

Sensori

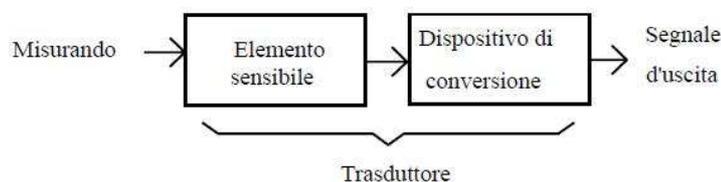
4.1 Introduzione

Il compito principale di un sistema di misura è quello di associare ad una determinata grandezza fisica un valore numerico che ne rappresenta alcune sue caratteristiche. Il primo elemento del sistema di misura è un elemento *sensibile* alla grandezza fisica in esame. Il suo compito consiste nel trasformare la grandezza oggetto della misurazione (misurando) in un'altra grandezza fisica, più adatta all'elaborazione che deve essere effettuata dal sistema successivo. Nei sistemi di misura il misurando spesso è convertito in una grandezza fisica di specie diversa.

Poiché il condizionamento e l'elaborazione dei segnali elettrici offrono numerosi vantaggi, grazie anche alla disponibilità di numerosi dispositivi e strumenti elettronici, si cerca di impiegare queste tecniche anche quando al misurando non è direttamente associata nessuna grandezza elettrica.

Nella maggior parte dei casi sarà quindi necessario convertire la natura del misurando, associando ad esso una grandezza elettrica equivalente, utilizzando un dispositivo detto trasduttore. Il *trasduttore* può essere definito come un dispositivo che riceve in ingresso una certa grandezza fisica e fornisce in uscita una grandezza fisica diversa. Esso opera essenzialmente una conversione di energia da una forma in un'altra (fisico-elettronico nel nostro caso), mantenendo invariato il contenuto informativo associato all'energia iniziale durante la trasformazione.

In base a quanto precedentemente esposto, per operare la conversione, un trasduttore ha bisogno di un elemento *sensibile* detto *sensore*, e di un dispositivo di conversione.



Il termine sensore indica il solo elemento sensibile (il materiale che modifica le sue caratteristiche in base ai fenomeni fisici che lo circondano), mentre il termine trasduttore indica l'elemento sensibile unitamente al dispositivo di conversione (insieme al sensore ci sono altri componenti elettronici che ne modificano la caratteristica).

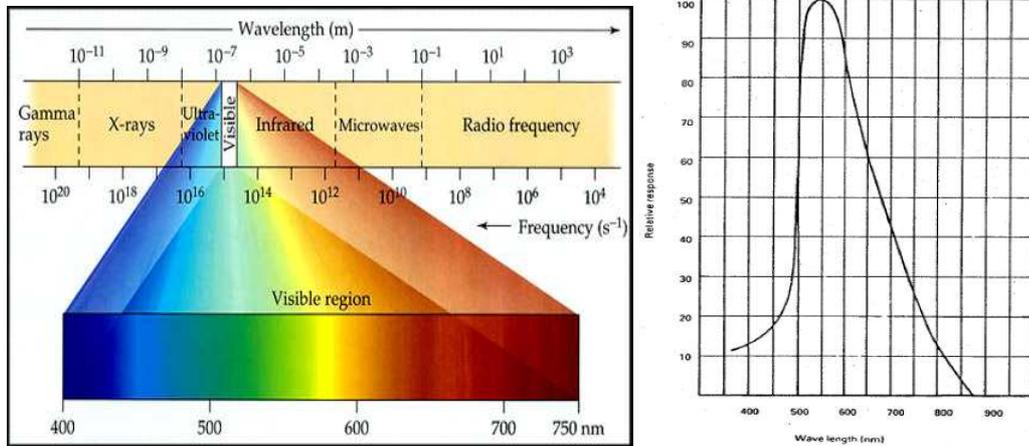
Nell'uso corrente spesso i termini sensore e trasduttore sono utilizzati con lo stesso significato, mentre altre volte con significato diverso. In generale il termine sensore è più diffusamente utilizzato negli USA, mentre il termine trasduttore è più diffuso in Europa.

Ci sono vari tipi di sensori (**resistivi**, **capacitivi**, **induttivi**, **fotovoltaici**, ecc) nel commercio. Io ho scelto di adoperare quello di tipo resistivo come il **NORP-12** della **Silonex** che modifica la sua resistenza in base alla quantità di luce assorbita, e quello a semiconduttore **LM35** della **National Semiconductor** che fornisce una tensione proporzionale alla temperatura ambientale.

4.2 Trasduttore fotoelettrico

Le radiazioni luminose aventi lunghezza d'onda compresa nello **spettro della luce** visibile modifica le proprietà elettriche di alcune sostanze. I fotoresistori sono costituiti da materiali

semiconduttori drogati (**solfo di cadmio, solfo di piombo, silicio**). Quando i materiali a semiconduttori vengono colpiti dalla radiazione luminosa la loro conducibilità aumenta. Il fotone che colpisce la superficie rompe un legame covalente, generando una coppia **elettrone-lacuna**. Questo può avvenire solo se il fotone possiede un'energia tale da far passare l'elettrone dalla banda di valenza alla banda di conduzione.



La variazione della resistenza con l'illuminamento segue la seguente legge:

$$R = A * E^{-\alpha}$$

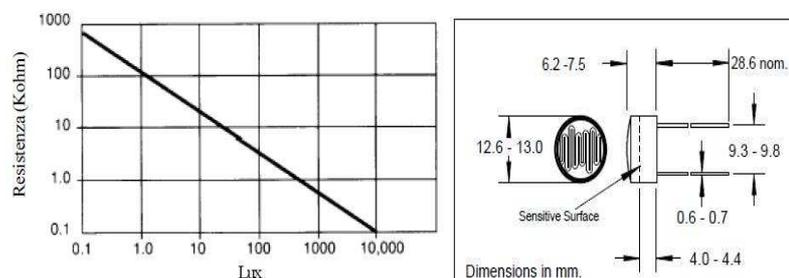
- **A** è la costante dimensionale che dipende dalla forma fisica del sensore ($1,3 * 10^5 / \text{lux}$).
- **E** è l'illuminamento (flusso luminoso incidente sulla superficie unitaria).
- **α** è la costante adimensionale minore di 1 che dipendono dalla tecnologia usata per costruire il fotoresistore ($\alpha = 0,908$).

Pregi e difetti delle fotoresistenze:

Pregi : Sono robuste, economiche e hanno un'elevata sensibilità : la loro resistenza varia da oltre un $1M\Omega$ in oscurità a poche decine di Ω a 1000 lux.

Difetti: hanno una limitata banda passante, infatti, una fotoresistenza può impiegare tempi nell'ordine del secondo per ritornare al valore di oscurità ($200K\Omega/s$). Il rapporto resistenza/Illuminamento appare lineare in scala log-log ($\text{Log}R = -\alpha \text{Log}L + \text{Log}k$ con α costante positiva, e k costante resistiva a 1 lux).

Il sensore preso in considerazione (**NORP-12 della Silonex**) ha una caratteristica non lineare con pendenza negativa, una bassa accuratezza e tempi di risposta lenti.

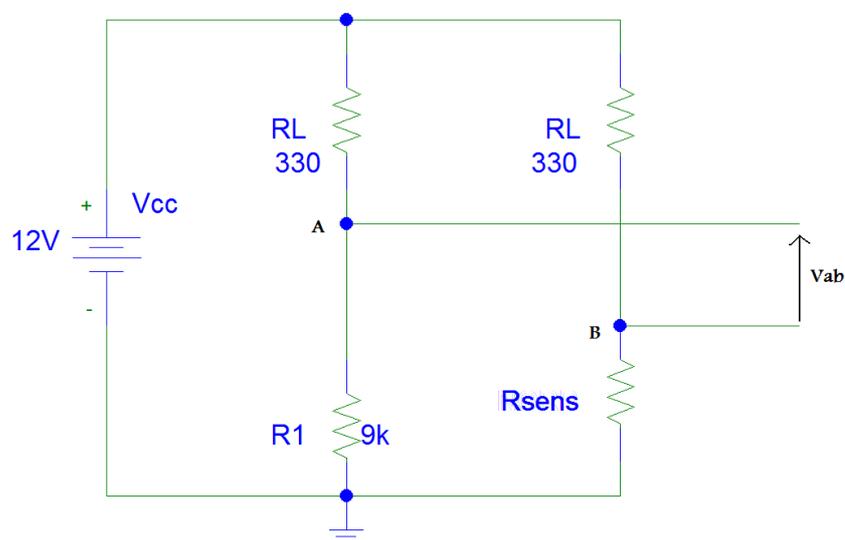


Caratteristiche elettriche della fotoresistenza NORP12:

Caratteristiche elettriche	Valore	Unità misura
Resistenza oscurità	1	MΩ
Resistenza a 10 lux	9	KΩ
Resistenza a 1000 lux	400	Ω
Tensione max di picco(AC DC)	320	V
Corrente max	75	mA
Potenza max (a 25 °C)	250	mW
Range temperatura	-60/+75	°C
Capacità di oscurità	3,6	pF
Reazione spettrale di picco	0,53	μm

Per modificare la curva caratteristica del sensore ho inserito il sensore all'interno del ponte di **Wheatstone** che consente di misurare una resistenza con grande precisione.

Il circuito seguente realizza la conversione resistenza-tensione :



Quando si dimensiona i componenti si suppone che nella condizione di funzionamento più gravosa ,corrispondente ad un illuminamento di 1000lux($R_{sens}=400\Omega$), il fotoresistore è attraversato da una corrente minore di 75mA.Con una tensione di 12V la I del ponte e uguale a:

$$I_{max} = \frac{V_{cc}}{R_{sens}(1000lux)+R_l} = \frac{12}{400+330} = 16,43mA$$

$$I_{min} = \frac{V_{cc}}{R_{sens}(10lux)+R_l} = \frac{12}{9000+330} = 1,29mA$$

La resistenza di bilanciamento R1 è stata dimensionata per avere una $V_{ab}=0$ in corrispondenza di 10lux. L'equilibrio è dato dalla formula $R1 \times Rl = R_{sens} \times Rl \gg R1 = R_{sens}$ (10lux)=9K.

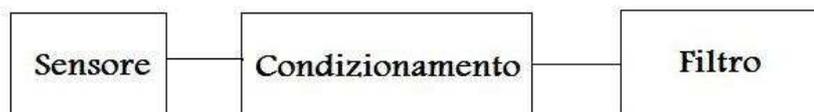
Per ricavare la tensione di uscita si utilizza la formula:

$$V_{ab} = \left[\frac{R1}{R1 + Rl} \right] - \left[\frac{R_{sens}}{R_{sens} + Rl} \right] \times V_{cc}$$

Luminosità(lux)	Rsens (Ω)	Vab (V)
10	9000	0
50	6000	0.2
100	3000	0,7
500	1000	2.55
700	600	3.8
1000	400	5

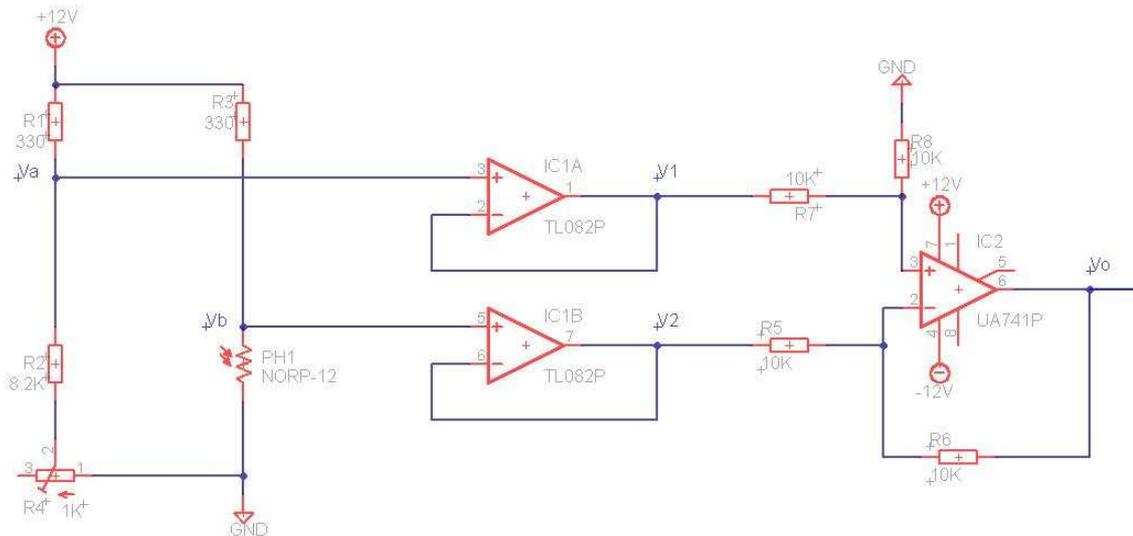
4.3 Progetto

Per acquisire la quantità di luce presente nell'ambiente ho pensato di realizzare un circuito di condizionamento capace di offrire in uscita una tensione variabile linearmente compresa tra **0V** e **5V** quando l'illuminamento varia nell'intervallo **10-1000 lux**.

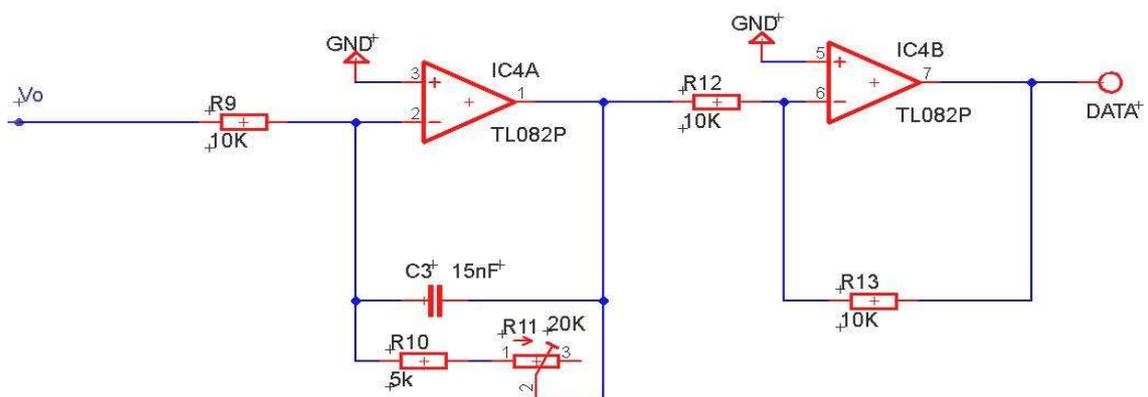


Circuito condizionamento

Per fare in modo di avere l'uscita variabile tra 0-5 V ho usato un amplificatore operazionale in configurazione differenziale. L'uscita V_o è data dalla formula $V_o = (R6/R5) \cdot (V1 - V2)$. Visto che la differenza delle due tensioni fornite dal ponte ha una tensione compresa tra 0-5 V non ha bisogno di essere amplificato, quindi $R6 = R5$. L'inseguitore di tensione o **Voltage Follower** inserito tra ponte di Wheatstone e l'amplificatore differenziale presenta la particolarità di possedere una resistenza di ingresso teoricamente infinita, una di uscita teoricamente nulla e un guadagno di tensione unitario. Questo circuito è capace di trasferire la tensione di ingresso in uscita senza variarla quindi fa in modo che l'amplificatore non senta l'effetto del carico generato dal ponte.



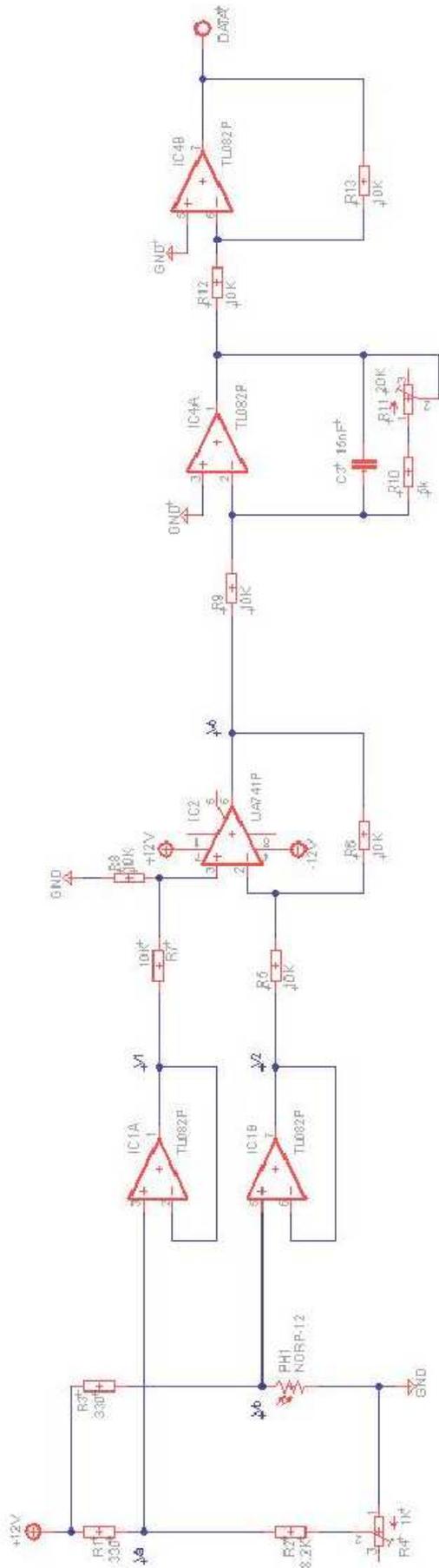
Circuito filtro segnale:



Filtro Passa Basso

Scopo del filtro è l'eliminazione di una parte dello **spettro del segnale**, lasciandone inalterata la porzione restante. Un filtro ideale non dovrebbe attenuare le frequenze desiderate, mentre l'attenuazione dovrebbe essere infinita per quelle indesiderate. I filtri possono essere realizzati con circuiti elettrici **attivi o passivi**: i filtri passivi sono circuiti composti da **resistenze, induttanze e capacità** e a causa della presenza dell'induttanza, risultano spesso ingombranti e vengono, quindi, usati laddove le potenze in gioco sono elevate oppure ad alte frequenze. Per eliminare i disturbi ad alte frequenze che sono generate da elementi esterni alla scheda come ad esempio il neon, telefonino cellulare e una miriade di altri tipi di dispositivi elettronici che noi usiamo ho scelto di utilizzare un **filtro passa basso attivo** utilizzando gli amplificatori operazionali. Quello più semplice anche se poco selettivo è il filtro passa basso di primo ordine utilizzando un amplificatore in configurazione invertente.

Circuito finale:



└ Ponte Wheatstone

└ Inseguitore tensione

└ Amplificatore Differenziale

└ Filtro Passa Basso

Part	Value	Package	Library	Position (inch)	Orientation
C3	15nF	C050-025X07s	resistor	(4.65 1.75)	R270
IC1	TL082P	DII08	linear	(2.2 1.75)	R0
IC2	UA741E	DII08	linear	(3.4 1.75)	R0
IC4	TL082P	DII08	linear	(5 1.75)	R0
PH1	NORP-12	V1400	photo-elements	(1.2 1.75)	R270
R1	330	0207/10	resistor	(1.85 1.75)	R90
R2	8.2K	0207/10	resistor	(2.2 1.4)	R0
R3	330	0207/10	resistor	(1.65 1.75)	R90
R4	1K	R1R1M54W	resistor	(2.2 1.2)	R90
R5	10K	0207/10	resistor	(3.05 1.75)	R270
R6	10K	0207/10	resistor	(3.85 1.75)	R90
R7	10K	0207/10	resistor	(2.55 1.75)	R270
R8	10K	0207/10	resistor	(2.8 1.75)	R90
R9	10K	0207/10	resistor	(4.15 1.75)	R270
R10	5k	0207/10	resistor	(5 1.4)	R0
R11	20K	R1R1M54W	resistor	(5 1.2)	R90
R12	10K	0207/10	resistor	(4.45 1.75)	R90
R13	10K	0207/10	resistor	(5 2.1)	R180
X1		AK300/4	Conn-Ptcs90	(5.95 1.75)	R90

4.4 Trasduttore termico

Sensori e trasduttori occupano un ruolo di primaria importanza in vasti settori dell'elettronica. Con tipologie e caratteristiche assai diversificate vengono utilizzati nel campo dell'**automazione industriale** e del **controllo del processo**, nel **settore automobilistico** e **consumer**, per **misurazioni di laboratorio** e **applicazioni biomedicale**. Tra i sensori più diffusi ci sono sicuramente quelli di **temperatura** (25% del mercato mondiale dei sensori) in quanto la misura e il controllo della temperatura è un'operazione molto frequente sia nell'ambito dei processi industriali che nell'ambito di applicazioni più comuni.

La temperatura è una **grandezza scalare** rappresentativa dello stato termico di un corpo ossia della sua capacità di trasferire calore ad altri corpi. L'unità di misura della temperatura nel **Sistema Internazionale** è il **Kelvin (°K)**. Storicamente il fenomeno fisico sfruttato maggiormente per la misurazione della temperatura è stato quello della dilatazione. In ambito industriale le specifiche tecniche hanno portato allo sfruttamento di altri fenomeni fisici. Nel caso di **misura a contatto**, si rilevano sia le variazioni di resistenza elettrica di materiali conduttori e semiconduttori sia fenomeni termoelettrici (effetto Seebeck). Nel caso di misurazioni **senza contatto** si ricorre, invece, alla misura dell'**energia radiante**.

Il modo di misurare la temperatura (con o senza contatto) si riflette sulla struttura del sensore. Innanzitutto la misura della temperatura comporta sempre un trasferimento di calore dal misurando al sensore. In caso di sensori a contatto il meccanismo di trasferimento sfruttato è quello della conduzione; la legge che regola lo scambio termico è:

$$\frac{dQ}{dt} = \sigma \cdot A \cdot (T_0 - T)$$

Dove:

$\frac{dQ}{dt}$ è la potenza termica [Watt];

T_0 è la temperatura da misurare dell'oggetto [Kelvin];

T è la temperatura del sensore [Kelvin];

σ è la conducibilità termica dell'interfaccia oggetto-sensore (dipende dalla superficie

che separa i due corpi a contatto) $\left[\frac{\text{Watt}}{\text{m}^2 \cdot \text{°K}} \right]$;

A è la superficie di contatto [m^2].

L'inserimento del sensore comporterà sempre una perturbazione delle condizioni di misura iniziali, in quanto si estrarrà una certa quantità di calore dal processo controllato; pertanto, ad un sensore che opera per conduzione termica, saranno richieste un'elevata conducibilità termica (elevata velocità di trasferimento di calore) ed un basso calore specifico (limitato assorbimento di calore).

Caratteristiche di un sensore di temperatura

La scelta di un sensore di temperatura deve essere vagliata con la massima cura: è necessario conoscere tutti i dati relativi alle condizioni ambientali in cui esso dovrà operare, i valori di temperatura che dovrà rilevare, la precisione che dovrà mantenere nel corso del suo esercizio. In definitiva le caratteristiche su cui si deve focalizzare l'attenzione per decidere quale tipo di sensore di temperatura utilizzare sono:

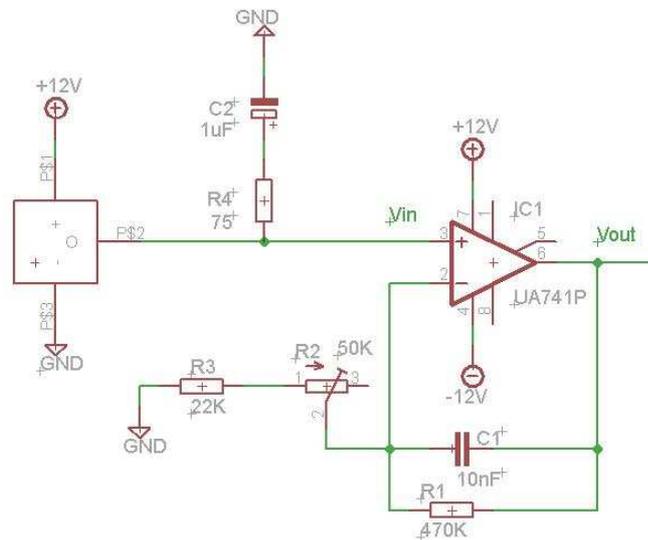
4.5 Progetto

Per acquisire la temperatura ambientale ho pensato di realizzare un circuito di condizionamento del **senso** LM35 capace di offrire una tensione variabile linearmente compresa tra **0V** e **5V** quando la temperatura varia nell'intervallo **0-50 °C**.

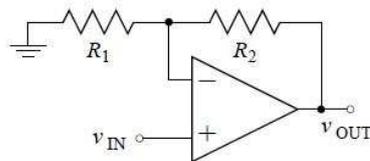


Condizionamento

Per fare in modo di avere una tensione compresa tra 0V e 5V quando temperatura varia nell'intervallo 0-50°C ho usato l'amplificatore operazionale in configurazione non invertente in grado di amplificare quasi 10 volte il valore ricevuto in ingresso.



L'uscita dell'amplificatore non invertente è data dalla formula:



$$V^- = V^+ = v_{IN} \quad e \quad I^- = I^+ = 0$$

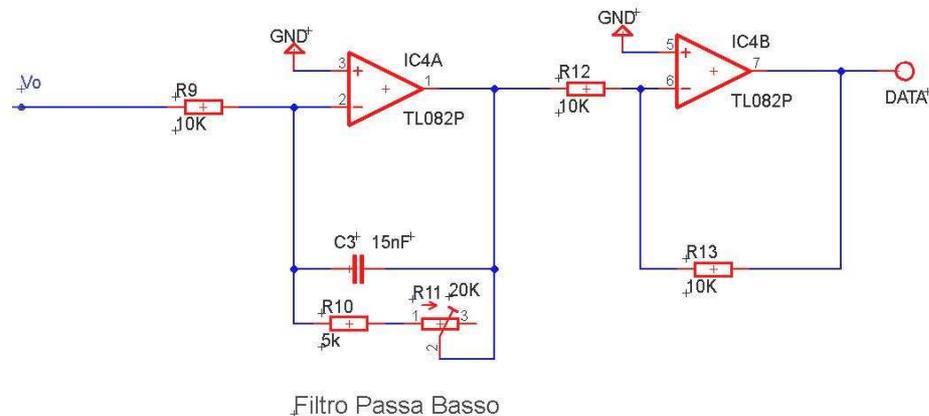
$$\frac{-v_{IN}}{R_1} = \frac{v_{IN} - v_{OUT}}{R_2} \rightarrow v_{OUT} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_{IN}$$

$$V_{out}(0^\circ\text{C}) = \left(1 + \frac{R_1}{R_s + R_3}\right) \times V_{in} \gg \left(1 + \frac{470}{52.25}\right) \times 0 = 0V$$

$$V_{out}(50^\circ\text{C}) = \left(1 + \frac{R_1}{R_s + R_3}\right) \times V_{in} \gg \left(1 + \frac{470}{52.25}\right) \times 0.5 = 5V$$

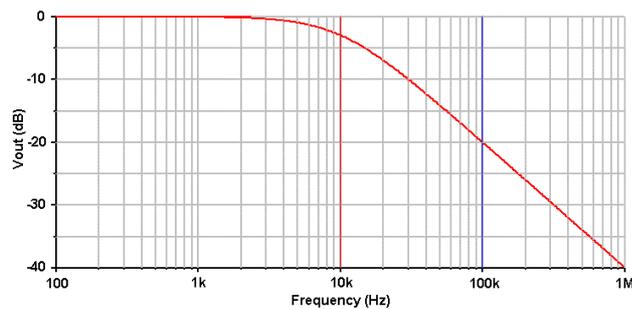
V_{in} si ricava con la formula $V_{in} = 10 \times 10^{-3} \times \text{temperatura } (^{\circ}\text{C})$. Quindi a 0°C la tensione fornita dal sensore è uguale a 0V , mentre a 50°C la tensione è di 0.5V ($V_{in} = 10 \times 10^{-3} \times 50$).

Circuito filtro segnale:



Il filtro è stato pensato per tagliare tutte le frequenze che superano i 10kHz . La funzione di trasferimento è uguale a $G(s) = \left[-\frac{R_{10}+R_{11}}{R_9} \right] \times \left[\frac{1}{1+s(R_{10}+R_{11}) \times C_3} \right]$ con una frequenza di taglio

$f_t = \frac{1}{2\pi \times (R_{10}+R_{11}) \times C_3}$. Mettendo $R_9 = R_{10}+R_{11}$ non si ha alcun guadagno, quindi il segnale presente in ingresso viene filtrato senza essere amplificato. Ho dovuto mettere un trimmer in serie alla resistenza di retroazione negativa per amplificare di quel poco per consentirmi di compensare il segnale perso. Visto che un filtro passa basso di un amplificatore a configurazione invertente rende in uscita una **tensione negativa** ho dovuto inserire in serie un altro amplificatore in configurazione invertente per avere una tensione positiva $V_{data} = \left(-\frac{R_{13}}{R_{12}} \right) \times (-V_{filtro}) = +V_{data}$ con $R_{13} = R_{12}$.

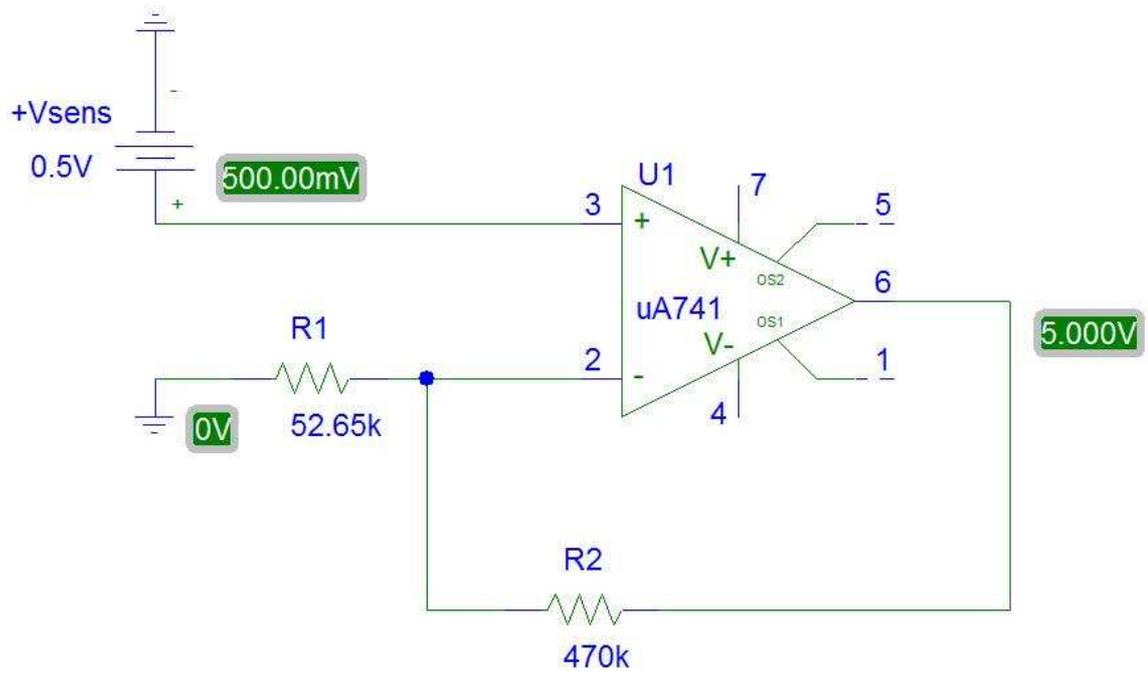


$$10\text{kHz} = \frac{1}{2\pi \times (R_{10} + R_{11}) \times C_3} \gg 10\text{kHz} = \frac{1}{2\pi \times (10\text{k}\Omega) \times C_3} \gg C_3 = 15\text{nF}$$

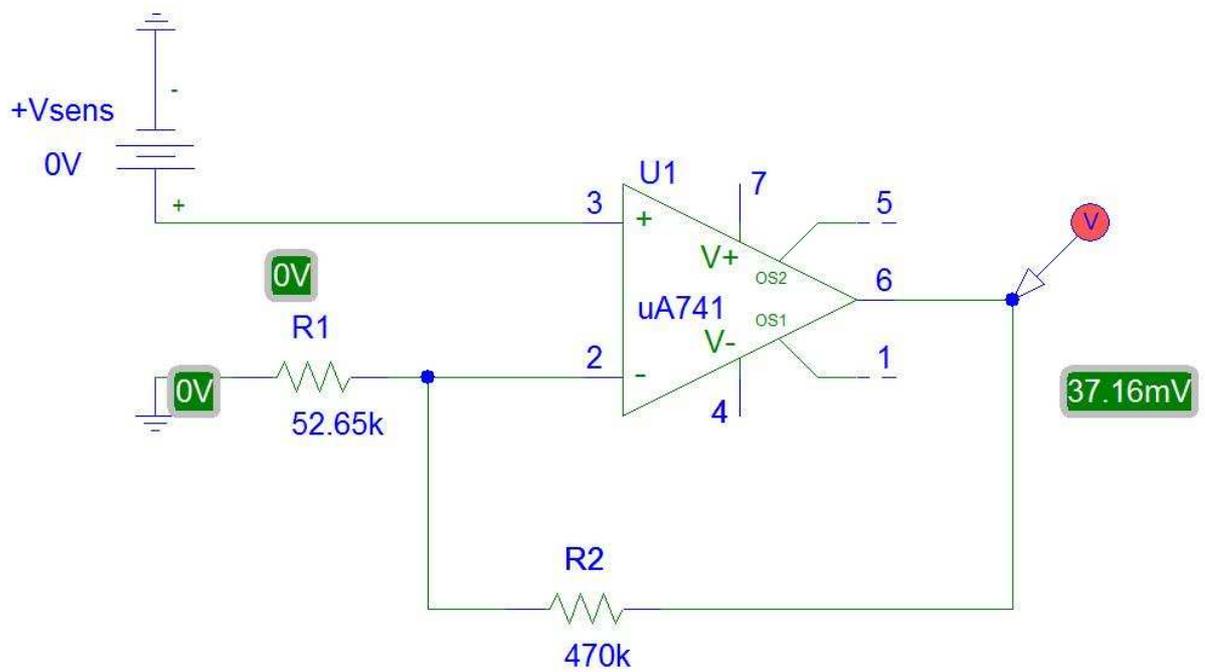
Simulazione circuito con Pspice:

Per simulare il sensore di temperatura ho fatto variare V_{sens} impostando il valore del generatore di tensione a 0V quando la temperatura si trovava a 0°C e 0.5V a 50°C . Ho notato che i valori dell'uscita corrispondono ai miei calcoli effettuati in precedenza anche se non perfettamente, dovuto al fatto che non ho regolato l'offset degli integrati ua741.

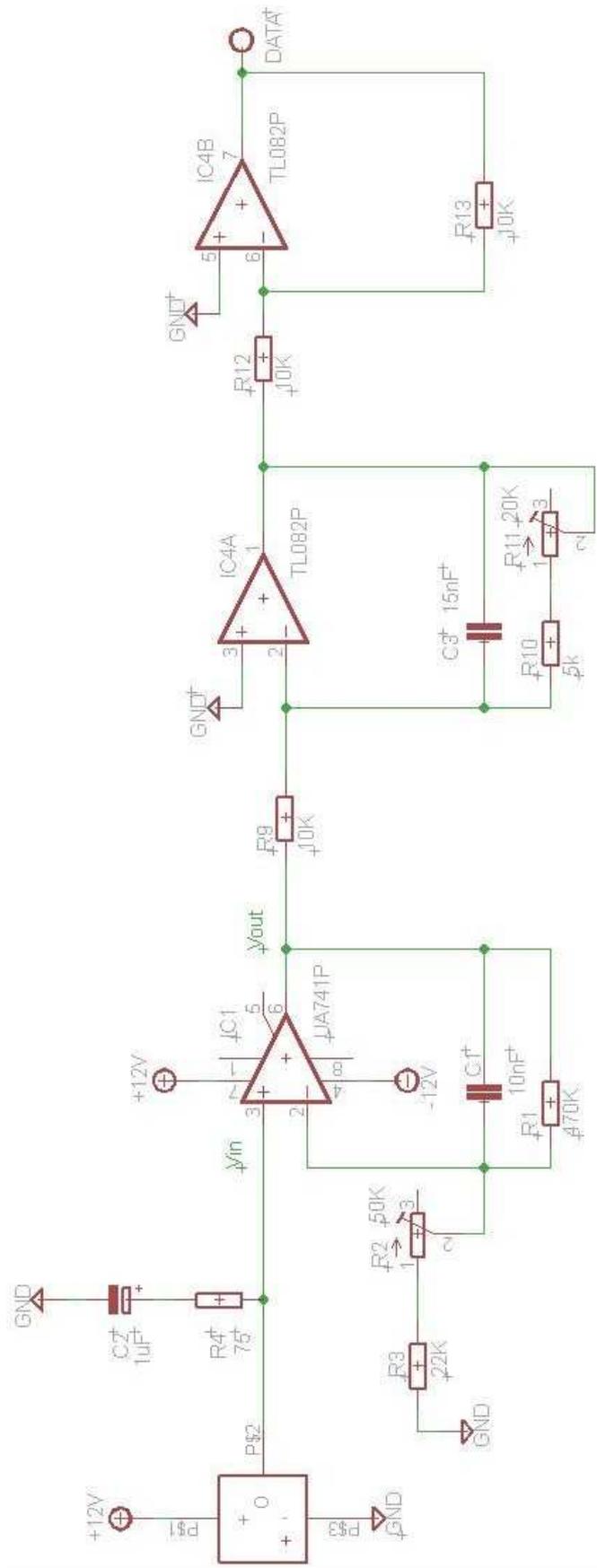
50°C



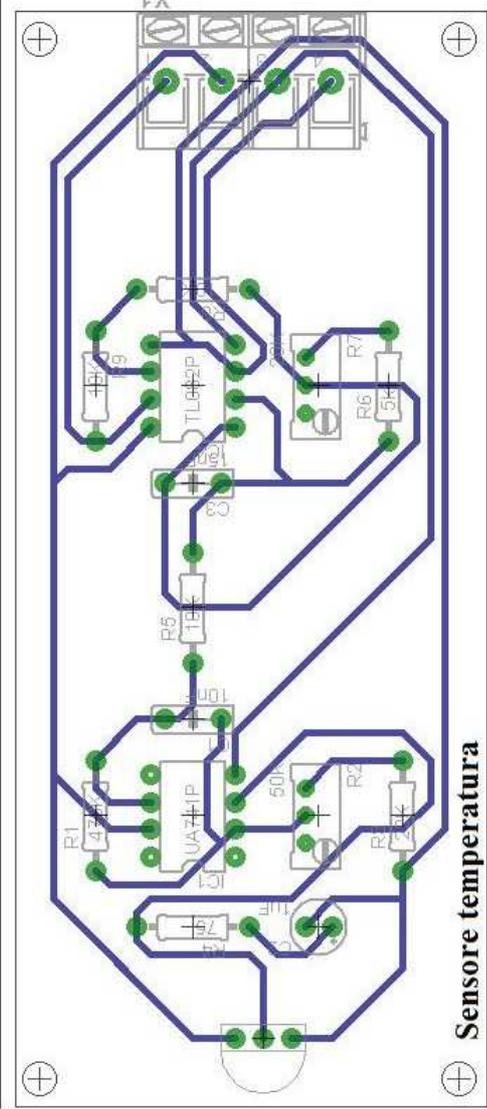
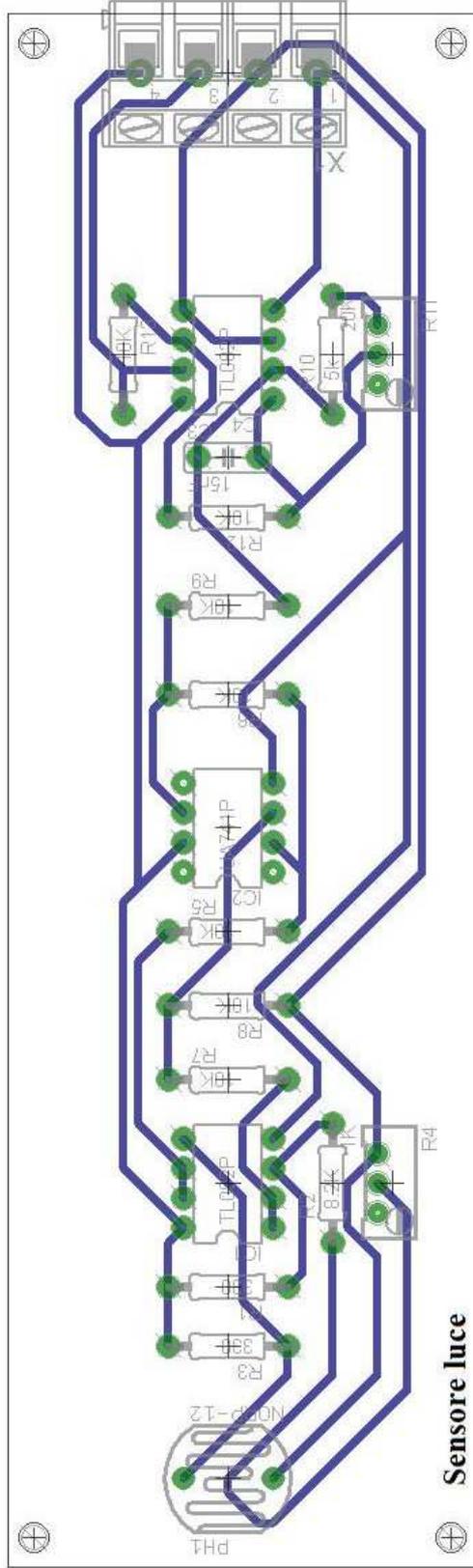
0°C



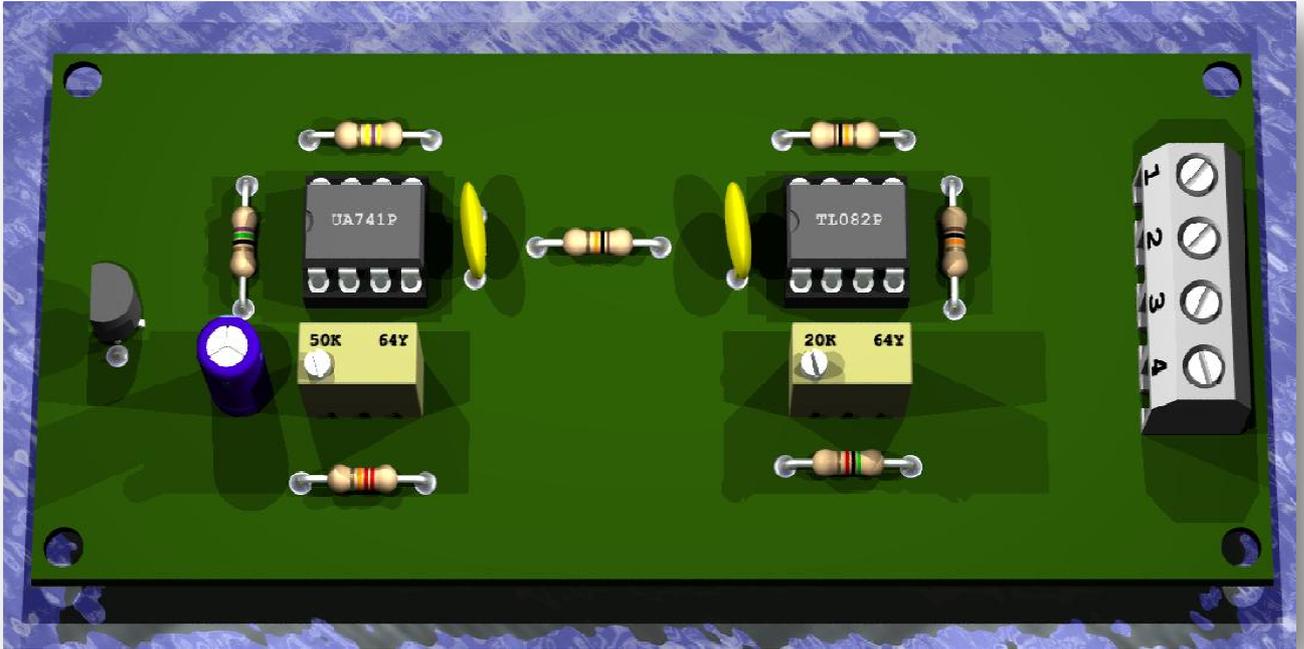
Circuito finale



Part	Value	Device	Package	Library	Sheet
C1	10nF	C-EU050-025X075	C050-025X075	resistor	1
C2	1uF	CP01-EUE2.5-5	E2,5-5	resistor	1
C3	15nF	C-EU050-025X075	C050-025X075	resistor	1
IC1	UA741P	UA741P	DIL08	linear	1
IC4	TL082P	TL082P	DIL08	linear	1
LM35	LM35	LM35	LM35A	ic-package	1
R1	470K	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1
R2	50K	R-TRIM64W	RTRIM64W	resistor	1
R3	22K	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1
R4	75	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1
R9	10K	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1
R10	5k	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1
R11	20K	R-TRIM64W	RTRIM64W	resistor	1
R12	10K	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1
R13	10K	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1
X1		AK300/4	AK300/4	con-ptr500	1



Sensore temperatura



Sensore luce

