

Modellazione e realizzazione di un igrometro capacitivo

Del Linz Leonida, Fontanini Riccardo, Marzona Davide

Anno Accademico 2018-2019

Indice

1 Introduzione **2**

2 Modello teorico **3**

3 Realizzazione pratica **5**

4 Setup di Misura **7**

5 Misure Sperimentali **9**
5.1 Estrazione modello matematico 34

6 Sviluppi futuri **39**

7 Conclusioni e possibili miglioramenti **42**

Capitolo 1

Introduzione

Il target di questo progetto è la realizzazione di un sensore di umidità di tipo capacitivo. L'umidità relativa è il rapporto fra l'umidità assoluta (quantità di vapore acqueo presente in un volume d'aria) e l'umidità di saturazione (la massima quantità d'acqua che può essere presente in un volume ad una data temperatura e pressione). Si è scelto di realizzare un sensore di tipo *capacitivo* in quanto la permettività elettrica dell'aria varia in funzione sia della temperatura che dell'umidità relativa. Il legame fra permittività elettrica e capacità è espresso dalla ben nota espressione della capacità di un condensatore a facce piane parallele:

$$C = \varepsilon \frac{D}{d} \tag{1.1}$$

dove S è la superficie dei piatti e d è la distanza fra di essi. L'obiettivo quindi è di costruire un sensore in grado di variare la sua capacità in base alla temperatura e all'umidità relativa presente nell'ambiente in cui è posizionato.

Capitolo 2

Modello teorico

L'espressione della dipendenza della permittività elettrica dell'acqua dalla temperatura è:

$$\varepsilon_w = 87.74 - 0.4T + 9.39 \cdot 10^{-4}T^2 - 1.41 \cdot 10^{-6}T^3 \tag{2.1}$$

il cui andamento viene riportato in Figura 2.1

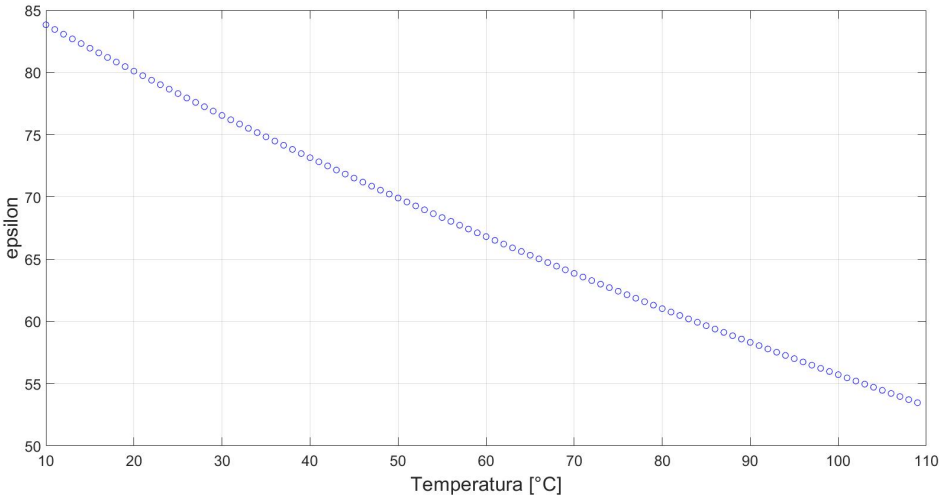


Figura 2.1: Andamento della permettività dielettrica dell'acqua rispetto alla temperatura

L'idea è di assumere che la la permettività dielettrica dell'aria umida non sia altro che una media della permettività dell'aria secca (ε_0) e dell'acqua (ε_w), pesata in base all'umidità dell'aria. Utilizzando un opportuno coefficiente α, che esprime il rapporto fra il volume d'acqua ed il volume totale occupato dal sensore, si ottiene un'espressione del tipo:

$$\varepsilon = \alpha\varepsilon_0\varepsilon_w + (1 - \alpha)\varepsilon_0 \tag{2.2}$$

Dalla consultazione di alcuni articoli su umidità relativa e temperatura (*Humidity Conversion Formulas, Vaisala*) è stato possibile estrapolare un modello per il calcolo del coefficiente α. In particolare il punto di partenza è la relazione fra la pressione di saturazione del vapore e la temperatura:

$$P_{ws} = P_c \cdot e^{\frac{BT_c}{T}} \tag{2.3}$$

dove

- P_{ws} : Pressione di saturazione del vapore
- P_c : Pressione critica (pari a $220640hPa$)
- T_c : Temperatura critica acqua (pari a $647K$)

- T : Temperatura dell'aria
- B : prefattore che dipende dalla temperatura dell'acqua, da T_c e da una serie di coefficienti ottenuti sperimentalmente

A questo punto è possibile ricavare la pressione di vapore P_w usando la relazione

$$P_w = RH\frac{P_{ws}}{100} \tag{2.4}$$

dove RH è l'umidità relativa. Conoscendo la pressione di vapore è facile passare all'umidità assoluta dell'aria usando la formula

$$AH = CP_w\frac{1}{T} \tag{2.5}$$

L'ultimo step è il calcolo della massa d'acqua presente nel volume di interesse, nel nostro caso rappresentato dal volume occupato dal sensore. Segue che

$$m_{H_2O} = AHV_{tot} \tag{2.6}$$

Sapendo infine che la densità dell'acqua è pari a $\rho = 1000\frac{Kg}{m^3}$ è immediato ricavare il volume d'acqua complessivo:

$$V_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{\rho} \tag{2.7}$$

Si è quindi giunti all'espressione del fattore α;

$$\alpha = \frac{V_{H_2O}}{V_{tot}} \tag{2.8}$$

Dopo aver implementato tutte le precedenti espressioni in uno script *Matlab* ed integrando l'espressione della capacità di un condensatore a facce piane parallele con N strati data da:

$$C = 2(N-1)\varepsilon\frac{S}{d} \tag{2.9}$$

dove S e d sono rispettivamente l'area dei piatti e la distanza fra di essi, si è potuto ricavare l'andamento teorico della capacità del sensore in funzione di RH e T, come riportato in Figura 2.2

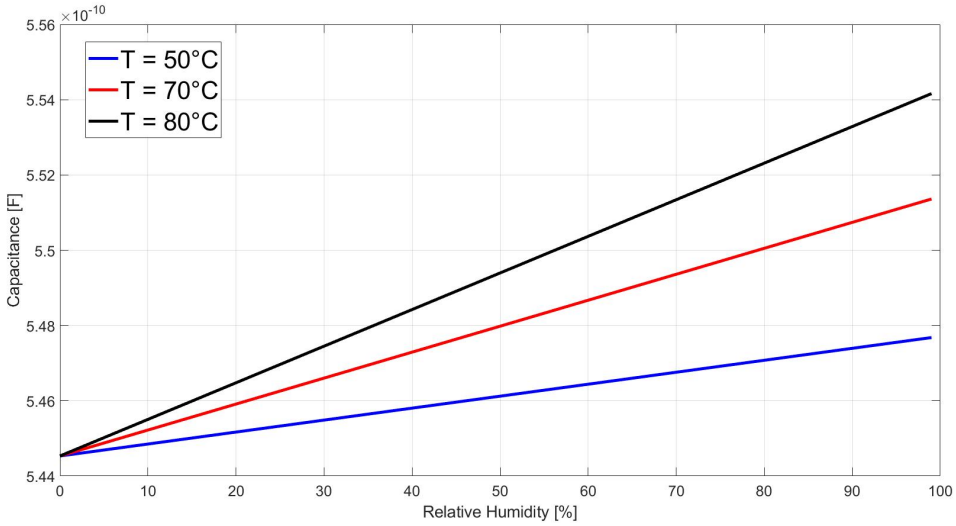


Figura 2.2: Capacità del sensore in funzione dell'umidità relativa per diverse temperature

Osservando il grafico si può dedurre una dipendenza diretta fra la capacità del sensore e l'umidità, sempre maggiore all'aumentare della temperatura.

Capitolo 3

Realizzazione pratica

Le specifiche sulle dimensioni del sensore sono:

- Larghezza lamelle: $a = 50mm$
- Lunghezza lamelle: $b = 30mm$
- Spessore lamelle: $1mm$
- Distanza fra le lamelle: $d = 2mm$
- Numero di lamelle: $N = 42$

Si è già detto che la capacità di un condensatore realizzato in questo modo è semplicemente:

$$C = 2(N-1)\varepsilon\frac{ab}{d} \tag{3.1}$$

Per maggiore chiarezza si osservi la sezione laterale del condensatore riportato in figura 3.1

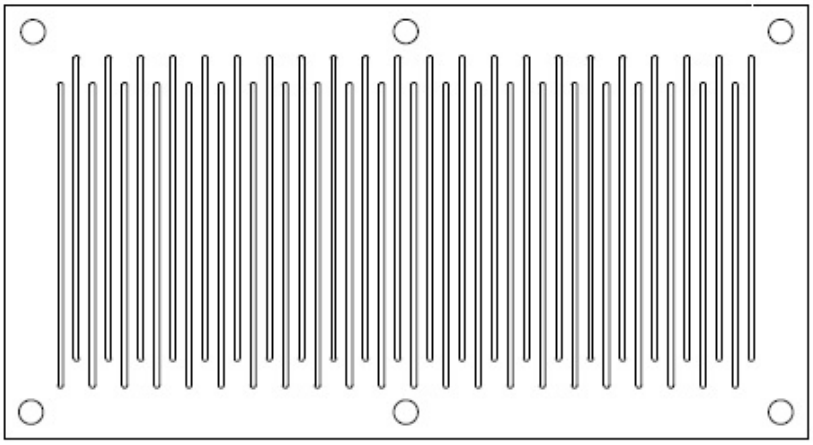


Figura 3.1: Disegno CAD del condensatore

Dal punto di vista pratico si è proceduto come segue:

- Taglio delle N lamelle da un foglio di rame di spessore $1mm$
- Progettazione di un opportuno supporto in $FR4$
- Assemblaggio del condensatore con fissaggio delle lamelle sulle piste della PCB

Il supporto è stato pensato in modo da avere poco ingombro e rendere la struttura finale il più solida possibile. In sostanza si tratta di due PCB in $FR4$ dotate di un pettine con una metallizzazione che consente il perfetto contatto elettrico delle lamelle. La PCB è stata disegnata in *Eagle* e fatta realizzare da un'azienda cinese. In poco meno di una settimana i pezzi erano in consegna e si è potuto procere all'assemblaggio finale, fissando le lamelle sul pettine ed unendo i due lati del condensatore con 4 barre filettate e 4 dadi di fissaggio. In figura si riporta il disegno CAD di una PCB e l'assieme finale.

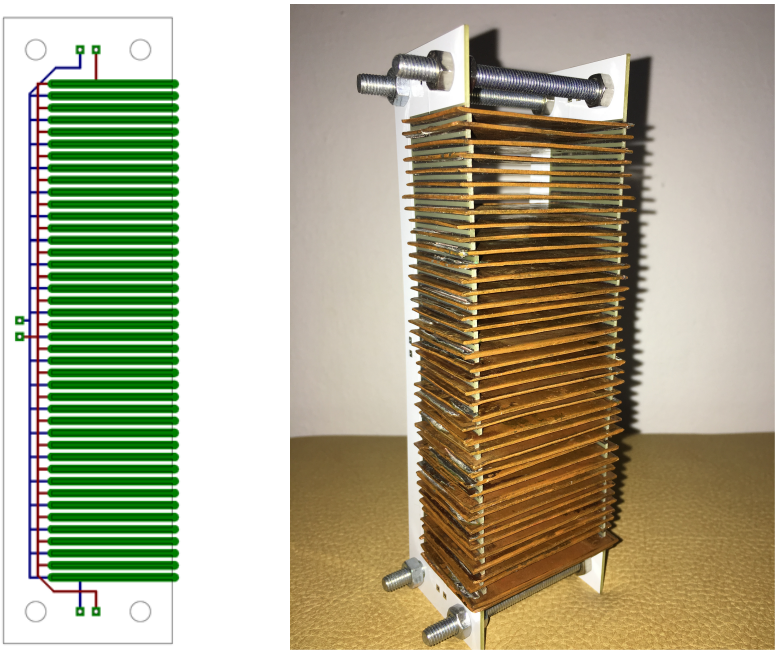


Figura 3.2: CAD di una PCB e assieme finale

Capitolo 4

Setup di Misura

Una volta completato l'assemblaggio del sensore si è potuto procedere alla verifica sperimentale del suo funzionamento, in modo da capire se il modello teorico fosse congruente con la realtà. Il setup di misura è così composto:

- Impianto termico con un range di temperature fra 10 e 85°C e umidità relativa fra 0 e 90 %
- Adeguato supporto in polistirolo robusto per connettere il sensore all'impianto
- Impedenzimetro modello $ST2830$ della Sourcetronic con range di frequenze da 1 a $100kHz$
- Interfaccia Matlab per acquisizione automatica delle misure

Prima di proseguire è bene fare una breve descrizione dell'impedenzimetro utilizzato per le misure. Lo strumento utilizzato è in grado di fornire le seguenti grandezze:

- Capacità e Resistenza Serie (C_s e R_s)
- Capacità e Resistenza Parallelo (C_p e R_p)
- Modulo e Fase (Z e θ)

Il setup automatico di misura è stato impostato in modo da acquisire 10 valori per ognuna di queste grandezze ogni volta che il sensore si trovava ad una certa temperatura e con un certo valore di umidità relativa, facendo anche degli step in frequenza da 1 a $10kHz$ con passo $1kHz$ e da 20 a $100kHz$ con passo $10kHz$. In tal modo una successiva elaborazione dei valori ottenuti consentiva una interpretazione di tipo statistico, molto indicata nel caso di misure sperimentali. Per poter fare tutto questo si è realizzato un semplice programma in ambiente *Matlab* con l'uso del pratico *AppDesigner*, di cui si riporta un'immagine in Figura 4.1.

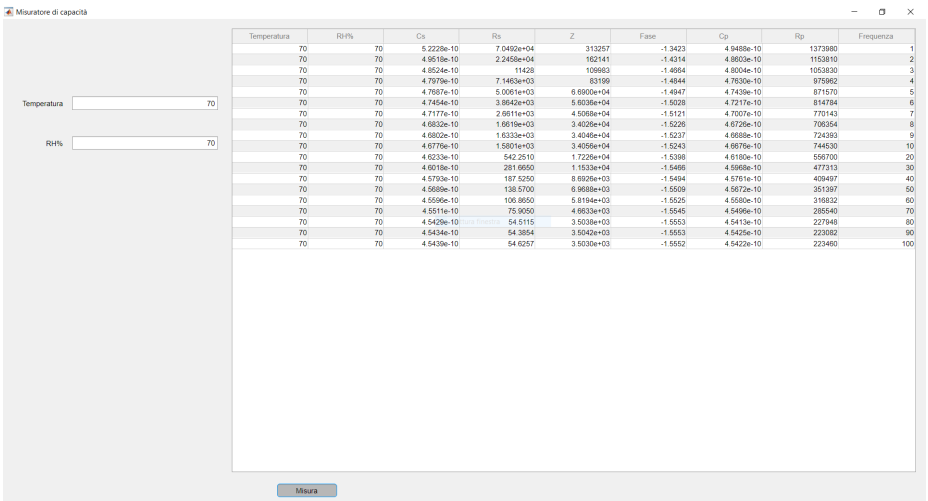


Figura 4.1: Interfaccia grafica Matlab

Inserendo i valori di temperatura e umidità relativa nelle apposite caselle in automatico lo strumento acquisisce le diverse grandezze elettriche con lo sweep in frequenza sopracitato, salvando il tutto in dei file di tipo *.csv* adatti per la successiva elaborazione sviluppata in ambiente Python. E' bene precisare che il setup di misura è stato reso il più stabile possibile, fissando i connettori in modo che non si muovano e allontanando le possibili sorgenti di interferenze elettromagnetiche quali strumenti e conduttori di corrente.

Capitolo 5

Misure Sperimentali

Dopo aver consultato il responsabile dell'impianto termico si è scelto di fissare una temperatura di partenza di 50°C e di procedere con uno sweep in umidità relativa. In seguito si è passati ad una temperatura di 70°C con un ulteriore sweep in umidità relativa, per concludere il tutto alla temperatura massima di 80°C. Riassumendo:

- $T_1 = 50°\text{C}$ con $RH = 17$, 43, 55, 64, 75 e 85%
- $T_2 = 70°\text{C}$ con $RH = 10$, 25, 40, 55, 70 e 85%
- $T_3 = 80°\text{C}$ con $RH = 9$, 40, 60, 70 e 85%

Nel seguito si riportano gli andamenti delle varie grandezze sopracitate nelle diverse condizioni di lavoro del sensore. E' bene specificare che i valori plottati sono dei valori *medi*, ottenuti dall'elaborazione di tutte le misurazioni acquisite. Inoltre si è deciso di inserire per ogni valore anche la relativa dispersione rispetto alla media, evidenziata da una sfumatura colorata. Infine per non appesantire troppo la notazione si è deciso di graficare solo i valori misurati in un ristretto range di frequenze, pari a 1, 5, 10, 50 e 100kHz.

Risultati per $T_1 = 50°\text{C}$

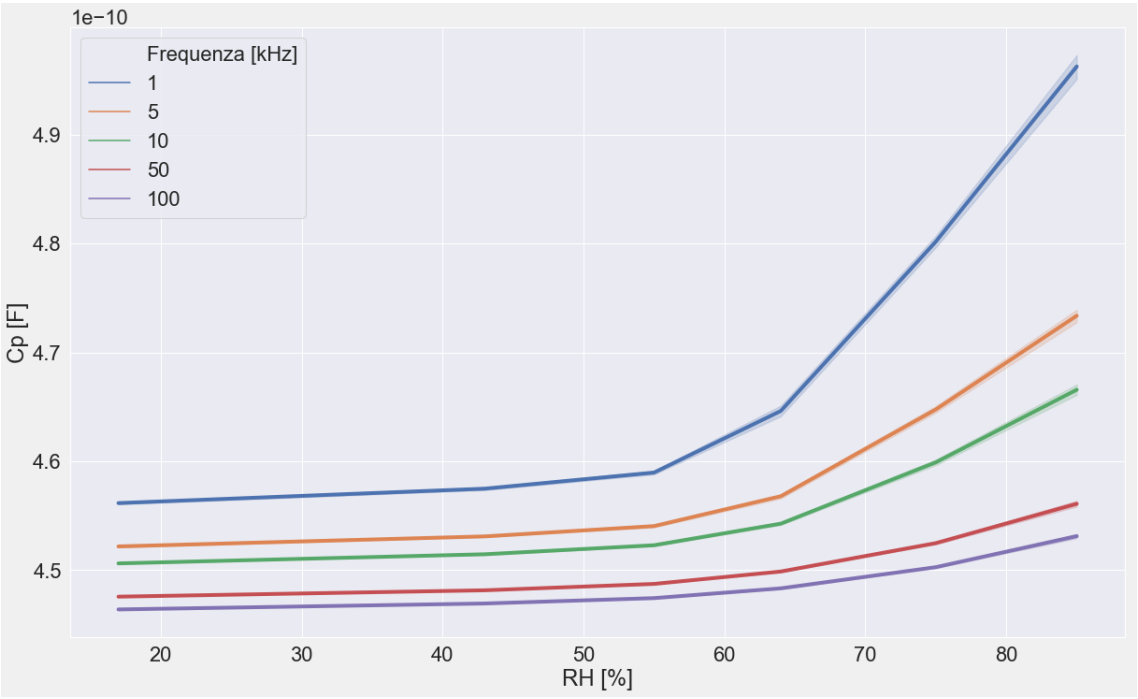


Figura 5.1: C_p @$T_1 = 50°\text{C}$

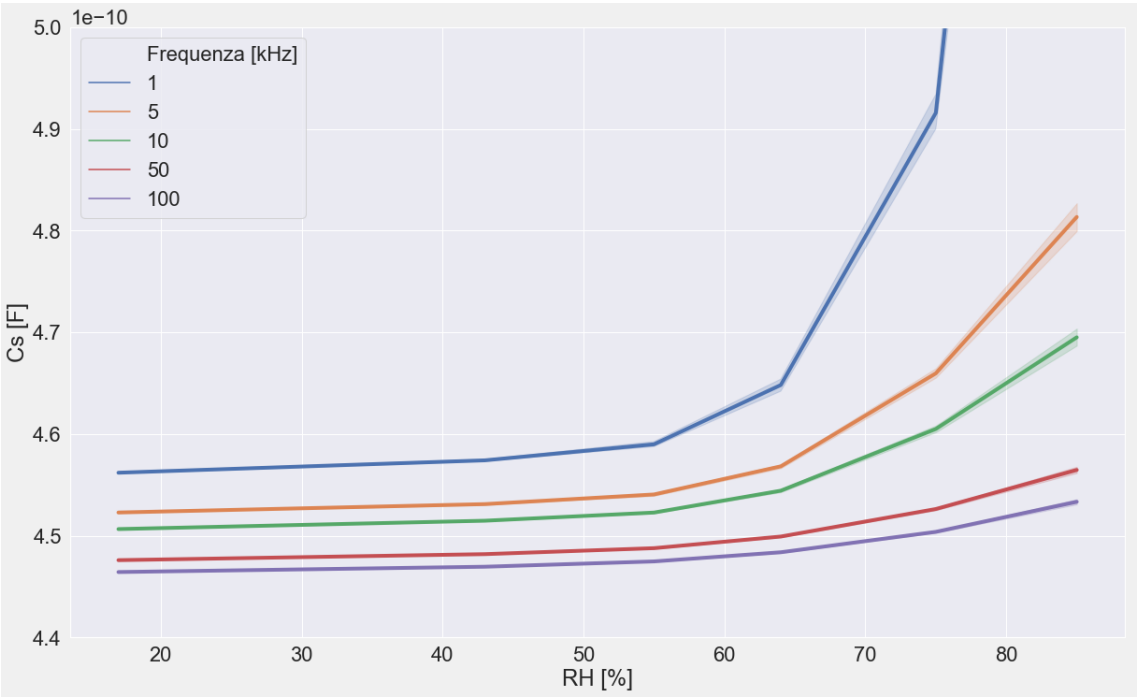


Figura 5.2: C_s @$T_1 = 50°C$

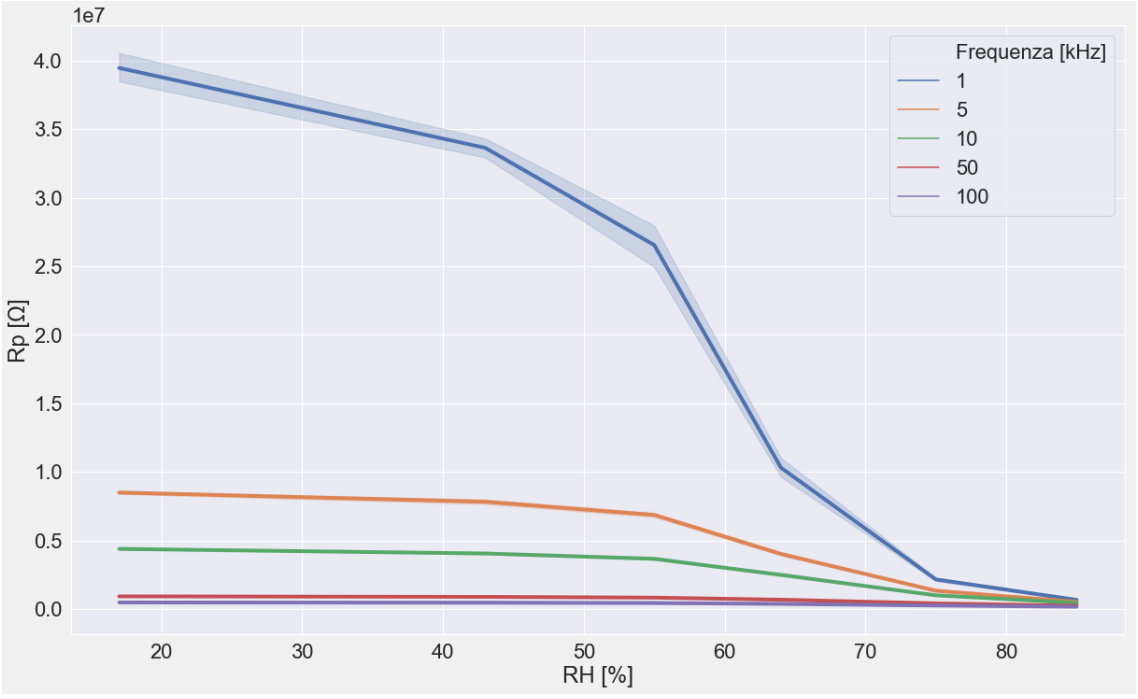


Figura 5.3: R_p @$T_1 = 50°C$

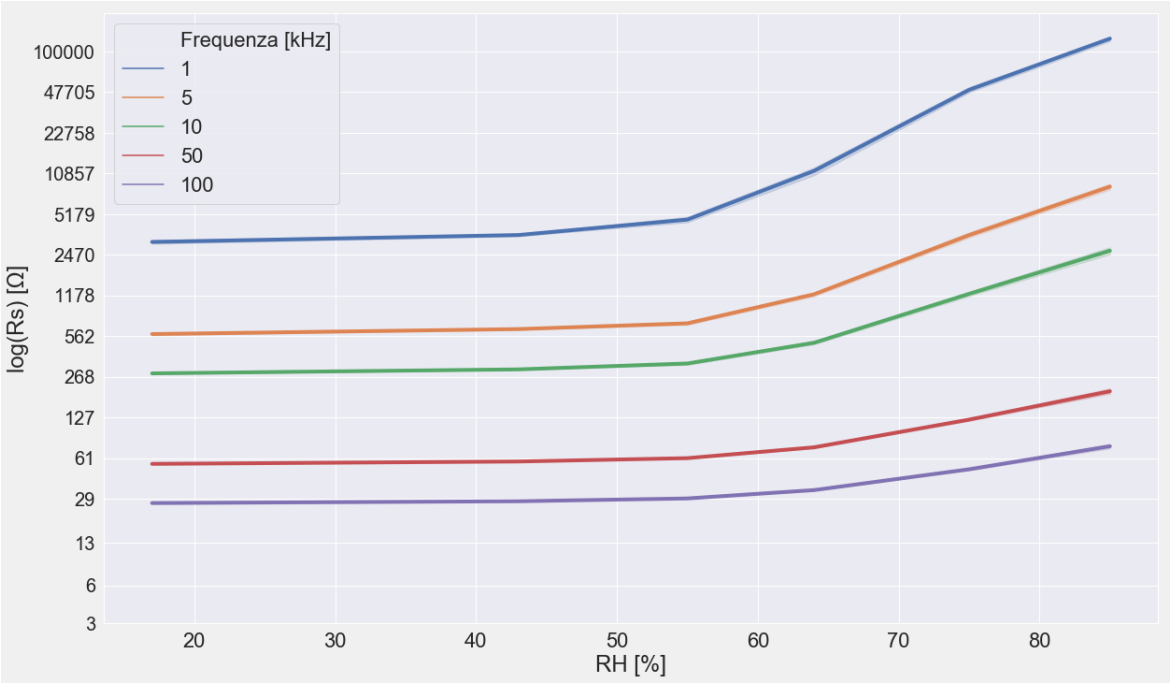


Figura 5.4: R_s @$T_1 = 50°\mathrm{C}$

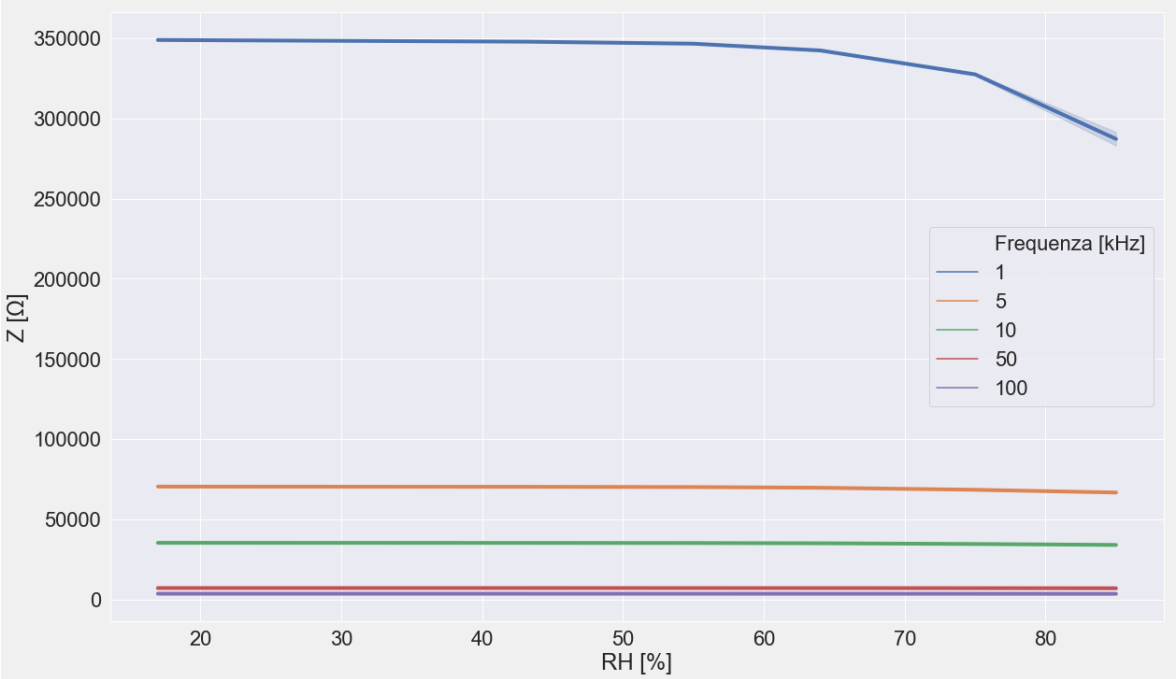


Figura 5.5: Z @$T_1 = 50°\mathrm{C}$

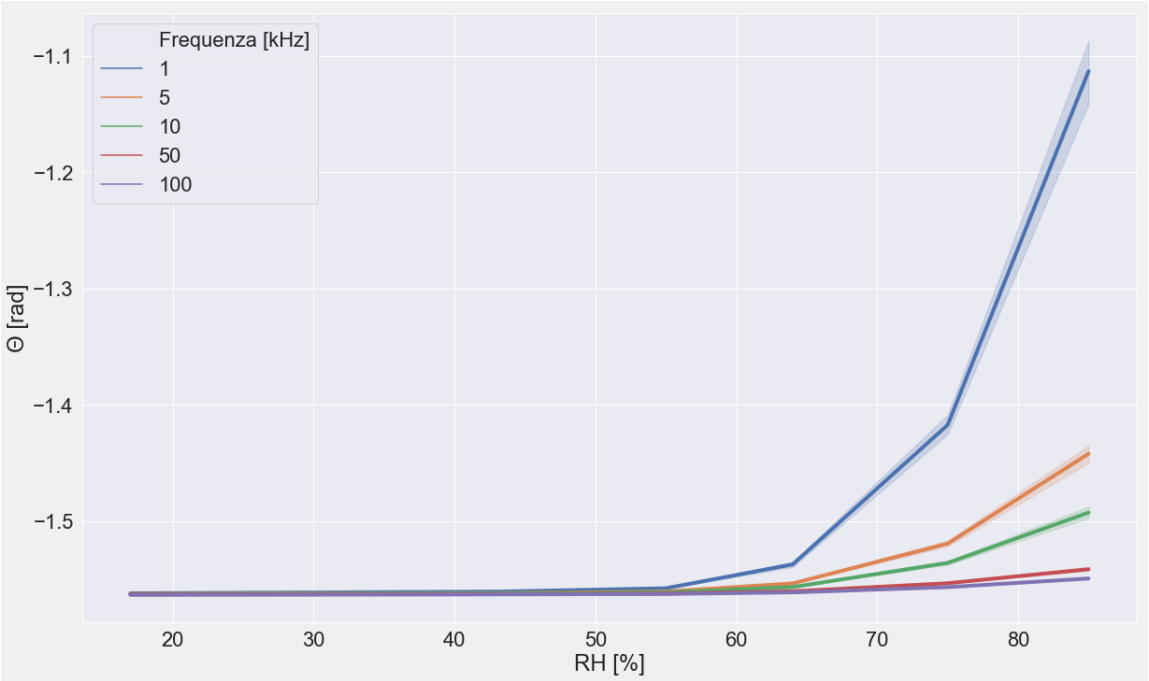


Figura 5.6: θ @$T_1 = 50°\text{C}$

Risultati per $T_2 = 70°\text{C}$

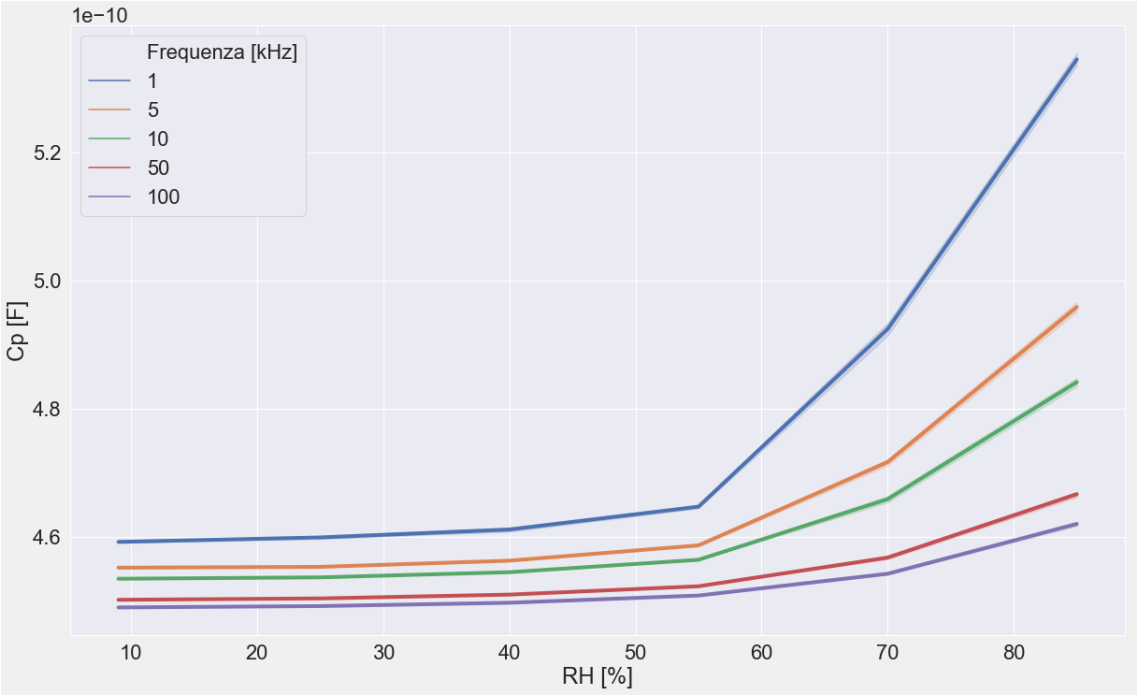


Figura 5.7: C_p @$T_2 = 70°\text{C}$

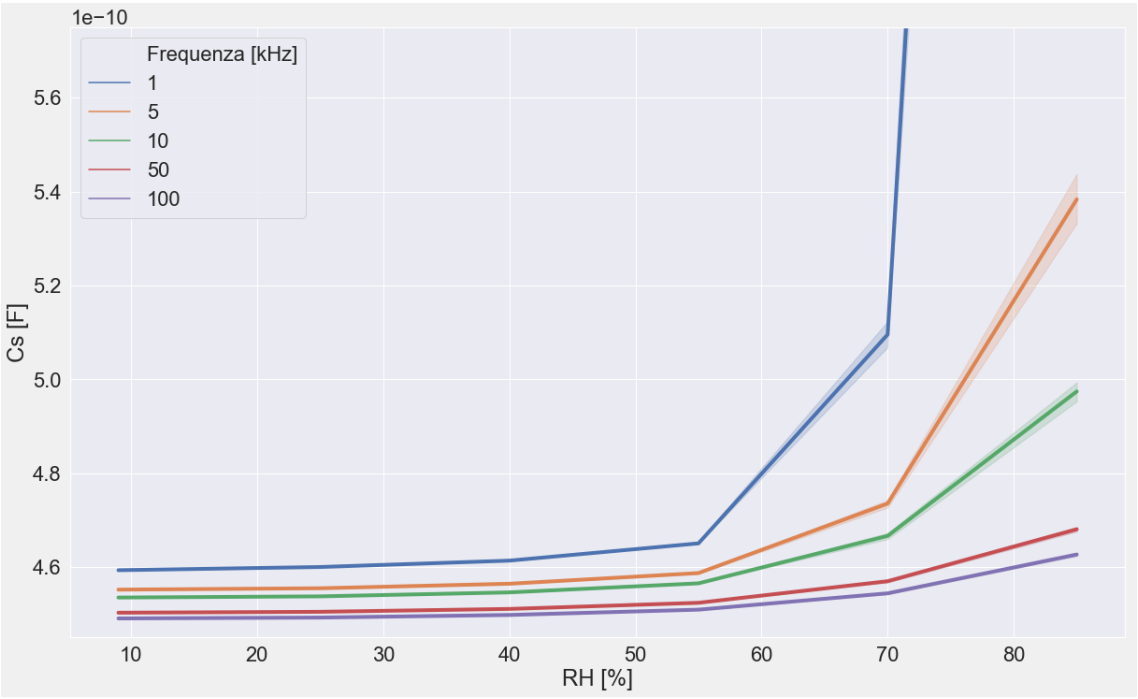


Figura 5.8: C_s @$T_2 = 70°C$

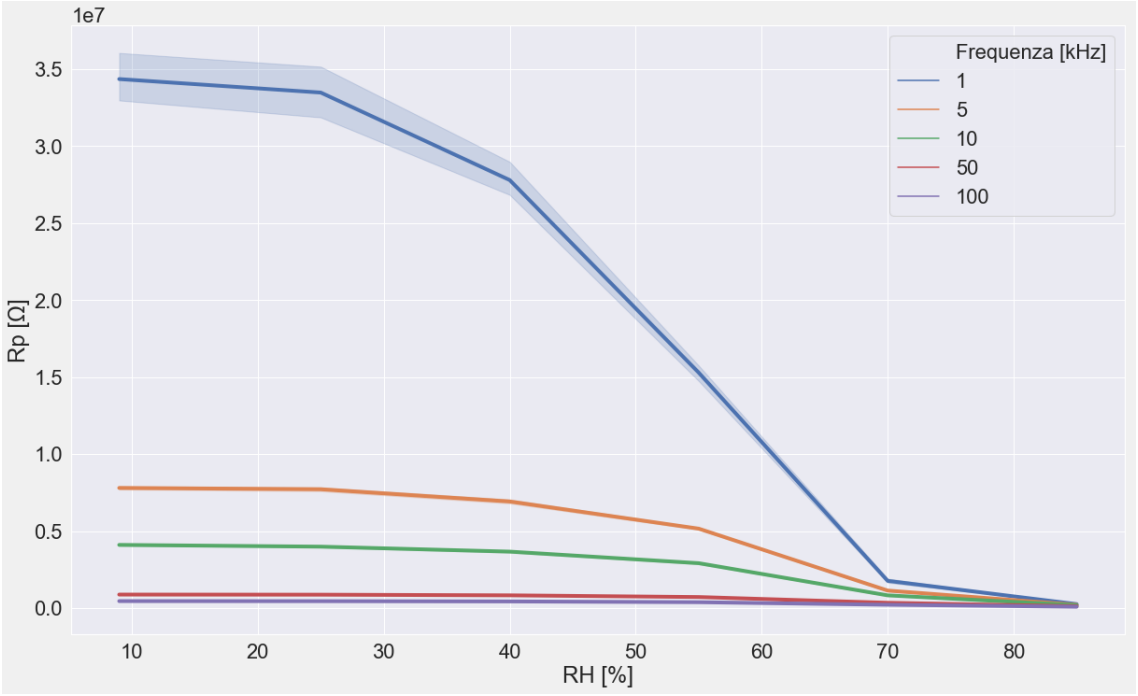


Figura 5.9: R_p @$T_2 = 70°C$

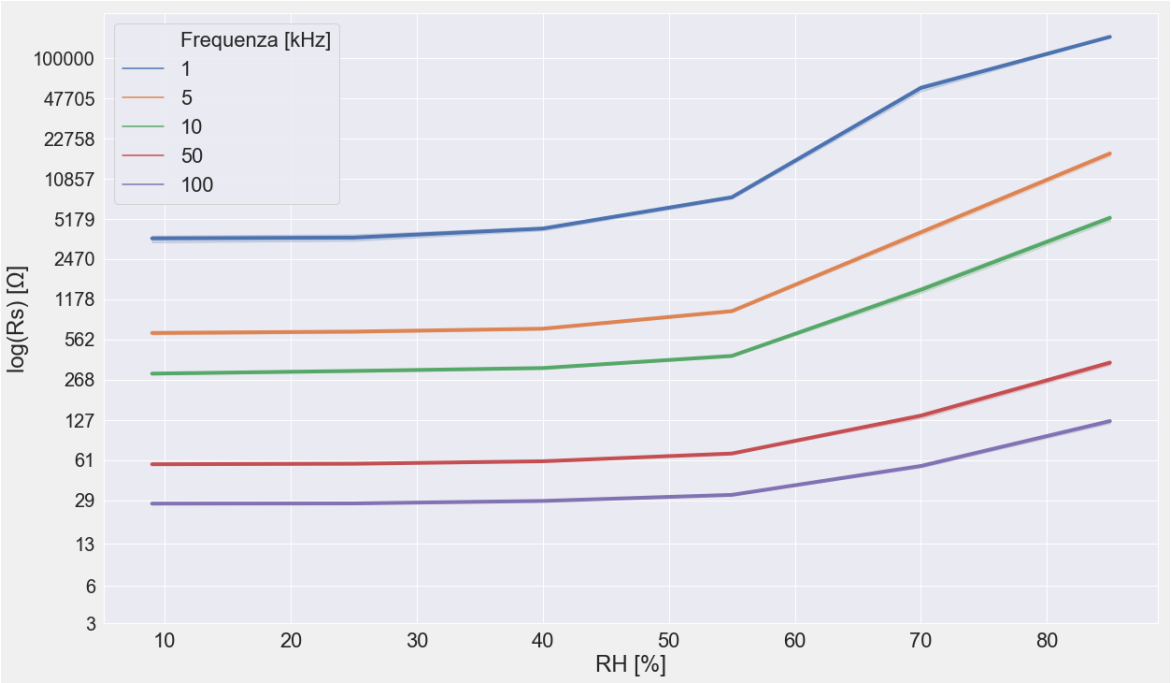


Figura 5.10: R_s @$T_2 = 70°\mathrm{C}$

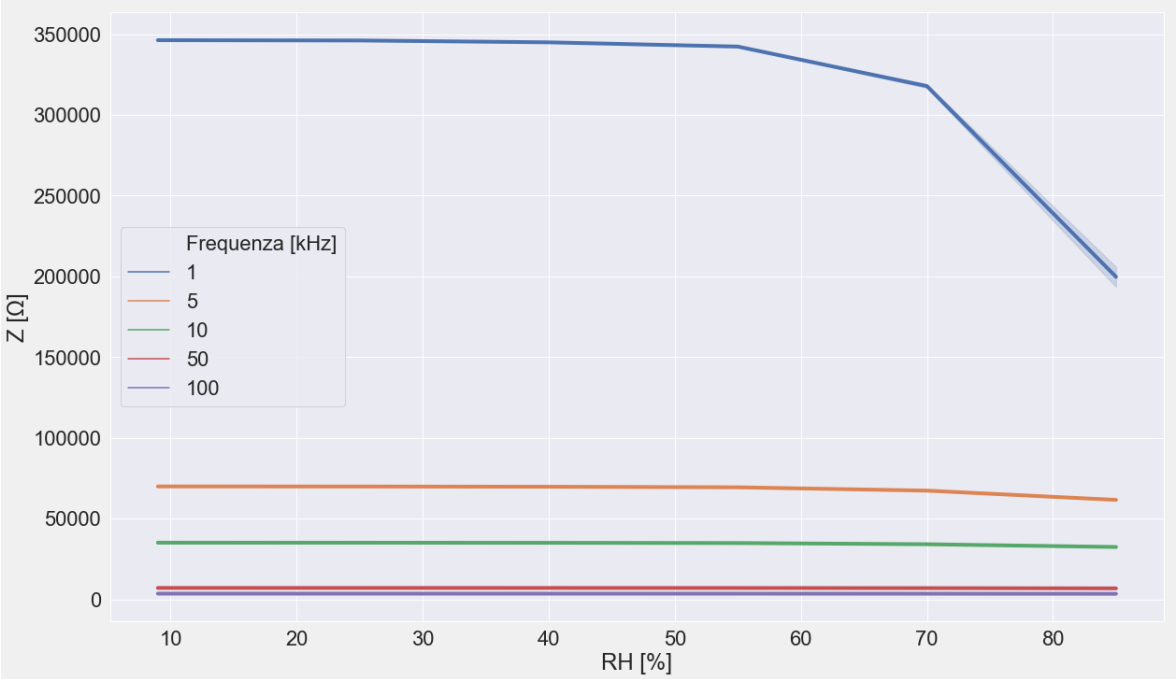


Figura 5.11: Z @$T_2 = 70°\mathrm{C}$

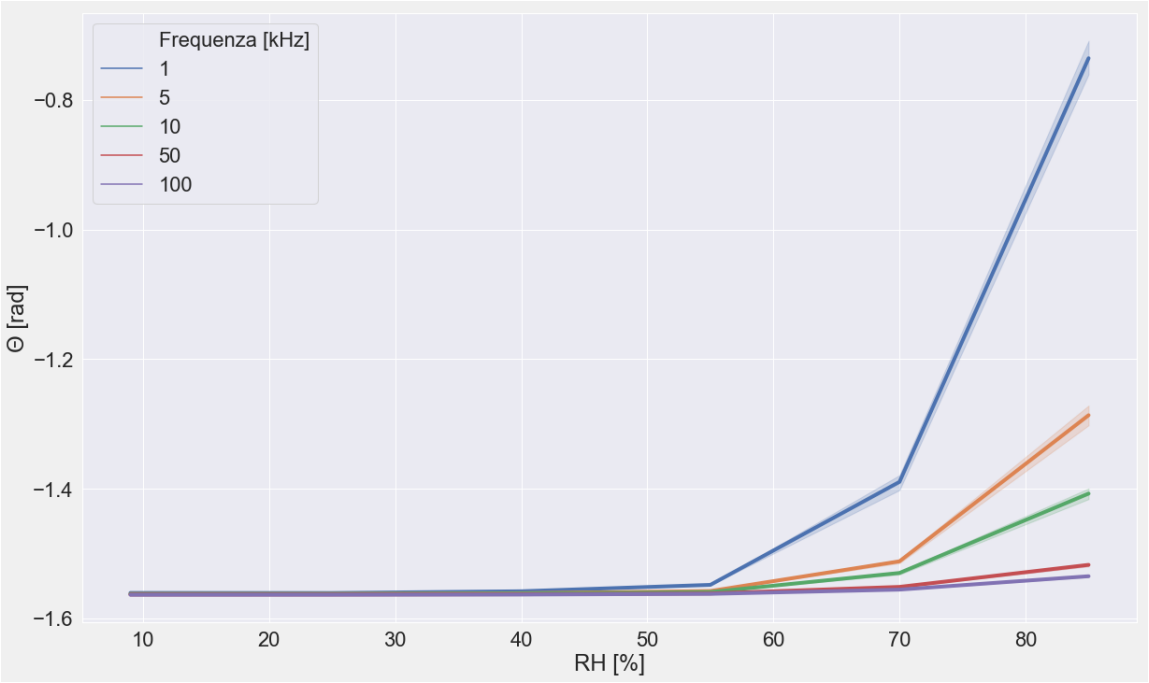


Figura 5.12: θ @$T_2 = 70°\text{C}$

Risultati per $T_3 = 80°\text{C}$

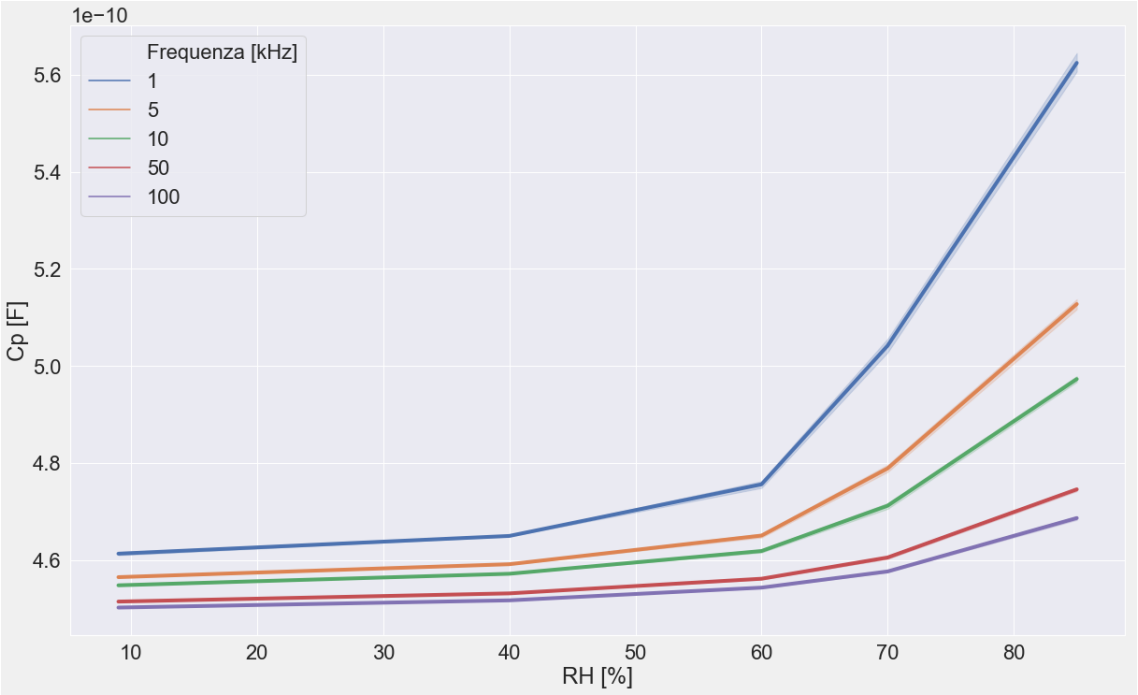


Figura 5.13: C_p @$T_3 = 80°\text{C}$

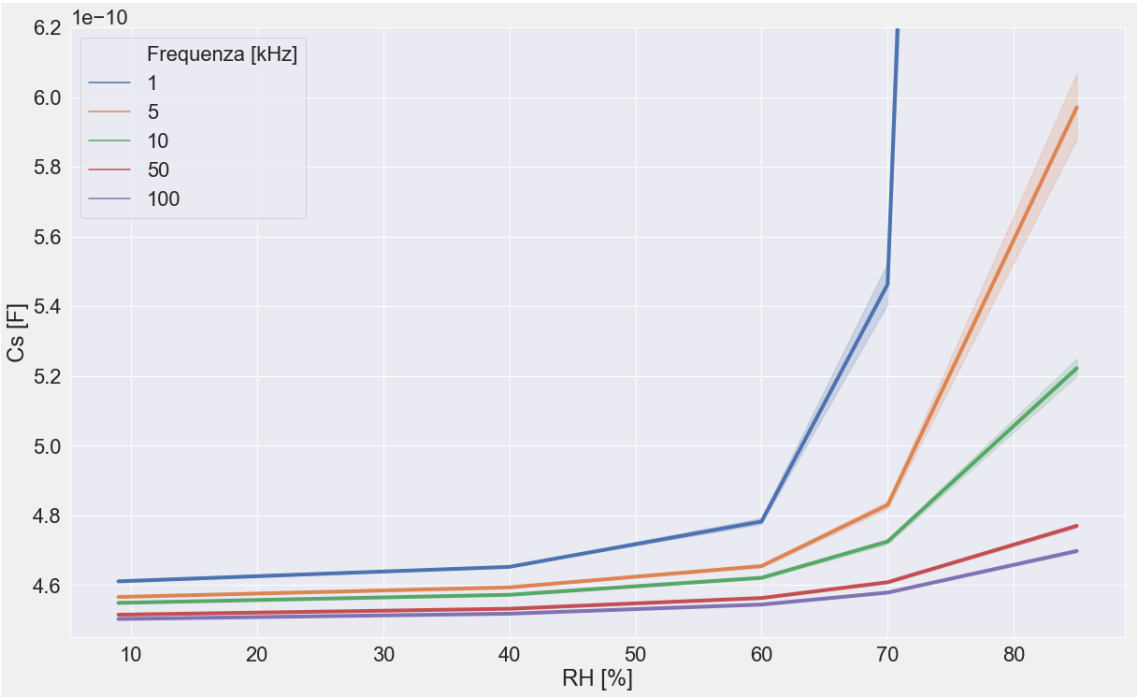


Figura 5.14: C_s @$T_3 = 80°C$

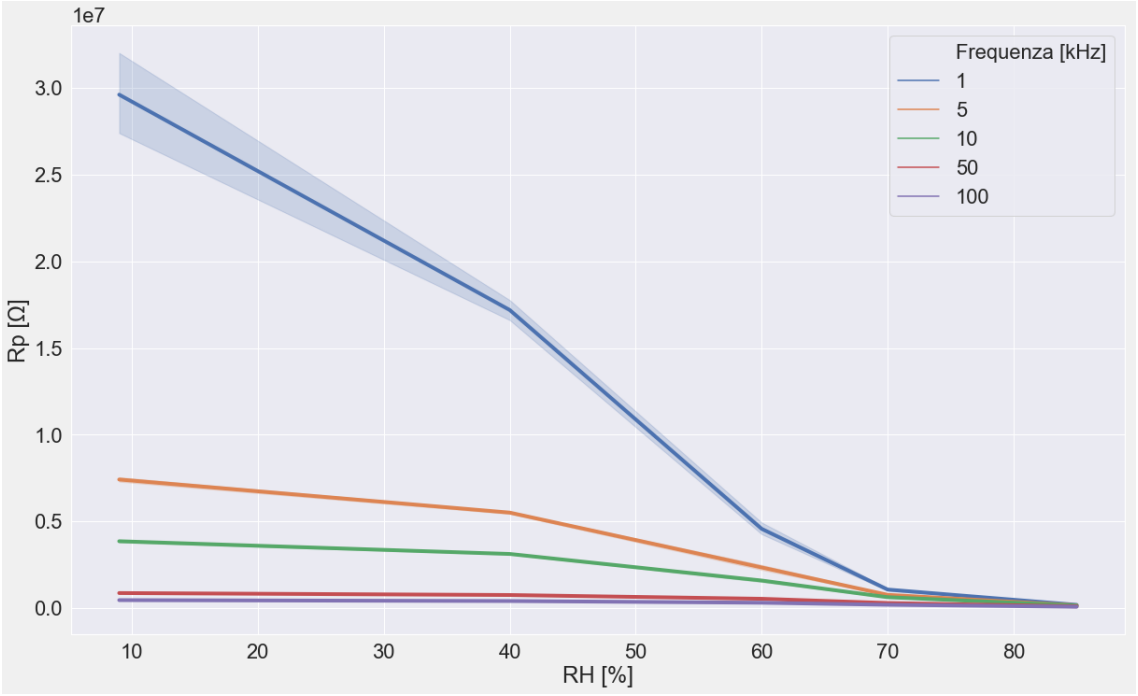


Figura 5.15: R_p @$T_3 = 80°C$

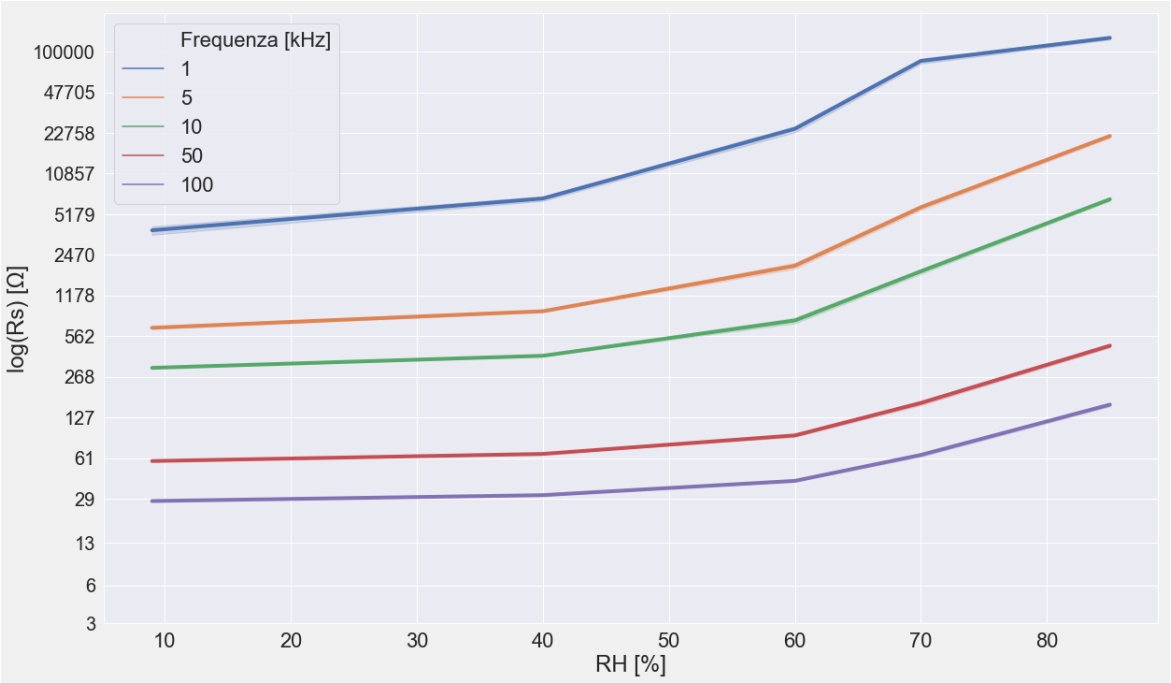


Figura 5.16: R_s @$T_3 = 80°C$

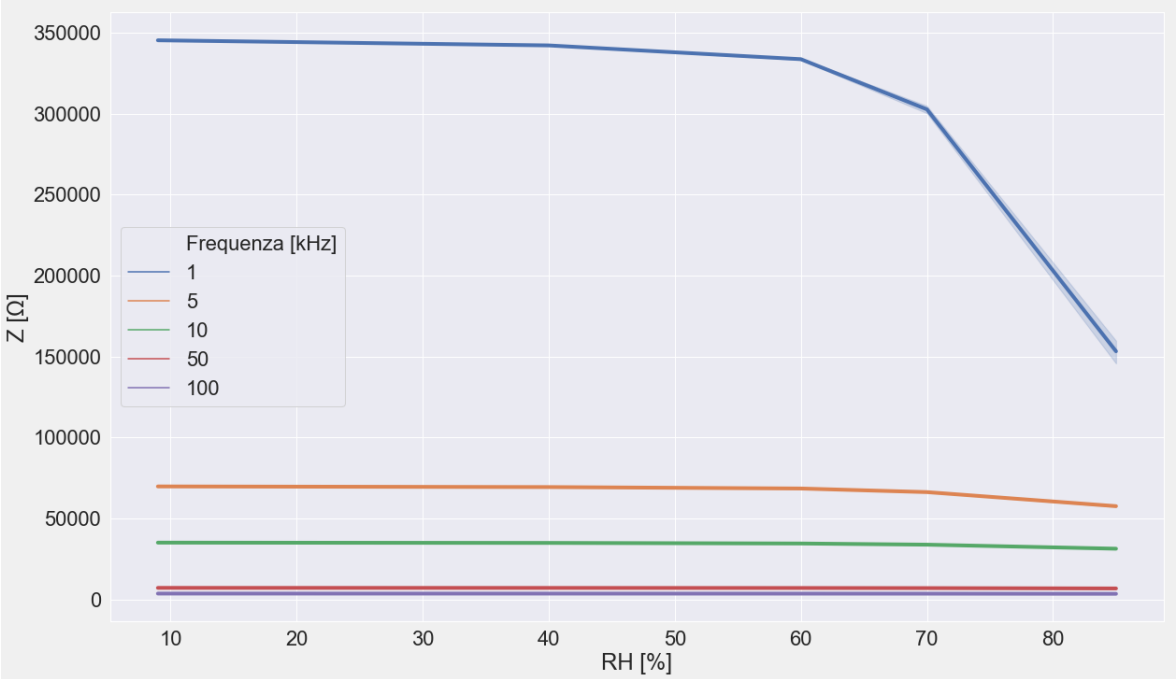


Figura 5.17: Z @$T_3 = 80°C$

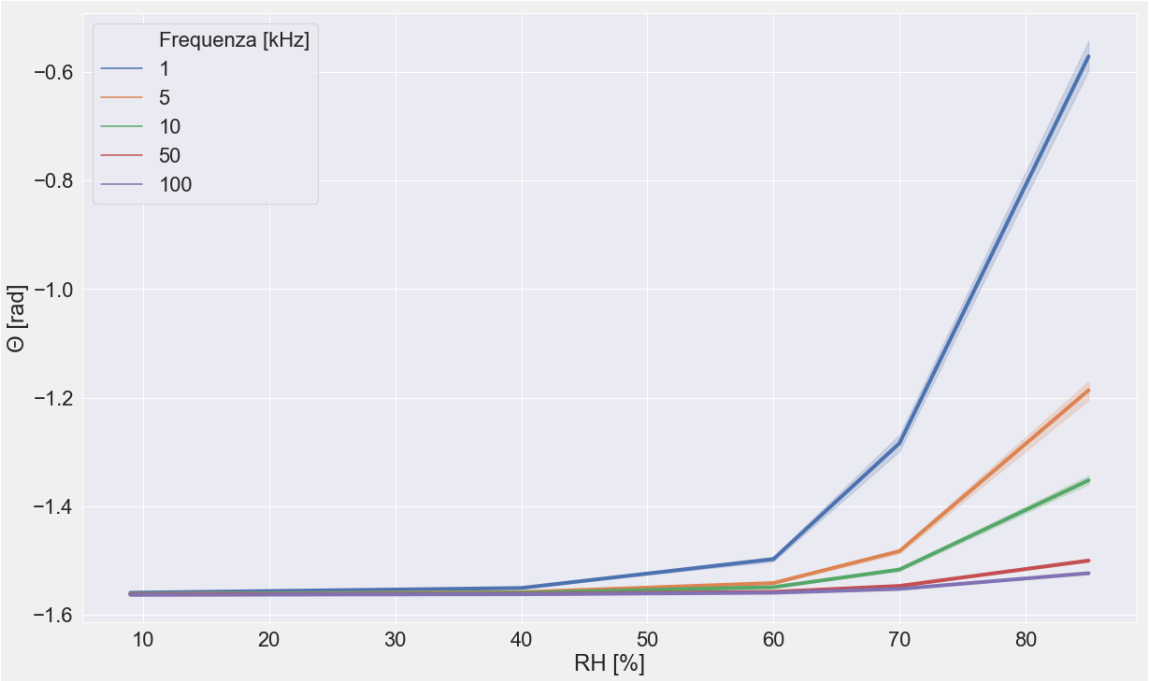


Figura 5.18: θ @$T_3 = 80°C$

Da un'analisi dei grafici si possono trarre le seguenti considerazioni:

- Per frequenze superiori a $10kHz$ la fase dell'impedenza resta nell'intorno dei -1.57 radianti, rispettando la natura capacitiva del sensore (si vedano Figure 5.6, 5.12 e 5.18)
- Il modulo dell'impendeza resta praticamente costante per ogni valore di RH e frequenza (Figure 5.5, 5.11 e 5.17)
- La resistenza parallelo R_p (che può essere vista come un ulteriore indicatore della qualità del condensatore) ha un andamento descrescente all'aumentare della RH, pur mantenendo valori piuttosto elevati (Figure 5.3, 5.9 e 5.15)
- I due valori di capacità hanno un andamento crescente all'aumentare dell'umidità relativa (Figure 5.1, 5.7, 5.13, 5.2, 5.8 e 5.14). Questo risultato è il più interessante e sta a significare che il modello teorico è in accordo con il comportamento reale del sensore

A seguito di queste osservazioni è utile concentrarsi su una grandezza per volta e plottare il suo andamento in funzione dell'umidità relativa e delle diverse temperature. Anche in questo caso si è deciso di considerare solo un set ristretto di frequenze per non appesantire troppo i grafici.

Capacità Parallelo C_p

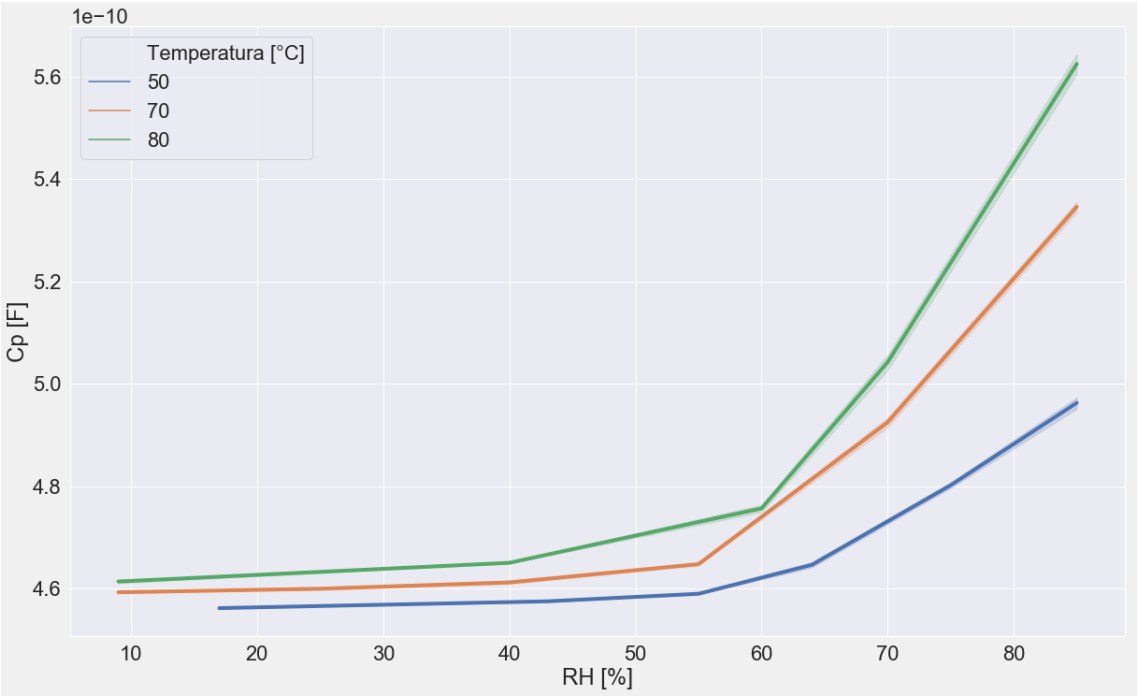


Figura 5.19: C_p, $f = 1kHz$

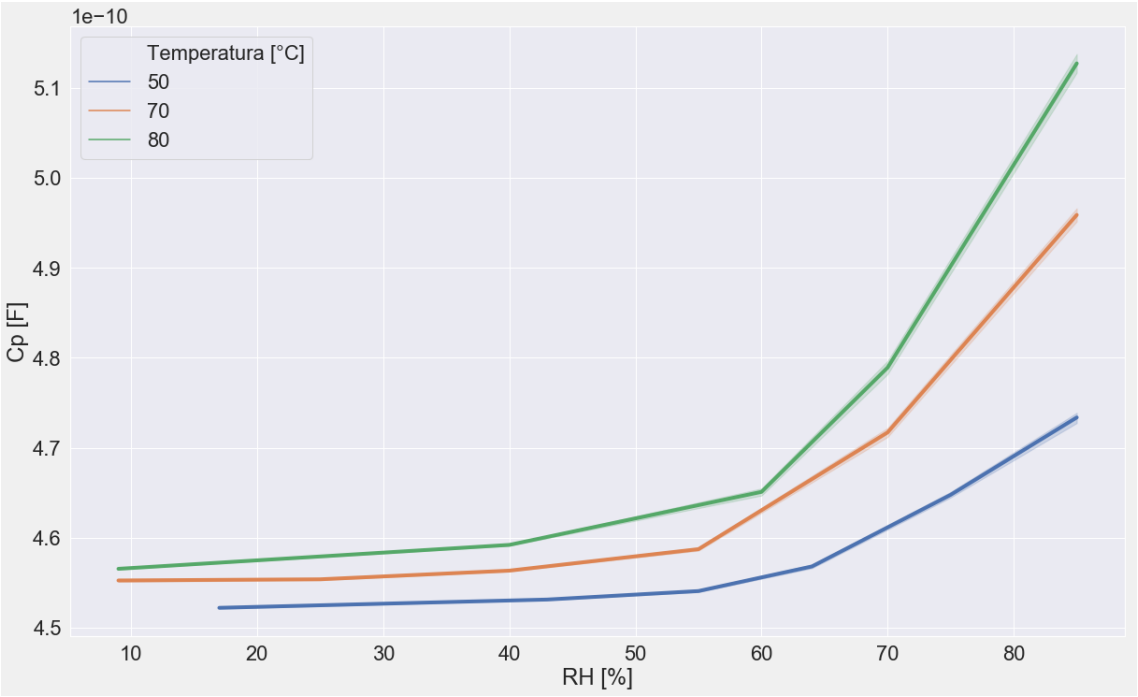


Figura 5.20: C_p, $f = 5kHz$

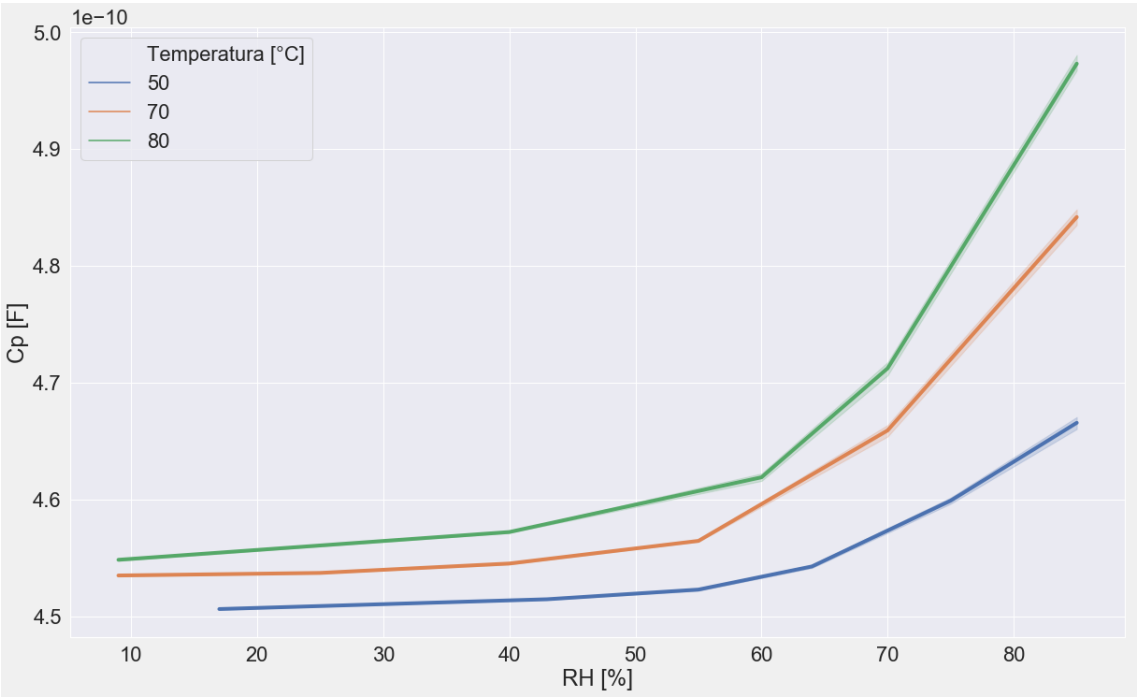


Figura 5.21: C_p, $f = 10kHz$

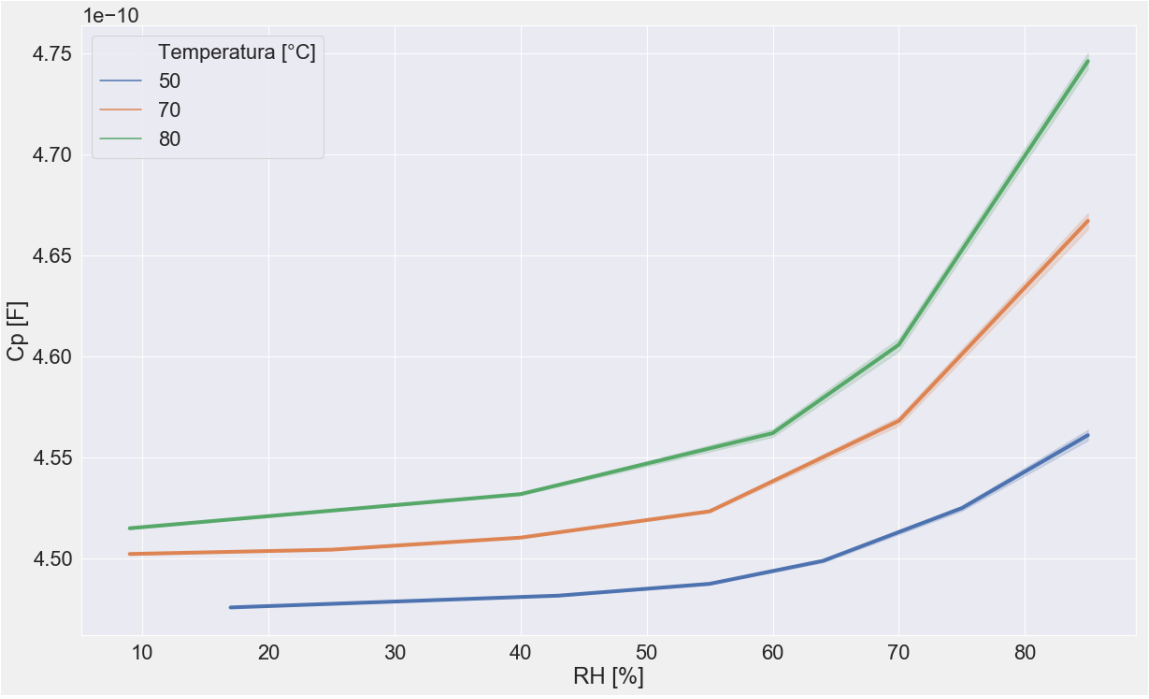


Figura 5.22: C_p, $f = 50kHz$

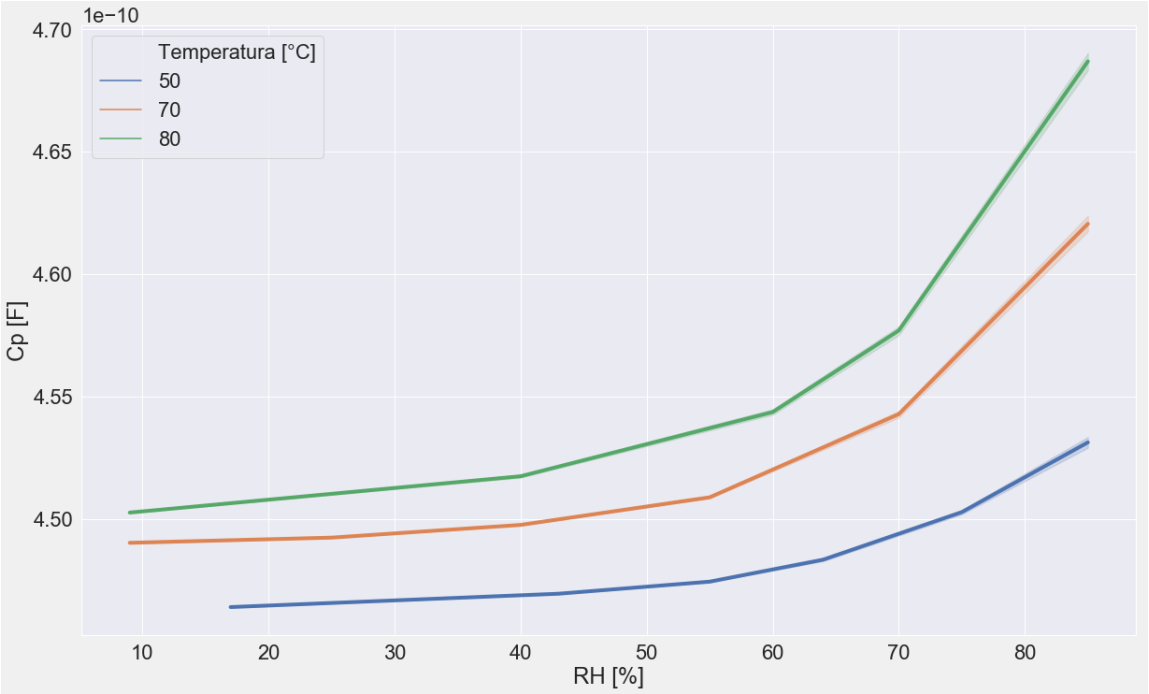


Figura 5.23: C_p, $f = 100kHz$

Capacità Serie C_s

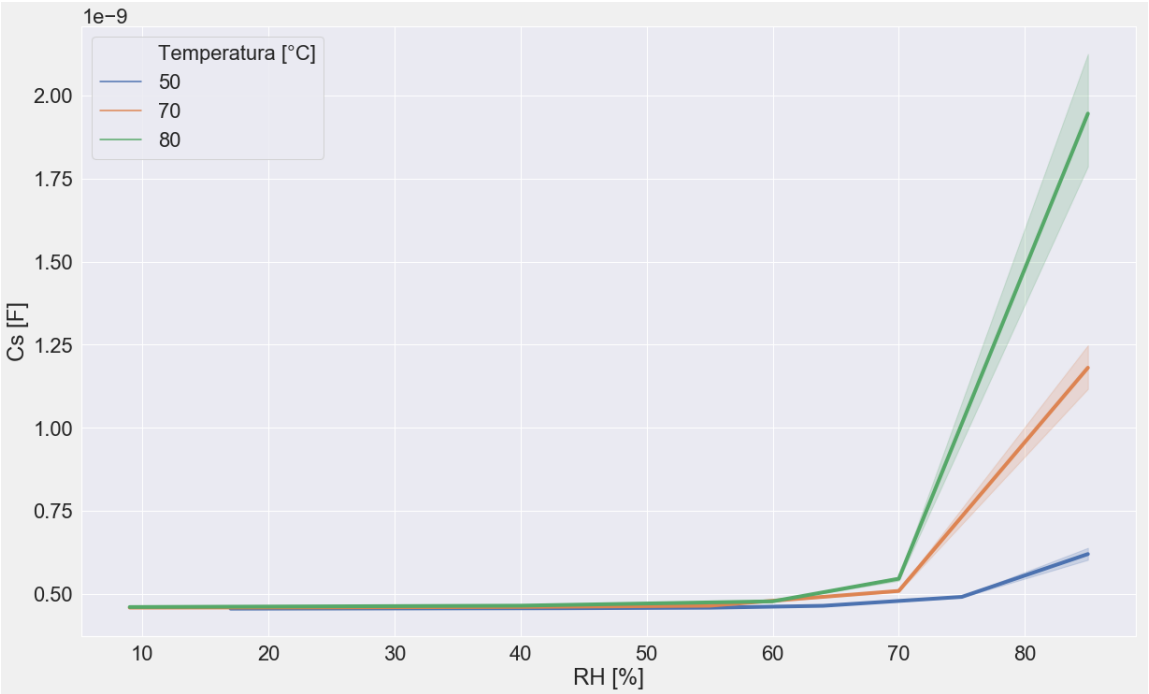


Figura 5.24: C_s, $f = 1kHz$

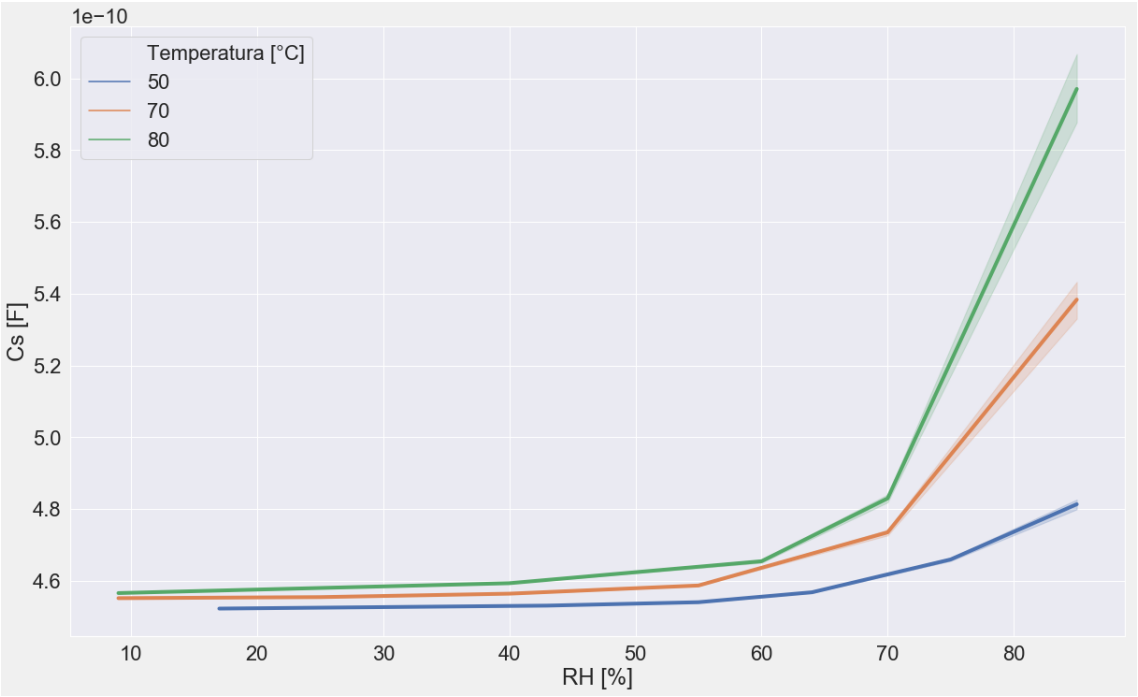


Figura 5.25: C_s, $f = 5kHz$

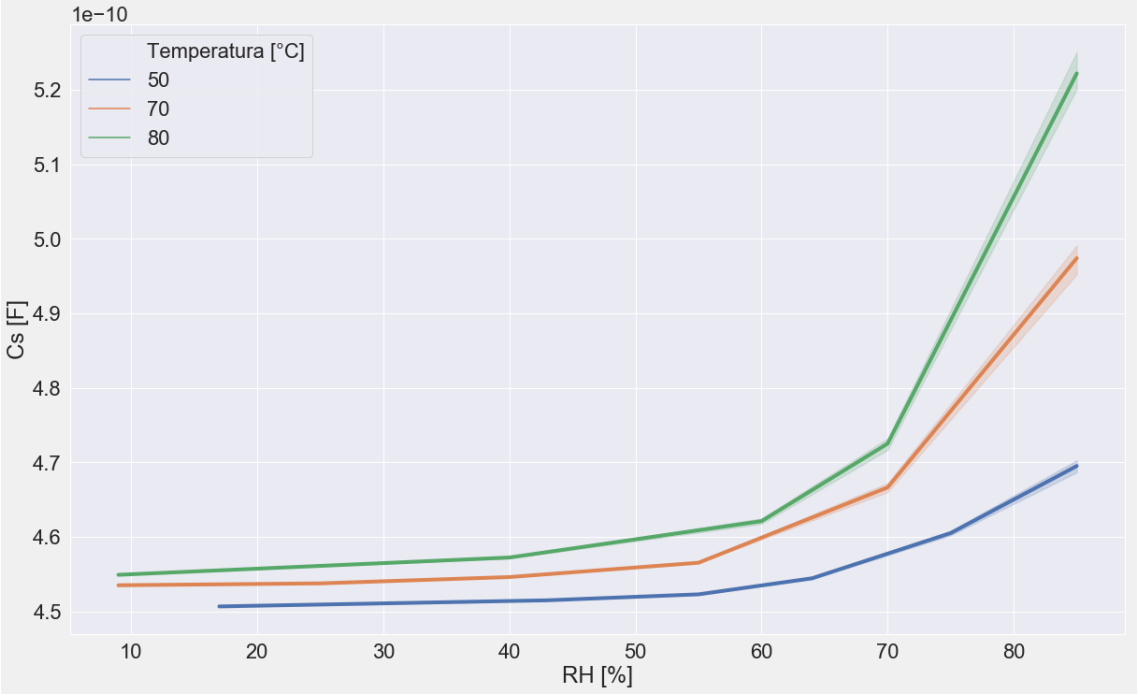


Figura 5.26: C_s, $f = 10kHz$

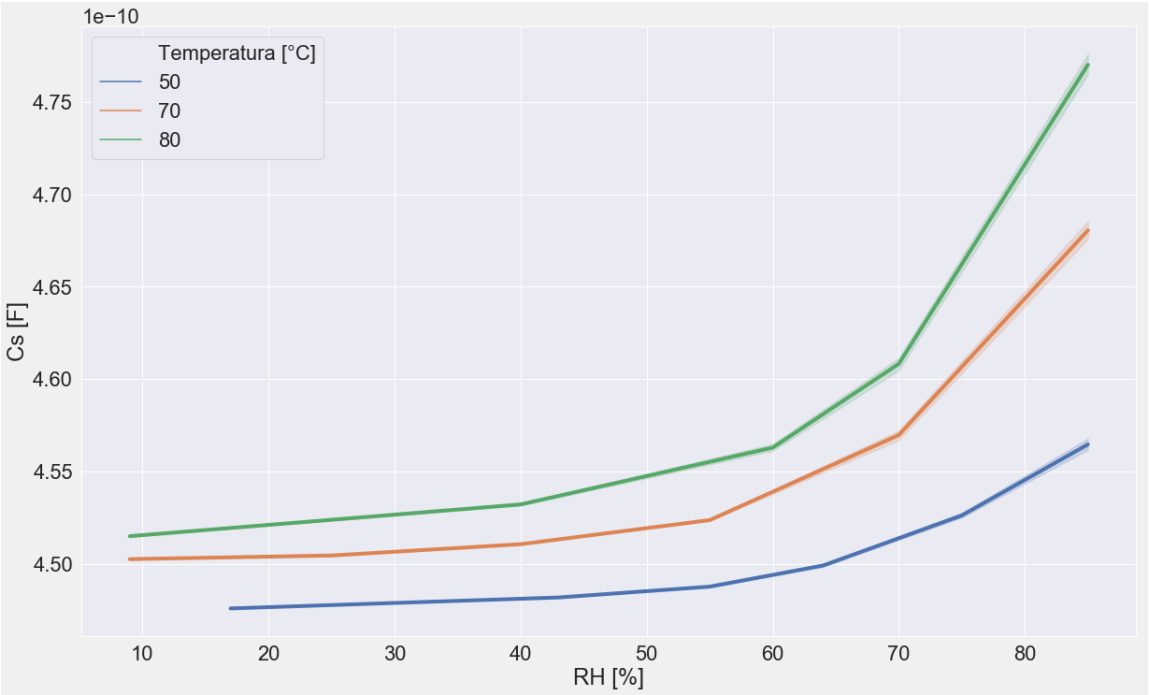


Figura 5.27: C_s, $f = 50kHz$

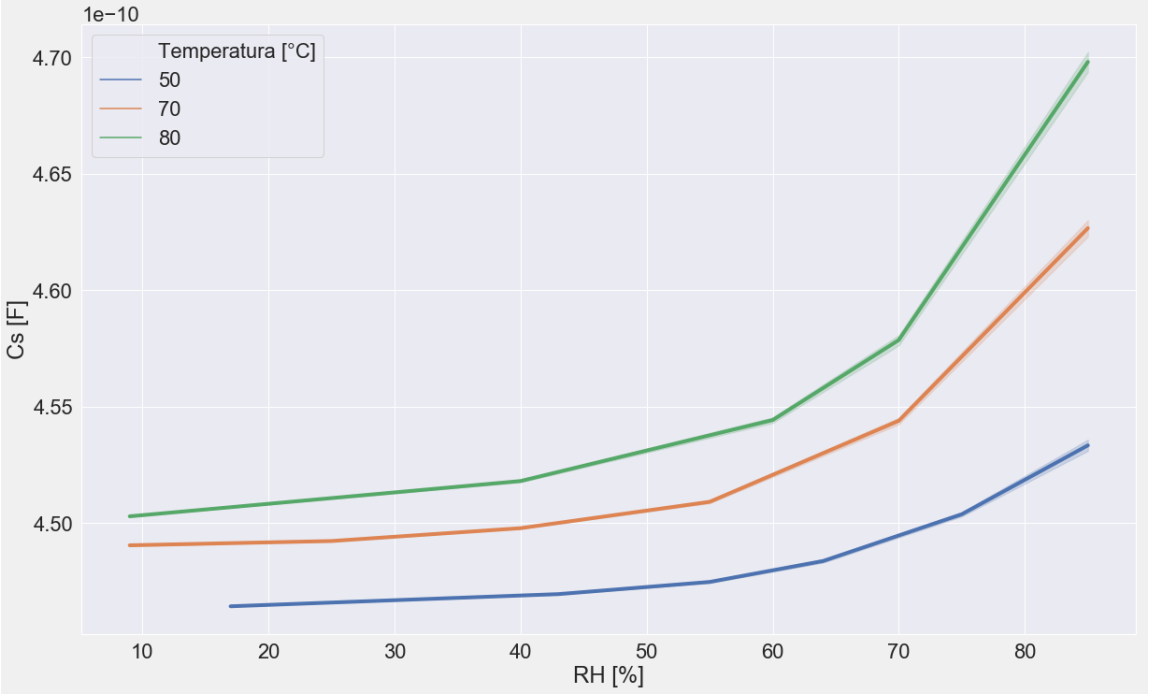


Figura 5.28: C_s, $f = 100kHz$

Resistenza parallelo R_p

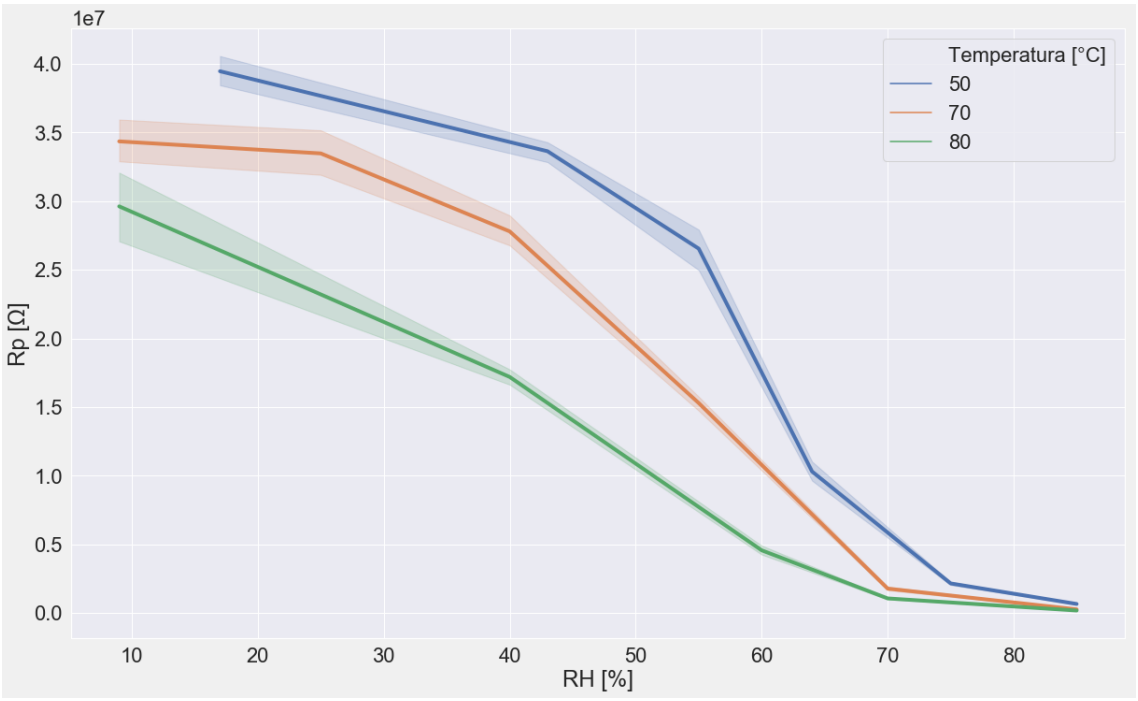


Figura 5.29: R_p, $f = 1kHz$

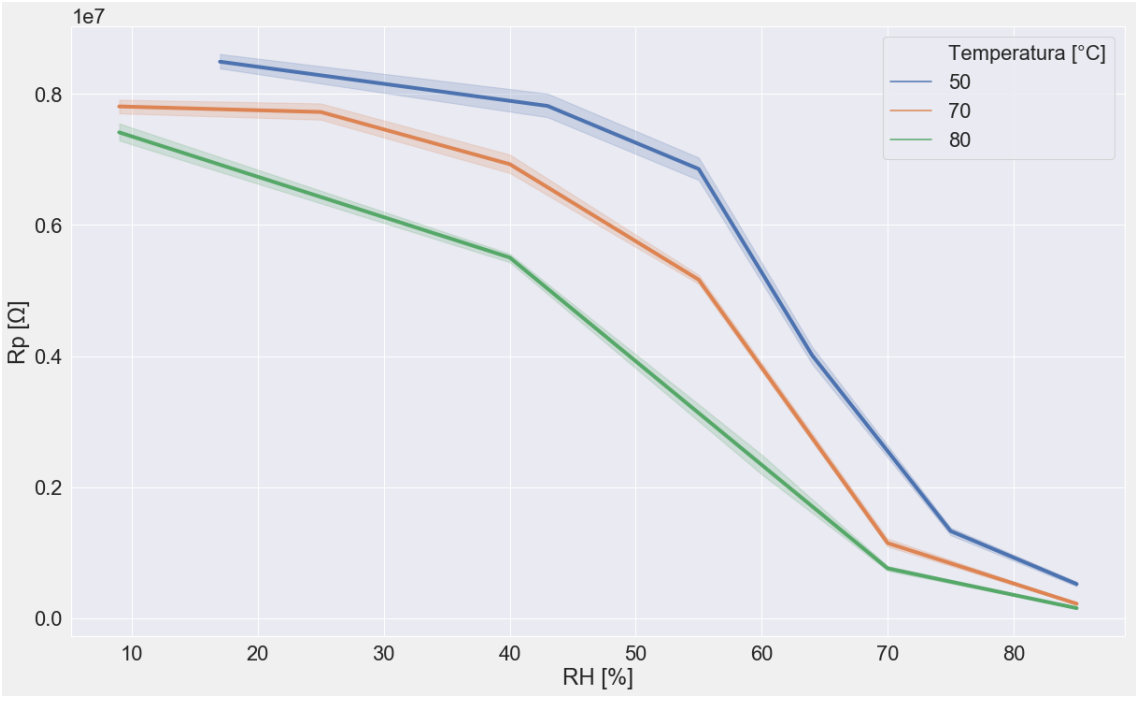


Figura 5.30: R_p, $f = 5kHz$

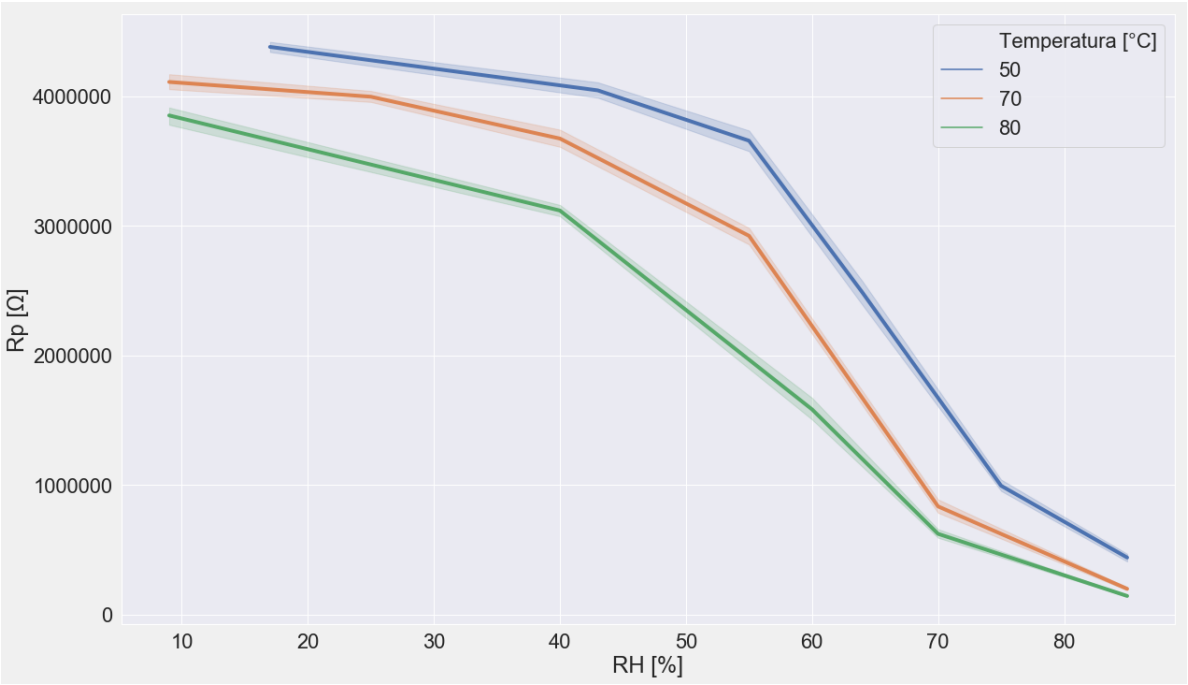


Figura 5.31: R_p, $f = 10kHz$

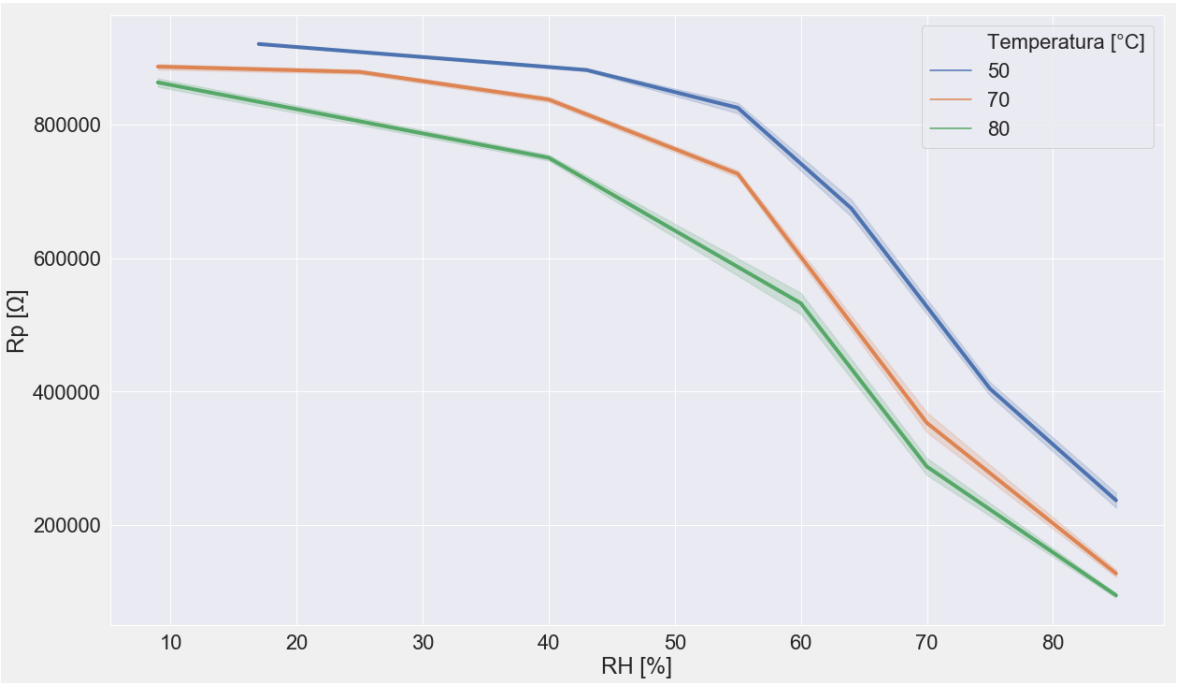


Figura 5.32: R_p, $f = 50kHz$

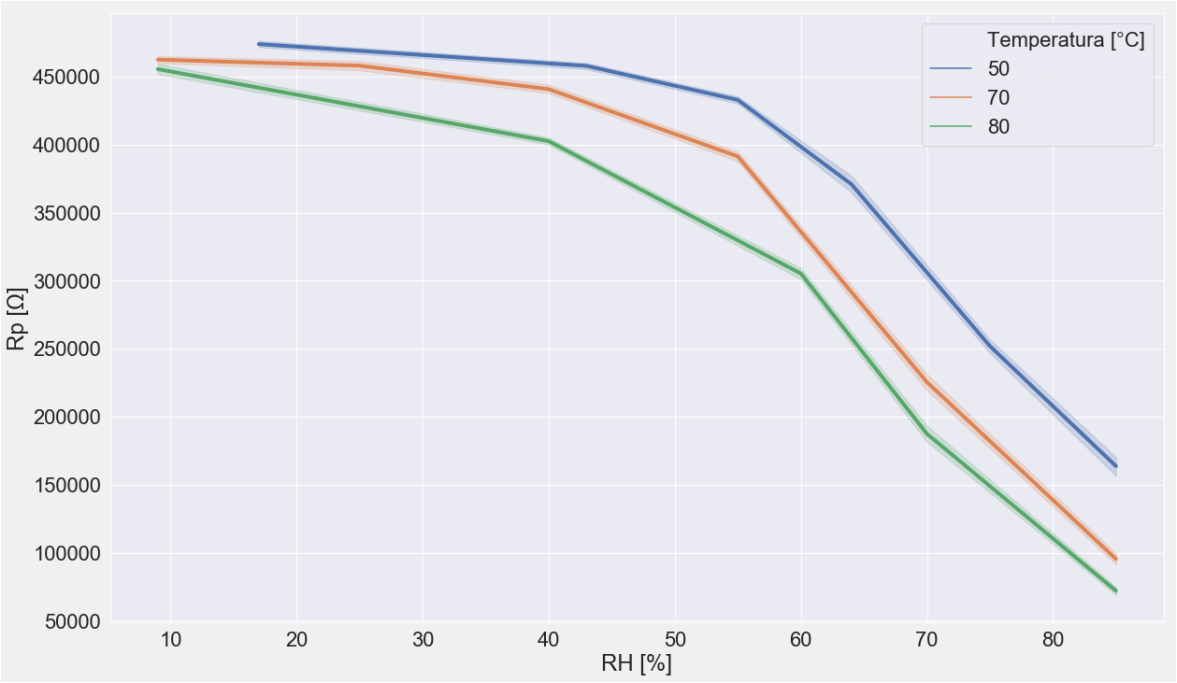


Figura 5.33: R_p, $f = 100kHz$

Resistenza serie R_s

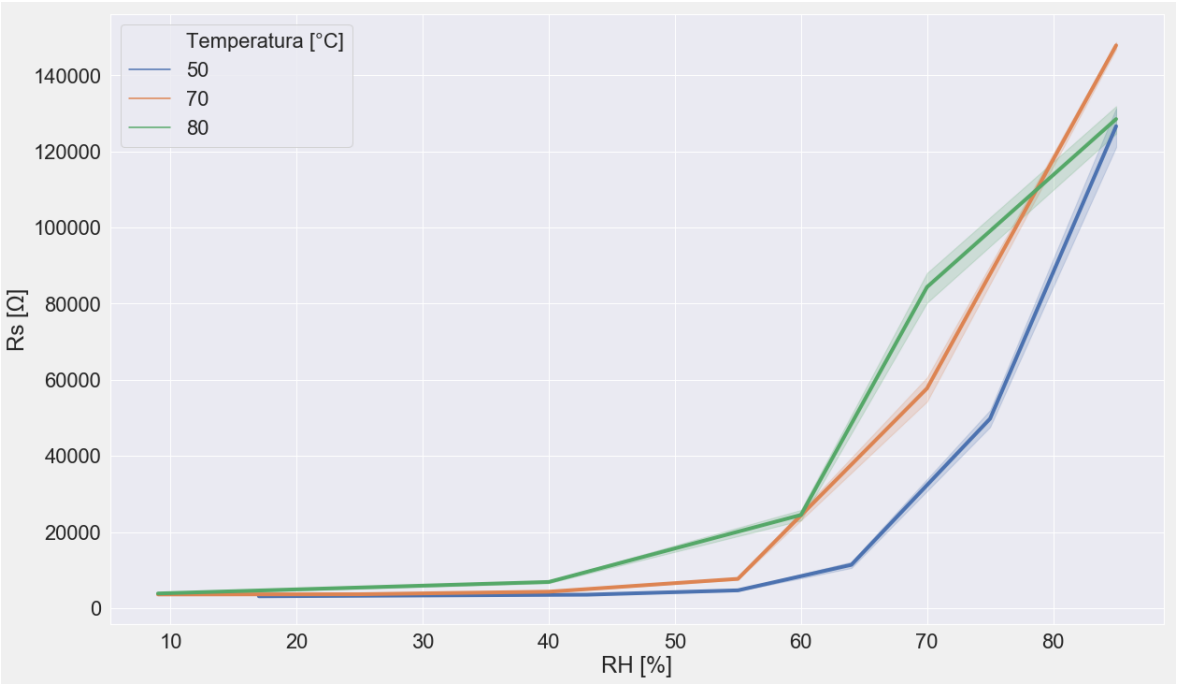


Figura 5.34: R_s, $f = 1kHz$

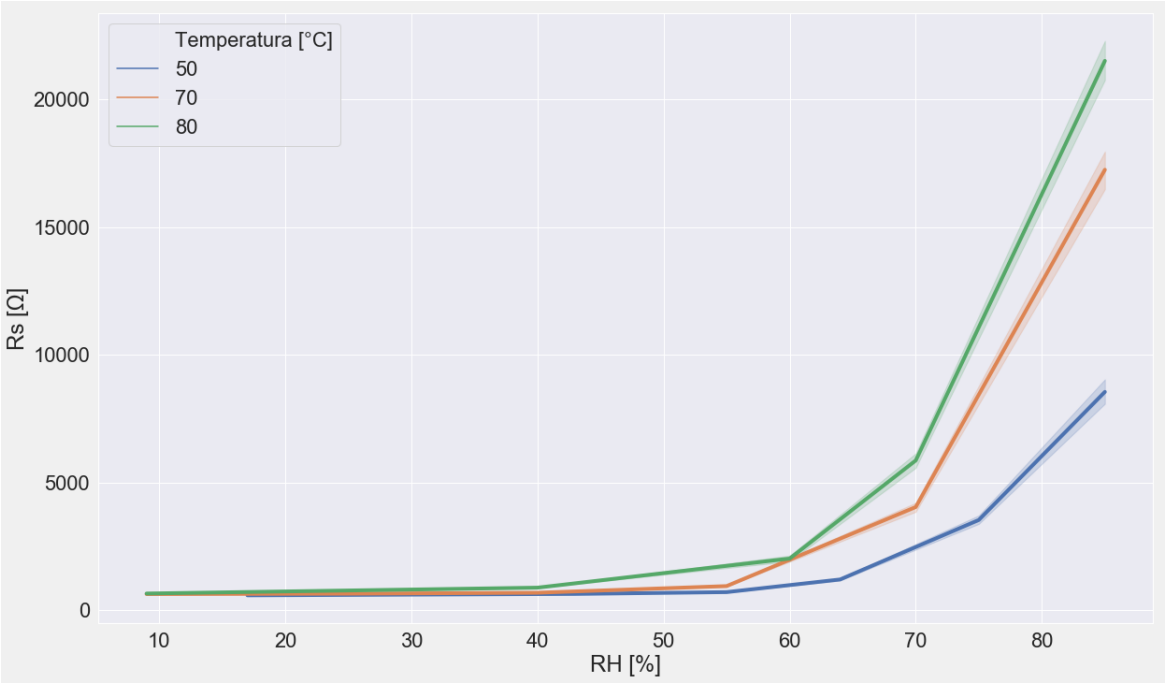


Figura 5.35: R_s, $f = 5kHz$

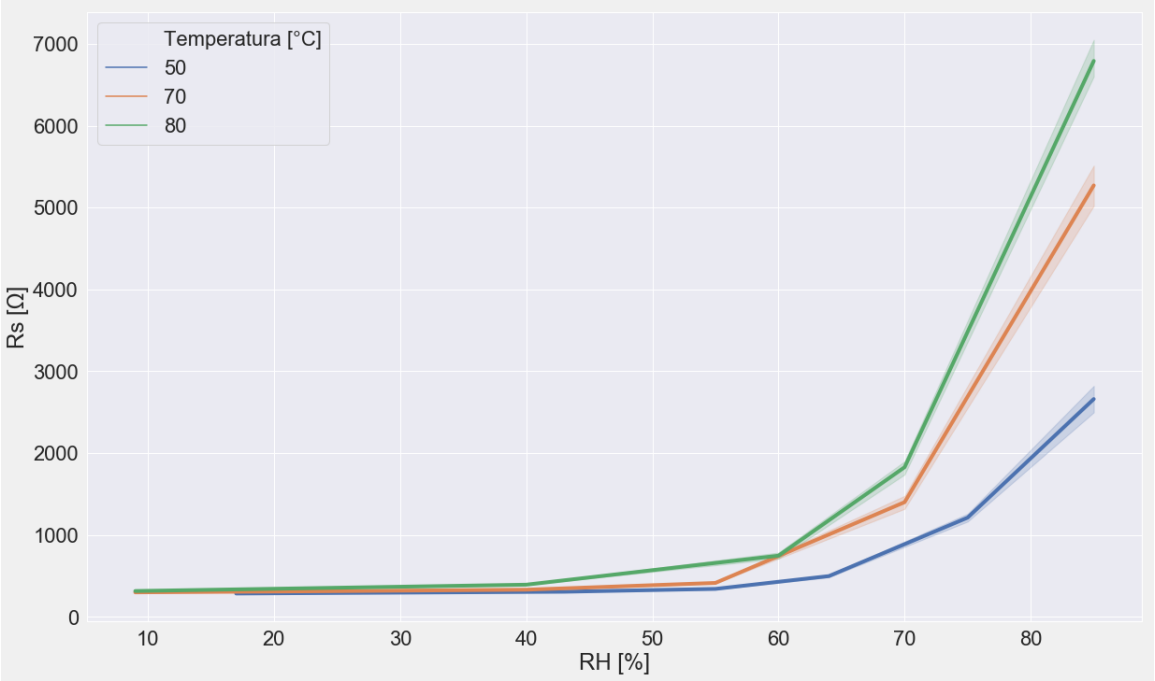


Figura 5.36: R_s, $f = 10kHz$

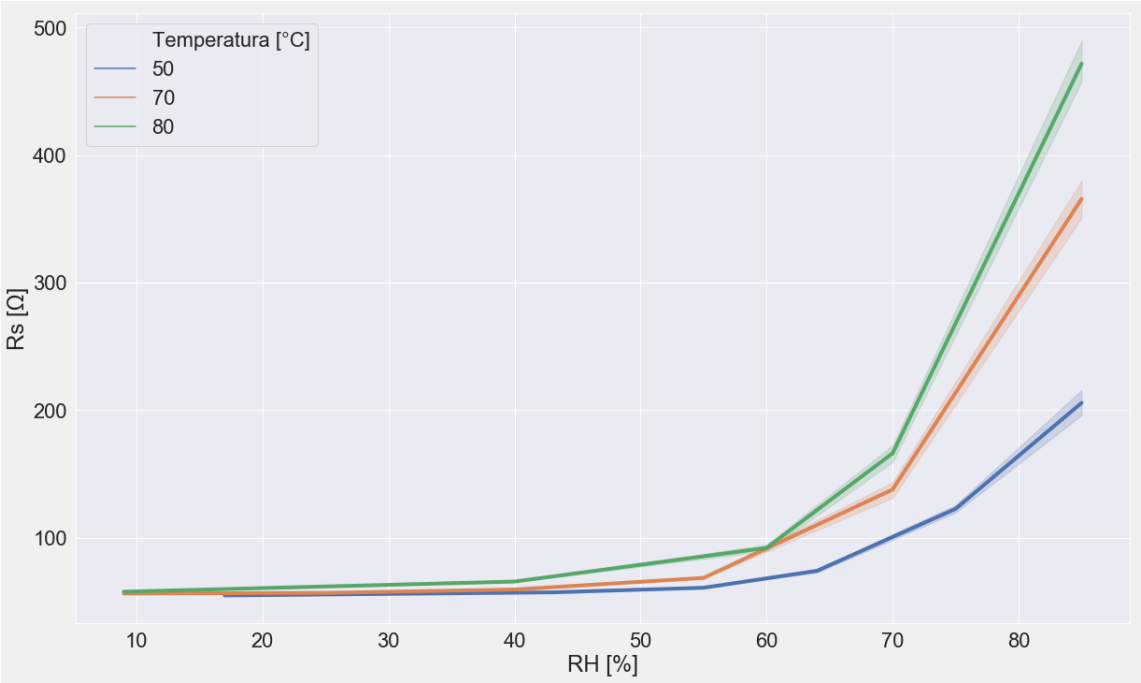


Figura 5.37: R_s, $f = 50kHz$

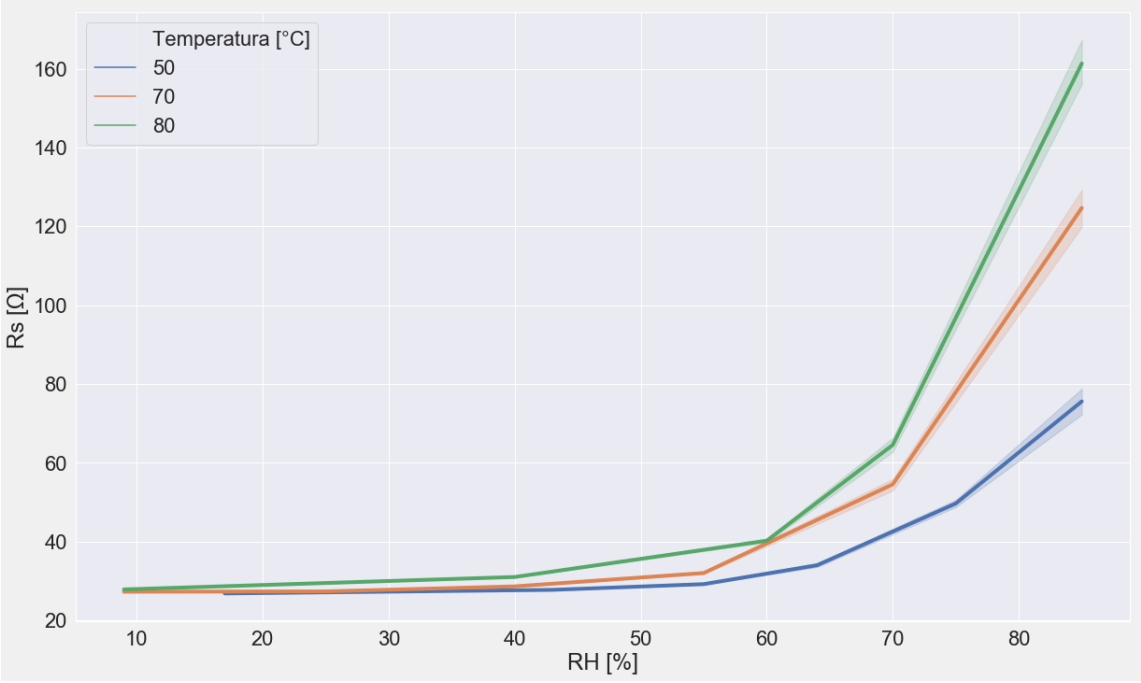


Figura 5.38: R_s, $f = 100kHz$

Modulo Impendenza Z

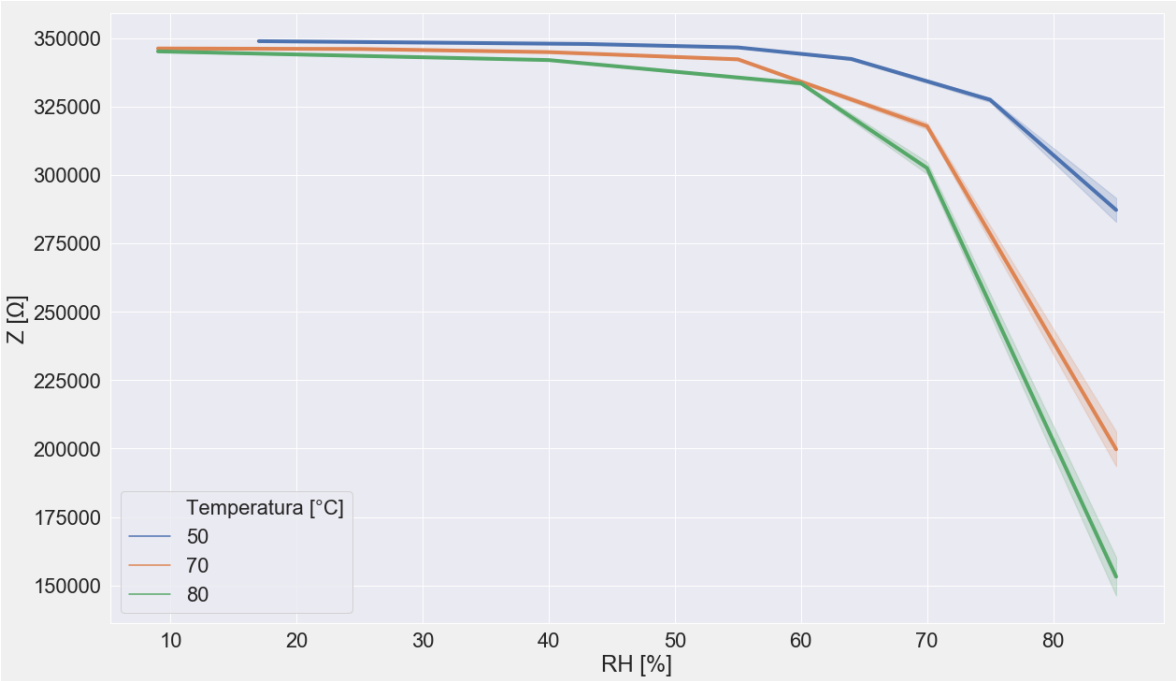


Figura 5.39: Z, $f = 1kHz$

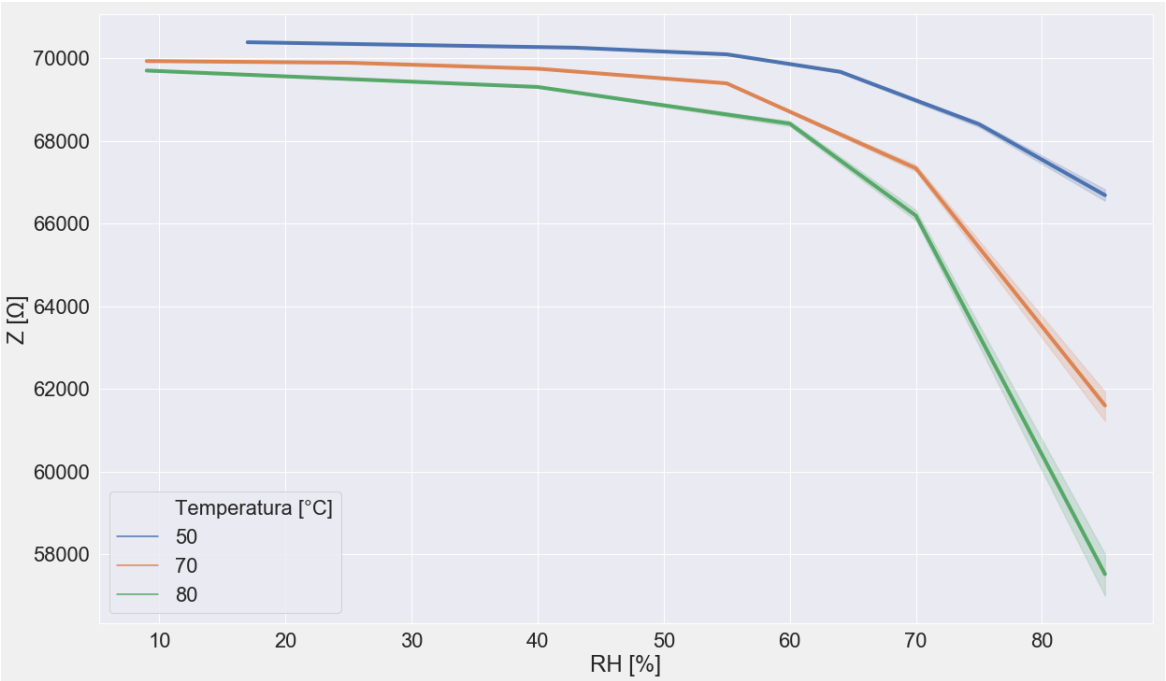


Figura 5.40: Z, $f = 5kHz$

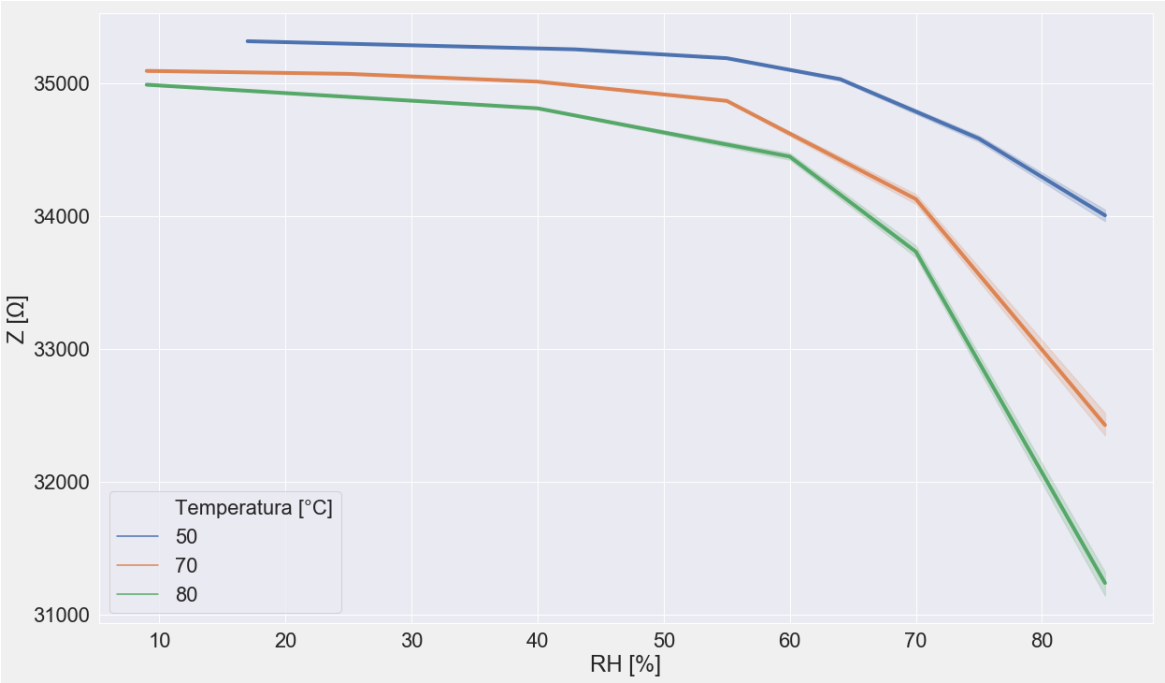


Figura 5.41: Z, $f = 10kHz$

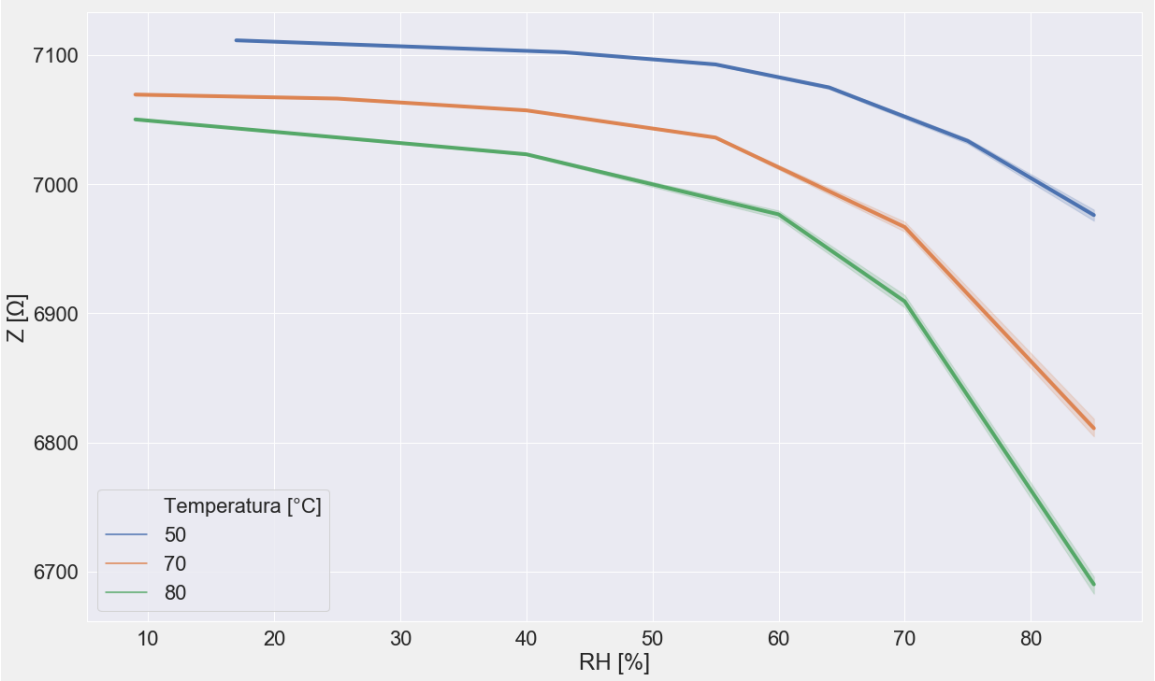


Figura 5.42: Z, $f = 50kHz$

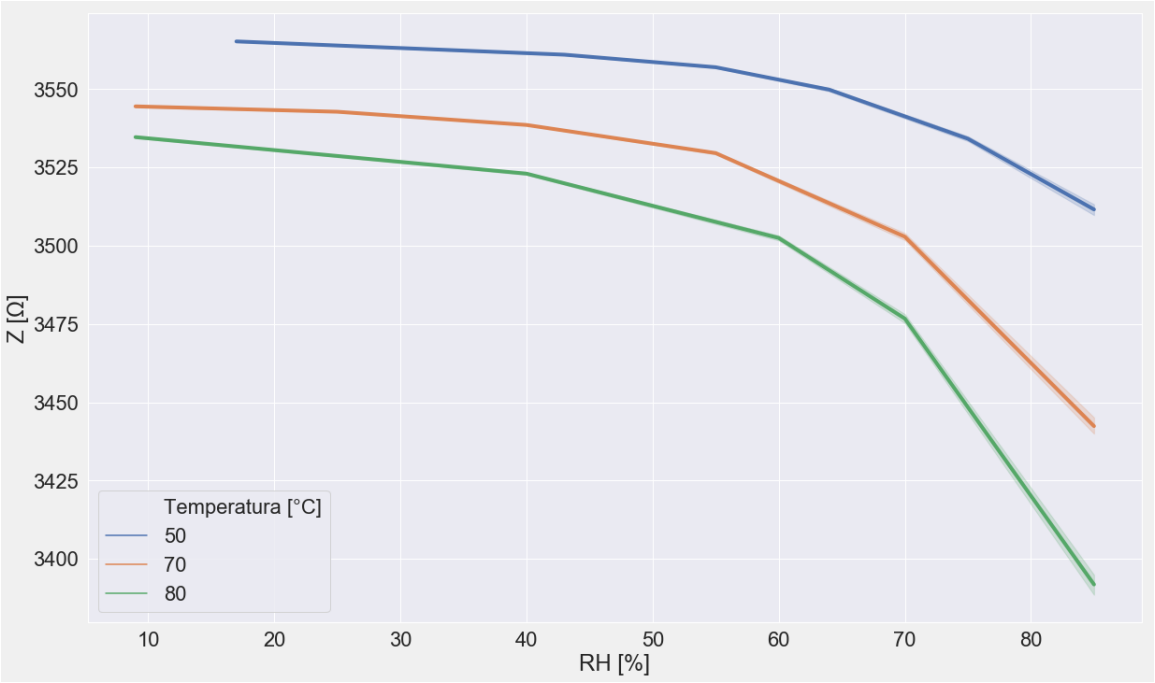


Figura 5.43: Z, $f = 100kHz$

Fase Impedenza θ

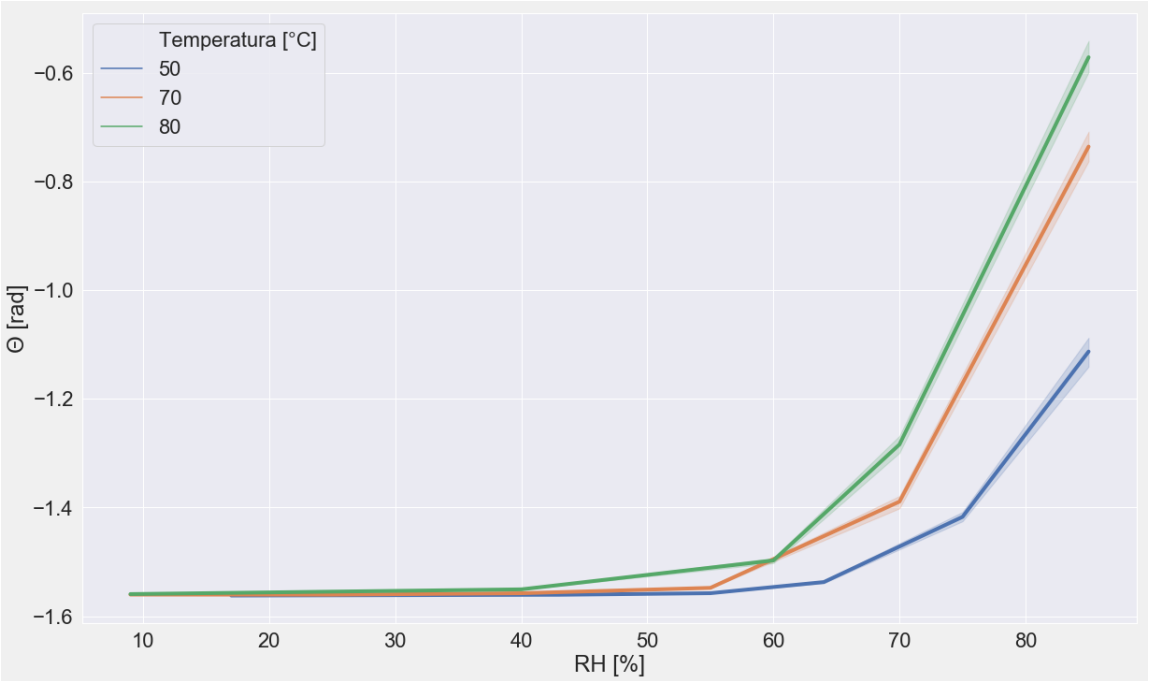


Figura 5.44: θ, $f = 1kHz$

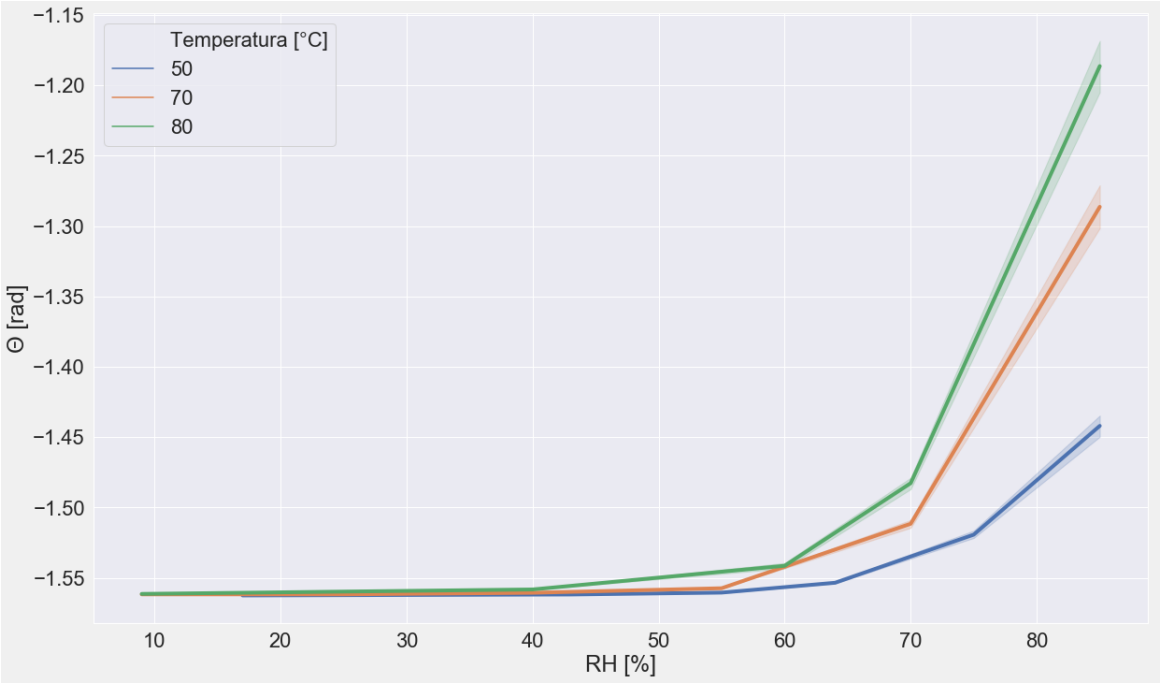


Figura 5.45: θ, $f = 5kHz$

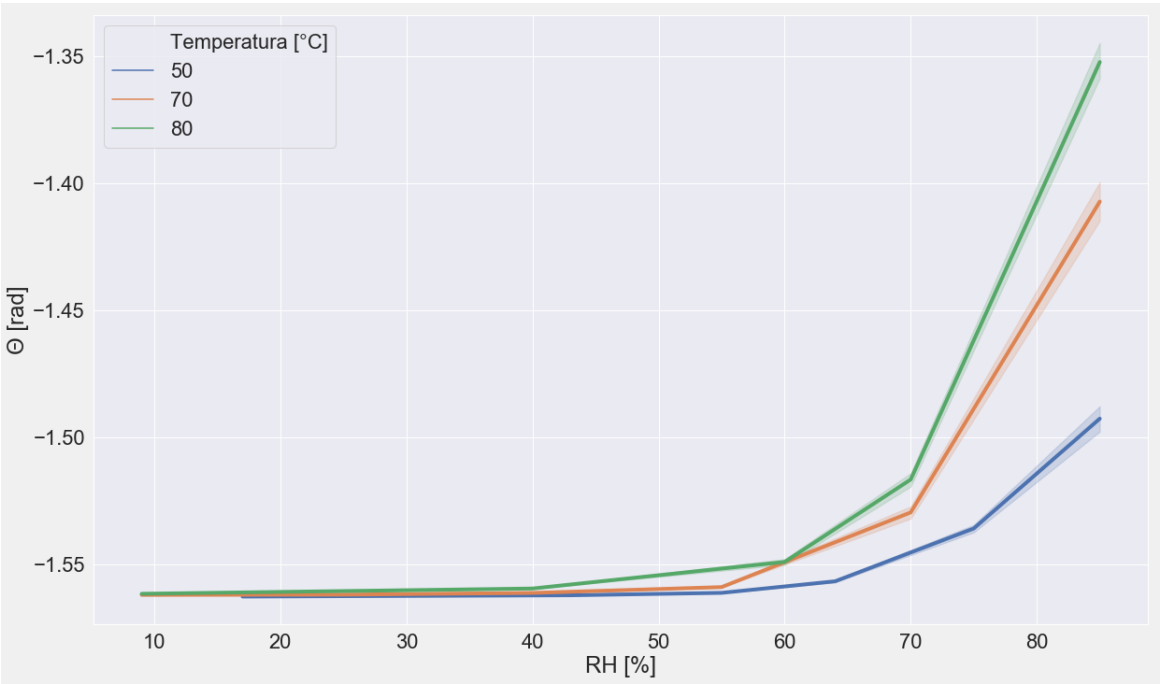


Figura 5.46: θ, $f = 10kHz$

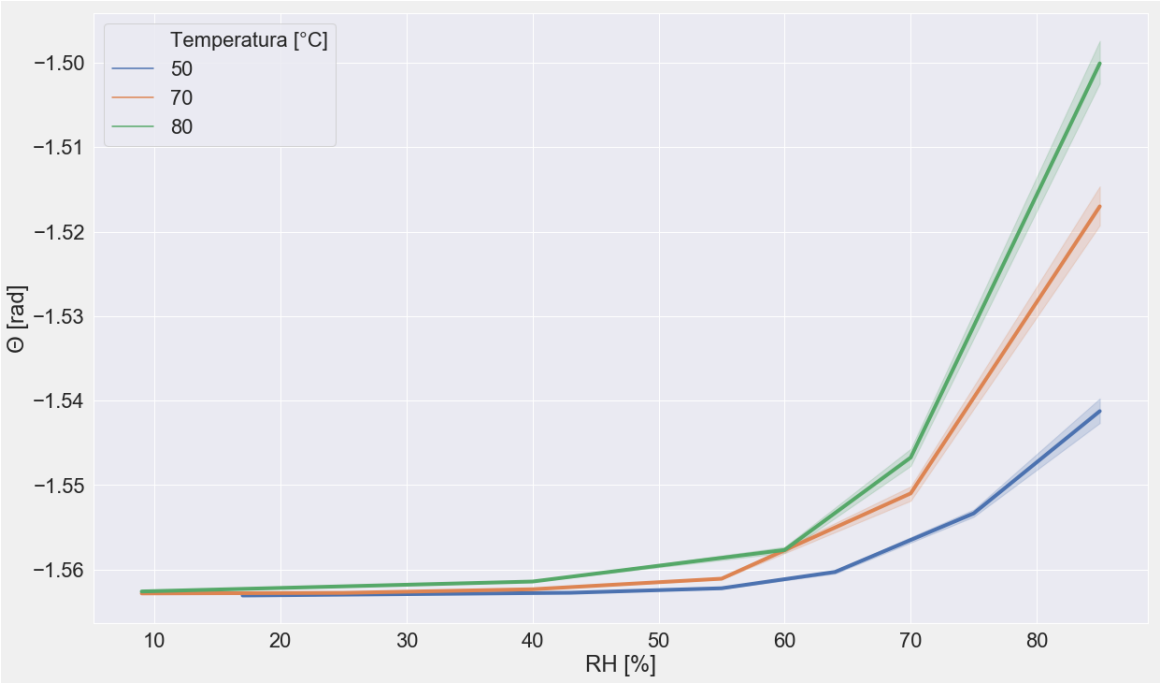


Figura 5.47: θ, $f = 50kHz$

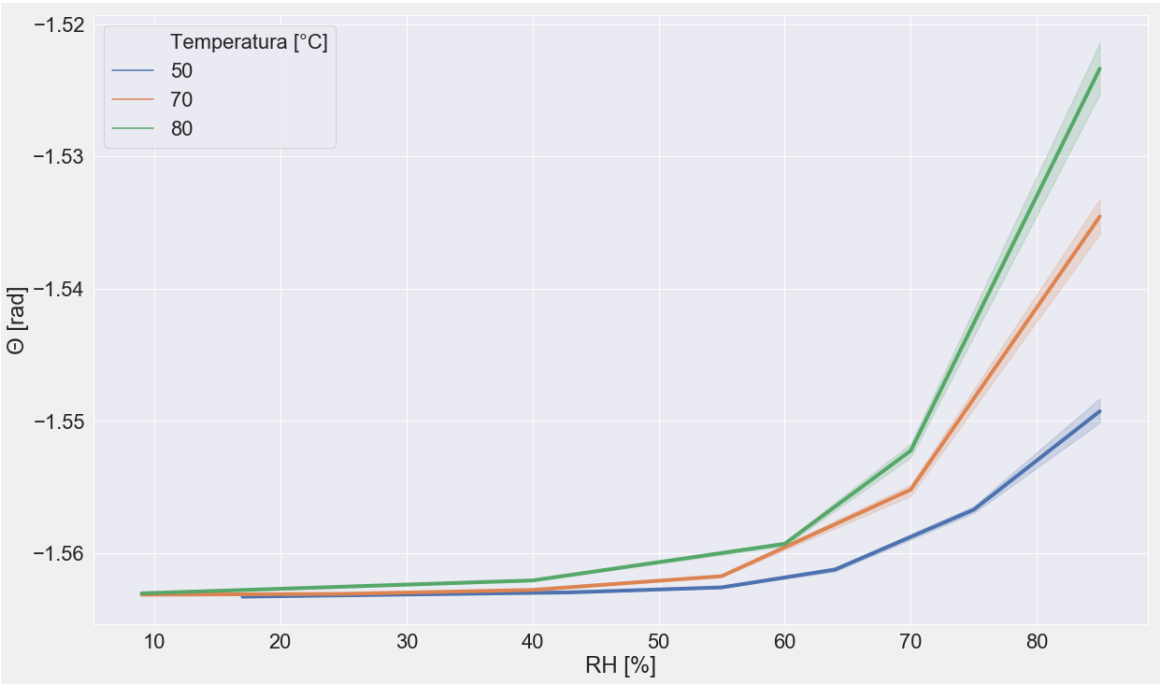


Figura 5.48: θ, $f = 100kHz$

5.1 Estrazione modello matematico

Per modellizzare completamente il sensore è necessario estrapolare un modello matematico. Per poter fare ciò si è deciso di concentrarsi sul valore di capacità parallelo come funzione dell'umidità relativa, fissata la temperatura e la frequenza. Per fare ciò si è deciso di utilizzare una espressione polinomiale del tipo

$$C_p = p_1 \cdot RH^n + p_2 \cdot RH^{n-1} + .. + p_{n-1} \cdot RH + p_n \tag{5.1}$$

dove n è il grado del polinomio. L'estrazione del modello parte dai dati sperimentali e viene effettuata dalla funzione *polyfit* di Matlab. Di seguito si riportano i diversi modelli per C_p, fissando la frequenza a $1kHz$.

- $T = 50°C$ (Figura 5.49)

$$C_p = 2.4032 \cdot 10^{-16} \cdot RH^3 - 2.093 \cdot 10^{-14} \cdot RH^2 + 5.791 \cdot 10^{-13} \cdot RH + 4.513 \cdot 10^{-10} \tag{5.2}$$

- $T = 70°C$ (Figura 5.50)

$$C_p = 3.693 \cdot 10^{-16} \cdot RH^3 - 2.779 \cdot 10^{-14} \cdot RH^2 + 6.309 \cdot 10^{-13} \cdot RH + 4.556 \cdot 10^{-10} \tag{5.3}$$

- $T = 80°C$ (Figura 5.51)

$$C_p = 5.958 \cdot 10^{-16} \cdot RH^3 - 5.195 \cdot 10^{-14} \cdot RH^2 + 1.412 \cdot 10^{-12} \cdot RH + 4.525 \cdot 10^{-10} \tag{5.4}$$

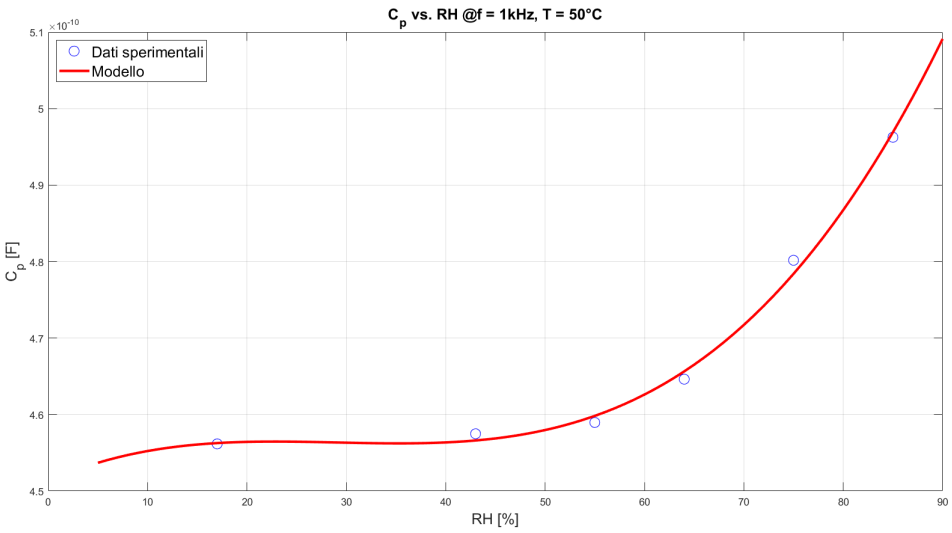


Figura 5.49: Andamento sperimentale e modello teorico di C_p,, $T = 50°C$

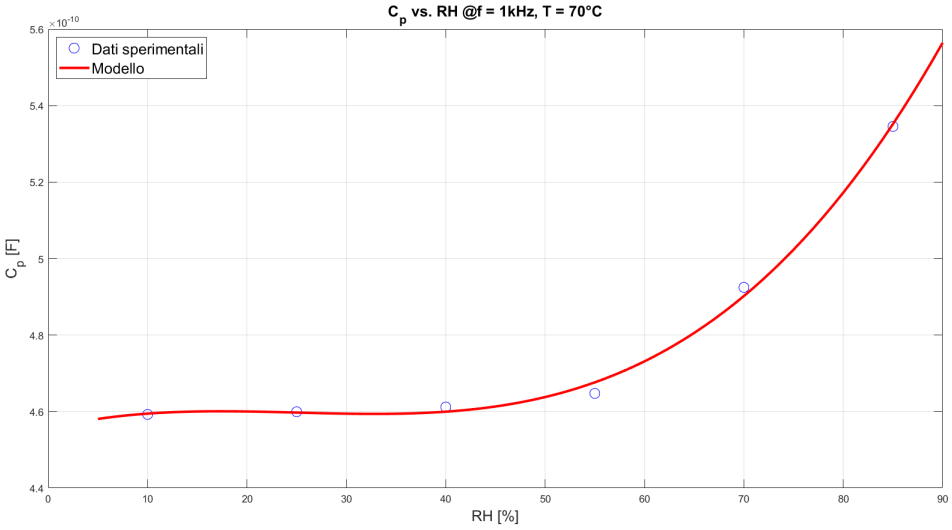


Figura 5.50: Andamento sperimentale e modello teorico di C_p, $T = 70°C$

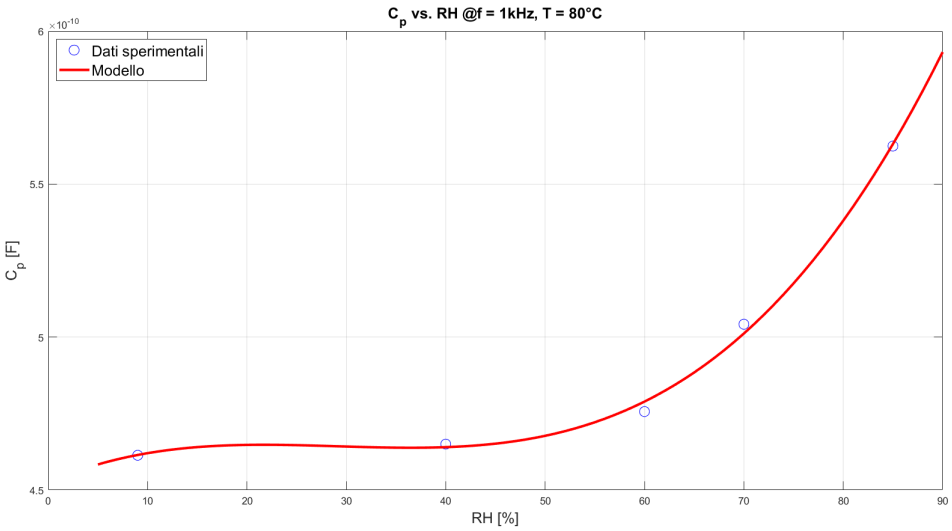


Figura 5.51: Andamento sperimentale e modello teorico di C_p, $T = 80°C$

Impedenza

Il valore di impedenza (inteso come modulo e fase) è molto importante per capire in che modo il sensore risponda alle diverse condizioni di lavoro. Come prima cosa si riportano gli andamenti di modulo e fase dell'impedenza (sono di fatto dei diagrammi di Bode) per i tre valori di temperatura, al variare dell'umidità relativa.

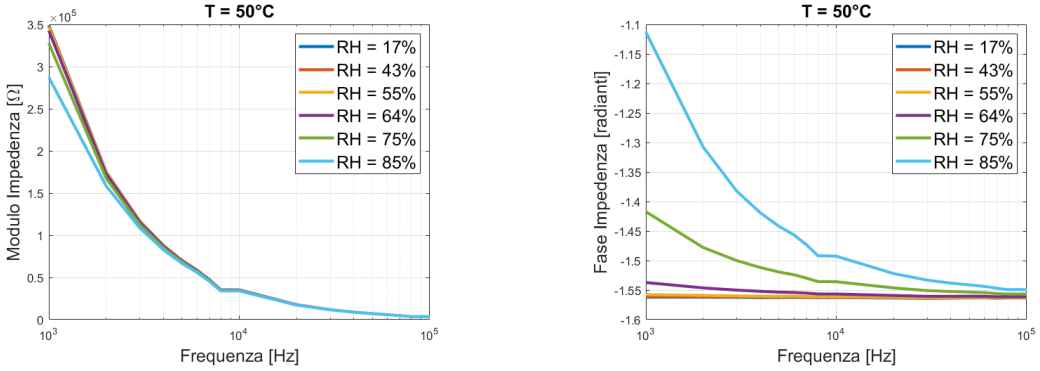


Figura 5.52: Modulo e Fase Impedenza, T = 50 ∘ C

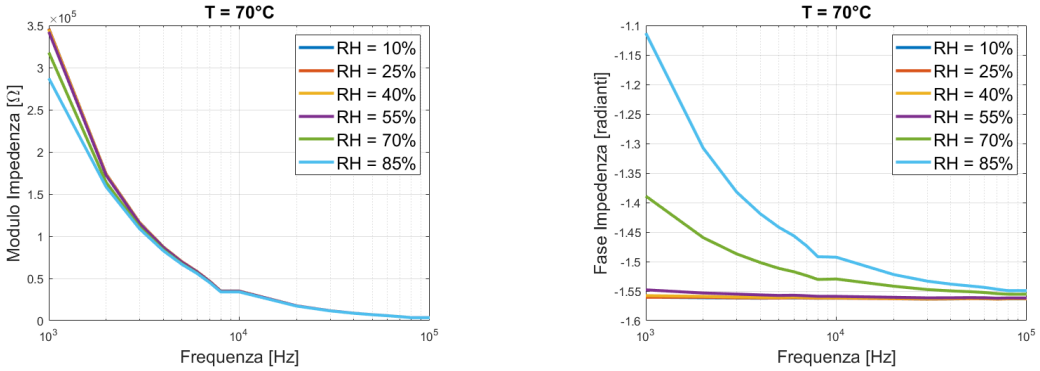


Figura 5.53: Modulo e Fase Impedenza, T = 70 ∘ C

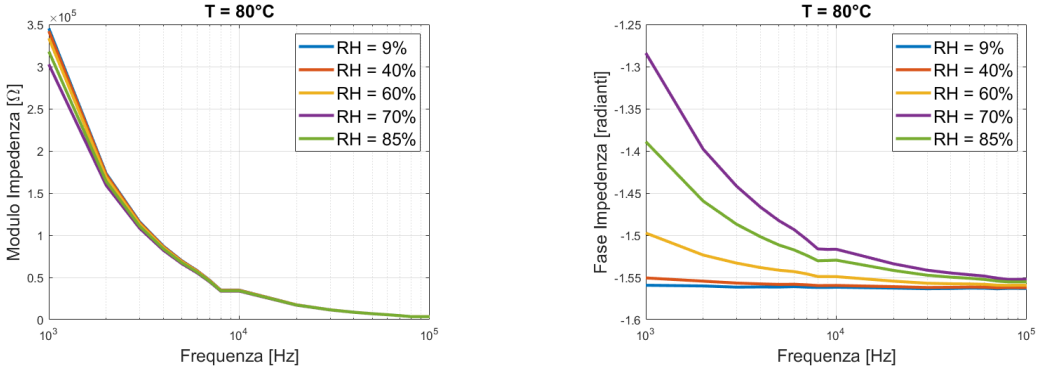


Figura 5.54: Modulo e Fase Impedenza, T = 80 ∘ C

Un metodo alternativo è quello di passare all'ammettenza e plottare sull'asse x la parte reale e sull'asse y la parte immaginaria cambiata di segno. In questo modo, fissato un valore di temperatura ed umidità relativa, uno swing completo in frequenza (da 0 a inf Hz) si tradurrebbe in una circonferenza che inizia a $\Re Y = 0$, $-\Im Y = 0$ e si chiude sullo stesso punto. Visto che nelle misure la frequenza massima si ferma a $100kHz$, gli andamenti per diversi valori di umidità relativa saranno degli archi di circonferenza via via più ampi. Nelle Figure 5.55, 5.56 e 5.57 si riportano tali comportamenti.

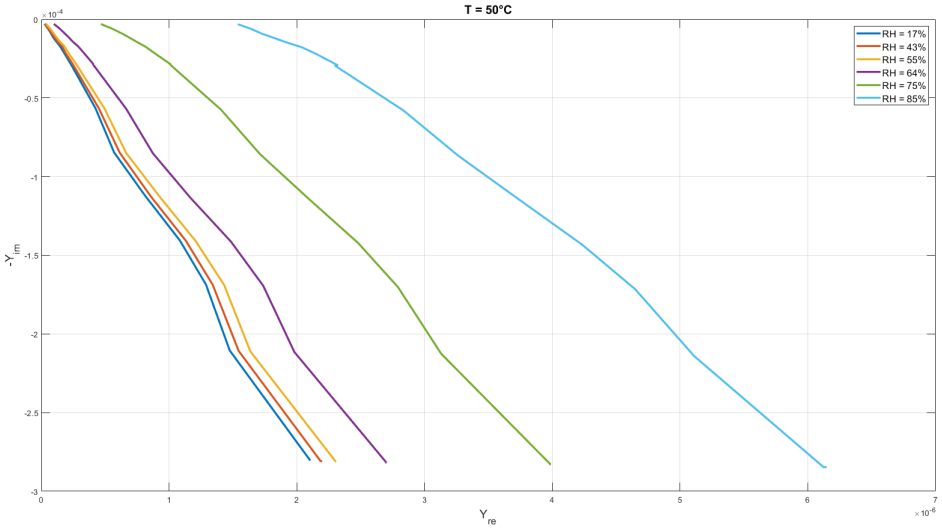


Figura 5.55: Parte reale e -Parte immaginaria dell'ammettenza $Y = Z^{-1}, T = 50°C$

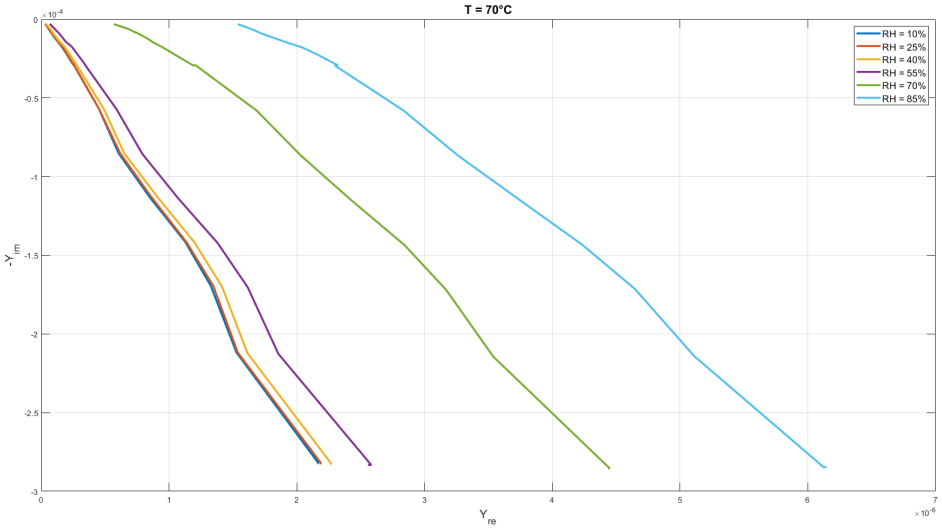


Figura 5.56: Parte reale e -Parte immaginaria dell'ammettenza $Y = Z^{-1}, T = 70°C$

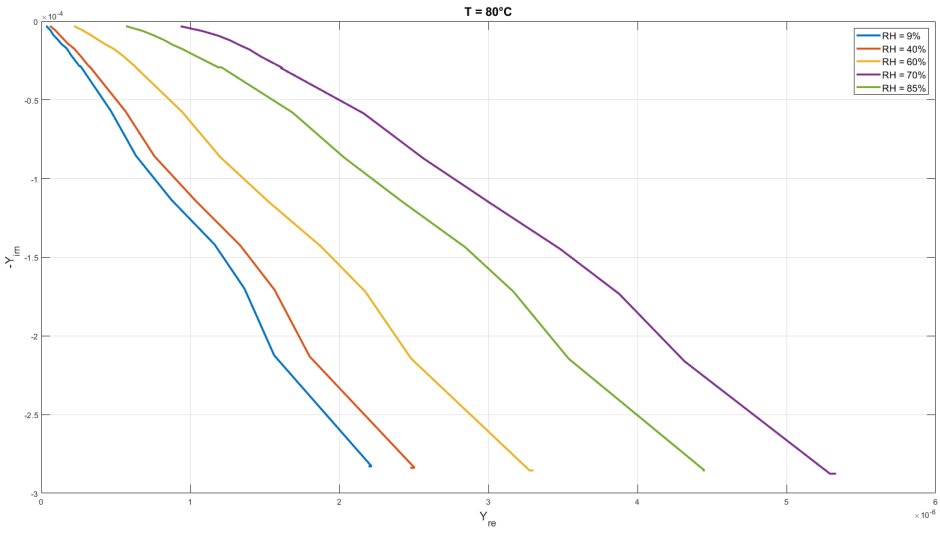


Figura 5.57: Parte reale e -Parte immaginaria dell'ammettenza $Y = Z^{-1}, T = 80°C$

Capitolo 6

Sviluppi futuri

Come specificato ad inizio relazione, l'acquisizione delle diverse grandezze del sensore è stata fatta con un LCR Meter, strumento molto preciso ma piuttosto costoso e non sempre alla portata di tutti. Si è così pensato a dei metodi alternativi per poter misurare la capacità del sensore. Fra le varie idee si è pensato di utilizzare un oscillatore a ponte di Wien, in grado di fornire in uscita un'onda il cui periodo è proporzionale al valore di capacità del sensore. A causa dell'elevata instabilità di tale circuito si è infine deciso che la soluzioni ottima fosse quella di utilizzare uno dei molti microcontrollori in commercio dotati di un sistema di misurazione capacitivo integrato (questo perchè progettati per interfacciarsi con moduli touch-screen di tipo capacitivo). In particolare si è scelto un microcontrollore ESP-32-WROOM-32 commercializzato dalla *Espressif Systems* (si veda Figura 6.1).

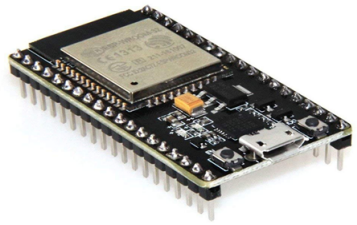


Figura 6.1: Microcontrollore ESP32-WROOM-32

Le principali caratteristiche di questo microcontrollore sono:

- Xtensa® 32-bit LX6 Dual-Core processor
- 448 KByte ROM
- 520 KByte SRAM
- SUpply VOltage $2.2 - 3.6V$
- Wifi 802.11 b/g/n/e/i
- Bluetooth v4.2 BR/EDR e BLE
- ADC da 12 bit
- 2 convertitori DAC da 8 bit
- 10 ingressi per sensori touch screen capacitivi
- Sensore di temperatura
- Comunicazioni con bus SPI, I^2S, I^2C E $UART$
- Interfaccia ad infrarossi

Per misurare un valore di capacità il microcontrollore usa un suo generatore di corrente interno che eccita la capacità sotto test mentre un comparatore converte lo swing in tensione ai suoi capi in un'onda quadra. A quel punto un contatore, fissato un periodo di gate T_g, si occupa del conteggio dei fronti di salita di tale onda quadra. Le corrispondenti forme d'onda vengono riportate in Figura 6.2.

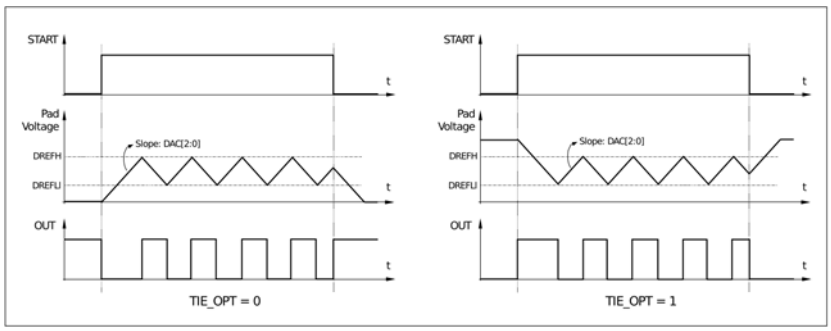


Figura 6.2: Forme d'onda relative alla modalità di misurazione di una capacità

E' bene precisare che i conteggi sono affetti da un certo rumore che ne distorce piuttosto pesantemente l'andamento, dovuti ad una alta sensibilità. Per far fronte a questo problema il microcontrollore mette a disposizione un filtro IIR in grado di ridurre di molto il rumore. Un esempio viene riportato in Figura 6.3 dove le tracce rossa e gialla indicano l'andamento nel tempo dei conteggi, rispettivamente pre e post filtro.

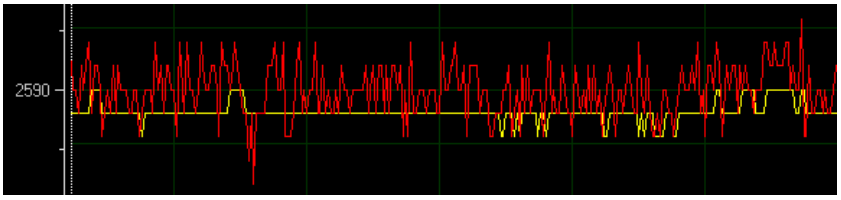


Figura 6.3: Filtraggio dei conteggi del contatore

Il conteggio ha anche una dipendenza dalla tensione che si sceglie di applicare al condensatore in esame, che può variare da pochi mV fino a qualche V. In particolare maggiore è il range di tensione, tanto più stabile sarà la lettura. L'espressione che lega i vari parametri è la seguente:

$$C = \frac{T_g}{N_{cont} \cdot R \cdot \ln(\frac{V_o - V_l}{V_o - V_h})} \tag{6.1}$$

dove

- T_g e N_{cont} sono rispettivamente il tempo di misura e il numero di conteggi
- R è la resistenza
- V_o è la tensione applicata al condensatore
- V_l e V_h sono gli estremi dello swing in tensione ai capi del condensatore (si vedano DREFH e DREFL in Figura 6.2)

Come esempio nella figura 6.4 si riporta l'andamento nel tempo del numero di conteggi (da convertire in un valore di capacità).

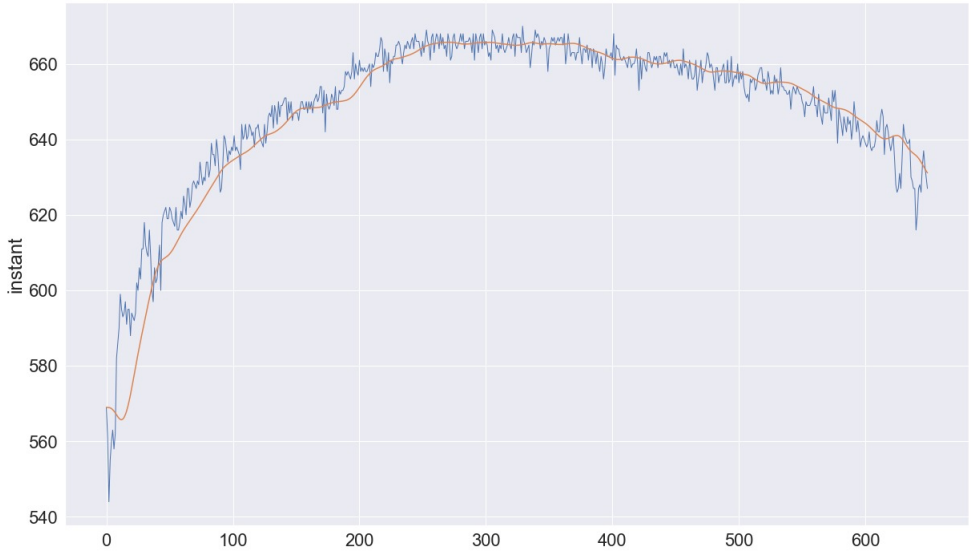


Figura 6.4: Andamento temporale conteggi, in rosso il valore filtrato

Dopo essere stato acquisito il dato numerico può essere inviato sia allo standard output (se lo si utilizza in locale con un PC in modalità debugging collegato tramite USB) sia ad un server capace di fare lo storage di tutti i dati letti, utilizzando l'interfaccia WiFi integrata. In particolare l'invio dei dati con quest'ultima tecnica può sfruttare due socket: TCP/IP e UDP/IP. Il primo viene implementato per lavorare in applicazioni completamente autonome, capaci di stabilire una connessione che garantisca un QoS minimo di invio e ricezione dati (overhead elevato). La modalità UDP invece non implementa nativamente nessun tipo di connessione, in quanto è un protocollo basato su *datagram* e per sua natura ha una minore affidabilità di invio/ricezione/notifica del dato a discapito di un overhead molto più basso. Una interessante applicazione potrebbe essere quella di usare un sensore di temperatura esterno posizionato nelle vicinanze del condensatore ed interfacciato al micro tramite il suo ADC, in modo da poter misurare istante per istante sia il valore di capacità che la temperatura di lavoro. In seguito i valori raccolti possono essere inseriti in un file *.csv* con un'indicazione temporale di inizio e fine misurazione e raccolti da un applicativo server in ascolto sulla porta 5005 (modificabile).

Capitolo 7

Conclusioni e possibili miglioramenti

Per concludere la relazione è d'obbligo un commento finale. Osservando gli andamenti della capacità visti nel Capitolo 5 risulta evidente una variazione della capacità di poche decine di pF per valori di umidità relativa inferiori al $55 - 60\%$ per temperature piuttosto basse. Concentrandosi però sulle Figure 5.1, 5.7 e 5.13 si nota come per valori di umidità relativa superiori al 60% la variazione è molto più pronunciata. Inoltre è lecito presumere che all'aumentare della temperatura (quindi per valori superiori agli $80°C$) la capacità vari in modo sempre più repentino, migliorando di molto la sensibilità dello strumento. Tutte queste osservazioni portano a capire che il sensore trova le sue ideali condizioni di lavoro ad alte temperature. Detto questo, come già anticipato nei paragrafi precedenti il condensatore è stato testato in un impianto termico in grado di raggiungere al massimo la temperatura di circa $85°C$. Uno dei possibili sviluppi è quello di utilizzare un impianto più potente (senza superare la massima temperatura di lavoro delle piastre in Fr4), in modo da verificare il corretto funzionamento del sensore per $T > 80 \circ C$. Infine è bene specificare che il sensore è affetto da alcune non idealità "pratiche" che rendono il comportamento reale diverso dal modello teorico, quali:

- Armature in rame non perfettamente uguali ma con una tolleranza di almeno $\pm 2mm$. Problema facilmente risolvibile tagliando le armature con una fresa semi-professionale in modo da ridurre la tolleranza a $\pm 0.1mm$.
- Cavi di collegamento in rame senza schermatura e con capacità parassita intrinseca. La soluzione potrebbe essere di usare dei cavi più corti ed in grado di mantenere un comportamento il più possibile non capacitivo per le varie frequenze di lavoro.