

---

---

LABORATORY NOTES  
OF  
ADVANCED PHYSICS LABORATORY

---

---

COLLECTION OF THE LABORATORY NOTES OF THE EXPERIMENT MEASUREMENT OF THE CRITICAL TEMPERATURE OF A SUPERCONDUCTOR VIA RESISTANCE MEASUREMENTS.

EDITED BY  
ALICE PAGANO AND FRANCESCA DODICI  
*The University of Padua*



# Contents

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 Misura resistenza del termometro</b>                          | <b>1</b>  |
| 1.1 Pratica con la saldatura . . . . .                             | 1         |
| 1.2 Ponte di Wheatstone . . . . .                                  | 1         |
| 1.2.1 Calibrazione DC . . . . .                                    | 2         |
| 1.2.2 Calibrazione AC . . . . .                                    | 3         |
| <b>2 Costruzione dell'amplificatore differenziale</b>              | <b>7</b>  |
| 2.1 Amplificatore differenziale . . . . .                          | 7         |
| 2.1.1 Usare il generatore per alimentare l'amplificatore . . . . . | 10        |
| 2.1.2 Assemblamento circuito . . . . .                             | 10        |
| 2.2 Raffreddamento circuito con azoto liquido . . . . .            | 12        |
| <b>3 Saldatura definitiva circuito</b>                             | <b>15</b> |
| 3.1 Circuito termometro e amplificatore . . . . .                  | 15        |
| 3.2 Assemblaggio finale . . . . .                                  | 15        |
| 3.3 Breve lezione su Arduino . . . . .                             | 20        |
| 3.3.1 LabView . . . . .  | 20        |
| 3.4 Collegare termometro Pt100 . . . . .                           | 20        |
| 3.5 Come funziona il criostato . . . . .                           | 21        |
| 3.6 Errori trovati nel circuito del ponte (termometro) . . . . .   | 21        |
| <b>4 Fase di misura</b>  | <b>23</b> |
| 4.1 Test preliminare . . . . .                                     | 23        |
| 4.2 Misura con Arduino . . . . .                                   | 23        |
| 4.2.1 Temperatura con pt100 (analog pin A0) . . . . .              | 23        |
| 4.2.2 Tensione $V_{out}$ (analog pin A1) . . . . .                 | 23        |
| 4.3 Disaccoppiamento termico termometro e campione . . . . .       | 24        |
| 4.4 Secondo test preliminare . . . . .                             | 25        |
| 4.5 Correzioni circuito amplificatore . . . . .                    | 26        |
| 4.6 Finalmente: misure . . . . .                                   | 27        |
| 4.6.1 Potenziale $V_0 = 6$ V . . . . .                             | 27        |



# Chapter 1

## Misura resistenza del termometro

Dopo aver ricevuto lo **scatolone fabbricone** con tutto il materiale necessario per l'intera esperienza di laboratorio, la lezione di oggi riguarda principalmente fare pratica con le saldature e iniziare l'assemblaggio del ponte di Wheatstone che servirà per misurare la resistenza del termometro. Quest'ultimo circuito una volta assemblato dovrà essere saldato nel modulo NIM. Questo modulo verrà inserito in un posto in cui possono essere selezionate varie tensioni.

**Laboratory 1.**  
Wednesday 7<sup>th</sup>  
October, 2020.  
*Compiled:*  
Wednesday 23<sup>rd</sup>  
December, 2020.

### 1.1 Pratica con la saldatura

Per prima cosa notiamo che ci sono due tipi di fili diversi: il cosidetto monofilo (che è rigido) e il multifilo che è più flessibile. Quello che cambia è che se io prendo la stelafili e levo la ricopertura, per il primo c'è un solo filo di rame, mentre per il multifilo c'è un intreccio di fili di rame.

Per fare una buona saldatura bisogna tenere conto delle tolleranze meccaniche del filo. Infatti se ho un filo molto piccolo, per saldarlo con la basetta devo inserire tanto stagno facendo però fare attenzione a non rompere il filo stesso. Inoltre, bisogna cercare di pulire bene i componenti prima della saldatura. Un altro accorgimento è che devo scaldare sui 150-200° (lo stagno fornito fonde attorno a quella temperatura), poi bisogna collegare l'elemento del componente con la basetta che ha una massa molto maggiore (quindi capacità termica molto maggiore) rispetto al componente, quindi anziché mettere il saldatore a contatto con il filo, metterlo al contatto con la base per non rompere il filo.

Adesso vogliamo saldare l'estremità del filo con la basetta. Far passare il filo e saldare. Un'altro accorgimento è che indipendentemente dal fatto che sia mono o multi filo bisogna fare la **prestagnatura**, cioè ricoprire uniformemente il filo con lo stagno prima di fare la saldatura vera e propria. In questo modo si perde più tempo, ma la resa è migliore, infatti c'è una notevole differenza tra saldare il filo pre stagnato e non stagnato. Per dissaldare si utilizza la pompetta dopo aver scaldato nuovamente lo stagno.

### 1.2 Ponte di Wheatstone

Adesso vogliamo montare sulla basetta mobile un circuito Wheatstone resistivo, che per la nostra esperienza sarà fondamentale. Infatti è necessario calibrare correttamente il circuito per trovare i valori ottimali delle resistenze.

Nella lezione di oggi abbiamo iniziato a costruire un prototipo di Ponte di Wheatstone per prendere dimistichezza con la sua calibrazione. Infatti i valori delle resistenze scelte, come ad esempio  $R$ , sono stati selezionati molto intuitivamente. Sarà necessario calcolare i valori ottimali per l'esperimento.

Per prima cosa bisogna realizzare un circuito come in Fig. 1.1. Abbiamo utilizzato le seguenti resistenze:

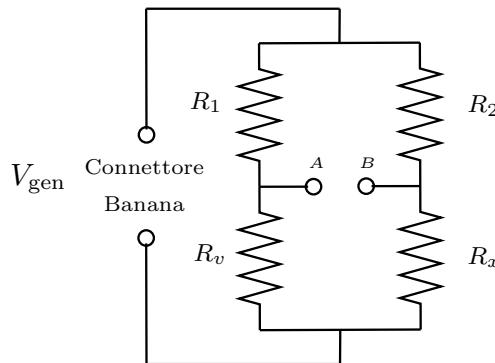
$$R_1 = R_2 = 57.9 \Omega, \quad R_x = 28.8 \Omega$$

Per scegliere il valore di  $R_x$ , essendo che questo nel nostro circuito sarà rappresentato dal termometro, abbiamo consultato una tabella che descrive l'andamento del rapporto  $R_x/R_0$  all'aumentare della temperatura per il nostro materiale. Si ha che il valore di  $R_0 = 100 \Omega$ , mentre il rapporto delle due quantità a 90 K (circa la temperatura alla quale lavoreremo) risulta essere:

$$\frac{R_x}{R_0} = 0.24298 \longrightarrow R_x = 24.298 \Omega$$

Quindi si è cercata nel cassetto una resistenza che avesse un valore simile a questo teorico.

Per quanto riguarda la resistenza  $R_v$  abbiamo utilizzato la resistenza presente nel modulo NIM e l'abbiamo regolata ad un valore approssimativamente uguale al valore  $R_x$  come atteso teoricamente.



**Figure 1.1:** Rappresentazione del ponte di Wheatstone.

### 1.2.1 Calibrazione DC

Per calibrare effettivamente il circuito bisogna effettuare prima una misura in **DC**. In questo caso la tensione  $V_{\text{gen}}$  è fornita dal generatore di tensione collegato attraverso i **cavi banana-banana**. Poi, per misurare la tensione ai vari capi delle resistenze si utilizza il tester digitale che ha una sensibilità del mV.

Affinchè il circuito sia calibrato in DC, dobbiamo variare il valore  $R_v$  fino a quando la tensione misurata ai capi  $B$  e  $A$  sia nulla,  $V_{BA} = 0$ . In particolare, la tensione  $V_A$  e  $V_B$  si può calcolare facilmente notando che sono dei partitori di tensione:

$$V_B = V_{\text{gen}} \frac{R_x}{R_2 + R_x}, \quad V_A = V_{\text{gen}} \frac{R_v}{R_1 + R_v}$$

Dall'analisi in DC abbiamo trovato che il valore che pone a zero la differenza di potenziale  $V_{AB}$  è  $R_v = 28.8 \Omega$ .

**TO DO:** cercare di capire **accademicamente** il valore ottimale per la resistenza  $R_x$  per ottenere una potenza dissipata minore di  $1 \times 10^{-4} \text{ W}$ . Si ricorda che la potenza dissipata si può calcolare come:

$$P = \frac{V_B^2}{R_x} = V_{\text{gen}}^2 \frac{R_x}{(R_1 + R_x)^2} < 1 \times 10^{-4} \text{ W}$$

e quindi

$$V_B^2 < \sqrt{R_x \times 10^{-4}}$$

**SOLUTION:** Non c'è una soluzione univoca. Con i valori precedentemente scelti otteniamo che:

$$P = V_{\text{gen}}^2 \frac{R_x}{(R_1 + R_x)^2} = V_{\text{gen}}^2 \frac{28.8 \Omega}{(57.9 + 28.8)^2 \Omega^2} = V_{\text{gen}}^2 \times 3.83 \times 10^{-3} \Omega < 1 \times 10^{-4} \text{ W}$$

che implica:

$$V_{\text{gen}}^2 < 0.026 \rightarrow V_{\text{gen}} < 0.16$$

La soluzione scelta alla fine è nel quaderno di Francesca (Prova-3).

Per ridurre  $V_B = V_{\text{gen}} \frac{R_x}{(R_1 + R_x)}$  bisogna o diminuire  $V_{\text{gen}}$  (aumenta l'errore sulla resistenza) oppure aumentare  $R_1$ .

### 1.2.2 Calibrazione AC

Fatta la calibrazione in DC, si può passare a quella in **AC** utilizzando il generatore di segnali. In questo caso è necessario collegare la tensione utilizzando i cavi BNC-banana. Il bilanciamento si effettua con l'oscilloscopio. Vedere se il ponte funziona ancora e nel caso contrario capire il perché e cercare di trovare lo stesso risultato ottenuto con la calibrazione DC.

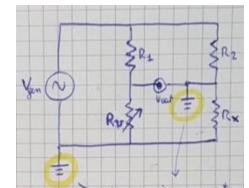
Sorge però un problema: siccome sia generatore che oscilloscopio hanno la massa a terra  $R_x$  è cortocircuitata (vedi Fig. 1.2). Bisogna dunque aggiungere un trasformatore d'isolamento.

Abbiamo cambiato le resistenze utilizzate per far quadrare il discorso della potenza dissipata. Abbiamo scelto:

$$R_1 = 15.01 \text{ k}\Omega, \quad R_2 = 14.89 \text{ k}\Omega$$

Bisogna che disaccoppiano i due circuiti (l'alimentazione e il ponte). Per fare ciò utilizziamo un trasformatore d'isolamento 1 a 1.

Inoltre, utilizzeremo l'amplificatore lock-in per ridurre il rumore. Infatti l'oscilloscopio rileva un range molto grande di frequenze, mentre il lock-in è settato solo sulla banda dei 30 Hz che sono di interesse.



**Figure 1.2:**  $R_x$  è cortocircuitata in AC.

**Laboratory 2.**  
Friday 9<sup>th</sup> October, 2020.  
Compiled:  
Wednesday 23<sup>rd</sup> December, 2020.

### Problema resistenza dei fili

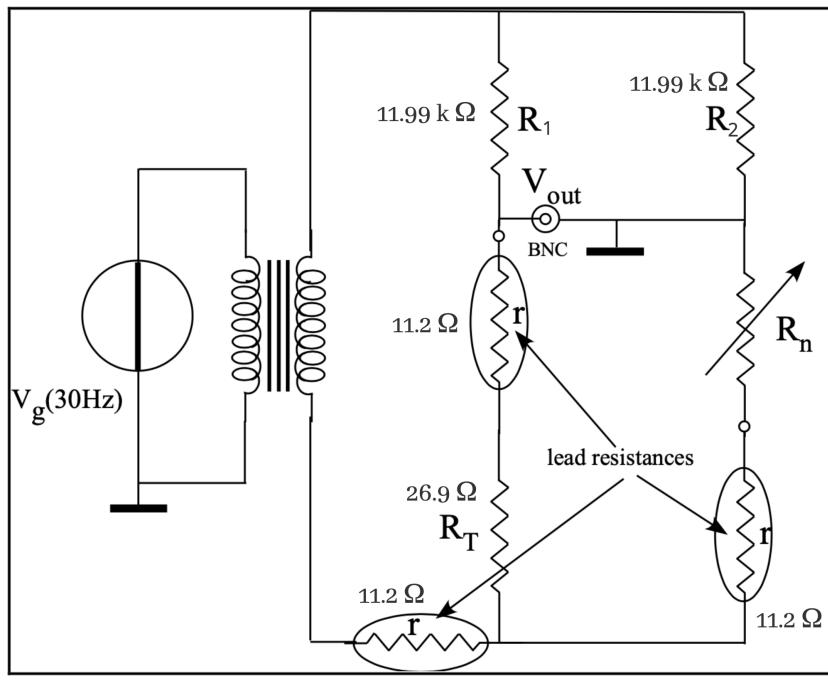
Il termometro che utilizzeremo ha tre fili a cui verranno collegati 3 bnc. Questi fili sono resistivi in quanto devono essere inseriti all'interno del criostato e sono fatti di lega. Non possiamo utilizzare dei fili di rame (che hanno resistenza nulla) in quanto hanno un'alta conducibilità e non permetterebbero di raffreddare il superconduttore all'interno del criostato.

Adesso per simulare la resistenza dei fili utilizziamo delle resistenze di  $\sim 10 \Omega$ .

*Remark.* Lavoreremo range di temperatura di circa 80-90 K (il nostro superconduttore avrà una temperatura critica sui 90-100 K).

### Configurazione finale

Come configurazione finale del nostro circuito abbiamo scelto le resistenze  $R_1$  e  $R_2$ , la resistenza  $R_x \equiv R_T$  e le resistenze parassiti dei fili come in Fig. 1.3.

Temperature bridge  $T_0$ **Figure 1.3:** Ponte di Wheatstone finale.

Una volta scelti i valori di resistenze per costruire il ponte di Wheatstone, abbiamo utilizzato il lock-in per ridurre il rumore ed effettuare una calibrazione precisa in AC. Infatti, aumentando il guadagno del lock-in riusciamo ad ottenere una calibrazione sempre più precisa. Purtroppo, si raggiunge un punto in cui la sensibilità della manopola del potenziometro sarà non sufficiente per calibrare il circuito. Quindi il guadagno non può essere aumentato troppo ma solo fino al punto in cui girando di non troppo la manopola si vedono delle leggere variazioni. Quando praticamente sfiorando la manopola si vedono grandi variazioni significa che abbiamo impostato un guadagno troppo alto.

Domanda: perché il lock-in riduce il rumore e ci permette di fare una calibrazione precisa? Il lock-in riduce il rumore perché genera onde in un range di 30 Hz e poi integra il segnale in quel range  $\pm 0.1$  (dove questo valore è dato dal valore della costante di tempo che è inversamente proporzionale alla lunghezza della banda passante). Invece l'oscilloscopio integra su una banda molto grande, fino al range dei MHz. Questo fa sì che utilizzare il lock-in sia molto conveniente. Inoltre ci fa capire perché i circuiti in AC siano preferibili rispetto a quelli in DC. Infatti, con un circuito in DC non avremmo potuto fare la stessa cosa perché non avevamo un onda portante ad una data frequenza.

Oggi abbiamo calibrato il circuito (ponendo a zero in AC la differenza di potenziale  $V_{AB}$ ) impostando un guadagno del lock-in di  $\sim \times 4.85$ .

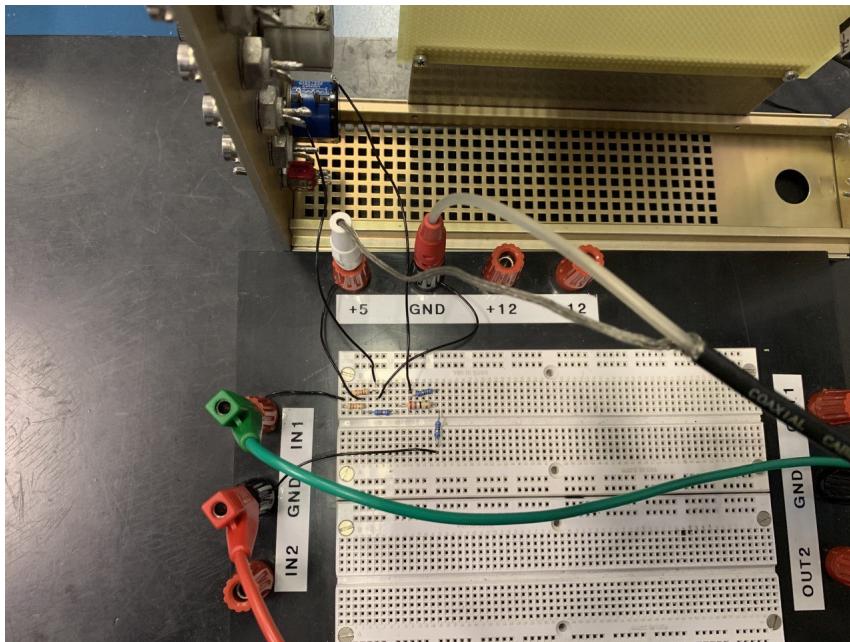
#### Remind 1: Configurazione ponte e calibrazione AC finale

Prima di passare alla sezione successiva in cui dovremo costruire l'amplificatore differenziale, facciamo un recap della disposizione di questo circuito prima di smontarlo. Per la volta prossima è importante ricordare che:

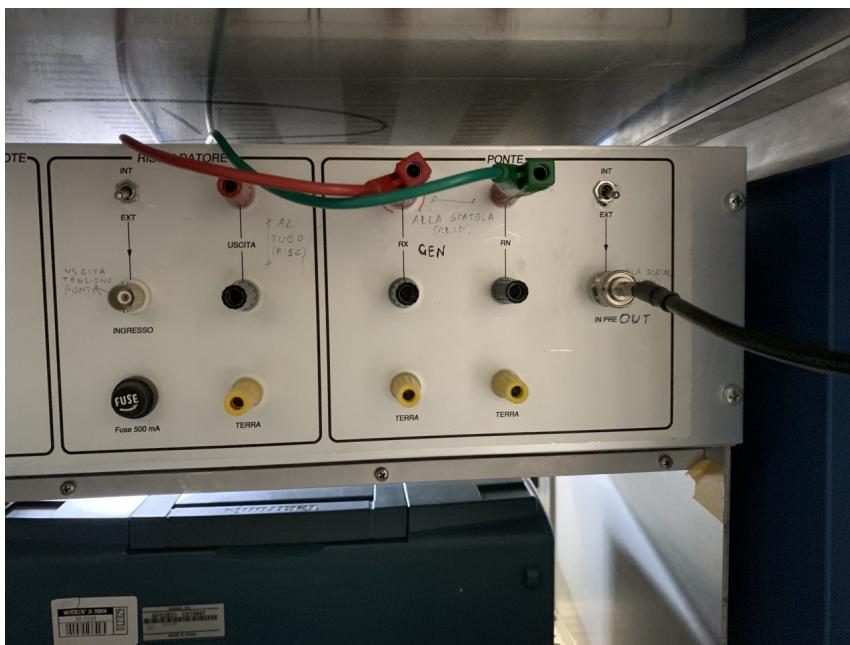
- il circuito finale è organizzato come in Fig. 1.4.
- in particolare, i connettori banana rossi e verdi sono collegati al trasformatore dal quale viene preso il segnale in ingresso. Questi cavi banana

sono connessi sul retro del trasformatore come in Fig. 1.5.

- il connettore banana-bnc (bianco e rosso) serve per misurare la tensione ai capi delle resistenze  $R_1$  e  $R_2$  per regolare la differenza di tensione  $V_{AB}$  a zero. Per fare ciò viene collegato al lock-in per fare la calibrazione. Per connetterlo al lock-in, collegare la parte bnc sul retro del trasformatore come alla sinistra di Fig. 1.5. E' importante notare che la leva deve essere impostata su EXT.



**Figure 1.4:** Circuito finale del termometro calibrato in AC.



**Figure 1.5:** Segnale in ingresso dal trasformatore, come inserire i cavi banana e dove.



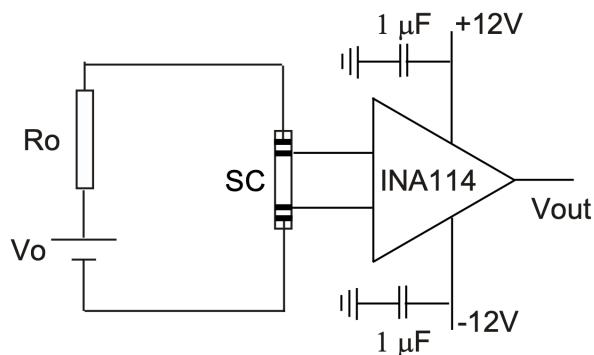
## Chapter 2

# Costruzione dell'amplificatore differenziale

### 2.1 Amplificatore differenziale

Adesso andiamo a costruire il circuito per realizzare l'amplificatore differenziale che verrà connesso ai capi del nostro superconduttore di cui vogliamo misurare la tensione. Infatti il superconduttore avrà una resistenza molto piccola (parliamo dell'ordine di  $0.1 \Omega$ ), quindi per misurarla dobbiamo amplificare il segnale di tensione ai capi di questa. Per questo utilizziamo l'amplificatore INA114AP che verrà collegato al materiale che andremo a misurare attraverso i 4 terminali in argento che questo presenta.

L'amplificatore INA114AP è particolare in quanto è un insieme di tanti amplificatori. Come un normale amplificatore, dobbiamo dargli un'alimentazione in ingresso  $V_+$  e  $V_-$ . Bisogna fare attenzione in questa parte qua. Infatti, consideriamo la tensione in uscita dall'amplificatore  $V_0$ , questa non può essere più grande del segnale che alimenta il nostro circuito che sarà di  $\pm 12$  V. Questo problema può sorgere se per esempio abbiamo una tensione ai capi del superconduttore che è di circa 0.1 V e noi vogliamo amplificarla con un guadagno  $\times 500$ . In questo caso otteniamo  $V_0 \sim 50$  V. Abbiamo raggiunto la saturazione.



**Figure 2.1:** Circuito amplificatore differenziale.

Il nostro obiettivo è montare il circuito in Fig. 2.1 e chiamiamo la resistenza e la tensione ai capi del superconduttore  $R_{sc}$  e  $V_{sc}$ . Adesso l'idea è che dobbiamo alimentare il nostro circuito con una  $V_0$  che deve essere continua e per fare ciò bisogna prendere una  $R_0$  molto grande in modo tale che valga approssimativamente

la seguente formula:

$$V_{sc} = V_0 \frac{R_{sc}}{R_{sc} + R_0} \sim V_{sc} = R_{sc} I \quad \text{dove } I = \frac{V_0}{R_0}$$

cioè che la tensione calcolata dalla formula del partitore di tensione sia approssimativamente uguale a un calcolo fatto come se la corrente fosse costante e quindi abbiamo un generatore di tensione continuo. Questo può valere se prendiamo una  $R_0$  sufficientemente grande perché invece la resistenza del superconduttore sarà piccola e trascurabile ( $\sim 0.1\Omega$ ). In questo modo otteniamo anche una tensione piccola ai capi del conduttore, che però andrà amplificata.

### Example 1: Circuito di prova per far funzionare l'amplificatore

Per prima cosa vogliamo far funzionare l'amplificatore. I valori scelti per  $R_0$  e  $V_0$  non saranno uguali a quelli che poi dovremmo scegliere quando utilizzeremo effettivamente il superconduttore, ma servono per ricreare una differenza di potenziale  $V_{sc}$  simile a quella che poi avremo in quel caso.

Se sceglio:

- $V_0 = 1 \text{ V}$
- $R_{sc} = 10\Omega$
- $R_0 = 2.5\text{k}\Omega$

Otteniamo che:

$$I = \frac{V_0}{R_0} = 0.4 \text{ mA} \quad \Rightarrow \quad V_{sc} = R_{sc} I = 4 \text{ mV}$$

Vediamo se questo risultato è consistente facendo i calcoli più complessi con il partitore di tensione:

$$V_{sc} = V_0 \frac{R_{sc}}{R_{sc} + R_0} = 3.98406 \text{ mV}$$

I risultati sono consistenti. Se inoltre impostiamo un guadagno  $G = 100$ , otteniamo:

$$V_{out} \equiv V_0 = G(V_{IN}^+ - V_{IN}^-) = 100 \times 4 \text{ mV} = 400 \text{ mV}$$

### Example 2: Circuito per il superconduttore

Adesso vogliamo realizzare il circuito al quale verrà collegato il superconduttore e vogliamo ottenere una differenza di potenziale  $V_{sc}$  simile a quella di prima. Se abbiamo:

- $V_0 = 1 \text{ V}$
- $R_{sc} = 0.1 \Omega$
- $V_{sc} = 4 \text{ mV}$

dobbiamo avere una  $R_0$  di:

$$V_{sc} = V_0 \frac{R_{sc}}{R_{sc} + R_0} \rightarrow R_0 = R_{sc} \left( \frac{V_0}{V_{sc}} - 1 \right) = 24.9 \Omega$$

E' troppo piccola, non soddisfa la condizione di corrente continua! Dobbiamo cambiare strategia. Sceglio:

- $V_0 = 5 \text{ V}$
- $R_{sc} = 0.1 \Omega$
- $V_{sc} = 0.4 \text{ mV}$

$$V_{sc}(R_{sc} + R_0) = V_0 R_{sc} \rightarrow R_0 = R_{sc} \left( \frac{V_0}{V_{sc}} - 1 \right) = 1.249 \text{ k}\Omega$$

Se inoltre impostiamo un guadagno  $G = 500$ , otteniamo:

$$V_{out} \equiv V_0 = G(V_{IN}^+ - V_{IN}^-) = 500 \times 0.4 \text{ mV} = 200 \text{ mV}$$

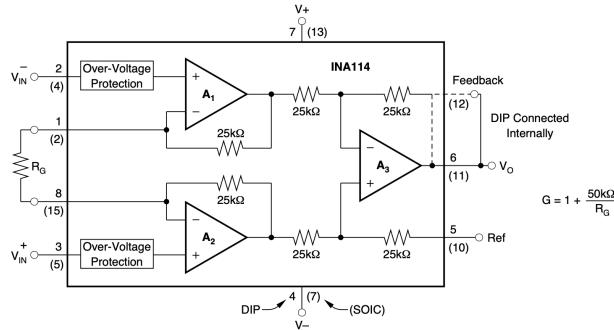
Ricordare bene che un guadagno alto dell'amplificatore può causare oscillazioni, quindi non esagerare.

Lo schema dell'amplificatore utilizzato è illustrato in Fig. 2.2. In particolare, facciamo attenzione alla resistenza  $R_G$  che dobbiamo inserire per scegliere il guadagno che vogliamo ottenere come:

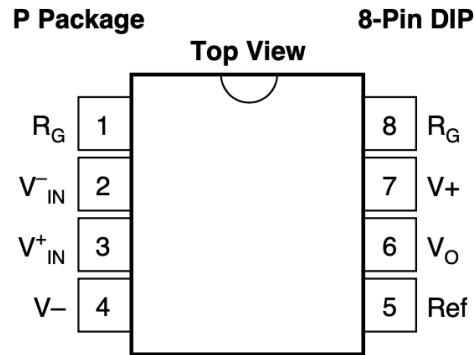
$$G = 1 + \frac{50\text{k}\Omega}{R_G}$$

Il pinnaggio dell'amplificatore è illustrato in Fig. 2.3. I pin di nostro interesse sono  $V_{IN}^-$  e  $V_{IN}^+$  (terminali ingresso dal superconduttore),  $V_-$  e  $V_+$  che sono i terminali di alimentazione ( $\pm 12 \text{ V}$ ), e infine ci interessa il pin  $V_0$  dal quale vediamo l'uscita:

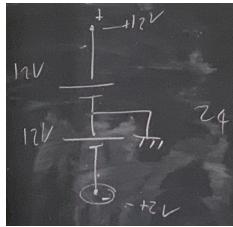
$$V_{out} = V_0 = G(V_{IN}^+ - V_{IN}^-)$$



**Figure 2.2:** INA114AP schema.



**Figure 2.3:** Pin INA114AP.



**Figure 2.4:**  
Creare differenza di potenziale di 24 V connettendo in serie due generatori.

**Laboratory 4.**  
Friday 16<sup>th</sup>  
October, 2020.  
Compiled:  
Wednesday 23<sup>rd</sup>  
December, 2020.

### 2.1.1 Usare il generatore per alimentare l'amplificatore

Come si alimenta correttamente l'amplificatore in modo tale da essere sicuri di dare +12 V nel terminale positivo e -12 V nel negativo? Per fare questo bisogna collegare due alimentatori in serie e mettere il terminale in comune a massa (comune), come in Fig. 2.4. Infatti in questo modo si è sicuri della differenza di potenziale che si sta dando a ciascun pin dell'amplificatore.

### 2.1.2 Assemblamento circuito

Una volta capito come alimentare l'amplificatore, abbiamo assemblato il circuito come in Fig. 2.1.

#### Circuito prova 1

Per il primo circuito di prova abbiamo scelto alla fine:

- due condensatori da  $1\ \mu\text{F}$ ;
- fissata una  $V_0 = 1\text{ V}$ ;
- presa una resistenza  $R_0 = 2.674\text{ k}\Omega$ ;
- presa  $R_{sc} = 11.2\ \Omega$ ;
- presa  $R_G = 467.1\ \Omega$  che implica  $G = 108.04$ ;
- alimentato l'amplificatore con  $V_+ = 12\text{ V}$  e  $V_- = -12\text{ V}$ .

In questo modo ci aspettiamo che teoricamente:

$$V_{sc}^{th} = V_0 \frac{R_{sc}}{R_{sc} + R_0} = 4.171\text{ mV}, \quad V_{out}^{th} = GV_{sc}^{th} = 450.649\text{ mV}$$

I valori misurati sono:

$$V_{out}^{mis} = 444.6\text{ mV}$$

Se invece utilizziamo  $V_0 = 0.5\text{ mV}$  (lasciando gli altri parametri invariati):

$$V_{out}^{th} = 225.32\text{ mV}, \quad V_{out}^{mis} = 219.6\text{ mV}$$

#### Circuito prova 2

Per il secondo circuito di prova abbiamo scelto:

- due condensatori da  $1\ \mu\text{F}$ ;
- fissata una  $V_0 = 0.5\text{ V}$ ;
- presa una resistenza  $R_0 = 21.83\text{ k}\Omega$ ;
- presa  $R_{sc} = 11.2\ \Omega$ ;
- presa  $R_G = 98.5\ \Omega$  che implica  $G = 508.614$ ;
- alimentato l'amplificatore con  $V_+ = 12\text{ V}$  e  $V_- = -12\text{ V}$ .

In questo modo ci aspettiamo che teoricamente:

$$V_{sc}^{th} = 0.2564\text{ mV}, \quad V_{out}^{th} = 130.4\text{ mV}$$

I valori misurati sono:

$$V_{out}^{mis} = 125.2\text{ mV}$$

anche se si nota come utilizzando un'amplificazione maggiore il valore di tensione misurato oscilla maggiormente (utilizzando il multmetro).

### Circuito finale 1

Per il circuito finale abbiamo scelto:

- due condensatori da  $1 \mu\text{F}$ ;
- fissata una  $V_0 = 0.5 \text{ V}$ ;
- presa una resistenza  $R_0 = 220.1 \Omega$ ;
- presa  $R_{sc} = 0.3 \Omega$ ;
- presa  $R_G = 98.5 \Omega$  che implica  $G = 508.614$ ;
- alimentato l'amplificatore con  $V_+ = 12 \text{ V}$  e  $V_- = -12 \text{ V}$ .

In particolare, per la  $R_{sc}$  abbiamo utilizzato il nostro superconduttore. Il valore è stato misurato con il multimetro che non ci darà mai una stima affidabile in quanto di default tra i due terminali del multimetro si misurano comunque circa  $0.2 \Omega$ . Proprio per l'incapacità stessa di misurare la resistenza con il multimetro, stiamo realizzando questo circuito con l'amplificatore.

Con i parametri sopra stabiliti, ci aspettiamo che teoricamente:

$$V_{sc}^{th} = 0.74887 \text{ mV}, \quad V_{out}^{th} = 380.886 \text{ mV}$$

Si misura che:

$$V_{out}^{mis} = 332 \text{ mV}$$

Il discostamento dal valore teorico è abbastanza, ma non esageratamente grande. Questo è dato dal fatto che magari la resistenza del nostro superconduttore non sia davvero di  $R_{sc} = 0.3 \Omega$ , ma inferiore.

Invece utilizzando  $R_G = 467.1 \Omega$  ( $G = 108.04$ ), si misura:

$$V_{out}^{th} = 80.9079 \text{ mV}, \quad V_{out}^{mis} = 56.5 \text{ mV}, \quad V_{sc}^{mis} = 0.5229 \text{ mV}$$

Facendo il calcolo inverso otteniamo che:

$$R_{sc}^{mis} = \frac{V_{sc}^{mis}}{I} = V_{sc}^{mis} \frac{R_0}{V_0} = 0.23 \Omega$$

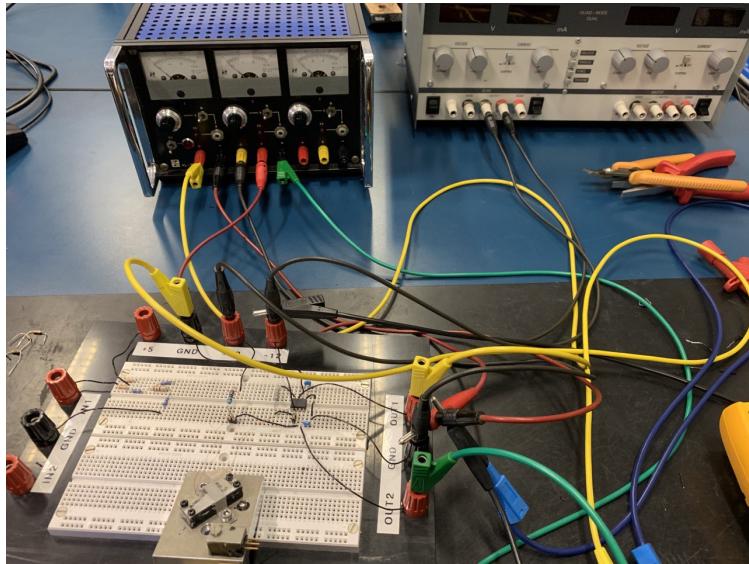
Questo calcolo è un po' tautologico però ci permette di capire la differenza nelle misurazioni a cosa può essere dovuta.

Il circuito finale è mostrato in Fig. 2.5 e in Fig. 2.6.

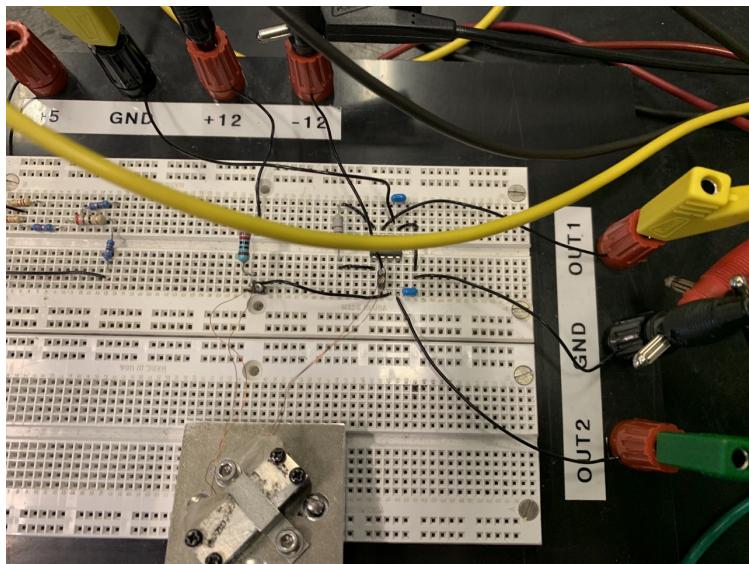
#### Remind 2

Prima di accendere il circuito, è importante controllare che la potenza dissipata deve essere minore del mW, se no il superconduttore si autoriscalderà e non riusciremo a misurare realmente la temperatura critica. Notiamo che con questi valori di resistenze e potenziali la condizione è soddisfatta:

$$P_{sc}^{dissipata} = \frac{V_{sc}^2}{R_{sc}} = 1.87 \times 10^{-6} \text{ W}$$



**Figure 2.5:** Circuito finale.



**Figure 2.6:** Circuito finale (altra angolazione).

## 2.2 Raffreddamento circuito con azoto liquido

Oggi abbiamo iniziato a preparare il cablaggio per il criostato. Per fare ciò abbiamo saldato i vari fili per assemblare il connettore.

Prima di mettere il superconduttore nel criostato, dobbiamo essere sicuri della correttezza del circuito. Per fare ciò mettiamo il superconduttore in una cassetta del gelato e lo ricopriamo di azoto liquido, questo si raffredda e dovremmo essere in grado di vedere il salto di potenziale (il punto critico del superconduttore (?)). Quindi abbiamo preparato i connettori apposta per collegare il superconduttore al circuito sulla basetta.

Per il criostato, dobbiamo accoppiare termicamente dito freddo e il nostro campione. Abbiamo due termometri uno del criostato e l'altro della temperatura del campione. Se scendiamo troppo giù di temperatura l'accoppiamento rischia di non essere ottimale e vediamo temperature diverse.

Dei contatti andavano a massa quindi abbiamo dovuto smontare il campione. Adesso facciamo il test con l'azoto. Il nostro circuito finale ha:

- $R_G = 98.5 \Omega \rightarrow G = 508.614$ ;
- $R_0 = 4.633 \text{ k}\Omega$ ;
- $V_0 = 0.5 \text{ V}$ ;
- $R_{sc}^{stimata} = 0.3 \Omega$ .

dove per  $R_{sc}^{stimata}$  abbiamo calcolato la resistenza del campione col multimetro semplicemente ai capi dei terminali. Dovremmo ottenere teoricamente:

$$V_{out}^{th} = 16 \text{ mV}$$

Invece otteniamo:

$$V_{out}^{mis} = 311 \text{ mV}$$

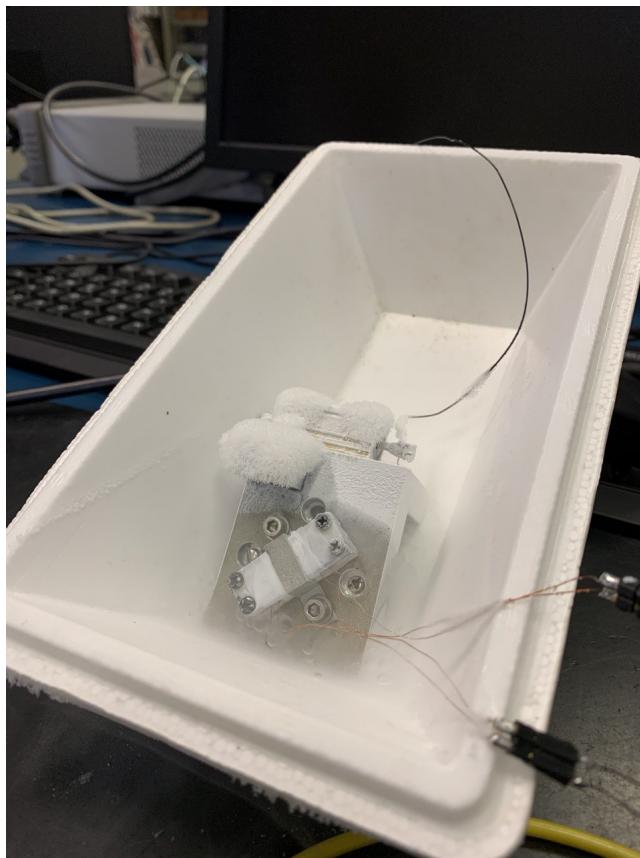
C'è qualcosa che non torna. Magari la resistenza  $R_{sc}$  non è corretta, mettiamo il valore:

$$R_{sc}^{stimata} = 0.3 + 11.3 = 11.6 \Omega$$

Dovremmo ottenere teoricamente:

$$V_{out}^{th} = 600 \text{ mV}$$

Questo è più in accordo con il valore misurato prima.



**Figure 2.7:** Apparato sperimentale per il raffreddamento con l'azoto.

L'apparato sperimentale è mostrato in Fig. 2.7. L'azoto raffredda a 77 K. Versiamo l'azoto sul campione nella vaschetta di gelato. Quindi partiamo da 311 mV. Notiamo che il voltaggio raggiunto è diventato negativo, poi è arrivato a zero, ma per poco e si è stabilizzato ai 10 mV. Poi è iniziato a risalire. E' arrivato fino a 160 mV,

poi ho spostato una banana ed è sceso di nuovo improvvisamente fino a 80 mV. Abbiamo usato il phon per riscaldare. Adesso il valore è sui 180 mV. Stiamo lavorando in DC, si creano resistenze di contatto necessariamente date dal fatto che abbiamo materiali diversi, quindi non vediamo una risalita sharp ma già il fatto che il valore si stabilizzi verso 180 mV è una cosa buona. Abbiamo versato altro azoto liquido. Il voltaggio diminuisce. Non arriva perfettamente a zero il valore ma arriva a qualche mV (tipo 5 mV), questo ci sta in questo esperimento perché possiamo avere tante resistenze parassite e altre forze elettromotrici. Secondo Mistura la presenza anche di ghiaccio crea rumori vari. E' arrivato a stabilizzarsi a -50 mV. L'abbiamo scaldato ed è arrivato fino a 180 mV. Abbiamo buttato altro azoto ed è transito subito perché eravamo molto vicini alla temperatura critica. Possiamo concludere che il circuito funziona correttamente.

**Laboratory 7.***Friday 23<sup>rd</sup>**October, 2020.**Compiled:**Wednesday 23<sup>rd</sup>**December, 2020.*

Nell'altra lezione abbiamo ragionato sull'assemblaggio del circuito che dovrà essere saldato sul modulo NIM.

# Chapter 3

## Saldatura definitiva circuito

### 3.1 Circuito termometro e amplificatore

Una volta testato sia il circuito per il termometro che quello con l'amplificatore differenziale e appurato che entrambi i circuiti funzionano e le dissipazioni di energia siano nei range consentiti, ci occupiamo ora di saldare tali circuiti sul modulo NIM.

Lo schizzo del circuito del termometro e dell'amplificatore sono visualizzati in Fig. 3.1.

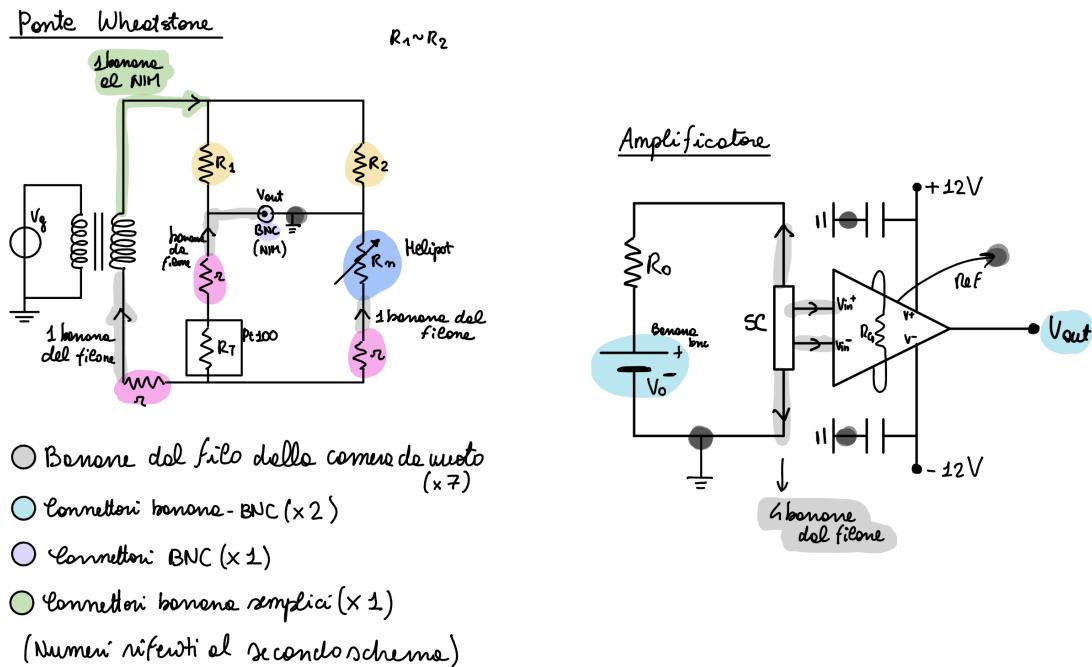


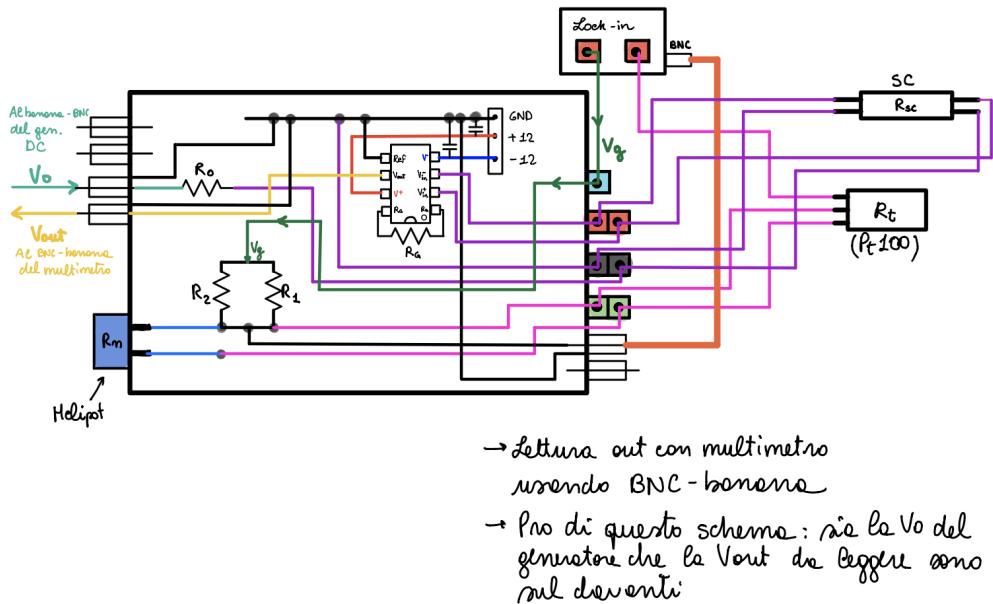
Figure 3.1: Schizzo circuito termometro a sinistra e amplificatore a destra.

### 3.2 Assemblaggio finale

L'assemblaggio finale nel modulo NIM è stato scelto come in Fig. 3.2.

Notare che per alimentare il NIM c'è l'alimentatore fatto apposta. Però, prima di utilizzarlo (e di collegare quindi il modulo NIM) per sicurezza utilizzare il cavo strano e utilizzare gli alimentatori precedenti per realizzare il +12 V e -12 V perché hanno protezioni nel caso di cortocircuito del circuito. Mentre, l'alimentatore del modulo NIM non ha protezioni e se c'è qualcosa di sbagliato rischiamo di bruciarlo o romperlo.

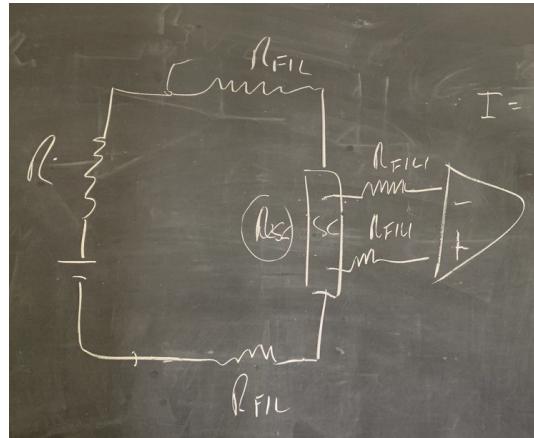
**Laboratory 8.**  
Wednesday 28<sup>th</sup>  
October, 2020.  
Compiled:  
Wednesday 23<sup>rd</sup>  
December, 2020.



**Figure 3.2:** Assemblaggio finale circuiti nel modulo NIM.

Gli oggetti utilizzati nel circuito sono:

- $R_1 = 15.01 \text{ k}\Omega$ ;
- $R_2 = 14.89 \text{ k}\Omega$ ;
- $R_n$  è variabile (helipot);
- $V_G = 5\text{V}$  con  $30\text{Hz}$ ;
- $R_0 = 995 \Omega$ ;
- $R_G = 98.5 \Omega \rightarrow G = 508.614$ ;
- $V_0 = 2\text{V}$ ;
- $V_+ = +12\text{V}$  e  $V_- = -12\text{V}$ .



**Figure 3.3:** Corretto collegamento del superconduttore e resistenza fili.

Abbiamo ricontrollato nuovamente che sulla basetta tutto funzionasse. Le volte scorse abbiammo sbagliato a collegare il superconduttore al circuito. Nella lezione di oggi abbiammo risolto questo problema e tutte le cose adesso tornano. Come possiamo notare in Fig. 3.3, la resistenza dei fili che si collegano al superconduttore può essere considerata. Questa andrà a ridurre la corrente che circola nel circuito in continua. Tuttavia, essendo molto piccola il cambiamento della corrente sarà nell'ordine dell'1%:

$$I = \frac{V_0}{R_0 + R_{sc} + 2R_{filo}} \approx \frac{V_0}{R_0}$$

In particolare, si sono rieffettuati i calcoli delle scorse volte, ma questa volta si è

supposto:

$$R_{sc} = 0.03 \Omega$$

In questo modo:

$$V_{sc}^{th} = V_0 \frac{R_{sc}}{R + R_{sc}} G = 30.63 \text{ mV}$$

Con una potenza dissipata ai capi del superconduttore di:

$$P_{sc} = R_{sc} \left( \frac{V_0}{R_0 + R_{sc} + 2R_{filo}} \right)^2 = 1.18 \times 10^{-7} \text{ V}$$

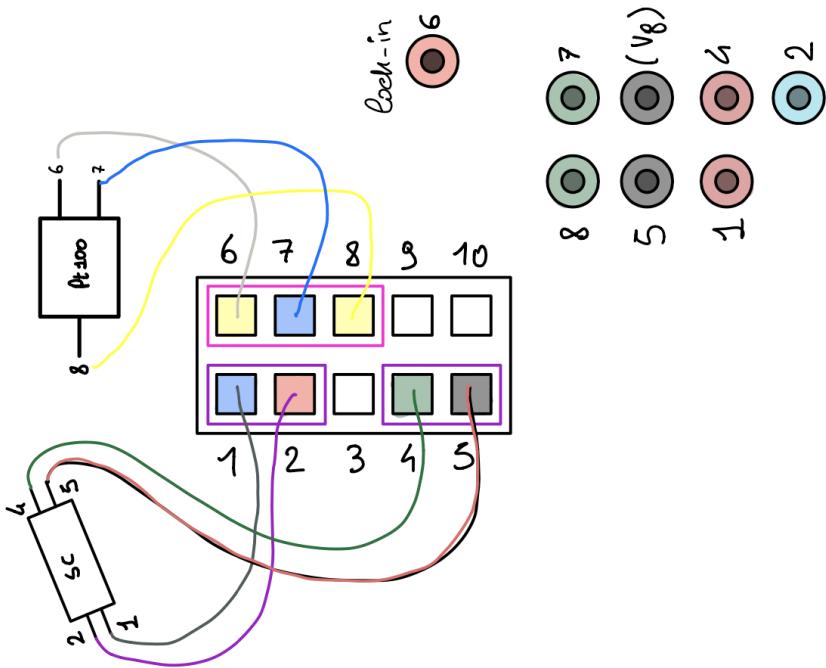
dove  $2R_{filo} \sim 10 \Omega$ . La potenza dissipata è più che accettabile e quindi si può procedere all'assemblaggio del circuito con tali valori degli oggetti.

*Remark.* Nel cavo BNC: il rosso è l'interno, il bianco (filo sfilacciato) è l'esterno.

Dopodichè abbiamo iniziato a saldare il circuito cominciando con l'amplificatore.

Abbiamo continuato la saldatura del circuito sul modulo NIM.

Abbiamo continuato il cablaggio, in particolare il tracciamento dei fili nella camera. In particolare, il circuito finale e il cablaggio dei fili si capisce visualizzando Fig. 3.4 e Fig. 3.5.



**Figure 3.4:** Cablaggio dei fili.

Il pezzo è montato nella camera con in Fig. 3.6.

Abbiamo poi finito di saldare tutto e preparare il setup sperimentale. Dovrebbe essere tutto pronto a meno di problemi. Il circuito finale montato è come in Fig. 3.7.

Il montaggio del modulo NIM è come in Fig. 3.8.

#### Laboratory 9.

Thursday 29<sup>th</sup>

October, 2020.

Compiled:

Wednesday 23<sup>rd</sup>

December, 2020.

#### Laboratory 10.

Friday 30<sup>th</sup>

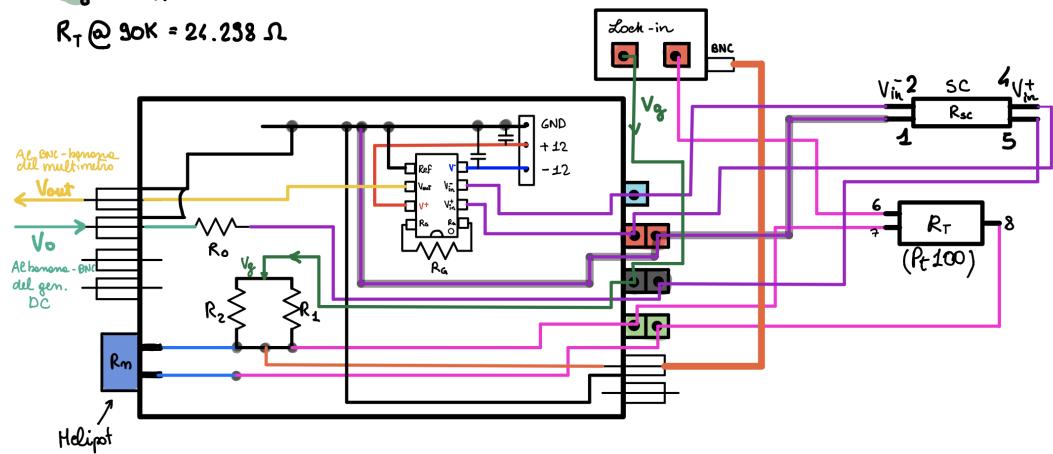
October, 2020.

Compiled:

Wednesday 23<sup>rd</sup>

December, 2020.

$$\begin{aligned}
 R_1 &= 11.99 \text{ k}\Omega \\
 R_2 &= 11.99 \text{ k}\Omega \\
 V_{g\text{g}} &= 5 V_{\text{PP}} \\
 R_T @ 90K &= 26.298 \Omega \\
 R_o &= 220.1 \Omega \\
 R_G &= 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614 \\
 V_o &= 0.5V
 \end{aligned}$$



→ Lettura out con multimetro  
usando BNC - banana

→ Pro di questo schema: niente  $V_o$  del generatore che le  $V_{out}$  da leggere sono sul davanti

Figure 3.5: Circuito finale + cablaggio fili.

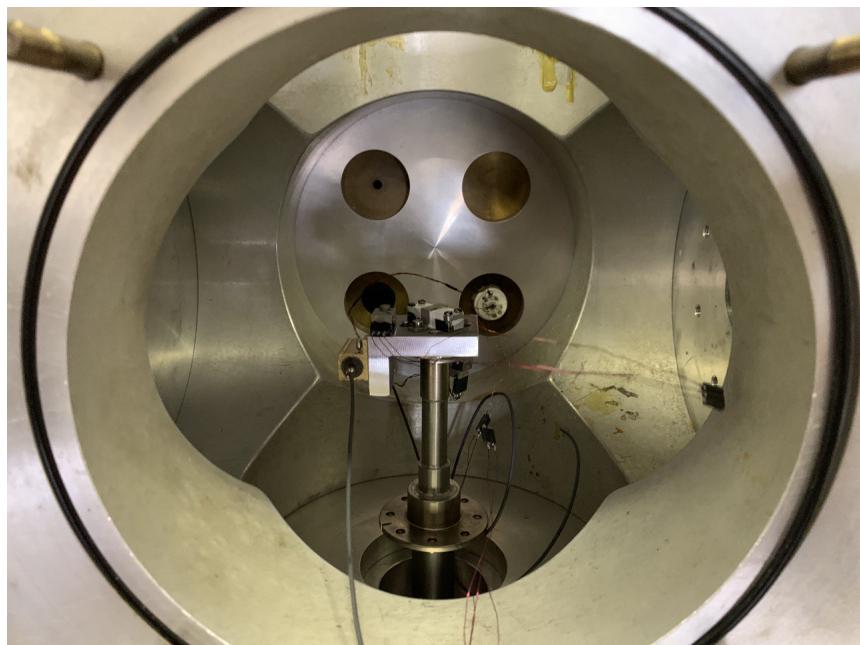
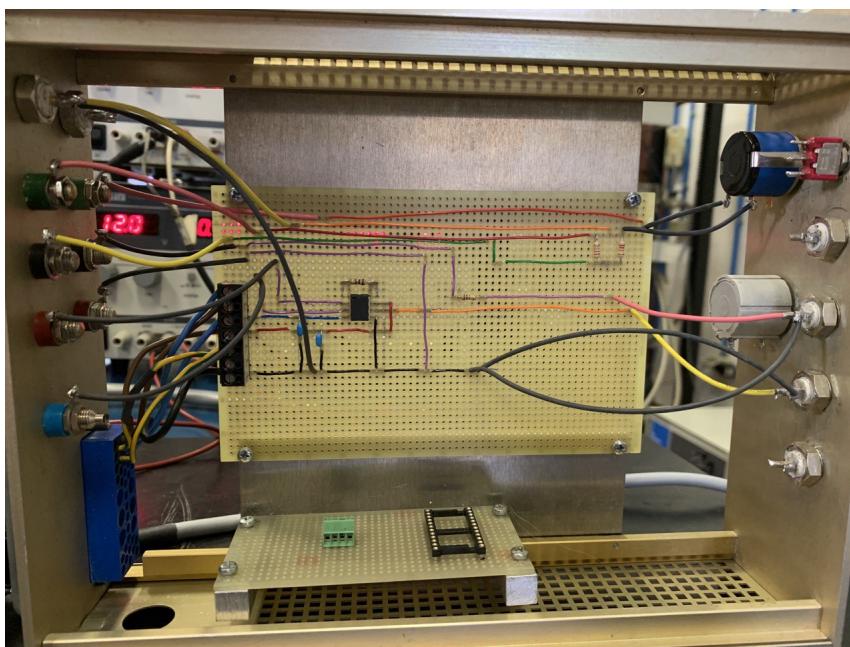
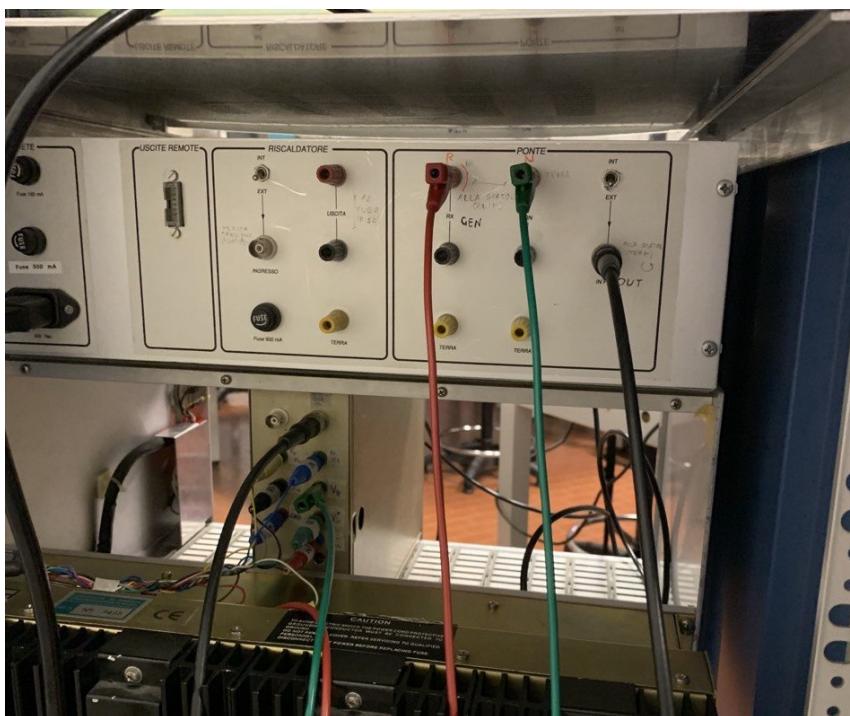


Figure 3.6: Come il campione è montato nella camera.



**Figure 3.7:** Circuito finale a meno di errori nella saldatura.



**Figure 3.8:** Modulo NIM montato (immagine del retro con il collegamento del lock-in).

### 3.3 Breve lezione su Arduino

**Laboratory 11.**  
 Friday 30<sup>th</sup>  
 October, 2020.  
 Compiled:  
 Wednesday 23<sup>rd</sup>  
 December, 2020.

Andremo ad utilizzare ingressi con frequenza di campionamento di 10 kHz. Si collega al computer con cavo USB, ma il protocollo di comunicazione con la porta è seriale. La potenza della scheda dta in questo chip di comunicazione. Il cuore della scheda è il microcontrollore. Abbiamo 13 pin digitali, che possono essere programmati sia come ingressi che uscite digitali. Quindi stiamo lavorando a 5 V. La risoluzione è di 5 mV (abbiamo 10 bit). La porta USB oltre che la comunicazione permette di alimentare la scheda.

Non serve definire gli ingressi analogici, se invece utilizzassi quelli digitali devo dire come viene settato il pin (se ingresso o uscita). La massima acquisizione che si può fare con l'analogico è di 10 kHz.

Nel nostro caso l'arduino utilizza 5 V che è esattamente la tensione erogata dal pc. Possiamo anche alimentare l'arduino con una tensione esterna che va da 7 a 12 V.

*Remark.* IMPORTANTE: il segnale che diamo in pasto all'arduino deve essere compreso tra 0 e 5 V. In caso contrario si rischia di bruciare la scheda.

#### 3.3.1 LabView

La prima parte del programma dice al pc con che tipo di seriale ci stiamo connettendo. Poi abbiamo dei caratteri che ci dicono l'ingresso che stiamo leggendo. Poi c'è un'icona di selezione etc etc.

### 3.4 Collegare termometro Pt100

Lo schema del termometro Pt100 è come mostrato in Fig. 3.9.

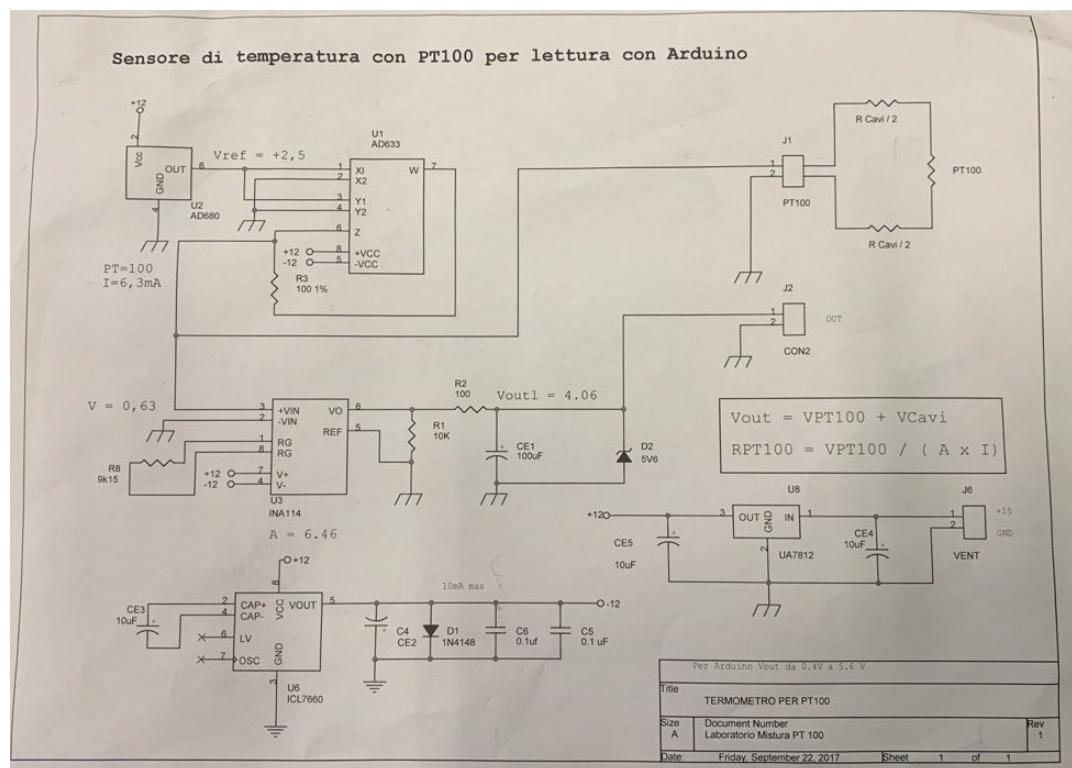


Figure 3.9: Schema termometro Pt100.



Figure 3.10:  
 Alimentazione ter-  
 mometro.

Abbiamo alimentato il termometro Pt100 con +15 V e collegamento a terra, vedi Fig. 3.10. Dopotutto, questo deve essere collegato alla camera a vuoto del criostato. Ci sono quattro collegamenti nel retro. Se si misura la resistenza tra i due banana più alti o tra i due banana più bassi si misura:

$$R_{\text{alto}} = 6.5 \Omega, \quad R_{\text{basso}} = 7.1 \Omega$$

Questa è la resistenza dei cavi resistivi collegati al termometro all'interno della camera (sono cavi speciali perché non portano fuori il calore). Bisogna tener conto della media di queste resistenze per inserire il suo valore nel programma di LabView e sottrarlo al valore di tensione ottenuto (quindi bisogna effettuare una correzione).

Invece, misurando la resistenza tra le due banane di sinistra o le due banane di destra (dove destra e sinistra si riferiscono al guardando da dietro il criostato, cioè come se l'operatore è dietro e guardasse le banana), si ottiene:

$$R_{Pt100}^{\text{sinistra}} = 114.9 \Omega, \quad R_{Pt100}^{\text{destra}} = 114.5 \Omega$$

Abbiamo testato prima il funzionamento del terometro con una resistenza da circa 100  $\Omega$  (con più esattezza 98.5  $\Omega$ ). La collegiamo ai capi degli ingressi del termometro. Misuriamo 4 V. Il supporto per arduino del terometro funziona, quindi siamo pronti a collegarlo al termometro vero e proprio.

### 3.5 Come funziona il criostato

Bisogna aprire la pompa da vuoto della camera. Aspettare che la pressione arrivi a circa  $10^{-3}$  o  $10^{-2}$ . Aprire l'acqua per il raffreddamento ed accendere il criocooler. Vediamo che la temperatura inizia a scendere. Per arrivare a circa 70 K, il sistema ha impiegato circa 2 ore. L'andamento del raffreddamento è circa lineare.

*Remark.* C'è il compressore, circolo termodinamico che raffredda. E' alimentato ad acqua. Vedere la temperatura dell'acqua per capire se alimentare ancora o no (se è troppo calda continuare ad alimentare).

Accendere il lock-in e calibrare. Infatti, già raggiungendo i 273 K dovremmo riuscire a bilanciare il ponte. Però non siamo riuscite.

### 3.6 Errori trovati nel circuito del ponte (termometro)

In questa lezione abbiamo poi risolto problemi che abbiamo riscontrato nella sal-datura del circuito precedente: il circuito del termometro aveva almeno tre errori:

- avevamo cortocircuitato le due resistenze  $R_1$  e  $R_2$ ;
- un filo verde che collegava  $V_g$  non era stato collegato (errore banale di connes-sione ma che poteva costarci tanto);
- errore più grave di tutti: misuravamo il segnale tra  $R_1$  e la terra. Invece do-bbiamo misurare il segnale tra  $R_1$  e  $R_2$ !

Abbiamo sistemato tutti questi errori e abbiamo testato il circuito con una resistenza da circa 100  $\Omega$ . Quest'ultimo funziona in questo caso, mentre non siamo in ogni caso riusciti a bilanciare il ponte collegato la nostra resistenza del termometro.

Il circuito finale è come in Fig. 3.11 e Fig. 3.12. Notiamo che rispetto alle altre versioni abbiamo anche invertito le boccole 7 e 8 (le altre volte sbagliavamo). Infatti, il capo cortocircuitato è 8 che deve essere connesso alla resistenza  $R_1$ .

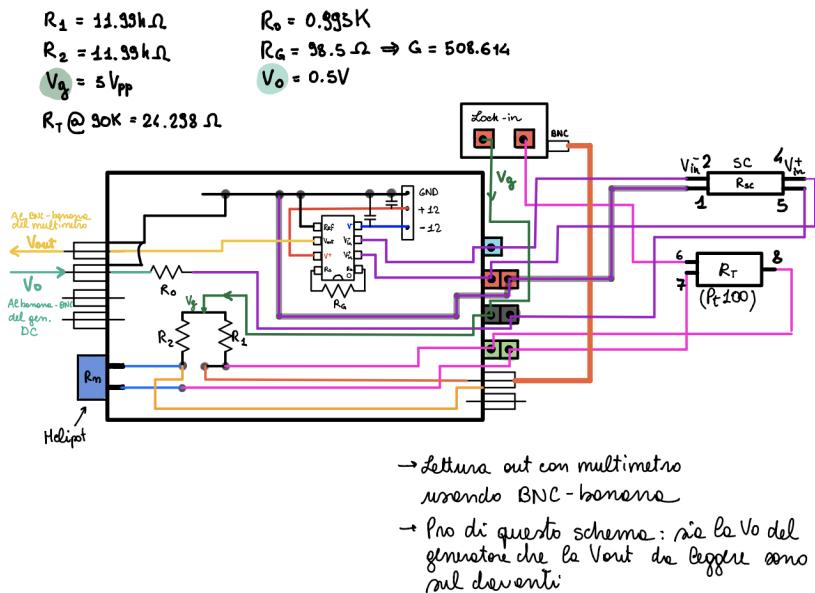


Figure 3.11: Schema circuito finale.

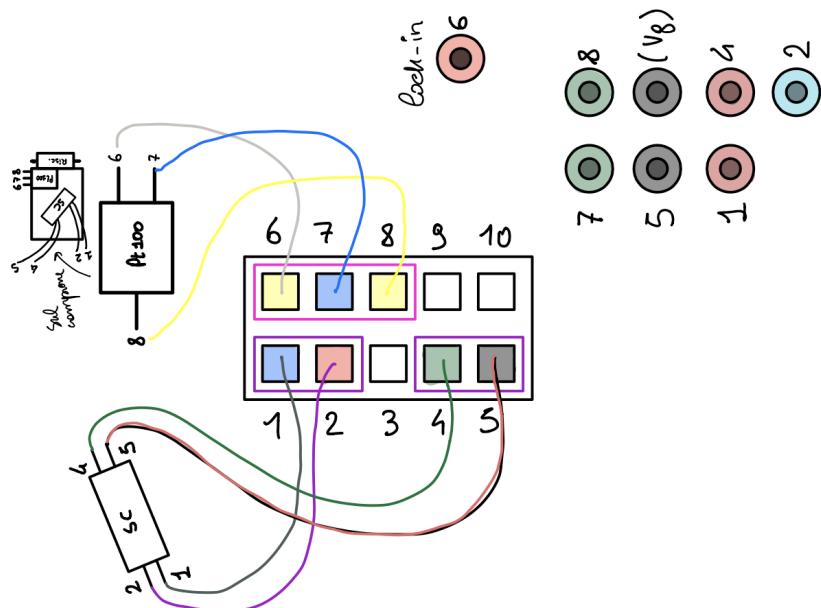


Figure 3.12: Schema boccole finale.

# Chapter 4

## Fase di misura

### 4.1 Test preliminare

Dopo che siamo riuscite a risolvere il problema del ponte (termometro), abbiamo iniziato a testare il circuito. Abbiamo acceso il criostato. Nella prima prova di raffreddamento abbiamo notato che la temperatura minima ottenuta nella camera (misurata con il Pt100 del dito freddo) risulta essere:

$$T_{min}^{Pt100} = 63 \text{ K}$$

Mentre la temperatura ottenuta dalla calibrazione del ponte:

$$T_{min}^{ponte} = 120 \text{ K}$$

Per misurare quest'ultima abbiamo calibrato il ponte e misurato la resistenza dell'helipot. In questo caso l'helipot misurava 37 giri, che corrispondono guardando la tabella a circa quella temperatura. Invece vediamo che la tensione misurata risulta essere:

$$V_{sc} = 80 \text{ mV}$$

L'acquisizione è stata salvata come "prova2.csv", in particolare in questo dataset fino a tempo 3200 abbiamo sbagliato, in quanto non avevamo acceso il generatore per dare segnale all'amplificatore.

### 4.2 Misura con Arduino

L'Arduino misura una tensione compresa tra 0 e 5 V (attenzione a non dare in pasto tensioni negative).

#### 4.2.1 Temperatura con pt100 (analog pin A0)

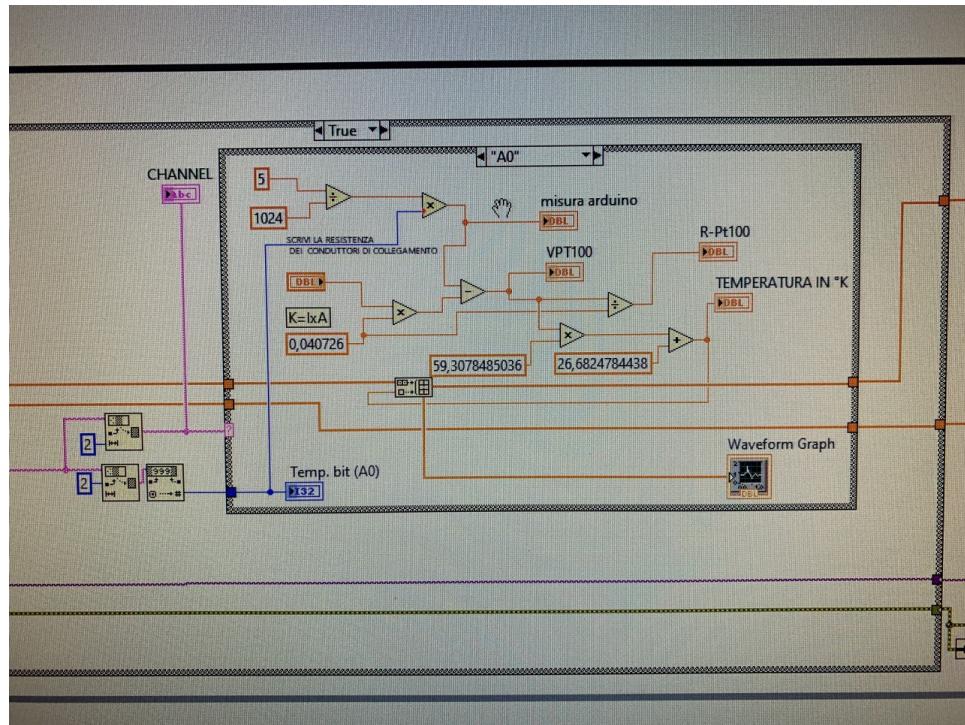
In particolare, per quanto riguarda la misura del pt100 (termometro della camera), la tensione viene convertita in temperatura con l'utilizzo di LabView secondo le operazioni riportate nello schema in Fig. 4.1.

#### 4.2.2 Tensione $V_{out}$ (analog pin A1)

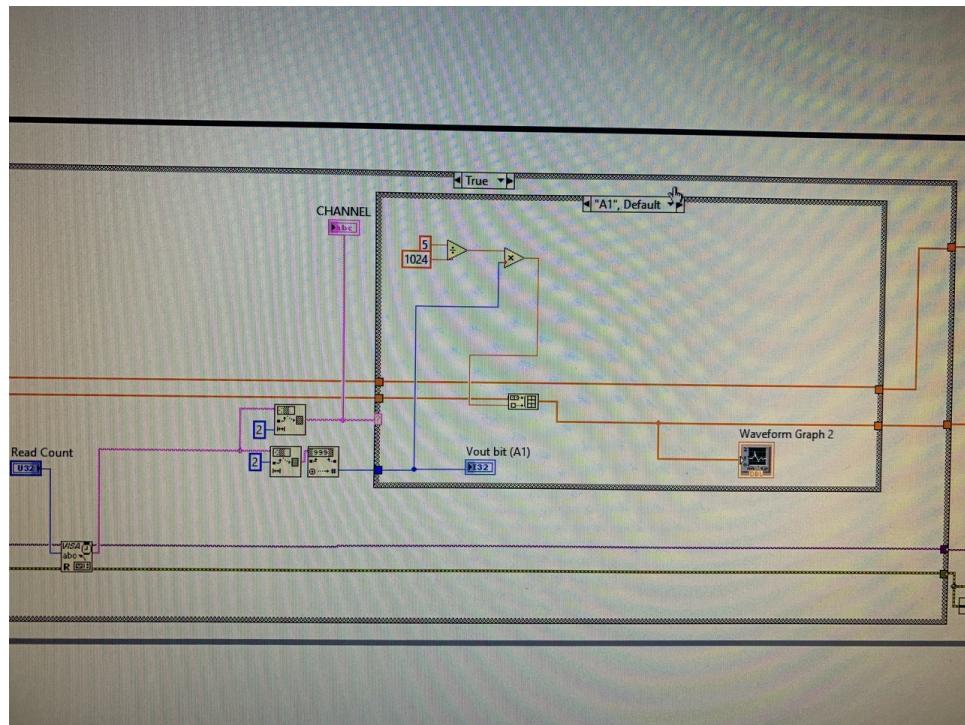
Per quanto riguarda la misura della tensione in uscita  $V_{out}$  dall'amplificatore, viene semplicemente calcolato il valore in tensione. Lo schema in LabView è riportato in Fig. 4.2.

**Laboratory 13.**  
Thursday 5<sup>th</sup>  
November, 2020.  
Compiled:  
Wednesday 23<sup>rd</sup>  
December, 2020.

**Laboratory 14.**  
Friday 6<sup>th</sup>  
November, 2020.  
Compiled:  
Wednesday 23<sup>rd</sup>  
December, 2020.



**Figure 4.1:** Convertire voltaggio in temperatura con LabView.



**Figure 4.2:** Misurare voltaggio in LabView.

### 4.3 Disaccoppiamento termico termometro e campione

Nella prima parte di questa giornata abbiamo cercato di disaccoppiare termicamente il termometro sul campione e la camera. In particolare, nella giornata di ieri riuscivamo a raffreddare la camera fino a 66 K, mentre il termometro del campione rimaneva a circa 120 K.

Per sistemare questo problema, abbiamo riaperto il campione e tolto il rivestimento

che lo faceva assomigliare ad una mummia. Abbiamo dunque tolto tutto e l'unica cosa che abbiamo inserito è un sottile strato di MAINLAR che riveste il superconduttore e i suoi contatti.

Abbiamo riattaccato il campione nella camera come precedentemente e abbiamo aggiunto una cupola di alluminio (un alluminio un po' più spesso di quello normale) per isolare il campione e il suo termometro da radiazioni.

## 4.4 Secondo test preliminare

Una volta fatte le modifiche della prima parte, abbiamo ricollegato tutto. Un arduino è stato collegato al pt100 della camera per monitorarne la temperatura. Un altro arduino è stato collegato al potenziale di uscita dal circuito dell'amplificatore per vedere se osserviamo il salto dato dalla transizione del superconduttore.

Alla fine siamo riusciti a raffreddare la camera fino a 37 K (dopo circa 2 ore) e il termometro del superconduttore segnava circa 65 K. I progressi ottenuti dal disaccoppiamento sono dunque ottimi. Le misure effettuate sono riportate in Fig. 4.3.

Il problema principale di tutto è che non siamo riusciti ad osservare il salto. Abbiamo notato che la tensione da 30 mV è salita fino ai 420 mV in modo lineare. Non osservando ancora il salto a temperature abbastanza basse (in cui ci aspettiamo che il campione abbia raggiunto effettivamente almeno una temperatura di 80 K), controlliamo che il circuito dell'amplificatore sia apposto. Il problema gravissimo è che cambiando la tensione in ingresso per esempio da 2.5 V a 1 V (o addirittura azzerandola!) il potenziale in uscita rimane costante a 420 mV! Abbiamo un problema gravissimo che dobbiamo assolutamente risolvere.

Per prima cosa abbiamo connesso una resistenza di  $10 \Omega$  al posto dei 4 fili del superconduttore. I valori ottenuti sembrano scalare linearmente cambiando il potenziale in ingresso. Però osserviamo che sono sempre più alti rispetto all'aspettazione teorica. Abbiamo azzerato il potenziale in ingresso: otteniamo circa 90 mV. A cosa sono dovuti? L'amplificatore non funziona più? Le altre volte avevamo ottenuto a 0 V in ingresso 0 V in uscita, com'è logico che sia. Dobbiamo risolvere questo problema.

| $V_o = 2.5V$ | $T_{dito}$ | $T_{amp}$ | $V_{out}$ |
|--------------|------------|-----------|-----------|
|              | 51 K       | 82 K      | 400 mV    |
|              | 47 K       | 75 K      | 406 mV    |
|              | 44.5 K     | 74 K      | 409 mV    |
|              | 43.6 K     | 72 K      | 410 mV    |
|              | 42.5 K     | 71 K      | 410 mV    |
|              | 42.7 K     | 68.5 K    | 409.4 mV  |
|              | 45.5 K     | 67.3 K    | 425 mV    |

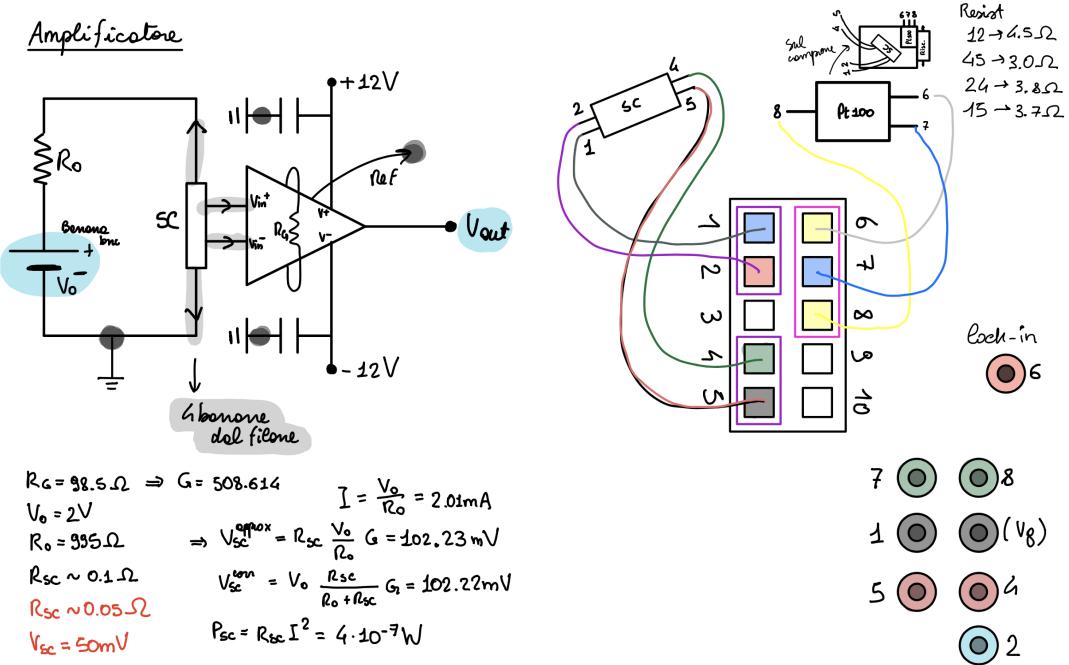
**Figure 4.3:** Misure effettuate durante il raffreddamento.

**Laboratory 15.**  
Friday 6<sup>th</sup>  
November, 2020.  
Compiled:  
Wednesday 23<sup>rd</sup>  
December, 2020.

**Laboratory 16.**  
Wednesday 11<sup>th</sup>  
November, 2020.  
Compiled:  
Wednesday 23<sup>rd</sup>  
December, 2020.

## 4.5 Correzioni circuito amplificatore

Le scorse volte invertivamo i pin  $V_{in+}$  e  $V_{in-}$ . Abbiamo corretto tutto. In Fig. 4.4 si ritrova in alto a sinistra il circuito dell'amplificatore, in basso lo schema del modulo NIM corretto e in alto a destra lo schema del cablaggio corretto.



$$\begin{aligned}
 R_1 &= 11.99k\Omega & R_o &= 0.995 k\Omega \\
 R_2 &= 11.99k\Omega & R_G &= 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614 \\
 V_B &= 5V_{pp} & V_0 &= 2V \\
 R_T @ 90K &= 24.238 \Omega
 \end{aligned}$$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$

$R_G = 98.5 \Omega \Rightarrow G = 508.614$

$V_0 = 2V$

$R_T @ 90K = 24.238 \Omega$

$R_o = 0.995 k\Omega$



**Figure 4.5:** Collegamento cavi nel retro del modulo NIM.

## 4.6 Finalmente: misure

Abbiamo collegato l'arduino per effettuare le misure.

- abbiamo collegato l'output del termometro del dito freddo e abbiamo impostato come resistenza dei fili 6.5;
- abbiamo collegato l'output dell'amplificatore  $V_{out}$ .

Notiamo come al diminuire della temperatura,  $V_{out}$  aumenti sempre di più. Il problema può essere un potenziale di contatto che si crea (che dipende dalla temperatura). Infatti, si può creare una forza elettromotrice indotta che aumenta l'offset.

Oggi abbiamo effettuato un primo test di misure in cui abbiamo raffreddato e riscaldato il campione varie volte. Abbiamo inoltre cambiato più volte il potenziale  $V_0$  dato in input per poter visualizzare salti maggiori. Abbiamo osservato che il campione transisce ad una resistenza di  $R_v \sim 32\Omega$  che corrisponde ad una temperatura di circa 110 K.

### 4.6.1 Potenziale $V_0 = 6$ V

In questa lezione abbiamo fissato:

- $V_0 = 6$  V;
- $R_{fili} = 6.5$ ;
- una pressione approssimativamente circa  $p = 1.2 \times 10^{-4}$  mbar;
- un guadagno del lockin di  $\times 2$ ;

**Laboratory 17.**  
Thursday 12<sup>th</sup>  
November, 2020.  
Compiled:  
Wednesday 23<sup>rd</sup>  
December, 2020.

- un potenziale del ponte di  $V_{ponte} = 5.65$  V (da misurare! infatti questo è solo il valore riportato);
- il fondo scala del multimetro è di 6 mV.

Abbiamo effettuato le misure nel seguente modo:

- abbiamo raffreddato il campione da una temperatura  $T_c = 251.052$  K, superando la temperatura critica (osservando il salto sempre a 110 K) fino ad una temperatura del dito freddo di 53.55 K;
- abbiamo riscaldato da una temperatura del dito freddo di 76.71 K fino a 143.9 K;
- abbiamo spento il potenziale in ingresso e raffreddato da una temperatura di 129.425 K fino a 56.73 K (misura dell'offset di raffreddamento);
- sempre con il potenziale in ingresso spento abbiamo riscaldato da una temperatura di 88.882 K fino a 130.583 K (misura dell'offset di riscaldamento).