



ISTITUTO TECNICO TECNOLOGICO MARCONI

Percorso di Alta Formazione Professionale per  
TECNICO SUPERIORE PER L'AUTOMAZIONE  
ED I SISTEMI MECCATRONICI

ELABORATO FINALE

# SCHEMA PER IL CONTROLLO TEMPERATURA DI UN FORNO PER LA SALDATURA DI COMPONENTI SMD

Relatore:  
Davide Ambrosio

Correlatore:  
Patrick Todesco

Diplomando:  
**Aris Tomaselli**

Matricola: **AI/0209/2021**

**Edizione 2020-2021**



# SOMMARIO

<b>ABSTRACT .....</b>	<b>5</b>
<b>FEATURE .....</b>	<b>5</b>
<b>Output .....</b>	<b>5</b>
<b>Interfacce .....</b>	<b>5</b>
<b>Altro .....</b>	<b>5</b>
<b>ALIMENTAZIONE .....</b>	<b>6</b>
<b>ALIMENTAZIONE PRINCIPALE .....</b>	<b>6</b>
<b>Fusibile .....</b>	<b>6</b>
<b>Varistore .....</b>	<b>7</b>
<b>NTC .....</b>	<b>7</b>
<b>BASSA TENSIONE .....</b>	<b>8</b>
<b>MICROCONTROLLORE .....</b>	<b>9</b>
<b>PANORAMICA .....</b>	<b>9</b>
<b>OSCILLATORE .....</b>	<b>9</b>
<b>PROGRAMMAZIONE .....</b>	<b>10</b>
<b>SENSORISTICA .....</b>	<b>11</b>
<b>RILEVATORE ZERO-CROSSING .....</b>	<b>11</b>
<b>SENSORI DI CORRENTE E TENSIONE .....</b>	<b>13</b>
<b>Corrente .....</b>	<b>13</b>
<b>Tensione .....</b>	<b>14</b>
<b>SENSORI DI TEMPERATURA .....</b>	<b>16</b>
<b>Termocoppie .....</b>	<b>16</b>
<b>NTC .....</b>	<b>16</b>
<b>OUTPUT .....</b>	<b>17</b>
<b>ATTUAZIONE SSR .....</b>	<b>17</b>
<b>ATTUAZIONE VENTOLA .....</b>	<b>17</b>
<b>INTERFACCE .....</b>	<b>19</b>
<b>USB SERIALE .....</b>	<b>19</b>
<b>RS-485 .....</b>	<b>19</b>
<b>USER BOARD .....</b>	<b>20</b>

## **LISTA FIGURE**

<i>Figure 1: schema alimentazione .....</i>	<i>6</i>
<i>Figure 2: 3D render della scheda .....</i>	<i>7</i>
<i>Figure 3: schema convertitore DC-DC .....</i>	<i>8</i>
<i>Figure 4: schema filtraggio alimentazioni .....</i>	<i>8</i>
<i>Figure 5: schema microcontrollore .....</i>	<i>9</i>
<i>Figure 6: schema oscillatore MCU .....</i>	<i>9</i>
<i>Figure 7: connettore di programmazione .....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 8: circuito zero-crossing .....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 9: simulazione ZC .....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 10: forme d'onda ZC simulato .....</i>	<i>12</i>
<i>Figure 11: schema sensori di rete .....</i>	<i>13</i>
<i>Figure 12: filtro simulato .....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 13: digramma di Bode stadio simulato .....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 14: amplificatore termocoppia .....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 15: circuito NTC .....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 16: schema attuazione SSR .....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 17: schema attuazione ventola .....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 18: schema convertitore USB-seriale .....</i>	<i>19</i>
<i>Figure 19: schema transceiver 485 .....</i>	<i>19</i>
<i>Figure 20: 3D render scheda pulsanti .....</i>	<i>20</i>
<i>Figure 21: 3D render scheda display .....</i>	<i>20</i>

## ***ABSTRACT***

Il progetto mira a convertire un vecchio forno da cucina in un forno a rifusione per saldare componenti SMD su PCB. Per farlo, è necessario rimuovere il vecchio meccanismo che controlla la temperatura, le modalità e il tempo di cottura e sviluppare un nuovo sistema di controllo. Questo nuovo sistema prevede una nuova scheda che deve essere in grado di controllare attentamente la temperatura nel tempo all'interno della camera del forno, poiché la saldatura di componentistica SMD è un processo delicato che deve rispettare dei profili di temperatura indicati dal produttore, garantendo così che i componenti non vengano danneggiati durante l'operazione. La nuova scheda di controllo che d'ora in avanti si indicherà con "controller board" è progettata per essere il più generica possibile e quindi in grado di gestire non solo un forno, ma, con alcune modifiche al firmware, può essere utilizzata ovunque ci sia una temperatura da controllare, ad esempio in una camera climatica o in una "heated chamber" per stampante FDM.

Il design si basa su componenti già disponibili in laboratorio e, per ridurre ulteriormente il costo totale del progetto, alcune delle PCB sono auto-incise e i componenti sono saldati a mano. Inoltre, il progetto è destinato a essere rilasciato come open-source.

## ***FEATURE***

### ***Sensoristica***

- Due amplificatori per termocoppie tipo K
- Due NTC
- Rilevatore Zero-crossing isolato
- Due rilevatori di tensione di rete isolati
- Due rilevatori di corrente di rete isolati

### ***Output***

- Due output open-drain
- Output open-drain con controllo PWM

### ***Interfacce***

- Convertitore USB seriale
- Linea RS-485 protetta
- Interfaccia utente con display e pulsanti

### ***Altro***

- Uscita 3,3V a bassa potenza*
- Uscita 5V a bassa potenza*

## ALIMENTAZIONE

### ALIMENTAZIONE PRINCIPALE

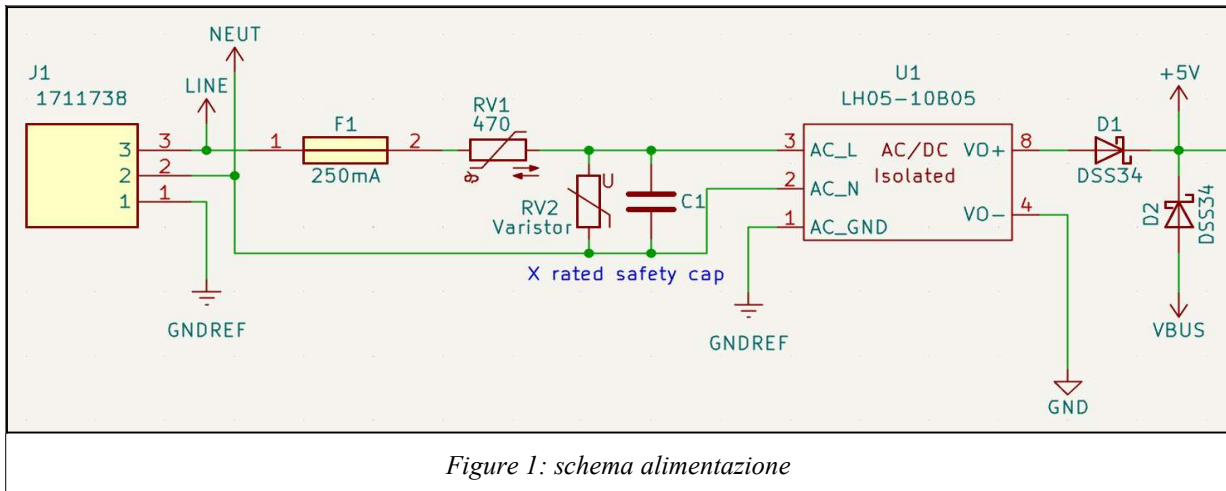


Figure 1: schema alimentazione

L'alimentazione principale per la scheda è fornita dalla rete elettrica. Un convertitore AC-DC integrato e isolato (fino a 3KV) raddrizza e abbassa la tensione da 230 VAC 60Hz a 5V DC. La protezione dell'ingresso coinvolge una combinazione di componenti (fusibile, varistor, NTC) per salvaguardare il convertitore e i circuiti collegati da anomalie e condizioni di sovratensione elettrica.

#### Fusibile

Il fusibile **F1** è un componente essenziale nella protezione d'ingresso della scheda, che, collegato in serie, protegge da flussi di corrente eccessivi che possono derivare da un corto circuito o altri eventi imprevisti. Quando la corrente attraverso il fusibile supera il suo valore nominale, l'elemento interno del fusibile si riscalda al punto di fondere, aprendo il circuito e disconnettendo la fonte di alimentazione dal convertitore. Il fusibile è valutato con un valore di corrente leggermente superiore alla corrente di esercizio massima prevista dal circuito, ma comunque abbastanza basso da evitare danni al convertitore in caso di guasto. La potenza massima in uscita dal convertitore è  $P_{out}=5W$  con un'efficienza  $\mu$  dell'87%, la potenza in

ingresso necessaria risulta  $P_{input}=\frac{P_{out}}{\mu}=5.75W$  e con la tensione d'ingresso  $V_{ACrms}=230V$ ,

la corrente nominale di ingresso è  $I_{input}=\frac{INPUT_{pwr}}{V_{ACrms}}=0.025A$

## Varistore

Un varistore è il semiconduttore collegato in parallelo ai terminali di ingresso del convertitore. I varistori sono progettati per proteggere da sovratensioni, picchi di tensione e transitori che possono verificarsi nella linea di alimentazione. In condizioni di funzionamento nominali, il varistore ha un'impedenza elevata e non influenza il circuito. Quando si verifica un picco di tensione o un transitorio, la resistenza del varistore diminuisce rapidamente, consentendo di assorbire e dissipare l'energia in eccesso deviando la corrente di sovratensione lontano dal convertitore. Il varistore **RV2** è selezionato in base alla sua tensione nominale ed ha una tensione nominale leggermente superiore alla tensione di ingresso massima prevista di  $V_{ACrms}=230\text{ V}$  per il convertitore.

## NTC

Il termistore NTC funge da limitatore di corrente di spunto presentando inizialmente una resistenza elevata per limitare l'impulso di corrente durante l'accensione. Man mano che si riscalda a causa della corrente che ci scorre attraverso, la sua resistenza diminuisce rapidamente, consentendo al circuito di operare a corrente nominale una volta raggiunta la sua temperatura di stato stazionario. Questo comportamento aiuta a proteggere i componenti, a ridurre lo stress sulla fonte di alimentazione e a garantire il funzionamento sicuro e stabile di circuiti e alimentatori.

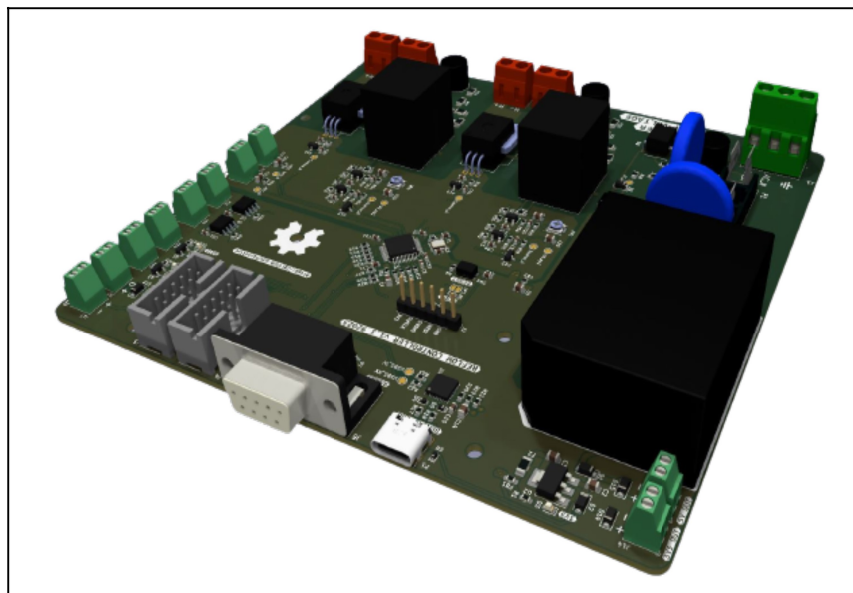
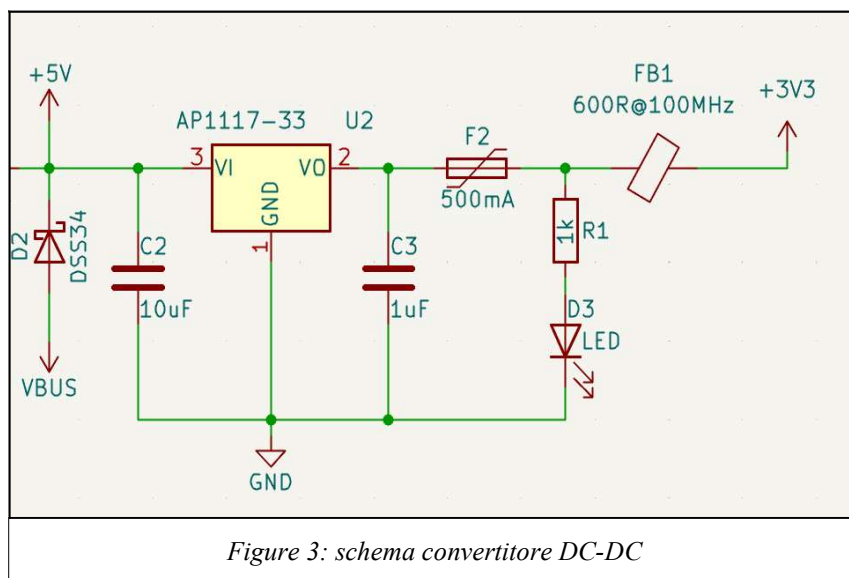
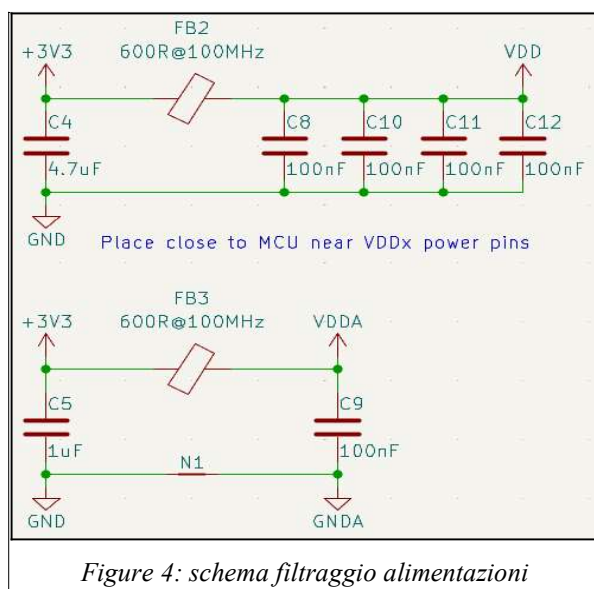


Figure 2: 3D render della scheda

## BASSA TENSIONE



tensione a 3,3V e fornisce fino ad un massimo di 1A di corrente. L'uscita è protetta da un fusibile polimerico ripristinabile da 500mA più che sufficienti per alimentare l'intera scheda che consuma 160mA, e un LED indica la presenza dei 3,3V. I condensatori d'ingresso e d'uscita posizionati secondo le specifiche del datasheet, contribuiscono a ridurre il ripple e a stabilizzare il regolatore di tensione lineare. Per migliorare ulteriormente del rumore, è presente una piccola ferrite in uscita dal regolatore.



L'alimentazione del microcontrollore e l'alimentazione analogica per i sensori sono dotate di ulteriori ferriti e condensatori di decoupling al fine di ridurre al minimo il rumore. I valori di questi condensatori e ferrite sono stati selezionati tra i componenti già disponibili nel laboratorio in maniera sperimentale. Questo processo di selezione ha coinvolto tentativi ed errori per identificare i componenti che offrivano le migliori prestazioni in termini di riduzione del rumore.



# MICROCONTROLLORE

## PANORAMICA

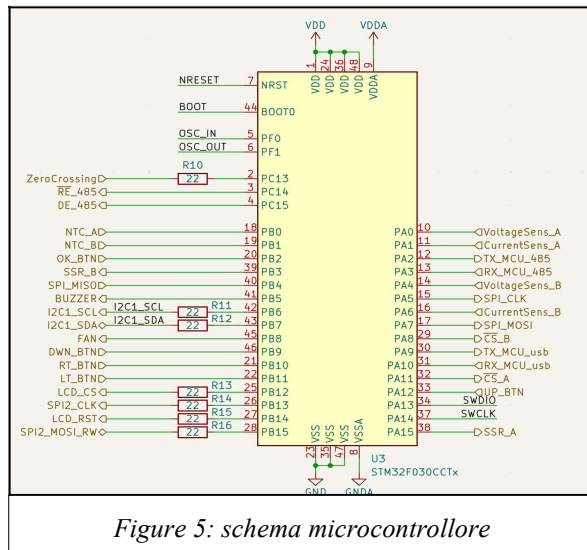


Figure 5: schema microcontrollore

utente.

Tra le caratteristiche necessarie al ci sono:

- I2C Fast Mode
- Due linee SPI a 18MHz
- Sei USART
- ADC a 12 bit con 16+2 canali
- Contatori e timer
- GPIO con interrupt

E molte altre periferiche e funzionalità non necessarie al progetto

## OSCILLATORE

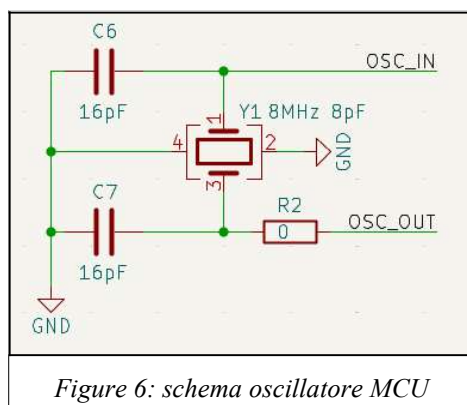


Figure 6: schema oscillatore MCU

Un oscillatore esterno da **8MHz** come da datasheet è stato selezionato come sorgente di clock per l'MCU per migliorare la stabilità a lungo termine e il jitter termico della frequenza. Il corretto funzionamento dell'oscillatore dipende da due condensatori esterni,  $C_6$  e  $C_7$ , e da qualsiasi

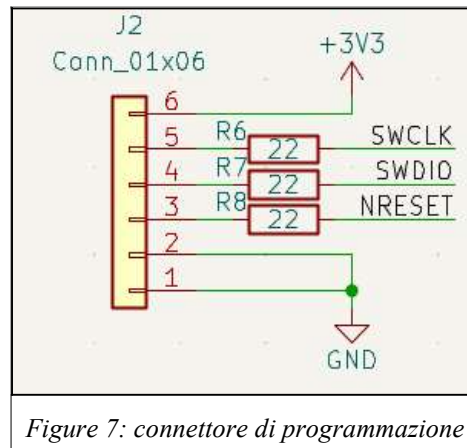
capacità parassita sulla PCB (non considerata nel

calcolo).

La capacità ottimale  $C_L$  per il cristallo è indicata nel datasheet, equivale a **8pF** ed è data da:

$$C_L = \frac{C_6 \cdot C_7}{C_6 + C_7} = 8 \text{ pF} \text{ con } C_6 = C_7 = 16 \text{ pF}$$

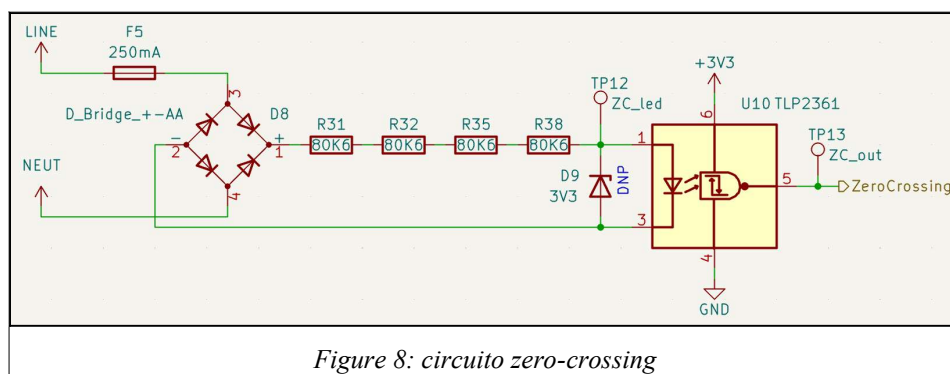
## **PROGRAMMAZIONE**



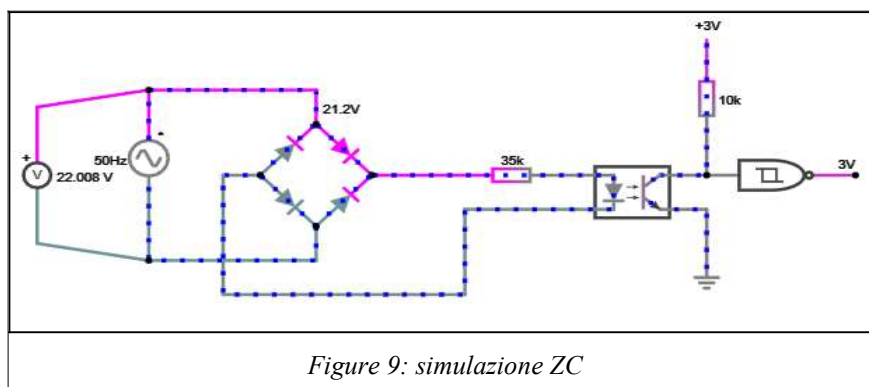
Un connettore da 2.54mm **J2**, viene utilizzato per collegare un programmatore compatibile alla scheda. Questo programmatore può essere STlink o più semplicemente si può collegare la parte di programmatore integrato in una scheda NUCLEO sempre di STMicroelectronics. In entrambi i casi, è necessario un collegamento ad hoc.

## SENSORISTICA

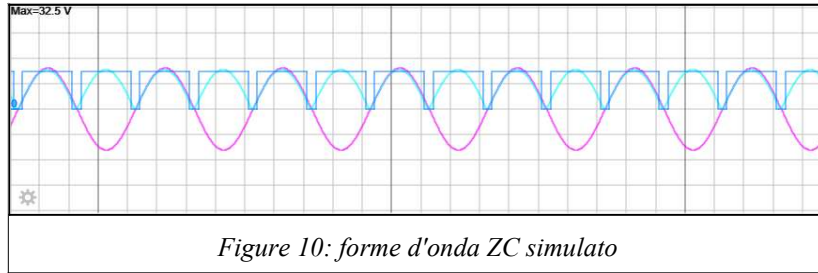
### RILEVATORE ZERO-CROSSING



Il rilevatore **zero-crossing** (ZC), è un circuito utilizzato per rilevare il momento in cui la tensione alternata di rete attraversa il punto in cui la tensione cambia polarità da positiva a negativa o viceversa. Viene usato nel il controllo di fase per attuare l'output in sincronia con la tensione di rete così da minimizzare i problemi EMI.



Il circuito è composto da un raddrizzatore a ponte di Graetz e un optoisolatore. Il raddrizzatore a doppia semi-onda converte la tensione di rete da AC (*Figure 9: forme d'onda ZC simulato in rosa*) in DC (*Figure 9: forme d'onda ZC simulato in azzurro*) la quale, attraverso la serie di resistenze eccita il LED che “triggererà” l'uscita dell'optocoupler ad andare bassa quando la tensione raddrizzata non sarà più sufficiente per mantenere il LED attivo. Questo genera un segnale (*Figure 9: forme d'onda ZC simulato in blu*) attivo basso con frequenza doppia rispetto alla tensione di rete ed è **galvanicamente isolato**.



Le resistenze in serie **R31-R32-R35-R38**, distribuendo il carico di tensione, permettono di rispettare i rating del componente e di utilizzare relativamente footprint più piccoli, ma anche di garantire un certo grado di ridondanza in caso di guasto critico.

Da datasheet la caratteristica V-I del LED dell'optoisolatore stabilisce che è necessario  $I_{led}=1\text{mA}$  a  $V_{led}=1.6\text{V}$  quindi, data una tensione di rete  $V_{max}=V_{rms}\cdot\sqrt{2}=325\text{V}$  la resistenza totale è data da:

$$R_{tot} = \frac{V_{max} - V_{led}}{I_{led}} = 323\text{ K}\Omega \rightarrow R_s = 4 \times 80.6\text{ K}\Omega$$

La potenza sulla singola resistenza  $P_R = I_{led}^2 \cdot R_s = 80.6\text{mW} \rightarrow \text{resistenza } 0805\text{ (}0.125\text{ W)}$  che è un footprint che ha un rating di tensione di 150V che è compatibile con la caduta di tensione sulla resistenza che si aggira sugli 80V.

## SENSORI DI CORRENTE E TENSIONE

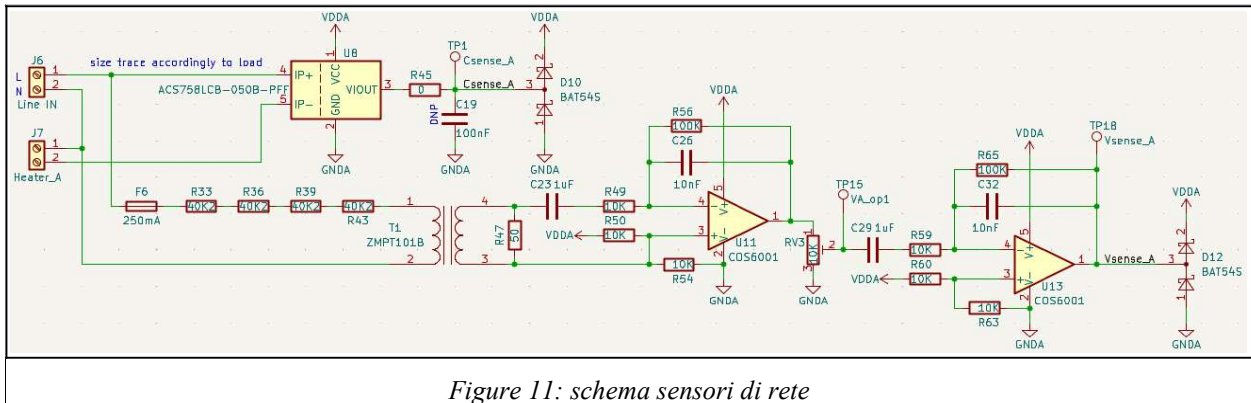


Figure 11: schema sensori di rete

L'elemento riscaldante connesso al connettore **Heater\_X** viene alimentato attraverso **Line IN**, inserendo a monte in serie alla fase il **SSR** così da poter determinare la potenza sull'elemento. La corrente massima su ciascun elemento riscaldante è di **7A**.

### Corrente

Il sensore per il rilevamento della corrente è un sensore ad effetto Hall, galvanicamente isolato di Allegro microsystems il **ACS758LCB-050B-PFF**. Sovradimensionato per l'applicazione, viene alimentato con  $V_{DDA}=3.3V$ , presenta un range di misura bidirezionale di  $\pm 50A$  con un tensione proporzionale alla corrente rilevata di  $V_{Hall}=40 \frac{mV}{A}$ , che si traduce

in un uscita dal chip pari a  $V_{out} = \frac{V_{DDA}}{2} \pm V_{Hall}$ .

L'ADC del microcontrollore, con alimentazione  $V_{DDA}$ , riesce a rilevare correnti massime di  $\pm 41A$ , prima di uscire dal range **0-3,3V**. Con una risoluzione dell'ADC teorica di

$$V_{res} = \frac{V_{DDA}}{2^{12}} = 8 \mu V \quad \text{la corrente misurata è dunque}$$

$$I = \frac{ADC_{integer} \cdot V_{res}}{V_{Hall}} - \frac{V_{DDA}}{2}$$

In uscita dal sensore di corrente è predisposto un filtro passa basso del primo ordine in caso si sviluppasse disturbi ad alta frequenza. Una possibile combinazione RC con frequenza di cutoff a 60Hz è data da  $C=47nF$ ,  $R=5.6K\Omega$ .

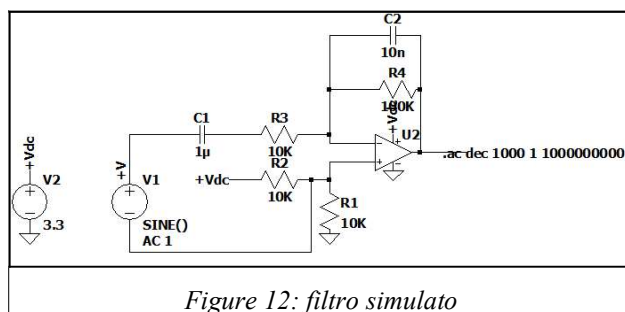
## Tensione

Per garantire l'isolamento galvanico viene usato un trasformatore di corrente 1:1 **ZMPT101B** che, data una corrente nell'avvolgimento d'ingresso, la ripresenta all'avvolgimento d'uscita. Il datasheet specifica una corrente massima di funzionamento di  $I_{max}=2mA$ . È necessario dimensionare la resistenza d'ingresso di conseguenza. Data una tensione di rete  $V_{max}=V_{rms}\cdot\sqrt{2}=325V$  la resistenza totale supponendo trascurabile la resistenza di avvolgimento è data da:

$$R_{tot}=\frac{V_{max}}{I_{max}}=162K\Omega \rightarrow R_S=4\times 40.2K\Omega$$

La potenza sulla singola resistenza  $P_R=I_{max}^2\cdot R_S=160mW \rightarrow$  resistenza 1206 (0.250 W) che è un footprint che ha un rating di tensione di 200V che è compatibile con la caduta di tensione sulla resistenza che si aggira sugli 80V. Anche in questo caso resistenze in serie, distribuendo il carico di tensione, permettono di rispettare i rating del componente e di utilizzare footprint più piccoli, ma anche di garantire un certo grado di ridondanza in caso di guasto critico.

La caduta di tensione  $V_{input}$  sulla resistenza in parallelo al secondario del trasformatore che va da un minimo di **-0.1V** ad un massimo di **+0.1V**, viene amplificata e filtrata attraverso i due operazionali in configurazione passa-banda. Viene applicato prima un DC-bias pari a  $\frac{V_{DDA}}{2}$  in modo da utilizzare tutto il range di tensione e garantire la compatibilità con l'ADC del microcontrollore.



Il guadagno è dato da

$$G=-\frac{R_{56}}{R_{49}}=-10 \quad \text{mentre la le due}$$

frequenze di limite banda sono date da

$$f_1=\frac{1}{2\pi\cdot R_{56}\cdot C_{26}}=160Hz \quad e$$

$$f_1=\frac{1}{2\pi\cdot R_{49}\cdot C_{22}}=16Hz \quad . \text{ Lo sfasamento di } 180^\circ \text{ impone di posizionare due di questi filtri in}$$

serie in modo da avere un guadagno positivo. Si interpone un trimmer per regolare con precisione la tensione in uscita dal primo stadio di amplificazione.

La tensione in uscita dal complesso è data da

$$V_{out} = V_{input} \cdot G_1 \cdot G_{pot} \cdot G_2 \text{ con } G_1 \text{ guadagno filtro 1, } G_{pot} \text{ guadagno potenziometro, } G_2 \text{ filtro 2}$$

La tensione di rete è data da

$$V_{ac} = \frac{(ADC_{integer} \cdot V_{res}) - \frac{V_{DDA}}{2}}{(G_1 \cdot G_{pot} \cdot G_2) \cdot 50 \Omega} \cdot R_{tot}$$

Sotto è descritto il diagramma di Bode del filtro simulato

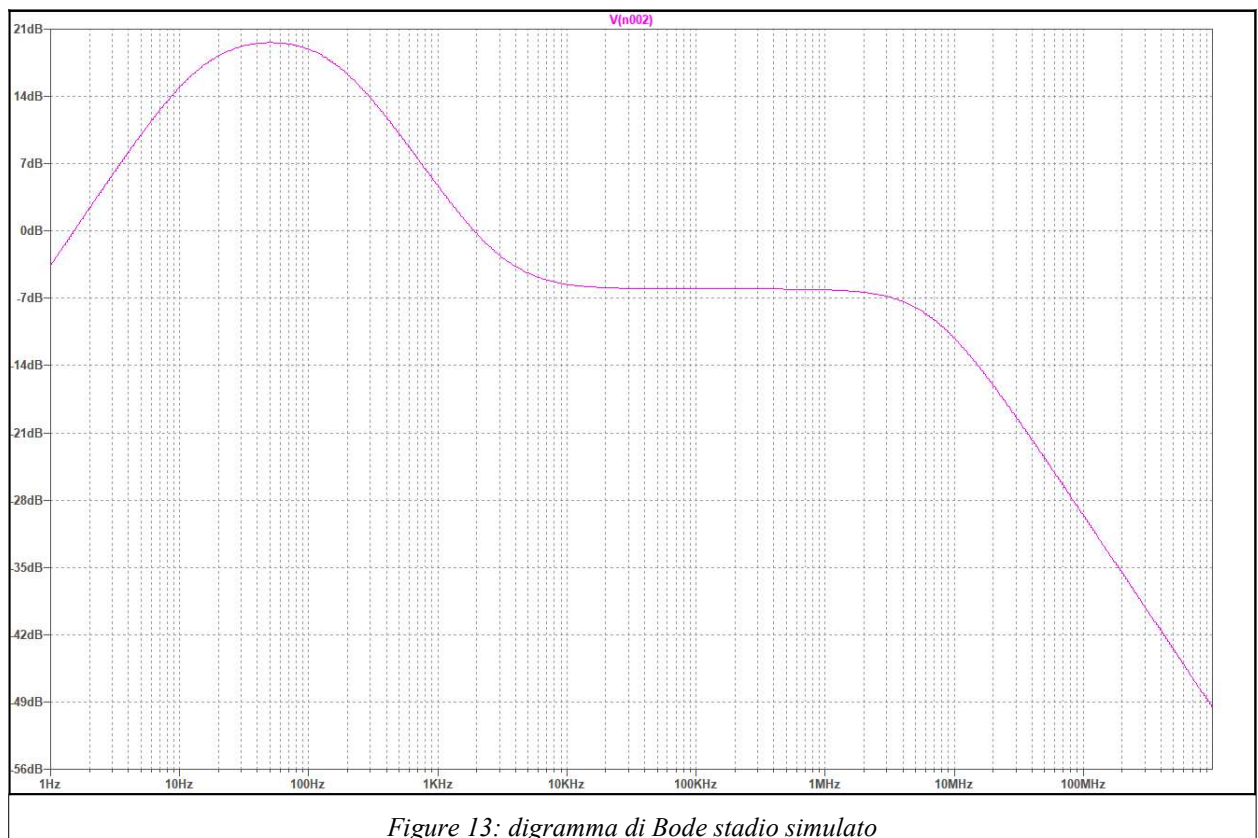
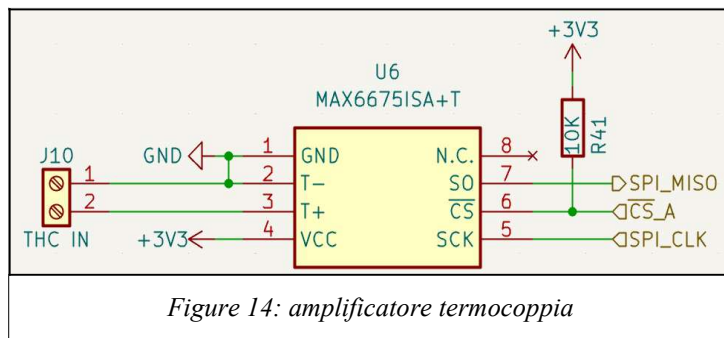


Figure 13: digramma di Bode stadio simulato

## SENSORI DI TEMPERATURA

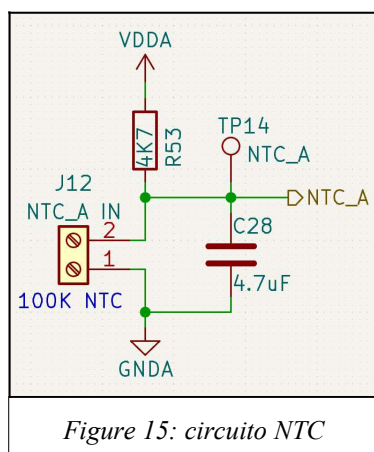
### Termocoppie



L'interfaccia di amplificazione delle termocoppie si basa su l'integrato **MAX6675ISA+T** che presenta una serializzazione della temperatura su linea SPI, offrendo una risoluzione di 12 bit, un'accuratezza di 0.25°C e un range di

lettura che va da 0°C a 1024°C. Questa viene usata per il controllo poiché la calibrazione di fabbrica e la semplice interfaccia seriale risulta più semplice da utilizzare rispetto al condizionamento del segnale di un'NTC.

### NTC

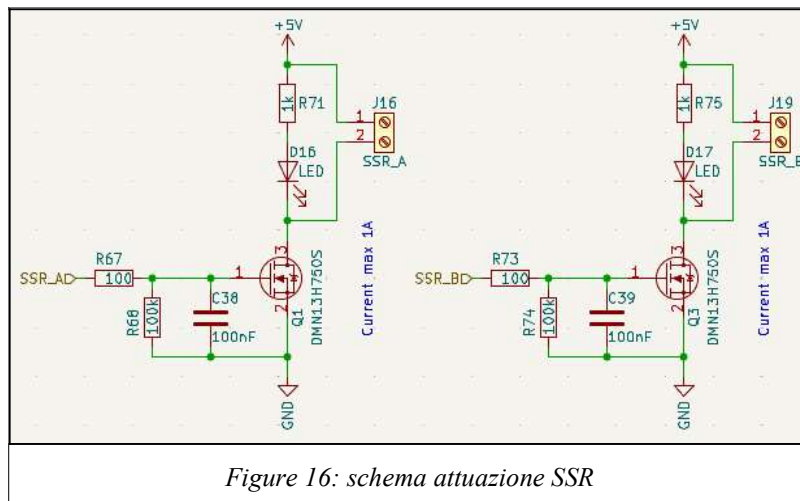


L'opzione NTC non viene usata per il progetto. La circuiteria formata da un semplice partitore di tensione è predisposta, ma ulteriori analisi riguardanti la scelta dei componenti e una caratterizzazione della termoresistenza è necessaria volendo inserire questo aspetto nel loop di controllo



## OUTPUT

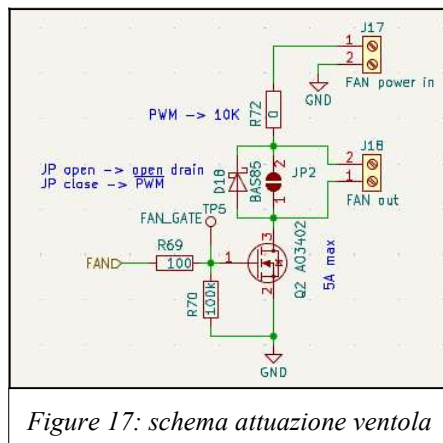
### ATTUAZIONE SSR



L'alimentazione degli elementi riscaldanti all'interno del forno è fornita da un massimo di due **relè a stato solido**, ciascuno con una potenza nominale di **2500W**. Due circuiti di attuazione identici controllano ciascun SSR tramite un **MOSFET** in grado di erogare fino a 1A di

corrente. L'SSR è collegato al connettore **SSR\_A** o **SSR\_B**, che fornisce una tensione di 5V, in configurazione open-drain, quando viene applicato un livello logico '1' al gate del MOSFET. Sui gate di ciascun MOSFET sono presenti resistenze limitatrici di corrente in ingresso e condensatori di filtraggio, mentre è presente un indicatore LED per visualizzare lo stato dell'uscita.

### ATTUAZIONE VENTOLA



Un forno di rifusione deve idealmente mantenere una temperatura coerente e uniforme all'interno. La ventola contribuisce a distribuire uniformemente l'aria calda, garantendo che tutte le parti del PCB siano esposte al medesimo profilo di temperatura. Inoltre, senza un ventola, possono verificarsi punti caldi o punti freddi localizzati all'interno del forno, il che può portare a una saldatura non uniforme e a difetti come il "tombstoning". In più dopo il

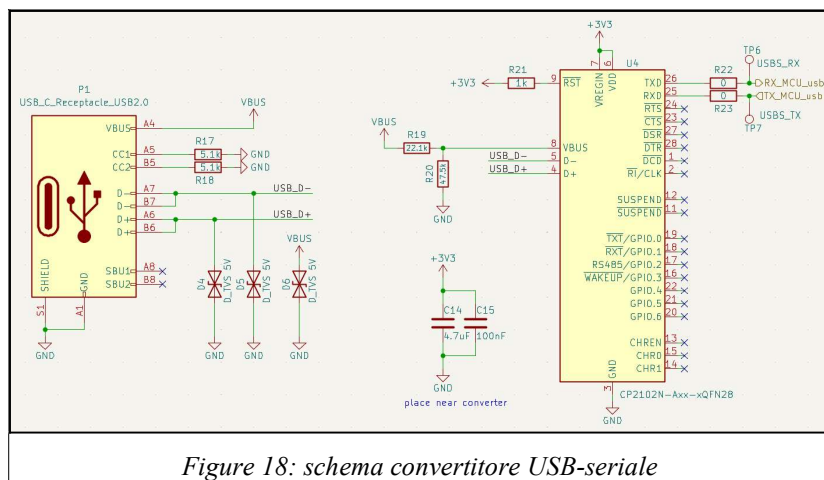
completamento del processo di reflow, la ventola contribuisce a raffreddare il PCB in modo più rapido.

Il circuito di attuazione predefinito è configurato come un MOSFET open-drain (**JP2** aperto e **R72 0Ω**), in grado di gestire correnti fino a 5A. La ventola viene alimentata con alimentazione esterna per aumentarne la flessibilità di utilizzo, attraverso il connettore **J17 FAN power in** con

tensione (fino a **30V**) tanto che è possibile utilizzare il connettore **J18 FAN out** come un' uscita generica open-drain per controllare carichi diversi dalla ventola. Inoltre, chiudendo **JP2** e sostituendo **R72** con una resistenza da **10K $\Omega$** , su J18 FAN out può essere generato un segnale **PWM** da interfacciare ad un carico ad alta impedenza.

## INTERFACCE

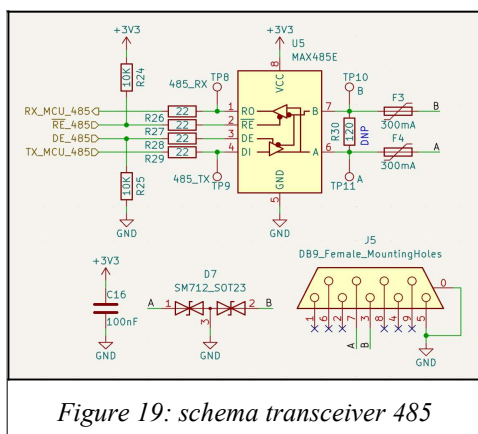
## USB SERIALE



Una modalità di comunicazione con il controller board è via il connettore USB type C montato sulla parte alta della scheda. Questo grazie ad un chip dedicato, virtualizza la connessione USB come collegamento seriale a 115200 baud , più semplice

da gestire a livello firmware. Il chip **CP2102N-A02-GQFN28R** non richiede fonti di clock esterne o particolari accortezze se non dei condensatori di decoupling e un partitore per il rilevamento dei 5V di alimentazione. Da questo connettore USB è possibile alimentare la scheda per le operazioni di programmazione e debug. La linea USB è protetta da eventi ESD grazie ai TVS montati e rispetta lo standard USB 2.0.

## RS-485



Un altro modo per raggiungere controller board è utilizzare la linea **RS-485**. L'RS-485 è un protocollo di comunicazione seriale differenziale a frequenza variabile, affidabile e robusto che è spesso scelto per applicazioni in cui è necessario trasmettere dati su lunghe distanze o in ambienti rumorosi, come quelli industriali. Un connettore **sub-DB9** standard è utilizzato per effettuare l'interfacciamento fisico. La comunicazione **half-duplex** è implementata dal chip integrato **MAX485E** che converte il

segnale seriale ***TX\_MXU\_485*** in trasmissione dal chip ad uno differenziale e viceversa con ***RX MCU 485***.

## USER BOARD

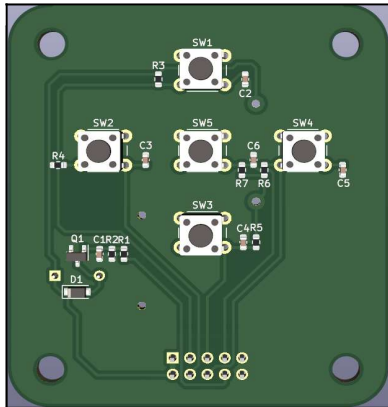


Figure 20: 3D render scheda pulsanti

Controller board è interfacciata a due schede aggiuntive per la gestione dell'interfaccia utente: una con una serie di pulsanti e un buzzer, l'altra con la possibilità di installare un display lcd I2C o un LCD grafico seriale. Entrambe le schede sono state progettate con piste più larghe, spaziatura maggiore con l'intenzione di inciderle in laboratorio.

La scheda pulsanti presenta 5 pulsanti che serviranno a muoversi tra i menu di configurazione della controller board; il segnale sui pulsanti è munito di pull-up e un condensatore per effettuare un primo debounce hardware.

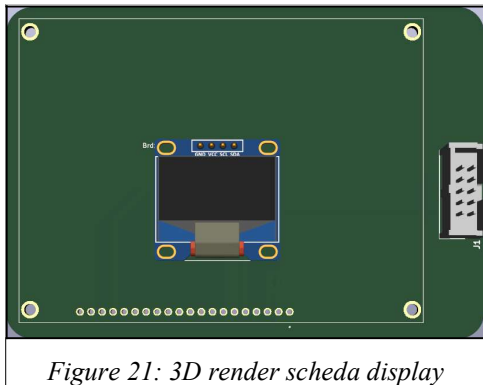


Figure 21: 3D render scheda display

La scheda display presenta solamente le connessioni necessarie per l'interfaccia con i suddetti display