

Esercitazione di Laboratorio:

Misure di temperatura con sensore LM335 e scheda Arduino
Uno

Coa Giulio (s236723) Licastro Dario (s234421)
Montano Alessandra (s238160)

22 gennaio 2020

1 Scopo dell'esperienza

Lo scopo di questa esercitazione è sviluppare un termometro digitale tramite l'uso di un sensore di temperatura e di una scheda Arduino.

2 Strumentazione utilizzata

La strumentazione usata durante l'esercitazione è:

Strumento	Marca e Modello	Caratteristiche
Multimetro Oscilloscopio	Agilent 34401A Rigol DS1054Z	4 canali, $B = 50 \text{ MHz}$, $f_c = 1 \text{ G} \frac{\text{Sa}}{\text{s}}$, $R_i = 1 \text{ M}\Omega$, $C_i = 13 \text{ pF}$, 12 Mbps di profondità di memoria
Generatore di segnali	Rigol DG1022	2 canali, $f_{\text{uscita}} = 20 \text{ MHz}$, $Z_{\text{uscita}} = 50 \Omega$
Scheda Arduino	UNO	$f_{c,\text{max}} = 76.9 \text{ k} \frac{\text{Sa}}{\text{s}}$
Sensore di temperatura	LM335	$\delta D_{\text{out}} = 2 \text{ LSB}$ $S = 10 \text{ m} \frac{\text{V}}{\text{K}}$, $V_{\text{out}} = 0 \text{ V} @ 0 \text{ K}$ $\delta T = \pm 2 ^\circ \text{C}$ Campo di temperatura pari a $-40 \div 100 ^\circ \text{C}$ Resistenza termica pari a $165 \frac{^\circ \text{C}}{\text{W}}$ Capacità dell'ordine dei $80 \div 100 \text{ p} \frac{\text{F}}{\text{m}}$
Cavi coassiali Connettori		

3 Premesse teoriche

3.1 Incertezza sulla misura dell'oscilloscopio

La misura del valore di un segnale tramite l'oscilloscopio (sia esso l'ampiezza, la frequenza, il periodo, etc.) presenta un'incertezza che dipende, principalmente, da due fattori:

- l'incertezza strumentale introdotta dall'oscilloscopio (ricavabile dal manuale).
- l'incertezza di lettura dovuta all'errore del posizionamento dei cursori.

Quest'ultima incertezza deriva dal fatto che il segnale visualizzato non ha uno spessore nullo sullo schermo.

3.2 Arduino

Arduino è una piattaforma elettronica open source basata su un hardware di facile utilizzo e programmabile in un ambiente software dedicato.

3.2.1 Arduino UNO

Arduino UNO è una scheda composta da un convertitore ADC a 10 bit (8 bit se la frequenza d'utilizzo è maggiore di $15\text{k}\frac{\text{Sa}}{\text{s}}$) che può essere alimentato da due distinte sorgenti, una interna alla scheda da $1.1 \pm 0.1\text{ V}$ e una esterna da $5 \pm 0.25\text{ V}$ ($4.85 \pm 0.4\text{ V}$ se si usa la porta USB 3.0 anziché la porta USB 2.0).



Figura 1: Arduino UNO.

3.3 Sensore LM335

Il sensore LM335 è un sensore di temperatura prodotto dalla National Semiconductor; esso permette di avere in uscita una tensione proporzionale alla temperatura rilevata ($V_{\text{out}} = S \cdot T_K$). Il suo comportamento è assimilabile a quello di un diodo di Zener la cui corrente I_D deve essere compresa nell'intervallo $0.4\text{ mA} \div 5\text{ mA}$.

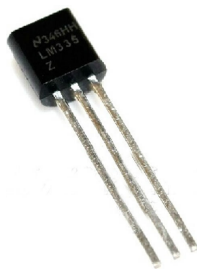


Figura 2: Sensore LM335.

4 Esperienza in laboratorio

4.1 Circuito di condizionamento

Per i nostri scopi, il sensore LM335 deve lavorare in regione di polarizzazione inversa, per cui esso verrà utilizzato con il catodo collegato alla massa e con l'anodo collegato alla sorgente di tensione.

Al fine di garantire un corretto funzionamento del sensore, dobbiamo garantire che la corrente che vi circola all'interno sia nel range di funzionamento; a tale scopo applichiamo una resistenza R_1 a monte del diodo, di modo che la corrente che scorra nel diodo rientri nel suddetto range.

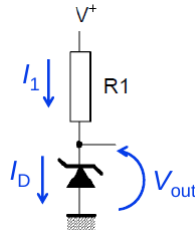
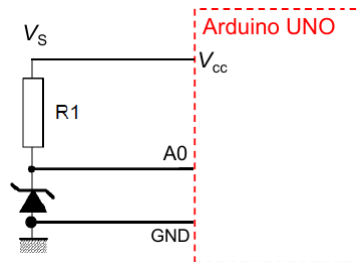


Figura 3: Circuito di condizionamento.

4.2 Misura della temperatura

Successivamente, abbiamo collegato il sensore all'Arduino UNO, seguendo lo schema nella figura seguente ed impostando una tensione d'alimentazione V_{cc} pari a 4.85 ± 0.4 V.



L'Arduino UNO produce, in uscita, un valore numerico nell'intervallo $0 \div 1023$ ($0 \div 2^{N_B} - 1$); al fine di ottenere la temperatura di lavoro del sensore, abbiamo usato la funzione

$$T_K = D_{out} \cdot \frac{V_{FR}}{2^{N_B}} \cdot \frac{1}{S}$$

Mentre, per ottenere la tensione ad essa associata, abbiamo sfruttato la relazione $V_{out} = S \cdot T_K$, ottenendo la formula

$$V_{out} = D_{out} \cdot \frac{V_{FR}}{2^{N_B}}$$

Queste formule sono state implementate nel seguente codice, simil C++, che è stato usato per settare l'Arduino UNO.

```

1 #include <string.h>
2
3 #define INT
4
5 int D_out, N_B, pin, sleepTime;
6 float R_2, R_3, S, T_C, T_K, V_out, V_FR;
7
8 void setup() {
9     Serial.begin(9600); // setup Serial
10    pin = A0; // set the pin to read data
11    sleepTime = 1000; // set how much time the sensor must execute the measurement of the
        temperature
12    S = 10 * pow(10, -3);
13    N_B = 10;
14    R_2 = 3.8 * pow(10, 3);
15    R_3 = 1 * pow(10, 3);
16    #ifndef INT
17        V_FR = 1.1;
18        analogReference(INTERNAL); // set the type of alimentation
19    #else
20        V_FR = 4.85;
21    #endif
22 }
23 void loop() {
24     D_out = analogRead(pin); // read data from the pin
25     T_K = (float) D_out * V_FR / pow(2, N_B) * 1 / S;
26     V_out = (float) D_out * V_FR / pow(2, N_B);
27     #ifndef INT
28         T_K = T_K * (1 + R_2 / R_3);
29         V_out = V_out * (1 + R_2 / R_3);
30     #endif
31     T_C = T_K - 273.15;
32     Serial.println("D_out: " + String(D_out) + " -- V_out: " + String(V_out) + " V -- T: " + String(
        T_K) + " K -- T: " + String(T_C) + " C");
33     delay(sleepTime);
34 }

```

4.3 Stima dell'incertezza

Al fine di determinare l'incertezza assoluta associata alla misura di temperatura ottenuta, abbiamo applicato la formula di propagazione delle incertezze del modello deterministico.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$$

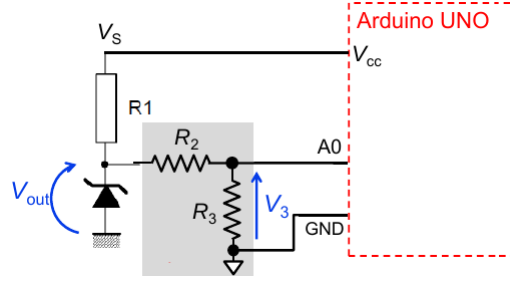
$$\delta y = \sum_{i=1}^m \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| \cdot \delta x_i$$

Il valore ottenuto è molto elevato, per cui tale misura non si può considerare affidabile.

4.4 Modifica del circuito di condizionamento

Al fine di ridurre l'incertezza associata a tale misurazione, imponiamo che la tensione di fondo scala V_{FR} sia pari al riferimento interno V_{int} dell'Arduino UNO; questa tensione è nota con un'incertezza assoluta minore e, pertanto, risulta essere più accurata.

Per poter applicare questa soluzione, occorre portare la tensione V_{out} dal range attuale ($0 \div 5$ V) al range $0 \div 1.1$ V; a tale scopo, applichiamo un partitore di tensione in parallelo al sensore.



Tale partitore deve essere strutturato di modo da

- Minimizzare gli effetti di carico.
- Imporre una tensione V_3 di, massimo, 1.1 V.
- Non assorbire troppa corrente, pena il corretto funzionamento del sensore.
- Attenuare la tensione V_{out} di un fattore ≥ 3

A tale scopo le resistenze R_2 ed R_3 devono essere abbastanza elevate per portare alla saturazione in caso di tensioni maggiori di 1.1 V, ma devono essere abbastanza piccole per evitare di assorbire troppa corrente.

L'inserimento di questo partitore si ripercuote sulla funzione usata per determinare la temperatura di lavoro del sensore e la tensione che esso produce in output; nello specifico, esse diventano

$$T_K = D_{out} \cdot \frac{V_{FR}}{2^{N_B}} \cdot \frac{1}{S} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right)$$

$$V_{out} = D_{out} \cdot \frac{V_{FR}}{2^{N_B}} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right)$$

Queste formule sono state implementate nel codice che è stato presentato al punto 4.2.

Una volta eseguite queste modifiche al circuito, abbiamo ripetuto l'esperienza, misurando nuovamente la temperatura di lavoro del sensore, la tensione che esso produce in uscita e l'incertezza associata alla misura.

5 Risultati

5.1 Circuito di condizionamento

In base ai dati fornitici, abbiamo proceduto al calcolo della tensione massima e della tensione minima a cui il sensore LM335 deve lavorare.

$$\begin{aligned} V_{out,max} &= S \cdot T_{K,max} = \\ &= S \cdot (T_{max} + 273.15) = \\ &= 10m \cdot (50 + 273.15) = \\ &= 3.23 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{out,min} &= S \cdot T_{K,min} = \\ &= S \cdot (T_{min} + 273.15) = \\ &= 10m \cdot (5 + 273.15) = \\ &= 2.78 \text{ V} \end{aligned}$$

Essendo che la resistenza R_1 è posta in serie al sensore, la corrente che scorre nel diodo è uguale a quella che scorre nella resistenza (in realtà è approssimabile, dato che si va a misurare la tensione ai capi del diodo e si ha un minimo di "perdite").

$$I_D \approx I_1 = \frac{V_s - V_{out}}{R_1}$$

Da ciò, si ha che le limitazioni sulla corrente che attraversa il diodo diventano

$$\frac{V_s - V_{out, \max}}{R_1} > 0.4 \text{ mA}$$

$$\frac{V_s - V_{out, \min}}{R_1} < 5 \text{ mA}$$

Da cui si ha che

$$\frac{V_s - V_{out, \max}}{0.4 \text{ mA}} > R_1 > \frac{V_s - V_{out, \min}}{5 \text{ mA}}$$

$$4050 \Omega > R_1 > 414 \Omega$$

Successivamente, abbiamo stimato la temperatura dell'ambiente in cui il diodo avrebbe lavorato, tenendo conto dell'autoriscaldamento del sensore, e, di conseguenza, la tensione in uscita che esso avrebbe prodotto.

$$\begin{aligned} V_{out} &= S \cdot T_K = \\ &= S \cdot (T + 273.15) = \\ &= 10 \text{ m} \cdot (25 + 273.15) = \\ &= 2.98 = \\ &\approx 3 \text{ V} \end{aligned}$$

Ed abbiamo imposto che I_D fosse di 2 mA, da cui

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{V_s - V_{out}}{I_1} = \\ &= \frac{4.85 - 3}{2 \text{ mA}} = \\ &= 925 \Omega \end{aligned}$$

5.2 Misura della temperatura

Il valore di D_{out} ottenuto è pari a 602, per cui la temperatura a cui lavora il sensore sarà

$$\begin{aligned} T_K &= D_{out} \cdot \frac{V_{FR}}{2^{N_B}} \cdot \frac{1}{S} = \\ &= 602 \cdot \frac{4.85}{2^{10}} \cdot \frac{1}{10 \text{ m}} = \\ &= 285.13 \text{ K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T &= T_K - 273.15 = \\ &= 286.55 - 273.15 = \\ &= 11.98 \text{ °C} \end{aligned}$$

Mentre la tensione in uscita sarà

$$\begin{aligned} V_{\text{out}} &= D_{\text{out}} \cdot \frac{V_{\text{FR}}}{2^{N_{\text{B}}}} = \\ &= 602 \cdot \frac{4.85}{2^{10}} = \\ &= 2.85 \text{ V} \end{aligned}$$

5.3 Stima dell'incertezza

Come detto precedentemente, abbiamo applicato la formula di propagazione delle incertezze del modello deterministico, ottenendo un'incertezza pari a

$$\begin{aligned} \delta T &= \left| \frac{\partial T}{\partial D_{\text{out}}} \right| \cdot \delta D_{\text{out}} + \left| \frac{\partial T}{\partial V_{\text{FR}}} \right| \cdot \delta V_{\text{FR}} + \left| \frac{\partial T}{\partial S} \right| \cdot \delta S = \\ &= \frac{V_{\text{FR}}}{S \cdot 2^{N_{\text{B}}}} \cdot \delta D_{\text{out}} + \frac{D_{\text{out}}}{S \cdot 2^{N_{\text{B}}}} \cdot \delta V_{\text{FR}} + \delta T^{\text{sensor}} = \\ &= \frac{4.85}{10m \cdot 2^{10}} \cdot 2 + \frac{602}{10m \cdot 2^{10}} \cdot 0.4 + 2 = \\ &= 26.46 \text{ K} \end{aligned}$$

5.4 Modifica del circuito di condizionamento

Essendo che il partitore deve attenuare di un fattore ≥ 3 la tensione V_{out} , si ha che

$$\begin{aligned} V_3 &\leq \frac{V_{\text{out}}}{3} \\ V_3 &\leq \frac{3}{3} \\ V_3 &\leq 1 \text{ V} \end{aligned}$$

Sfruttando questo vincolo, imponiamo che V_3 sia pari a 1 V, ovvero, imponiamo che

$$\begin{aligned} V_3 &= \frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot V_s \\ \frac{R_3}{R_2 + R_3} &= \frac{V_3}{V_s} = \\ &= \frac{1}{4.85} = \\ &= 0.21 \end{aligned}$$

Questa relazione non identifica univocamente le resistenze del partitore e, pertanto, ci lascia un certo grado di libertà nella progettazione del circuito; nell'ottica di scegliere delle resistenze che consentissero di non avere un partitore che assorba troppa corrente, abbiamo scelto le resistenze coi seguenti valori

$$R_2 = 3.8 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = 1 \text{ k}\Omega$$

L'inserimento del partitore non ci porta a dover ristrutturare il circuito, in quanto la corrente che scorre nel sensore è sufficiente a farlo funzionare.

$$\begin{aligned} I_D &= I_{D,old} - \frac{V_{out}}{R_2 + R_3} = \\ &= 2m - \frac{3}{3.8k + 1k} = \\ &= 1.38 \text{ mA} \end{aligned}$$

Il valore di D_{out} ottenuto è pari a 566, per cui la temperatura a cui lavora il sensore sarà

$$\begin{aligned} T_K &= D_{out} \cdot \frac{V_{FR}}{2^{N_B}} \cdot \frac{1}{S} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) = \\ &= 566 \cdot \frac{1.1}{2^{10}} \cdot \frac{1}{10m} \cdot \left(1 + \frac{3.8k}{1k}\right) = \\ &= 291.84 \text{ K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T &= T_K - 273.15 = \\ &= 291.84 - 273.15 = \\ &= 18.69^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Mentre la tensione in uscita sarà

$$\begin{aligned} V_{out} &= D_{out} \cdot \frac{V_{FR}}{2^{N_B}} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) = \\ &= 566 \cdot \frac{1.1}{2^{10}} \cdot \left(1 + \frac{3.8k}{1k}\right) = \\ &= 2.92 \text{ V} \end{aligned}$$

L'incertezza associata a questa misurazione è

$$\begin{aligned} \delta T &= \left| \frac{\partial T}{\partial D_{out}} \right| \cdot \delta D_{out} + \left| \frac{\partial T}{\partial V_{FR}} \right| \cdot \delta V_{FR} + \left| \frac{\partial T}{\partial S} \right| \cdot \delta S = \\ &= \frac{V_{FR}}{S \cdot 2^{N_B}} \cdot \delta D_{out} + \frac{D_{out}}{S \cdot 2^{N_B}} \cdot \delta V_{FR} + \delta T^{sensor} = \\ &= \frac{1.1}{10m \cdot 2^{10}} \cdot 2 + \frac{566}{10m \cdot 2^{10}} \cdot 0.1 + 2 = \\ &= 7.74 \text{ K} \end{aligned}$$

Come si può notare, essa è minore dell'incertezza associata alla precedente misurazione, pertanto questa misura è più affidabile della precedente.