



# **Misura di temperatura con sensore Pt100 e scheda Arduino Uno**

## Obiettivo dell'esperienza

- Sviluppare un termometro digitale usando
  - ↳ un sensore resistivo di temperatura
    - ✓ Pt100 a film sottile – classe II (B)
  - ↳ una scheda Arduino
    - ✓ Arduino UNO
- Progettare il circuito di condizionamento del sensore
- Valutare l'incertezza attesa

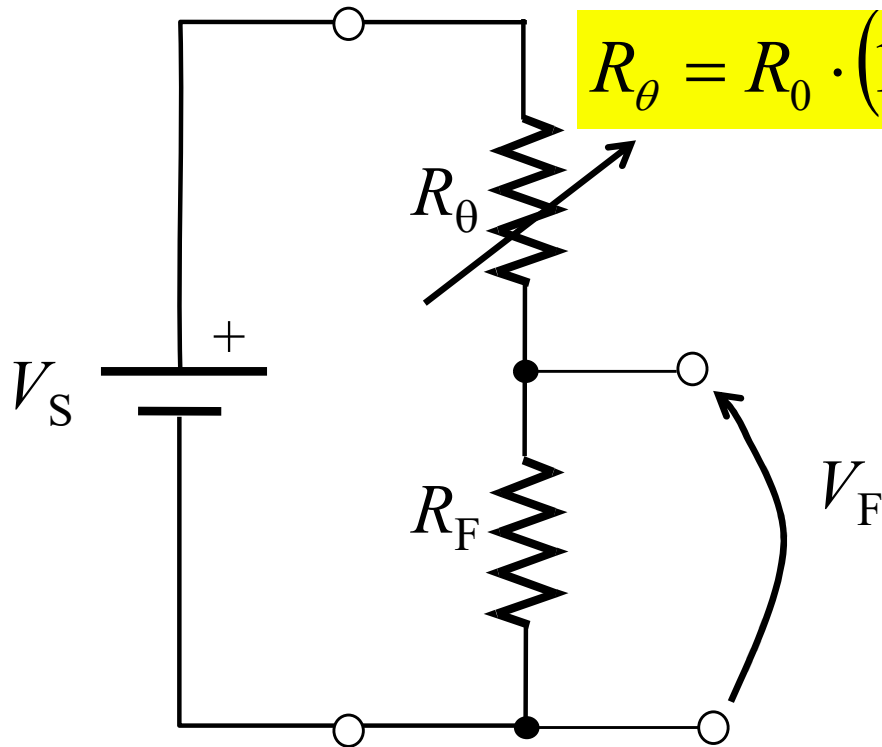
## Il sensore



- Pt100 a 4 fili
  - ✓  $R_0 = 100 \, \Omega$
  - ✓  $A = 3.9083 \cdot 10^{-3} \, (^{\circ}\text{C})^{-1}$
  - ✓  $B = - 5.775 \cdot 10^{-7} \, (^{\circ}\text{C})^{-2}$
- Classe II (B)
  - ✓  $\delta\theta = \pm (0.3 + 0.005 \cdot |\theta|) \, ^{\circ}\text{C}$
- Resistenza termica:  $100 \, ^{\circ}\text{C}/\text{W}$

## Circuito di condizionamento

### ➤ Divisore di tensione



### Relazione ingresso/uscita

$$V_F = V_S \cdot \frac{R_F}{R_F + R_\theta} =$$
$$= V_S \cdot \frac{R_F}{R_F + R_0 \cdot (1 + A \cdot \theta + B \cdot \theta^2)}$$

## Circuito di condizionamento

### ➤ Divisore di tensione

$$V_F = V_S \cdot \frac{R_F}{R_F + R_0 \cdot (1 + A \cdot \theta + B \cdot \theta^2)}$$

### ➤ $V_S$ ? $R_F$ ?

↳ Criterio di progetto: massimizzare la sensibilità

$$S_{V_F}^{\theta} = \frac{\partial V_F}{\partial \theta} \quad \left( \frac{V}{^{\circ}\text{C}} \right)$$

$$S_{V_F}^{\theta} = -V_S \cdot R_F \cdot R_0 \cdot \frac{A + 2 \cdot B \cdot \theta}{\left[ R_F + R_0 \cdot (1 + A \cdot \theta + B \cdot \theta^2) \right]^2}$$

Termine da massimizzare

Elevata tensione di alimentazione, ma prestando attenzione all'autoriscaldamento

## Circuito di condizionamento

### ➤ Divisore di tensione

$$S_{V_F}^{\theta} = -V_S \cdot R_F \cdot R_0 \cdot \frac{A + 2 \cdot B \cdot \theta}{\left[ R_F + R_0 \cdot (1 + A \cdot \theta + B \cdot \theta^2) \right]^2}$$

$$\frac{\partial(\cdot)}{\partial R_F} = 0$$

Termine da  
massimizzare

$$\left. \frac{\partial(\cdot)}{\partial R_F} \right|_{\theta=0^{\circ}\text{C}} = A \cdot R_0 \cdot \frac{R_0 - R_F}{(R_0 + R_F)^3} = 0 \quad \Rightarrow \quad \boxed{R_F = R_0}$$

## Circuito di condizionamento

➤ Divisore di tensione

➤  $R_F = R_0 = 100 \, \Omega$

➤  $V_S ?$

↳ Criterio: rendere trascurabile  
l'autoriscaldamento rispetto all'incertezza  
del sensore ( $0.3 \, ^\circ\text{C}$ )

$$P_{R_0} = \frac{V_S^2}{4} \cdot \frac{1}{R_0} \quad \rightarrow \quad \Delta\theta_{s-o} = P_{R_0} \cdot 100 \left( \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} \right) = \frac{V_S^2}{4} \cdot \frac{1}{R_0} \cdot 100 \ll 0.3 \, ^\circ\text{C}$$

$$V_S \ll 1.1 \, \text{V}$$

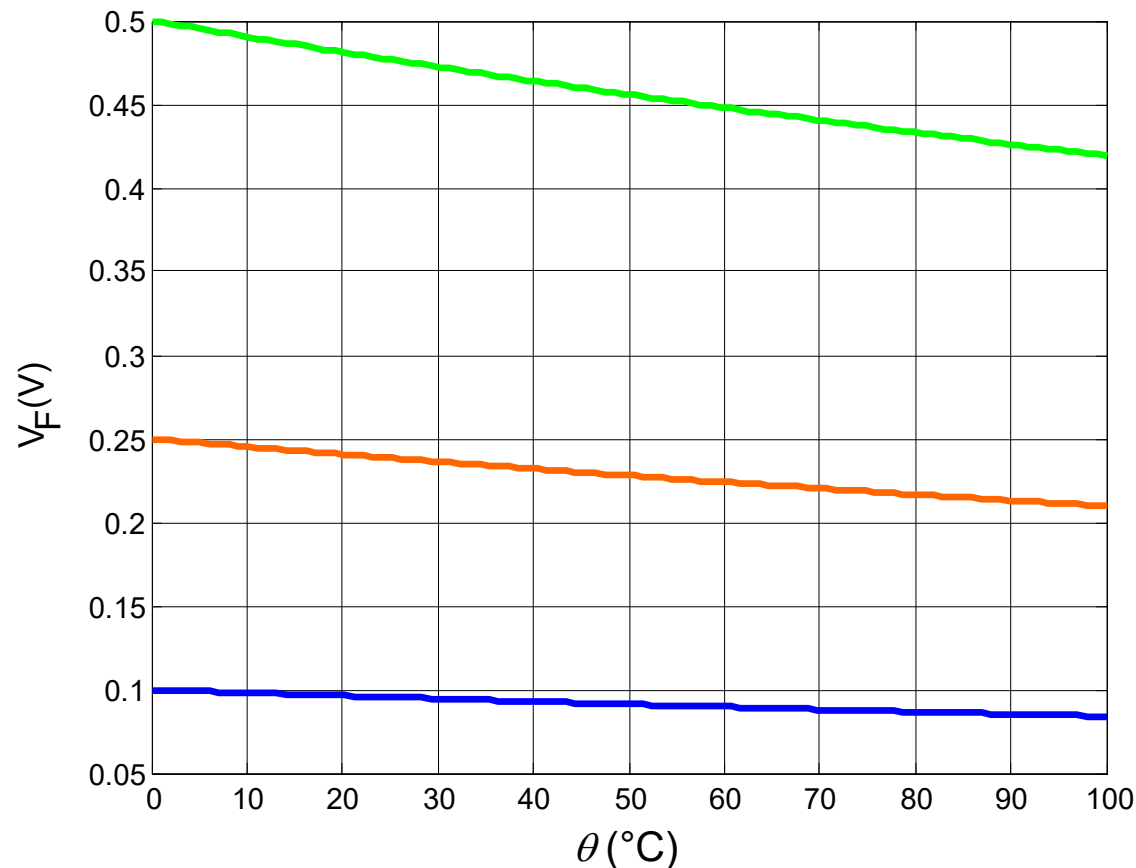


... bassa sensibilità

## Circuito di condizionamento

➤ Divisore di tensione

➤  $R_F = R_0 = 100 \Omega$



$V_S$

1 V

0.5 V

0.2 V

$S_{V_F}^\theta$

- 0.8 mV/°C

- 0.4 mV/°C

- 0.16 mV/°C



## Circuito di condizionamento

➤ Divisore di tensione

➤  $R_F > R_0 \rightarrow$  valori più elevati di  $V_S$

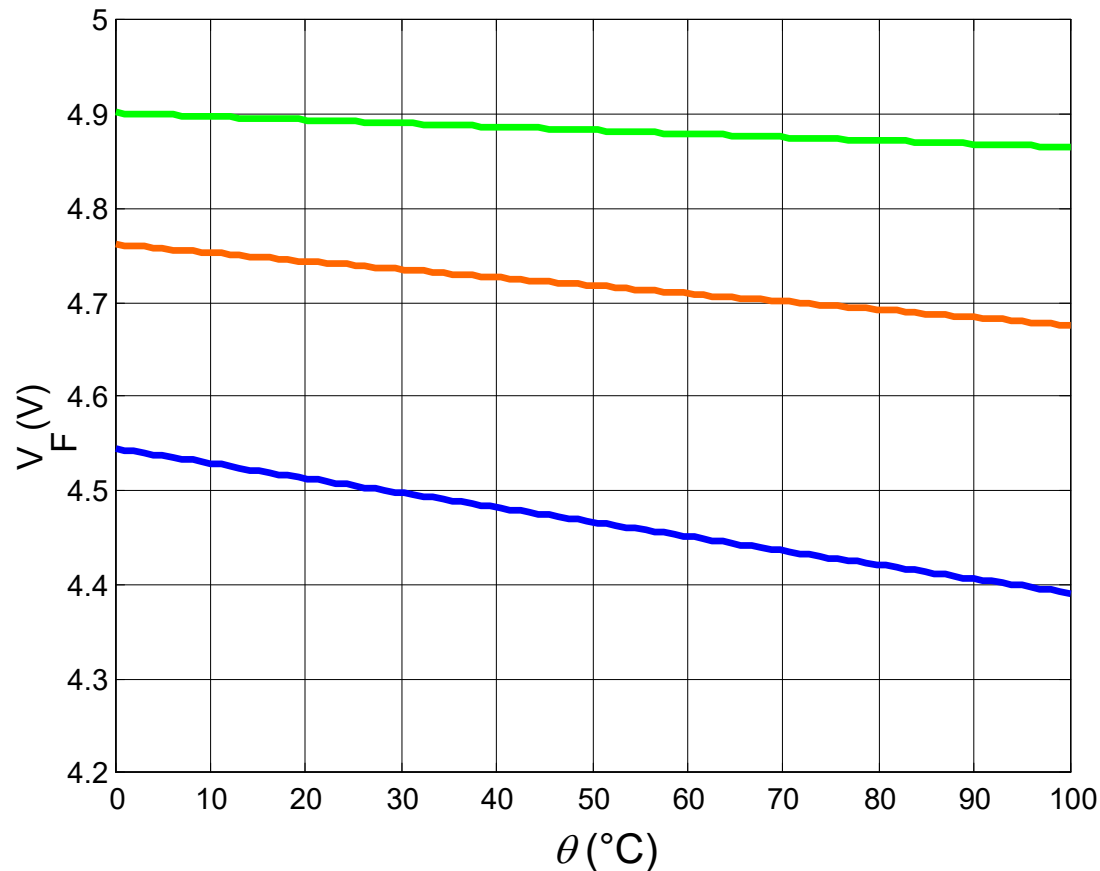
$$V_S = 5 \text{ V}$$

$$R_F$$

$$5 \text{ k}\Omega$$

$$2 \text{ k}\Omega$$

$$1 \text{ k}\Omega$$



$$S_{V_F}^\theta$$

$$- 0.36 \text{ mV}/^\circ\text{C}$$

$$- 0.86 \text{ mV}/^\circ\text{C}$$

$$- 1.54 \text{ mV}/^\circ\text{C}$$

## Circuito di condizionamento

### ➤ Divisore di tensione

#### ➤ Possibile scelta:

✓  $V_S = 5 \text{ V}$

✓  $R_F = 1 \text{ k}\Omega$

⇒  $S_{V_F}^\theta = -1.54 \text{ mV}/^\circ\text{C}$

⇒  $\Delta\theta_{s-o} \approx 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$

#### ➤ Funzione di taratura:

$$\theta = -\frac{A}{2 \cdot B} - \sqrt{\frac{A^2}{4 \cdot B^2} - \frac{1}{R_0 \cdot B} \cdot \left( R_0 + R_F - \frac{V_S}{V_F} \cdot R_F \right)}$$

## Circuito di condizionamento

### ➤ Divisore di tensione

$$\theta = -\frac{A}{2 \cdot B} - \sqrt{\frac{A^2}{4 \cdot B^2} - \frac{1}{R_0 \cdot B} \cdot \left( R_0 + R_F - \frac{V_S}{V_F} \cdot R_F \right)}$$

### ➤ Incertezza assoluta

$$\delta \theta = \left| S_{\theta}^{V_S} \right| \cdot \delta V_S + \left| S_{\theta}^{V_F} \right| \cdot \delta V_F + \left| S_{\theta}^{R_F} \right| \cdot \delta R_F + \delta \theta^{\text{sens}}$$

### ➤ Risoluzione di misura

$$\Delta \theta = S_{\theta}^{V_F} \cdot \Delta V_F = S_{\theta}^{V_F} \cdot V_q$$

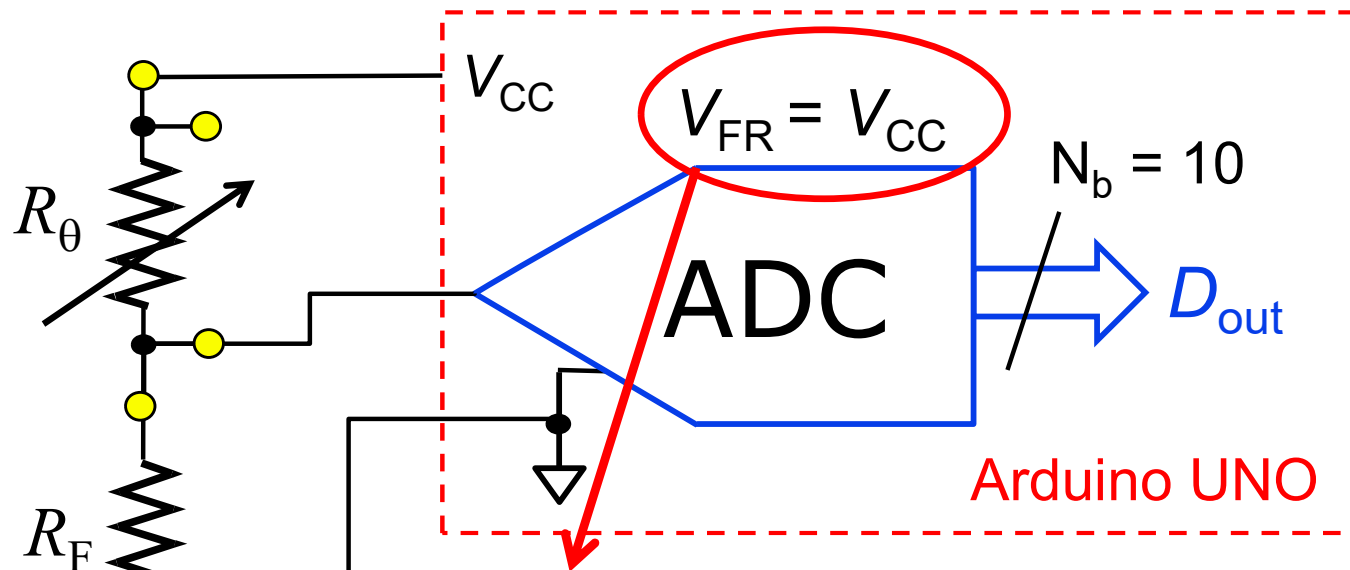
$$\Rightarrow V_{FR} = 5 \text{ V}$$

$$\Delta \theta \approx \begin{cases} 0.2 \text{ }^{\circ}\text{C} & (N_b = 14) \\ 0.8 \text{ }^{\circ}\text{C} & (N_b = 12) \\ 3.2 \text{ }^{\circ}\text{C} & (N_b = 10) \end{cases}$$

**Lettura  
singola**

## Circuito di condizionamento

- Divisore di tensione
  - Schema elettrico suggerito

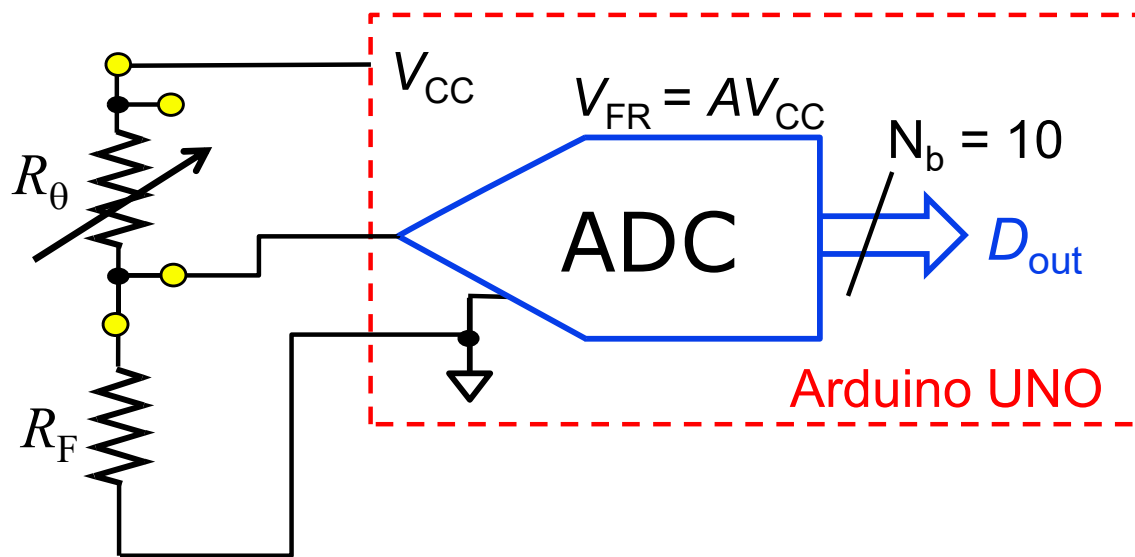


$V_{CC}$  usata sia come tensione di riferimento dell'ADC sia come tensione di alimentazione del circuito di condizionamento

➡ **Misura raziometrica**

# Circuito di condizionamento

- Divisore di tensione
- Misura raziometrica



$$D_{\text{out}} = \left\lfloor \frac{V_F}{V_q} \right\rfloor =$$

$$= V_{CC} \cdot \frac{R_F}{R_F + R_\theta} \cdot \frac{1}{V_q}$$

$$V_q = \frac{V_{FR}}{2^{N_b}} = \frac{V_{CC}}{2^{N_b}} \Rightarrow D_{\text{out}} = \cancel{V_{CC}} \cdot \frac{R_F}{R_F + R_\theta} \cdot \frac{2^{N_b}}{\cancel{V_{CC}}} = 2^{N_b} \cdot \frac{R_F}{R_F + R_\theta}$$

## Circuito di condizionamento

- Divisore di tensione
- Misura raziometrica
  - ↳ Funzione di taratura

$$\theta = -\frac{A}{2 \cdot B} - \sqrt{\frac{A^2}{4 \cdot B^2} - \frac{1}{R_0 \cdot B} \cdot \left( R_0 + R_F - \frac{2^{N_b}}{D_{\text{out}}} \cdot R_F \right)}$$

- ↳ L'incertezza dipende solo da  $D_{\text{out}}$ ,  $R_F$  e dal sensore

$$\delta \theta = \left| S_{\theta}^{D_{\text{out}}} \right| \cdot \delta D_{\text{out}} + \left| S_{\theta}^{R_F} \right| \cdot \delta R_F + \delta \theta^{\text{sens}}$$

## Circuito di condizionamento

- Divisore di tensione
- Misura raziometrica

$$\theta = -\frac{A}{2 \cdot B} - \sqrt{\frac{A^2}{4 \cdot B^2} - \frac{1}{R_0 \cdot B} \cdot \left( R_0 + R_F - \frac{2^{N_b}}{D_{\text{out}}} \cdot R_F \right)}$$

- Risoluzione pari a circa 3 °C nel caso di letture singole ( $N_b = 10$ ,  $\Delta D_{\text{out}} = 1$  LSB)
  - Migliorabile mediante l'implementazione di un metodo a letture multiple (*dithering* basato sul rumore interno)

## Firmware del micro-controllore

- Gestire la comunicazione seriale
  - Fissare il *baud rate*, usare la *built-in function* `serialEvent()`, ...
    - ↪ Vedere capitoli 3, 4 e 5 della guida *Using Arduino boards in Measurements for dummies*
- Configurare l'ADC
- Acquisire il segnale di tensione
  - *built-in functions* `analogReference()` e `analogRead()`
    - ↪ Vedere capitolo 6 della guida



## Firmware del micro-controllore

- Implementare la funzione di taratura
  - Convertire il codice di uscita dell'ADC in misura di temperatura
    - ↳ Usare le opportune costanti di taratura ( $R_F$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $R_0$ )
    - ↳ Valutare l'incertezza di misura
- Fornire le misure di temperatura
  - Inviare i risultati al *serial monitor* via USB

## Caratterizzazione del sistema

- Valutare l'errore di misura a fronte di un termometro di riferimento
  - ✓ Lettura singola
  - ✓ Letture multiple
- Verificare la conformità rispetto all'incertezza attesa