

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

DIPARTIMENTO di
INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA E DELL'INFORMAZIONE
"Guglielmo Marconi"
DEI

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA

TESI DI LAUREA

in

MANUTENZIONE PREDITTIVA PER INFRASTRUTTURE ELETTRICHE

**REALIZZAZIONE DI UNA CELLA PER LA
CARATTERIZZAZIONE IN TEMPERATURA DI
ESTERI FLUIDI UTILIZZATI NEI TRASFORMATORI DI POTENZA**

CANDIDATO

Ioan Cristian Morar

RELATORE:

Chiar.mo Prof. Andrea Cavallini

CORRELATORI

Dott. Ing. Fabrizio Negri

Dott. Ing. Marco Zaccaria

Anno Accademico 2015/2016

Sessione II

Alla mia famiglia

INDICE

INTRODUZIONE	7
CAPITOLO 1: POLARIZZAZIONE DEI DIELETTRICI	9
1.1 I MATERIALI DIELETTRICI	9
1.2 TIPI DI POLARIZZAZIONE	10
1.3 PERDITE NEI DIELETTRICI	12
1.4 COSTANTE DIELETTRICA COMPLESSA ED EQUAZIONI DI DEBYE	15
1.5 CIRCUITO EQUIVALENTE DI UN DIELETTRICO REALE	19
1.6 RISPOSTA DIELETTRICA NEL DOMINIO DEL TEMPO	22
CAPITOLO 2: ESTERI	25
2.1 CONFRONTO FRA FLUIDI DI ORIGINE VEGETALE ED OLI MINERALI	25
2.2 CARATTERISTICHE E PROPRIETA' FISICHE OLI VEGETALI	28
2.3 SPETTROSCOPIA DIELETTRICA A BASSA FREQUENZA	32
2.4 ERRORI COMMESSI NELLA SPETTROSCOPIA	38
2.5 INFLUENZA DELLE TEMPERATURE SULLE MISURE	40
CAPITOLO 3: COSTRUZIONE SISTEMA DI CONTROLLO	44
3.1 NORMA CEI 10-9:1997-09	44
3.2 REALIZZAZIONE DEL SISTEMA DI TEMPERATURA DELLA CELLA	46
3.3 PROGRAMMA LABVIEW	51

CAPITOLO 4: PROVE PER COLLAUDO SISTEMA	59
4.1 MECCANISMI DI INVECCHIAMENTO	59
4.2 ALLESTIMENTO DELLE PROVE	60
4.3 RISULTATI SPERIMENTALI	62
CONCLUSIONI	76
BIBLIOGRAFIA	77
RINGRAZIAMENTI	80

INTRODUZIONE

Lo scopo principale di questa tesi è di analizzare le caratteristiche fisiche ed elettriche degli esteri, ossia dei fluidi di origine vegetale, allo scopo di verificare la loro adeguatezza come sostituti degli oli di origine minerale attualmente impiegati nei trasformatori di potenza.

Risulta quindi evidente l'importanza nell'avere a disposizione dei liquidi con bassa costante dielettrica ma allo stesso tempo ottime proprietà chimiche e di trasferimento del calore. Per minimizzare la quantità di energia dissipata, che si manifesta sotto forma di calore determinando un incremento della temperatura del sistema di isolamento, è fondamentale che le perdite dielettriche all'interno del sistema isolante siano estremamente basse. Per questo motivo gli isolanti liquidi dovrebbero avere un fattore di dissipazione molto basso.

Per sfruttare al meglio tale conoscenza è necessario studiare il comportamento della costante dielettrica e del fattore di dissipazione al variare della temperatura e della frequenza.

Nel primo capitolo viene descritto il comportamento dei materiali dielettrici, il comportamento sotto l'effetto della polarizzazione e le varie equazioni descrittive nonché un discorso analitico sulla costante dielettrica complessa e sulla schematizzazione di un dielettrico tramite alcuni semplici parametri.

Il secondo capitolo mette a confronto gli esteri, ossia i fluidi di origine vegetale, con gli oli minerali attualmente commercializzati ed utilizzati. Alcune proprietà rilevanti per le nostre applicazioni invece vengono studiate in modo approfondito. Nella parte finale vengono trattate la spettroscopia dielettrica a bassa frequenza come metodo di investigazione dello stato dell'isolante e la caratterizzazione in temperatura di alcuni campioni esteri.

Il terzo capitolo descrive brevemente la norma CEI 10-9, punto di riferimento fondamentale per quel che riguarda i metodi di prova sugli oli. Successivamente viene illustrato il lavoro fisico e di progettazione che ha portato alla realizzazione del sistema di controllo della temperatura utilizzato per le varie prove. L'ultimo paragrafo invece ha lo scopo di spiegare il software implementato a tale scopo nell'ambiente di programmazione LabView e come utilizzarlo per delle prove in modo autonomo.

Nel quarto capitolo vengono illustrati i risultati ottenuti su 6 stati di un fluido di origine vegetale, ossia sul provino grezzo, su quello invecchiato in ambiente controllato per una settimana a 150 °C e su di un fluido invecchiato due settimane allo stesso modo nonché su altri 3 campioni come quelli sopra citati ma con l'aggiunta di alcune particelle di umidità.

CAPITOLO 1: POLARIZZAZIONE DEI DIELETTRICI

1.1 I MATERIALI DIELETTRICI

Il comportamento macroscopico dei materiali all'applicazione di un campo elettrico è dato dall'equazione

$$D = \varepsilon E \quad (1.1)$$

Oppure dalla sua equazione equivalente, nella quale si evidenzia la permittività

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E \quad (1.2)$$

Dal punto di vista microscopico invece è necessario considerare anche il vettore polarizzazione P e si ottiene

$$D = \varepsilon_0 E + P \quad (1.3)$$

con

$$P = (\varepsilon - \varepsilon_0)E \quad (1.4)$$

Applicando un campo elettrico ad un materiale esso è inferiore rispetto a quello che avremmo se invece lo applicassimo nel vuoto. Il campo elettrico è dato sia dalle cariche libere che da quelle legate alla materia, ossia le sorgenti del vettore polarizzazione. Esse si dispongono sulle superfici limite del materiale, il quale può essere visto quindi come sede della somma di due distribuzioni di cariche di segno contrario. L'intensità di tale fenomeno è evidenziata dalla suscettività dielettrica definita come

$$\chi = \varepsilon - \varepsilon_0 \quad (1.5)$$

Oppure in maniera più pratica dalla suscettività relativa

$$\chi_r = \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} \quad (1.6)$$

E quindi si ottiene la relazione

$$P = \varepsilon_0(\varepsilon_r - 1)E = \varepsilon_0\chi_r E \quad (1.7)$$

1.2 TIPI DI POLARIZZAZIONE

Principalmente si hanno quattro tipi di polarizzazione:

- Polarizzazione elettronica
- Polarizzazione atomica
- Polarizzazione dipolare
- Polarizzazione interfacciale

Per descrivere la polarizzazione elettronica consideriamo un atomo. Esso si può schematizzare come un nucleo positivo ed una nube di elettroni che girano attorno al nucleo su orbite circolari. Se non viene applicato un campo elettrico si ha una condizione di equilibrio nella quale il baricentro delle cariche negative e quello delle cariche positive coincidono. Applicando invece un campo elettrico l'atomo si deforma ed i due baricentri assumono posizioni diverse, creando così un dipolo elettrico. In ogni caso la risultante delle forze applicate all'elettrone (forza di attrazione del nucleo, forza centrifuga e forza nata dal campo elettrico applicato) deve rimanere nulla e quindi la nuova orbita non sarà casuale bensì si avrà un'orbita ellittica, definita da un'eccentricità relativamente modesta ossia la distanza fra il nucleo ed il baricentro dell'elettrone è molto più piccola rispetto al raggio medio dell'orbita che percorre l'elettrone.

Per quanto riguarda la polarizzazione atomica si può procedere in modo simile ma in questo caso considerando una molecola. Il campo elettrico deforma la molecola proprio come nel caso della polarizzazione elettronica. Anche in questo caso l'intensità della deformazione è correlata all'intensità del campo applicato ed alla forza di coesione degli ioni.

La polarizzazione dipolare, detta anche per orientamento, è possibile solo sulle molecole polari, ossia quelle molecole che hanno un momento dipolare permanente. Normalmente i dipoli si dispongono in maniera casuale e quindi il momento risultante applicato è nullo. Se viene applicato un campo elettrico esso tende ad orientare i vari dipoli nella stessa direzione. L'agitazione termica ovviamente si oppone a tale fenomeno e quindi all'equilibrio la risultante dei vari momenti dipolari elementari sarà nulla in tutte le direzioni tranne nella direzione del campo. La polarizzazione dipolare risulta quindi funzione anche della temperatura.

La polarizzazione interfacciale è dovuta alla scarsa mobilità degli ioni nei dielettrici perché alcuni di essi si depositano sulle superfici di discontinuità del dielettrico dando nascita ad una carica spaziale. Nel caso il campo applicato sia variabile i vari ioni tendono a seguirne l'andamento con un certo ritardo. Si crea quindi un'isteresi nel materiale e come conseguenza di ciò si hanno delle perdite. A basse frequenze tale fenomeno è trascurabile vista l'inerzia degli ioni mentre diventa rilevante ad esempio in corrente continua.

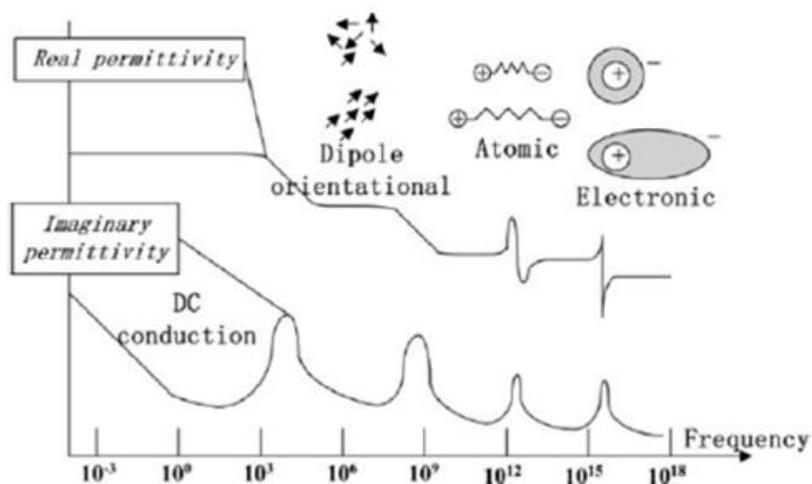


Figura 1: Rappresentazione della permittività reale e complessa in base alla frequenza

Nella figura si può apprezzare la scala relativa dei vari fenomeni di polarizzazione. Si distinguono la polarizzazione elettronica, la polarizzazione atomica e la polarizzazione per orientamento dei dipoli.

1.3 PERDITE NEI DIELETTRICI

Nella realtà tutti i dielettrici hanno un certo valore di conducibilità γ diverso da zero per cui il fenomeno della conduzione non può essere trascurato in quanto provoca perdite per effetto Joule e crea fenomeni di instabilità termica nel dielettrico che ne degradano le proprietà. Essendo la conducibilità proporzionale alla temperatura a causa dell'agitazione termica gli elettroni possono quindi superare il gap di energia ed entrare nella banda di conduzione.

Indicando con W_0 l'energia di legame, k la costante di Boltzman e T la temperatura in Kelvin il numero di cariche libere vale

$$N = N_0 e^{-\frac{W_0}{kT}} \quad (1.8)$$

Ed ugualmente per la conducibilità

$$\gamma = \gamma_0 e^{-\frac{W_0}{kT}} \quad (1.9)$$

Da ciò si deduce che per elevati valori di campo elettrico il materiale diventa instabile, ossia un aumento della corrente provoca un aumento di temperatura, l'aumento di temperatura aumenta la conducibilità del dielettrico e ciò porterebbe ad un ulteriore incremento della corrente. Ciò continuerebbe in modo sempre più marcato portando alla rottura del dielettrico.

Va inoltre sottolineato che la conducibilità aumenta pure con il campo elettrico in quanto esso fa diminuire il gap di energia portandolo dal valore W_0 al valore $W_0 - a|E|$, dove a è un particolare coefficiente e quindi l'effettivo valore di conducibilità vale

$$\gamma = \gamma_0 e^{-\frac{W_0 - a|E|}{kT}} \quad (1.10)$$

In maniera sperimentale si è determinata una formula di maggiore utilità pratica che evidenzia meglio la dipendenza della conducibilità dalla temperatura e dal campo applicato

$$\gamma = \gamma_0 e^{(K_1\theta + K_2|E|)} \quad (1.11)$$

Con K_1 e K_2 costanti del materiale. E' interessante far notare al lettore che $K_1\theta > K_2E$ ossia che la dipendenza dalla temperatura è più forte rispetto a quella dal campo elettrico.

Supponiamo di applicare al dielettrico un campo variabile nel tempo $E(t)$ di tipo sinusoidale. La polarizzazione dipolare di conseguenza avrà anche lei un andamento variabile nel tempo ma con un certo ritardo rispetto al campo impresso. Essa descrive quindi un'elisse dovuta al ritardo di P rispetto ad E .

$$E = E_M \sin(\omega t) \quad (1.12)$$

$$P = P_M \sin(\omega t - \varphi) \quad (1.13)$$

L'area sottesa dall'elisse corrisponde alle perdite di energia per unità di volume

$$w = \oint E \times dD = \oint E \times d(\epsilon_0 E + P) = \epsilon_0 \oint \frac{dE^2}{2} + \oint E \times dP = \oint E \times dP \quad (1.14)$$

Dal punto di vista fisico le perdite per isteresi sono causate dall'attrito dei dipoli elementari nella loro rotazione quindi all'aumentare della frequenza la polarizzazione dipolare tende a diminuire.

In un dielettrico reale lo sfasamento fra tensione applicata e corrente non è esattamente di 90° , bensì la corrente avrà una componente in fase con la tensione ed una in quadratura.

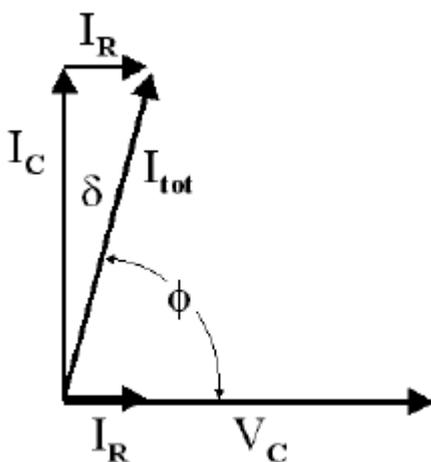


Figura 2: Rappresentazione grafica dell'angolo di perdita

Considerando l'angolo $\delta = 90^\circ - \varphi$ la potenza attiva può essere determinata come

$$P = Q \cotan \varphi = Q \tan \delta \quad (1.15)$$

Da tale formula si nota che la potenza attiva vale $\tan \delta$ volte la potenza reattiva motivo per cui il termine $\tan \delta$ viene denominato fattore di dissipazione mentre l'angolo δ angolo di perdita. Per i dielettrici di uso comune $\tan \delta$ vale $10^{-4} - 10^{-2}$ per cui risulta valida l'approssimazione $\delta \approx \tan \delta \approx \sin \delta \approx \cos \phi$.

Risulta utile scomporre la potenza reattiva e riscrivere la potenza attiva come

$$P = \omega C V^2 \tan \delta \quad (1.16)$$

Da tale formula si nota che le perdite dielettriche dipendono dal quadrato della tensione.

Consideriamo ora un condensatore piano con spessore del dielettrico d e superficie S . La sua capacità vale

$$C = \varepsilon \frac{S}{d} \quad (1.17)$$

Mentre la tensione ai suoi capi

$$V = E d \quad (1.18)$$

Possiamo quindi definire la potenza reattiva come

$$Q = \omega \varepsilon E^2 S d \quad (1.19)$$

Oppure riferendoci alla potenza reattiva specifica si ha

$$q = \frac{Q}{V} = \omega \varepsilon E^2 \quad (1.20)$$

e

$$p = \omega \varepsilon E^2 \tan \delta \quad (1.21)$$

Si definisce il fattore di perdita come prodotto fra ε e $\tan \delta$.

1.4 COSTANTE DIELETTRICA COMPLESSA ED EQUAZIONE DI DEBYE

Partendo dalle equazioni descritte in precedenza

$$D = \varepsilon E \quad (1.22)$$

$$P = (\varepsilon - \varepsilon_0)E \quad (1.23)$$

Facendo riferimento a grandezze sinusoidali ed applicando il metodo simbolico si ottiene che ε è un numero complesso formato da una parte reale che rappresenta la permittività e da una parte immaginaria che tiene conto dell'isteresi e delle perdite ad essa collegate.

$$\dot{\varepsilon} = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (1.24)$$

Considerando la densità di corrente totale, ossia la somma fra la corrente di conduzione e la corrente di spostamento, le perdite per unità di volume valgono

$$p = \left(J + \frac{\partial D}{\partial t} \right) \cdot E \quad (1.25)$$

E se ci riferiamo a grandezze sinusoidali tale formula si semplifica ulteriormente

$$p = \gamma E^2 + j\omega \varepsilon \dot{E} \cdot \dot{E} \quad (1.26)$$

Il secondo membro dell'addizione rappresenta le perdite per isteresi. Sostituendo al posto della permittività la sua forma complessa le perdite diventano

$$p = \gamma E^2 + \omega \varepsilon'' E^2 = \omega E^2 \left(\frac{\gamma}{\omega} + \varepsilon'' \right) \quad (1.27)$$

Possiamo ora considerare una nuova costante dielettrica complessa ε^*

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j \left(\frac{\gamma}{\omega} + \varepsilon'' \right) \quad (1.28)$$

In questo modo la parte reale tiene conto della permittività del dielettrico mentre la parte immaginaria tiene conto delle perdite per isteresi e delle perdite per conduzione. In questo caso il fattore di dissipazione può essere riscritto come

$$\tan \delta = \frac{\frac{\gamma}{\omega} + \varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (1.29)$$

Per una qualunque frequenza la polarizzazione totale è data dalla somma della polarizzazione elettronica, quella atomica e quella dipolare. Per frequenze molto elevate la polarizzazione dipolare tende a zero quindi possiamo affermare che

$$P_{\infty} = P_e + P_a \quad (1.30)$$

$$P = P_{\infty} + P_d \quad (1.31)$$

Mentre per $\omega=0$, ossia in condizioni statiche

$$P_s = P_{\infty} + P_d(\omega = 0) = P_{\infty} + P_{sd} \quad (1.32)$$

P_{sd} indica la polarizzazione dipolare in condizioni statiche. Per frequenze tendenti all'infinito e per frequenze nulle possiamo scrivere la polarizzazione come

$$P_{\infty} = (\varepsilon_{\infty} - \varepsilon_0)E \quad (1.33)$$

$$P_s = (\varepsilon_s - \varepsilon_0)E \quad (1.34)$$

E per una qualunque frequenza in tale range

$$P = (\varepsilon - \varepsilon_0)E = P_\infty + P_d = (\varepsilon_\infty - \varepsilon_0)E + P_d \quad (1.35)$$

Possiamo ricavare che la polarizzazione dipolare vale quindi

$$P_d = (\varepsilon - \varepsilon_\infty)E \quad (1.36)$$

Per determinare P_d ad ogni frequenza supponiamo che essa raggiunga sempre la posizione di equilibrio dopo un certo tempo con una velocità proporzionale alla distanza dall'equilibrio

$$P_{sd} - P_d(t) = \tau \frac{dP_d(t)}{dt} \quad (1.37)$$

Con τ tempo di rilassamento del dielettrico. Ricaviamo quindi

$$\tau \frac{dP_d(t)}{dt} + P_d(t) = (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)E(t) \quad (1.38)$$

Considerando grandezze sinusoidali l'equazione si può riscrivere nella forma

$$j\omega\tau\dot{P}_d + \dot{P}_d = (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\dot{E} \quad (1.39)$$

$$\dot{P}_d = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \dot{E} \quad (1.40)$$

E quindi la permittività complessa è definita come

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} = \\ &= \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2} - j\omega\tau \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2} \end{aligned} \quad (1.41)$$

Essa prende il nome di Equazione di Debye.

Mettiamo in evidenza la parte reale e la parte immaginaria

$$\varepsilon' = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (1.42)$$

$$\varepsilon'' = \omega \tau \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (1.43)$$

L'andamento temporale delle due componenti della permittività è il seguente

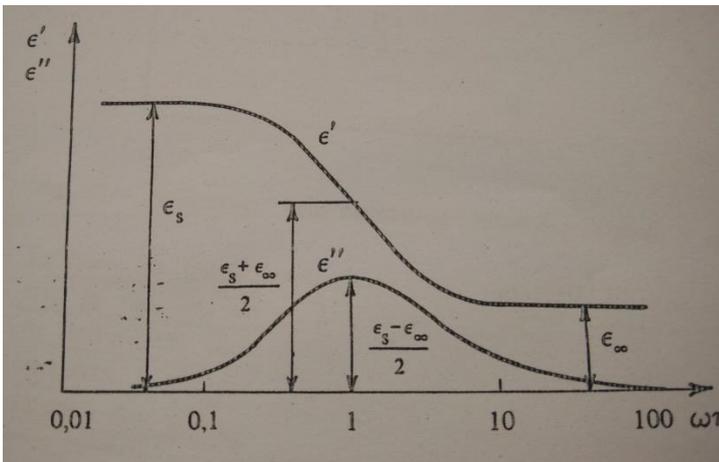


Figura 3: Rappresentazione grafica della permittività

La ε'' ha un massimo per $\omega\tau=1$ e vale

$$\varepsilon''_{max} = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{2} \quad (1.44)$$

Nel caso di dielettrico ideale

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \omega \tau \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{\varepsilon_s + \varepsilon_{\infty} \omega^2 \tau^2} \quad (1.45)$$

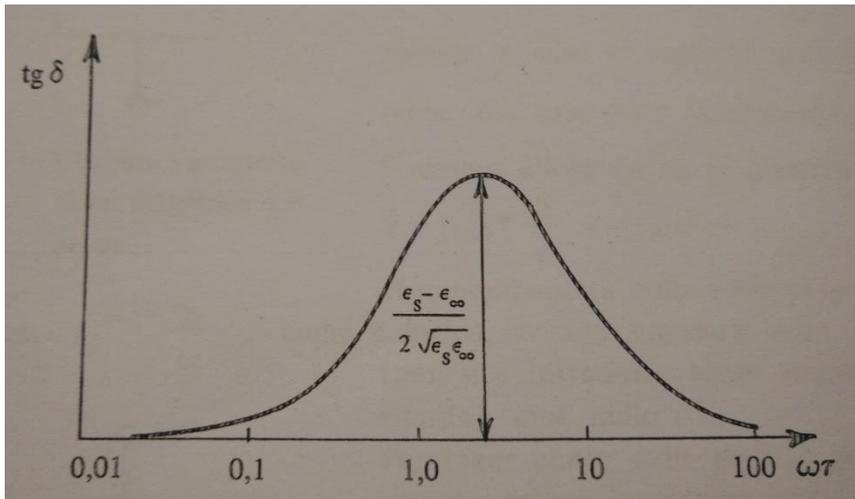


Figura 4: Rappresentazione grafica del fattore di perdita

Tale funzione ha un massimo nel punto $\sqrt{\frac{\epsilon_s}{\epsilon_\infty}}$ che vale

$$\tan \delta_{max} = \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{2\sqrt{\epsilon_s \epsilon_\infty}} \quad (1.46)$$

1.5 CIRCUITO EQUIVALENTE DI UN DIELETTICO REALE

Un dielettrico reale può essere schematizzato come una capacità con in parallelo una conduttanza che tiene conto della conducibilità del materiale.

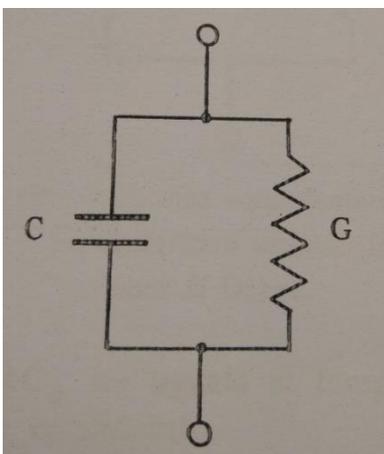


Figura 5: Schematizzazione di un dielettrico

La capacità vale

$$C = \frac{\varepsilon' S}{d} \quad (1.47)$$

Mentre la conduttanza

$$G = \frac{\gamma S}{d} \quad (1.48)$$

E quindi l'ammettenza equivalente vale

$$\dot{Y} = G + j\omega C = (\gamma + j\omega\varepsilon') \frac{S}{d} \quad (1.49)$$

Se consideriamo anche le perdite per isteresi introduciamo una resistenza in serie alla capacità. Ponendo $\tau=RC$ si ha

$$\dot{Y} = \frac{j\omega C}{1 + j\omega RC} = \frac{j\omega C}{1 + j\omega\tau} = \frac{j\omega + \omega^2\tau}{1 + \omega^2\tau^2} C = \frac{j\omega + \omega^2\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \varepsilon_s \frac{S}{d} \quad (1.50)$$

Estrapolando la ε^* otteniamo

$$\varepsilon^* = \frac{\varepsilon_s j\omega + \omega^2\tau}{j\omega + \omega^2\tau^2} = \varepsilon_s \frac{1 - j\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (1.51)$$

Esplicitiamo la parte reale e la parte immaginaria per poter graficare le due funzioni

$$\varepsilon' = \frac{\varepsilon_s}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (1.52)$$

$$\varepsilon'' = \varepsilon_s \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (1.53)$$

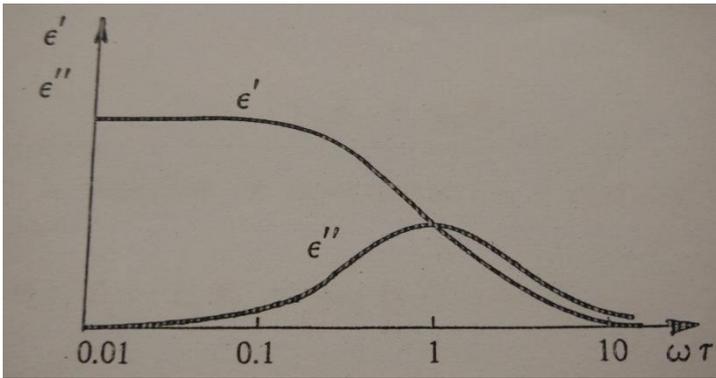


Figura 6: Rappresentazione delle componenti della permittività

Come si può notare dal grafico per frequenze molto elevate la ϵ' non si annulla bensì tende al valore ϵ_∞ ossia la polarizzazione elettronica e quella atomica sono ancora presenti.

Sulla base di tutte queste considerazioni possiamo schematizzare il dielettrico nel seguente modo

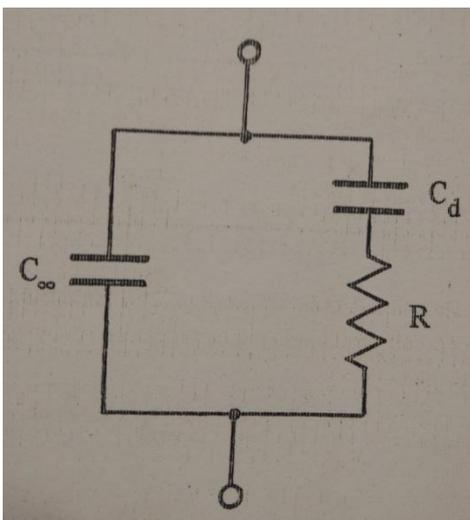


Figura 7: Schematizzazione completa di un dielettrico reale

$$C_\infty = \epsilon_\infty \frac{S}{d} \quad (1.54)$$

$$C_d = (\epsilon_s - \epsilon_\infty) \frac{S}{d} \quad (1.55)$$

Tale capacità serve a considerare gli effetti della polarizzazione dipolare, in questo modo il prodotto fra essa e la resistenza in serie dà il tempo di rilassamento del dielettrico.

L'impedenza del dielettrico vale

$$\dot{Y} = j\omega C_\infty + \frac{j\omega}{1 + j\omega\tau} C_d = j\omega \left(\varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \right) \frac{S}{d} \quad (1.56)$$

Da cui ricaviamo

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \quad (1.57)$$

Un'ultima considerazione si può fare relativamente alle perdite per effetto Joule, ossia se le si vuole considerare occorre mettere in parallelo al circuito precedente una conduttanza G di valore

$$G = \gamma \frac{S}{d} \quad (1.58)$$

E quindi la ε'' diventa

$$\varepsilon'' = \frac{\gamma}{\omega} + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (1.59)$$

1.6 RISPOSTA DIELETTRICA NEL DOMINIO DEL TEMPO

Applicando una tensione alternata $V(t)$ ai capi del provino si ha una densità di corrente che vale

$$J(t) = \sigma E(t) + \frac{\partial D(t)}{\partial t} = \sigma E(t) + \frac{\partial}{\partial t} [\varepsilon_0 E(t) + P(t)] \quad (1.60)$$

Scomponendo la polarizzazione in due componenti, una veloce (istantanea) P_{fast} o P_∞ ed una lenta ossia osservabile P_{slow}

$$P = P_{slow} + P_{fast} \quad (1.61)$$

Si ha

$$P(t) = P_{\infty} + \varepsilon_0 E(-\infty)\phi(t + \infty) + \varepsilon_0 \int_{-\infty}^t \frac{dE(t^*)}{d(t^*)} \phi(t - t^*) dt^* \quad (1.62)$$

$$P(t) = \varepsilon_0(\varepsilon_{\infty} - 1)E(t) + \varepsilon_0 E(-\infty)\phi(t + \infty) + \varepsilon_0 \int_{-\infty}^t \frac{dE(t^*)}{d(t^*)} \phi(t - t^*) dt^* \quad (1.63)$$

$\Phi(t)$ è la risposta di polarizzazione del sistema applicando un gradino unitario di tensione all'istante $t=0$

$$P_{slow}(t) = \varepsilon_0 E(-\infty)\phi(t + \infty) + \varepsilon_0 E(t^*)\phi(t - t^*) - \varepsilon_0 \int_{-\infty}^t E(t^*) \frac{d\phi(t - t^*)}{d(t^*)} dt^* \quad (1.64)$$

Tramite alcuni passaggi e ponendo $u=t-t^*$ otteniamo

$$P_{slow}(t) = \varepsilon_0 \int_0^{\infty} E(t - u) \frac{d\phi(u)}{du} du \quad (1.65)$$

Per cui riscriviamo la polarizzazione totale

$$P(t) = P_{\infty} + P_{slow} = \varepsilon_0(\varepsilon_{\infty} - 1)E(t) + \varepsilon_0 \int_0^{\infty} E(t - u) \frac{d\phi(u)}{du} du \quad (1.66)$$

Dal punto di vista fisico u rappresenta il cambiamento di campo elettrico e ϕ la funzione di rilassamento della polarizzazione.

Tornando alla densità di corrente la possiamo esprimere, ponendo $u=\tau$, come

$$J(t) = \sigma E(t) + \frac{\partial D(t)}{\partial t} = \sigma E(t) + \frac{\partial}{\partial t} \left[\varepsilon_0 E(t) + \varepsilon_0(\varepsilon_{\infty} - 1)E(t) + \varepsilon_0 \int_0^{\infty} E(t - \tau) \frac{d\phi(\tau)}{d\tau} d\tau \right]$$

$$= \sigma E(t) + \frac{\partial}{\partial t} \left[\varepsilon_0 \varepsilon_\infty E(t) - \varepsilon_0 (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \int_0^\infty E(t - \tau) \frac{d\phi(\tau)}{d\tau} d\tau \right] \quad (1.67)$$

Moltiplicando entrambi i termini per l'area delle armature A e dividendo per la distanza fra di esse d si ottiene il valore di corrente che attraversa il condensatore per un determinato valore di tensione $V(t)$

$$I(t) = \frac{C_0 \sigma}{\varepsilon_0} V(t) + \frac{\partial}{\partial t} C_0 \left[\varepsilon_\infty V(t) + (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \int_0^\infty V(t - \tau) \left(-\frac{d\phi(\tau)}{du} \right) d\tau \right] \quad (1.68)$$

$$I(t) = I_{cond}(t) + I_p(t) = \frac{C_0 \sigma}{\varepsilon_0} V(t) + \frac{\partial}{\partial t} C_0 \left[\varepsilon_\infty V(t) + \int_0^\infty V(t - \tau) f(\tau) d\tau \right] \quad (1.69)$$

Il termine $f(\tau) = -\frac{d\phi(\tau)}{du} (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)$ non è altro che la corrente di polarizzazione osservabile nel materiale, ossia la $P_{slow}(t)$ nominata precedentemente, con capacità a vuoto pari ad $1F$ e con un gradino unitario di tensione all'istante $t=0$.

CAPITOLO 2: ESTERI

2.1 CONFRONTO FRA FLUIDI DI ORIGINE VEGETALE ED OLI MINERALI

Nei trasformatori di potenza ,per renderli più piccoli ed allo stesso efficienti, si sta cercando di sostituire l'aria con degli oli vegetali. Essi inoltre garantiscono una maggiore stabilità contro l'ossidazione, una permittività più bassa, una minore viscosità nonché prestazioni migliori in quanto a raffreddamento e lubrificazione del trasformatore.

Per la scelta degli oli svolgono un ruolo importante sia le loro caratteristiche fisiche e chimiche che altri parametri come la durata di vita oppure la compatibilità con l'ambiente ossia essi non dovrebbero essere tossici, dovrebbero essere bio degradabili, riciclabili, rinnovabili e con un'adeguata stabilità all'ossidazione.

Nella progettazione e scelta degli oli per i trasformatori dobbiamo valutare i trasformatori nel loro complesso e tutte le variabili esterne come ad esempio variazioni di temperature o climatiche. Il sistema di isolamento deve riuscire ad essere stabile in tutte le condizioni di lavoro ordinarie.

La migliore fonte di esteri naturali sono gli oli di semi tipo l'olio di colza, girasoli, soia, oliva, mais, palma, cocco o semi di lino. Tali oli sono costituiti principalmente dai trigliceridi, un prodotto derivato dall'esterificazione del glicerolo con acidi grassi, i quali costituiscono il 95% del peso totale dei trigliceridi.

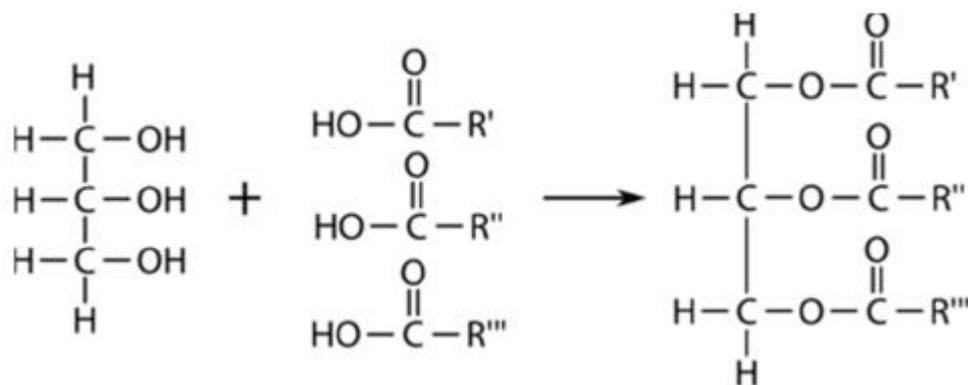


Figura 8:Rappresentazione della struttura chimica di un trigliceride

Nella figura si può osservare come la combinazione del glicerolo con 3 acidi grassi formi i trigliceridi.

Nella seguente tabella è fornita la percentuale di acidi grassi in alcuni oli derivanti da semi vegetali:

Acido	Olio di rape	Olio di arachidi	Olio di semi di girasole	Olio di soia	Olio di semi di cotone
14:0	0.1	0	0	0.1	0
14:1	0	0	0	0	0
16:0	4.1	11	6.1	11	22
16:1	0.3	0	0	0.1	0
17:0	0.1	0	0	0	0
17:1	0	0	0	0	0
18:0	1.8	2	3.9	4	3
18:1	60.9	48	42.6	23.4	19
18:2	21	32	46.4	53.2	54
18:3	8.8	0	1	7.8	1
20:0	0.7	0	0	0.3	0

La percentuale di acidi grassi ovviamente influenza sia le caratteristiche elettriche che la densità, il punto di infiammabilità ed altre caratteristiche fisiche.

Per capire meglio le potenzialità degli oli vegetali basta guardare il seguente confronto fra gli oli minerali e quelli vegetali.

VANTAGGI OLI MINERALI

- Basso costo e quindi costo ridotto anche dei trasformatori
- Bassi costi di manutenzione
- Minore viscosità a basse temperature
- Biodegradabili
- Facilità di esecuzione manutenzione predittiva
- Lunga vita di funzionamento
- Autoripristinante dopo uno stress
- Facile da smaltire/riciclare
- Pour Point estremamente basso, -35°C
- Esperienza nelle varie applicazioni in quanto viene usato da un secolo

VANTAGGI OLI VEGETALI

- Ottime proprietà dielettriche
- Ottima chiarezza
- Completamente biodegradabile in tempi brevi
- Usato per trasformatori di alta tensione
- Non tossico
- Bassi costi di manutenzione
- Possibilità di eseguire manutenzione predittiva
- Composto da ingredienti commestibili
- Risorsa rinnovabile
- Facile da riciclare/smaltire
- Lunga vita di funzionamento
- Tipicamente autoripristinante dopo uno stresso temporario
- Conforme alle normative vigenti sugli oli
- Completamente miscelabile con oli minerali
- Punto di infiammabilità molto alto, sopra i 300°C

SVANTAGGI OLI MINERALI

- Costi di installazione elevati
- Punto di infiammabilità relativamente basso
- Sconsigliato dalle compagnie di assicurazioni
- Potrebbe necessitare di un sistema antincendio dedicato
- Necessarie distanze di sicurezza alte e barriere antifuoco
- Non classificabile come olio edile
- Non rinnovabile
- Contiene tracce di zolfo corrosivo

SVANTAGGI OLI NATURALI

- Costi più elevati rispetto all'olio minerale
- Necessità di un contenitore liquido apposito
- Pour Point a -21°C
- Deve essere sigillato in appositi contenitori

2.2 CARATTERISTICHE E PROPRIETA' FISICHE OLI VEGETALI

Per eseguire le prove sono stati realizzati quattro campioni per ogni materiale da testare. Per le relative misure lo strumento utilizzato è l'Alpha High Performance Modular Measurement System della Novocontrol nel range di frequenze 1Hz-1MHz.

La temperatura a cui sono state eseguite le prove è di 30°C.

Per le prove di tensione di BreakDown è stato implementato il circuito nel seguente modo:

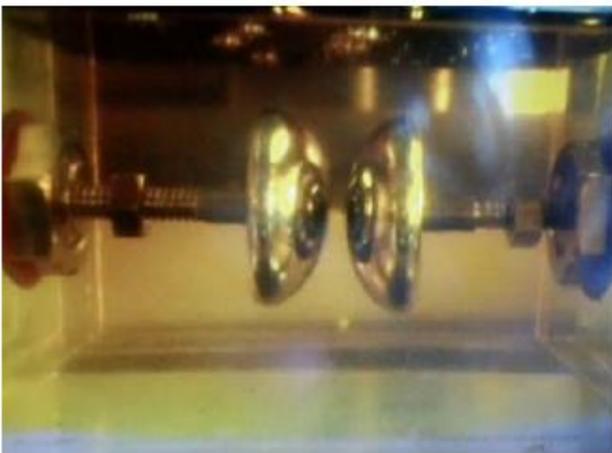


Figura 9: Circuito per le prove di BreakDown

E' stata applicata una tensione a 50 Hz fin a quando non si ha ottenuto una scarica nell'olio. I risultati ottenuti sono i seguenti:

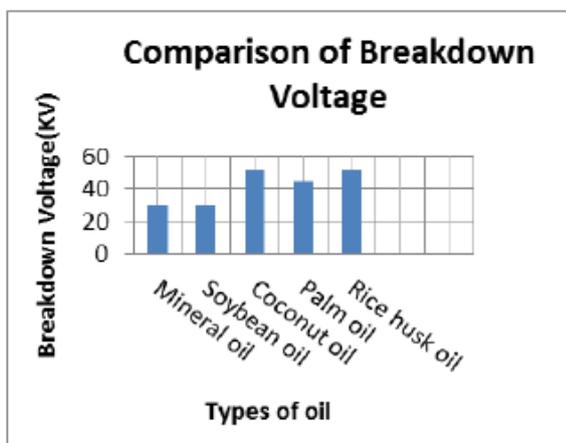


Figura 10: Rappresentazione della tensione di BreakDown per vari tipi di olio

Risulta interessante il fatto che sia l'olio di palma che quello di palma e di riso hanno dei valori di tensioni di breakdown notevolmente superiori rispetto ad un olio minerale, rendendoli quindi interessanti per future applicazioni nei trasformatori di distribuzione o di potenza.

Per quanto riguarda il peso specifico dei vari oli vegetali si è determinato che hanno tutti un peso specifico più elevato dell'olio minerale, ma all'incirca uguale a quello del ghiaccio. Si potrebbero quindi creare un problema dovuto al galleggiamento dei cristalli di ghiaccio più leggeri in un ambiente freddo; per quanto riguarda un ambiente caldo l'alta densità dell'olio non dovrebbe essere un fattore critico.

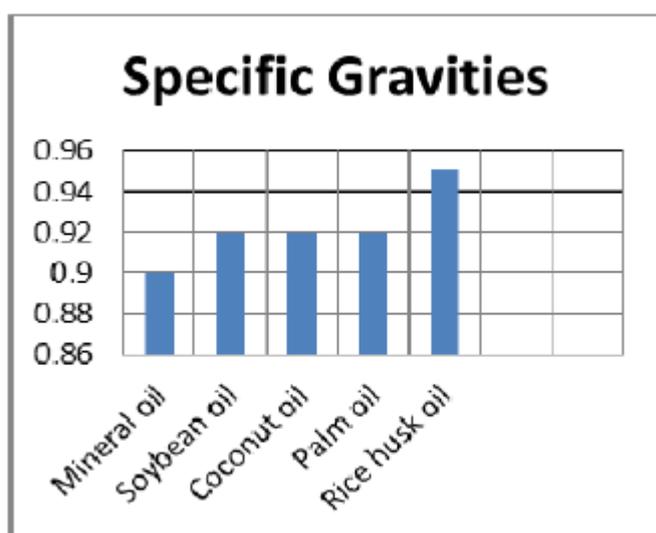


Figura 11: Rappresentazione del peso specifico per vari tipi di olio

I punti di infiammabilità e di combustione degli oli vegetali sono nettamente superiori rispetto agli oli minerali quindi essi offrono una maggiore resistenza al fuoco, vantaggio notevole in caso di guasto.

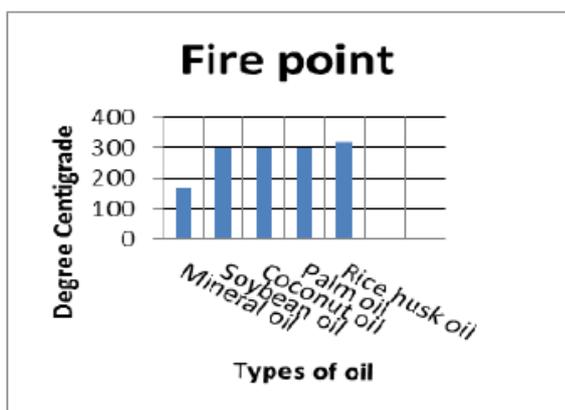


Figura 12: Rappresentazione del punto di infiammabilità per vari tipi di olio

Dal grafico si nota che i valori dei vari oli vegetali sono quasi il doppio rispetto agli oli minerali usati comunemente nell'industria. Le possibilità di guasto relative a cause di questo tipo sono quindi relativamente più basse conferendo al sistema una maggiore affidabilità di servizio.

Il pour point (punto di scorrimento) ossia la temperatura minima alla quale l'olio è fluido è illustrato nella figura sotto.

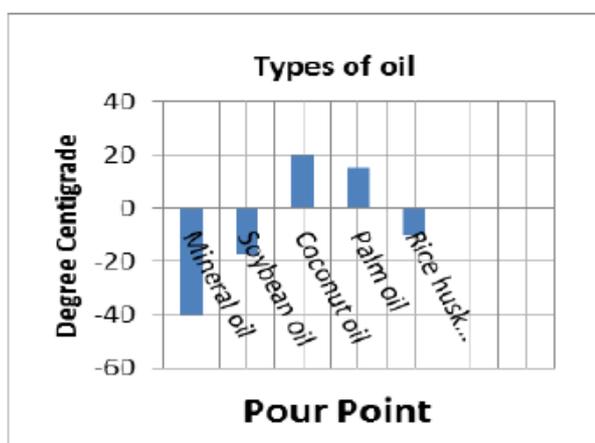


Figura 13: Rappresentazione del pour point per vari tipi di olio

Rispetto agli oli minerali gli oli vegetali hanno un punto di scorrimento più basso ossia essi variano fra -18°C e +20°C mentre per gli oli minerali vale circa -40°C. Gli oli di riso e soia possono perciò essere usati in ambienti con temperature inferiori a -10°C senza alcun deterioramento delle loro caratteristiche. In ambienti molto freddi invece non è consigliato utilizzare tali oli in quanto l'affidabilità del sistema potrebbe essere compromessa.

Dalle analisi sulla viscosità si sono ottenuti i seguenti risultati.

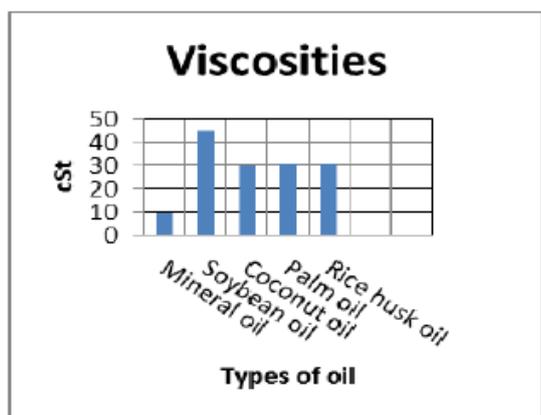


Figura 14: Rappresentazione della viscosità per vari tipi di olio

Negli oli vegetali essa risulta essere fino a 4-5 volte maggiore rispetto agli oli minerali. Siccome il raffreddamento del trasformatore avviene tramite il flusso convettivo del fluido isolante è desiderabile che esso abbia una bassa viscosità ossia più è bassa la viscosità del dielettrico maggiore risulta la sua efficienza nel raffreddare il trasformatore. La viscosità rimane quindi un parametro estremamente critico per l'impiego di oli vegetali in quanto la loro elevata viscosità potrebbe compromettere il funzionamento dei trasformatori, soprattutto in presenza di climi freddi. Dalle prove eseguite per determinare il fattore di dissipazione si è determinato che esso è maggiore in tutti gli oli vegetali rispetto all'olio minerale.

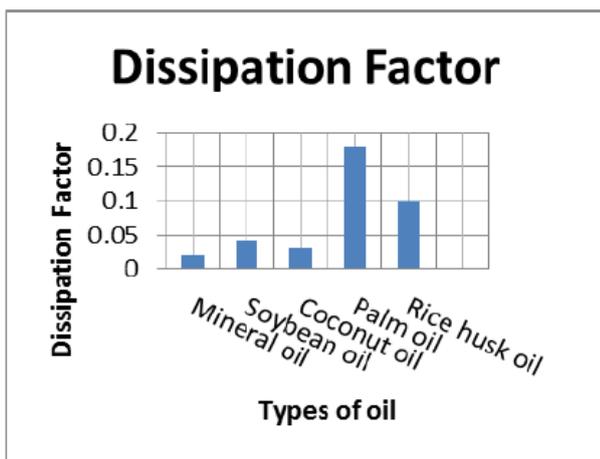


Figura 15: Rappresentazione del fattore di dissipazione per vari tipi di olio

Dal grafico si nota che esso è eccessivamente grande nell'olio di palma ed in quello di riso, risultato probabilmente dovuto ad alte concentrazioni di particelle contaminanti conduttive. Tale problema può essere risolto attraverso ulteriori trattamenti dell'olio.

La permittività relativa, ampiamente analizzata nel capitolo precedente, è graficata nel seguente istogramma.

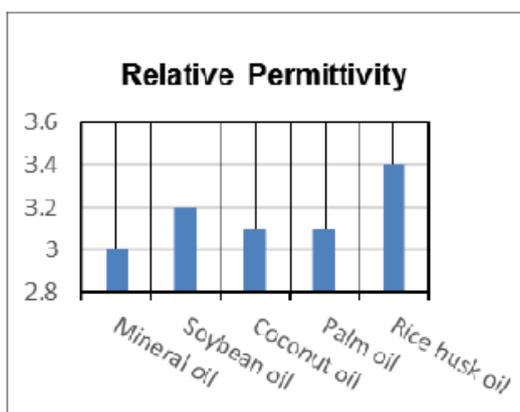


Figura 16: Rappresentazione della permittività relativa per vari tipi di olio

L'olio di riso possiede una permittività relativa piuttosto elevata. Ciò costituisce un vantaggio in quanto rispetto agli altri oli esso sarebbe sottoposto ad uno stress inferiore da parte del campo elettrico.

2.3 SPETTROSCOPIA DIELETTRICA A BASSA FREQUENZA

Attualmente la spettroscopia dielettrica a bassa frequenza è uno strumento di diagnostica molto affidabile per apparecchi di alta tensione. La quantità di umidità contenuta nell'isolamento può essere determinata infatti attraverso questo metodo, ossia vengono confrontati i dati misurati ed il modello teorico ottenuto da considerazioni sulla geometria del sistema di isolamento, temperatura, proprietà dielettriche dell'olio ed età del sistema. I dati ottenuti in determinate condizioni in laboratorio non sono estremamente precisi, motivo per cui un modello accurato può determinare esattamente il contenuto d'acqua.

E' stato osservato che la polarizzazione di cariche spaziali avviene a basse frequenze soprattutto per gli oli invecchiati, ossia la carica spaziale riduce il campo elettrico nell'olio e quindi la sua permittività aumenta mentre la conduttività ed il fattore di dissipazione diminuiscono. L'aumento della permittività può essere usato come parametro di diagnosi per i liquidi isolanti.

Per campi elettrici molto piccoli nei liquidi isolanti i portatori maggioritari di carica sono gli ioni oppure associazioni ioniche di ordine superiore risultanti dalla dissociazione spontanea di piccole quantità di sostanze ionizzabili o dall'azione della radiazione naturale. Nel caso di piccoli campi elettrici l'iniezione elettronica, l'elettrone ed il tunnel di conduzione sono trascurabili. Gli ioni invece hanno la tendenza ad attrarre verso di loro altre molecole, in pratica nei liquidi la mobilità ionica è indipendente dalla natura del liquido o dalla polarità. Se uno ione portatore di carica viene ipotizzato come una sfera di raggio a (tipicamente a è compreso fra 0.5 e 1 nm) in un liquido con viscosità dinamica η , uguagliando la forza di Coulomb alla forza viscosa si determina che la mobilità ionica k vale

$$k = \frac{e}{6\pi\eta a} \quad (2.1)$$

Tale espressione generalmente fornisce il giusto ordine di grandezza. Gli ioni guidati dal campo elettrico E si muovono verso gli elettrodi alla velocità $v=kE$. Sotto un campo elettrico uniforme il tempo necessario ad uno ione per attraversare l'intero gap g vale

$$t_g = \frac{g}{kE} \quad (2.2)$$

Nel caso l'isolante liquido venga caricato più a lungo del tempo di transito le cariche spaziali si possono depositare vicino alle superfici degli elettrodi, influenzando perciò il campo elettrico nella massa di liquido isolante e modificando i risultati delle misure.

In corrente continua l'energia di attivazione della conduzione è pari alla differenza di potenziale della barriera che separa le due posizioni di equilibrio, generalmente espressa in elettrovolt. La variazione della resistenza dell'isolamento può essere espressa secondo la legge di Arrhenius se il materiale non cambia intrinsecamente.

$$R_{dc}(T) = R_0 e^{\frac{\Delta H_{dc}}{kT}} \quad (2.3)$$

Con k costante di Boltzmann e T temperatura assoluta. La R_0 è una costante uguale alla resistenza in continua ad una temperatura infinitamente alta mentre $R_{dc}(T)$ è il corrispettivo valore di resistenza dc alla temperatura T . La pendenza del grafico del logaritmo della resistenza di isolamento in funzione dell'inverso della temperatura fornisce quindi l'energia di attivazione.

Per quanto riguarda la sperimentazione sono stati usati due elettrodi cilindrici cromati con una capacità di 23pF, un gap di 2,5mm ed un elettrodo di guardia. Per quanto riguarda la polarizzazione e la depolarizzazione tramite un computer è stato comandato lo strumento IDA200, adatto alla spettroscopia in frequenza. I campioni sono stati seccati a 100°C sottovuoto ad 1mbar per due giorni, successivamente impregnati con l'olio trattato nelle stesse condizioni. Per quanto riguarda l'invecchiamento termico esso è stato eseguito a 135°C in recipienti di vetro per 135, 500 e 2000 ore. Come catalizzatore sono stati usati 2,5 grammi/litro di ferro e rame e 0,5 grammi/litro di zinco ed alluminio. Il campione di olio estere utilizzato (Pentaeritritolo Triestere con diversi acidi grassi) è stato prelevato da un trasformatore di distribuzione. Per rendere più realistiche le condizioni di prova la cella è stata messa in forno per 6 ore prima di iniziare la misura ad una temperatura controllata in remoto con un'incertezza di 1°C. I risultati ottenuti nel dominio del tempo sono stati ottenuti tramite una polarizzazione da 2 secondi a 1000 s ed una depolarizzazione di altri 1000 secondi, il tutto alla temperatura controllata di 70°C.

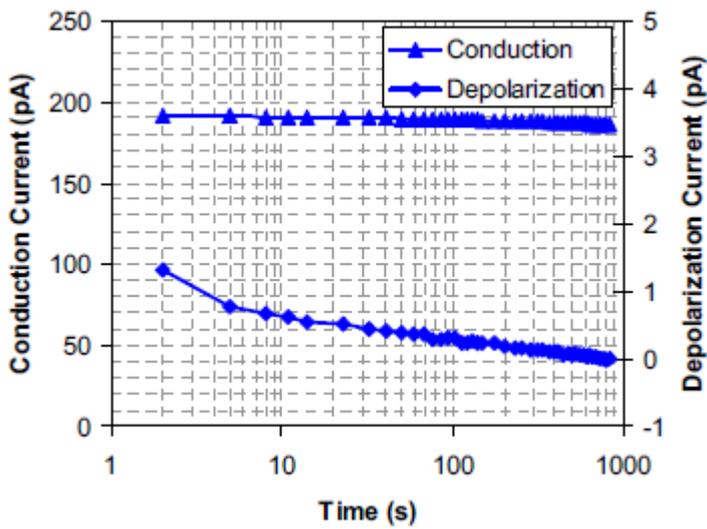


Figura 17: Rappresentazione della corrente di polarizzazione e depolarizzazione con un campo applicato di 4 V/mm

Nella figura di sopra è illustrato il comportamento del campione di estere invecchiato per 135 ore e sottoposto a 4 V/mm (ossia 10 V complessivamente).

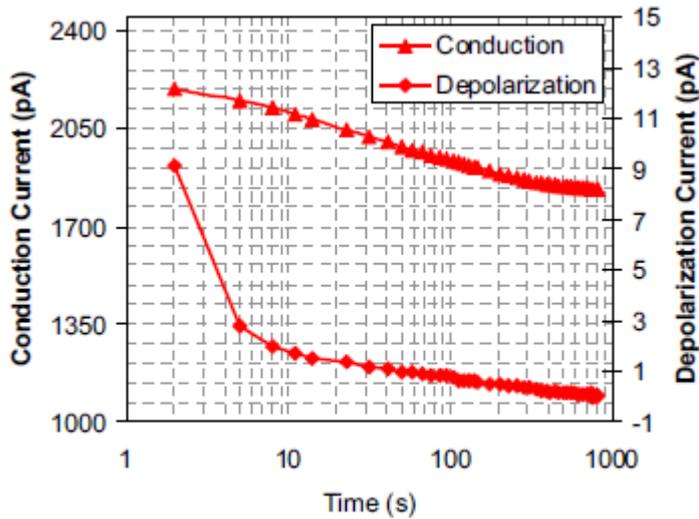


Figura 18: Rappresentazione della corrente di polarizzazione e depolarizzazione con un campo applicato di 40 V/mm

In questa figura invece è illustrato il comportamento di un campione di olio invecchiato 135 ore ma sottoposto ad un campo di 40 V/mm.

Per gli oli isolanti e durante il periodo di polarizzazione la corrente di conduzione è significativamente più alta della corrente di polarizzazione. Siccome le due correnti non possono

essere misurate separatamente si assume che la corrente misurata sia totalmente la corrente per conduzione.

Il decremento di essa è dovuto al calare dei portatori di carica e alla polarizzazione della carica spaziale. Mentre la carica spaziale aumenta il campo elettrico nell'isolante diminuisce e come conseguenza la corrente di conduzione cala.

Nella seguente figura viene invece mostrato un confronto fra la corrente di polarizzazione del campione invecchiato 500 ore e di quello invecchiato 2000.

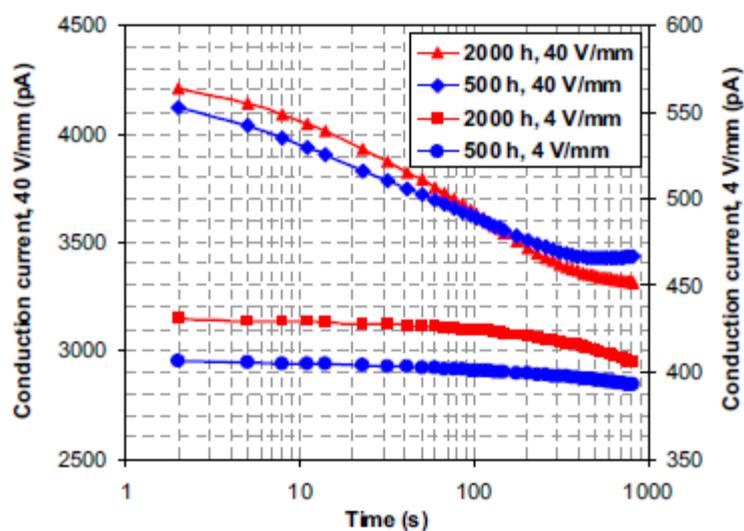


Figura 19: Rappresentazione della corrente di polarizzazione e depolarizzazione con un campo applicato di 40 V/mm e tempi di invecchiamento diversi

Si nota che l'errore del modello RC in parallelo è più basso per campi elettrici minori. Il campione invecchiato maggiormente mostra una maggiore diminuzione della corrente di conduzione, fenomeno dovuto alle cariche spaziali in quanto la loro polarizzazione può ridurre il campo elettrico nell'isolante.

Per quanto riguarda le misure nel dominio della frequenza esse sono state effettuate a temperatura ambiente. C'' , ossia la parte immaginaria della capacità, è lineare con pendenza -1 su una scala doppio-logaritmica motivo per cui il meccanismo di conduzione non varia significativamente nel range di frequenze osservato.

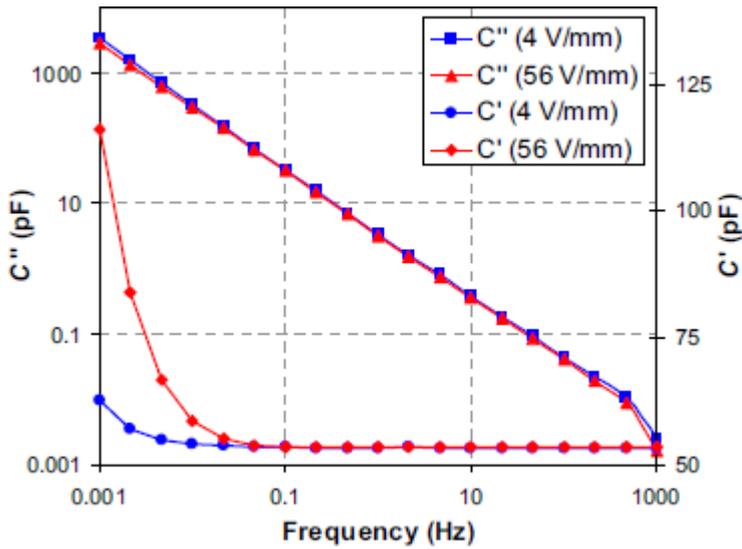


Figura 20: Rappresentazione della parte reale e di quella immaginaria della capacità

Applicando una tensione continua si osservano la corrente di conduzione e quella di depolarizzazione, nettamente più piccola. Essa è dovuta alla polarizzazione della carica spaziale sulle superfici degli elettrodi.

Per le misure delle capacità ad alte frequenze è preferibile misurare la carica invece della corrente, anche se ciò è più difficile a causa dell'elevato valore di corrente di conduzione rispetto a quella di polarizzazione.

L'aumento della capacità a basse frequenze dimostra che il modello RC in parallelo non è molto valido per rappresentare il comportamento di un dielettrico liquido a basse frequenze. Applicando bassi campi elettrici la variazione della capacità è molto piccola e quindi è bene eseguire la spettroscopia col minore campo elettrico possibile. Nel caso le prove vengano eseguite con lo stesso valore di campo elettrico bisogna valutare se considerare gli effetti dovuti alla polarizzazione della carica spaziale. Ciò si può fare ad esempio considerando la variazione in valore relativo della capacità

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{C_{0.001Hz} - C_{1000Hz}}{C_{1000Hz}} \quad (2.4)$$

Nella figura sottostante vengono illustrate le variazioni della capacità e del fattore di perdita a 50Hz per vari valori di campo elettrico.

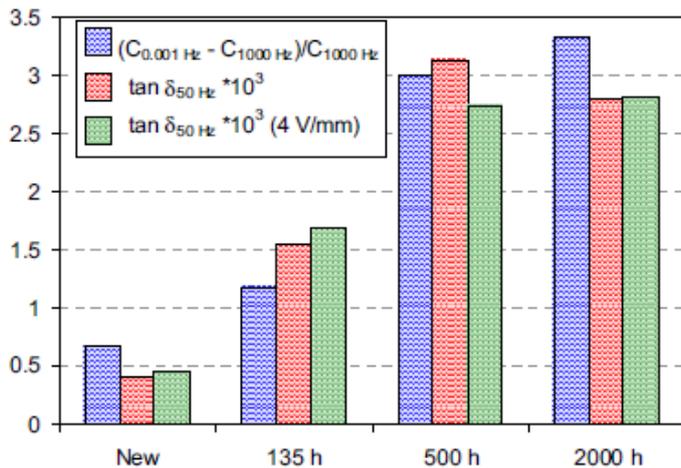


Figura 21: Rappresentazione della variazione di capacità e fattore di perdita in funzione dell'invecchiamento

La variazione relativa è stata calcolata applicando un campo elettrico di 56 V/mm. Si nota che la variazione relativa del fattore di perdita dell'olio invecchiato 500 ore è modesta rispetto a quello invecchiato 2000.

La corrente di conduzione negli isolanti liquidi è funzione della concentrazione dei portatori di carica e della loro mobilità. Durante l'invecchiamento la viscosità dinamica del liquido aumenta e la mobilità dei portatori di carica diminuisce, fatto che comporta la diminuzione del fattore di perdita con l'invecchiamento.

Per quanto riguarda l'andamento di C' e C'' il seguente grafico illustra il loro andamento grazie ad una misura effettuata a temperatura ambiente su un provino di estere.

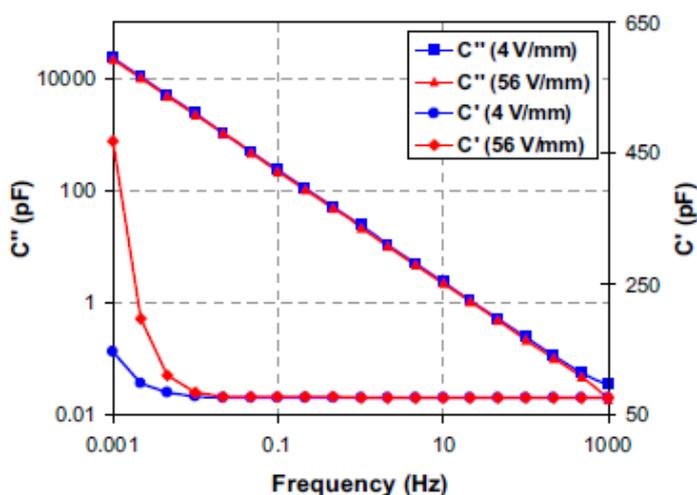


Figura 22: Rappresentazione della parte reale e di quella immaginaria della capacità in base al campo elettrico applicato

L'influenza della temperatura sulla risposta dielettrica può essere spiegata come uno spostamento in direzione dell'asse x ed uno spostamento in direzione dell'asse y. Molti materiali godono della proprietà tale per cui la funzione di risposta dielettrica a varie temperature si può ricondurre ad una curva master. Un semplice esempio di tale curva si ha per la suscettibilità elettrica, la quale trasla in frequenza ma non in ampiezza alle varie variazioni di temperatura. I vari cambiamenti sono dovute a delle energie di attivazione.

Negli isolanti liquidi all'aumentare della temperatura la viscosità diminuisce mentre il contenuto di ioni ed il fattore di perdita aumentano, come illustrato in figura.

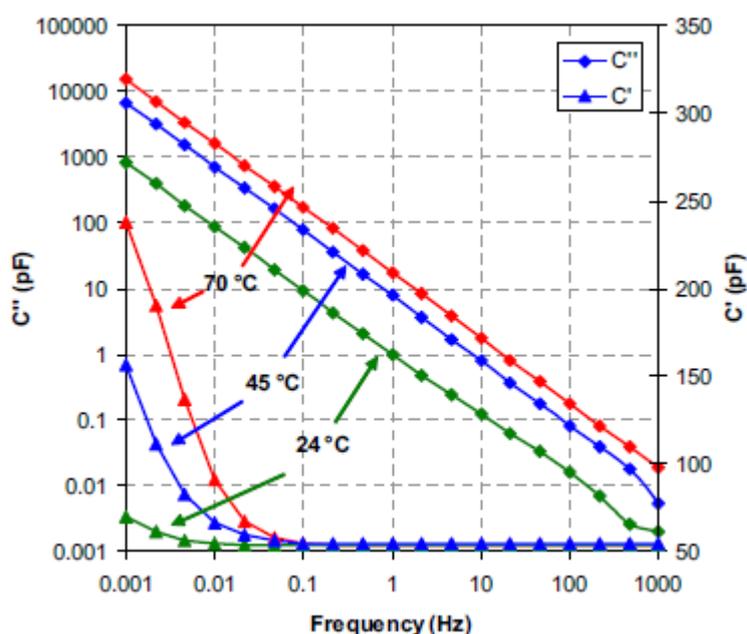


Figura 23: Rappresentazione della parte reale e di quella immaginaria della capacità al variare della temperatura

2.4 ERRORI COMMESSI NELLA SPETTROSCOPIA

Applicando una tensione alternata ad un dielettrico la corrente sarà data dalla somma di due componenti, la corrente di carica e la corrente cosiddetta di perdita, entrambe legate alla permittività complessa del materiale come visto in precedenza.

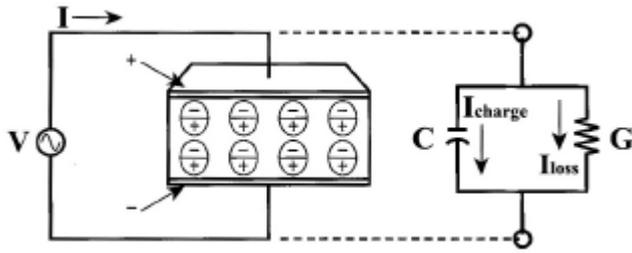


Figura 24: Schematizzazione di un circuito di prova

Facendo riferimento alla figura di sopra, la corrente di carica è quella che attraversa la capacità mentre la corrente di perdita quella che passa per la conduttanza.

Scriviamo quindi la corrente totale come

$$I = I_{charge} + I_{loss} = V(j\omega C + G) \quad (2.5)$$

Con C la capacità del materiale analizzato fra gli elettrodi e C_0 la capacità a vuoto.

Ponendo $C = \epsilon_r' C_0$ e $G = \omega C_0 \epsilon_r''$ la corrente totale può essere riscritta come segue

$$I = V(j\omega C_0 \epsilon_r' + \omega C_0 \epsilon_r'') = V(j\omega C_0)(\epsilon_r' - j\epsilon_r'') = V(j\omega C_0) \epsilon_r^* \quad (2.6)$$

Con $\epsilon_r^* = (\epsilon_r' - j\epsilon_r'')$ e $\epsilon_r^* = \epsilon' / \epsilon_0$

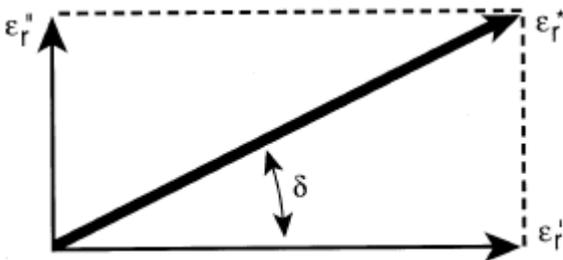


Figura 25: Schematizzazione delle componenti della permittività

Nel caso il materiale trattato abbia bassissime perdite, come ad esempio gli oli usati nei trasformatori di potenza, il vettore $\epsilon_r^* \rightarrow \epsilon_r'$ e $\tan \delta$ tende a zero (positivo).

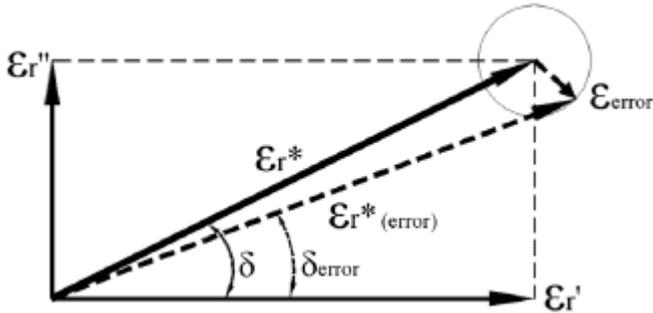


Figura 26: Schematizzazione dell'errore commesso

Tuttavia se $|\epsilon_{\text{error}}|$ del provino diventa maggiore di $|\epsilon_r''|$ l'angolo δ diventa negativo e quindi anche la sua tangente assume un valore negativo. Questo diventa quindi un parametro critico per la scelta dei vari sensori di misura per oli. La geometria del sensore ed il materiale di cui è composto dovranno quindi intensificare la componente di corrente di perdita per avere una maggiore precisione nella misura in frequenza.

Si può affermare perciò che la permittività complessa dipende sia dalla frequenza che dalla temperatura, ossia per frequenze relativamente basse, ossia inferiori ad 1MHz, le polarizzazioni dominanti sono quella ionica e quella molecolare. Un aumento di temperatura del materiale invece provoca un aumento delle perdite e favorisce i trasporti di carica, sfavorendo le proprietà dielettriche del materiale.

2.5 INFLUENZA DELLE TEMPERATURE SULLE MISURE

Sfruttando una tecnica mista di investigazione, ossia una spettroscopia dielettrica con dipendenza dalle temperature, si ottiene un valido strumento per conoscere lo stato dell'isolante.

Per avere un range piuttosto ampio di temperature le prove sono state eseguite a quattro diverse temperature: 20, 40, 60 e 80°C.

In base al loro comportamento gli oli analizzati sono stati divisi in tre gruppi:

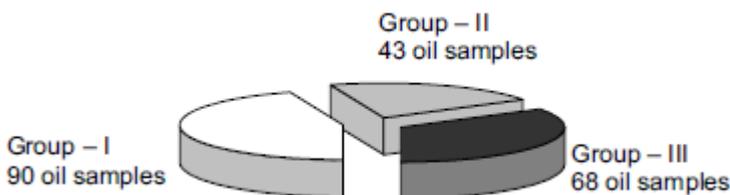


Figura 27: Suddivisione degli oli in base al loro comportamento

- Gruppo 1: Sono i liquidi altamente isolanti. Essi sono caratterizzati da un fattore di dissipazione estremamente basso per ogni valore di frequenza e temperatura, permittività stabile ad ogni valore di temperatura ed una dipendenza del fattore di dissipazione dalla temperatura.

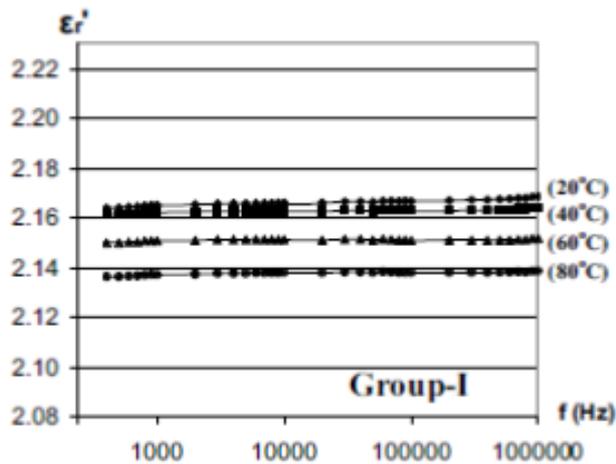


Figura 28: Rappresentazione di ϵ_r' al variare della temperatura

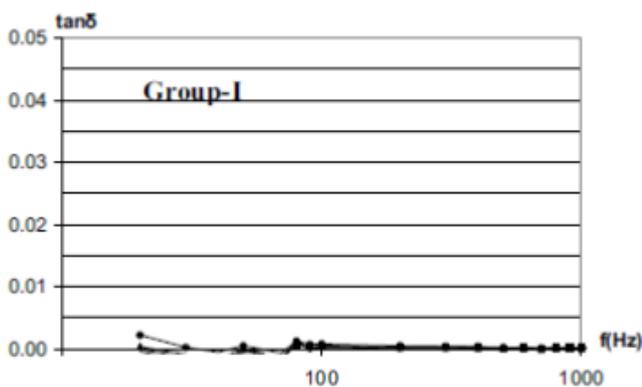


Figura 29: Rappresentazione di $\tan\delta$ al variare della temperatura

- Gruppo 2: Isolanti liquidi con basse perdite. Essi possiedono un lieve disturbo per alcune proprietà dielettriche ed un valore del fattore di dissipazione più elevato dei precedenti. Inoltre essi sono caratterizzati da una stabilità termica minore ed una dipendenza del fattore di dissipazione dalla temperatura inferiore rispetto ai precedenti.

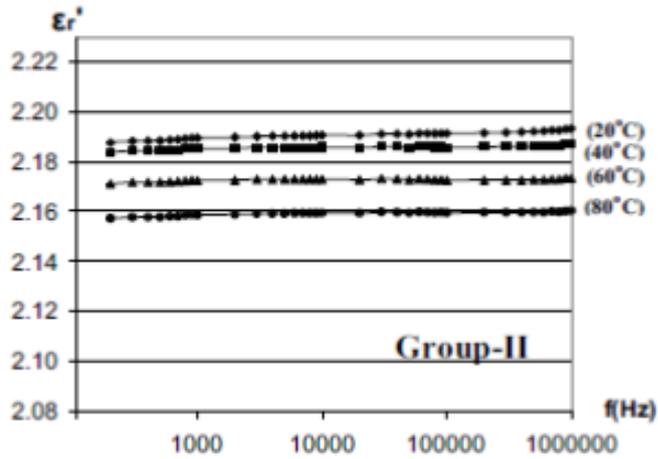


Figura 30: Rappresentazione di ϵ_r' al variare della temperatura

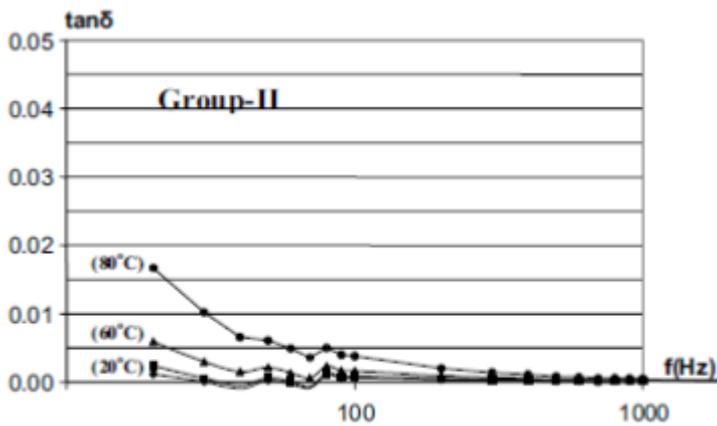


Figura 31: Rappresentazione di $\tan\delta$ al variare della temperatura

- Gruppo 3: essi possiedono elevate perdite e instabilità termica. Sono caratterizzati inoltre da un fattore di dissipazione più accentuato ed un'instabilità termica delle caratteristiche dielettriche notevole. Ad ogni modo essi non dovrebbero essere impiegati senza un adeguato trattamento oppure delle ispezioni più approfondite.

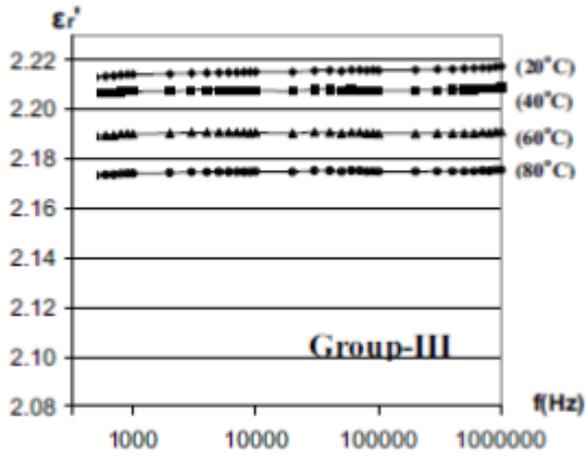


Figura 32: Rappresentazione di ϵ_r' al variare della temperatura

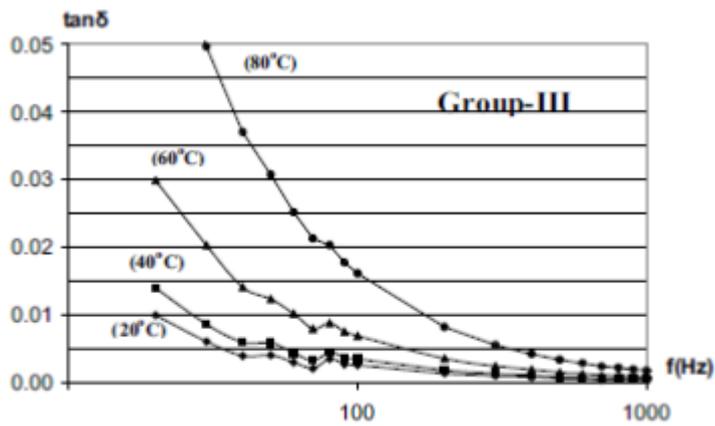


Figura 33: Rappresentazione di $\tan\delta$ al variare della temperatura

La diminuzione della permittività può essere attribuita ai processi di depolarizzazione causati dalla temperatura ed al fatto che un aumento della temperatura può stimolare delle correnti nel liquido favorite da particelle cariche sospese in esso o da altri contaminanti.

CAPITOLO 3: COSTRUZIONE SISTEMA DI CONTROLLO

3.1 NORMA CEI 10-9:1997-09

La norma CEI 10-9 definisce le condizioni di prova per le prove in temperatura delle caratteristiche degli isolanti liquidi.

Nella sezione A4 della norma viene definita l'apparecchiatura da utilizzare, in particolare la cella di prova, l'ambiente di prova, la vetreria ed i dispositivi di misura.

- Cella di prova: si deve usare “una cella idonea per tutte queste applicazioni deve soddisfare alle seguenti prescrizioni generali:
 - 1) la cella deve essere progettata in modo da poter essere facilmente smontata per permettere la pulizia di tutte le sue parti e rimontata senza modificare in modo significativo la capacità della cella vuota. Inoltre deve essere studiata in modo da poter essere posta in un bagno o in una stufa mantenuta ad una opportuna temperatura costante e che la temperatura dell'elettrodo interno possa essere misurata;
 - 2) i materiali utilizzati per la costruzione della cella non devono essere porosi e devono poter resistere in modo soddisfacente alle temperature richieste. La centratura degli elettrodi non deve essere influenzata da una variazione di temperatura;
 - 3) la superficie degli elettrodi in contatto con il liquido in prova deve avere una finitura speculare per facilitare la pulizia. Non si deve avere alcuna interazione chimica fra il liquido in prova e gli elettrodi. Questi non devono essere deteriorati dai prodotti impiegati per la pulizia. Le celle di acciaio inossidabile si sono dimostrate soddisfacenti per qualsiasi tipo di liquido isolante. L'alluminio e le sue leghe non possono essere utilizzati perché possono essere attaccati da detergenti alcalini.
 - 4) i materiali isolanti solidi utilizzati per sostenere gli elettrodi devono avere un debole fattore di dissipazione e una alta resistività. Essi non devono assorbire o essere alterati dai liquidi di taratura, di prova e dai prodotti usati per la pulizia.
 - 5) la distanza fra l'elettrodo di guardia e l'elettrodo di misura lungo la superficie del liquido e dell'isolamento solido deve essere sufficiente per resistere alla tensione di prova utilizzata “ [norma CEI 10-9 sezione A4.1]

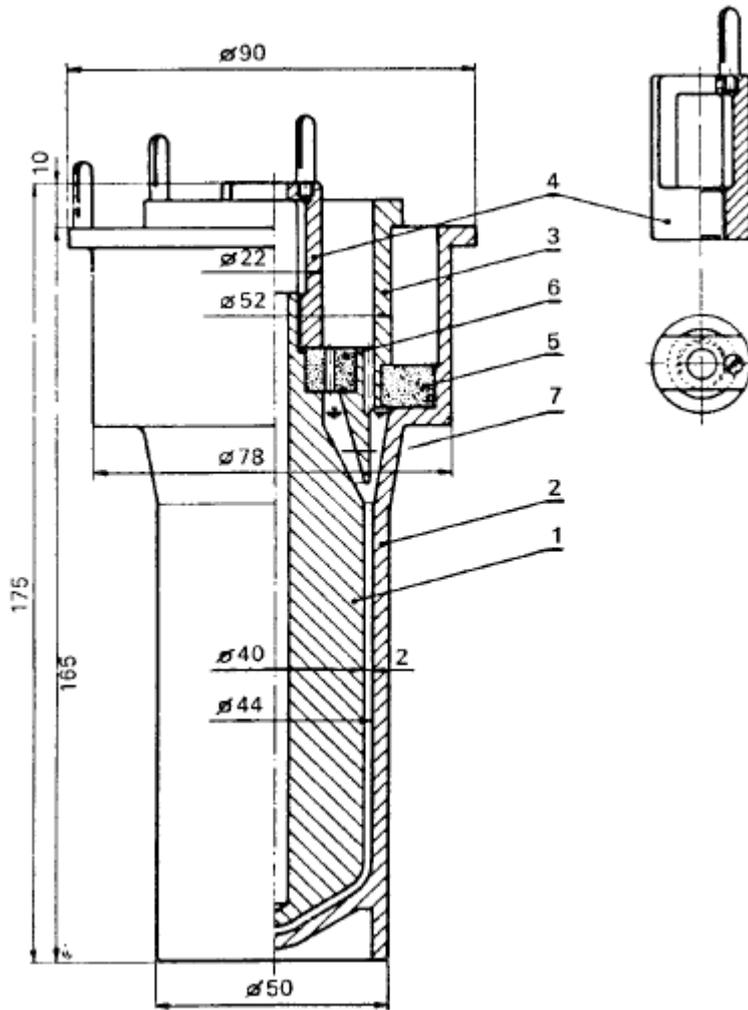
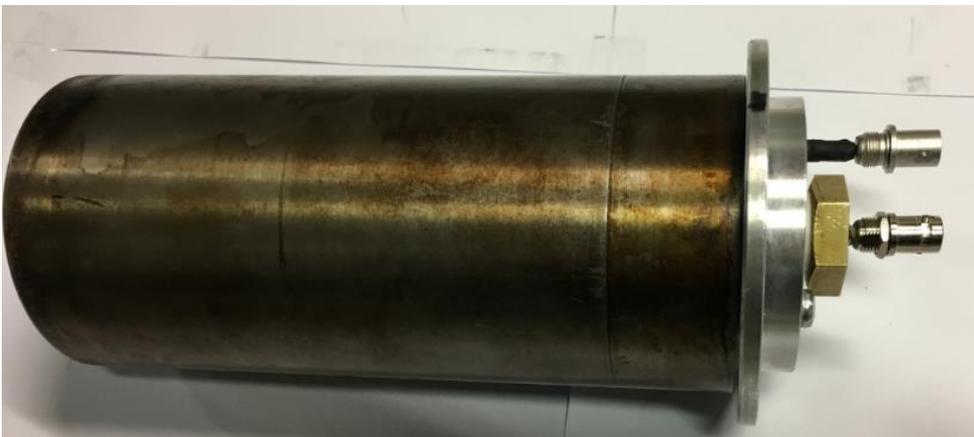


Figura 34: Rappresentazione in sezione della cella secondo la norma CEI

La cella di prova utilizzata è la seguente:



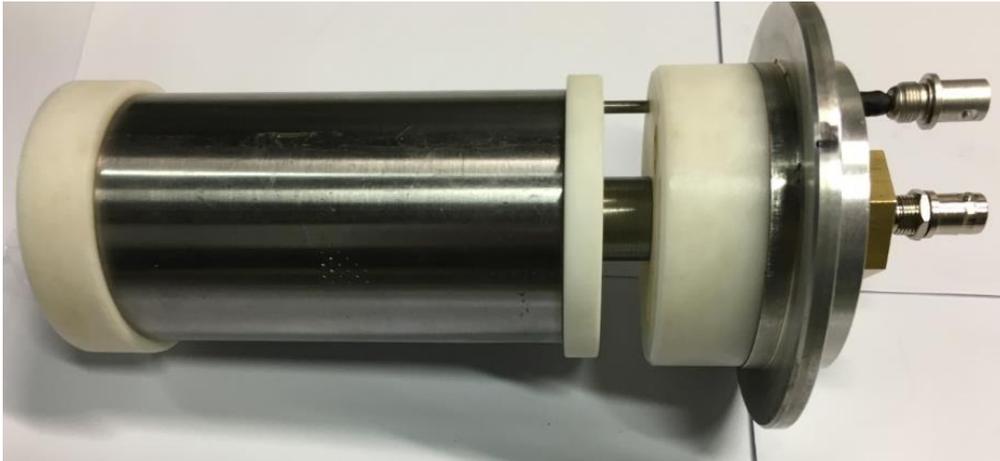


Figure 35 e 36: Cella utilizzata per le prove

- Ambiente di prova: la norma prescrive un ambiente di prova controllato, ad esempio una stufa a circolazione d'aria. L'ambiente di prova utilizzato invece è un sistema di riscaldamento controllabile in remoto, come descritto nel prossimo paragrafo.
- Vetreria di prova: come suggerito dalla norma, l'intera vetreria utilizzata è in vetro borosilicato.
- Dispositivo di misura della permittività: è stato utilizzato l'Alpha Beta Analyzer con un software implementato nell'ambiente di programmazione LabView, ampiamente descritto nei paragrafi successivi.

La norma definisce anche i vari metodi di pulizia della cella e dell'ambiente di prova o di lavoro. Nel caso si vogliano eseguire delle prove di routine invece l'appendice A della norma descrive le varie procedure alternative.

3.2 REALIZZAZIONE DEL SISTEMA DI TEMPERATURA DELLA CELLA

A partire dalla cella di misura disponibile, alla quale sono stati apportati un paio di miglioramenti, è stato pensato di realizzare un sistema di controllo della temperatura in modo da evitare di dover usare un forno ventilato per le varie prove. Si è giunti quindi alla conclusione che il sistema più ottimizzato fosse quello di realizzare attorno alla cella un contenitore in alluminio da scaldare tramite un generatore di potenza, il tutto isolato termicamente attraverso un contenitore esterno in teflon.

Sulla superficie esterna è stata applicata una filettatura in modo da avvolgere un doppio strato di rame avente lo scopo di scaldare il contenitore in alluminio grazie all'effetto Joule.

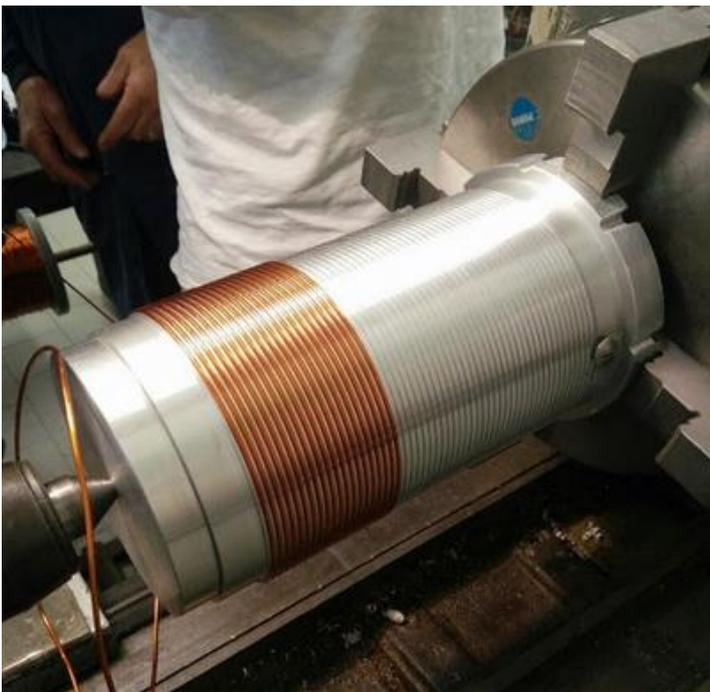


Figure 39 e 40: Dettagli sulle lavorazioni eseguite sul contenitore in alluminio



Figura 41: Contenitore in alluminio con avvolgimento in rame

Successivamente è stato realizzato il contenitore in teflon in modo da immergere dentro di esso il contenitore in alluminio e attorno alle spire dell'olio, con lo scopo di uniformare il calore.

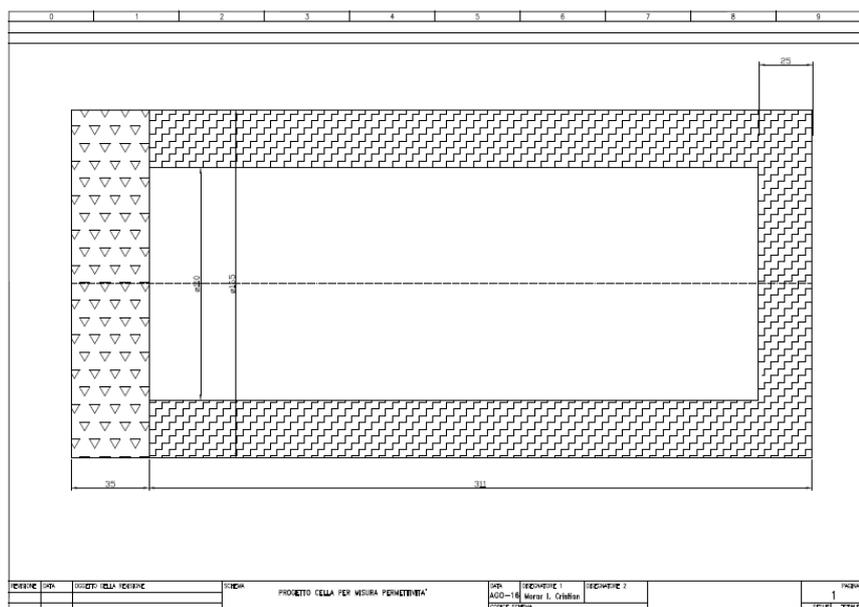


Figura 42: Progetto in AutoCad del contenitore in teflon

3.3 PROGRAMMA LABVIEW

Per la parte di controllo si è deciso di implementare un programma in ambiente di programmazione LabView, in modo da poter controllare sia la parte di riscaldamento e mantenimento temperatura della prova che lo strumento di misura tramite lo stesso software. Tale opzione ha reso possibile quindi inserire tutti i dati in un pannello da controllo senza dover aprire vari programmi e necessitare della presenza fisica di un operatore per le varie operazioni di commutazione fra essi.

Spiegare tutto il programma realizzato in LabView risulterebbe complicato in quanto composto da tantissimi blocchi e sottoblocchi, e per alcuni versi anche privo di significato in quanto il lettore necessiterebbe di un'adeguata conoscenza dell'ambiente di programmazione. Per queste ragioni saranno illustrati brevemente i blocchi più rilevanti e successivamente una breve guida su come usare il programma in completa autonomia.

La prima parte riguarda il controllo della temperatura della cella ossia come comandare il generatore di potenza che riscalda le spire e come controllare la temperatura dell'olio di prova. Essa è costituita da tre scenari, il primo ossia lo scenario di inizializzazione, lo scenario di start e quello di stop.

Ecco una breve illustrazione dello scenario di inizializzazione, esso ha fra le funzioni principali quella di scegliere il range di frequenze nel quale fare la misura, definire il numero di punti M in cui suddividere tale intervallo e quindi creare l'array di frequenze.

In questo scenario vengono definite anche le temperature alle quali si vogliono eseguire le varie prove.

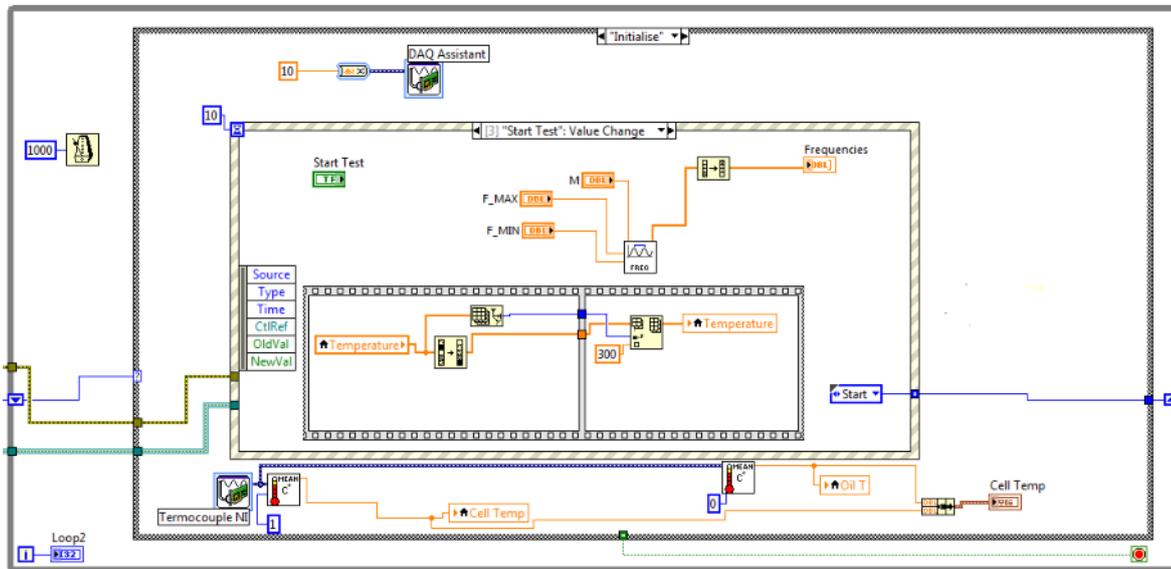


Figura 46: Dettaglio della schermata di start ed inizializzazione temperatura

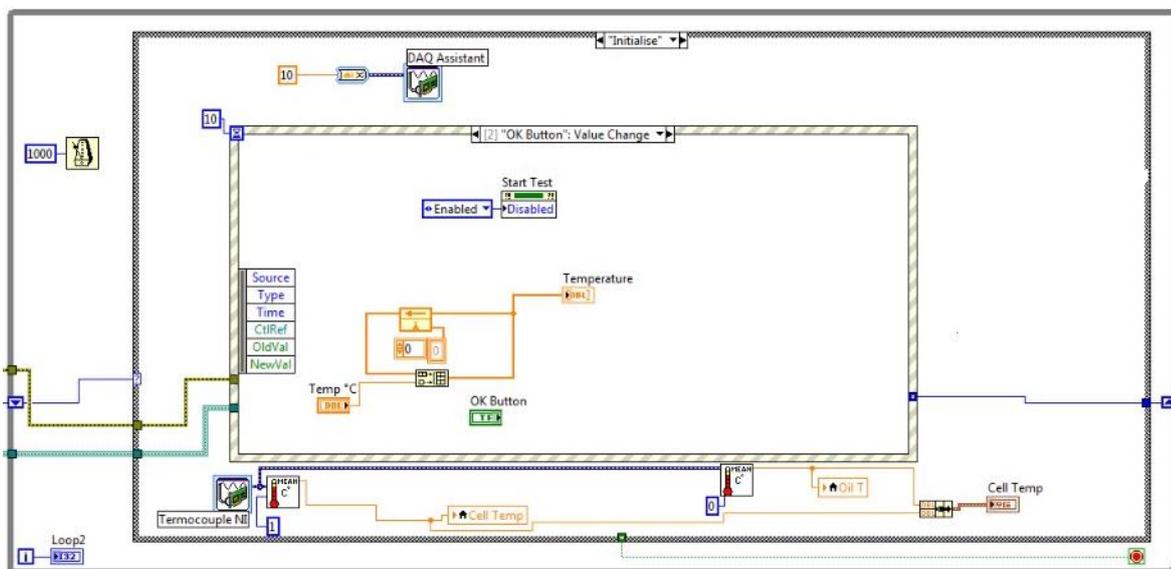


Figura 47: Dettaglio della schermata di start con array di temperature

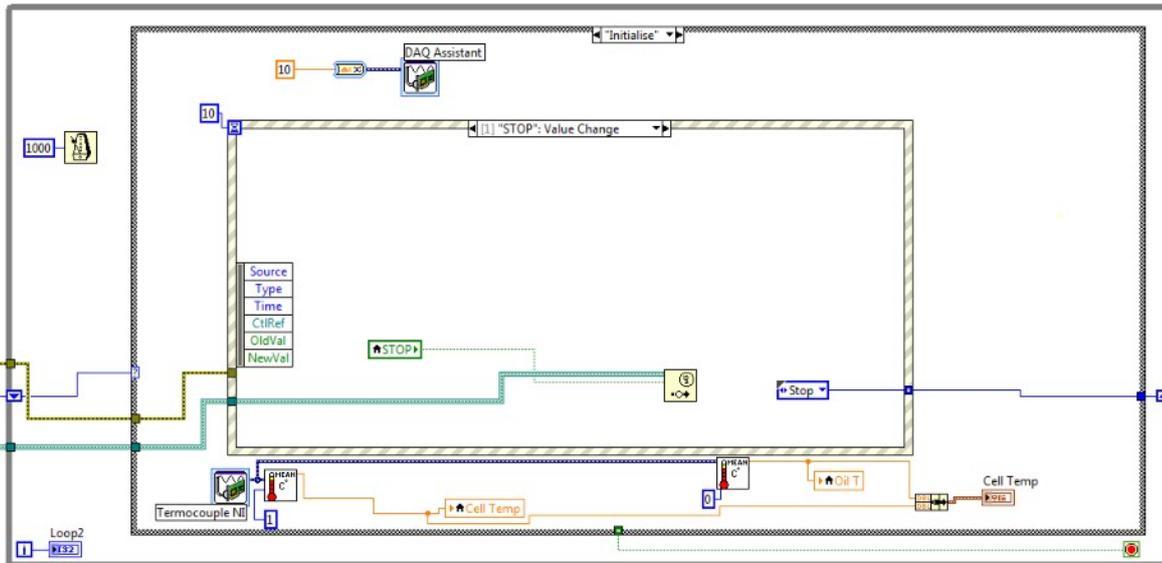


Figura 48: Dettaglio della schermata di stop

Il blocco di start avvia il generatore di potenza e gli fa erogare una potenza proporzionale alla differenza di temperatura fra quella imposta dall'utente e la temperatura attuale. La temperatura della cella viene rilevata tramite due termocoppie, una immersa nell'olio della cella ed una nell'olio che ricopre le spire avvolte sull'alluminio.

Per sicurezza è stato implementato anche un sistema di arresto nel caso la temperatura del sistema superasse i 150°C, evidenziato anche nella figura seguente.

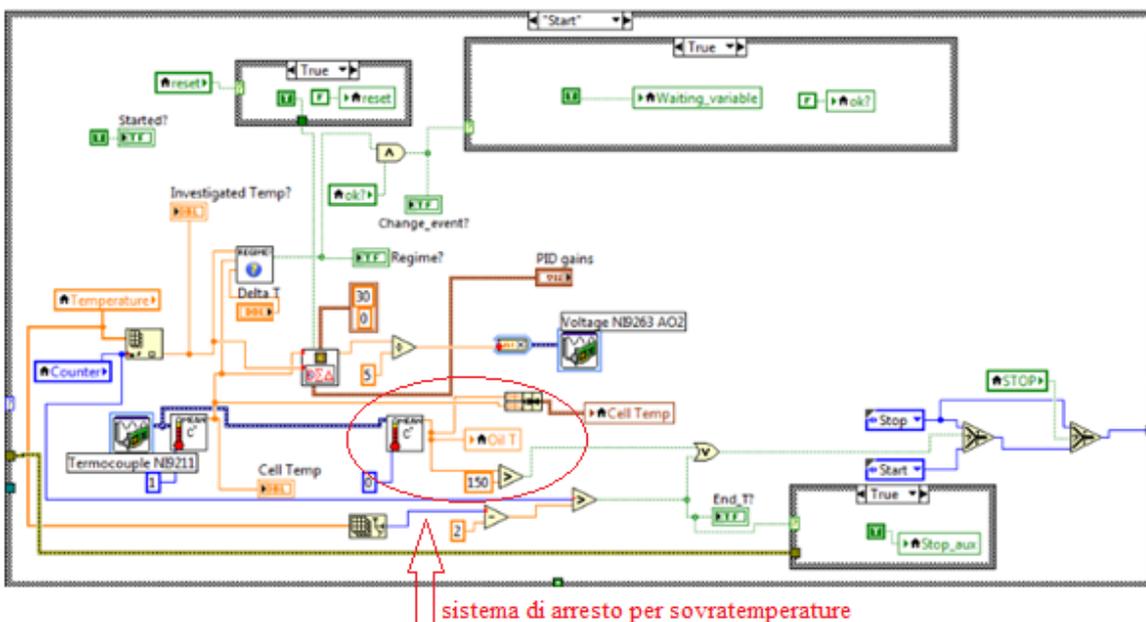


Figura 49: Schermata di start del programma di misura

Per quanto riguarda lo stop, esso può essere attivato manualmente premendo sull'apposito bottone di stop sul front panel, quando la temperatura è arrivata a regime o quando è stato raggiunto l'ultimo valore di temperatura desiderato.

Passiamo ora alla parte del programma che gestisce la misura, ossia quella che comanda l'Alpha Beta Analyzer.

Anche essa, per semplicità di realizzazione e ragionamento, è stata suddivisa in tre scenari: timeout, start e stop.

Nella parte di timeout vengono inizializzati tutti i settaggi dello strumento di misura, in particolare i comandi:

- *IDN? Viene inviato un comando allo strumento per chiedere se è connesso
- RST viene fatto un reset di tutte le impostazioni precedenti dello strumento, rendendolo pronto per la misura
- MODE=IMP lo strumento viene settato in modalità impedenza, quella utile per le nostre prove
- ACV= definisce l'ampiezza della tensione del generatore AC, bisogna inserire un valore compreso tra 0V e 3 V

Nella parte di start sono stati implementati i comandi di misura, ossia:

- GFR= tale comando definisce la frequenza alla quale eseguire la misura, varia da $3e-6$ a $2e7$ Hz
- MST è il comando di trigger della misura
- ZCPRE? Fornisce il risultato della misura di impedenza in termini di capacità parallelo complessa, ossia la parte reale della capacità parallelo, la parte immaginaria e la frequenza alla quale sono state misurate
- ZCRRE? Fornisce il risultato della misura di impedenza in termini di un circuito RC parallelo, ossia la capacità C_p del circuito, la resistenza R_p e la frequenza alla quale sono stati misurati

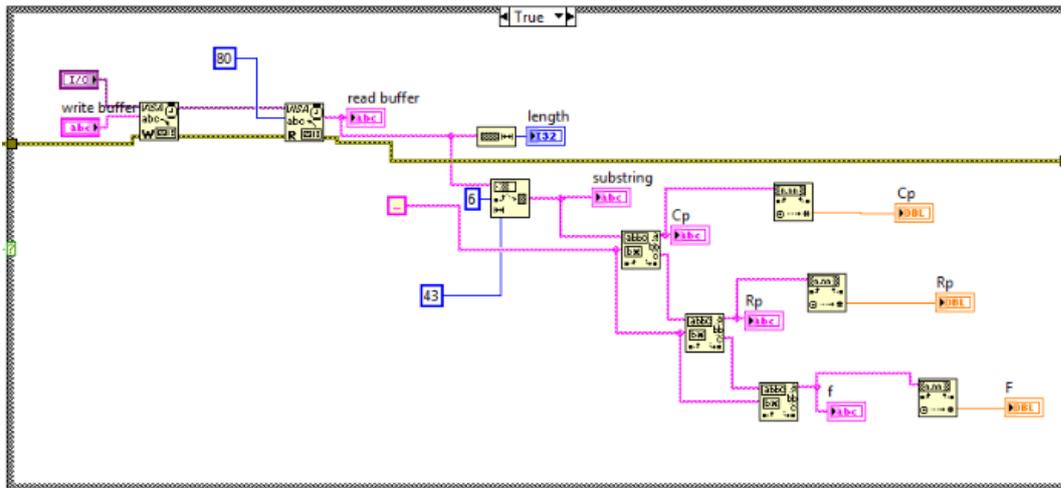


Figura 50: Dettaglio della schermata di elaborazione dati forniti dallo strumento di misura

Partendo da tali risultati tramite alcune semplici operazioni si sono determinati i valori di $\tan \delta$, ϵ' e ϵ'' ed i valori di frequenza ai quali sono stati determinati, il tutto con lo scopo di salvare i vari dati in opportuni fogli di calcolo.

Nel caso un utente esterno debba usare tale programma lo potrà fare dal front panel, estremamente facile ed intuitivo da usare.

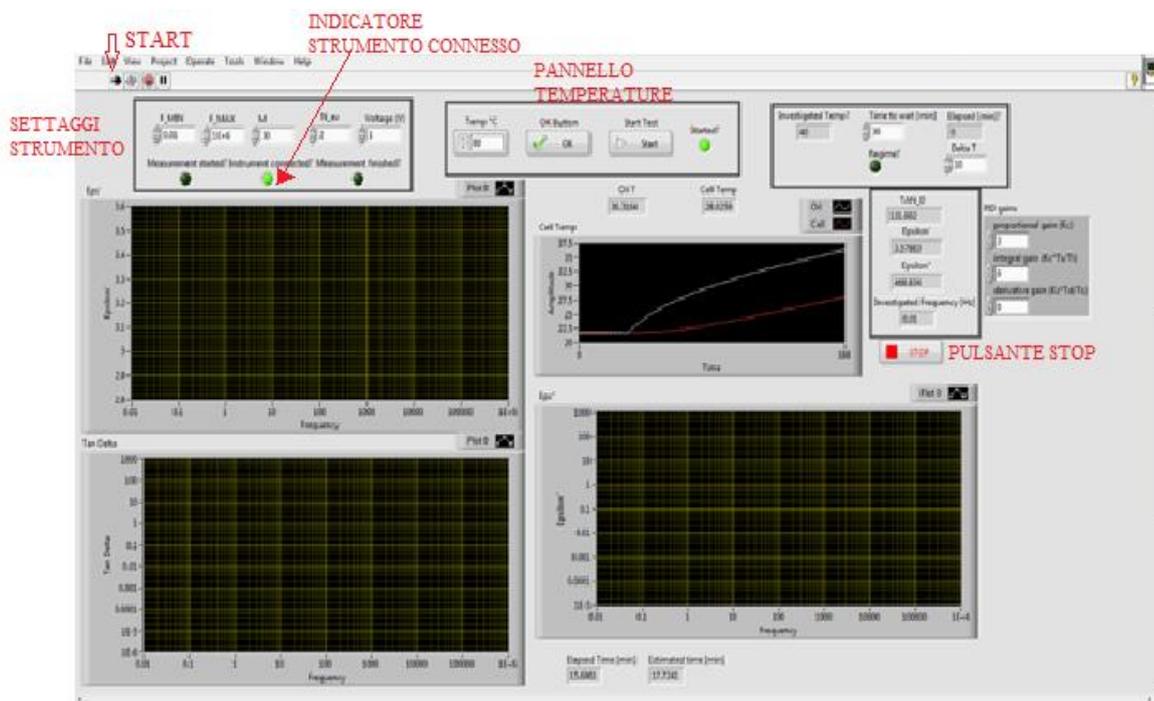


Figura 52: Pannello di controllo su LabView

La prima cosa da fare dopo aver fatto i vari collegamenti fisici della cella allo strumento di misura ed al generatore di potenza è avviare il programma, ossia cliccare sulla freccia bianca in alto a sinistra. Facendo ciò il programma si avvia ed in automatico si dovrebbe accendere il led verde che ci avverte che lo strumento è connesso.

Nel primo riquadro in alto a sinistra ci sono i vari settaggi per lo strumento. Bisogna inserire la frequenza minima e quella massima alle quali si vogliono eseguire le misure, il numero di punti in cui suddividere tale intervallo ed il numero di scansioni per ogni valore di frequenza. Come compromesso fra il possibile errore di una misura ed il tempo di scansione si suggerisce di impostare tale valore a 2.

Nel pannello successivo vanno inseriti i vari valori di temperatura a cui si desiderano eseguire le prove. Si immette il primo valore, si spinge ok, dopo qualche secondo si colora anche il pulsante di start il che significa che tale valore è stato acquisito. Procedere in questo modo anche per gli altri valori di temperatura ed una volta inserito ed acquisito anche l'ultimo valore premere start per iniziare la prova.

Nel grafico della temperatura verranno visualizzati i valori di temperatura delle due termocoppie. Appena il valore di temperatura della termocoppia immersa nell'olio di prova sarà ad un valore di

temperatura prossimo al valore desiderato con un errore di 10 gradi si attiverà un counter di regime, generalmente il tempo ottimale emerso dalle prove per esso varia fra i 30 ed i 40 minuti. Lo scopo di tale tempo è quello di stabilizzare l'equilibrio termico fra i due oli in modo da creare una situazione di regime. Quando il counter giunge al termine viene avviata la misura in frequenza.

Nei tre grafici verranno visualizzati i vari valori , mano a mano che lo strumento esegue la misura. Quando essa si conclude i vari dati vengono salvati in automatico in un foglio di calcolo elettronico ed il sistema passa alla prova successiva.

Nel caso si voglia fermare una prova premere il pulsante rosso di stop.

CAPITOLO 4: PROVE PER COLLAUDO SISTEMA

4.1 MECCANISMI DI INVECCHIAMENTO

Il processo di invecchiamento dell'olio vegetale è dovuto all'ossidazione dei legami insaturi a causa di uno stress termico. Tale processo può avvenire per idrolisi, ossidazione oppure polimerizzazione. L'idrolisi è il processo opposto a quello che crea un olio estere, ossia in presenza di acqua si ha la formazione di molecole estere e acidi grassi.

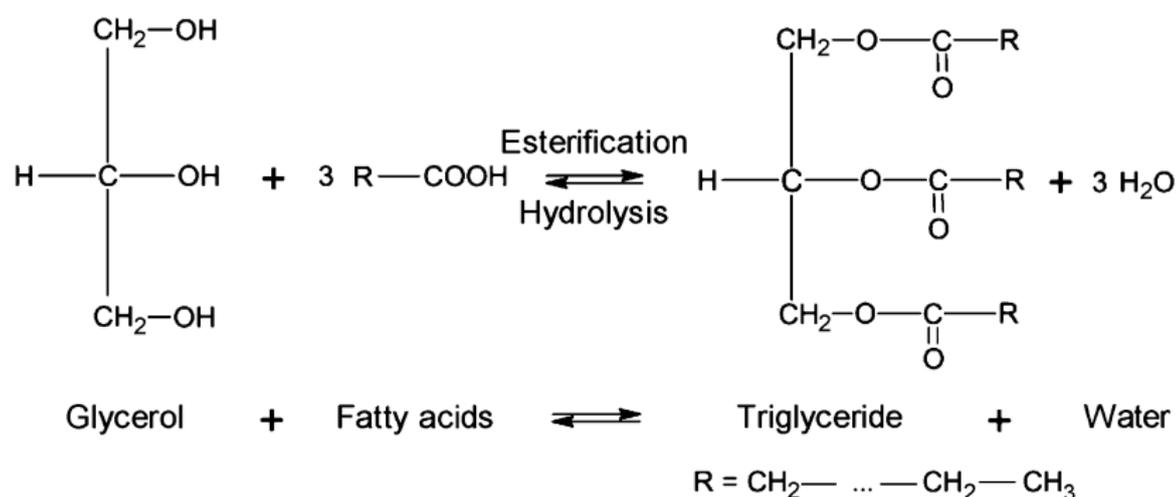


Figura 53: Reazione di idrolisi

Durante tale processo le molecole di estere si allontanano dai legami C-O. Si tratta di una reazione autocatalitica in quanto gli acidi grassi stessi accelerano il processo di idrolisi. Altri fattori che favoriscono la reazione sono la presenza di acqua, l'aumento di temperatura oppure la presenza di metalli sciolti nell'olio.

L'ossidazione è dovuta all'azione dell'ossigeno sui legami doppi del carbonio in quanto disgrega il trigliceride e porta alla separazione di alcune parti dell'acido grasso.

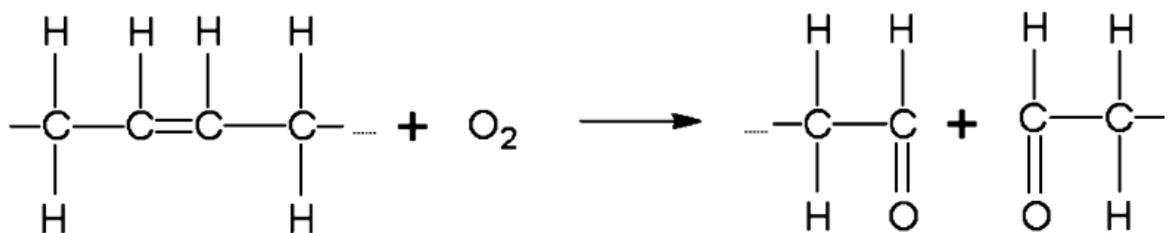


Figura 54: Reazione di ossidazione

La stabilità dell'olio dipende dal numero di legami doppi (acidi grassi insaturi), più essi sono meno è stabile l'olio. Una elevata percentuale di acidi grassi insaturi tuttavia rende più stabile l'olio a contatto con l'aria.

4.2 ALLESTIMENTO DELLE PROVE

Per collaudare il sistema è stato deciso di eseguire 6 prove a diverse temperature: 40, 60 e 80°C.

Per rendere i campioni più significativi si è deciso di utilizzarle l'olio estere NOMEX 970 FLD DUPONT in 6 diversi stati:

- Allo stato naturale deumidificato
- Allo stato naturale con un'umidità di 300 ppm
- Invecchiato una settimana in forno controllato a 150°C e successivamente deumidificato
- Invecchiato una settimana in forno controllato a 150°C con un'umidità di 300 ppm
- Invecchiato due settimane in forno controllato a 150°C e successivamente deumidificato
- Invecchiato due settimane in forno controllato a 150°C con un'umidità di 300 ppm

Per le operazioni di deumidificazione il campione di olio è stato sottoposto all'azione della pompa per il sottovuoto per 12 ore.

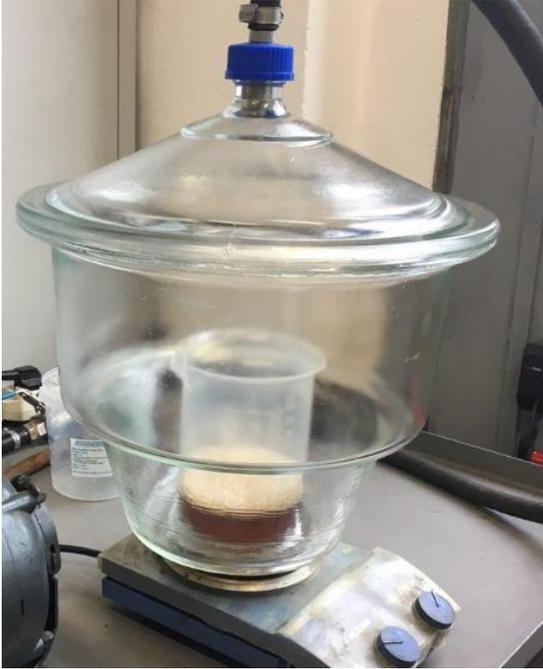
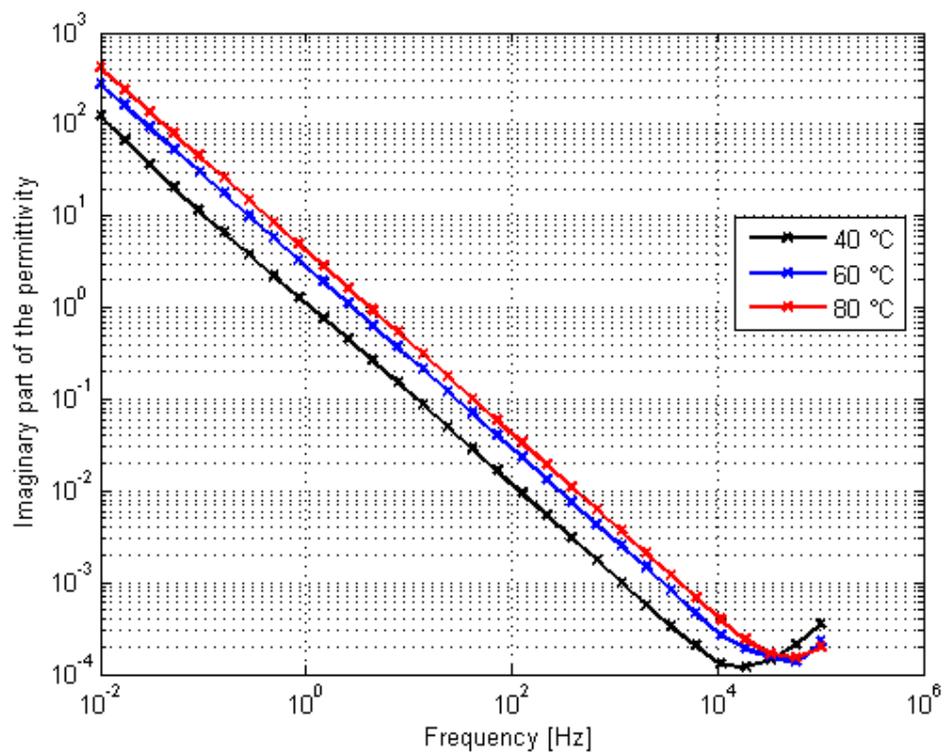
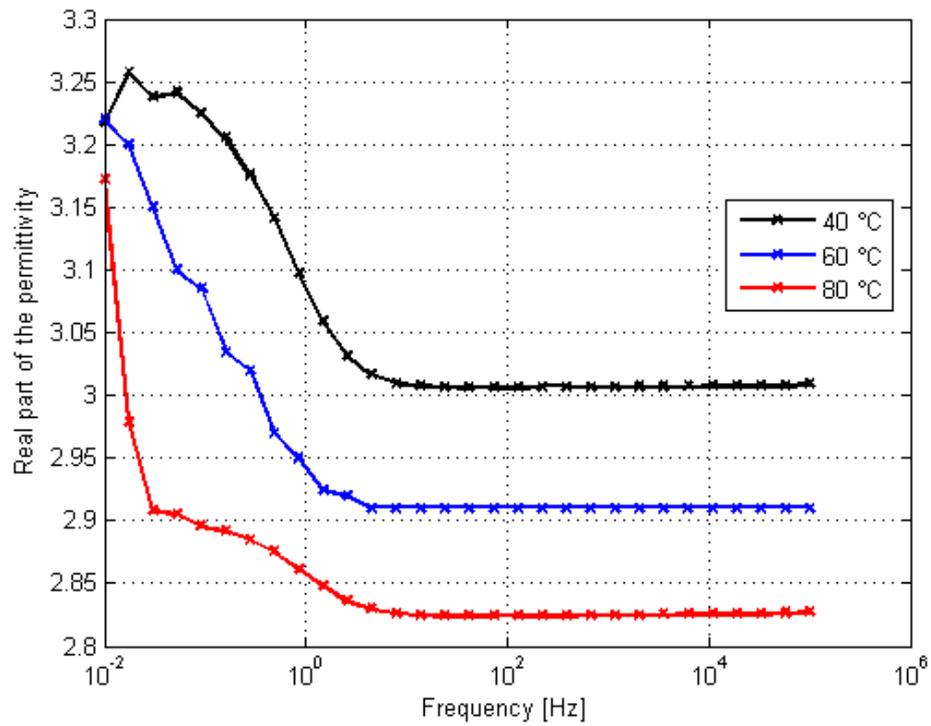


Figura 55: Pompa utilizzata per il sottovuoto

Per quanto riguarda i campioni con umidità è stata aggiunta una goccia di acqua a circa 200 ml di olio e successivamente mischiata ad una temperatura di 50 gradi per 15 minuti con l'agitatore magnetico mostrato nella figura precedente. Dalle misure di umidità con l'apposito strumento è emerso che essa risultava di circa 300 ppm.

4.3 RISULTATI SPERIMENTALI

1) ESTERE SECCO



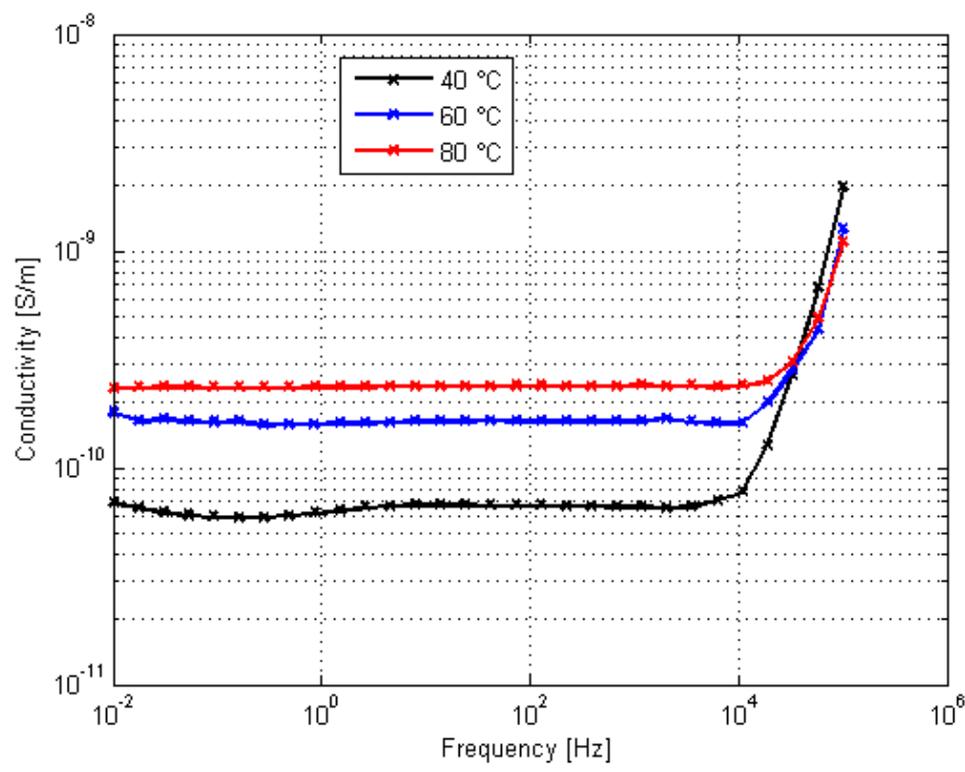
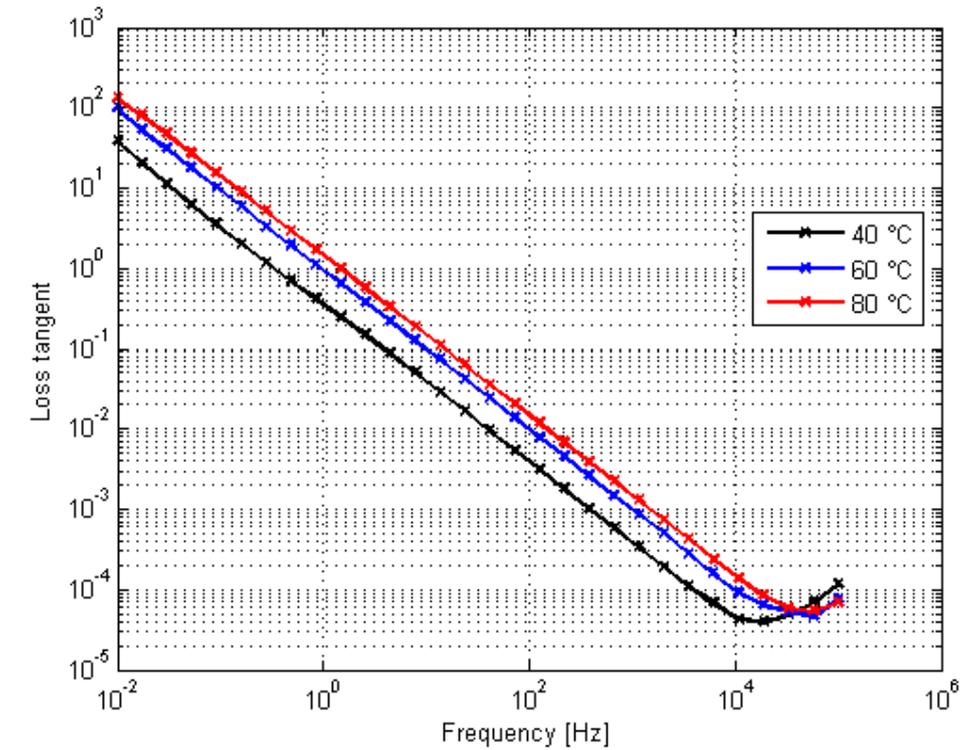
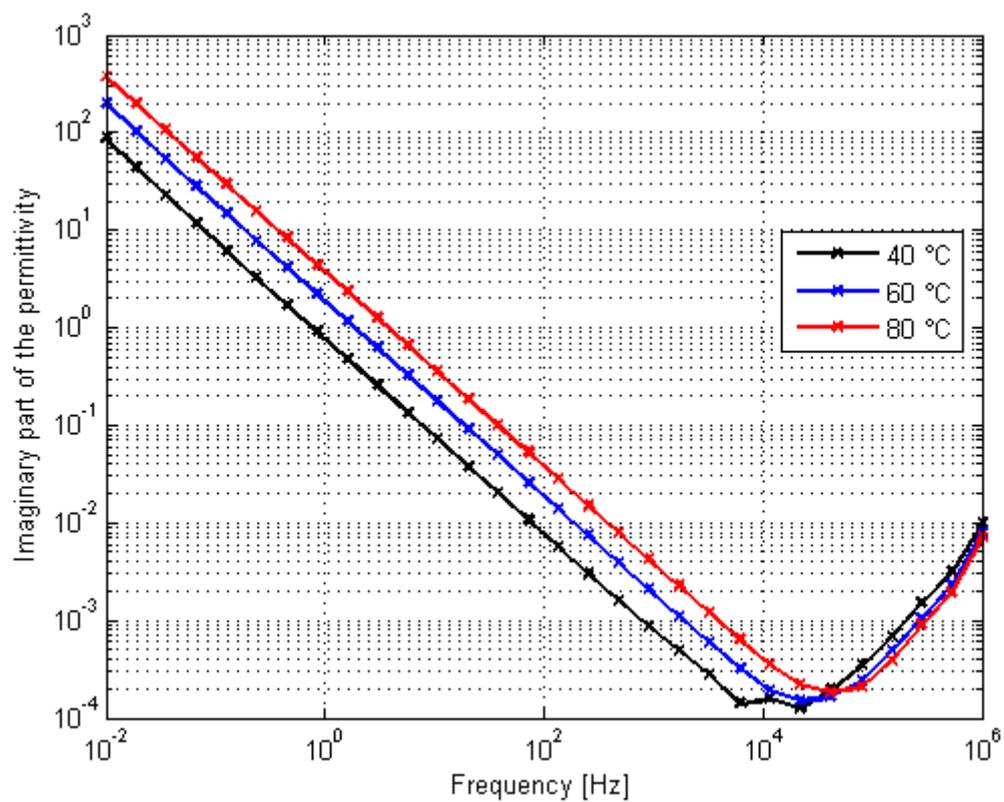
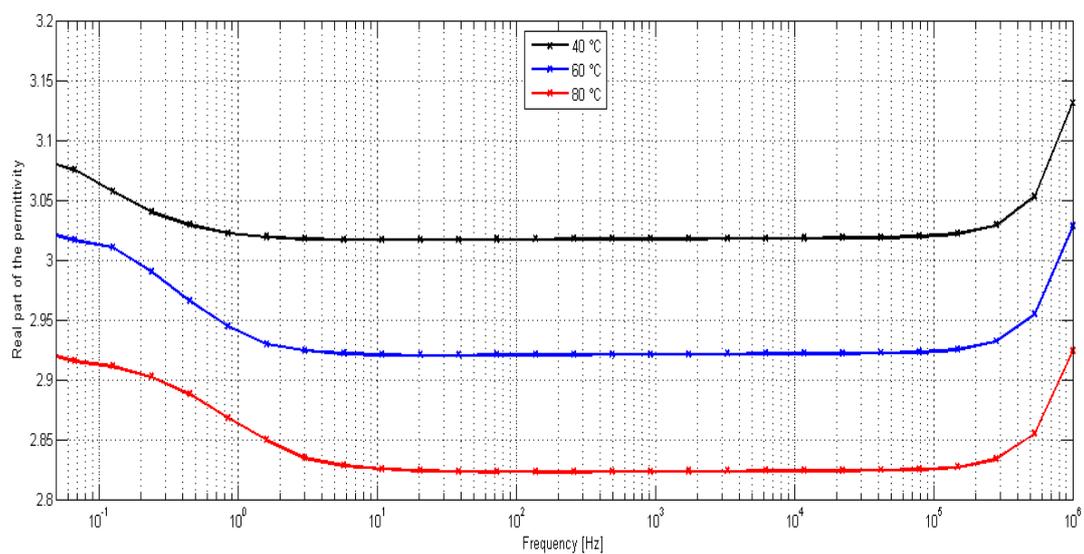


Figure 56-59: Rappresentazione grafica dei risultati ottenuti dalle prove

2) ESTERE CON UMIDITA' 300 PPM



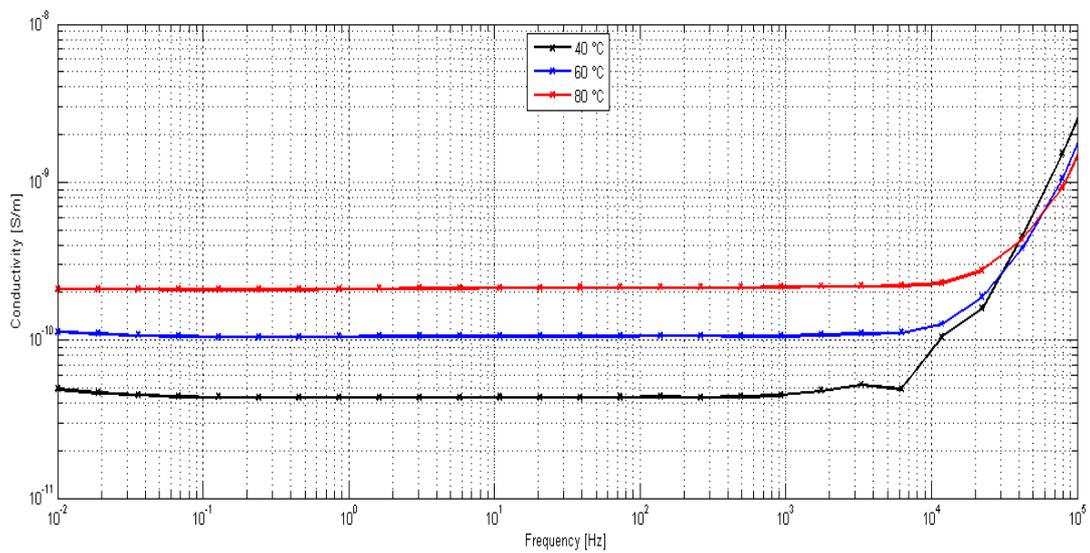
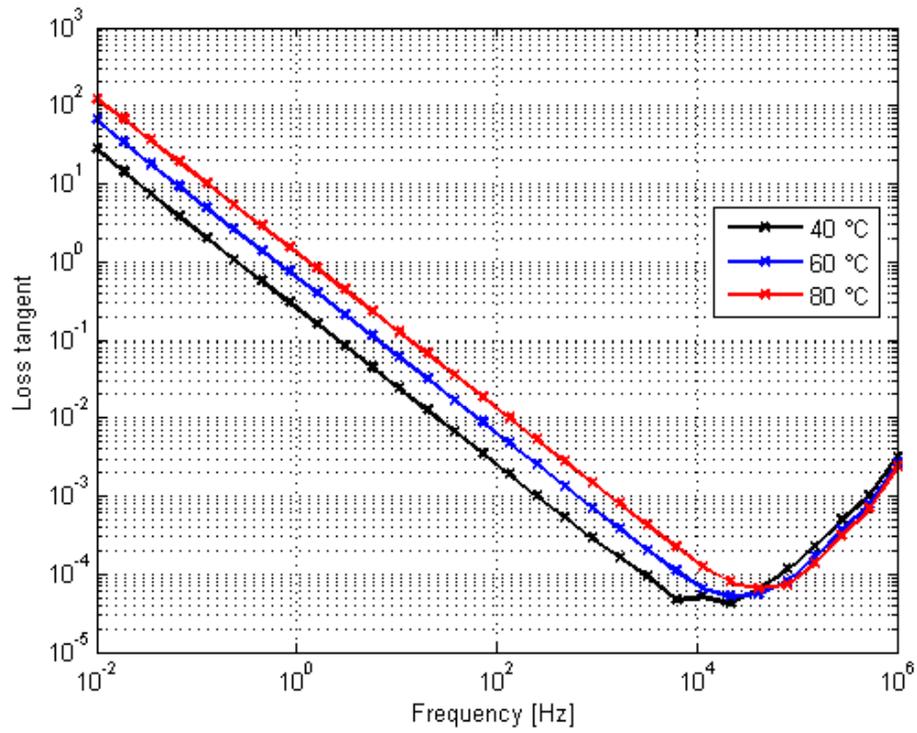
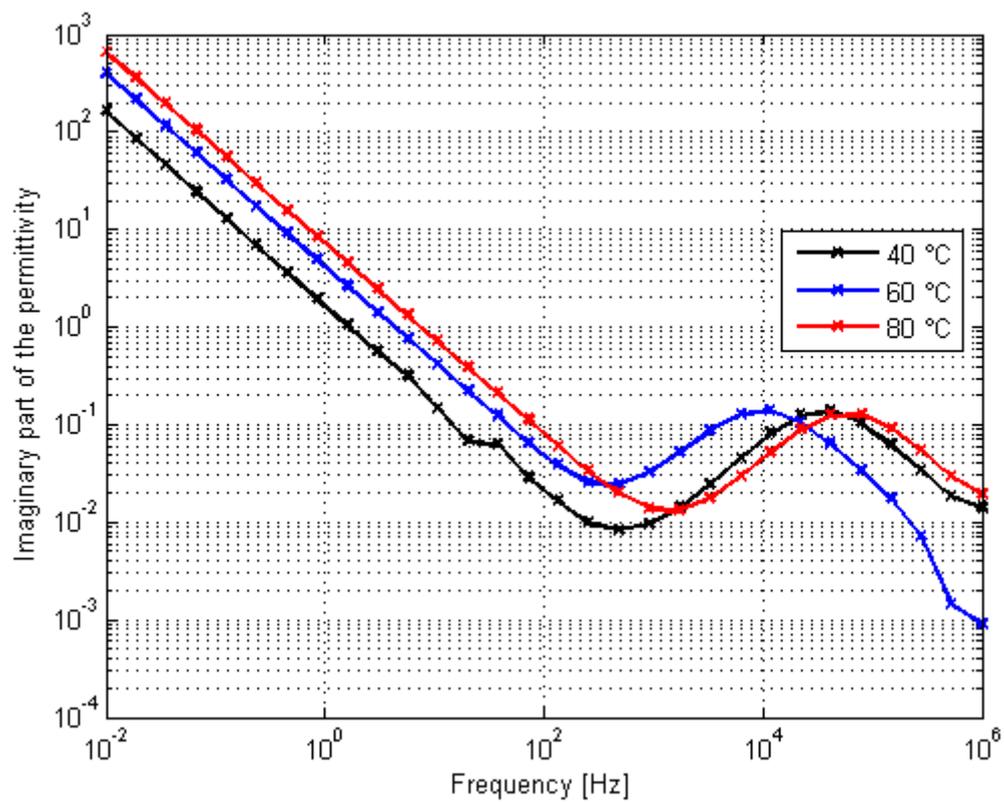
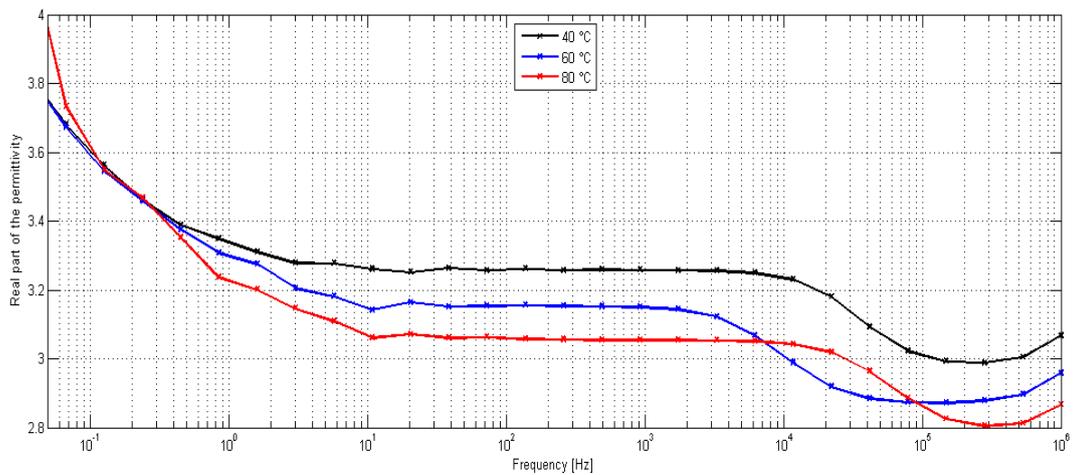


Figure 60-63: Rappresentazione grafica dei risultati ottenuti dalle prove

3) ESTERE SECCO INVECCHIATO UNA SETTIMANA



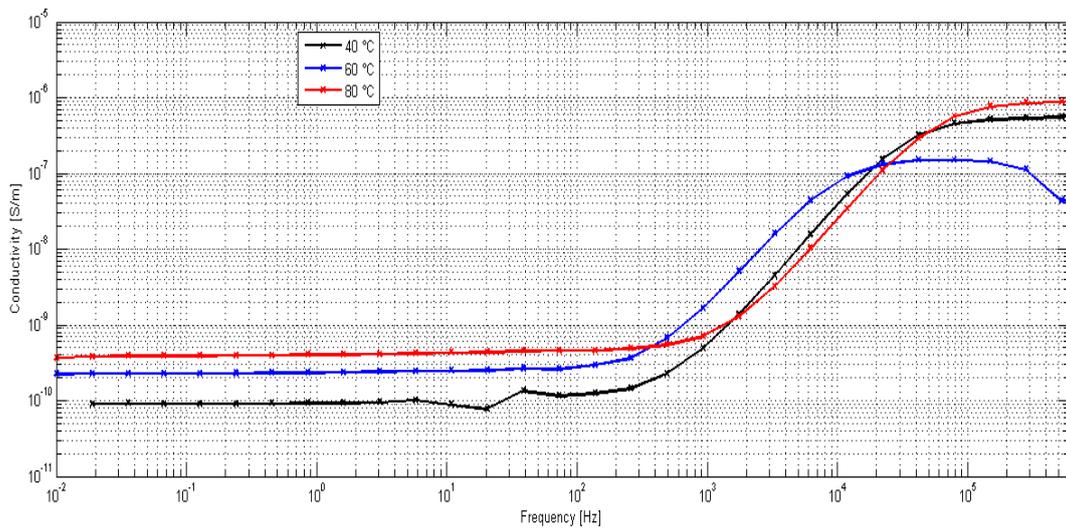
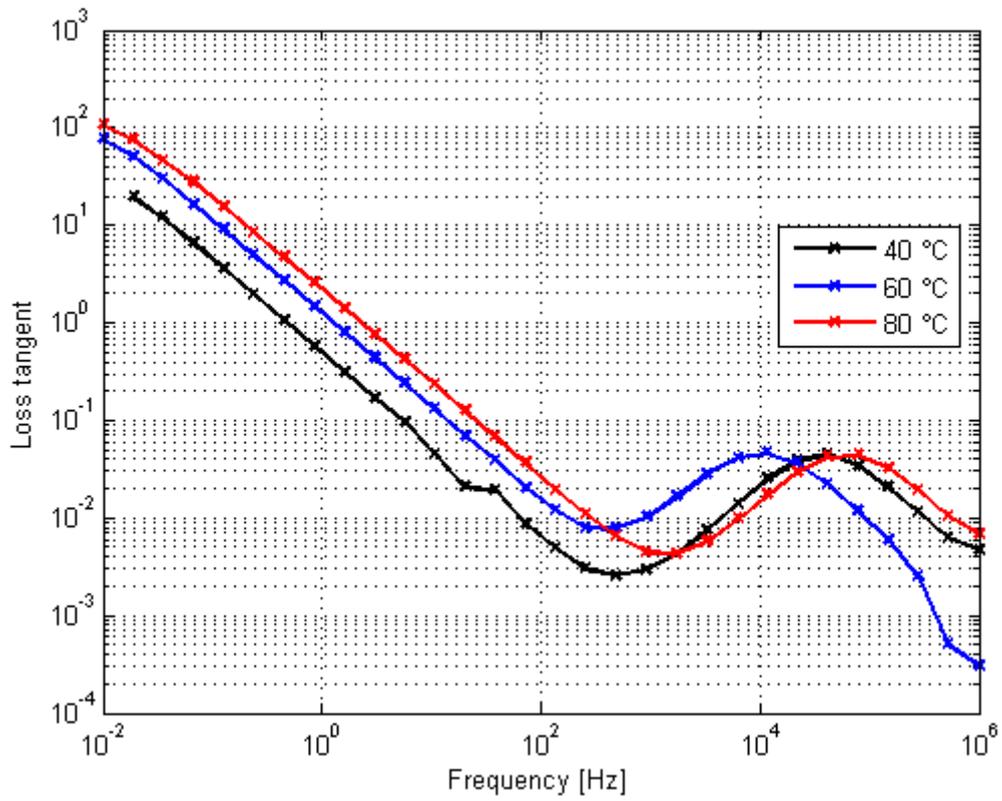
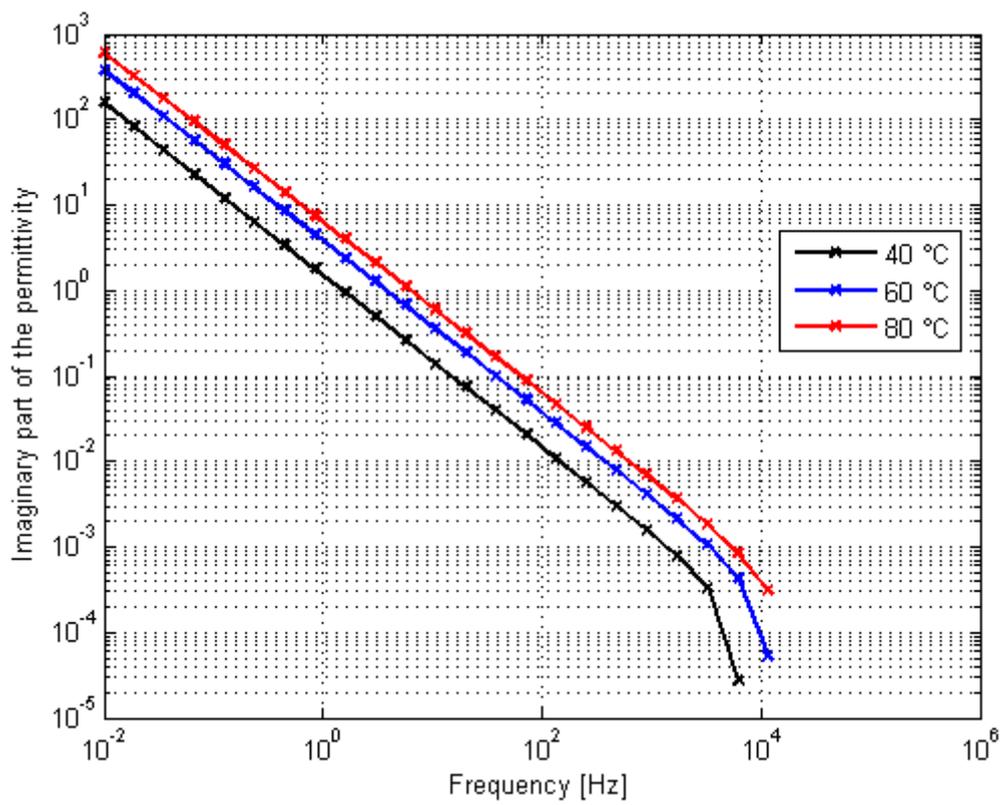
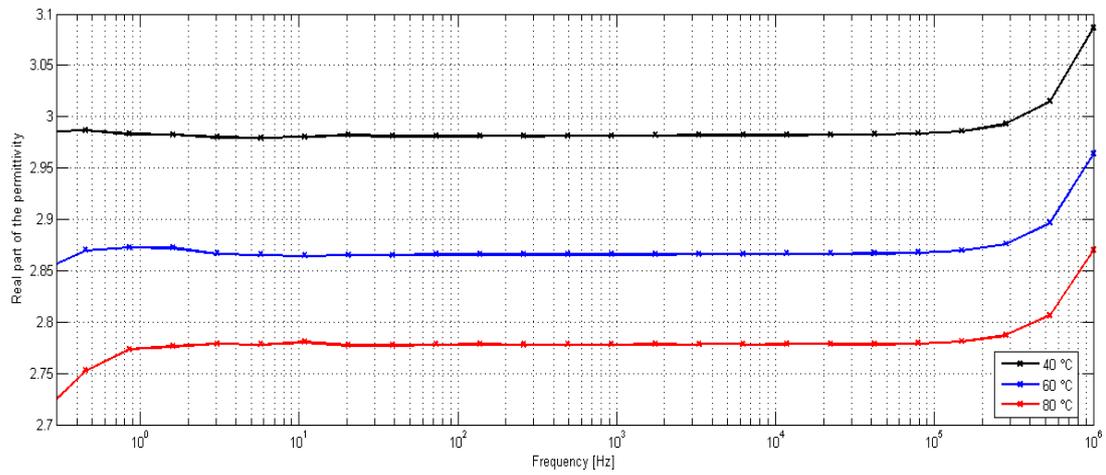


Figure 64-67: Rappresentazione grafica dei risultati ottenuti dalle prove

4) ESTERE INVECCHIATO UNA SETTIMANA CON UMIDITA' 300 PPM



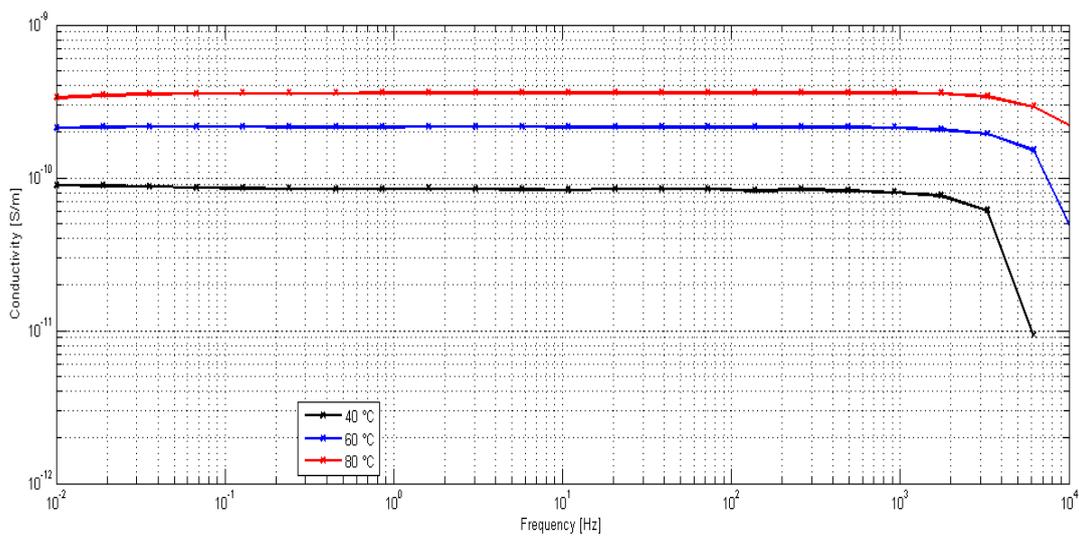
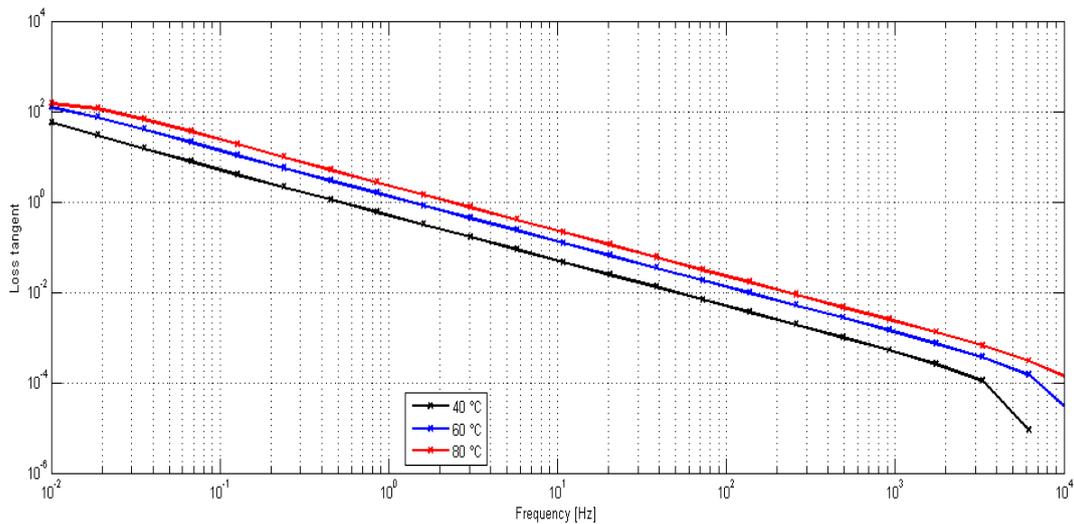
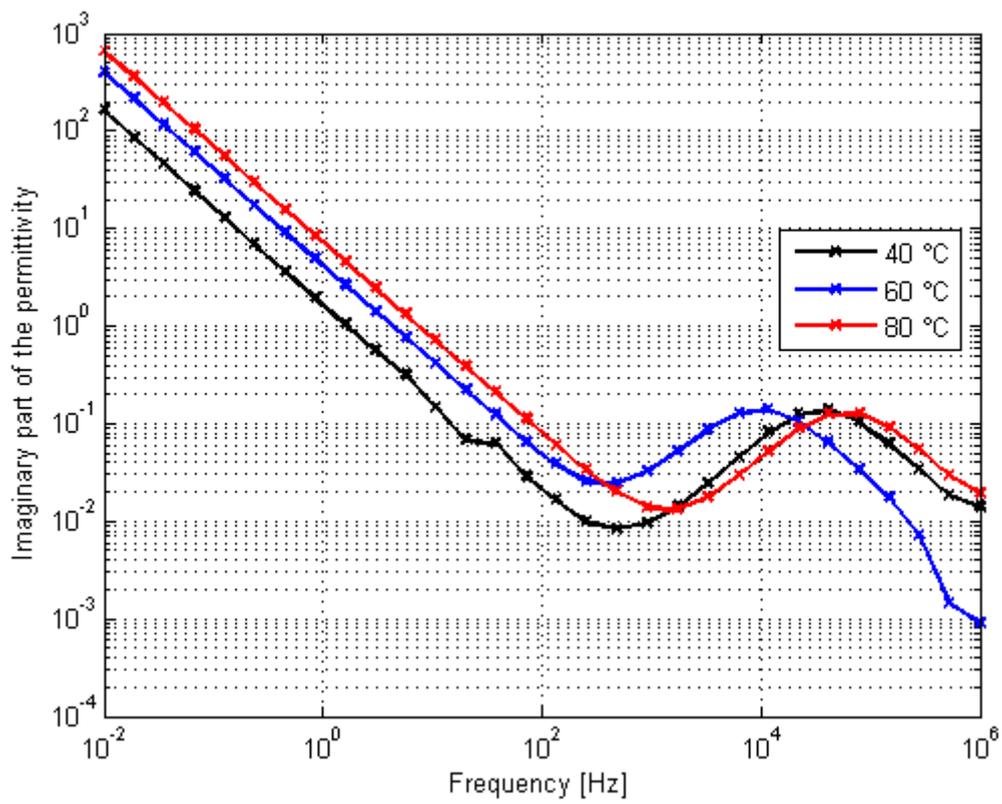
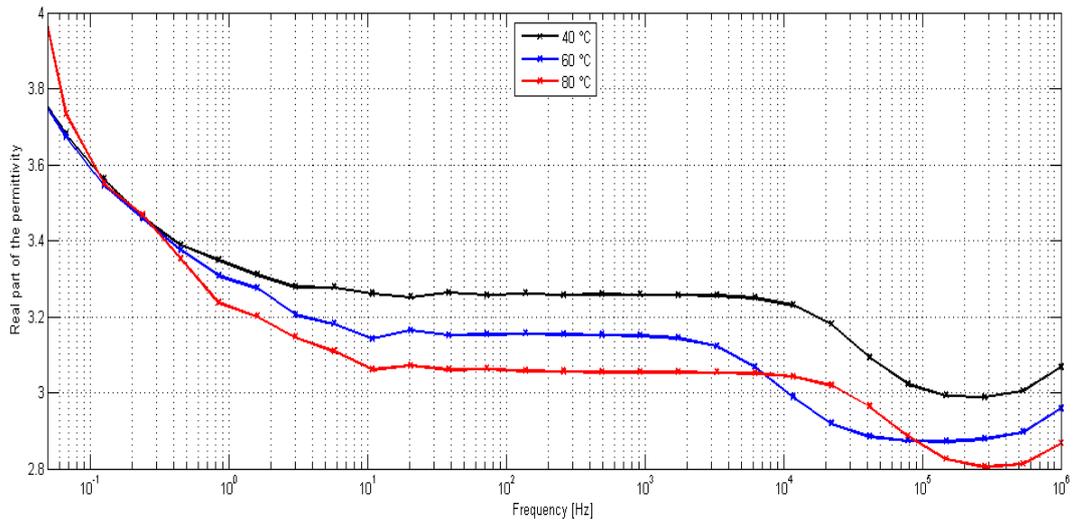


Figure 68-71: Rappresentazione grafica dei risultati ottenuti dalle prove

5) ESTERE INVECCHIATO DUE SETTIMANE



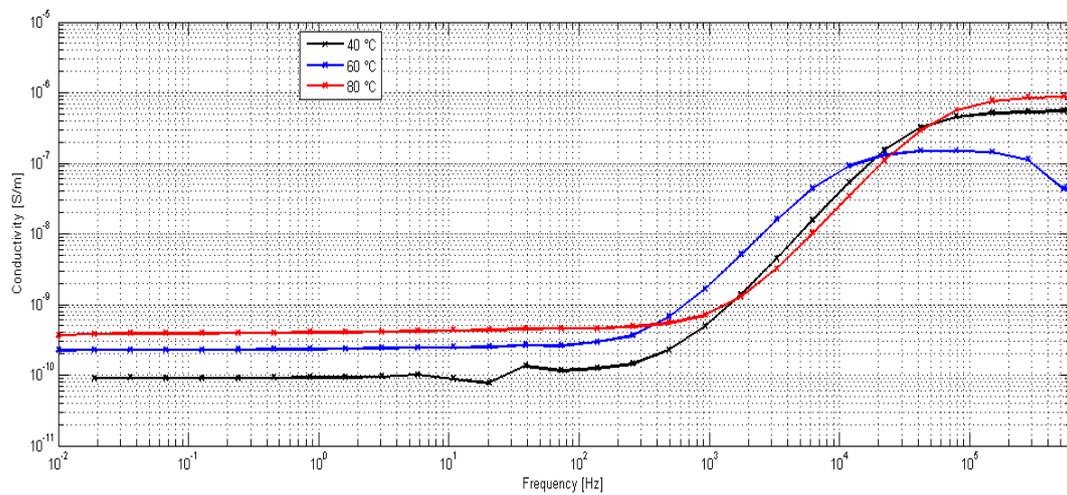
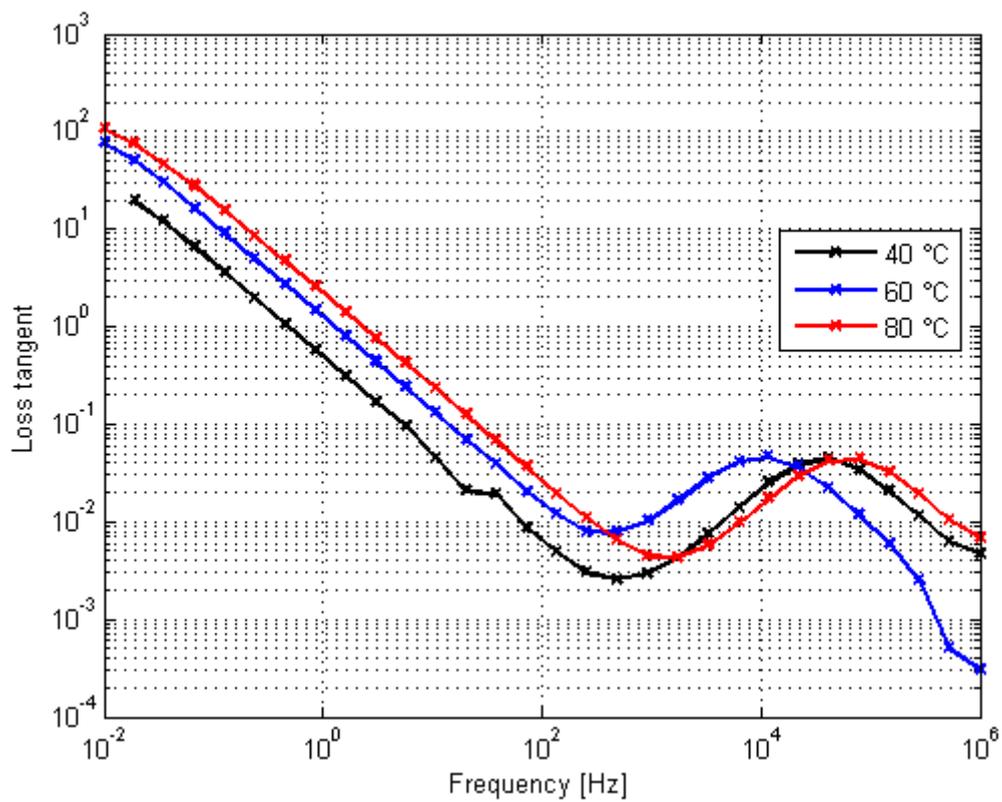
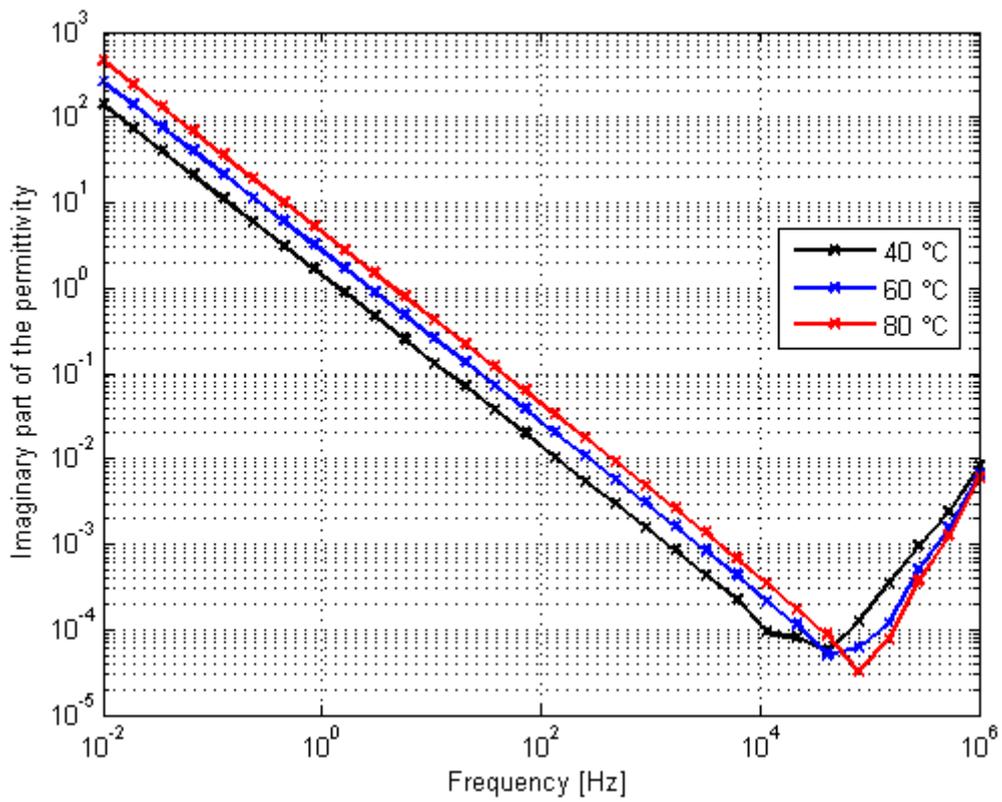
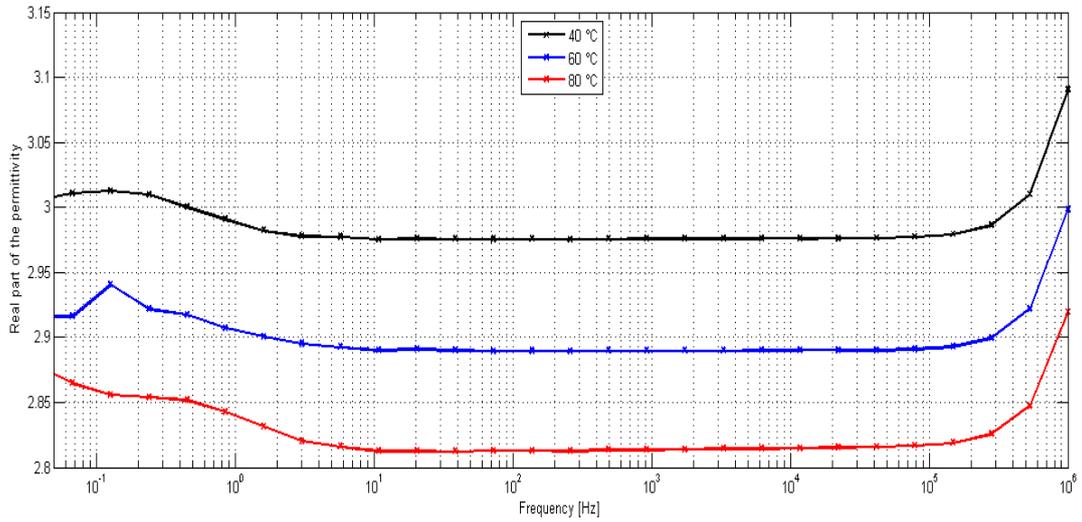


Figure 72-75: Rappresentazione grafica dei risultati ottenuti dalle prove

6) ESTERE INVECCHIATO DUE SETTIMANE CON UMIDITA' 300 PPM



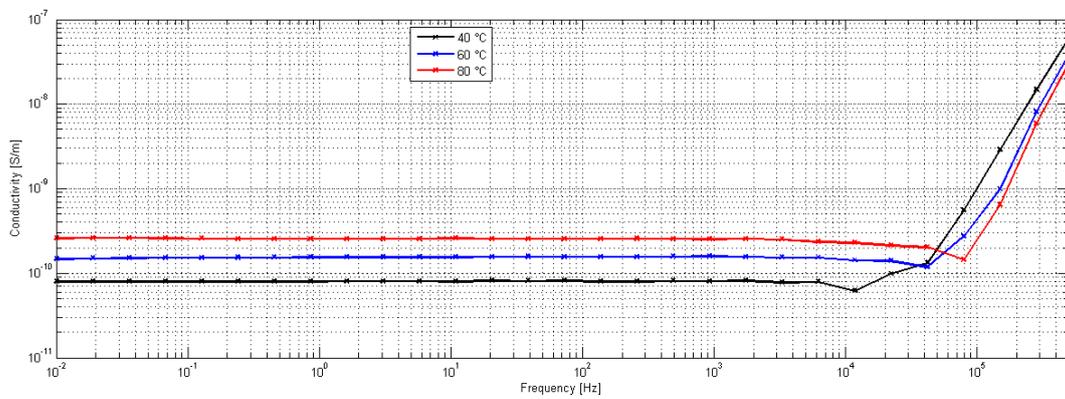
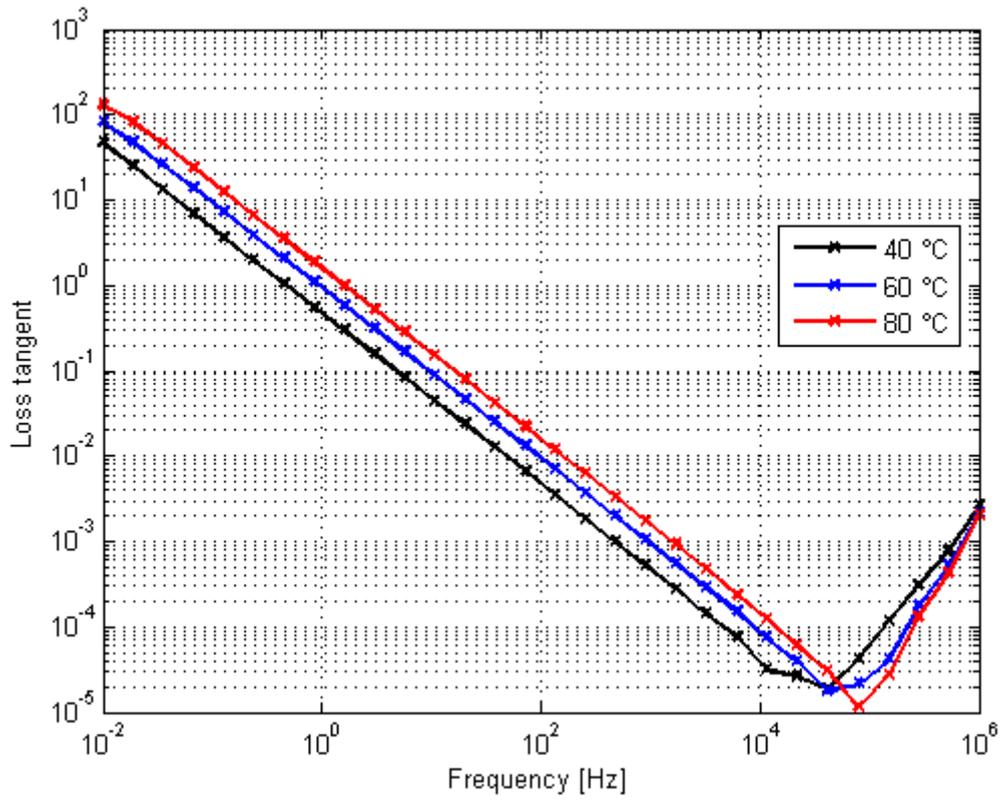


Figure 76-79: Rappresentazione grafica dei risultati ottenuti dalle prove

Dai grafici precedenti si possono notare le seguenti cose:

Facendo riferimento ai singoli campioni l'andamento di ϵ' è costante per tutti i valori di frequenza, con una piccola tendenza ad aumentare a bassa frequenza. All'aumentare della temperatura invece la ϵ' diminuisce, risultato pienamente in accordo con la legge di Debye

$$P = \frac{\epsilon_s - 1}{\epsilon_s + 2} \left(\frac{M}{d} \right) = \frac{4\pi}{3} N_A \sum_{j=1}^n \left(\frac{d}{M} \right) x_j \left[a_j + \frac{\mu_j^2}{3kT} \right] \quad (4.1)$$

Con N_A numero di Avogadro, M il peso molecolare e d la densità.

La ϵ'' , così come il $\tan \delta$, hanno un comportamento simile per tutti i campioni: a partire dalle alte frequenze esse tendono a calare poi in corrispondenza di un certo valore di frequenza, all'incirca uguale per tutti, incominciano ad aumentare con pendenza proporzionale all'inverso della frequenza. Si nota inoltre che sia ϵ'' che $\tan \delta$ aumentano all'aumentare della temperatura, ossia il dielettrico degrada le sue proprietà ed aumentano le perdite.

La conducibilità ha un andamento lineare, con un incremento alle alte frequenze.

Essa inoltre varia al variare della temperatura secondo la legge

$$\sigma(T) = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E}{kT}} \quad (4.2)$$

dove k è la costante di Boltzman. Per i singoli campioni di olio possiamo determinare le varie energie di attivazione, prendendo come frequenza di riferimento 1 kHz e come valori di temperatura 40 e 60 e 80°C.

I calcoli sono stati effettuati mediante un programma in Matlab sfruttando il principio della regressione lineare.

Ecco i risultati determinati sui vari campioni

	1	2	3	4	5	6
σ_{40} [S/m]	1,547E-11	1,764E-11	1,420E-10	1,578E-10	3,010E-9	1,539E-11
σ_{60} [S/m]	1,650E-10	1,721E-10	2,181E-10	2,383E-10	5,434E-9	2,865E-11
σ_{80} [S/m]	2,172E-10	2,402E-10	4,737E-10	5,249E-10	7,852E-9	5,152E-11
ΔE [eV]	0,636	0,629	0,285	0,284	0,229	0,23

Figura 80: Tabella con i risultati di conducibilità ed energia di attivazione per vari campioni

Si può concludere che la conducibilità, oltre ad essere funzione dello stato dell'estere, dipende anche dalla temperatura.

Per quanto riguarda l'energia di attivazione si può concludere che:

- l'effetto dell'umidità è trascurabile
- per quel che riguarda l'invecchiamento, facendo riferimento ai campioni considerati ed all'intervallo di tempo preso di considerazione ossia un invecchiamento di una e due settimane, è evidente come l'energia di attivazione subisca un calo drastico dopo una settimana mentre per il tempo successivo tenda a stabilizzarsi.

La riduzione dell'energia di attivazione comporta un aumento della conducibilità più drastico alle stesse variazioni di temperatura e quindi una sua riduzione rivela un aumento della conducibilità stessa all'aumento dell'umidità.

CONCLUSIONI

A partire dalla cella di misura presente in laboratorio è stato creato un sistema completo per la spettroscopia dielettrica applicata ad isolanti fluidi di origine vegetale.

Il sistema, composto da una parte fisica che ha lo scopo di raggiungere una temperatura desiderata ed una parte software implementata in ambiente LabView che controlla il generatore di potenza ed il Dielectric Analyzer, può essere sfruttato anche per altri tipi di isolanti liquidi come ad esempio i nanofluidi.

I risultati determinati dalle prove su un estere corrispondono ai risultati presenti in letteratura confermando quindi la riuscita realizzazione e funzionamento del sistema ideato.

Attualmente il sistema non prevede anche un sistema di raffreddamento e quindi come sviluppo futuro si può implementare un sistema di ricircolo dell'olio oppure altre soluzioni più ottimizzate.

BIBLIOGRAFIA

- [1] L. Simoni “Dielettrici. Proprietà e comportamento nel tempo “ 1983
- [2] T. A. Prevost, “Dielectric Properties of Natural Esters and their Influence on Transformer Insulation System Design and Performance - An Update”, Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES '09. IEEE, vol. 1, pp. 1-7, July 2009. Calgary, Canada.
- [3] M. Marci, I. Kolcunová and J. Kurimský “Dielectric properties of natural esters”, 2011, 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC) , pp. 1-4, 8-11 May 2011. Rome, Italy.
- [4] L. Mo. de Espinosa, A. R. Meier, “Plant oils: The perfect renewable resource for polymer science?!” , European Polymer Journal, vol. 47, Issue 5, pp. 837–852, May 2011. Insulation ISEI. IEEE, pp. 30-33, 10-13 July 2012. San Juan, PR, USA
- [5] Lipids | CK-12 Foundation: 26.3: Lipids. Lipids | CK-12 Foundation [online]. [cit. 2016-02-18]. Available from: <http://www.ck12.org/book/CK-12-Chemistry-Intermediate/section/26.3/>
- [6] Patric Mc Shane.C, *Relative Properties of the New Combustion-Resistant Vegetable-Oil-Based Dielectric Coolants for Distribution and Power Transformers*, 1132 IEEE transactions on industry applications, vol. 37, NO. 4, July/August 2001, pp1132-1139
- [7] Patric Mc Shane.C, *Vegetable Oil Based Dielectric Coolants*, 2002 IEEE reprinted with permission from IEEE Industry applications magazine, may/june 2002, volume 8, issue3, pp34-41
- [8] Dow Corning corporation , *Material Safety Data Sheet, Dow Corning(r) 561, Silicone Transformer Liquid*, pp1-7
- [9] Dow Corning -*Formaldehyde Generation from Silicone Materials* Fact Sheet, Dow Corning Product Stewardship, Executive Summary, ©2012 Dow Corning Corporation. All rights reserved

- [10] Dave Hart, *Dielectric Fluids for Transformer Cooling, History and Types*, GE Specification Engineer
- [11] Endah Yuliasuti 1388436, *Analysis of Dielectric Properties comparison between Mineral oil and Synthetic Ester Oil*, Thesis, submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Electrical Engineering, High Voltage Technology and Management Group, Department of Electrical Sustainable Energy Faculty of Electrical Engineering, Mathematics, and Computer Science Delft University of Technology June 2010
- [12] Y. Bertrand and L. C. Hoang, "Vegetal Oils as Substitute for Mineral Oils," IEEE Seventh Int'l. Conf. on Properties and Applications of Dielectric Materials, pp. 491-494, 2003.
- [13] C.P. McShane, G. Gauger, J. Luksich, "Fire Resistant Natural Ester Dielectric Fluid and Novel Insulation System for Its Use," IEEE/PES Transmission and Distribution Conf., pp. 890-894, 1999.
- [14] T.V. Oommen, C.C. Claiborne and E.J. Walsh, "Introduction of a new fully biodegradable dielectric fluid," IEEE Annual Textile, Fiber and Film Industry Technical Conf., pp. 1-4, 1998.
- [15] S. Arazoe, D. Saruhashi, Y. Sato, S. Yanabu, G. Ueta and S. Okabe, "Electrical characteristics of natural and synthetic insulating fluids," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, Vol. 18, No. 2; pp. 506-512, 2011.
- [16] H. Borsi, E. Gockenbach, "Properties of ester liquid MIDEL 7131 as an alternative liquid to mineral oil for transformers," IEEE Inter. Conf. Dielectric Liquids, pp. 377-380, 2005.
- [17] Ferguson, A. Lobeiras, and J. Sabau, "Suspended Particles in the liquid insulation of aging power transformers", IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 18, No.4, pp.17-23, 2002
- [18] W. S. Zaengl, "Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment, Part I: Theoretical Considerations" IEEE Electr. Insul. Mag. Vol. 19, No 5, pp 5 – 19, 2003.

- [19] T.V.Oommen, C.C.,” Vegetable oils for Liquid –Filled transformers”, IEEE Electrical Insulation Magazine, pp. 6-11, 2002.J. Clerk Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.68-73.
- [20] Md. Amanullah, Syed M. Islam, Samer Chami and Gary Ienco,”Analyses of physical characteristics of vegetable oils as an alternative source to mineral oil-based dielectric fluid “ IEEE International conference on Dielectric Liquids, 26 June-1 July 2005, pp.397-400.
- [21] D.C Abeysundara, C. Weerakoon, J.Lucas, K.A.I. Gunatunga and K. C. Obadage,”Coconut oil as an alternative to Transformer oil” ERU Symposium, November, 2001.Y. Yorozu, M. Hirano, K. Oka, and Y. Tagawa, “Electron spectroscopy studies on magneto-optical media and plastic substrate interface,” IEEE Transl. J. Magn. Japan, vol. 2, pp. 740- 741, August
- [22] A. N. Nagashree, S. Vasudeva Murthy, V. Champa, B. V. Sumangala, “Investigations on the suitability of indigenous Natural Esters as Liquid Dielectrics” ,IEEE International Conference of Dielectric Materials, July24-28, 2012
- [23] Yuliastuti, Endah,”Analysis of Dielectric properties comparison between Mineral oil and Synthetic Ester oil”, Master Thesis, Delft University of Technology, June, 2010.

RINGRAZIAMENTI

Un ringraziamento particolare alla mia famiglia che mi ha sempre sostenuto in questi anni.

Grazie anche ai miei amici che mi sono stati accanto nei momenti più felici ed in quelli un po' meno, in particolare vorrei ringraziare Stefano, senza il cui aiuto e supporto non avrei completato questo lavoro.

Grazie all'amico nonché correlatore di questa tesi, Fabrizio Negri, i cui consigli sono stati indispensabili per me.

Grazie al prof. Andrea Cavallini per avermi seguito in questo progetto ed a tutto il personale dell'università, sempre pronto a dare una mano in caso di bisogno.