UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRENTO

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

Corso di Misure Meccaniche e Termiche

COMPENSAZIONE DINAMICA DI UNA SONDA PT100

Docente:

Mariolino De Cecco

Studente:

Andrea Cardone

a.a. 2019/2020

Indice

INTRODUZIONE

L'obbiettivo di questa esperienza consiste nell'effettuare la taratura dinamica della sonda termica e determinare l'andamento temporale del misurando, in questo caso si tratta di una piastra termostatata. Per acquisire i dati è stata utilizzata una termoresistenza Pt100. La successiva elaborazione consisterà nella taratura dinamica dello strumento e poi nella compensazione dinamica del segnale di temperatura. Lo scopo della taratura dinamica consiste nel determinare la funzione di trasferimento dello strumento, quindi una funzione nel dominio della frequenza che rappresenti il rapporto tra la trasformata del segnale di ingresso e quello d'uscita. In questa esperienza è noto il modello matematico dello strumento, quindi la taratura dinamica consiste nel determinare i parametri della funzione di trasferimento. Come si vedrà in seguito, la dinamica della sonda sarà tale che nel segnale d'uscita verranno introdotti un'attenuazione e uno sfasamento rispetto al segnale del misurando. Quindi, una volta eseguita la taratura dinamica, verra fatta la compensazione dinamica per ricavavare una stima del misurando.

DESCRIZIONE SONDA PT100

La sonda Pt100 è un sensore di temperatura, in particolare si tratta di una termoresistenza, difatti il principio fisico che viene utilizato è la dipendenza della resistenza rispetto alla temperatura. Lo strumento utilizzato consiste in un filo di platino avvolto su un supporto, racchiuso in un involucro ceramico e immerso in polvere d'allumina con lo scopo di proteggerlo dall'ambiente esterno e da eventuali sollecitazioni meccaniche. La sonda Pt100 presenta una resistenza di 100 Ω a 0 °C.

PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

La misurazione della temperatura si basa essenzialmente sulla proprietà dei metalli di variare la propria resistività e quindi anche la resistenza in base alla loro temperatura. Nei metalli la trasmissione di energia elettrica avviene grazie agli elettroni di conduzione che si muovono attraverso il reticolo. Aumentando la temperatura gli atomi che compongono il reticolo cristallino del metallo oscillano con ampiezze sempre maggiori. Quindi il moto degli elettroni risulta sempre più ostacolato in quanto risultano più probabili le interazioni tra elettroni e atomi, che causano una deflessione dell'elettrone dalla sua traiettoria originaria. Questo fenomeno viene chiamato scattering elettronico e ha come effetto la riduzione della velocità di deriva degli elettroni.

Quindi conoscendo come varia la resistenza elettrica della sonda si ricava la temperatura alla quale si trova appunto lo strumento di misura.

Per l'intervallo di temperatura nel quale viene fatta l'esperienza la relazione tra resistenza e temperatura è:

$$R = R_0(1 + \alpha T + \beta T^2)$$

dove R_0 è la resistenza misurata a T_0, nel caso della Pt100

$$R_0 = 100\,\Omega$$

$$T_0 = 0\text{ °C}$$

α e β sono delle costanti che per la sonda al platino utilizzata valgono

$$\alpha = 3.90802 \cdot 10^{-3}\text{ °C}^{-1}$$

$\beta = -5.802 \cdot 10^{-7}\ °C^{-2}$

In base alla normativa IEC 751 (1995) le Pt100 sono classificate a seconda della tolleranza nella misura fornita:

Pt100 Classe A ± 0,15 °C [0 °C] ± 0,06 Ω [0 °C]
Pt100 Classe B ± 0,30 °C [0 °C] ± 0,12 Ω [0 °C]

Il TCR (*Temperature Coefficient of Resistance*) di una termoresistenza indica la variazione media per grado celsius del valore della resistenza fra gli 0 °C e i 100 °C.

Si può ricavare con la seguente espressione:

$$TCR = \frac{R_{100} - R_0}{R_0 \cdot 100}$$

Il TCR coincide con il coefficiente α dell'equazione lineare che esprime la dipendenza di R dallla temperatura. Maggiore è il TCR maggiore sarà il coefficiente α e quindi, di conseguenza, sarà maggiore anche la sensibilità. Ciò è dovuto ad una maggior purezza del platino, solitamente i valori variano da 0,00375 a 0,003928 $°C^{-1}$. La norma IEC 751 indica per le Pt100 un TCR di 0,00385 $°C^{-1}$.

CENNI DI TEORIA UTILIZZATA PER ELABORARE I DATI

In seguito, durante l'analisi dei dati, verrà utilizzata la trasformata di Fourier definita come:

$$G(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t)\, e^{-i\omega t}\, dt$$

L'utilità di utilizzare la trasformata di fourier consiste nel poter ottenere delle equazioni algebriche da equazioni differenziali lineari, passando dal dominio del tempo a quello della frequenza. Difatti l'operazione di derivazione risulta essere:

$$\frac{d}{dt} g(t) \leftrightarrow i\omega G(\omega)$$

Quindi in seguito verranno utilizzate le trasformate dei segnali e la funzione di trasferimento dello strumento, ricavata dal modello termodinamico e definita come il rapporto tra la trasformata del segnale di uscita e quello di ingresso del sensore.

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{U(\omega)}$$

Alla fine dell'analisi dei dati sarà necessario antitrasformare il segnale ottenuto, ciò è possibile in quanto la trasformata di Fourier gode della proprietà di reversibilità, difatti:

$$g(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} G(\omega)\, e^{i\omega t}\, d\omega$$

CONSIDERAZIONI TERMODINAMICHE

Per poter fare la taratura dinamica bisogna innanzitutto ricavare la funzione differeniale che descriva il modello della sonda termica.
Posiamo determinare l'energia termica dello strumento come:

$$E(t) = mcT(t)$$

dove m è la massa della sonda espressa in [kg], c è il capacità termica espressa in [J°C Kg] e T è la temperatura dello strumento espresso in [°C] .

Nel momento in cui la sonda viene messa a contatto con il misurando avviene uno scambio di energia termica tra misurando e sonda, dovuto alla loro differenza di temperatura. Ciò avviene fino a che lo strumento di misura non raggiunge la stessa temperatura del misurando. La potenza termica trasferita, cioè l'energia termica scambiata per unità di tempo può essere definita come:

$$P = \frac{dE}{dt} = \alpha A(T_m - T_s)$$

dove α è il coefficiente di scambio termico, A è l'area di contatto, T_s è la temperatura della sonda e T_m è la temperatura del misurando.

In prima approssimazione si può considerare che la variazione di energia termica per unità di tempo della sonda corrisponda con il flusso di calore tra sonda e misurando. Quindi si deriva la prima equazione rispetto al tempo e la si pone uguale alla seconda, si ottiene un'equazione differenziale del primo ordine che fungerà da modello matematico della sonda.

$$\frac{dE}{dt} = mc\frac{dT_s(t)}{dt} = \alpha A(T_m(t) - T_s(t))$$

Tale relazione differenziale lineare, mediante trasformazione secondo Fourier, diviene una relazione algebrica tra l'ingresso $T_m(\omega)$ che rappresenta il misurando e l'uscita $T_s(\omega)$ che rappresenta la variabile proporzionale all'uscita.

$$H(\omega) = \frac{T_s(\omega)}{T_m(\omega)} = \frac{1}{1 + i\omega\frac{mc}{\alpha A}}$$

che può essere riscritta come:

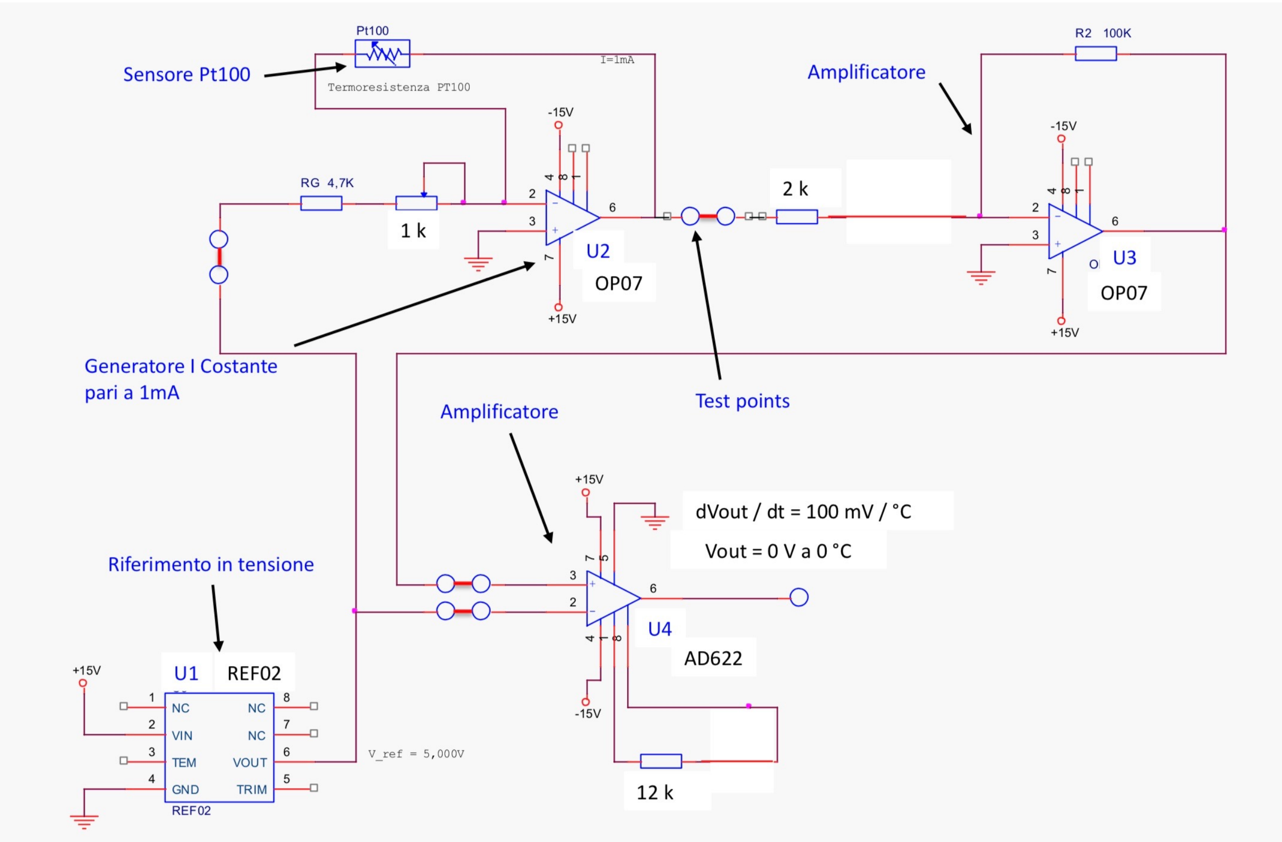
$$H(\omega) = \frac{T_s(\omega)}{T_m(\omega)} = \frac{1}{1 + i\omega\tau}$$

dove $\tau = \dfrac{mc}{\alpha A}$ che ha dimensione di un tempo e sarà il parametro che verrà ricavato attraverso la taratura dinamica.

ESPERIENZA IN LABORATORIO

L'obbiettivo dell'esercitazione in laboratorio era di raccogliere i dati per poter compiere successivamente la taratura dinamica e la compensazione dinamica. Dato che la temperatura viene ricavata analizzando la variazione della resistenza della PT100, il circuito del sensore aveva due principali specifiche: l'amplificazione del segnale e l'alimentazione costante del sensore in modo da poter ricavare la sua resistenza misurando la caduta di tensione ai suoi capi.

Nella figura seguente il circuito utilizzato (non sono stati indicati i condensatori di disaccoppiamento per attenuare i disturbi).



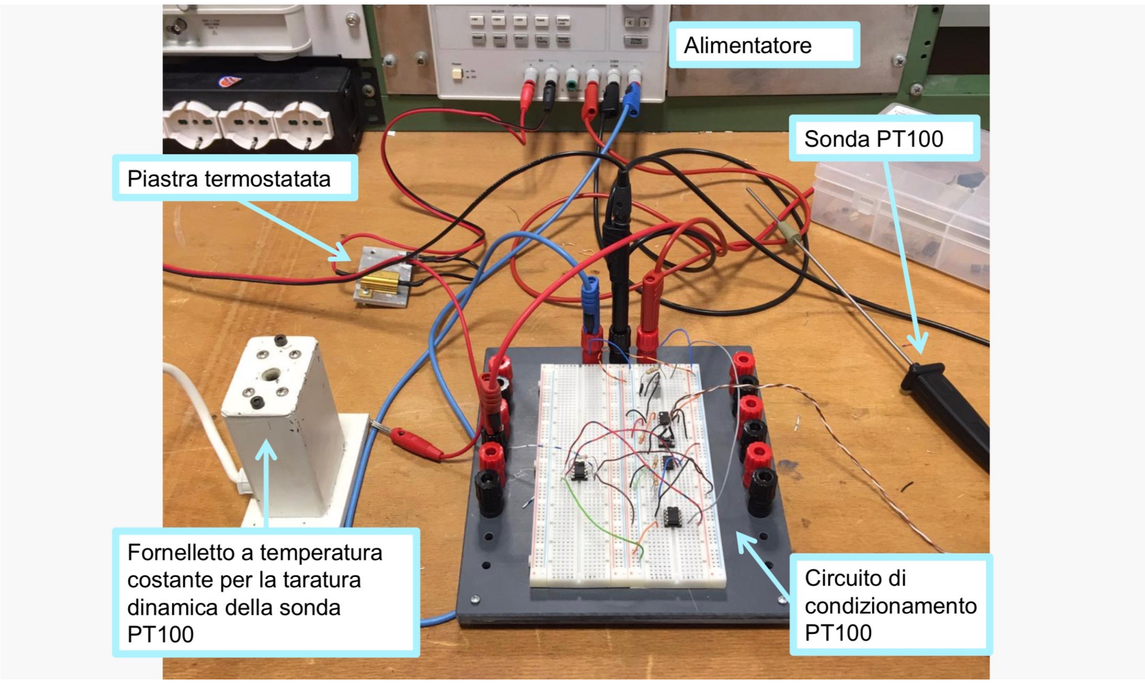
Per fare in modo che la sonda si scaldi il meno possibile per effetto Joule dovuto alla corrente di alimentazione è stata scelta una piccola corrente: $I = 1\,mA$. Avendo una piccola corrente di alimentazione diventa necessario amplificare il segnale. Lo stadio di amplificazione è stato pensato in modo che il segnale di tensione vari di 100 mV per °C e una tensione di 0 V a 0 °C. In basso a sinistra il generatore di tensione costante (U1) serve per alimentare l'amplificatore operazionale (U2) con 5 V, in modo da avere la corrente costante di 1 mA attraverso il sensore Pt100. Per ottenere questa corrente è necessario che RG sia complessivamente equivalente a $5\,\Omega$, quindi per avere il valore della corrente più preciso possibile è stata utilizzata una resistenza da 4.7 $k\Omega$ e un trimmer da 1 $k\Omega$. All'uscita di U2 si avrà $V_1(t) = -I_{ref} \cdot R(t)$ e quindi:

$$\frac{dV_1}{dT} = -0.385 \frac{\Omega}{^oC} \cdot 1\, mA = -0.385 \frac{mV}{^oC}$$

In seguito il segnale viene amplificato dall'amplificatore invertente U3 con $G_3 = -50$, quindi si ottiene:

$$\frac{dV_3}{dT} = G_3 \cdot \frac{dV_2}{dT} = 19.25 \frac{mV}{^oC}$$

Per ottenere $\frac{dV_4}{dT} = 100 \frac{mV}{^oC}$ si utilizza l'amplificatore da strumentazione U4. Considerando che $V_1(T=0) = -100\, mV$, $V_2(T=0) = G_3 \cdot V_1(T=0) = 5\, V$, non si farà altro che moltiplicare la differenza tra il segnale V_2 e quello a 5V del generatore di tensione per $G_4 \approx 5$. Alla fine si ottiene il segnale che presenta circa 0 V a 0 °C e un incremento di 100 mV per °C. Qindi risulta semplice ricostruire il valore della temperatura in quanto è sufficiente moltiplicare per 10 il valore di tensione registrato.
Il segnale per la taratura dinamica è stato ottenuto inserendo la sonda in un fornelletto a temperatua costante, così da avere un gradino di temperatura.
Il segnale da compensare dinamicamente è stato ottenuto mettendo la sonda a contatto con una piastra termostatata riscaldata da una resistenza corazzata.
Nella seguente immagine vengono riportati la realizzazione del circuito e gli strumenti utilizzati.



ELABORAZIONE DEI DATI

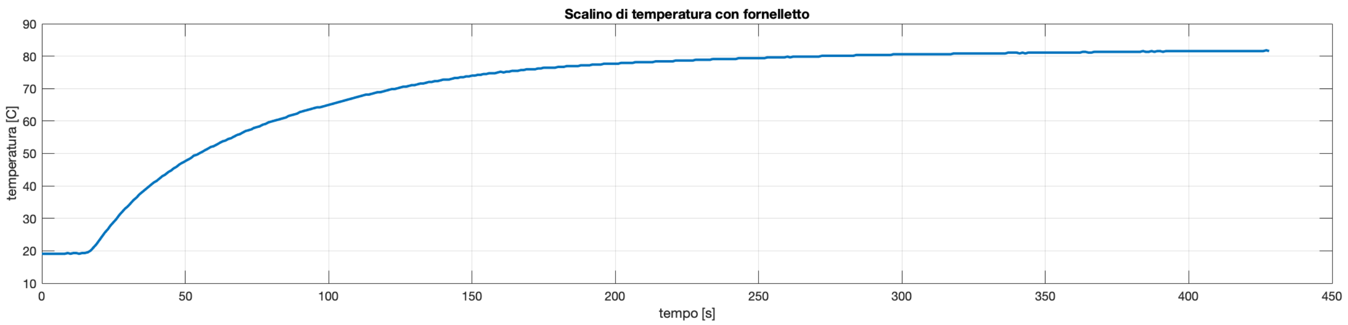
Ottenimento valore temperatura

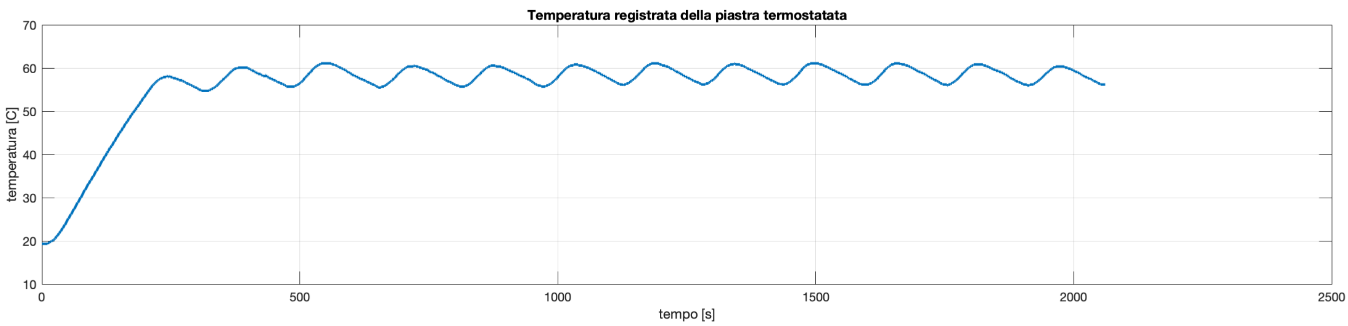
Per ottenere il valore della temperatura sarebbe sufficiente moltipicare il valore della tensione per 10. Durante l'esercitazione non è stato possibile inserire la resistenza da 12.7 $k\Omega$ perchè l'amplificatore andava in saturazione a causa di un offset di tensione dovuto a disturbi. Quindi per ottenere il valore della temperatura si moltiplica il valore della tensione per 50 e sapendo che la temperatura ambiente era di circa 19 °C si sottrae una costante per ottenere questa temperatura iniziale.

$$T(t) = V(t) \cdot 50 - k$$

$$T(t_i) \approx 19\ °\mathrm{C}$$

Si ottengono i seguenti andamenti della temperatura in funzione del tempo.





Taratura dinamica

Studiare la dinamica dello strumento di misura è fondamentale per poter compiere la compensazione dinamica. In questo caso è già noto il modello matematico della funzione di trasferimento della sonda, quindi la taratura consiste nel determinare i parametri caratteristici dello strumento, cioè la costante τ descritta precedentemente.

Il procedimento utilizzato consiste nel sottoporre la Pt100 ad un ingresso canonico di temperatura facile da realizzare, quindi un gradino. Dopodichè si registra il segnale dello strumento e si procede a determinare la costante di tempo. Lo scalino di temperatura viene realizzato inserendo la sonda in un fornelletto che ha una temperatura T_f, quindi la sonda passa da una temperatura T_i a T_f. Si suppone che l'operazione di inserimento della sonda sia sufficientemente veloce e che la temperatura del fornelletto non venga perturbata dall'inserimento dell sonda.

Per un'ingresso canonico quale lo scalino, la soluzione è nota in forma chiusa, indicando con T_i la temperatura iniziale e T_f la temperatura finale della sonda:

$$T(t) = (T_i - T_f) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + T_f$$

Da questa equazione si può ricavare la costante di tempo in diversi modi:

1) Per mezzo della soluzione dell'equazione differenziale si ottiene:

$$T(\tau) = (T_i - T_f) \cdot e^{-1} + T_f$$

Conosciuto $T(\tau)$ si trova graficamente $t(T(\tau))$, quindi infine:

$$\tau = t(T(\tau)) - t_i$$

Dall'analisi grafica dello scalino si ottiene $\tau = 62.45\, s$

```
Ttau = (Ti - Tf)*exp(-1) + Tf;

% Ti = 19.1364

% Tf = 81.5503

% Ttau = 58.5898

% t determinato graficamente

tTtau = 76.45;
ti = 14;
tau1 = tTtau - ti;

% tau1 = 62.4500
```

2) È possibile linearizzare la soluzione dell'equazione differenziale

$$T(t) = (T_i - T_f) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + T_f$$

$$\frac{T(t) - T_f}{T_i - T_f} = e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$ln\left(\frac{T(t) - T_f}{T_i - T_f}\right) = -\frac{t}{\tau}$$

Conoscendo la frequenza di campionamento f_c pari a $\frac{1}{T_c}$, si ottiene:

$$ln\left(\frac{T(kT_c) - T_f}{T_i - T_f}\right) = -\frac{kT_c}{\tau}$$

L'andamento segue quindi una retta con coefficiente angolare negativo pari a $-\frac{T_c}{\tau}$.

Mediante interpolazione lineare con modello privo di coefficiente costante, è possibile ricavare l'inverso della costante di tempo, sapendo che $T_c = 1$ s.

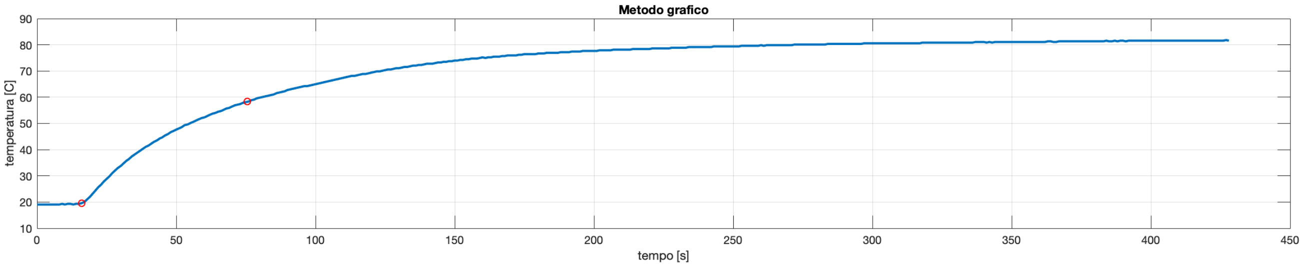
Prima di fare questi calcoli il segnale è stato traslato in modo da avere l'inizio dello scalino a t = 0 s e filtrato in modo da attenuare i disturbi.

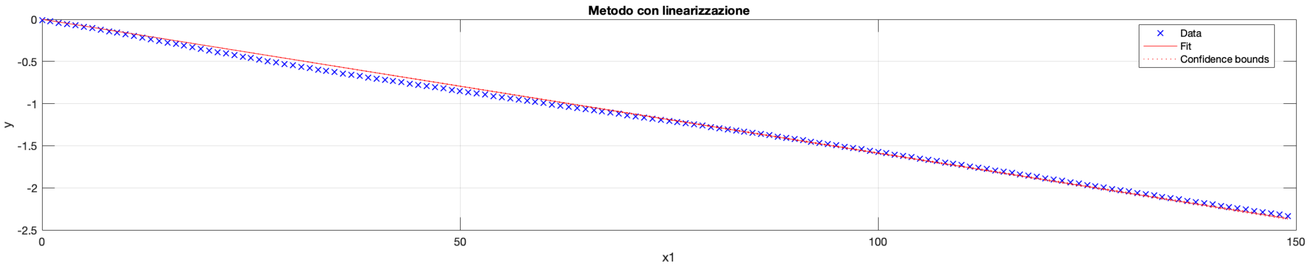
Con questo metodo si ottiene $\tau = 62.9983\, s$

Nella parte successiva verrà utilizzato questo risultato.

```
% linearizzazione

ylin = log((Tsca- Tf)/(Ti - Tf));

% regressione con fitlm

lin = fitlm(tsca,ylin, 'intercept', false);

tau2 = -1/lin.Coefficients.Estimate;
tau = tau2;

% tau2 = 62.9983
```

In seguito vengono rappresentati i grafici relativi ai due metodi.





3) Minimizzazione funzione penalità

Viene definita la funzione penalità come il quadrato della differenza tra l'andamento teorico e quello misurato durante l'esperienza, la funzione penalità sarà dipendente dal parametro τ.

$$\Phi(\tau) = \sum_{k=0}^{N} \left(T_k^s - (T_i - T_f) \cdot e^{-\frac{kT_c}{\tau}} - Tf \right)^2$$

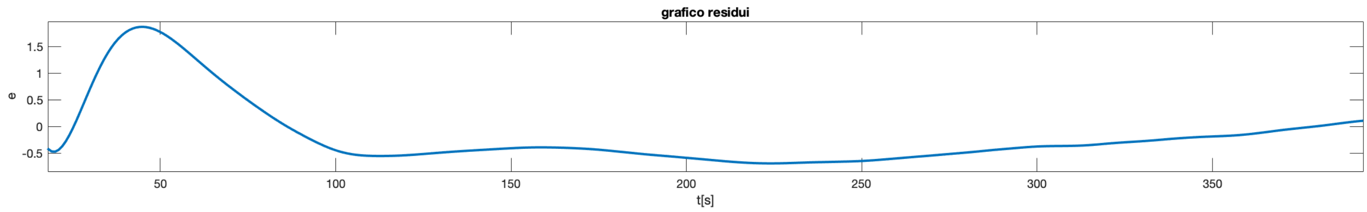
dove $\dfrac{1}{T_c}$ è la frequenza di campionamento (1 Hz nel nostro caso).

Quindi si cerca il minimo della funzione penalità, ciò viene fatto con due cicli for annidati, uno per il valore tau e uno per calcolare la funzione penalità per ogni tau.

```
% inizializzazione del valore tau

found_tau = 0;

% inizializzazione funzione penalità

lsq_t = intmax;

% loop su tau

for new_tau = 50:0.001:70
    lsq = 0;
    lsq_temp = 0;

    % calcolo funzione penalità

    for t = 1:l
        lsq = lsq_temp + (dati(t) - temp(t, new_tau, Ti, Tf))^2;
        lsq_temp = lsq;
end

    % aggiornamento funzione penalità e tau relativo

    if lsq < lsq_t
    found_tau = new_tau;
    lsq_t = lsq;
    end
end

% tau = 62.4580

function Te = temp(t, tau, Ti, Tf)
    Te = (Ti - Tf) * exp(-t/tau) + Tf;
end
```

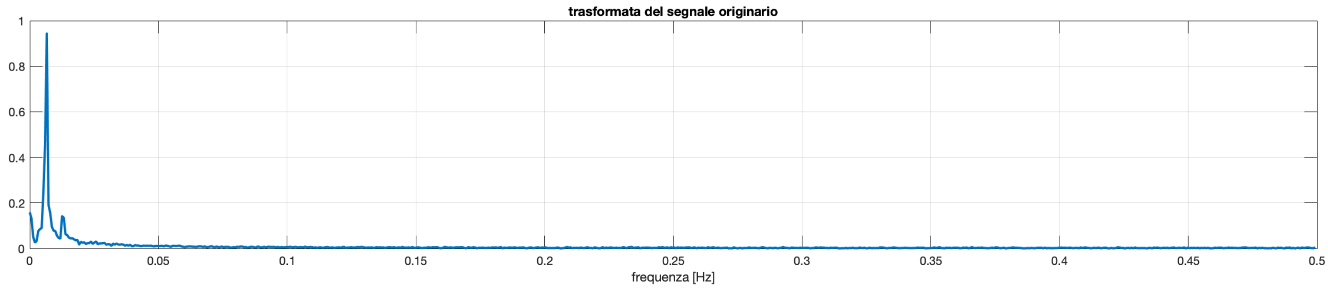
In seguito vengono calcolati i residui tra la il segnale acquisito e la funzione del modello teorico con il parametro trovato al punto precedente.

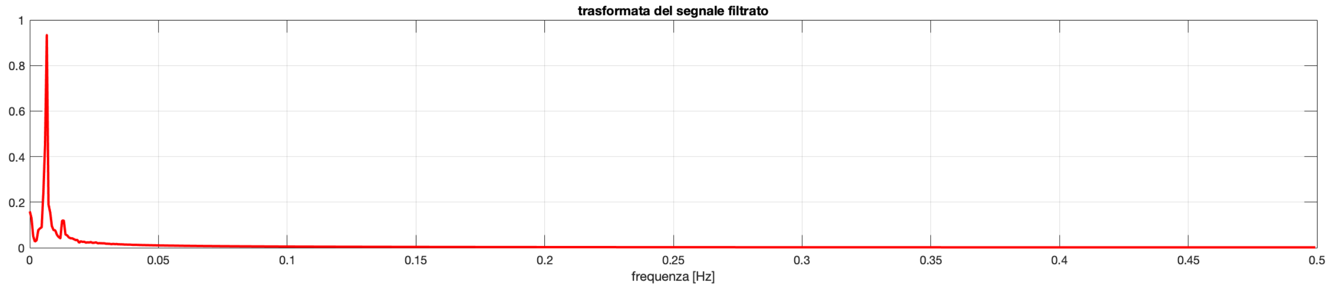
```
res = zeros(l,1);

for t = 1:l
    res(t) = dati(t) - temp(t, found_tau, Ti, Tf);
    lsq_temp = lsq;
end
```



Compensazione dinamica

Per poter eseguire la compensazione dinamica è fondamentale conoscere la funzione di trasferimento dello strumento, la quale risulta avere la struttura di un filtro passa-basso. La sua inversa avrà le caratteristiche di un filtro passa-alto, quindi sarà necessario compiere due operazioni per ottenere una buona compensazione dinamica: filtrare il segnale in modo da attenuare i disturbi, che verrebbero successivamente amplificati, e traslare il segnale in modo che il suo valore medio sia uguale a zero.

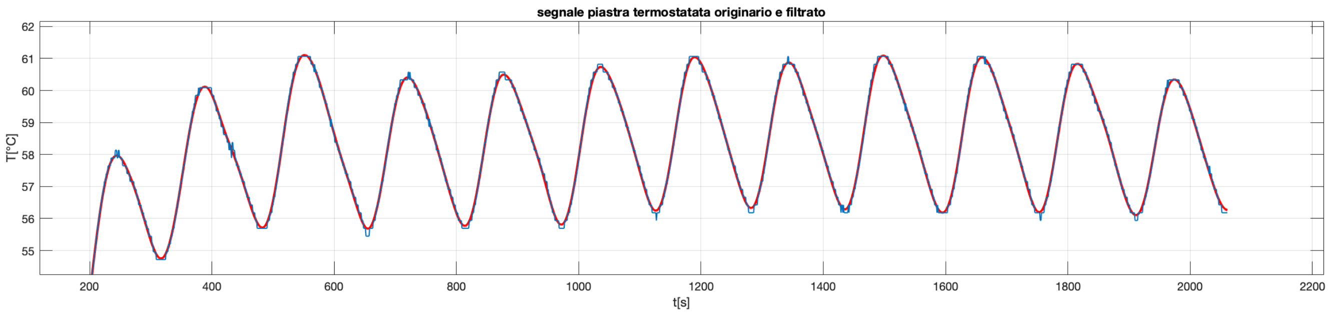




Dalla trasformata di Fourier del segnale si individua la frequenza di taglio $\omega_n = 0.04\, rad/s$.

```
[A, B] = butter(2, 0.04);
Tsigfilt = filtfilt(A ,B ,TPt100sig);
```

Per il filtaggio del segnale è stato utilizzato un filtro butterworth del secondo ordine facendo attenzione a non attenuare le componenti principali del segnale e a non introdurre uno sfasamento. L'andamento del segnale filtrato risulta esssere:

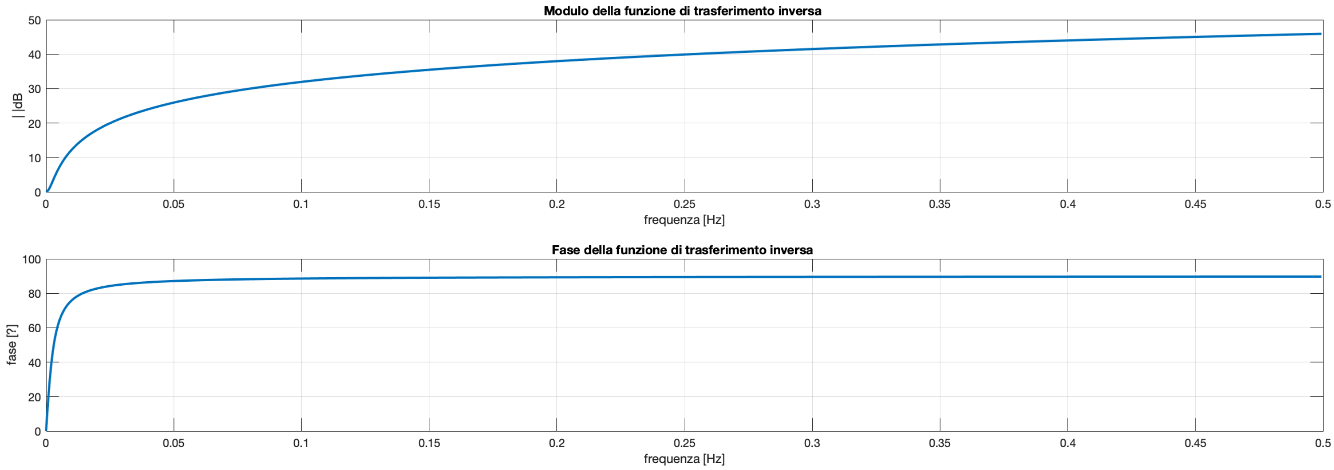


Ora si determina la funzione di trasferimento inversa

$$H_i(\omega) = \frac{1}{H(\omega)} = 1 + i\omega\tau$$

```
FTinvpos = 1 + i*2*pi*f(1:end/2)' .* tau;
FTinvneg = flipud(FTinvpos);
FTinv = [FTinvpos; FTinvneg];
```

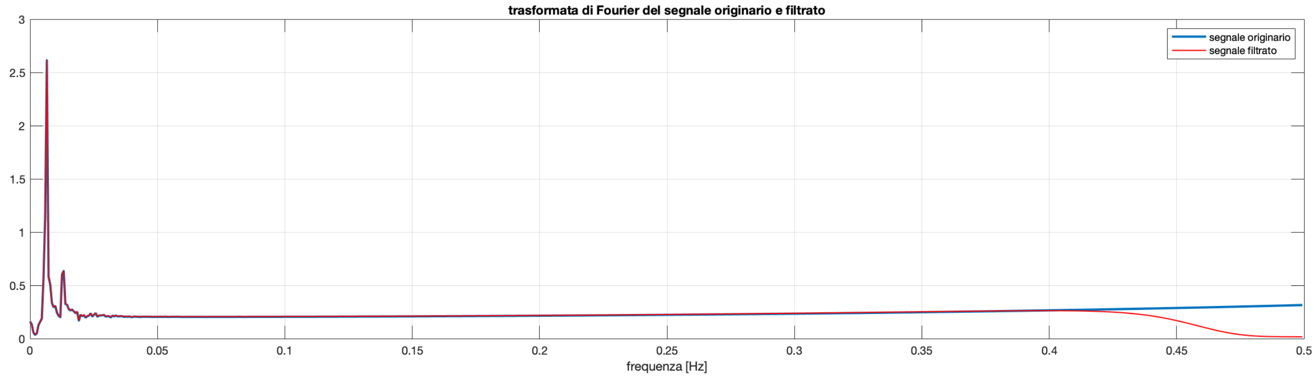
Come si può notare nei seguenti diagrammi di Bode la funzione di trasferimento inversa si presenta come un filtro passa-alto.



Per effettuare la compensazione dinamica del segnale non resta che moltiplicare la trasformata del segnale filtrato per la funzione di trasferimento inversa della sonda.

```
% moltiplicazione della trasformata del segnale filtrato per la funzione di
% trasferimento inversa
TsCompSonda = TSfilt.*FTinv ;
```

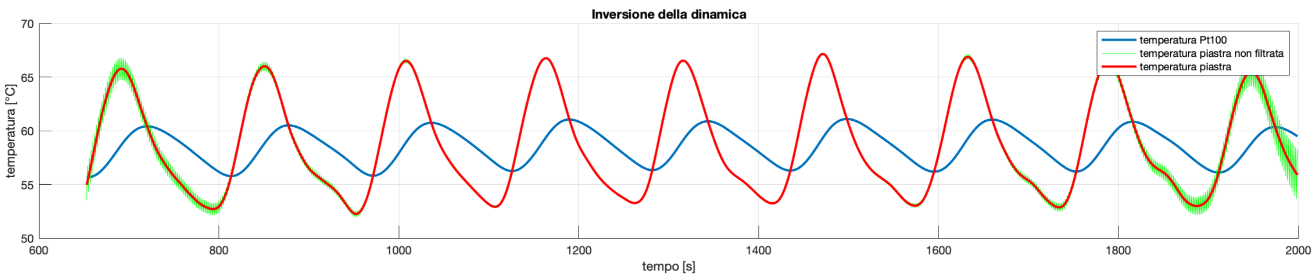
Ciò che sio ottiene è la trasformata di Fourier del segnale compensato dinamicamente, il segnale presenta una componente di rumore che viene eliminato con un filtraggio successivo. In seguito vengono riportate le trasformate di Fourier del segnale affetto da rumore e filtrato.



Per ottenere l'andamento temporale del segnale non resta che eseguire l'antitrasformata, facendo attenzione a considerare che il segnale finale avrà solamente parte reale. Difatti eseguendo l'antitrasformata del segnale verranno verrà generata anche la parte immaginaria, dovuta all'errore inerente. Quindi sarà necessario specificare questa condizione nel codice in modo da eliminare la parte immaginaria.

```
% antitrasformata del segnale compensato
TempIngSonda1 = ifft(TsCompSonda, 'symmetric');
```

Infine si riporta l'andamento della temperatura della sonda Pt100 e quello della piastra termostatata.



CONCLUSIONI

Il segnale di temperatura ricostruito ottenuto risulta essere amplificato e sfasato, in particolare anticipato, rispetto al segnale della sonda. Considerando che la funzione di trasferimento dello strumento si comporta come un filtro passa basso (ciò è dovuto all'inerzia termica della sonda) e supponendo che il segnale della piastra sia sufficientemente veloce in modo tale da non permettere alla sonda di riprodurlo fedelmente, ci si aspetta che il segnale dello strumento risulti attenuato e ritardato. Quindi il risultato della compensazione dinamica risulta essere coerente con le ipotesi fatte.

Osservando l'andamento della temperatura della piastra si può notare come la fase di salita è molto più rapida di quella di discesa. Difatti la prima è causata dalla potenza termica dissipata dalla resistenza per effetto Joule e assorbita principalmente dalla piastra per conduzione, mentre la fase di discesa è determinata dalla convezione naturale in aria.

SCRIPT MATLAB

```
%% SCRIPT MATLAB PT100

clear all
close all
clc

%% Importazione dati Labview
% Dati scalino per taratuta dinamica

misura_scalino = importdata('Misura_Scalino.txt');
tempo = misura_scalino.data(:,1);
vout = misura_scalino.data(:,2);

% Dati piastra termostatata per la compensazione dinamica

misura_piastra_termostatata = importdata('Misura_Piastra_Termostatata.txt');
temposig = misura_piastra_termostatata.data(:,1);
voutsig = misura_piastra_termostatata.data(:,2);

%% Ricostruzione temperatura

TPt100sca = vout*50 - 30;
TPt100sig = voutsig*50 - 30;
figure
subplot(2,1,1)
plot(tempo, TPt100sca,'LineWidth',2), grid on, xlabel('tempo [s]'),
ylabel('temperatura [C]'),
title('Scalino di temperatura con fornelletto');
subplot(2,1,2)
plot(temposig, TPt100sig,'LineWidth',2), grid on, xlabel('tempo [s]'),
ylabel('temperatura [C]'),
title('Temperatura registrata della piastra termostatata');

%% Taratura dinamica

% -- 1° Metodo (metodo grafico) —

% Temperatuta iniziale

Ti = mean(TPt100sca(1:14));
```

```
% Temperatura finale

Tf = mean(TPt100sca(390:400));

% Temperatura al tempo tau

Ttau = (Ti - Tf)*exp(-1) + Tf;

% Ti = 19.1364

% Tf = 81.5503

% Ttau = 58.5898

% t determinato graficamente

tTtau = 76.45;
ti = 14;
tau1 = tTtau - ti;

% tau1 = 62.4500

% -- 2° Metodo (linearizzazione eq. differenziale) —+

% Tempo di campionamento e frequenza di campionamento (1 s e 1 Hz)
tc = tempo(2) - tempo(1);
fc = 1/tc;

% filtraggio del segnale, viene considerato solamente il segnale
% del transitorio (16:400)

[X, Y] = butter(2, 0.05);
TPt100scafilt = filtfilt(X, Y, TPt100sca(17:400));
Tsca = TPt100scafilt(1:400);
nsca = length(Tsca);
tsca = 0:tc:(nsca - 1)*tc;

% linearizzazione

ylin = log((Tsca- Tf)/(Ti - Tf));

% regressione con fitlm

lin = fitlm(tsca,ylin, 'intercept', false);
```

```
figure
subplot(2,1,1), plot(tempo,TPt100sca,'LineWidth',2)
hold on
plot(16, 19.56 ,'or',75.58, 58.28,'or'), grid on, xlabel('tempo [s]'),
ylabel('temperatura [C]'),
title('Metodo grafico');
subplot(2,1,2)
plot(lin);
grid on,
title('Metodo con linearizzazione');

tau2 = -1/lin.Coefficients.Estimate;
tau = tau2;

% tau2 = 62.9983

% -- 3° metodo (minimi quadrati funzione esponenziale) --

% al termine dello script viene definita la funzione
% esponenziale della temperatura

dati = TPt100scafilt;
l = length(dati);

% inizializzazione del valore tau

found_tau = 0;

% inizializzazione funzione penalità

lsq_t = intmax;

% loop su tau

for new_tau = 50:0.001:70
    lsq = 0;
    lsq_temp = 0;

    % calcolo funzione penalità

    for t = 1:l
        lsq = lsq_temp + (dati(t) - temp(t, new_tau, Ti, Tf))^2;
        lsq_temp = lsq;
```

```
end

    % aggiornamento funzione penalità e tau relativo

    if lsq < lsq_t
    found_tau = new_tau;
    lsq_t = lsq;
    end
end

% tau = 62.4580

% calcolo dei residui

res = zeros(l,1);

for t = 1:l
    res(t) = dati(t) - temp(t, found_tau, Ti, Tf);
    lsq_temp = lsq;
end

figure
plot(tempo(17:400),res);

%% Filtraggio dati segnale
% filtro butterworth on-line
% frequenza di taglio valutata dal grafico della trasformata del segnale

[A, B] = butter(2, 0.04);
Tsigfilt = filtfilt(A ,B ,TPt100sig);
mu = mean(Tsigfilt(243:end));
figure
plot(temposig, Tsigfilt, 'r','LineWidth',2)
hold on
plot( temposig, TPt100sig,'LineWidth',1), grid on
xlabel('t[s]')
ylabel('T[?C]')
title('segnale piastra termostatata originario e filtrato')
```

```
%% Trasformata di Fourier segnale normale e filtrato, traslati

% per l'elaborazione del segnale verrà tolto il valore medio per poter
% essere aggiunto al termine della compensazione dinamica

% trasformata del segnale affetto da rumore e filtrato

TS = fft(TPt100sig(549:end) - mu);
TSfilt = fft(Tsigfilt(549:end) - mu);

% numero campioni

N = length(TPt100sig(549:end));
% risoluzione frequenza

h =1/(N*tc);

% vettore frequenze

f = 0:h:fc*(N-1)/N ;

% rappresentata solamente la parte positiva

figure
subplot(2,1,1), plot(f(1:end/2), abs(TS(1:end/2))/N,'LineWidth',2), grid on,
title('trasformata del segnale originario'),
xlabel('frequenza [Hz]');
subplot(2,1,2), plot(f(1:end/2) ,abs(TSfilt(1:end/2))/N, 'r', 'LineWidth', 2),
grid on,
title('trasformata del segnale filtrato'),
xlabel('frequenza [Hz]’);

%% Funzione di trasferimento inversa

% costruzione della funzione di trasferimento inversa, parte positiva e
% negativa

FTinvpos = 1 + i*2*pi*f(1:end/2)' .* tau;
FTinvneg = flipud(FTinvpos);
FTinv = [FTinvpos; FTinvneg];
figure
```

```
hold on

subplot(2,1,1)
Ft_in = 20*log10(abs(FTinv));
Ft_in = Ft_in(1:end/2);
plot(f(1:end/2), Ft_in,'LineWidth',2)
title('Modulo della funzione di trasferimento inversa ')
xlabel('frequenza [Hz]')
ylabel('|  |dB')
grid on
subplot(2,1,2)
Fase = angle(FTinv)*180/pi;
Fase = Fase(1:end/2);
plot(f(1:end/2) , Fase,'LineWidth',2)
title('Fase della funzione di trasferimento inversa ')
xlabel('frequenza [Hz]')
ylabel('fase [?]')
grid on
hold off

%% Compensazione dinamica

% moltiplicazione della trasformata del segnale filtrato per la funzione di
% trasferimento inversa

TsCompSonda = TSfilt.*FTinv ;

% antitrasformata del segnale compensato

TempIngSonda1 = ifft(TsCompSonda, 'symmetric');
temposig = temposig(549:end);

% filraggio del segnale (nel processo di antitrasformazione viene
% introdotto un disturbo con frequenza vicina a quella di campionamento

[C, D] = butter(2, 0.9);
TempIngSonda = filtfilt(C ,D ,TempIngSonda1) + mu;

% rappresentazioni trasformate dei segnali

figure
TS_new = fft(TempIngSonda1);
TS_new_filt = fft(TempIngSonda - mu);
```

```
plot(f(1:end/2),abs(TS_new(1:end/2))/N,'LineWidth',2)
hold on
plot(f(1:end/2), abs(TS_new_filt(1:end/2))/N, 'r','LineWidth',2), grid on
title('trasformata di Fourier del segnale originario e filtrato')
xlabel('frequenza [Hz]')
legend('segnale originario' , 'segnale filtrato’)

% rappresentazione segnale originario e segnale compensato dinamicamente

figure
hold on
plot(temposig(106:1452), Tsigfilt(654:2000),'LineWidth',2)
plot(temposig(106:1452),TempIngSonda(106:1452),'r','LineWidth',2)
title('Inversione della dinamica');
xlabel('tempo [s]');
ylabel('temperatura [?C]');
legend('temperatura Pt100' , 'temperatura piastra')
grid on
hold off

%% Funzione temperatura per 3° metodo

function Te = temp(t, tau, Ti, Tf)
    Te = (Ti - Tf) * exp(-t/tau) + Tf;
end
```