

# ELETTRONICA DEI SISTEMI ANALOGICI E SENSORI

C.d.L. Laurea Magistrale  
Ingegneria Elettronica

Anno Accademico 2013/2014

Docente  
Prof. Ing. Lorenzo Capineri

Assistenti di Laboratorio  
Tecnico Sig Andrea Giombetti  
Dott. Antonio Chini

## Esercitazione di laboratorio:

*Circuito di interfaccia per termocoppie  
e misura della temperatura*

Versione 1.6 – Ottobre 2013

## Scopo dell'esercitazione

Lo scopo di questa esercitazione è il progetto elettronica di un'interfaccia per la misura di differenze di temperatura mediante due termocoppie. L'esercitazione di laboratorio prevede l'impiego di due termocoppie (tipo K) e il condizionamento del segnale in tensione in uscita in modo da ottenere un segnale dato dalla differenza delle temperature ( $T_1$  e  $T_2$ ). L'uscita sarà quindi un segnale proporzionale alla differenza tra le temperature assolute misurate tra i due punti di contatto delle termocoppie con il corpo /materiale di prova. Allo scopo di ridurre il rumore eventualmente sovrapposto al segnale di uscita si può prevedere l'inserimento di un filtro analogico di tipo passa-basso oppure adottare un processo di media sui segnali campionati con oscilloscopio digitale.

Per lo studio delle caratteristiche del circuito di prova si utilizzeranno i bollettini tecnici dei dispositivi utilizzati e sarà montato il prototipo del circuito su un circuito stampato. Il circuito con alimentazione esterna da banco, morsettiere per il collegamento alle termocoppie, punti di accesso (*test points*) per effettuare le misure con l'oscilloscopio. Si faranno infine misure di laboratorio caratterizzando la risposta in tensione in funzione della temperatura differenziale.

## Specifiche di progetto e scelta dei componenti

La catena di condizionamento del segnale deve permettere il prelievamento dei segnali  $V_{TC1}$  e  $V_{TC2}$  in uscita dalle termocoppie  $TC_1$  e  $TC_2$ , conoscere il valore assoluto [K] di temperatura di  $T_1$  e  $T_2$ , avere disponibile un segnale  $V_{out1}$  proporzionale al segnale ( $V_{TC1} - V_{TC2}$ ), con guadagno regolabile da 1 a 10 (come mostrato nello schema a blocchi di Figura 1). Questo stadio a guadagno regolabile si rende necessario quando i due segnali da rilevare presentano valori paragonabili come nel caso di due temperature  $T_1$  e  $T_2$  uguali.

## Specifiche del progetto

- Acquisizione di due segnali in temperatura ( $0 \div 100^\circ \text{C}$ ) per mezzo delle termocoppie tipo K;
- Condizionamento di segnali per mezzo del modulo integrato AD595, in modo da avere disponibile un segnale in tensione correlato alla temperatura delle termocoppie e di intensità  $> 10 \text{ mV}$ ;
- Amplificazione programmabile con amplificatore per strumentazione;
- Eventuale filtraggio con filtro passa basso ( $f_p = 10 \text{ Hz}$ ).

## Schema a blocchi

In Figura 1 si riporta lo schema a blocchi da realizzare. Il condizionamento del segnale delle due termocoppie è fatto per mezzo dei due amplificatori AD595, che permettono anche di compensare il giunto freddo della termocoppia. In questo modo all'uscita di ogni amplificatore sarà disponibile un segnale direttamente proporzionale alla temperatura

assoluta letta dalla termocoppia e riferita agli 0°C del ghiaccio fondente. In allegato si riportano le caratteristiche delle termocoppie utilizzate e il bollettino tecnico dell'amplificatore AD595.

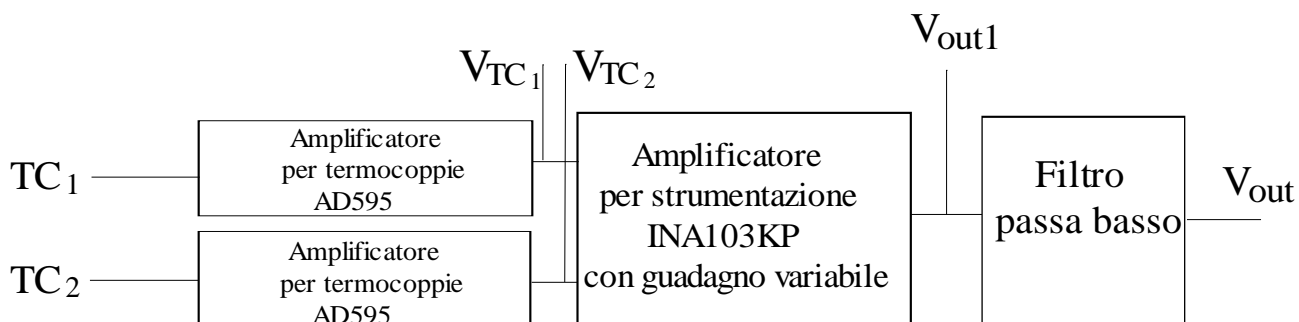


Figura 1

Il segnale rilevato da ogni singola termocoppia  $V_{TC1}$  e  $V_{TC2}$  è trattato per mezzo del componente AD595. In Figura 2 si mettono in evidenza i collegamenti da realizzare tramite la morsettiera, per entrambe le termocoppie (vedi bollettino tecnico AD595 e cavo per termocoppia).

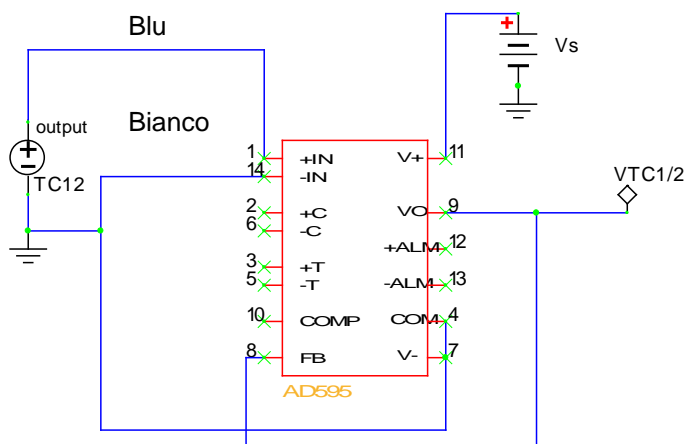


Figura 2 Colori termocoppia K: bianco (-In), blu (+In).

Come evidenziato (vedi data sheet AD595) nella parte relativa alla connessione delle termocoppie all'integrato, va posta particolare attenzione alla connessione dei due fili (cromo/alumel) della termocoppia con i piedini 1 e 14 dell'integrato. Infatti la giunzione che si viene a creare deve essere alla stessa temperatura dell'integrato, per rendere efficace la compensazione del giunto freddo, poiché la compensazione è effettuata riferendosi alla temperatura dell'integrato. La saldatura dei due fili con le piazzole di rame deve essere realizzata utilizzando una piccola quantità di prodotto antiossidante, che rende possibile la saldatura dei fili della termocoppia, vedi Figura 3. Per motivi pratici nell'esercitazione è stata utilizzata una morsettiera la quale introduce un livello di incertezza nella misura

poiche' allontana le termocoppie spurie dovute ai collegamenti ai morsetti dal punto di saldatura dei terminali di ingresso dell'integrato AD 595.

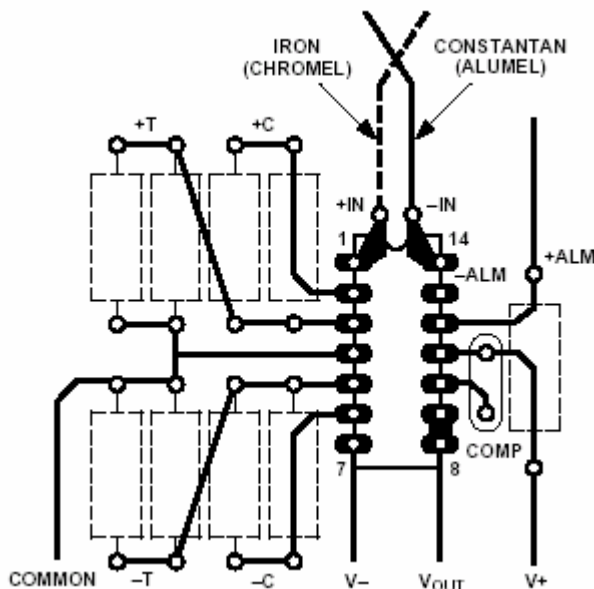


Figura 3 : Disposizione delle piste di collegamento per utilizzare una termocoppia con il circuito di condizionamento AD595 (vista lato rame) come da data sheet.

I due segnali  $VTC_1$  e  $VTC_2$  sono portati in ingresso a un amplificatore per strumentazione tipo INA103KP, che permette di amplificare la differenza dei due segnali, regolare il guadagno e correggere l'offset. Infatti sia le due termocoppie che i due AD595 presenteranno differenze costruttive che provocheranno errori di calibrazione riportati nei data sheets. Per questo motivo, nell'ipotesi che  $TC_1$  e  $TC_2$  siano poste alla stessa temperatura, i due segnali  $VTC_1$  e  $VTC_2$  non saranno perfettamente uguali, sbilanciando così l'uscita dell'amplificatore INA103KP. Il circuito di regolazione dell'offset permette di riportare a zero la sua uscita. In Figura 4 sono evidenziati i collegamenti che permettono di variare il guadagno dell'amplificatore. Per il guadagno programmabile vale la relazione:

$$G = 1 + \frac{6k\Omega}{R_G}$$

In base alla Tabella 1 si sceglie il valore  $R_G = 667 \text{ Ohm}$ . Nel circuito di prova si fissa il valore di  $R_G$  tramite un potenziometro da 10kOhm.

| GAIN | GAIN (dB) | $R_G (\Omega)$ |
|------|-----------|----------------|
| 1    | 0         | No $R_G$       |
| 3.16 | 10        | 2774           |
| 10   | 20        | 667            |
| 31.6 | 30        | 196            |

Tabella 1

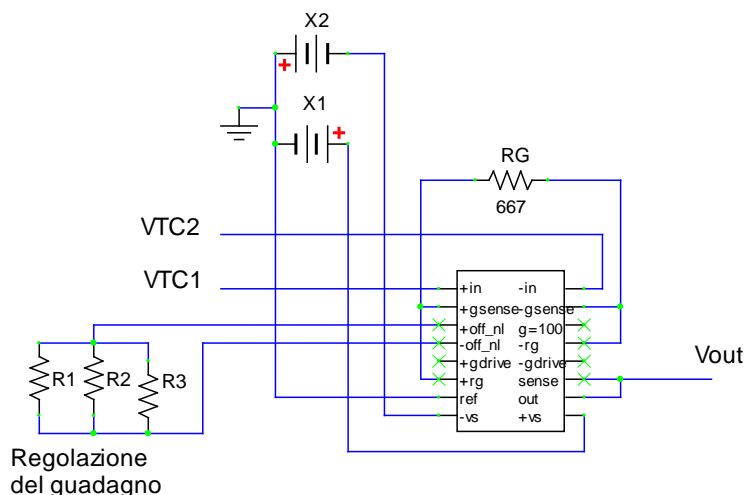


Figura 4

Tre resistori  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  permettono di ottenere i valori di resistenza richiesti per l'amplificazione utilizzando resistori commerciali ma si può usare anche un solo resistore con tolleranza 1% o 5% o un potenziometro anche se meno accurato e stabile nel tempo.

### Partlist

| Part    | Value    | Device       | Package    | Library        | Sheet |
|---------|----------|--------------|------------|----------------|-------|
| C1      | 0.1u     | C2,5-3       | C2.5-3     | capacitor-wima | 1     |
| C2      | 0.1u     | C2,5-3       | C2.5-3     | capacitor-wima | 1     |
| C3      | 0.1u     | C2,5-3       | C2.5-3     | capacitor-wima | 1     |
| C4      | 0.1u     | C2,5-3       | C2.5-3     | capacitor-wima | 1     |
| C5      | 0.1u     | C2,5-3       | C2.5-3     | capacitor-wima | 1     |
| D1      | 1N4007   | 1N4007       | DO41-10    | diode          | 1     |
| D2      | HLMP6    | HLMP6        | HLMP6      | display-hp     | 1     |
| IC1     | 786TV    | 786TV        | TO220V     | linear         | 1     |
| IC2     | AD_595   | DIL14        | DIL14      | ic-package     | 1     |
| IC3     | INA103   | DIL16S       | SOCKET-16  | ic-package     | 1     |
| IC4     | AD_595   | DIL14        | DIL14      | ic-package     | 1     |
| J2      | 350429-1 | 350429-1     | 350429-1   | con-amp        | 1     |
| J3      | 350429-1 | 350429-1     | 350429-1   | con-amp        | 1     |
| POWER   | 350429-1 | 350429-1     | 350429-1   | con-amp        | 1     |
| R1      | 470      | R            | R          | docu-dummy     | 1     |
| RG      | 10k      | TRIM_EU-B25P | B25P       | pot            | 1     |
| ROFFSET | 10k      | R-TRIMMT93YA | RTRIMT93YA | rcl            | 1     |
| TERMO1  |          | MTA02-100    | 10X02MTA   | con-amp        | 1     |
| TERMO2  |          | MTA02-100    | 10X02MTA   | con-amp        | 1     |
| TGND1   |          | MTA02-100    | 10X02MTA   | con-amp        | 1     |
| TGND2   |          | MTA02-100    | 10X02MTA   | con-amp        | 1     |
| VO      |          | MTA02-100    | 10X02MTA   | con-amp        | 1     |

Prima di procedere con le prove di misura dinamica di temperatura, è opportuno eseguire una verifica della calibrazione delle due termocoppie. Riferendosi al data sheet del componente AD595, si nota che a una temperatura ambiente di 25 °C l'uscita deve essere di 250 mV. Nel nostro caso non e' stato previsto sul circuito di prova un potenziometro di calibrazione come invece e' illustrato nel data sheet (vedi Figura 5).

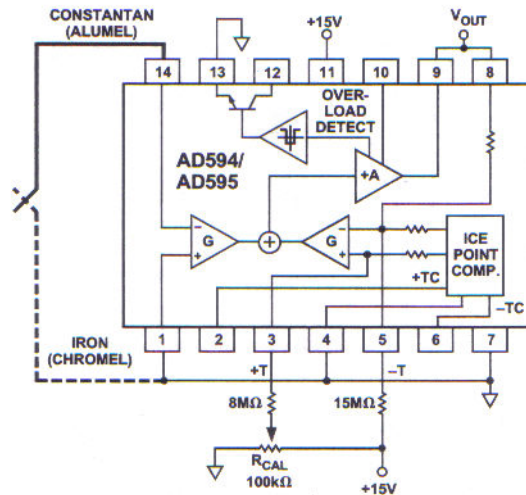


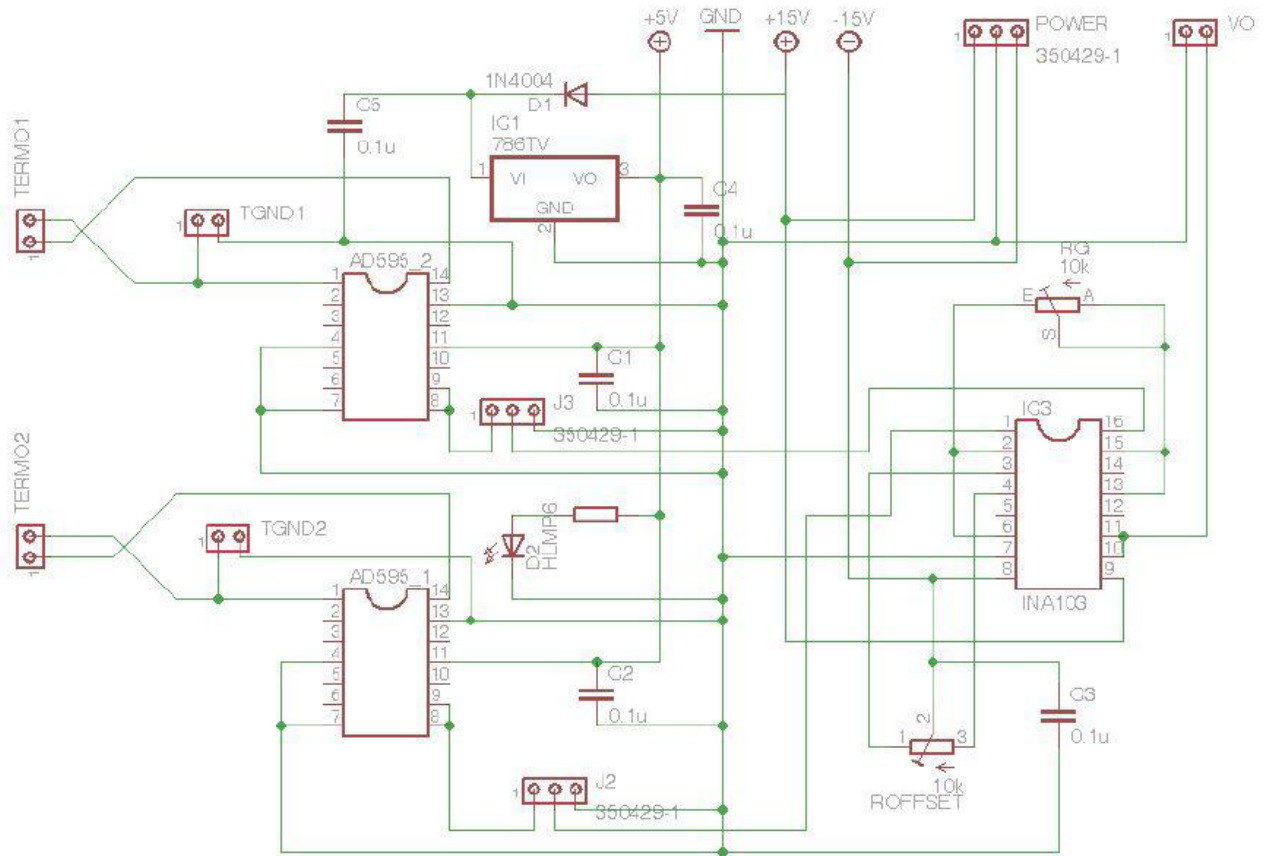
Figura 5 Calibrazione AD595

**Calibrazione della temperatura 0°C:** prima di procedere con la misura differenziale si deve verificare la tensione di uscita delle due termocoppie e del relativo circuito di interfaccia quando la temperatura e' 0°C. Per ottenere questa condizione si puo' utilizzare convenientemente del ghiaccio fondente. Le uscite dei due circuiti di interfaccia devono essere scollegati tramite opportuno connettore dallo stadio successivo amplificatore per strumentazione. Si annoti il valore medio dell'uscita in queste condizioni.

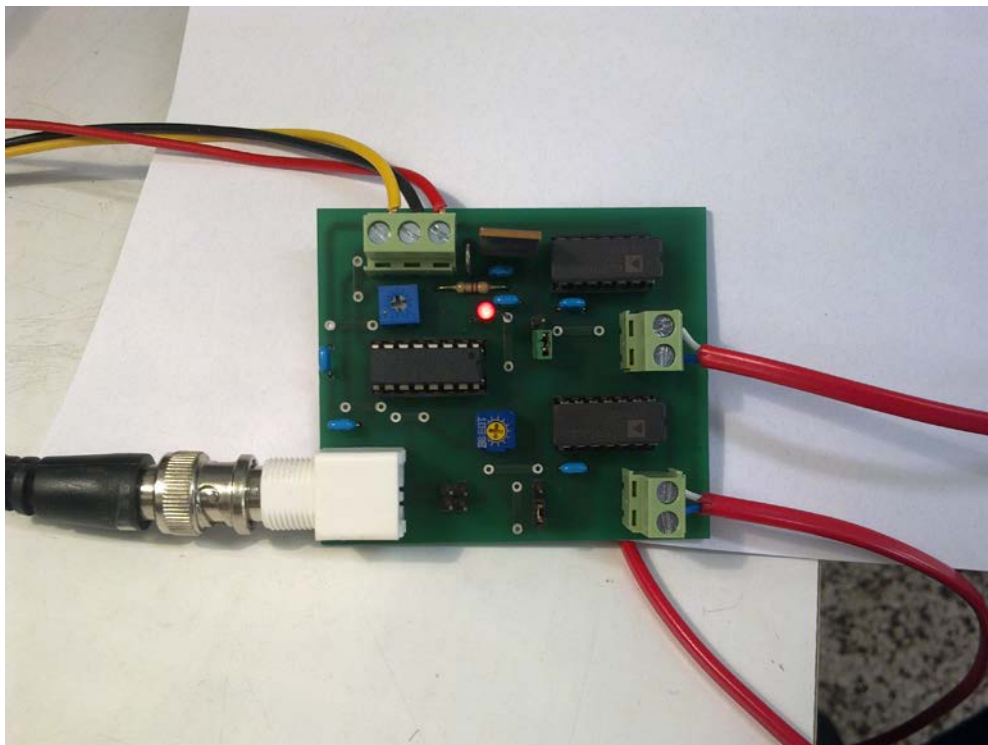
Per l'amplificatore per strumentazione si puo' regolare l'offset rimuovendo i due integrati AD595 e mettendo in corto circuito tramite apposito ponticello i due ingressi e regolando il trimmer fino a minimizzare la tensione di uscita. Dopo avere rimosso il cortocircuito di ingresso inserire nuovamente i due integrati AD 595.

Una volta montato il circuito e verificate le connessioni fra tutti i componenti, con il multimetro digitale si leggerà la tensione VTC1 e VTC2; le due sonde dell'oscilloscopio verranno connesse a  $V_{out1}$  e a  $V_{out}$ . Se il segnale  $V_{out}$  risulta di valore minore di 50 mV, si provvederà ad aumentare il guadagno dello stadio amplificatore INA103 i fino a ottenere un valore di  $R_G$  adatto (vedi tabella 1). A questo punto sbilanciando la lettura delle due termocoppie, scaldando o raffreddando una delle due, si acquisiscono i due segnali portando TC2 a valori diversi di temperatura (derivabili dal segnale VTC2), e mantenendo TC1 a temperatura ambiente. Si costruisca una tabella per temperature da 25°C a 80°C, con passi di circa 5 °C.

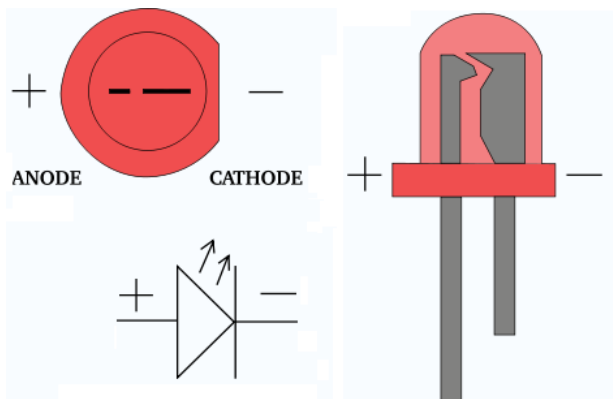
## Schema elettrico



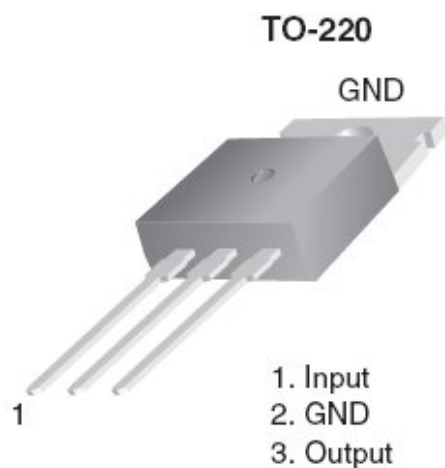
## Schema di montaggio



## Diodo led



## Pinout regolatore di tensione LM7805



## Relazione di laboratorio

Si compili una relazione nella quale verranno riportati:

- Nominativi del gruppo, nome del corso , anno accademico, data
- Scopo e specifiche del progetto
- Lista materiali utilizzati (BOM - Bill of Materials)
- Schema a blocchi del progetto
- Schemi circuitali
- Strumenti utilizzati e loro collegamento , caratteristiche
- Programmi software utilizzati per le simulazioni;
- Misura della risposta al gradino termico mediante il circuito di misura della temperatura
- La descrizione del filtro passa basso progettato;
- Tabelle e grafici relativi alle misure effettuate
- Conclusioni finali con il confronto fra i risultati attesi dalla teoria e quelli sperimentali, indicando le maggiori sorgenti di errore



## SENSORI TERMICI DI PORTATA

Un esempio applicativo può essere costituito dal controllo della temperatura di due punti (ingresso e uscita) di un misuratore di flusso di gas/fluido. In questa esperienza Senza entrare dettagliatamente nel principio di funzionamento di questo tipo di dispositivo, si assuma che la quantità di flusso che fluisce nel misuratore sia proporzionale allo sbilanciamento di temperatura che si viene a creare tra l'ingresso e l'uscita del dispositivo, quando questo venga opportunamente riscaldato, esternamente, in modo uniforme (in prima ipotesi si potrebbe pensare a potenza costante).

Per avere un'idea delle dimensioni di un flussimetro e di conseguenza delle costanti di tempo del segnale in uscita, si pensi che il modello MKS PR3000 ha una lunghezza di 8 cm e le due temperature sono misurate a una distanza di circa 3 cm. Il tempo di risposta di termocoppie commerciali tipo K a giunto caldo esposto è di 50 ms, e la costante di tempo del flussimetro è di circa 0.5 s.

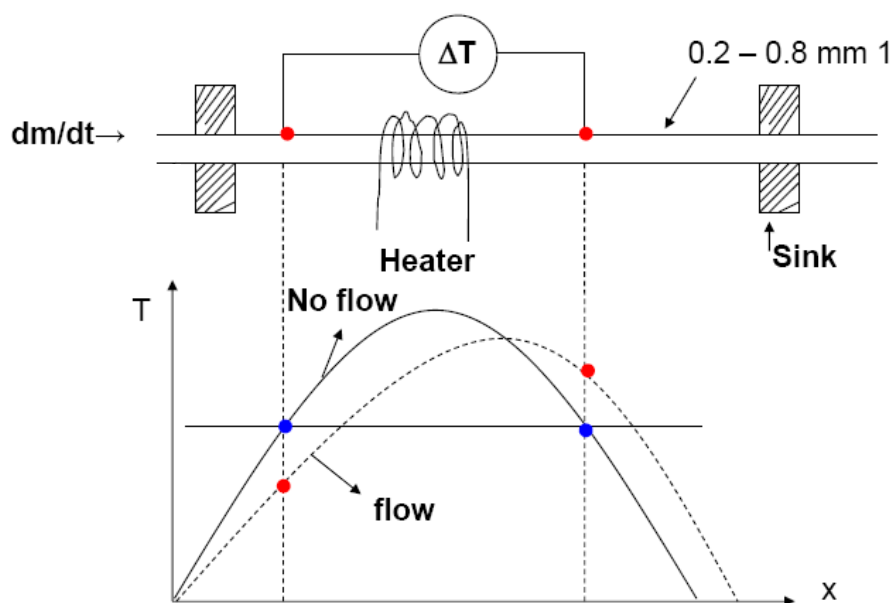


Figura 1

In figura 1 si riporta il principio di funzionamento enunciato per la prima volta da C.C. Thomas nel 1911.

$m_s$  è il flusso di gas [kg/s],  $TC_1$  e  $TC_2$  sono le due termocoppie, i due profili di temperatura dipendono dalla quantità di gas che passa nel condotto.  $\Delta T$  la differenza di temperatura correlata al flusso. Si assuma che il condotto sia opportunamente riscaldato a potenza costante.

Quando il flusso di gas entra nel condotto si troverà a una certa temperatura  $T_1$ ; siccome il condotto è riscaldato a una temperatura maggiore di  $T_1$ , per il Secondo Principio della Termodinamica si può scrivere:

$$W = \dot{m} C_p \Delta T$$

dove  $W$  è la potenza riscaldante,  $\dot{m}$  è la massa di fluido,  $C_p$  il calore specifico del fluido a pressione costante e  $\Delta T$  la differenza di temperatura tra i due punti di prelievo. In realtà questo è vero sotto alcune ipotesi, che sono l'adiabaticità del sistema e la possibilità di considerare costante il calore specifico del gas nei punti 1 e 2<sup>1</sup>.

Nel progetto che verrà effettuato in Laboratorio saranno utilizzate due termocoppie di tipo K Sigestherm ed un circuito di condizionamento di tipo AD595 Monolithic Thermocouple Amplifiers per misurare temperature nell'intervallo (0 - 100 °C) e con accuratezza  $\pm 3^\circ\text{C}$ . Nel circuito di interfaccia vi sono i blocchi funzionali per la linearizzazione della risposta delle termocoppie e la compensazione per la variazione della temperatura ambiente.

---

<sup>1</sup> Il calore specifico, infatti, dipende da molti fattori, tra i quali la pressione e la temperatura. Il Secondo Principio della Termodinamica afferma che:

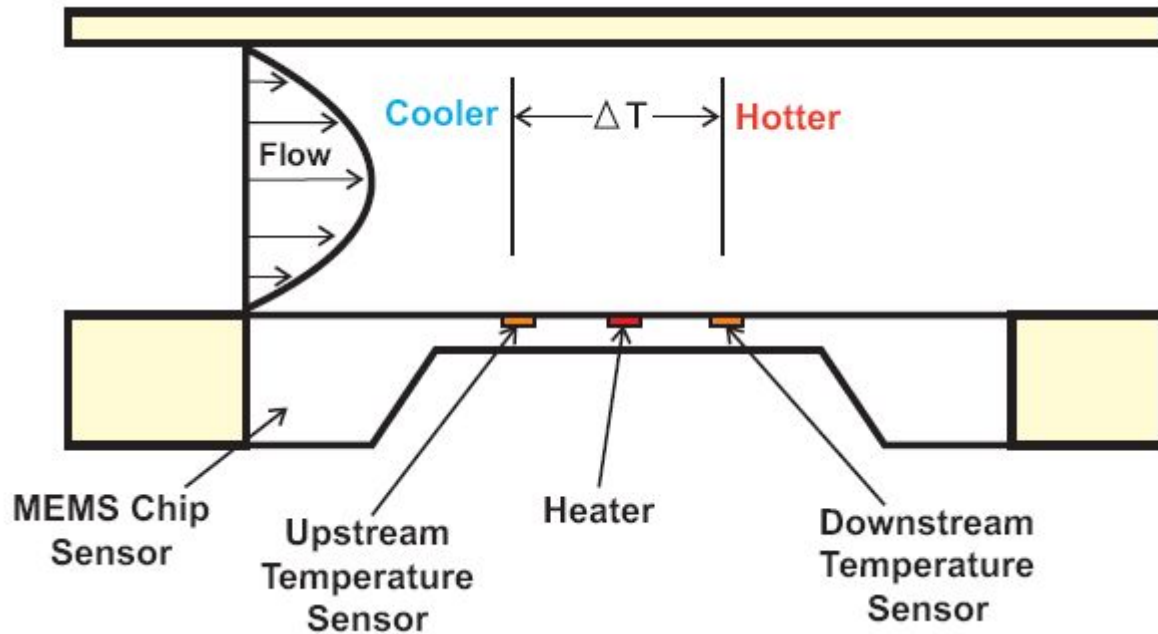
$$Q = \dot{m} \Delta H = \dot{m} (C_p T_2 + h_0 - C_p T_1 + h_0)$$

dove  $Q$  è il calore fornito a un sistema,  $m$  la massa,  $H$  è la funzione di stato entalpia e  $h_0$  una costante. Calcolando  $Q$  tra due punti a diversa temperatura  $T_1$  e  $T_2$  si può scrivere:

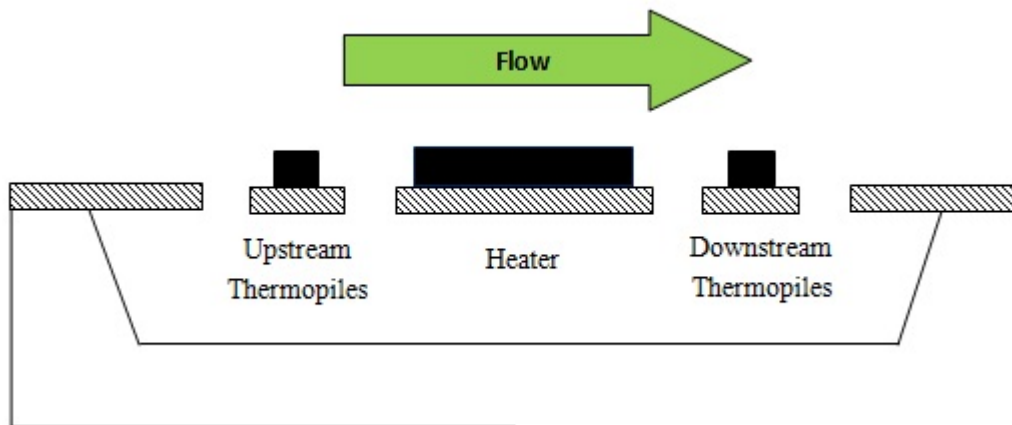
$$Q = \dot{m} (H_2 - H_1) = \dot{m} (C_{p2} T_2 + h_0 - C_{p1} T_1 + h_0) = \dot{m} C_{p12} \Delta T \text{ con } C_{p12} \text{ valore medio del calore specifico a pressione costante del gas nelle condizioni 1 e 2.}$$

## MEMS Flow meters

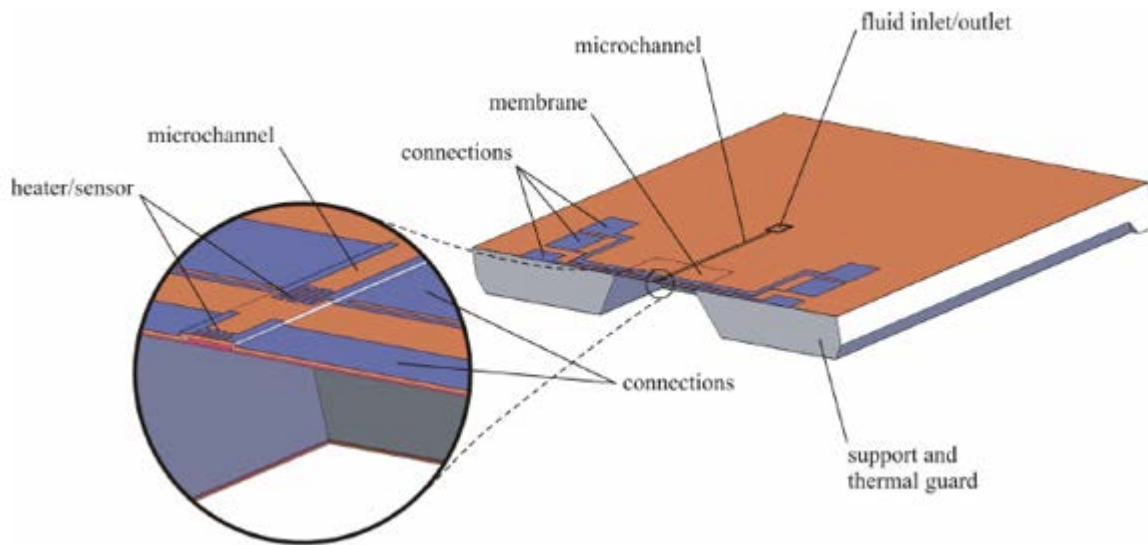
Un esempio di sistema integrato per misure di microfluidica e nanofluidica e' riportato nella seguente figura. Vi sono molte attività di ricerca e sviluppo per la realizzazione di sensori di portata in silicio con misura differenziale di temperatura basata su termocoppie, giunzioni a semiconduttore o sensori termoresistivi.



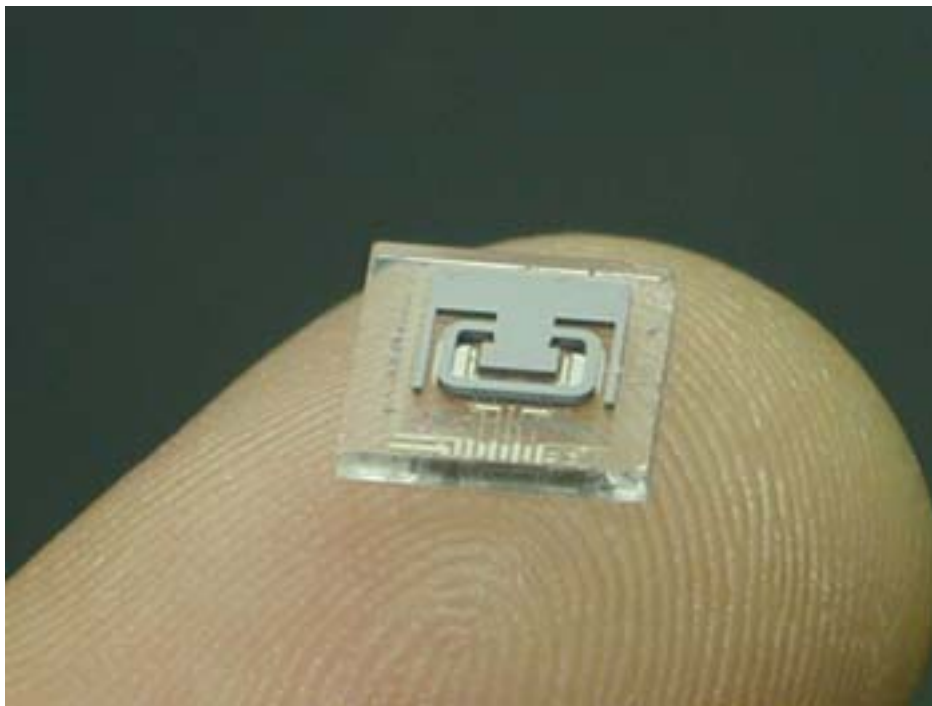
### CMOS IC Technology



### Three Dimensional Structure



### A MEMS flow meter device



# Data sheet

Thermocouple Extension & Compensating Cable

## PVC Insulated Flat Pair – to BS1843

Type 'JX' Thermocouple or 'VX' compensating cable with 7/0.2mm conductors



Type 'JX' Extension



Type 'VX' Compensating

- PVC insulated flat pair construction
- Conductors laid flat PVC insulated with overall PVC sheath
- 7/0.2mm stranded conductors
- Thermocouple extension type 'JX', & compensating type 'VX' which compensates for 'K' type thermocouples
- All round general purpose cable, both waterproof and very flexible
- 'JX' available in 10 metre lengths & 'VX' in 25 & 100 metre lengths
- Tolerance Class 2
- Insulation rating -10°C to 105°C
- Colour code (cores & jacket) to former British Standard – BS1843-1952

Massima temperatura operativa +80° C

Minima temperatura operativa 0° C

| T/C Type             | Conductors | mm <sup>2</sup> | Cores         | Jacket | Reel Length | RS order code |
|----------------------|------------|-----------------|---------------|--------|-------------|---------------|
| <b>Extension:</b>    |            |                 |               |        |             |               |
| JX                   | 7/0.2mm    | 0.219           | +Yellow/-Blue | Black  | 10 metres   | 150-010       |
| <b>Compensating:</b> |            |                 |               |        |             |               |
| VX                   | 7/0.2mm    | 0.219           | +White/-Blue  | Red    | 25 metres   | 151-316       |
| VX                   | 7/0.2mm    | 0.219           | +White/-Blue  | Red    | 100 metres  | 158-963       |

**Overall sheath Dimensions** (approx.)

7/0.2mm 2.5mm x 3.9mm

**Loop resistance** (ohms per combined metre)

Type J @ 2.7 Ohms/mtr

Type VX @ 2.3 Ohms/mtr