

# Ponte bolometrico <sup>1</sup>

## 1 Introduzione

Scopo di questa esercitazione è la misura di una potenza a radiofrequenza per mezzo di un elemento sensibile, comunemente chiamato bolometro, il cui valore di resistenza dipende dalla temperatura e quindi dalla potenza dissipata. Il metodo di misura è del tipo a sostituzione: la potenza totale dissipata dal bolometro è mantenuta costante nelle due fasi della misura: nella prima parte, senza la presenza di  $P_{rf}$ , il ponte è portato all'equilibrio e si ha una potenza  $P_1$  dissipata sul sensore bolometrico; nella seconda fase si misura la potenza  $P_{rf}$  incognita come differenza fra  $P_1$  e la potenza  $P_2$  necessaria per riportare il ponte all'equilibrio, quando è presente  $P_{rf}$ . Sia  $P_1$  che  $P_2$  vengono valutate tramite l'usuale formula  $P = RI^2$ .

Poiché nella seconda fase il ponte di Wheatstone è nuovamente in equilibrio, la potenza dissipata dal sensore bolometrico è la stessa che si ha nella prima fase, in assenza della  $P_{rf}$ . Per ragioni pratiche si utilizzerà una frequenza di circa 100 kHz. In questa esercitazione il sensore bolometrico è costituito da una lampadina a filamento le cui caratteristiche *bolometriche* devono essere preventivamente valutate sperimentalmente.

## 2 Caratterizzazione del sensore bolometrico

Il sensore bolometrico utilizzato è una lampadina a filamento con caratteristiche nominali: 28V, 40mA. I parametri d'interesse da misurare sono la resistenza apparente ( $R_a = V/I$ ) e la resistenza differenziale ( $R_d = dV/dI$ ) che vengono misurati con il metodo voltamperometrico.

Al fine della misura si utilizzi lo schema di figura 1 utilizzando valori di tensione in continua fra 0 e 5 V a passi di 0.5 V. Si costruisca una tabella per tensioni e correnti. Da questi valori si ricavano la resistenza apparente e differenziale, disegnando il grafico con le corrispondenti fasce di incertezza. Con i

<sup>1</sup>Questi appunti sono parzialmente tratti dal materiale prodotto da E. Rubiola tra il 1995 ed il 2000

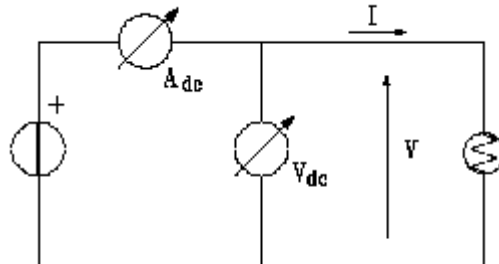


Figura 1: schema per la caratterizzazione del bolometro in continua.

dati disponibili si valuti la sensibilità assoluta  $S = \frac{\Delta R}{\Delta P}$  e la sensibilità relativa  $s = \frac{1}{R} \frac{\Delta R}{\Delta P}$ . Per il progetto dei valori di resistenza da utilizzare per il ponte bolometrico è necessario, in primo luogo, individuare un valore di resistenza del sensore bolometrico e, successivamente, determinare le altre resistenze al fine di massimizzare la sensibilità di rivelazione della condizione di equilibrio.

### 3 Realizzazione del ponte bolometrico

Dalla formula:

$$V_d = V_1 - V_2 = \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \cdot V_a \quad (1)$$

si ha che il ponte di figura 2 è in equilibrio ( $V_d = 0$ ) quando  $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$ . Nella equazione 1 il sensore bolometrico è indicato da  $R_1$ . Si costruisca il ponte al fine di massimizzare il valore di sensibilità senza operare con tensioni di alimentazione troppo elevate e tenendo presente i valori di resistenza ottenuti dalla tabella al punto 2. Si ricorda che la sensibilità di rivelazione dell'equilibrio è massimizzata per valori di resistenze identici. Se le tre resistenze fisse sono  $R_2 = R_3 = R_4 = R$  e si indica il sensore bolometrico con  $R_1 = R \cdot (1 + \alpha)$ , dove  $\alpha$  è la variazione relativa di resistenza dovuta alla temperatura, allora, dalla eq.1, si ha:

$$V_d = \frac{\alpha}{4} V_a \quad (2)$$

Quando la potenza totale dissipata dal sensore bolometrico assume il valore nominale, poiché il ponte è in equilibrio, si ha  $\alpha = 0$ ,  $R_1 = R$ , e  $V_d = 0$ . All'equilibrio la corrente totale  $I$  misurata dall'amperometro di figura 2 si divide a metà fra i due rami del ponte mentre la corrente che attraversa il voltmetro è nulla. La potenza dissipata dal bolometro, nella fase in cui non si ha la presenza della  $P_{rf}$ , è pari a  $P_1 = R \frac{I^2}{4}$ . Inserendo ora la potenza incognita

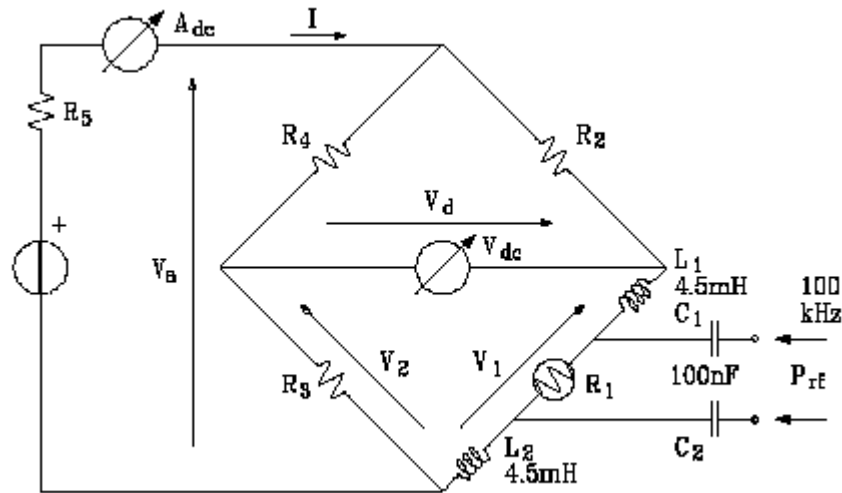


Figura 2: schema del ponte bolometrico in cui  $R_1$  è il sensore bolometrico di valore  $R_1 = R(1 + \alpha)$ .

$P_{rf}$  e riportando il ponte all'equilibrio, si ha una corrente *in continua*, che circola nell'amperometro, di valore  $I_2$  ed una la potenza *in continua* dissipata di valore  $P_2 = R \frac{I_2^2}{4}$ . A quest'ultima occorre aggiungere la potenza  $P_{rf}$  per cui il bolometro dissipa complessivamente  $P_2 + P_{rf}$ .

Poiché il ponte è in equilibrio sia nella prima fase (senza  $P_{rf}$ ) che nella seconda fase (con  $P_{rf}$ ), ne deriva che il valore di resistenza apparente del sensore bolometrico è sempre la stessa. Ciò comporta che la potenza dissipata (...e quindi la temperatura) del sensore bolometrico è rimasta invariata. Poiché la potenza dissipata è la stessa nei due casi, si ha  $P_1 = P_2 + P_{rf}$  e dunque:

$$P_{rf} = P_1 - P_2 = \frac{R}{4} \cdot (I_1^2 - I_2^2) \quad (3)$$

## 4 Considerazioni pratiche

Se, per esempio, il bolometro ha resistenza di  $200 \Omega$  a  $2 \text{ V}$  e  $230 \Omega$  a  $2.5 \text{ V}$ , si possono impiegare resistori da  $220 \Omega$ . Per questi valori ci si aspetta che il ponte sia in equilibrio per una tensione ai capi del bolometro di poco superiore ai  $2 \text{ V}$  (quindi una tensione di alimentazione del ponte  $V_a$  pari al doppio). La presenza di  $R_5$  (valore orientativo:  $1.5 \text{ k}\Omega$ ) nel circuito di figura 2 è necessaria per ottenere una regolazione più fine dell'alimentatore.

## 5 Dinamica di ingresso e misure di potenza

Se  $P_{rf}$  si avvicina a  $P_1$  l'equilibrio del ponte si raggiunge con una piccola  $P_2$ . Questo comporta di ridurre troppo la tensione di alimentazione del ponte  $V_a$  passando dalla misura a vuoto alla misura con  $P_{rf}$ , rendendo difficile la rivelazione dell'equilibrio. Se, per esempio,  $P_{rf} = 0.9P_1$ , si ha  $P_2 = 0.1P_1$ , il che comporta di ridurre  $V_a$  a circa un terzo del valore iniziale. Con queste osservazioni si calcoli la massima potenza  $P_{rf}$  che si può applicare al ponte per il suo funzionamento in condizioni limite e in condizioni *ragionevoli*. In assenza di radiofrequenza, si porti il ponte all'equilibrio agendo sull'alimentatore regolabile. Si applichi ora il segnale alla frequenza di 100 kHz e si riporti il ponte all'equilibrio. Leggendo le correnti di alimentazione  $I_{dc}$  con e senza segnale, si calcoli la potenza del segnale alternato dissipata dal bolometro. Si ripeta la misura anche con valori di  $P_{rf}$  verso gli estremi della dinamica. Si valuti l'incertezza associabile alla misura di potenza senza tenere conto degli effetti dovuti alle induttanze di blocco per l'alternata e le capacità di blocco per la continua. Si trascuri il problema di adattamento di impedenza fra la sorgente ed il sensore bolometrico.

## 6 Stima delle incertezze di misura

### 6.1 Contributo dell'amperometro

Dall'equazione 3 si può calcolare il contributo di incertezza dovuto all'amperometro in quanto:

$$(\delta P_{rf})_{\delta I_1} = \frac{1}{2} R I_1 \delta I_1 \quad (4)$$

ed anche

$$(\delta P_{rf})_{\delta I_2} = \frac{1}{2} R I_2 \delta I_2 \quad (5)$$

e quindi

$$\delta P_{rf} = \frac{1}{2} R (I_1 \delta I_1 + I_2 \delta I_2) \quad (6)$$

### 6.2 Contributo del voltmetro per la misura della condizione di equilibrio

Volendo considerare gli effetti di incertezza dovuti alla misura della tensione di equilibrio del ponte, si ha:

$$\delta V_d = \frac{1}{4} s V_a \delta P \quad (7)$$

e, ricavando  $\delta P$ , con la sostituzione  $V_a = RI$ , si ottiene:

$$\delta P = \frac{4}{sRI} \delta V_d \quad (8)$$

Poiché la stima della potenza  $P_{rf}$  necessita di equilibrare il ponte due volte per rivelare la condizione  $V_d = 0$ , è ragionevole che la risoluzione del voltmetro sia sempre la stessa. Si ha così la seguente espressione:

$$\delta P_{rf} = \left( \frac{4}{sRI_1} + \frac{4}{sRI_2} \right) \delta V_d \quad (9)$$

### 6.3 Altre cause di incertezza

Le induttanze di blocco dell'alternata ed i condensatori di blocco della continua non rappresentano reattanze ideali (circuito aperto e cortocircuito). Si cerchi di valutare grossolanamente l'ordine di grandezza della loro influenza sulla misura di potenza. Infine si osservi che, per problemi di adattamento d'impedenza, al bolometro non viene trasferita tutta la potenza da misurare. In genere, nei casi reali, il manuale dello strumento indica la perdita di potenza o il rapporto di onde stazionarie. Questi dati permettono di apportare dei fattori di correzione alla misura aggiungendo, a sua volta, dei termini di incertezza.

## 7 Ponte bolometrico con riequilibrio in bassa frequenza

Lo schema del ponte bolometrico con riequilibrio in bassa frequenza è riportato in figura 3. In assenza di radiofrequenza il ponte è in equilibrio con una corrente di bassa frequenza  $I_{ac} = I_1$ . Applicando il segnale a radiofrequenza si deve riequilibrare il ponte riducendo la corrente di bassa frequenza fino al valore  $I_{ac} = I_2$ . La potenza a radiofrequenza si ricava per differenza delle dissipazioni prodotte da  $I_1$  e  $I_2$  nel bolometro. La corrente in bassa frequenza ( $\approx 500$  Hz) fornita dall'amplificatore comandato dalla scheda di sintesi, circola in parte nel ponte bolometrico ed in parte nel ramo costituito dall'alimentatore e dalla resistenza  $R_5$ . In pratica la corrente di riequilibrio in alternata si suddivide fra il ramo dell'alimentatore e il ponte bolometrico secondo la proporzione che lega fra loro le rispettive conduttanze. Si osservi che l'inserimento di una induttanza di blocco (in serie a  $R_5$ , ed identica a quelle già utilizzata per il blocco della  $P_{rf}$  a 100 kHz) sarebbe inutile a causa del basso valore della frequenza utilizzata per il riequilibrio. Al fine di semplificare la misura delle correnti  $I_1$  e  $I_2$  è possibile effettuare una misura di tensione ai capi del ponte e valutare indirettamente la corrente che lo attraversa.



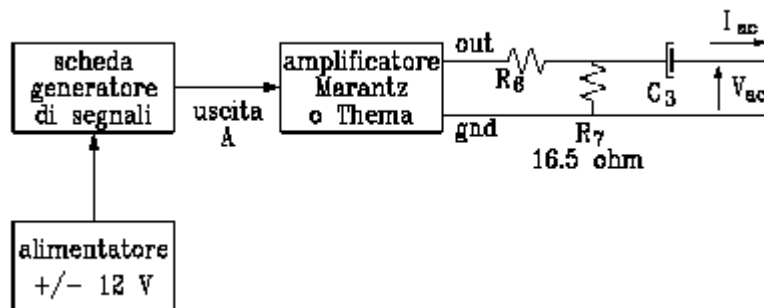


Figura 4: schema per il generatore di bassa frequenza utilizzato per equilibrare il ponte bolometrico.

regolazione ragionevole per la  $V_a$ . Si raccomanda di misurare il segnale con l'oscilloscopio.

**Amplificatore Marantz PM 230.** Usare il canale sinistro (Left) e collegare il generatore di segnali all'ingresso CD. Predisporre l'amplificatore per ingresso CD tramite tasto sul pannello frontale. Escludere i filtri le cui regolazioni sono presenti sul pannello frontale; regolare i controlli di tono a metà corsa. Dei due morsetti di uscita il nero è la massa, il rosso è il segnale. Attenzione alla regolazione della potenza: l'amplificatore può erogare 60 W su  $8\Omega$ , eccessivi per la misura e sufficienti a provocare danni. Con tutti i comandi in centro dinamica (inclusi il volume ed il bilanciamento) si ottiene la massima potenza con circa  $650\text{ mV}_{\text{eff}}$  all'ingresso CD. Per l'esperienza da svolgere si regoli il bilanciamento fra i canali in modo da privilegiare il canale destro (si ricorda che si utilizza, al contrario, il sinistro) in modo da ridurre la potenza disponibile sul canale sinistro. Con il controllo di volume si regoli successivamente l'ampiezza.

**Amplificatore Thema GT 15.** Regolare i controlli di tono a metà corsa. Usare l'ingresso "low" e l'uscita "H. Phone". L'amplificatore ha due controlli di volume in cascata ("gain" e "master") che devono essere regolati in modo da non saturare gli stadi intermedi del circuito. Si raccomanda di controllare la forma d'onda del segnale d'uscita con l'oscilloscopio. Regolando il gain a metà corsa ed il master a 9/10, si ottiene la massima potenza (12 W su  $8\Omega$ ) con  $140\text{ mV}_{\text{eff}}$  all'ingresso "low". Per l'esperienza da svolgere è opportuno regolare i controlli dei toni acuti (treble) e bassi (bass) al minimo (0/10) ed il controllo dei toni medi (middle) a 5/10. Regolare il controllo di guadagno (gain) a 1/10 e usare come controllo di ampiezza il controllo di volume principale (master).

## 8 Misure di potenza

La misura di potenza a radiofrequenza è ottenuta per differenza della parte della potenza a bassa frequenza che viene dissipata dal bolometro nelle due condizioni, in presenza e in assenza di segnale a radiofrequenza, ma sempre con il ponte in equilibrio. Con i valori dei componenti e dei vari parametri scelti, si calcoli la massima potenza  $P_{rf}$  che si può applicare al ponte per il suo funzionamento. Trascurando i problemi di adattamento di impedenza e considerando le reattanze come ideali, si valuti l'incertezza della misura di potenza.