

1. INTRODUZIONE AL PROGETTO.

1.1. CARATTERISTICHE GENERALI

Il seguente progetto mira alla realizzazione di un circuito applicativo per sensore di temperatura, il quale permetta di ottenere in uscita una tensione proporzionale alla temperatura stessa.

Il sensore (o trasduttore) di temperatura è un sistema le cui uscite sono condizionate dalla temperatura presente nell'ambiente in cui è posto.

Il mercato offre una molteplicità di sensori; la scelta di uno tra questi è da effettuarsi tenendo conto di particolari fattori quali:

- CAMPO DI TEMPERATURA MISURABILE: range di temperatura di lavoro del sensore.
- STABILITA' E LINEARITA' DELLA FUNZIONE DI TRASFERIMENTO: caratteristiche d'uscita.
- CONDIZIONI DI UTILIZZO: ambienti interni o esterni.
- GRANDEZZA ELETTRICA D'USCITA: tensione, corrente ecc...
- COSTANTE DI TEMPO ASSOCIATA: bassa o alta a seconda delle applicazioni.

In virtù di tali fattori è stato scelto il sensore di temperatura AD590J, di produzione Harris. Tale sensore, per le caratteristiche presentate, si presta perfettamente all'utilizzo cui è chiamato.

Per quanto concerne la costante di tempo associata, quella presentata dall'AD590J non è particolarmente bassa, caratteristica peculiare dei sensori che lavorano con variazioni di temperatura molto rapide.

Nella maggior parte dei casi, il nostro compreso, le variazioni di temperatura sono assai lente, di conseguenza non è giustificabile l'utilizzo di un sensore con bassa costante di tempo associata.

In merito alla natura e alle caratteristiche d'uscita del sensore, si constata come il suo comportamento sia assimilabile a quello di un generatore di corrente in grado di variare l'intensità di corrente erogata in modo linearmente proporzionale alla temperatura dell'ambiente circostante.

Più precisamente, la corrente in uscita è incrementata di 1 micro-ampère quando la temperatura rilevata dal sensore aumenta di 1 grado Kelvin. L'erogazione di corrente viene dunque definita da una costante di sensibilità pari a $1 \mu\text{A}/^\circ\text{K}$.

Il fatto che l'AD590J varia la propria corrente d'uscita in rapporto ai gradi Kelvin anziché ai gradi Celsius non rappresenta un problema; la differenza tra le due diverse scale di misura sta solo nel loro punto minimo, ovvero:

$$0^{\circ}K = -273,15^{\circ}C \quad e \quad 0^{\circ}C = 273,15^{\circ}K$$

1.2. SPECIFICHE DI PROGETTO

Il range di temperatura entro il quale il sensore deve lavorare varia da 0 °C a 50 °C. Il corrispondente range di tensioni varia da 0 volt a 5 volt.

Quando il sensore rileva una temperatura di 0 °C la tensione ai morsetti d'uscita del circuito è pari a 0 volt; quando la temperatura rilevata dal sensore è di 50 °C la tensione riscontrabile in uscita è di 5 volt.

Le potenzialità dell'AD590J non sono sfruttate al massimo, dal momento che esso è in grado di effettuare correttamente misure di temperature comprese in un range più vasto (vedi data sheets).

La scelta di suddetto range è tuttavia giustificata dal fatto che il sensore andrà a lavorare in un ambiente chiuso e non nell'ambiente esterno.

2. SCHEMA E FUNZIONAMENTO DEI SINGOLI BLOCCHI DEL CIRCUITO.

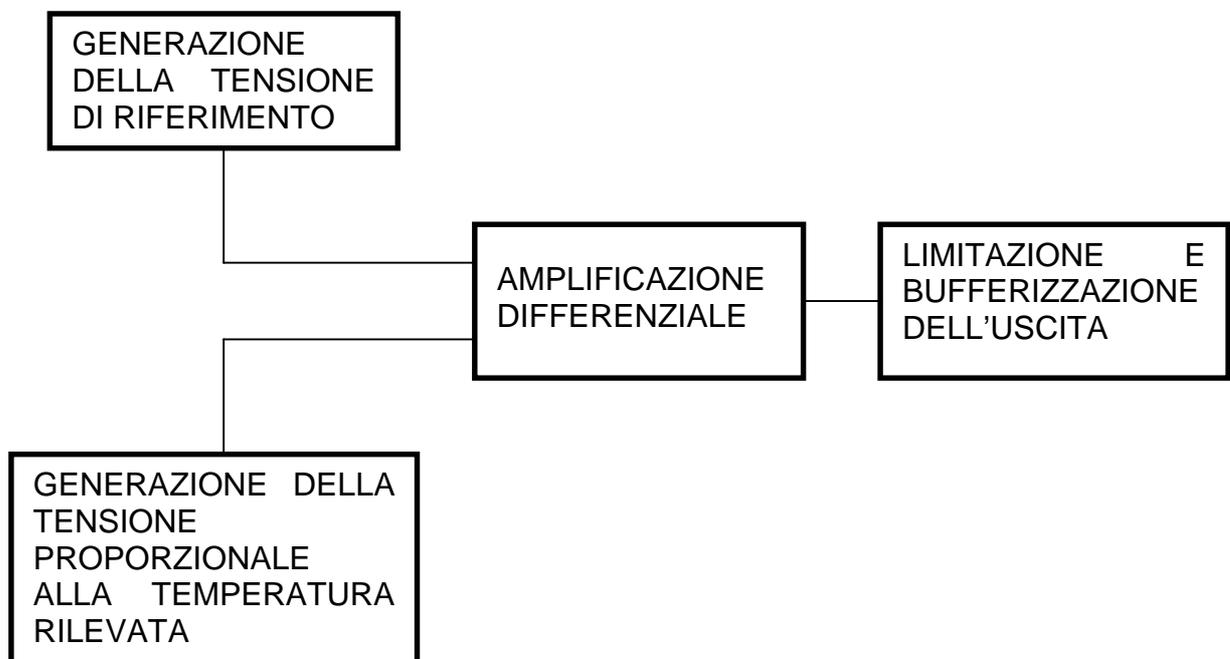


Figura 1. Schema a blocchi del circuito.

Prima di passare all'analisi specifica di ciascun blocco è bene fornire almeno una sommaria spiegazione per quanto riguarda il funzionamento dell'intero sistema.

Dai primi due blocchi del circuito escono due tensioni. Il primo blocco fornisce una tensione che si mantiene costante a un determinato valore: tale tensione sarà denominata tensione di riferimento.

Il secondo blocco fornisce una tensione che varia in modo direttamente proporzionale al variare della temperatura.

Le due tensioni arrivano al terzo blocco, il quale ne amplifica la differenza.

L'ultima parte del circuito si occupa di limitare la tensione in uscita (in riferimento alle specifiche di progetto) e di separare l'uscita stessa da tutto ciò che la precede.

Procediamo ora con un'accurata analisi di ogni parte del circuito.

2.1. GENERAZIONE DELLA TENSIONE DI RIFERIMENTO

Lo schema elettrico seguente rappresenta la parte del circuito che provvede a fornire la tensione di riferimento (V_{RIF}).

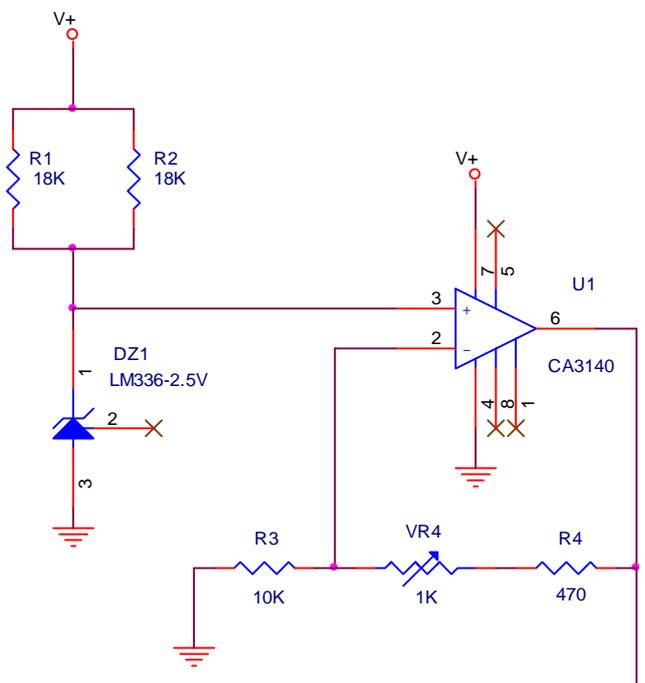


Figura 2. Circuito per la generazione della tensione di riferimento.

Il parallelo tra le resistenze R_1 ed R_2 ha lo scopo di limitare ad un giusto valore la corrente che circola nell'integrato LM336 (I_{Z1}).

Quest'ultimo fornisce alla sua uscita una tensione pari a 2,5 volt.

Quello che segue, come si può facilmente vedere, è un amplificatore con operazionale (U_1) in configurazione non invertente. Esso ha il compito di prelevare la tensione di 2,5 volt in uscita dall'LM336 e amplificarla di una determinata quantità. Il guadagno dell'amplificatore è definito dalle resistenze R_3 , R_4 e VR_4 .

Più precisamente esse fanno in modo che il guadagno dell'operazionale sia tale da avere alla sua uscita una tensione pari a 2,732 volt, la quale rappresenta proprio la tensione di riferimento.

Ovviamente questo non è un valore casuale ma è giustificato da opportune considerazioni, esposte nel successivo paragrafo.

2.2. GENERAZIONE DELLA TENSIONE PROPORZIONALE ALLA TEMPERATURA RILEVATA

La parte di circuito di seguito esposta è in grado di fornire alla sua uscita una tensione di valore proporzionale al valore di temperatura rilevata dal sensore (V_S).

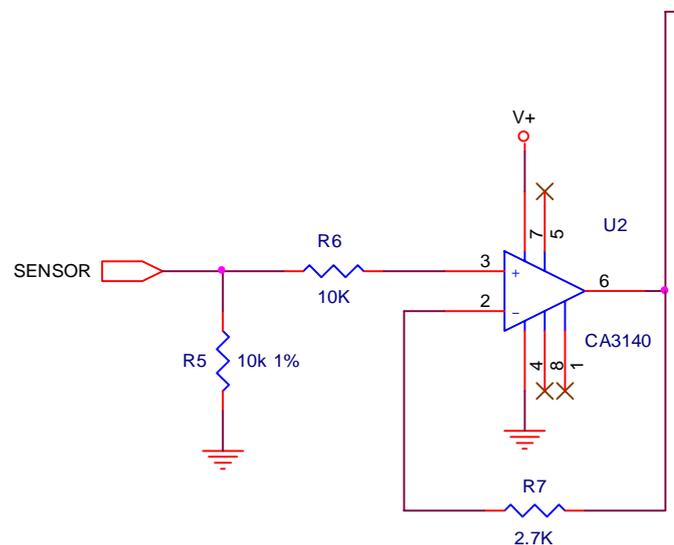


Figura 3. Circuito per la generazione della tensione proporzionale alla temperatura.

Il sensore (collegato direttamente alla tensione di alimentazione), è seguito da una resistenza (R_5 nello schema elettrico).

Suddetta resistenza ha un compito molto importante in quanto deve effettuare la conversione corrente-tensione del segnale in uscita dal sensore.

Come già spiegato precedentemente (vedi par. 1.1 «Caratteristiche generali»), il sensore risponde con una variazione dell'intensità di corrente erogata alla variazione di temperatura.

Le specifiche di progetto però chiedono una risposta in tensione. In virtù di ciò si sfrutta la prima legge di Ohm, che lega la corrente e la tensione tramite la seguente formula:

$$V = R \cdot I$$

Intercalando il tutto nel caso pratico, significa che facendo scorrere una corrente su una resistenza si ottiene una tensione proporzionale all'intensità di corrente stessa e la costante di proporzionalità è costituita proprio dalla resistenza.

Tale tensione entra poi all'ingresso non invertente dell'operazionale che segue (U_2), collegato in modo da funzionare come inseguitore di tensione (ciò si fa per non caricare l'uscita del sensore).

Ora restano da vedere i valori limite che la tensione proporzionale alla temperatura rilevata può assumere (V_{IN1} e V_{IN2}), ovvero i valori di tensione nei casi in cui la temperatura risulta essere pari a 0 °C e a 50 °C.

Per maggiori semplicità e chiarezza è conveniente separare e studiare schematicamente i due casi.

2.2.1. Temperatura rilevata dal sensore pari a 0 °C.

- Corrente erogata sulla resistenza R_5 :

$$I_{R5} = I_{OUT} @ 25^\circ C - (25^\circ C \cdot \alpha) = 298,2\mu A - 25\mu A = 273,2\mu A$$

con $\alpha = 1\mu A/^\circ C$

- Tensione all'ingresso non invertente dell'operazionale U_2 :

$$V_{IN1} = I_{R5} \cdot R_5 = 273,2\mu A \cdot 10K\Omega = 2,732V$$

Per tensione di riferimento è stato adottato un valore di 2,732 volt (vedi par. 2.1. «Generazione della tensione di riferimento»): lo stesso valore è assunto dalla tensione in uscita all'operazionale U_2 (V_S) nel caso in cui la temperatura rilevata dal sensore sia pari a 0°C.

Ciò significa che in questa situazione all'operazionale U_3 , collegato in modo

da funzionare come amplificatore differenziale (ovvero come amplificatore della differenza dei due segnali in ingresso), si presentano due segnali identici; la loro differenza sarà dunque nulla e di conseguenza lo sarà anche la tensione in uscita all'operazionale stesso.

2.2.2. Temperatura rilevata dal sensore pari a 50 °C.

- Corrente erogata sulla resistenza R_5 :

$$I_{R5} = I_{OUT} @ 25^{\circ}C + (25^{\circ}C \cdot \alpha t) = 298,2\mu A + 25\mu A = 323,2\mu A$$

con $\alpha t = 1\mu A/^{\circ}C$

- Tensione all'ingresso non invertente dell'operazionale U_2 :

$$V_{IN2} = I_{R5} \cdot R_5 = 323,2\mu A \cdot 10K\Omega = 3,232V$$

In questo caso all'operazionale U_3 si presentano due segnali differenti e quindi la loro differenza non è nulla.

Infatti si ha che:

$$3,232V - 2,732V = 0,5V$$

2.3. AMPLIFICAZIONE DIFFERENZIALE

La circuiteria sotto riportata rappresenta un amplificatore differenziale, in grado di amplificare la differenza tra i due segnali presenti agli ingressi invertente (pin2) e non invertente (pin3).

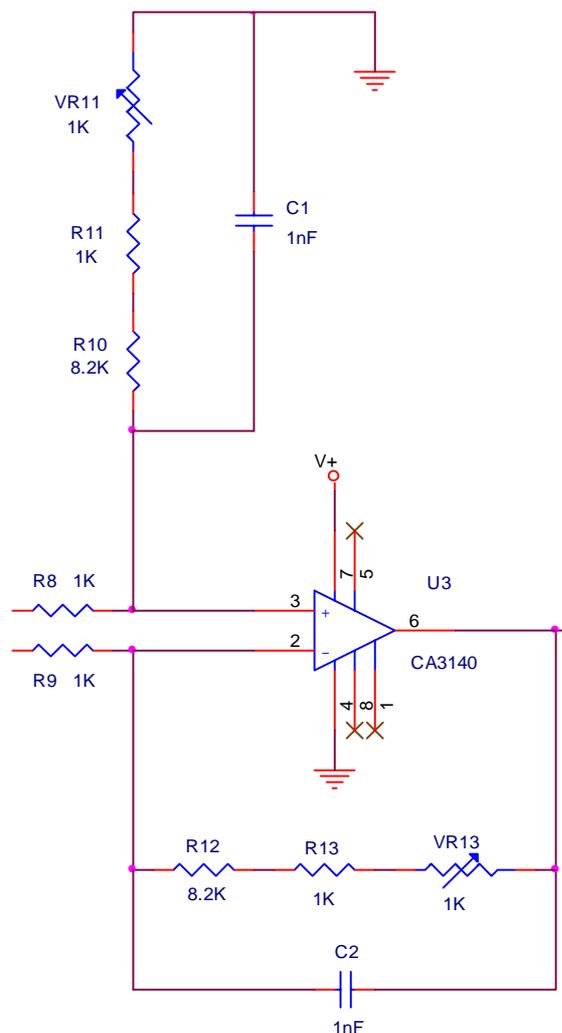


Figura 4. Circuito per l'amplificazione differenziale.

Come già accennato alla fine del precedente paragrafo, in ingresso a questo stadio, nel caso in cui il sensore rileva una temperatura di 50 °C, c'è una tensione di 0,5 volt.

Le specifiche di progetto chiedono però che a tale valore di temperatura sia associata una tensione di 5 volt.

Ciò significa che l'operazionale U₃ dovrà assicurare un guadagno (A_V) pari

a 10, dal momento che:

$$A_v = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{5V}{0,5V} = 10$$

Tale valore di amplificazione viene definito dalle varie resistenze presenti nel circuito di cui sopra.

Da notare invece la presenza dei due condensatori C_1 e C_2 , posti in parallelo rispettivamente al ramo collegato a massa e al ramo di retroazione.

Tali condensatori servono per proteggere lo stadio amplificatore dall'eventuale presenza di segnali rumorosi.

2.4. LIMITAZIONE E BUFFERIZZAZIONE DELL'USCITA

La parte di circuito sottostante è utilizzata per limitare la tensione d'uscita a circa 5 volt e per bufferizzare l'uscita stessa.

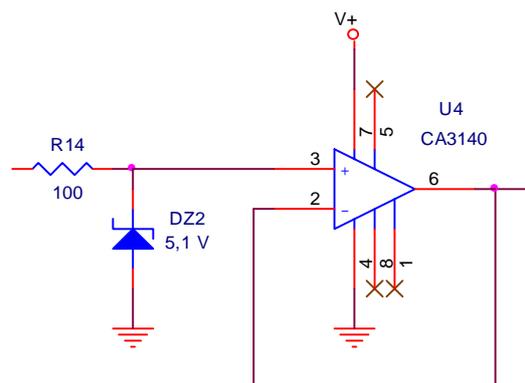


Figura 5. Circuito per la bufferizzazione dell'uscita.

La limitazione della tensione d'uscita risulta essere necessaria al fine di rispettare le specifiche di progetto.

Il sensore infatti, potrebbe rilevare una temperatura superiore ai 50 °C definiti come limite superiore del campo di temperature misurabili; in tal caso anche la tensione in uscita all'intero circuito (V_{OUT}) sarebbe superiore ai 5 volt richiesti nelle specifiche di progetto.

In virtù di ciò nel circuito è stato introdotto un diodo zener il quale, preceduto dalla relativa resistenza, limita la tensione d'uscita al suo valore nominale.

Nel caso pratico non dovrebbero comunque sussistere problemi, in quanto è molto difficile che la temperatura all'interno di un locale sia superiore ai 50 °C.

Tuttavia in fase di progetto è opportuno tenere ragionevolmente conto anche dei casi limite, in modo tale da garantire un corretto funzionamento del circuito in ogni situazione.

Ora che è chiaro il funzionamento dei singoli blocchi si può passare all'analisi dimensionale di tutti i componenti del circuito.

3. DIMENSIONAMENTO DEI COMPONENTI.

3.1. RESISTENZE R_1 ED R_2

Fissando a 1 milli-ampère il valore della corrente che deve attraversare l'integrato LM336 (D_{Z1}), si possono determinare i valori delle resistenze R_1 ed R_2 semplicemente applicando la prima legge di Ohm.

La resistenza complessiva da introdurre nel circuito sarà infatti data dalla formula:

$$R = \frac{V_{CC} - V_{Z1}}{I_{Z1}} = \frac{12V - 2,5V}{1 \cdot 10^{-3} A} \cong 9,5K\Omega$$

Dal momento che il valore calcolato non è un valore commerciale, sono state scelte due resistenze da 18 K Ω , il cui parallelo dà come risultato una resistenza complessiva di 9 K Ω .

$$R = R_1 // R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{324K\Omega}{36K\Omega} = 9K\Omega$$

Adottando tale valore ohmico, la corrente che andrà a circolare sull'LM336 sarà data dalla formula che segue:

$$I_{Z1} = \frac{V_{CC} - V_{Z1}}{R} = \frac{9,5V}{9K\Omega} = 1,055 \cdot 10^{-3} A$$

In conclusione:

- $R_1 = 18 K\Omega$
- $R_2 = 18 K\Omega$

3.2. RESISTENZE R_3 , R_4 E VR_4

Tali resistenze devono essere dimensionate in modo da far sì che l'operazionale U_1 fornisca in uscita la tensione di riferimento pari a 2,732 volt, quando al suo ingresso non invertente ci sono i 2,5 volt imposti dall'LM336.

Il valore dell'amplificazione è dato dal rapporto tra le due suddette tensioni:

$$A_v = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{2,732V}{2,5V} \cong 1,09$$

L'operazionale U_1 è in configurazione non invertente, pertanto il guadagno (oltre che come il rapporto tra le tensioni d'uscita e d'ingresso), può essere definito tramite la seguente formula:

$$A_v = 1 + \frac{R_f}{R_s}$$

che nel nostro caso diventa:

$$A_v = 1 + \frac{R_4 + VR_4}{R_3}$$

Come si può vedere la formula fornisce già un guadagno unitario, perciò il rapporto tra le resistenze deve dare come risultato il «0,09» mancante:

$$A_v = 1 + 0,09 = 1,09$$

In virtù di ciò sono stati scelti un trimmer da 1 K Ω , una resistenza da 470 Ω e una da 10 K Ω . Si ha infatti che:

$$\frac{470\Omega + 430\Omega}{10000\Omega} = 0,09$$

Tarando il trimmer sui 430 Ω (tenendo conto dei possibili scostamenti di R_4 dal valore nominale), si ottiene dunque il «0,09» mancante.

In conclusione:

$$-R_3 = 10 \text{ K}\Omega$$

$$-R_4 = 470 \Omega$$

$$-VR_4 = 1 \text{ K}\Omega$$

3.3. RESISTENZA R_5

La resistenza R_5 deve essere dimensionata in modo tale da far sì che all'ingresso non invertente dell'operazionale U_2 la tensione aumenti di 10 milli-volt ogni qualvolta la temperatura aumenti di 1 °K.

Sapendo che il sensore incrementa di 1 micro-ampère la corrente erogata ogni volta che la temperatura cresce di un 1 °K, il valore della resistenza R_5 può essere calcolato servendosi nuovamente della prima legge di Ohm:

$$R_5 = \frac{V_{R5}}{I_{R5}} = \frac{10mV/^\circ K}{1\mu A/^\circ K} = 10K\Omega$$

In virtù del compito che tale resistenza dovrà assolvere, è opportuno che il suo valore effettivo sia il più vicino possibile al valore nominale. In caso contrario la conversione corrente-tensione sarebbe diversa da quella dimensionata e il circuito potrebbe non funzionare nel modo corretto.

In forza di ciò è stata adottata una resistenza da 10 K Ω a strato metallico, con una tolleranza dell'1%.

In conclusione:

$$-R_5 = 10 K\Omega$$

3.4. RESISTENZE R_6 ED R_7

Le resistenze R_6 ed R_7 hanno dei valori ohmici consigliati direttamente dal costruttore al fine di garantire un corretto funzionamento dell'inseguitore di tensione (operazionale U_2).

In conclusione:

$$-R_6 = 10 K\Omega$$

$$-R_7 = 2,7 K\Omega$$

3.5. RESISTENZE $R_8, R_9, R_{10}, R_{11}, VR_{11}, R_{12}, R_{13}, VR_{13}$

Tali resistenze vengono dimensionate in modo tale che l'amplificatore differenziale (operazionale U_3) abbia guadagno 10.

Nel caso particolare in cui

$$\frac{R_A}{R_B} = \frac{R_C}{R_D}$$

il guadagno è dato dalla seguente formula:

$$A_v = \frac{R_A}{R_B} = \frac{R_C}{R_D}$$

CON $R_A = R_{10} + R_{11} + VR_{11}$

$$R_B = R_8$$

$$R_C = R_{12} + R_{13} + VR_{13}$$

$$R_D = R_9$$

Sostituendo:

$$A_v = \frac{R_{10} + R_{11} + VR_{11}}{R_8} = \frac{R_{12} + R_{13} + VR_{13}}{R_9}$$

Affinchè il guadagno sia pari a 10 basta che nel rapporto, la somma al numeratore sia dieci volte più grande della somma al denominatore.

In conclusione:

- $R_8 = 1 \text{ K}\Omega$
- $R_9 = 1 \text{ K}\Omega$
- $R_{10} = 8,2 \text{ K}\Omega$
- $R_{11} = 1 \text{ K}\Omega$
- $VR_{11} = 1 \text{ K}\Omega$
- $R_{12} = 8,2 \text{ K}\Omega$
- $R_{13} = 1 \text{ K}\Omega$
- $VR_{13} = 1 \text{ K}\Omega$

3.6. CONDENSATORI C_1 E C_2

I condensatori C_1 e C_2 servono per filtrare eventuali segnali rumorosi (es. segnali a radiofrequenza), derivanti da dispositivi o apparecchi posti nelle vicinanze del circuito.

Per il loro dimensionamento non ci si deve attenere a condizioni particolarmente rigide.

Sono stati scelti due condensatori del valore nominale di 10 nano-Farad.

Con l'utilizzo di tali condensatori la costante di tempo associata risulta essere pari a:

$$\tau = R \cdot C = 10\text{K}\Omega \cdot 10\text{nF} = 100 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

La corrispondente frequenza è invece data dalla seguente formula:

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot \tau} = \frac{1}{628,3 \cdot 10^{-6}} \cong 1,6 \text{ KHz}$$

Ciò significa che i segnali di frequenza superiore alla frequenza calcolata vengono filtrati, in quanto sul ramo di retroazione c'è un filtro passa-basso.

In conclusione:

- $C_1 = 10 \text{ nF}$
- $C_2 = 10 \text{ nF}$

3.7. RESISTENZA R_{14} E DIODO ZENER D_{Z1}

Il diodo zener deve limitare la tensione in uscita a un valore il più possibile vicino a 5 volt, anche nei casi in cui la temperatura rilevata dal sensore supera i 50 °C.

A tale scopo è stato scelto un diodo zener del valore nominale di 5,1 volt (che è il più prossimo a 5 volt).

L'unica cosa di cui si deve tenere conto è che il diodo zener comincia a limitare la tensione in uscita all'amplificatore differenziale prima che essa raggiunga il valore di 5,1 volt e la causa di ciò ha fondamento sulla natura stessa del diodo zener.

In ogni caso, il fatto che il diodo entri in funzione con un leggero anticipo fa sì che a fondo scala non ci sia più una perfetta proporzionalità tra tensione e temperatura rilevata.

Più precisamente, a una temperatura di 50 °C la tensione in uscita all'intero circuito è pari a circa 4,7 volt (tensione corrispondente a una temperatura di 47 °C).

Per sintetizzare:

$$\begin{aligned} T = 50^\circ\text{C} &\Rightarrow V = 5\text{V} \\ T = 47^\circ\text{C} &\Rightarrow V = 4,7\text{V} \end{aligned}$$

Ciò significa che, limitatamente a fondo scala, ho un errore di misura di circa 3 °C.

In conclusione, si nota che il suddetto errore di misura interessa una parte molto ridotta della scala di valori complessiva. Oltretutto rimane abbastanza improbabile che la temperatura interna ad una stanza raggiunga valori tanto elevati.

In virtù di tali motivi non è ragionevole utilizzare un componente con tensione di zener più alta (il valore di tale tensione si scosterebbe troppo dal valore imposto nelle specifiche di progetto), nè tantomeno progettare

un limitatore di precisione (si complicherebbe inutilmente il circuito).
Per quanto riguarda la resistenza R_{14} , essa deve avere un valore tale da non produrre una grande caduta di tensione e da far sì che la corrente non carichi eccessivamente l'amplificatore differenziale che la precede.
In base a questi motivi è stata scelta una resistenza del valore nominale di 100Ω .

In conclusione:

- $D_{Z2} = 5,1 \text{ V}$
- $R_{14} = 100 \Omega$

Detto questo, il dimensionamento dei componenti può ritenersi concluso.

4. DISTINTE.

4.1. DISTINTA MAGAZZINO

NUMERO	DESCRIZIONE	CARATTERISTICHE
2	RESISTORE	18 K Ω \pm 5% - 0,25 W
2	RESISTORE	10 K Ω \pm 5% - 0,25 W
1	RESISTORE	10 K Ω \pm 1% - 0,25 W
1	RESISTORE	470 Ω \pm 5 % - 0,25 W
1	RESISTORE	2,7 K Ω \pm 5% - 0,25 W
4	RESISTORE	1 K Ω \pm 5% - 0,25 W
2	RESISTORE	8,2 K Ω \pm 5% - 0,25 W
1	RESISTORE	100 Ω \pm 5% - 0,25 W
3	TRIMMER	1 K Ω - multigiro
2	CONDENSATORE	1 nF
1	DIODO ZENER	5,1 V - 0,25 W
4	OPERAZIONALE	CA3140
1	INTEGRATO	LM336 - 2,5 V
1	CONNETTORE	6 piedini
1	CONNETTORE	2 piedini
4	ZOCCOLETTI	8 piedini dil x CA3140

Tabella 1. Distinta magazzino.

4.2. DISTINTA ASSEMBLAGGIO

RIFERIMENTO	DESCRIZIONE	CARATTERISTICHE
R ₁	RESISTORE	18 K Ω \pm 5% - 0,25 W
R ₂	RESISTORE	18 K Ω \pm 5% - 0,25 W
R ₃	RESISTORE	10 K Ω \pm 5% - 0,25 W
R ₄	RESISTORE	470 Ω \pm 5 % - 0,25 W
R ₅	RESISTORE	10 K Ω \pm 1% - 0,25 W
R ₆	RESISTORE	10 K Ω \pm 5% - 0,25 W
R ₇	RESISTORE	2,7 K Ω \pm 5% - 0,25 W
R ₈	RESISTORE	1 K Ω \pm 5% - 0,25 W
R ₉	RESISTORE	1 K Ω \pm 5% - 0,25 W
R ₁₀	RESISTORE	8,2 K Ω \pm 5% - 0,25 W
R ₁₁	RESISTORE	1 K Ω \pm 5% - 0,25 W
R ₁₂	RESISTORE	8,2 K Ω \pm 5% - 0,25 W
R ₁₃	RESISTORE	1 K Ω \pm 5% - 0,25 W
R ₁₄	RESISTORE	100 Ω \pm 5% - 0,25 W
VR ₄	TRIMMER	1 K Ω - multigiro
VR ₁₁	TRIMMER	1 K Ω - multigiro
VR ₁₃	TRIMMER	1 K Ω - multigiro
C ₁	CONDENSATORE	1 nF
C ₂	CONDENSATORE	1 nF
D _{Z2}	DIODO ZENER	5,1 V - 0,25 W
U ₁	OPERAZIONALE	CA3140
U ₂	OPERAZIONALE	CA3140
U ₃	OPERAZIONALE	CA3140
U ₄	OPERAZIONALE	CA3140
D _{Z1}	INTEGRATO	LM336 - 2,5 V
J ₁	CONNETTORE	6 piedini
J ₂	CONNETTORE	2 piedini
/	ZOCCOLETTI	8 piedini dil x CA3140

Tabella 2. Distinta assemblaggio.

5. NOTE DI COLLAUDO.

5.1. COLLAUDO E MISURE FINALI

Terminata la progettazione del circuito e il dimensionamento dei componenti che lo compongono si è proceduto con un'operazione di collaudo, atta a verificare il comportamento del termometro entro il range di temperature misurabili.

Il circuito è stato dapprima montato su una breadboard e ne è stato studiato il comportamento senza il sensore, fornendo direttamente all'ingresso dell'operazionale U_2 la tensione desiderata.

Una volta constatato l'esito positivo di questa prima prova si è proceduto con la produzione del circuito stampato, sul quale sono successivamente stati saldati i componenti; è infatti sulla basetta che si effettuano la taratura del termometro e le misure finali, utili per giudicare più o meno lineare l'andamento della caratteristica d'uscita.

Per quanto riguarda l'operazione di taratura ci si è serviti di un calorimetro, di un termometro al mercurio e di un fornellino.

Riempito con dell'acqua il serbatoio del calorimetro, abbiamo immerso in essa il bulbo del termometro al mercurio e la testa del sensore, collegando opportunamente quest'ultimo alla basetta. Onde evitare pericolose infiltrazioni il sensore è stato opportunamente isolato.

Dopo aver permesso al termometro al mercurio di stabilizzarsi sul valore da esso rilevato, si è visto che la temperatura dell'acqua era pari a 18 °C.

Il sensore, immerso nella medesima acqua, avrebbe dovuto rilevare una temperatura identica e quindi all'uscita del circuito si avrebbe dovuto avere la tensione corrispondente, pari a 1,8 volt.

Tale valore è facilmente ricavabile dalla seguente proporzione:

$$50 \text{ °C} : 5 \text{ V} = 18 \text{ °C} : X$$

da cui

$$X = 1,8 \text{ V}$$

Dopo una opportuna regolazione dei trimmer presenti sui rami dell'amplificatore differenziale, all'uscita del circuito si è riscontrata proprio una tensione pari a 1,8 volt.

Ovviamente, affinché il circuito si possa definire tarato, occorre che questa relazione tra tensione e temperatura sia verificata per tutto il range di lavoro; solo dopo si potrà considerare lineare il comportamento della caratteristica d'uscita.

In virtù di quanto detto si sono effettuate altre due misure riscaldando l'acqua prima fino a 31 °C, poi fino a 43 °C ed il circuito ha risposto correttamente in ambo i casi.

L'esiguità del numero di misure effettuate è da imputarsi alle caratteristiche proprie dell'operazione di taratura, alquanto onerosa in termini di tempo.

Nella tabella che segue sono schematicamente riproposti i risultati delle misure effettuate.

TEMPERATURA [°C]	TENSIONE [V]
18	1,8
31	3,1
43	4,3

Tabella 3. Misure effettuate.

Detto questo, il collaudo del circuito può considerarsi positivamente concluso, in quanto le considerazioni finora effettuate dimostrano che il termometro per locali progettato è in grado di funzionare correttamente nel range di temperatura compreso tra gli 0 °C e i 50 °C, come espressamente richiesto nelle specifiche di progetto.