)')
#plt.ylabel(r'\varepsilon_r$ or $\sigma$ (S/m) or p. depth (mm)')
#plt.ylabel(r'\varepsilon_r$')
#plt.ylabel(r'\sigma$ (S/m)')
plt.ylabel(r'p. depth (mm)')
freq = 1.8e9
N = 0.01
#N = 0.267
temp = 20
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 = 5 deg')
#plt.plot(x, sig, label='Conductivity (S/m), T = 5 deg')
plt.plot(x, pd, label='Penetration Depth (mm), T = 20 deg')
```

```

temp = 25
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 = 10 deg')
#plt.plot(x, sig, Label='Conductivity (S/m), T = 10 deg')
plt.plot(x, pd, label='Penetration Depth (mm), T = 25 deg')
temp = 30
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 = 15 deg')
#plt.plot(x, sig, Label='Conductivity (S/m), T = 15 deg')
plt.plot(x, pd, label='Penetration Depth (mm), T = 30 deg')
temp = 35
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 = 20 deg')
#plt.plot(x, sig, Label='Conductivity (S/m), T = 20 deg')
plt.plot(x, pd, label='Penetration Depth (mm), T = 35 deg')
temp = 40
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 = 25 deg')
#plt.plot(x, sig, Label='Conductivity (S/m), T = 25 deg')
plt.plot(x, pd, label='Penetration Depth (mm), T = 40 deg')
#plt.legend(loc="upper left")
plt.legend(loc="upper right")
plt.savefig('variaF.pdf')
plt.grid()
plt.show()

```

Si ottengono per la soluzione B questi risultati:



Infine con il medesimo codice Python per l'ultima soluzione, anche qui cambiando i valori in base alla soluzione

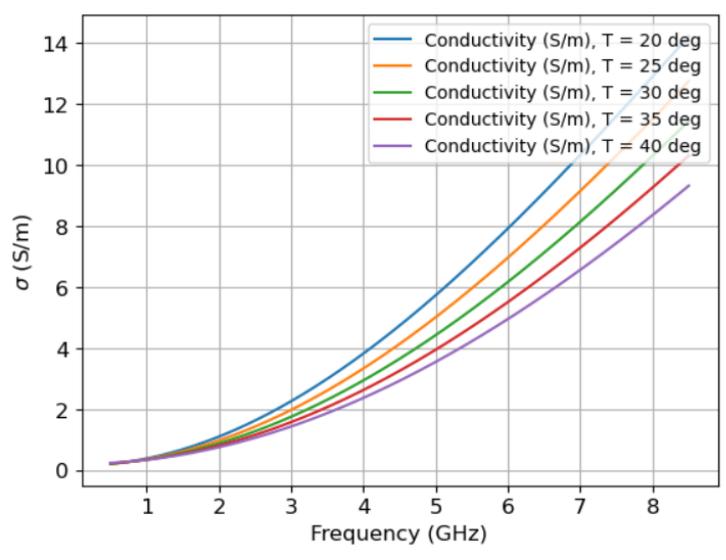
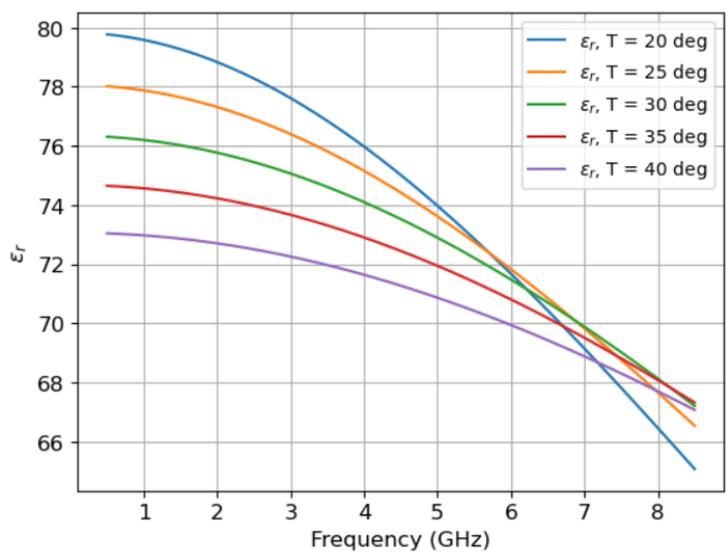
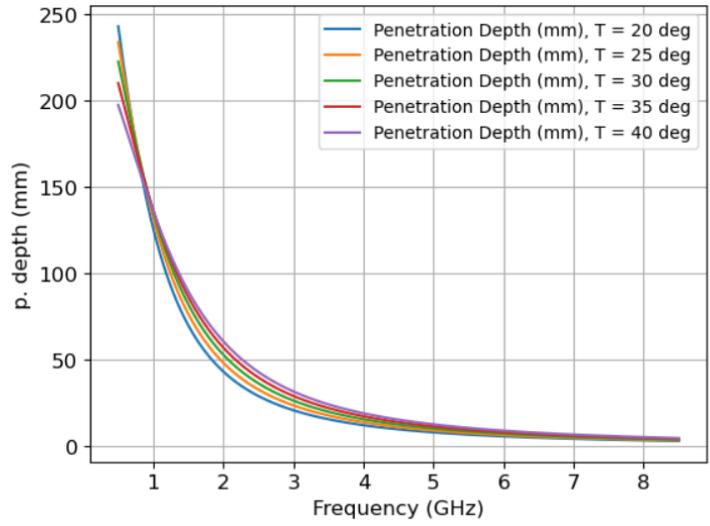
```
import matplotlib.pyplot as plt
import math
xin = 0.5e9
xfi = 8.5e9
xstep = 1e6
length = math.trunc((xfi - xin) / xstep + 1)
x = [0]*length
er = [0]*length
sig = [0]*length
pd = [0]*length
mur = 1
plt.rc('xtick', labelsize=12)
plt.rc('ytick', labelsize=12)
plt.rc('axes', labelsize=12)
plt.xlabel('Frequency (GHz)')
#plt.ylabel(r'$\varepsilon_r$ or $\sigma$ (S/m) or p. depth (mm)')
#plt.ylabel(r'$\varepsilon_r$')
#plt.ylabel(r'$\sigma$ (S/m)')
plt.ylabel(r'p. depth (mm)')
freq = 1.8e9
N = 0.0144
#N = 0.267
temp = 20
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 = 5 deg')
#plt.plot(x, sig, label='Conductivity (S/m), T = 5 deg')
plt.plot(x, pd, label='Penetration Depth (mm), T = 20 deg')
```

```

temp = 25
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 = 10 deg')
#plt.plot(x, sig, label='Conductivity (S/m), T = 10 deg')
plt.plot(x, pd, label='Penetration Depth (mm), T = 25 deg')
temp = 30
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 = 15 deg')
#plt.plot(x, sig, label='Conductivity (S/m), T = 15 deg')
plt.plot(x, pd, label='Penetration Depth (mm), T = 30 deg')
temp = 35
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 = 20 deg')
#plt.plot(x, sig, label='Conductivity (S/m), T = 20 deg')
plt.plot(x, pd, label='Penetration Depth (mm), T = 35 deg')
temp = 40
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 = 25 deg')
#plt.plot(x, sig, label='Conductivity (S/m), T = 25 deg')
plt.plot(x, pd, label='Penetration Depth (mm), T = 40 deg')
plt.legend(loc="upper left")
plt.legend(loc="upper right")
plt.savefig('variaF.pdf')
plt.grid()
plt.show()

```

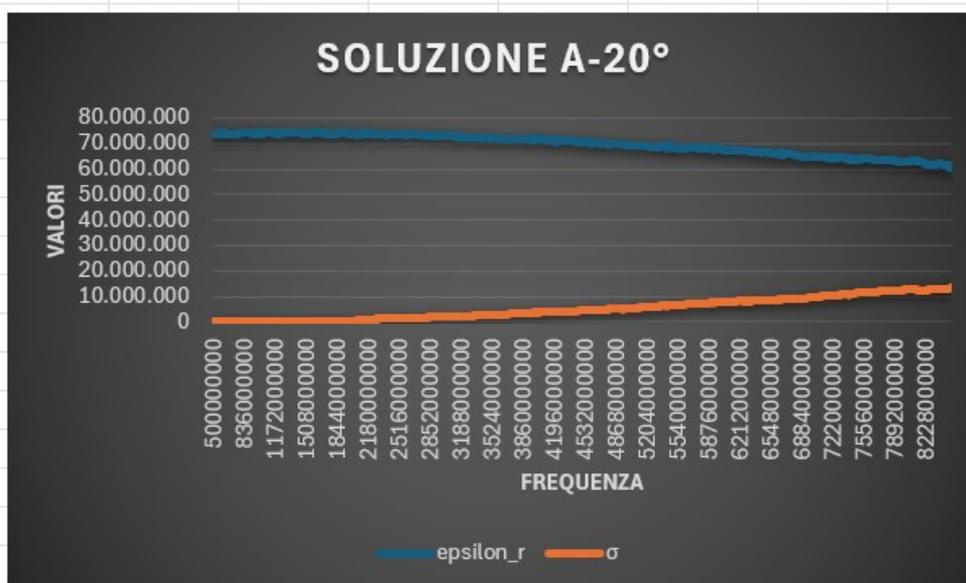
Abbiamo ottenuto questi valori per la soluzione C:

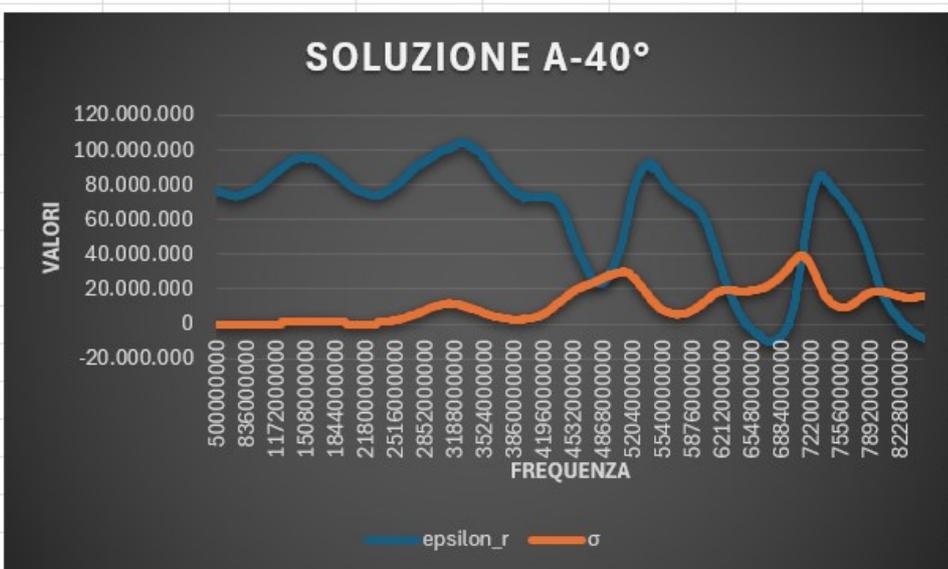
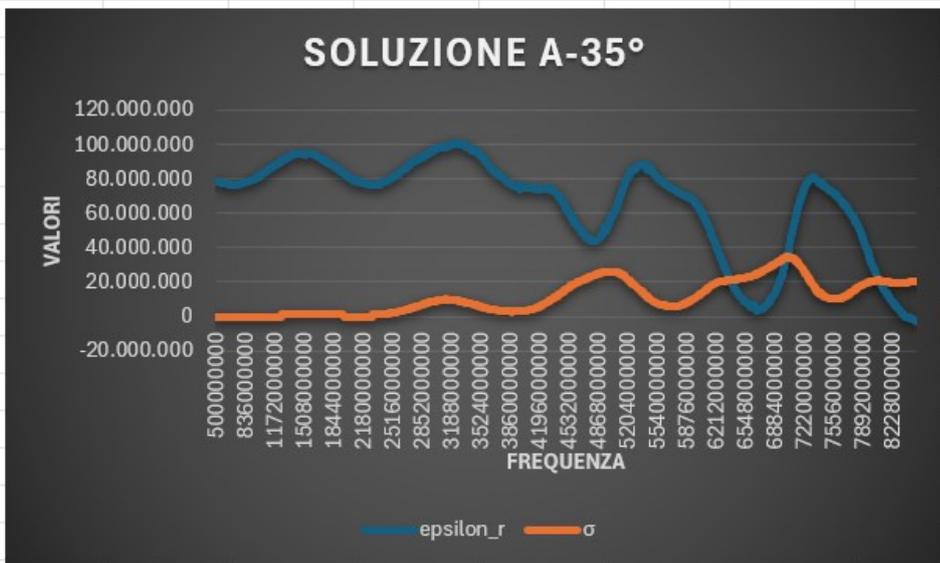
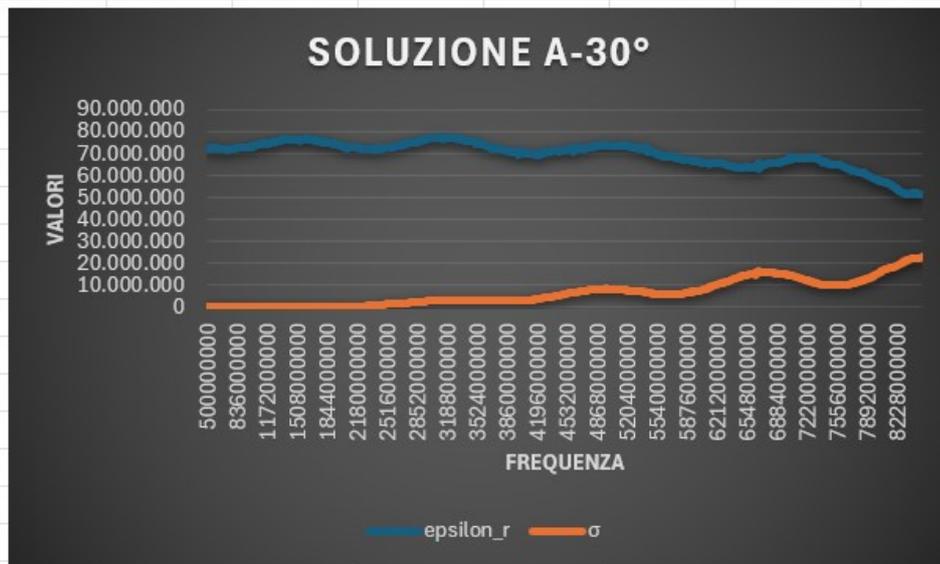


Si nota che per tutte e tre le soluzioni al variare della frequenza la costante dielettrica diminuisce, la conducibilità aumenta e lo spessore di penetrazione diminuisce. Riferendoci alla variazione di temperatura la costante dielettrica ha un lieve aumento, la conducibilità diminuisce e quindi lo spessore di penetrazione aumenta.

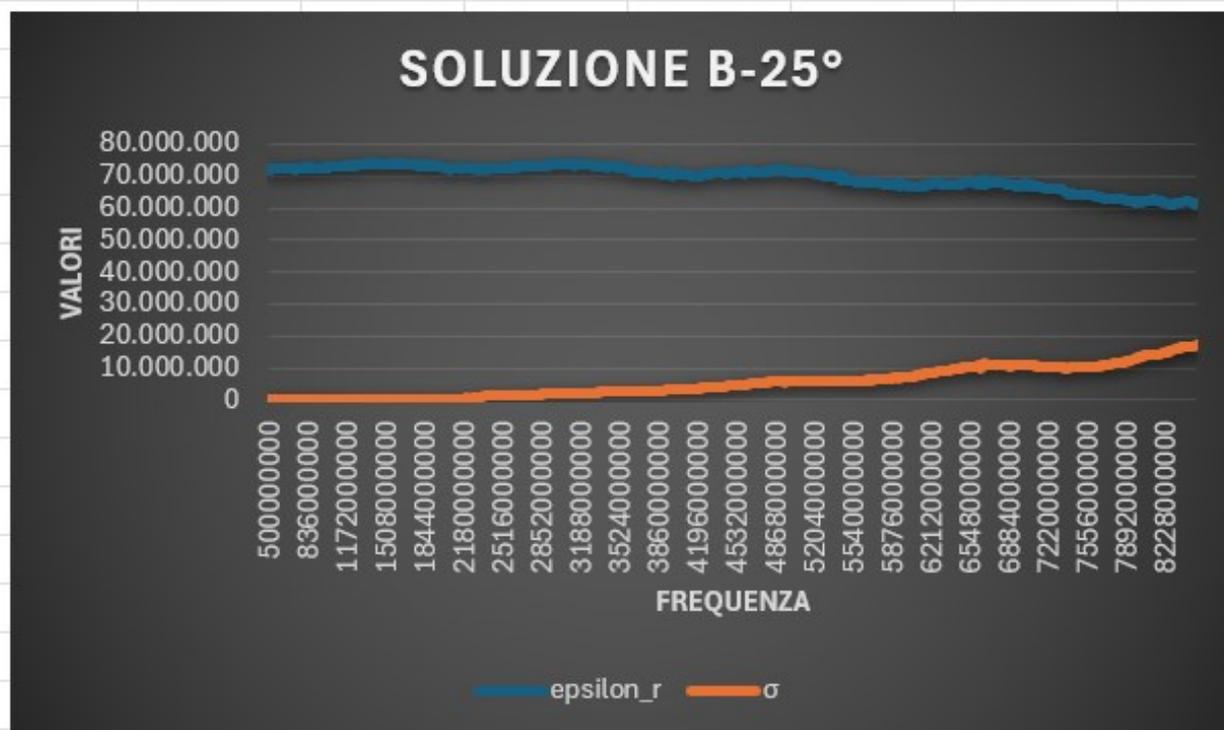
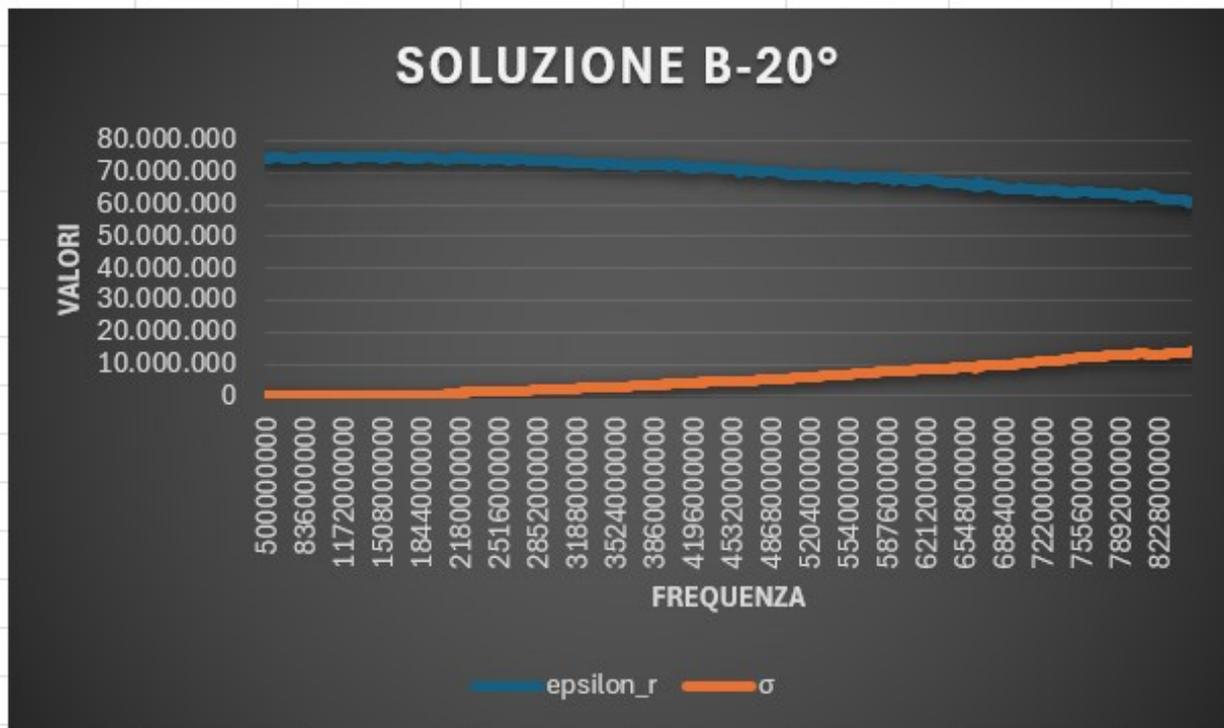
RISULTATI REALI

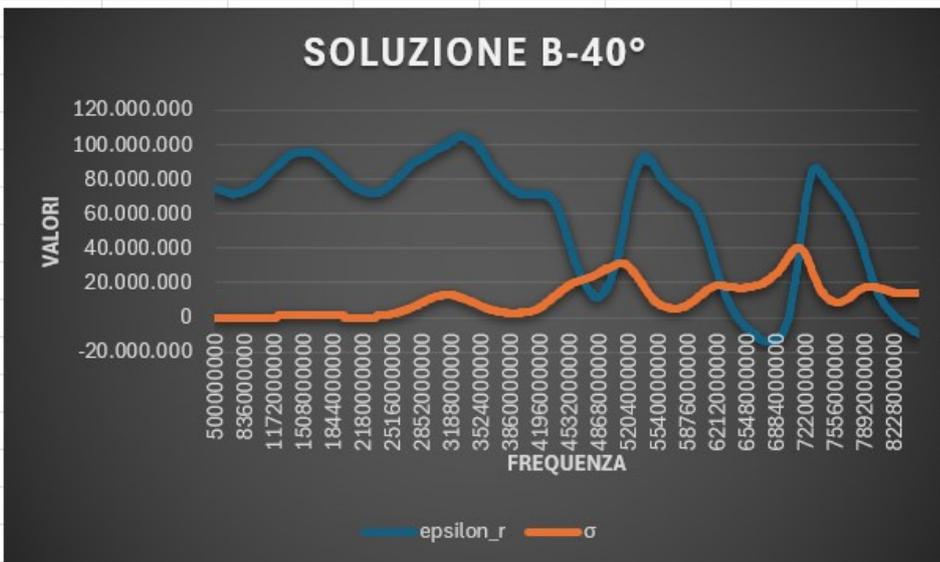
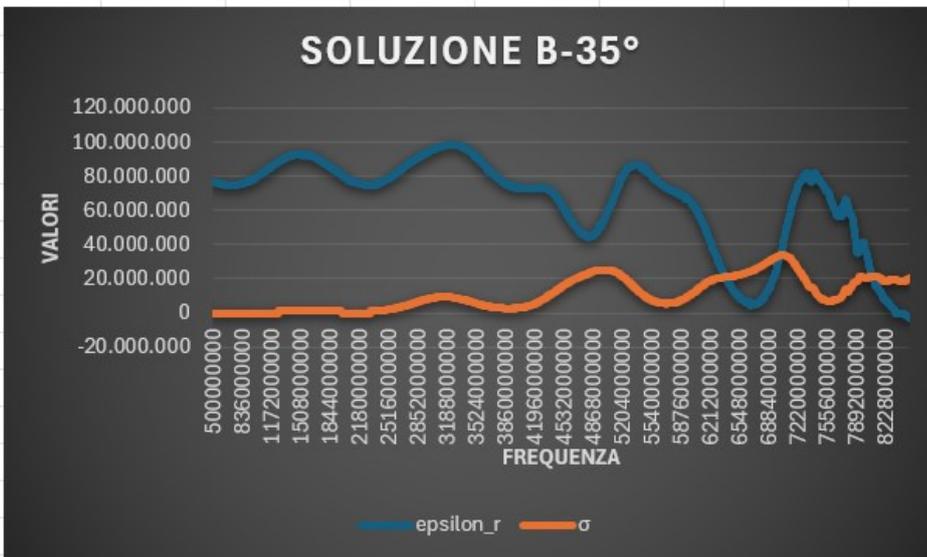
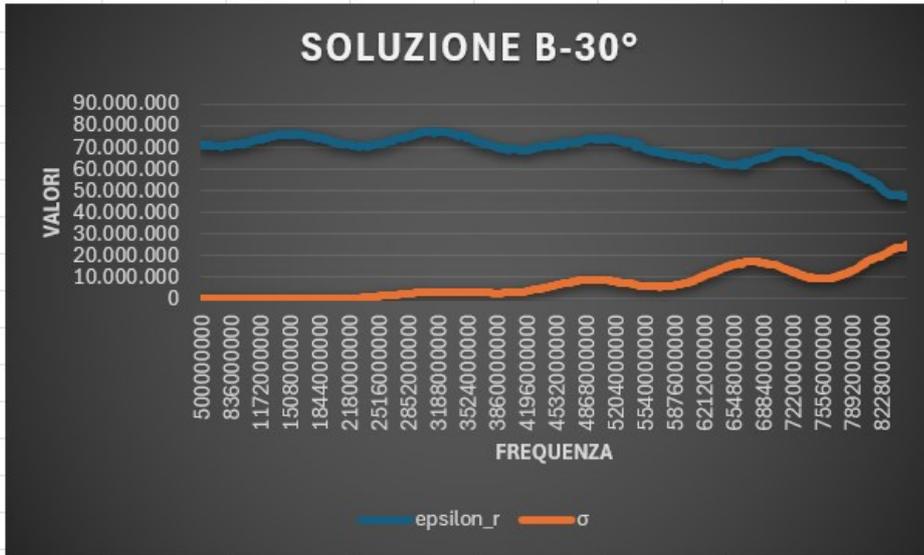
I grafici precedentemente mostrati rappresentano le curve teoriche; grazie alle misurazioni invece possiamo ottenere quelli che sono i reali grafici di ϵ_r e σ . Per la soluzione A, alle varie temperature, abbiamo ottenuto:



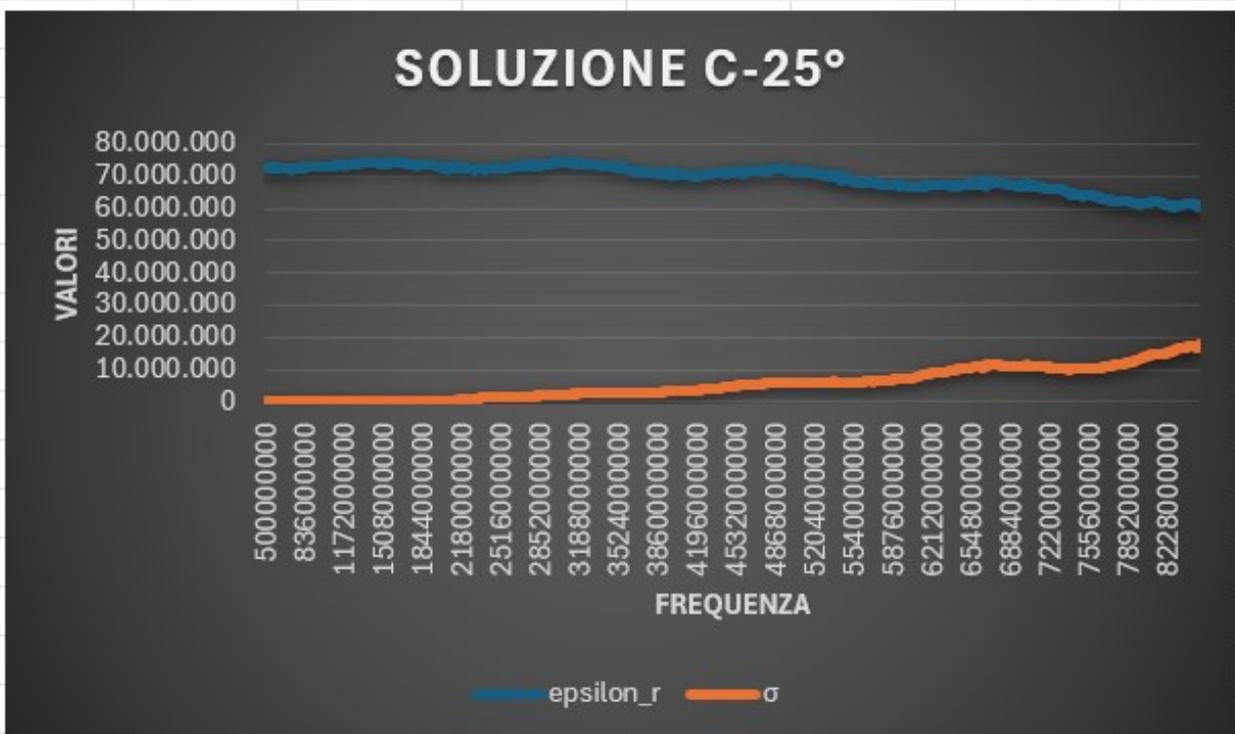
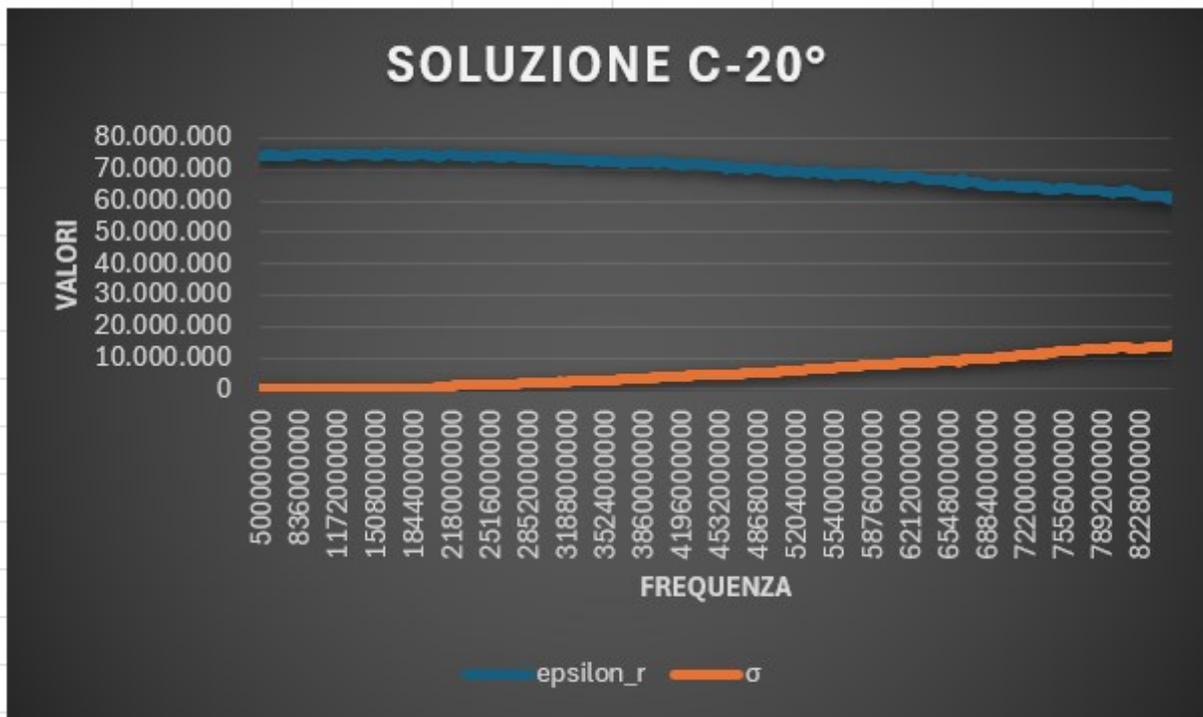


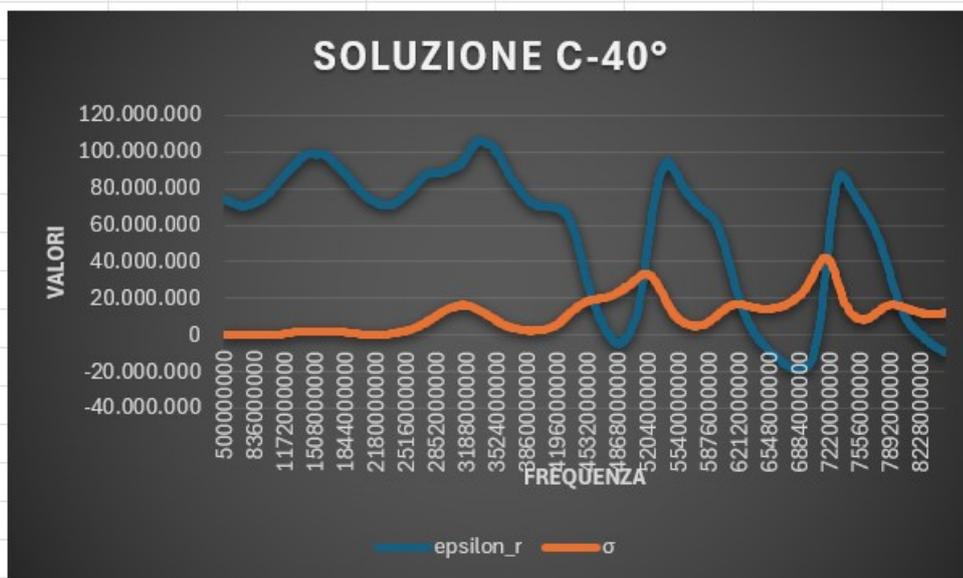
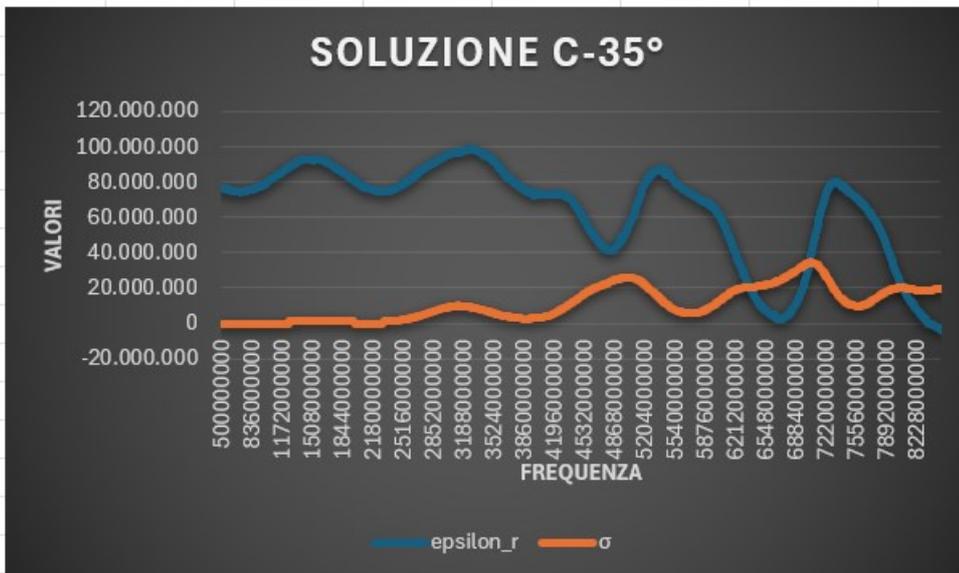
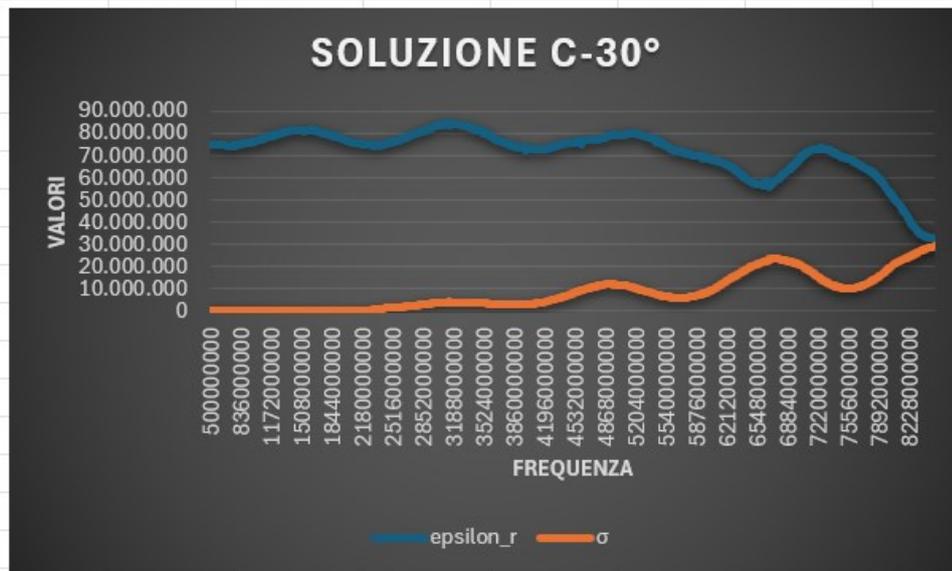
Per la soluzione B invece abbiamo ottenuto:





Per la soluzione C, infine, abbiamo ottenuto:





I risultati sperimentali hanno un leggero discostamento da quelli teorici alle frequenze e alle temperature più alte, questo potrebbe essere dovuto al fatto che lo spessore di penetrazione diminuisce con l'aumentare della frequenza e della temperatura.

Lo scostamento maggiore è per la soluzione A che ha uno spessore di penetrazione maggiore, tutto ciò potrebbe far pensare che le dimensioni del contenitore con la soluzione di prova sia troppo piccolo rispetto allo spessore di penetrazione.

Probabilmente abbiamo un effetto di un'onda stazionaria dovuta all'interfaccia tra soluzione campione e l'acqua, contenuta nello strumento di riscaldamento, che sono a temperature diverse: si dovrebbe fare una prova cambiando il contenitore del campione oppure più velocemente spostando la sonda all'interno del contenitore usato.

CONCLUSIONE

Gli studi svolti si sono concentrati sulla misurazione della costante dielettrica complessa di materiali liquidi, in particolare soluzioni saline, e sulla valutazione della loro permittività relativa e conducibilità elettrica in funzione di temperatura e concentrazione salina.

Gli studi teorici e sperimentali hanno messo in evidenza quanto segue:

- **Dipendenza dalla temperatura e dalla concentrazione:** si è osservato che sia la permittività relativa (ϵ_r) sia la conducibilità (σ) variano sensibilmente con l'aumento della temperatura e della salinità.
- **Confronto tra teoria ed esperimento:** i risultati sperimentali, ottenuti utilizzando una sonda terminale e un analizzatore di rete vettoriale Agilent, sono stati in buona parte coerenti con i modelli teorici, seppur mostrando leggere discrepanze alle alte frequenze e temperature, attribuibili a limiti nella calibrazione e a possibili effetti di onde stazionarie.
- **Visualizzazione dati:** l'elaborazione dei dati tramite Python ha permesso di generare grafici utili per confrontare i risultati teorici e sperimentali, evidenziando le tendenze dei parametri misurati.

In sintesi, lo studio ha dimostrato l'importanza di una calibrazione accurata e di condizioni controllate per ottenere misurazioni affidabili, contribuendo alla comprensione delle proprietà dielettriche dei materiali.

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) Tesi Giampiero Proietti A.A 2022/2023
- 4) https://it.wikipedia.org/wiki/Permittivit%C3%A0_elettrica
- 5) Tesi Michele Crognal A.A 2022/2023