UNIVERSITÀ
DI PADOVA

UNIVERSITÀ
DI PADOVA

Tesi di Laurea Triennale
Corso di Studi in Ingegneria Meccatronica

Sviluppo di un sistema a microcontrollore per il controllo di una piattaforma di Stewart

Laureandi: Bazzaco Jacopo, Gavagnin Giacomo, Scalco Riccardo, Zambonini Dario

Relatore: Prof. Roberto Oboe

Correlatore: Prof.ssa Giulia Michieletto

Piattaforma di Stewart: generalità

Una piattaforma di Stewart è un meccanismo parallelo a sei gradi di libertà costituito da due piattaforme rigide collegate da sei attuatori.

A differenza di un classico meccanismo seriale, in cui gli attuatori sono collegati uno dopo l'altro, nella piattaforma di Stewart tutti e sei gli attuatori possono lavorare contemporaneamente tra la base fissa e la piattaforma mobile.

Piattaforma di Stewart: gradi di libertà

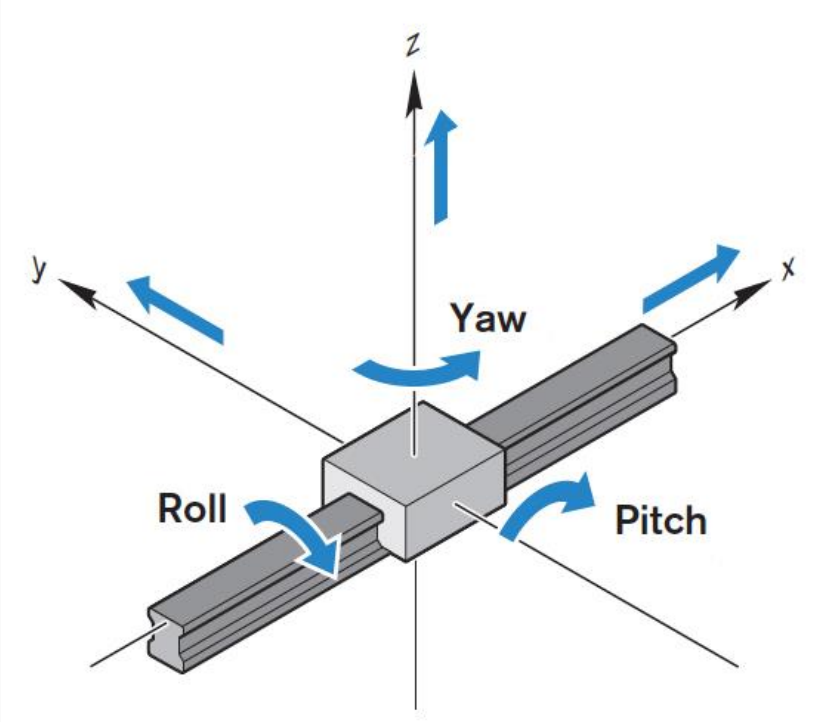
Una piattaforma di Stewart è un meccanismo parallelo a sei gradi di libertà (6DOF), dunque può eseguire i sei movimenti rigidi nello spazio.

TRASLAZIONI:

- X (sourge)
- Y (sway)
- Z (heave)

ROTAZIONI:

- Roll - rollio (rotazione attorno all'asse X)
- Pitch - beccheggio (rotazione attorno all'asse Y)
- Yaw - imbardata (rotazione attorno all'asse Z)

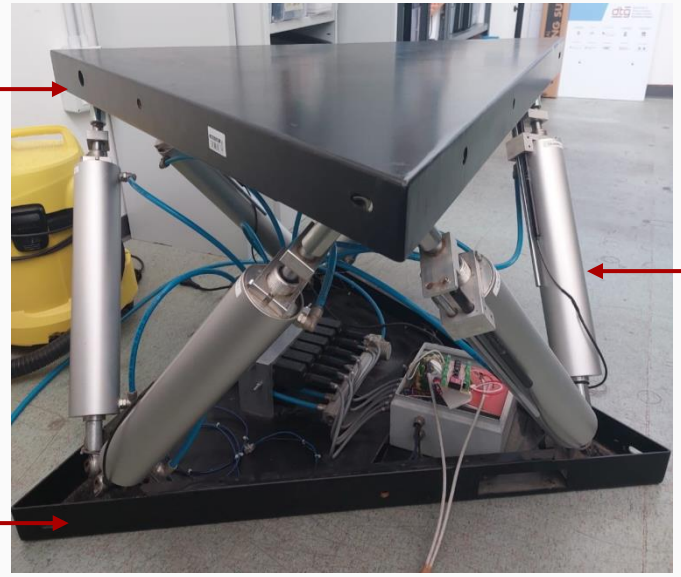


Piattaforma di Stewart: struttura meccanica

Gli elementi principali che caratterizzano una piattaforma di Stewart sono:

- Piattaforma inferiore (base): struttura fissa
- Piattaforma superiore: elemento mobile che sostiene il carico
- Sei gambe, ciascuna costituita da: un attuatore lineare (elettrico, idraulico o pneumatico), due giunti sferici alle estremità che consentono l'orientamento

Piattaforma superiore



Gambe

Piattaforma inferiore

Piattaforma di Stewart: tipologia analizzata

La struttura analizzata per il progetto è una piattaforma di Stewart pneumatica, in cui i sei attuatori sono dei cilindri pneumatici alimentati ad aria compressa e controllati tramite delle elettrovalvole.

VANTAGGI:

- Elevata velocità di movimento
- Struttura relativamente semplice
- Costo inferiore rispetto ai sistemi elettromeccanici di pari dimensioni
- Assenza di perdite di olio (rispetto ai sistemi idraulici)

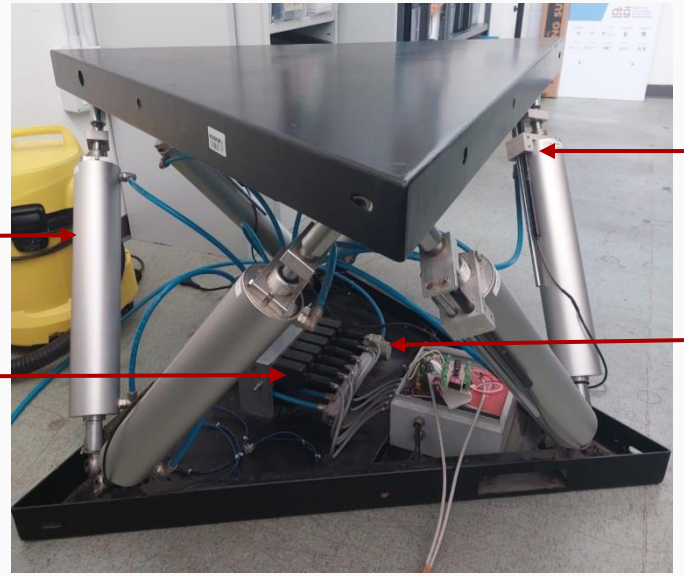
SVANTAGGI:

- Precisione e ripetibilità rispetto agli attuatori elettrici
- Controllo più complesso, soprattutto per movimenti precisi
- Comportamento influenzato dalla comprimibilità dell'aria

Piattaforma di Stewart: componenti principali

I principali componenti che caratterizzano una piattaforma di Stewart ad attuatori pneumatici sono:

- Sei cilindri pneumatici
- Elettrovalvole
- Gruppo di trattamento dell'aria (gruppo FRL): filtro, regolatore di pressione, lubrificatore
- Sensori di posizione



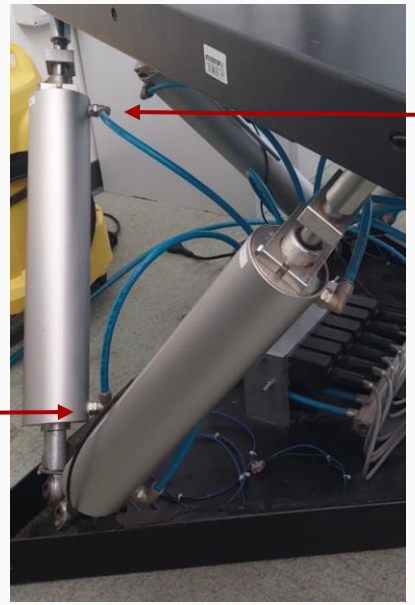
Cilindri a doppio effetto

I cilindri montati nella piattaforma di Stewart in oggetto sono sei cilindri pneumatici a doppio effetto.

Un cilindro pneumatico a doppio effetto è un attuatore lineare che converte l'energia dell'aria compressa in un movimento rettilineo in entrambe le direzioni dello stelo (estensione e rientro).

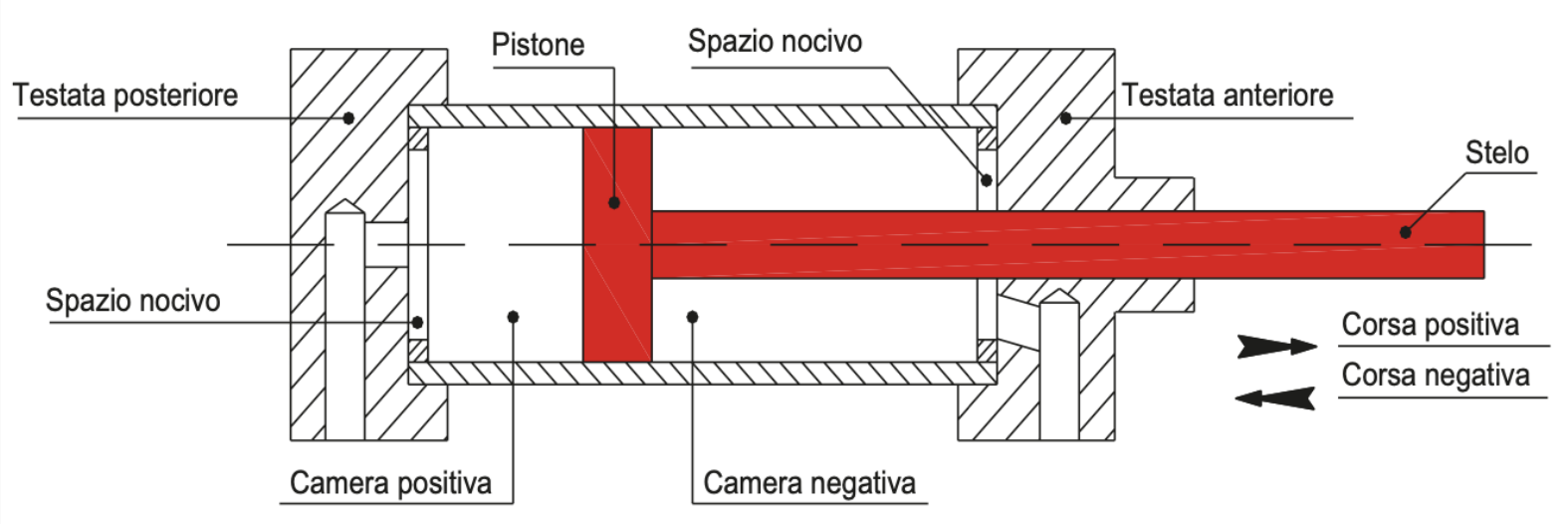
A differenza di un cilindro a semplice effetto (in cui può essere presente una molla di ritorno), utilizza la pressione dell'aria sia per la fase di estensione, sia per la fase di rientro.

Collegamento con aria compressa per la fase di estensione dello stelo



Collegamento con aria compressa per la fase di rientro dello stelo

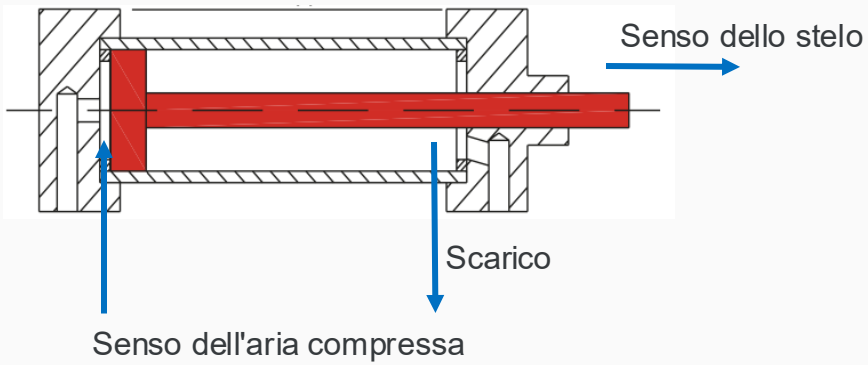
Cilindri: parti principali



Tubo (o camicia): è la parte racchiusa tra le due testate all'interno della quale scorre il gruppo pistone-stelo.
Pistone: è l'organo mobile dotato di dispositivi che garantiscano la tenuta; il suo movimento è lineare.
Stelo: è l'albero metallico collegato al pistone che ha lo scopo di trasmettere all'esterno il movimento.
Testate: assicurano la tenuta meccanica e pneumatica con il tubo e consentono le connessioni di ingresso e uscita dell'aria.
Camera positiva: è lo spazio variabile compreso tra la testata posteriore e il pistone.
Camera negativa: è lo spazio variabile compreso tra la testata anteriore e il pistone.
Spazio nocivo: è lo spazio che rimane fra una testata e il pistone quando questo si trova a fine corsa.

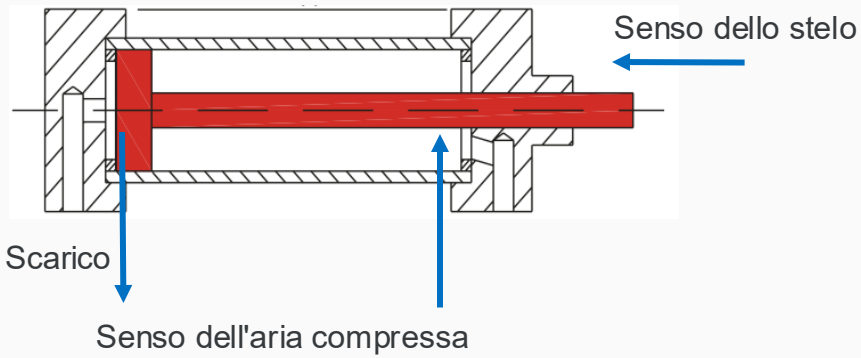
Estensione e rientro dei cilindri

Estensione



Quando l'aria compressa è inviata nella camera positiva del cilindro, il pistone compie la sua corsa positiva (estensione). L'aria presente nella camera negativa è scaricata all'esterno

Rientro



Quando l'aria compressa è inviata nella camera negativa del cilindro, il pistone compie la sua corsa negativa (rientro). L'aria presente nella camera positiva è scaricata all'esterno

Nei cilindri montati nella piattaforma in oggetto, l'estensione dello stelo è di circa 20cm.
Per permettere entrambi i movimenti, il cilindro viene controllato tramite un'elettrovalvola

Elettrovalvole pneumatiche: generalità

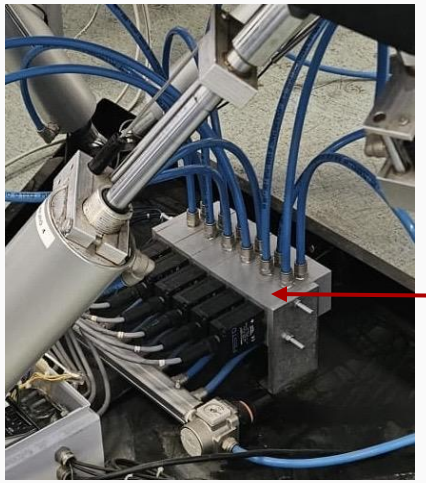
Le elettrovalvole pneumatiche sono dispositivi elettromeccanici che controllano il passaggio dell'aria compressa all'interno di un circuito pneumatico. La loro funzione è trasformare un comando elettrico in una azione pneumatica, aprendo, deviando o chiudendo il flusso dell'aria verso i cilindri.

STRUTTURA:

Una elettrovalvola è costituita principalmente da due parti: una parte elettrica e una parte pneumatica.

Parte elettrica: bobina elettromagnetica, nucleo fisso, nucleo mobile

Parte meccanica: corpo valvola, spool (cursore), guarnizioni, molle di richiamo, porte pneumatiche



Le elettrovalvole montate nella piattaforma

Elettrovalvole Festo MPYE-5-...B

Nella piattaforma di Stewart analizzata sono montate sei elettrovalvole Festo MPYE-5-...B. Queste sono elettrovalvole proporzionali a 5 vie e 3 posizioni (valvola 5/3).

Le elettrovalvole proporzionali, a differenza delle elettrovalvole tradizionali che hanno solo due stati (ON-OFF), possono assumere un numero continuo di posizioni intermedie. Questo permette di regolare in modo preciso pressione, portata, direzione del flusso d'aria.

Il principio di funzionamento si basa sulla forza sviluppata da un solenoide proporzionale.

Quando alla bobina viene applicata una corrente elettrica si genera un campo magnetico. Il campo magnetico produce una forza proporzionale all'intensità della corrente. Questa forza sposta gradualmente lo spool.

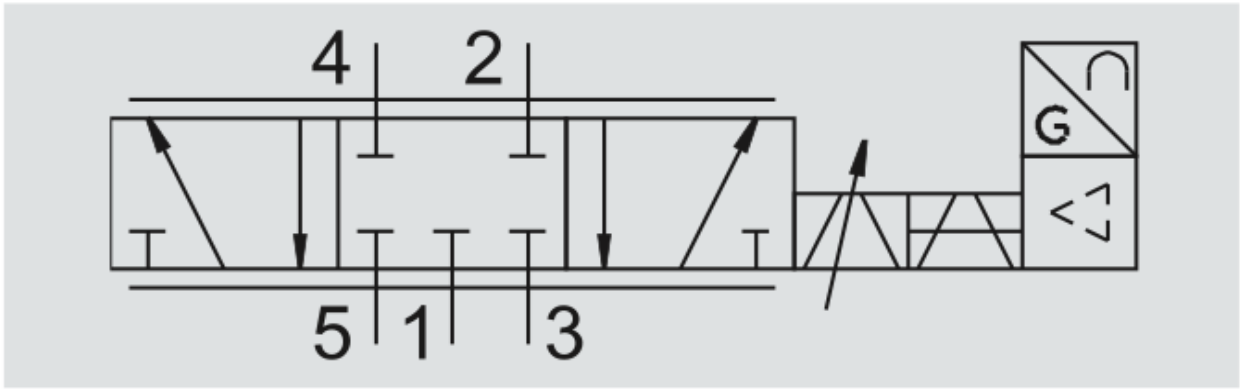
Elettrovalvole Festo MPYE-5-...B

Queste elettrovalvole proporzionali sono di tipo 5/3.

Ciò significa che sono presenti cinque porte:

- 1: alimentazione
- 2-4: uscite verso il cilindro
- 3-5: scarichi

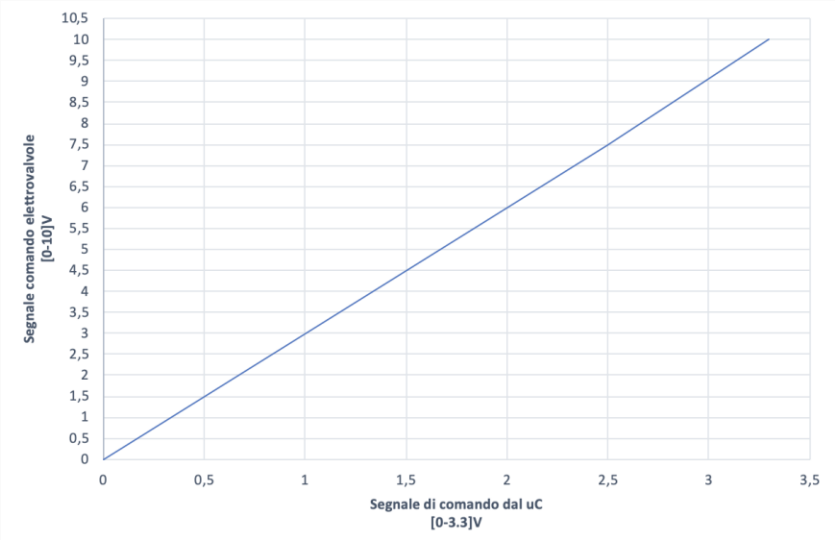
e tre posizioni dello spool (in posizione centrale tutte le porte sono chiuse, quindi il cilindro resta fermo)



Elettrovalvole Festo MPYE-5-...B: tecnica di comando

In queste tipologie di elettrovalvole è presente un driver, che riceve un segnale di comando nell'intervallo [0-10] V. Nel caso specifico del progetto, il comando verrà dato da un'uscita analogica del microcontrollore nell'intervallo [0-3.3] V, che grazie ad un circuito di amplificazione (guadagno A=3) verrà adattato nell'intervallo [0-10] V. In base al comando in tensione, il driver regola la corrente nella bobina che determina l'apertura dell'elettrovalvola (tramite il pilotaggio dell'attuatore dello spool).

Uscita analogica uC	Segnale comando elettrovalvole	Apertura elettrovalvola
0 V	0 V	0%
0.83 V	2.5 V	25%
1,67 V	5V	50%
2,5 V	7.5 V	75%
3.3 V	10 V	100%



Nelle elettrovalvole Festo MPYE è presente anche un sensore di posizione integrato che permette un controllo in anello chiuso della posizione dello spool. Lo spool quindi, si porta e si mantiene nella posizione richiesta.

Sensori di posizione: potenziometri

Nella piattaforma di Stewart analizzata si utilizzano sei potenziometri lineari come sensori di posizione dei sei cilindri.

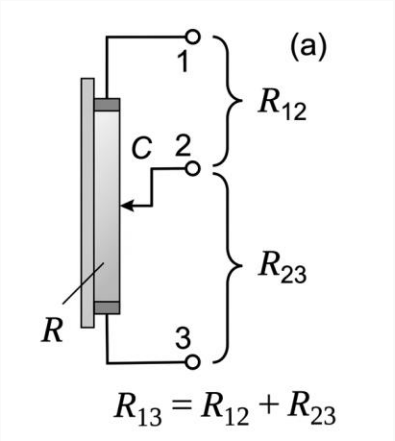
Un potenziometro lineare è un dispositivo elettrico che converte un movimento meccanico rettilineo in un segnale elettrico.

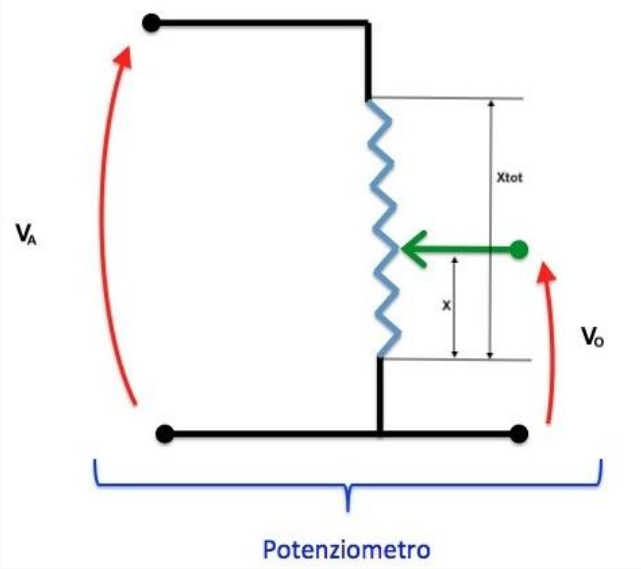
Potenziometro

Sensori di posizione: potenziometri

Essi sono in generale costituiti da un materiale elettricamente conduttivo (R) sul quale appoggia un cursore mobile (C).

La posizione del cursore viene identificata in modo univoco applicando agli estremi di R una tensione V_A di valore noto e misurando la tensione V_O.





$$V_O = V_A \frac{R_{23}}{R_{13}}$$

Nel caso in cui la resistenza R_{23} vari in modo lineare al variare della posizione del cursore, si ha:

$$V_O = V_A \frac{X}{X_{tot}}$$

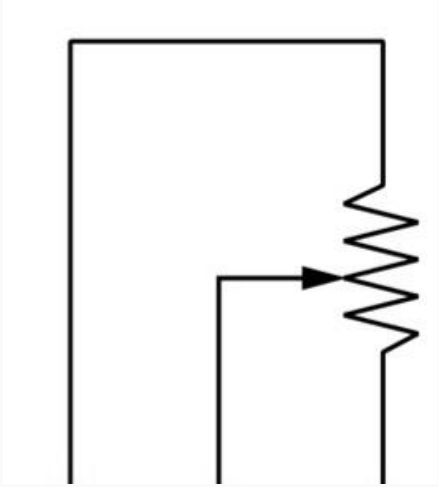
dove X è la posizione attuale del cursore, mentre X_{tot} è la sua corsa complessiva.

Dunque la tensione di uscita sarà proporzionale all'allungamento dello stelo del cilindro.

Sensori di posizione: potenziometri

Nel caso specifico del progetto, la tensione V_A è fissata a 3.3 V. Questa scelta è dovuta al fatto che il valore di uscita del potenziometro V_O viene inviato in lettura ad un ingresso analogico del microcontrollore, dunque dovrà essere compreso nell'intervallo [0-3.3] V.

Il valore nominale della resistenza è di 6.7 kΩ (R_{13}). Dunque la resistenza (R_{23}) sarà proporzionale all'allungamento dello stelo del cilindro.

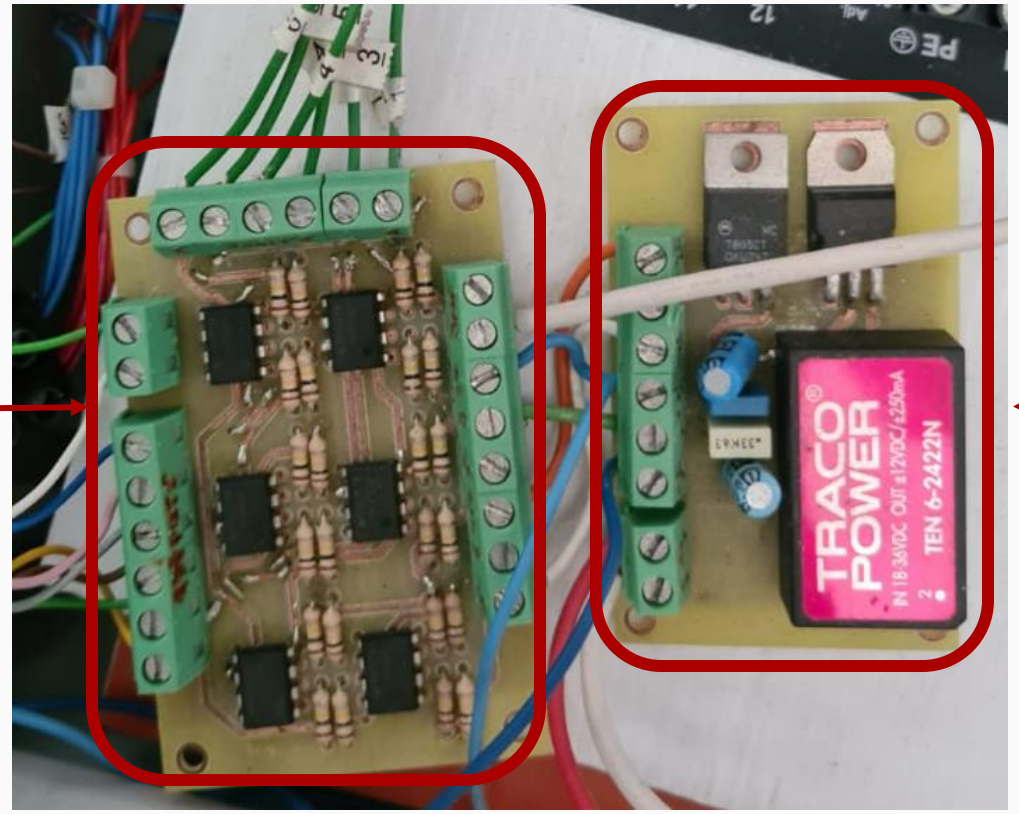


V_A = 3.3 V V_O = [0-3.3 V] GND

Estensione	Resistenza	V_o
0	0 kΩ	0 V
X_{tot} / 2	3.35 kΩ	1.65 V
X_{tot}	6.7 kΩ	3.3 V

Scheda elettronica precedente

Scheda di condizionamento dei segnali delle elettrovalvole



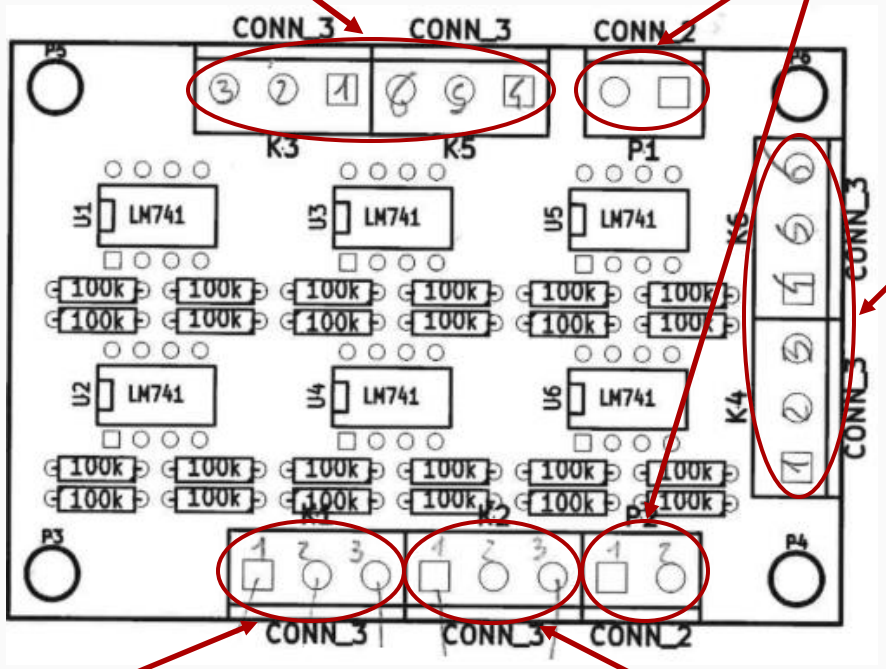
Scheda di alimentazione

Layout precedente: organizzazione della scheda

Ingressi
da -5V a +5V

GND

Uscite
da 0V a +10V



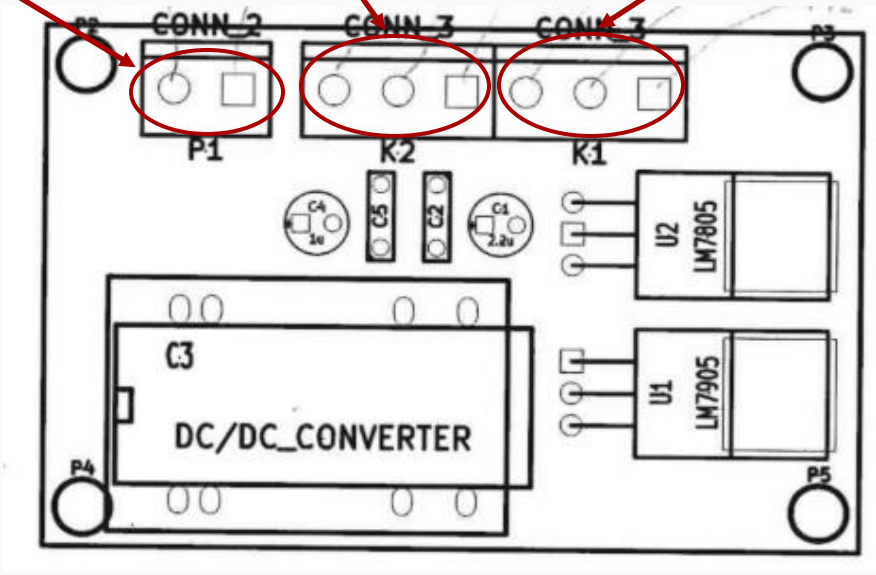
+12V/GND/-12V
Alimentazione OpAmp

-5V/GND/+5V

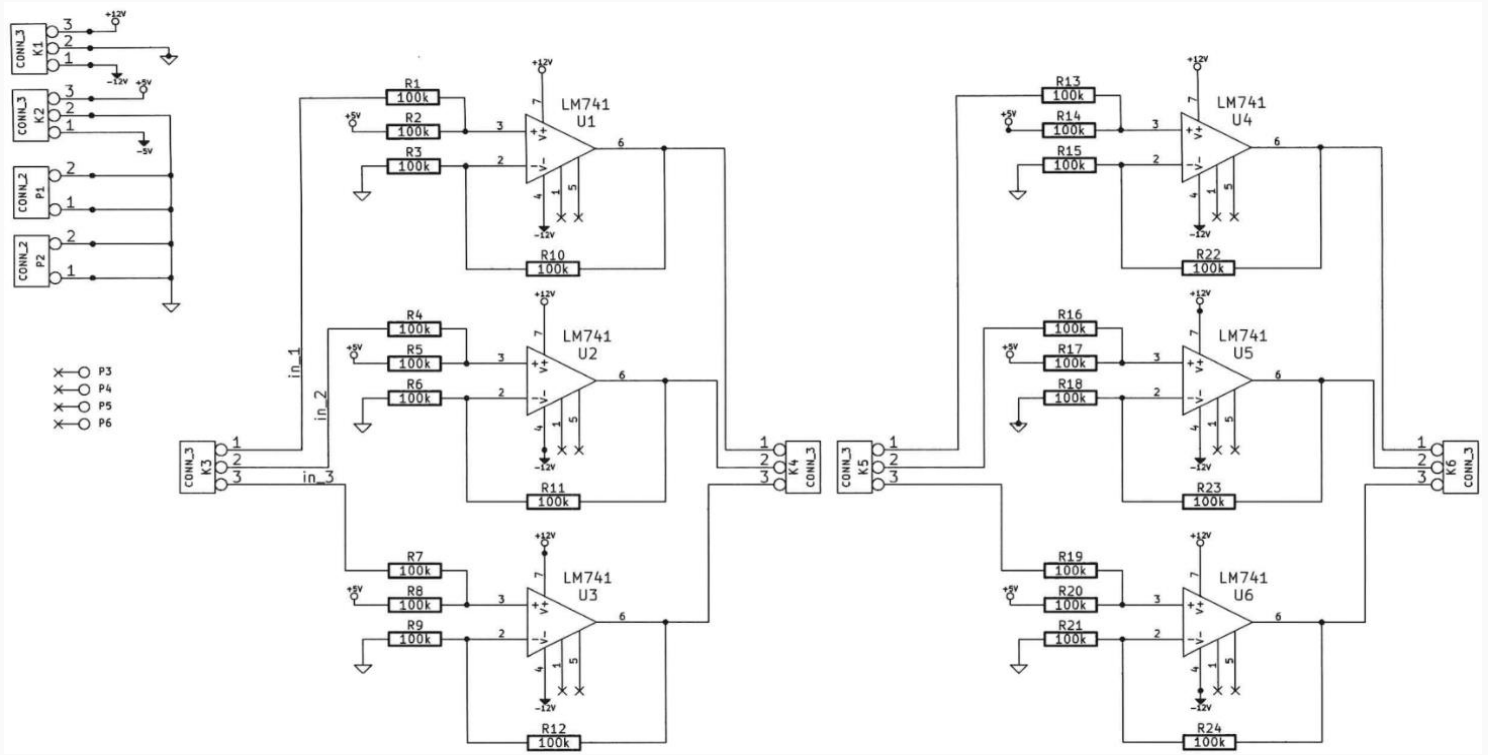
Alimentazione
0-24V

Uscite -5/GND/+5V

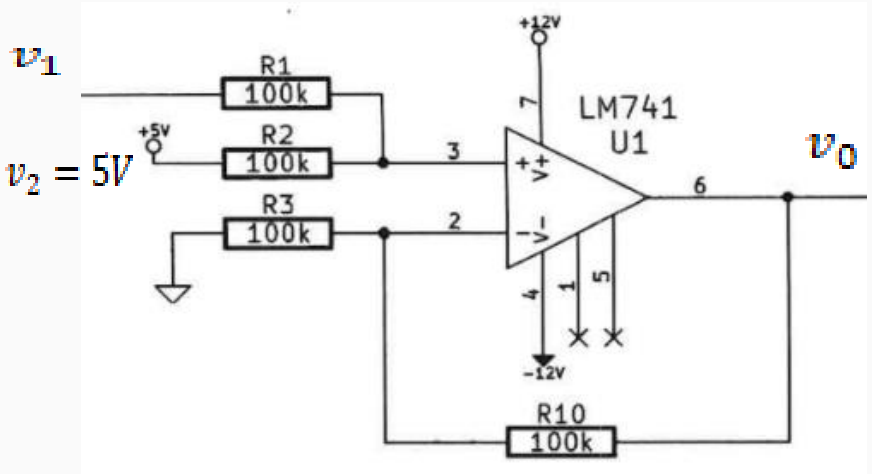
Uscite per OpAmp
-12/GND/+12V



Schema circuitale: amplificatori operazionali



Amplificatore operazionale sommatore non invertente

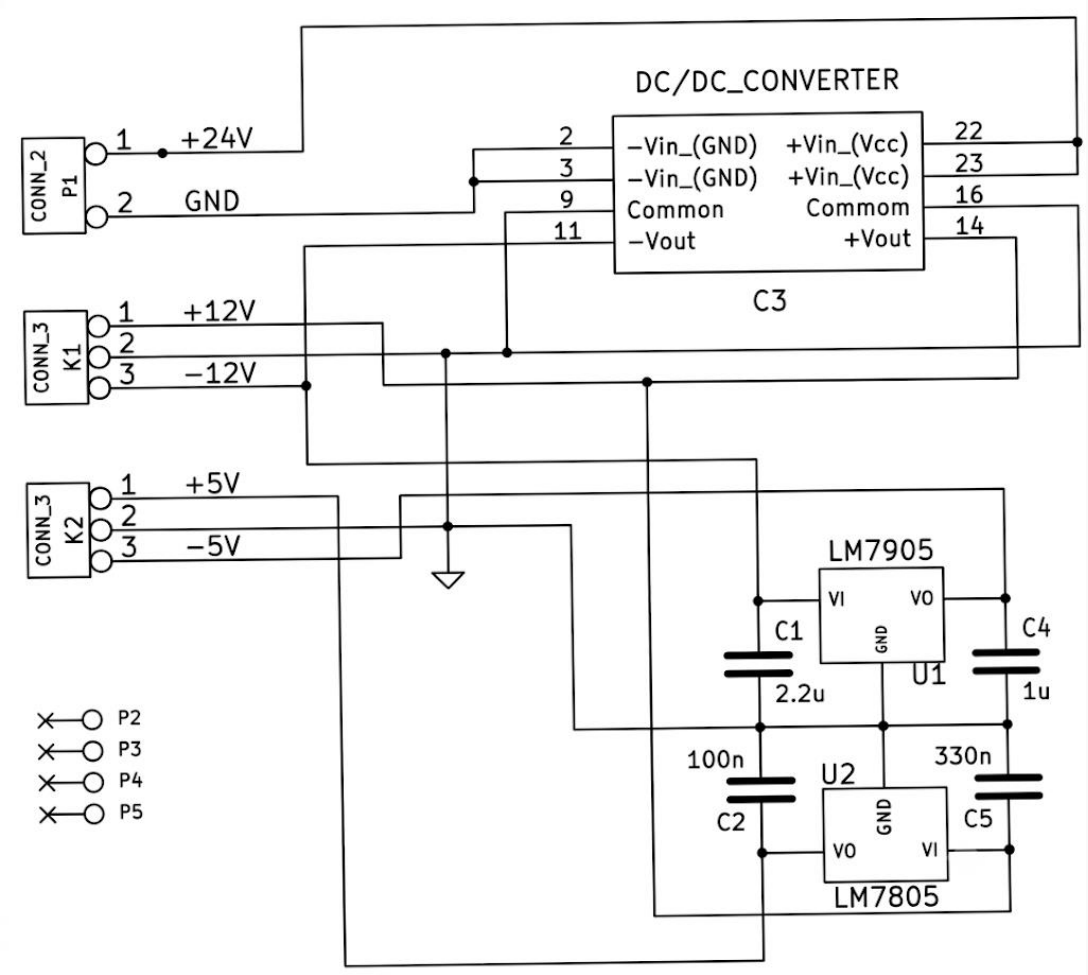


Dato che le resistenze sono tutte uguali a 100kOhm, allora la tensione in uscita sarà:

$$v_0 = v_1 + v_2$$

Ovvero una semplice addizione della tensione $v_2 = 5V$ alla tensione compresa tra –5V e +5V in uscita

Schema circuitale dell'alimentazione dell'intero circuito



Il convertitore DC/DC ha una tensione d'ingresso –Vin/+Vin di 0V(GND)/+24V. Quest'ultimo fornisce poi le tensioni di alimentazione richieste dagli operazionali presenti della sezione di adattamento del segnale.

Sono presenti due regolatori di tensione:

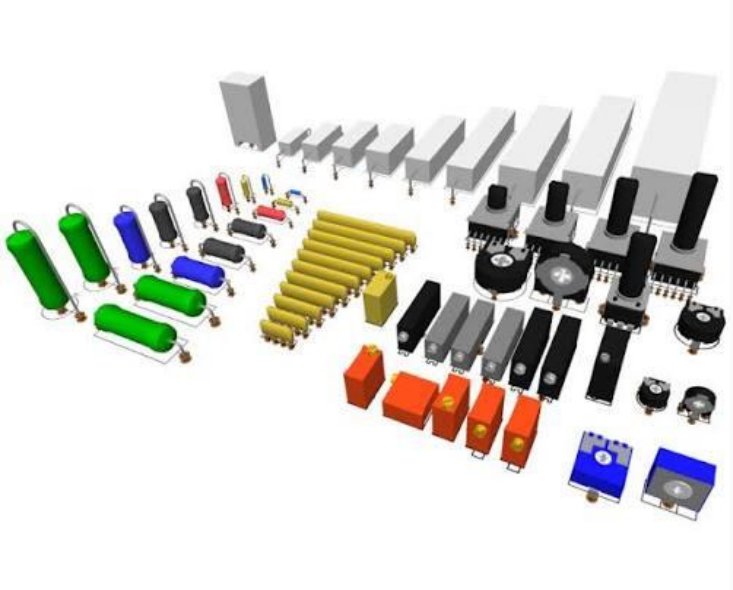
- LM7905 che ha come tensione d'ingresso i -12V provenienti dal convertitore e tensione d'uscita pari a –5V
- LM7805 che ha come tensione d'ingresso i +12V provenienti dal convertitore e tensione d'uscita pari a 5V

Obiettivi del progetto:

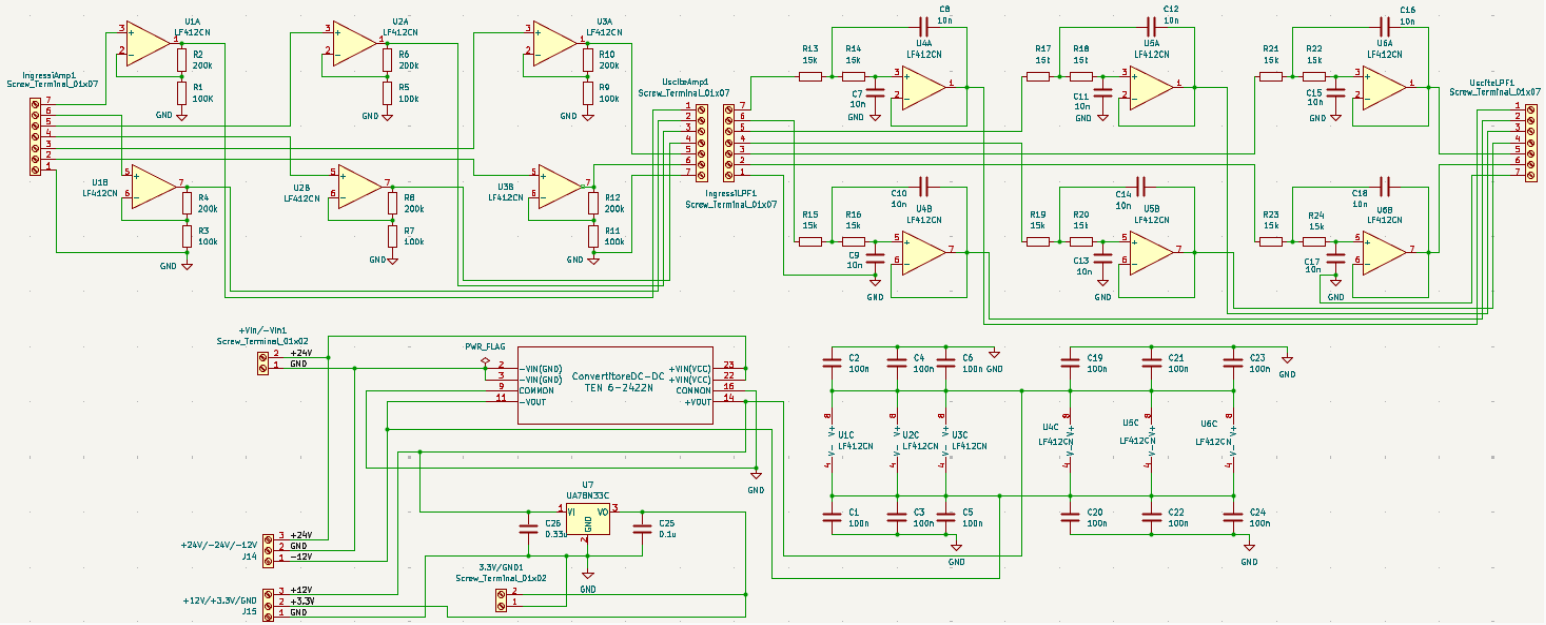
- Modernizzazione e semplificazione circuitale
- Layout trasparente e riadattabile
- Utilizzo di un'unica scheda stampata con alimentazione e condizionamento dei segnali
- Filtraggio dei disturbi provenienti dai potenziometri
- Cable management migliore poiché meno cavi necessari
- Utilizzo del microcontrollore STM32 per poter controllare tutte e sei le elettrovalvole
- Adattare segnali di uscita da microcontrollore da 0-3.3V al range comando elettrovalvole 0-10V

KiCad

- Software open source per creare schemi di circuiti elettrici e circuiti stampati
- Supporta flussi di lavoro integrati e non
- Vari tool integrati per l'aiuto della progettazione sia dello schematico che del circuito stampato quali:
    - ERC (electrical rules checker)
    - Simulatore SPICE
    - Visualizzatore 3D
    - Visualizzatore file gerber



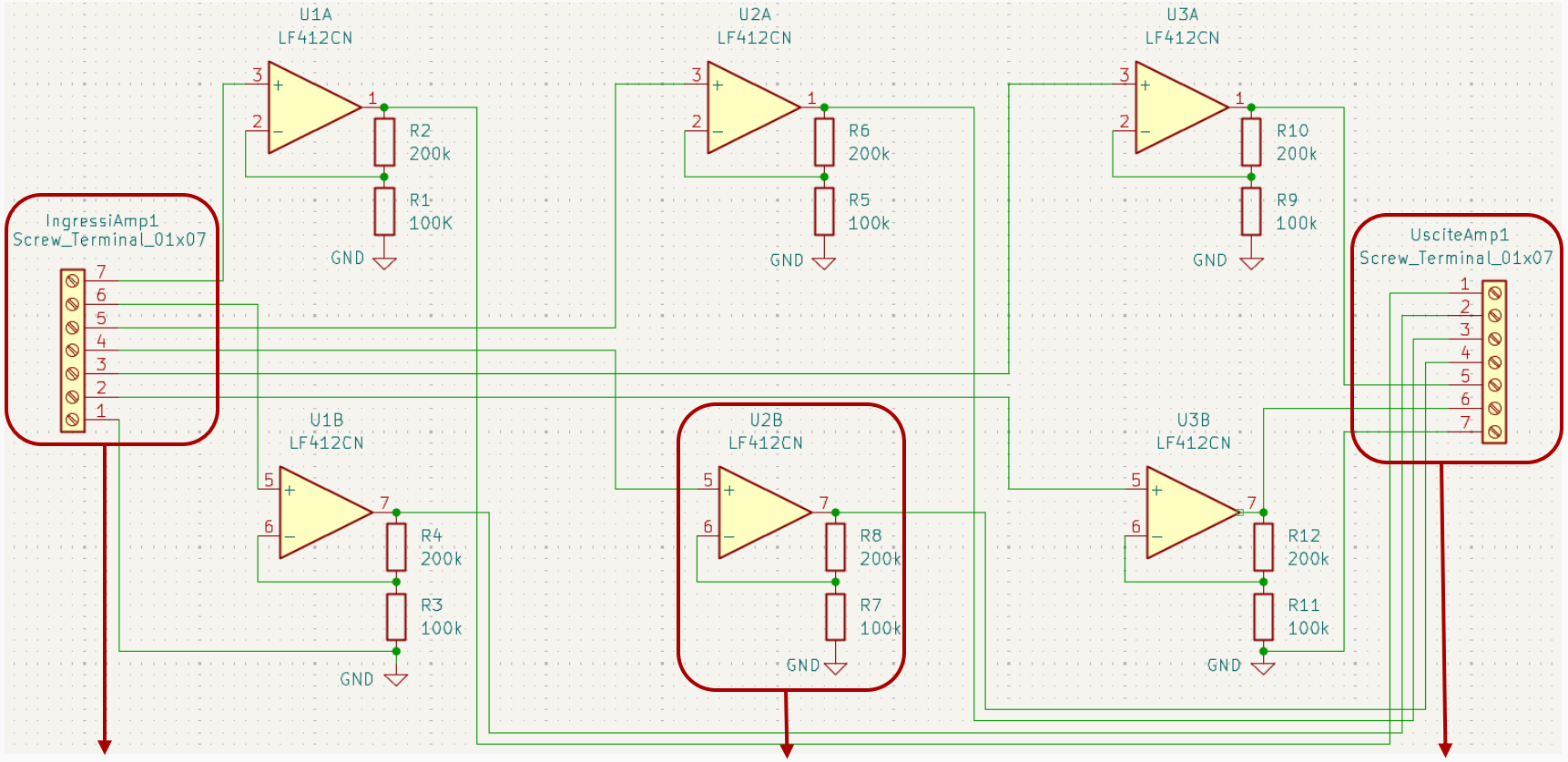
Nuovo Layout: schematico su KiCad



Durante questa fase si procede con:

1) Scelta dei componenti
2) Interconnessioni logiche tra i vari componenti
3) Assegnazione footprint
4) Annotazione schematico
5) Controllo errori tramite ERC

Sezione di amplificazione

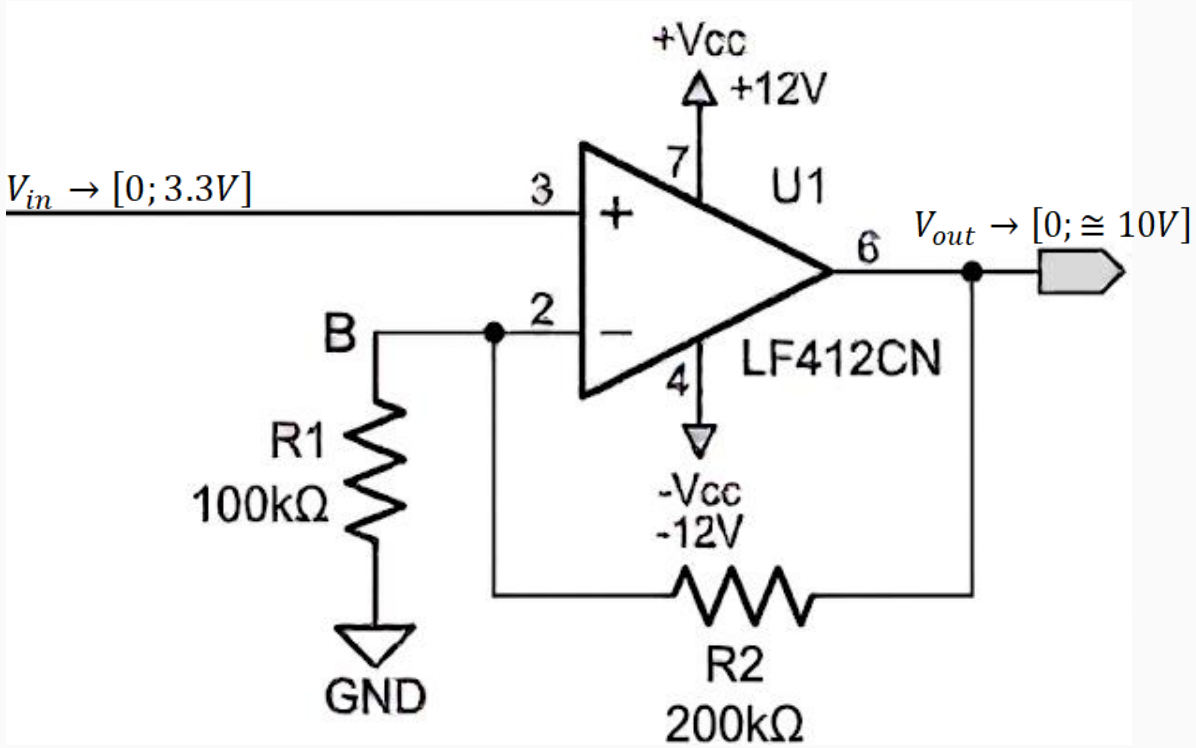


Morsettiera d'ingresso
(segnali dal microcontrollore)

Amplificatore operazionale LF412CN
in configurazione non invertente

Morsettiera d'uscita
(segnali alle elettrovalvole)

Amplificatore operazionale in configurazione non invertente:



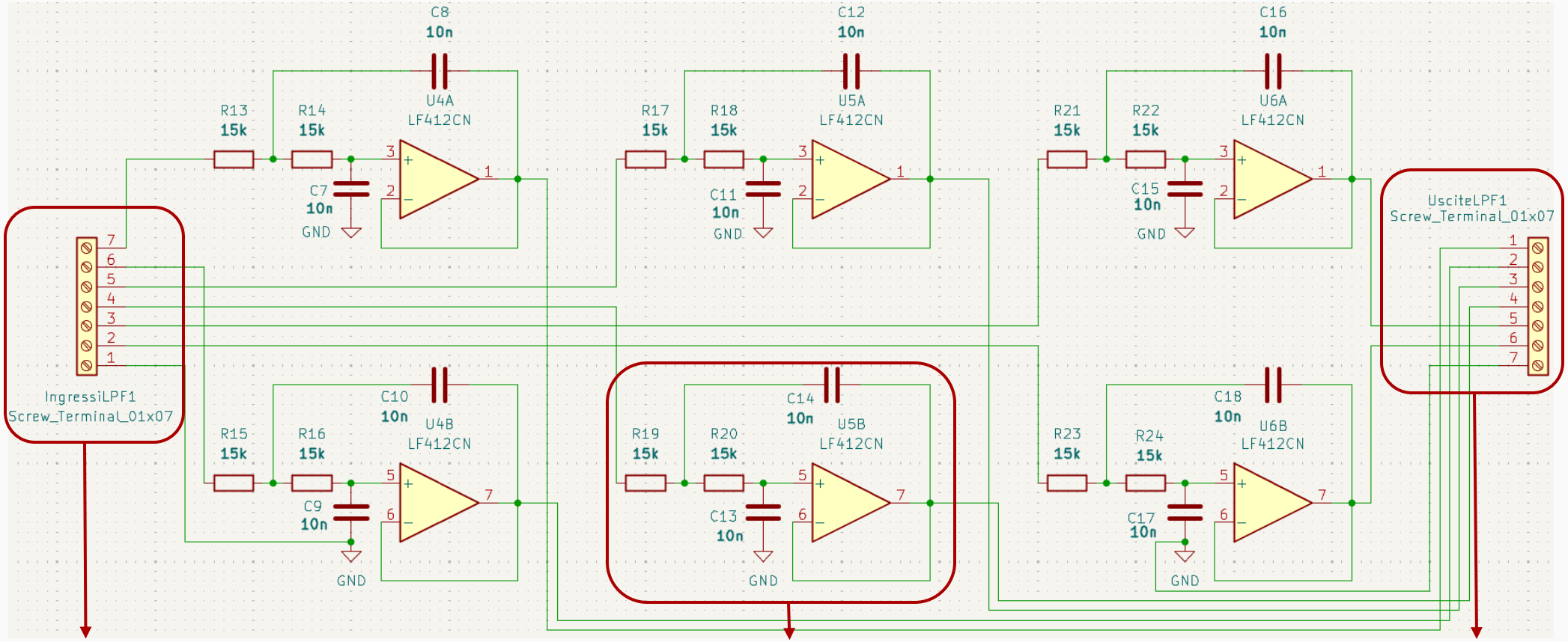
Formula guadagno in tensione per amplificatore operazionale non invertente:

$$A = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$R_5 = 100k\Omega$ $R_6 = 200k\Omega$

$$A = 1 + \frac{200k\Omega}{100k\Omega} = 1 + 2 = 3$$

Sezione di filtraggio: filtri di Butterworth

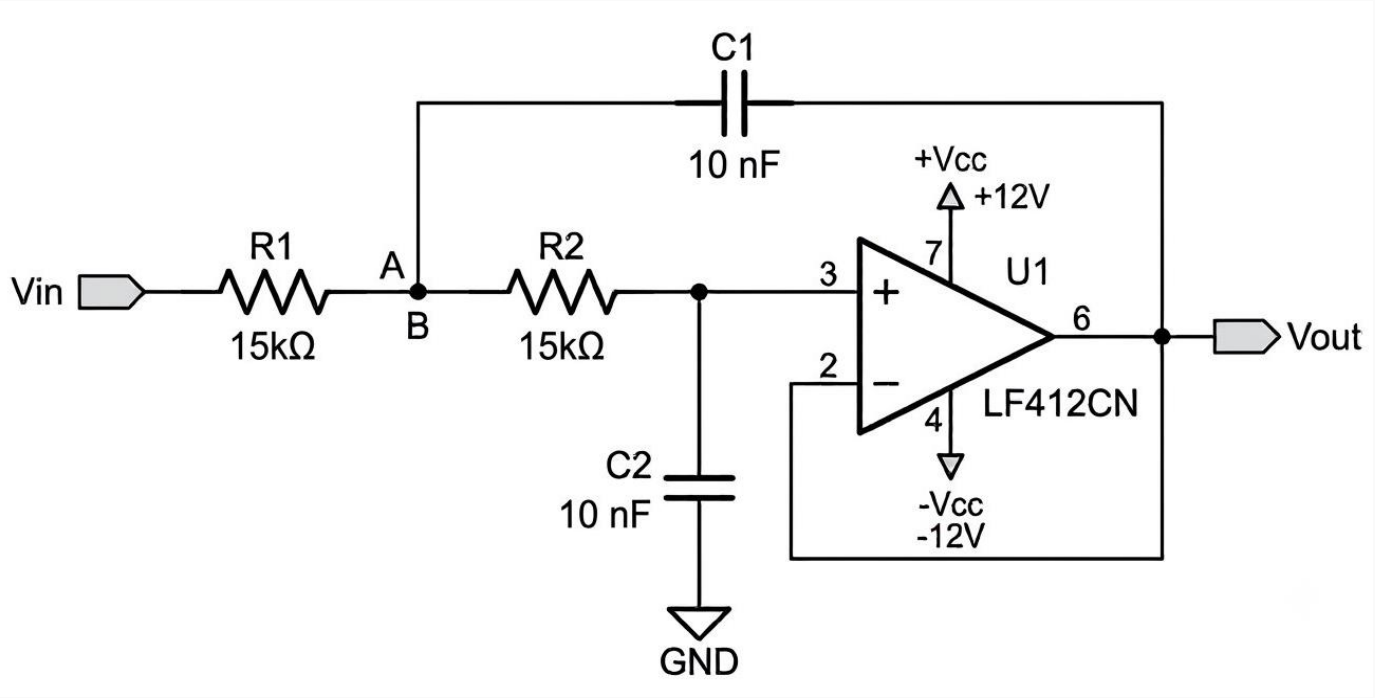


Morsettiera d'ingresso (segnali dai potenziometri)

Implementazione filtro di Butterworth tramite amplificatore operazionale LF412CN

Morsettiera d'uscita (segnali al microcontrollore)

Filtri di Butterworth: formule e funzionamento del filtro passabasso con banda passante a circa 1kHz



$$\omega = \frac{1}{RC} \qquad V_{in} \rightarrow [0; 3.3V]$$

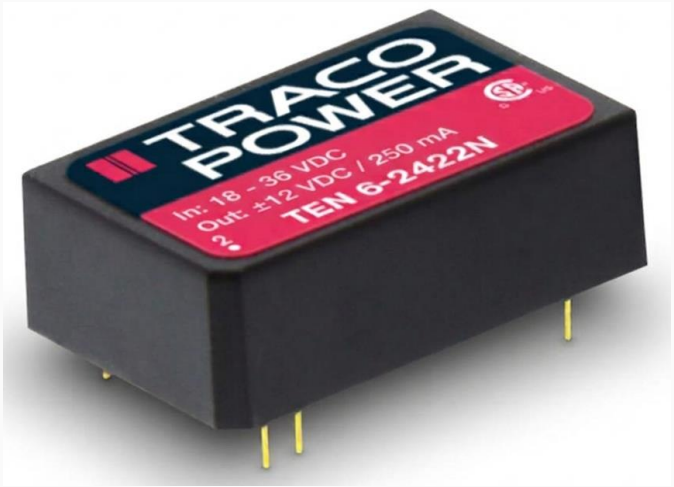
$$\omega_0 = 2\pi f_0 = 2\pi * 1000Hz \cong 6283\, rad/s$$

$$C = 10nF \qquad R = 15k\Omega$$

$$\omega = \frac{1}{10 * 10^{-9} * 15 * 10^3} = \frac{1}{1.5 * 10^{-4}} = 6{,}667 * 10^3\, rad/s$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{6.667 * 10^3}{2\pi} \cong 1061Hz \qquad A = 1$$

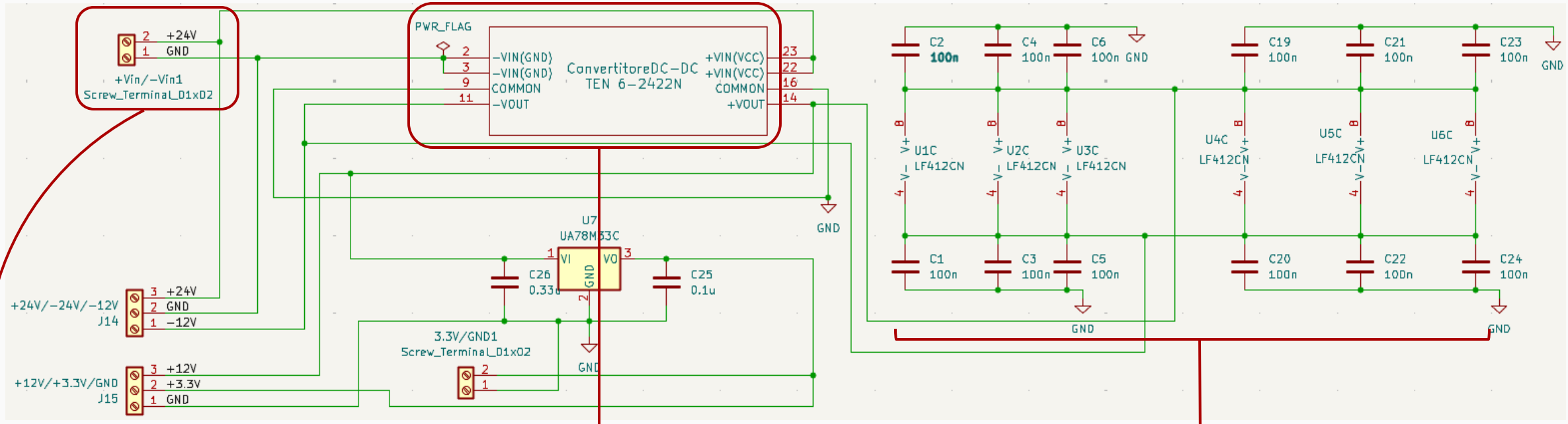
Sezione di alimentazione



Il microcontrollore deve essere alimentato da una tensione di 3.3V. Per far ciò utilizziamo un regolatore di tensione (UA78M33C) per trasformare i +12V in 3.3V

Gli amplificatori operazionali sono alimentati da una tensione di -12V/+12V grazie ad un convertitore DC/DC (TEN 6-2422N) che ha una tensione d'ingresso di 0V/+24V

Sezione di alimentazione

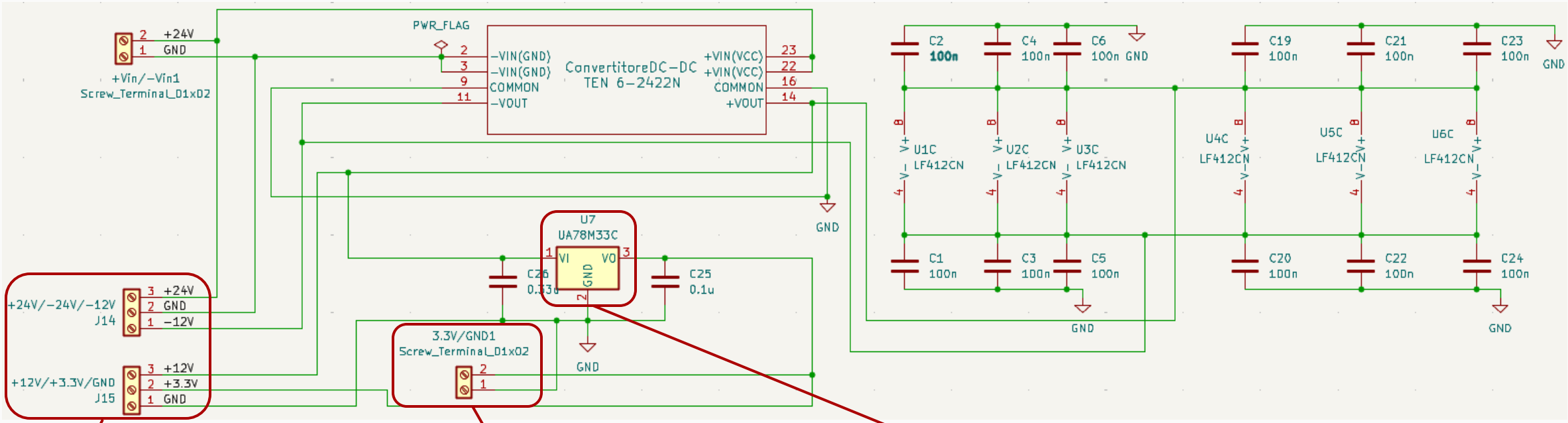


Morsettiera di alimentazione

Convertitore DC-DC: TEN 6-2422N

Alimentazione OpAmp

Sezione di alimentazione



Morsettiere esterne

Morsettiera di alimentazione microcontrollore

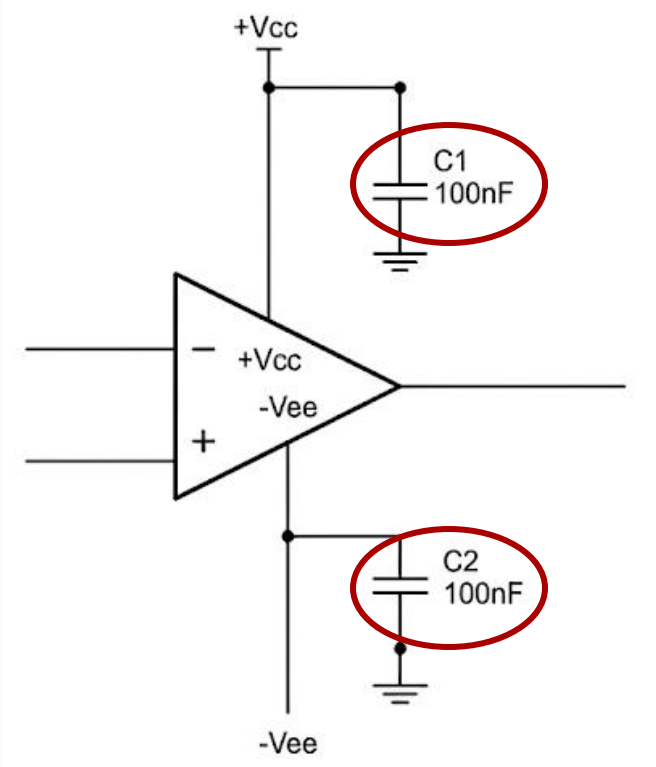
Regolatore di tensione: UA78M33C

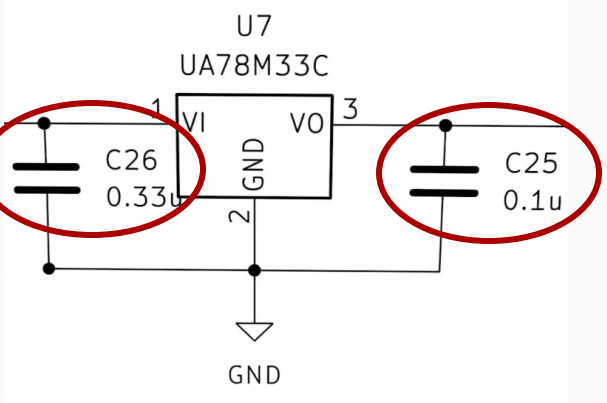
Condensatori di disaccoppiamento

In corrispondenza dell'alimentazione degli opamp sono presenti dei condensatori di bypass le cui funzioni sono:

- Filtraggio rumore
- Fornire corrente istantanea
- Prevenire oscillazioni
- Isolare gli stadi di alimentazione

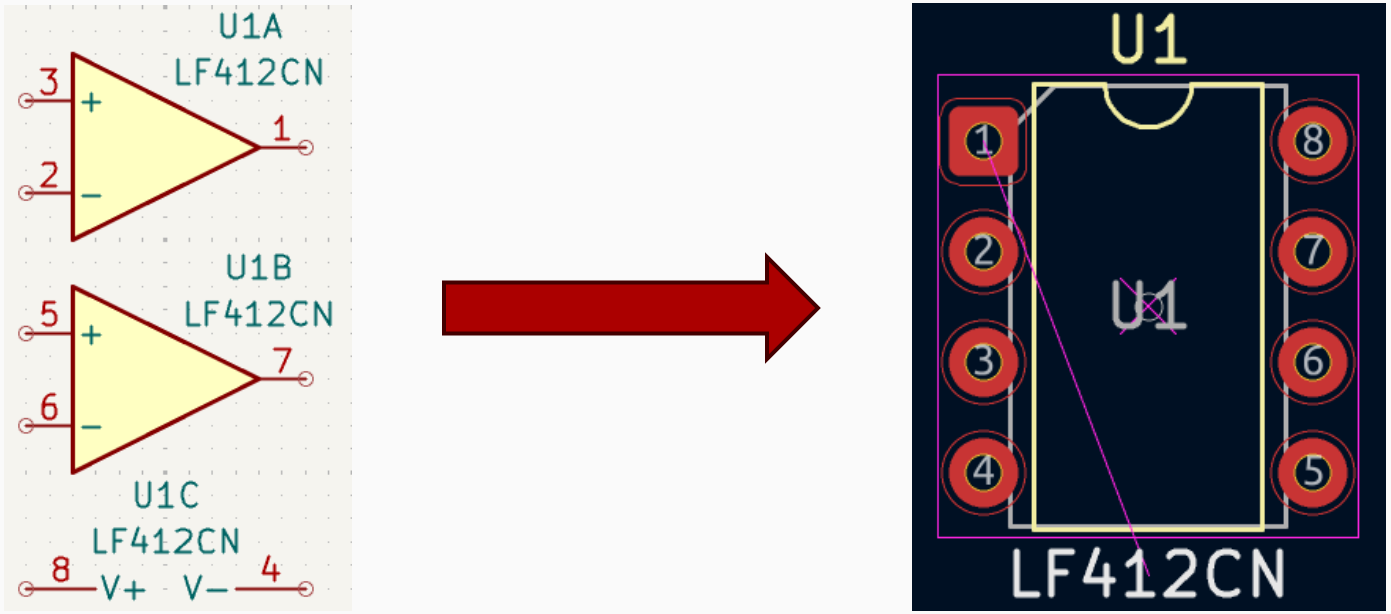
Anche per il regolatore di tensione sono presenti e svolgono un ruolo ancora più indispensabile dato che garantiscono la stabilità dell'anello di regolazione.





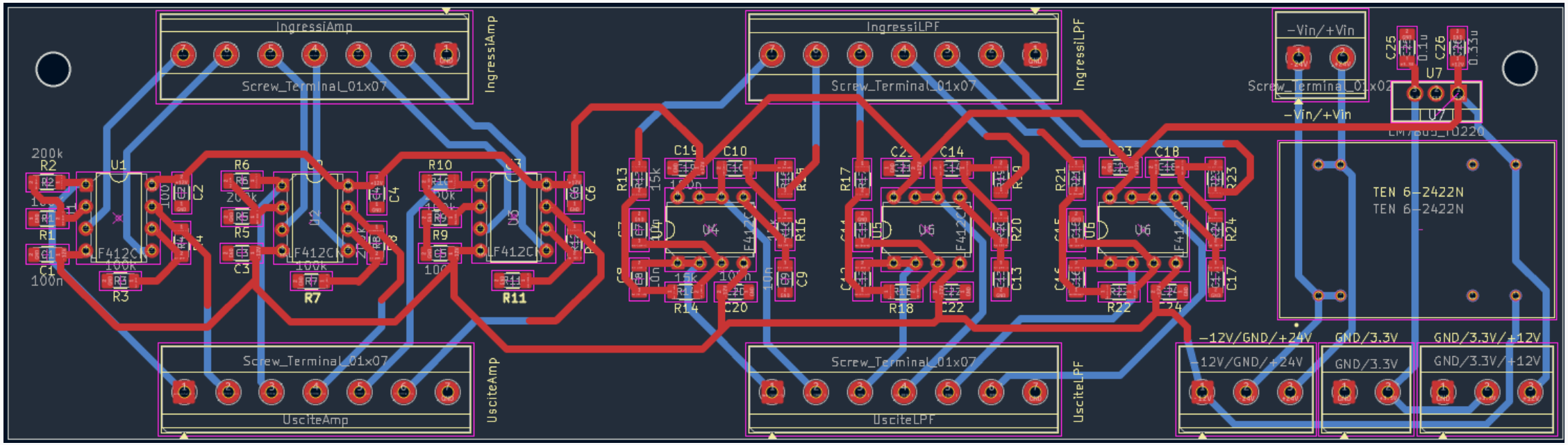
PCB editor

Durante questa fase si progetta il circuito stampato. KiCad in base al footprint assegnato nello schematico associa ad ogni componente l'ingombro reale, il numero di pin e anche i collegamenti logici che devono essere effettuati nella successiva fase di routing.



Routing

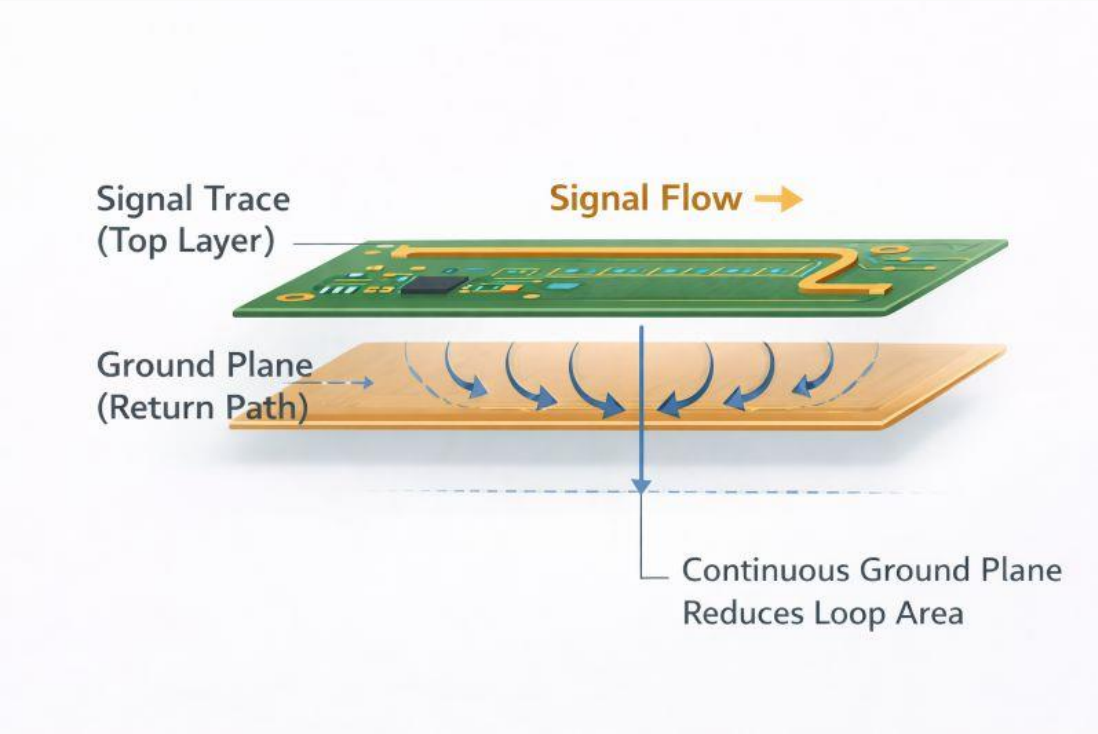
A questo punto è necessario scegliere il numero di strati di rame su cui lavorare (nel nostro caso due) e dimensionare le piste (35mils ~ 1mm). Dopo aver disegnato i fori di fissaggio delle scheda si passa alla disposizione ottimale dei componenti sulla scheda e al routing.



Piani di massa

Una volta tracciate tutte le piste, eccetto quelle che collegano i GND, si tracciano i piani di massa che non sono altro che delle aree di rame collegate al potenziale di massa. I vantaggi di questa soluzione sono molteplici:

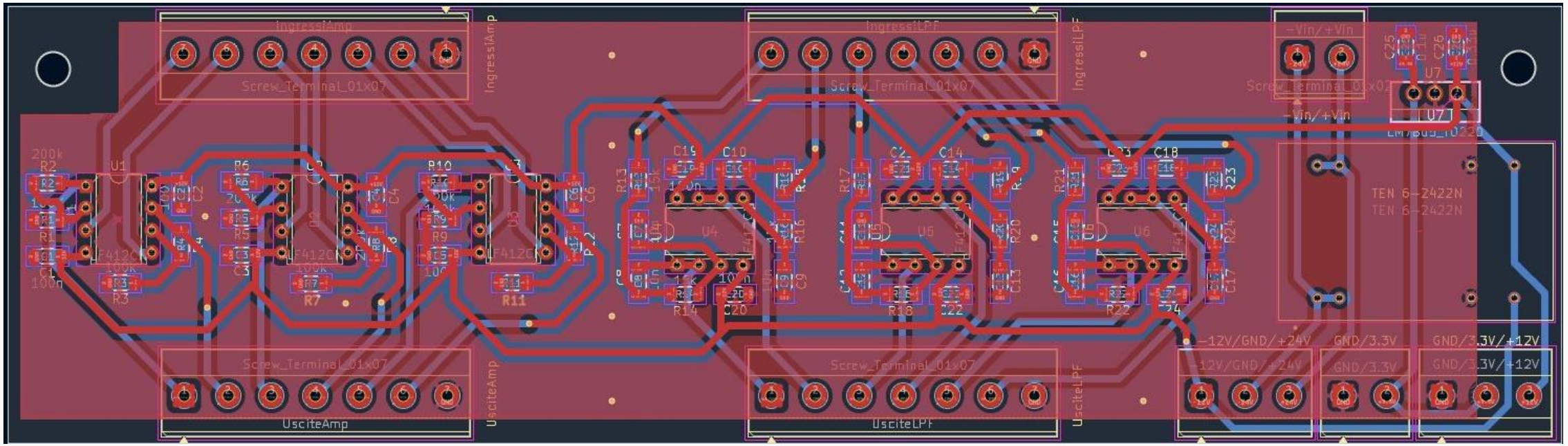
- Fornisce un percorso a bassa impedenza
- Dissipazione del calore
- Riduzione del numero di piste e quindi complessità minore della fase di routing e tempi ridotti nella fase di fresatura della scheda



Vias

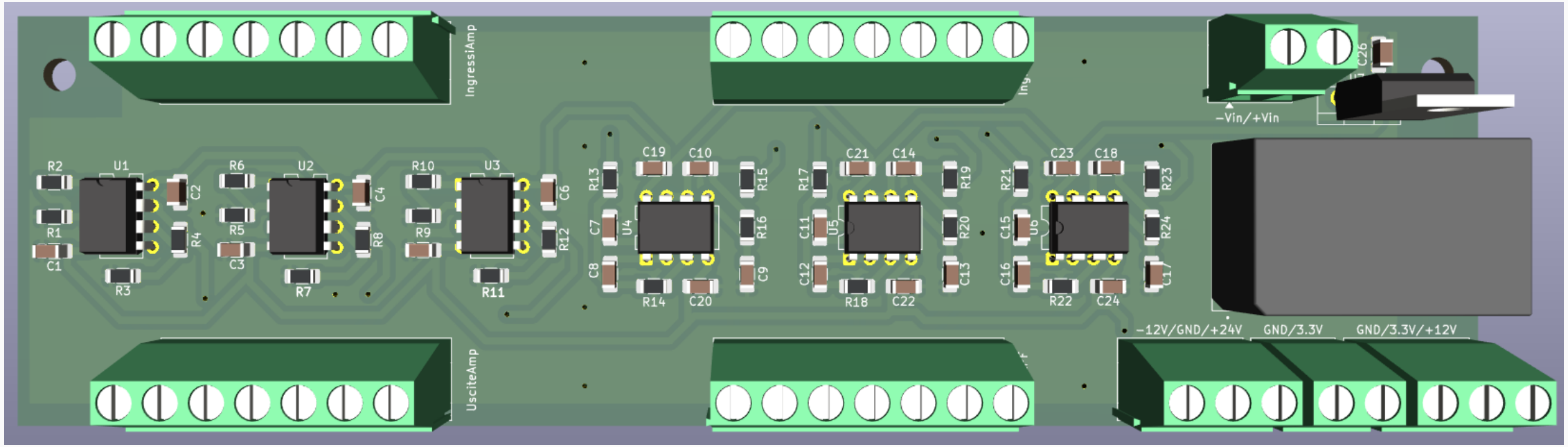
Infine si posizionano i vias (24mils ~ 0.6mm) ovvero dei fori passanti che collegano i due layer della scheda. Le due funzioni principali svolte dai vias sono:

1. Collegamento dei rispettivi piani di massa
2. Possibilità di creare delle piste che in parte percorrono in bottom layer e in parte il front layer



3D Viewer

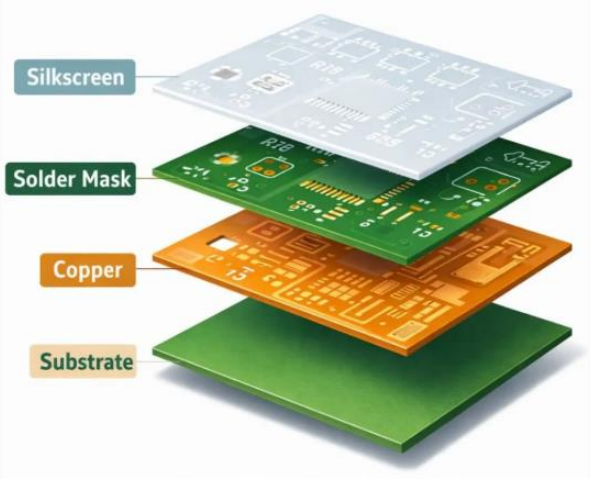
Per un controllo finale è possibile utilizzare il tool "Design Rules Checker" integrato su KiCad e il visualizzatore 3D che permette di vedere un'anteprima della PCB terminata.

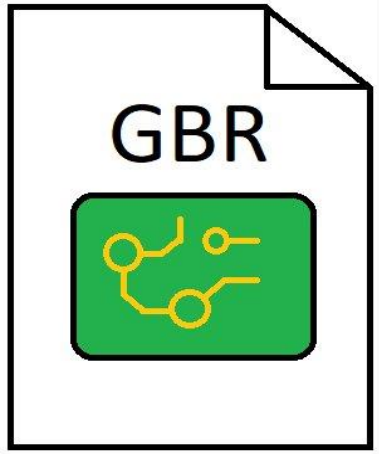


File Gerber

I file Gerber sono il formato standard universale utilizzato nell'industria elettronica per comunicare come deve essere fatto il PCB, contengono le informazioni relative ad ogni layer.

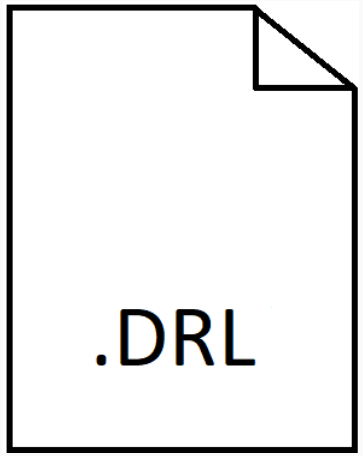
- Silkscreen
- Solder mask
- Gerber top layer
- Gerber bottom layer
- Paste mask



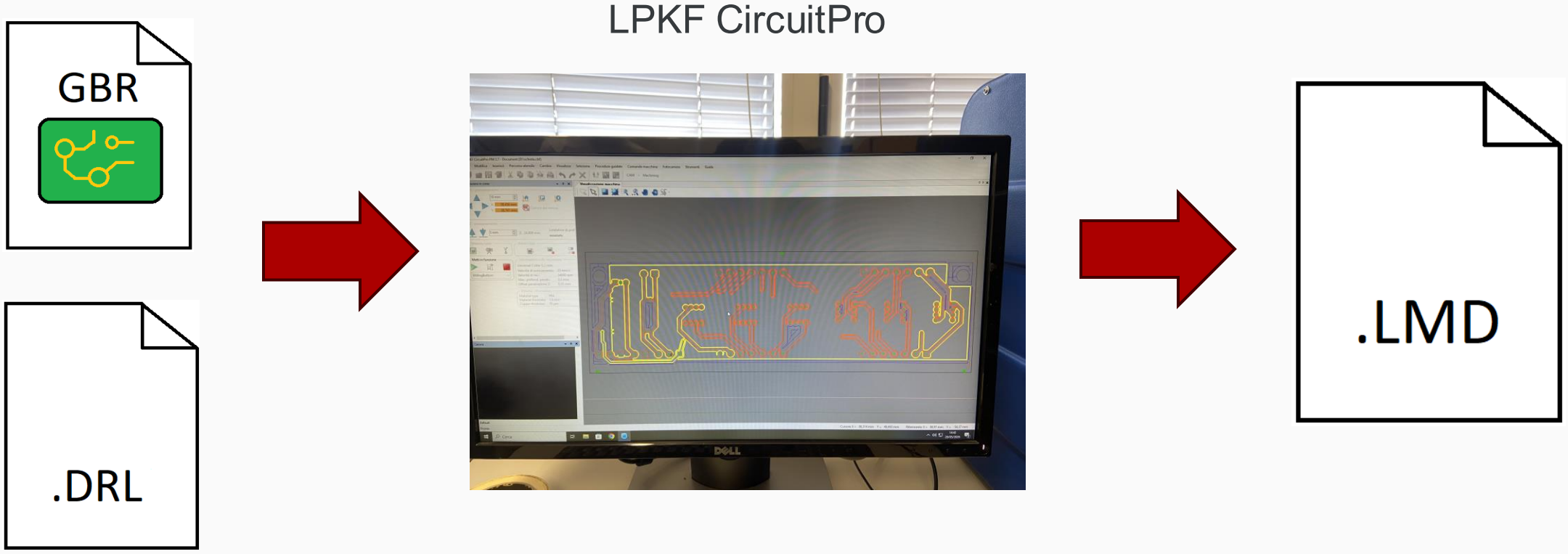


File foratura

I drill files contengono le informazioni riguardanti le coordinate (X,Y) e diametri dei fori da praticare, codici utensile e la tabella delle dimensioni.

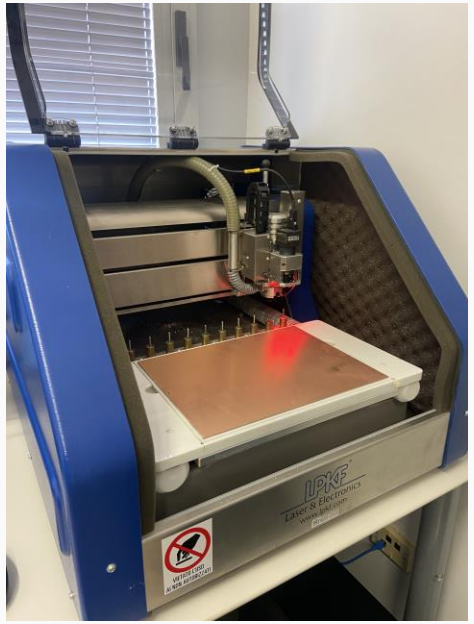


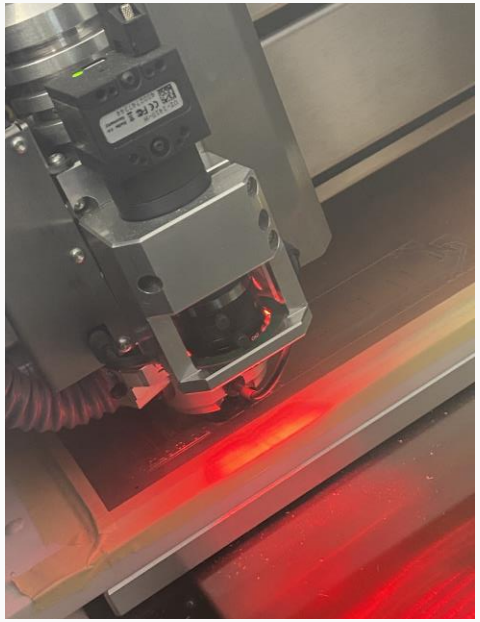
Fresatura PCB

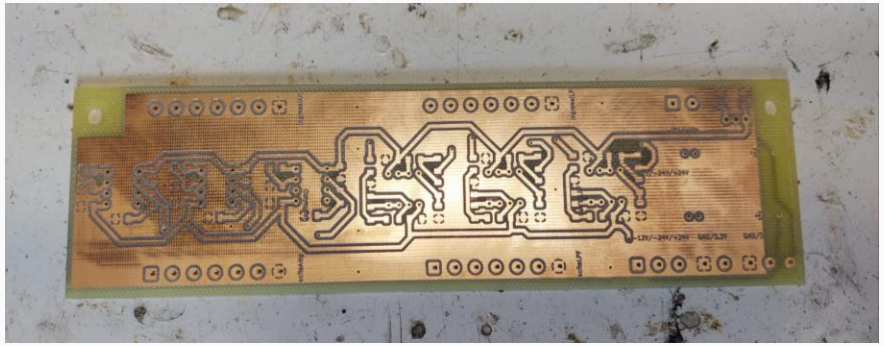


Fresatura PCB

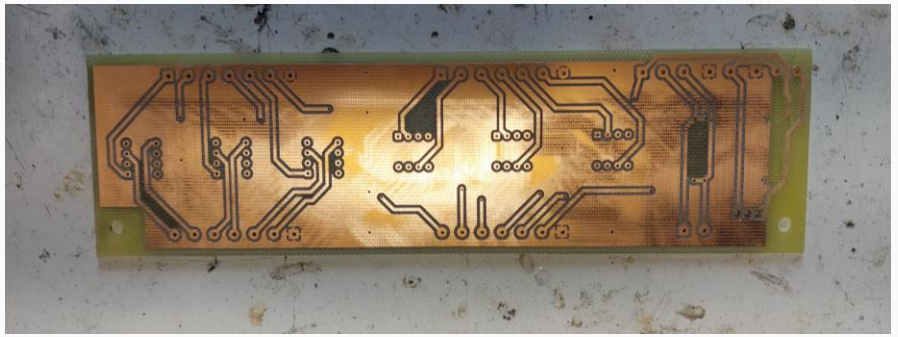
1) Lavorazione Top Layer
2) Ribaltamento e allineamento ottico
3) Lavorazione Bottom Layer







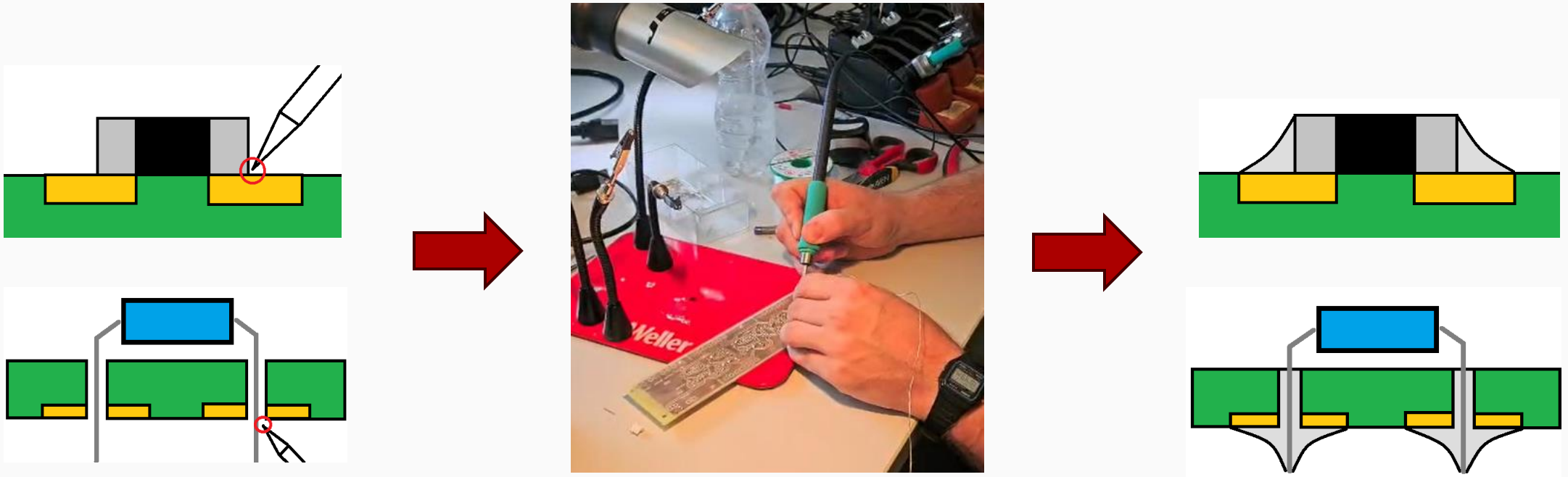
TOP



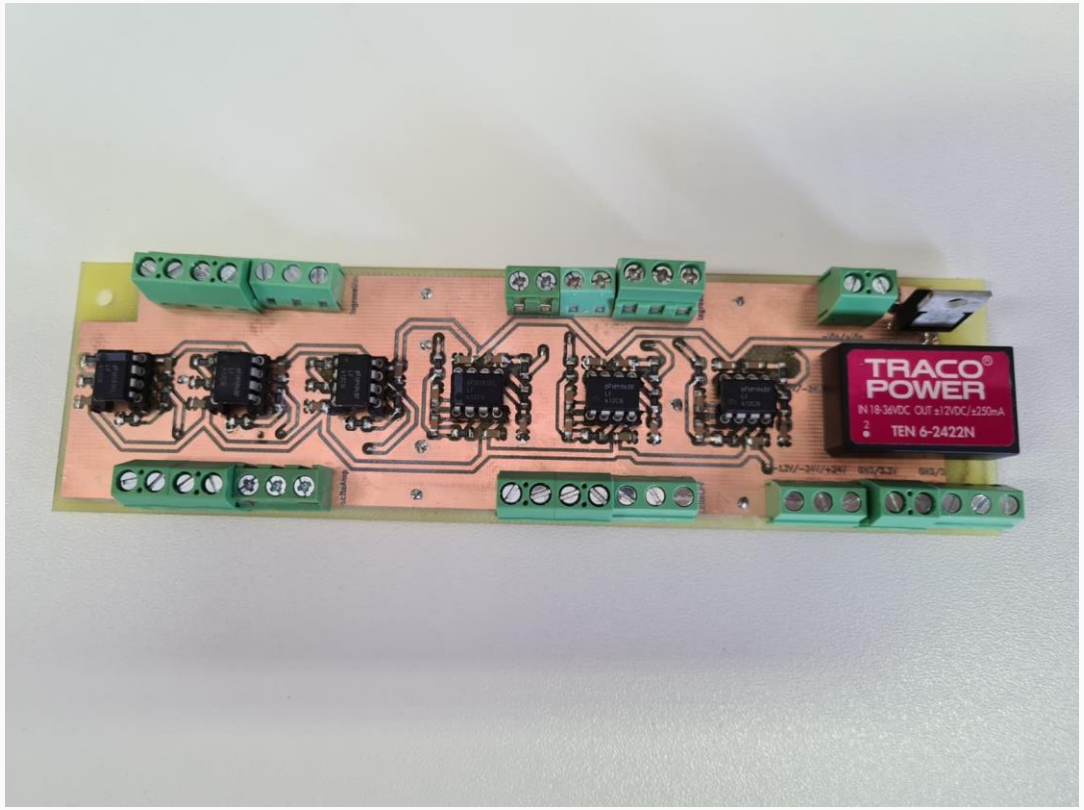
BOTTOM

Saldatura componenti

La saldatura a stagno è la tecnica fondamentale per unire i componenti elettronici ai circuiti stampati, garantendo sia il collegamento elettrico sia il fissaggio meccanico.



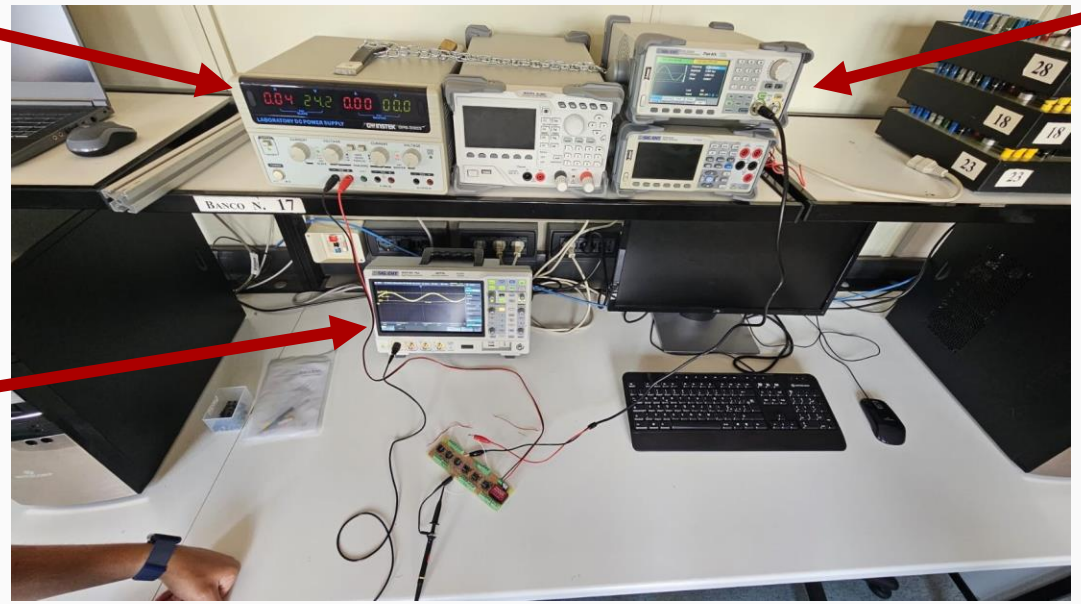
PCB completata



Strumentazione utilizzata per il test funzionale

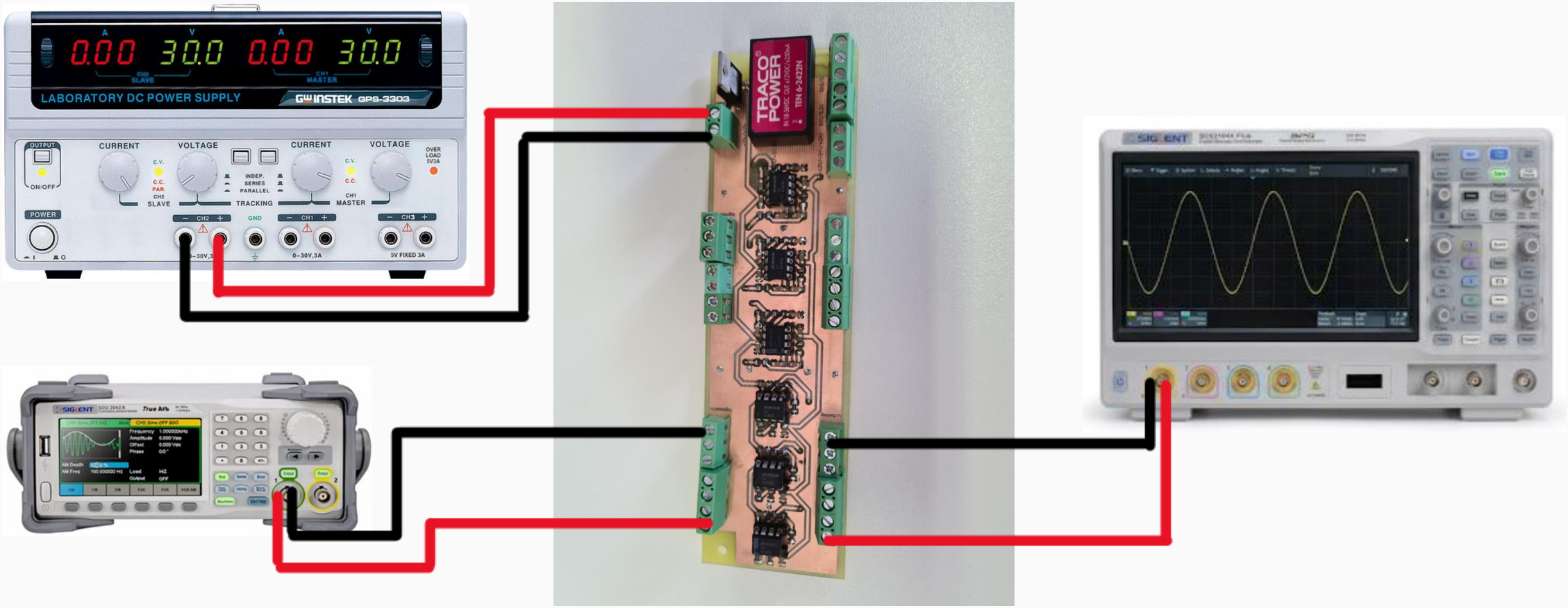
Alimentatore da banco

Oscilloscopio

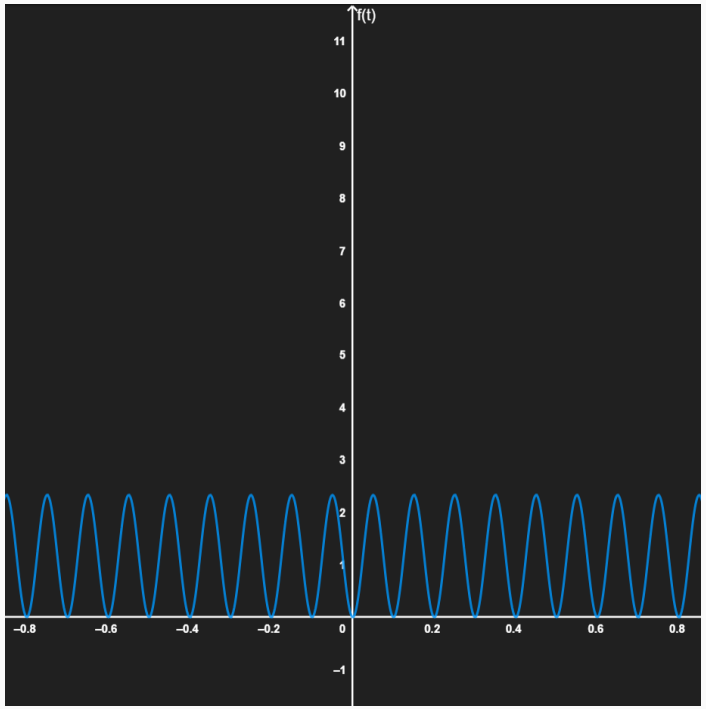


Generatore di funzioni

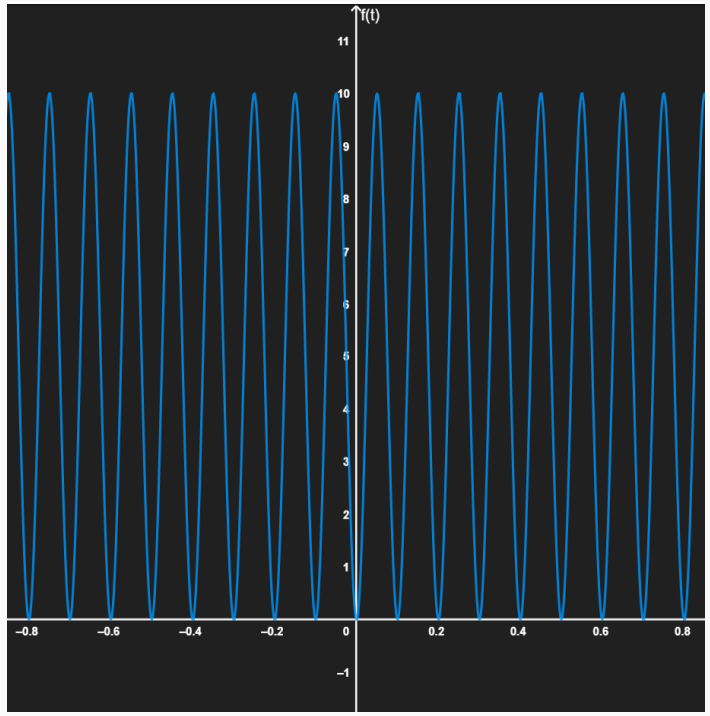
Collegamenti per test condizionamento segnali elettrovalvole



Test condizionamento segnali elettrovalvole

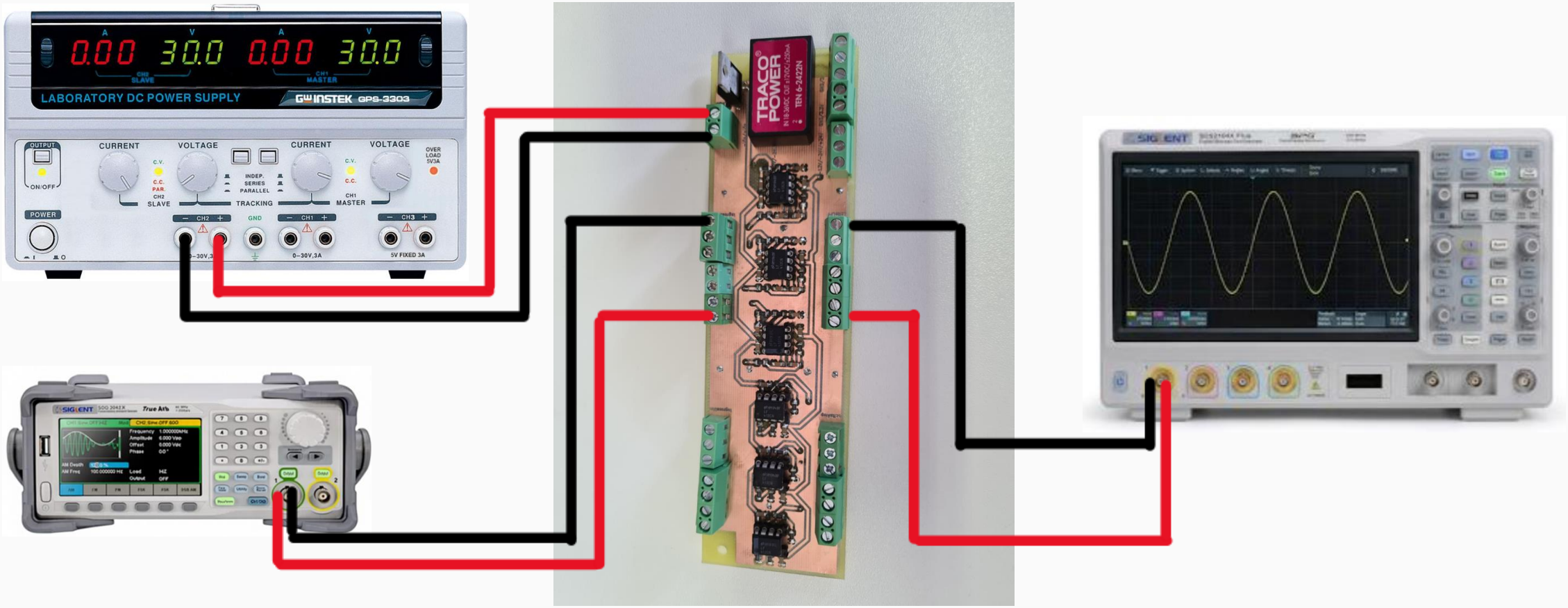


Nel generatore di funzioni diamo in input una sinusoide di ampiezza A=1,65V Voffset=1,65V e f=10Hz

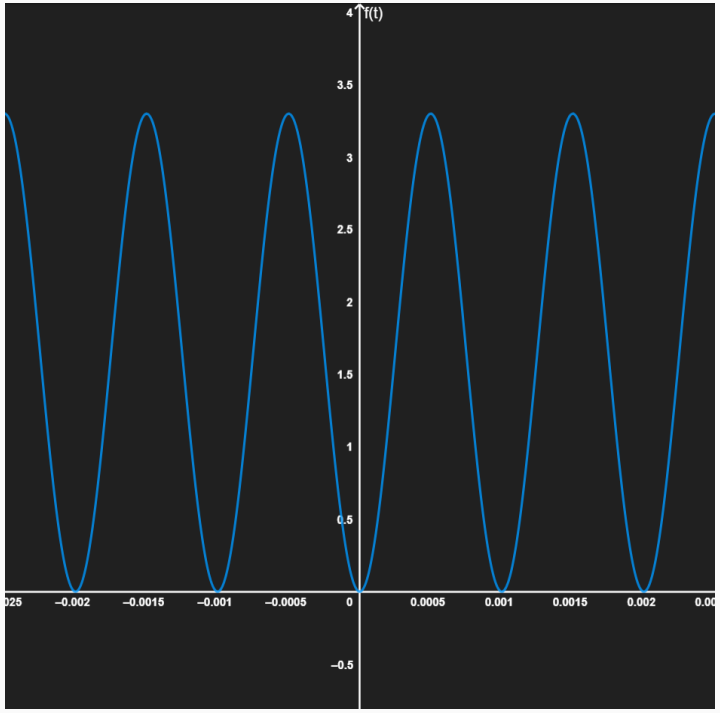


Oscilloscopio misura una sinusoide di ampiezza A=5V Voffset=5V e f=10Hz

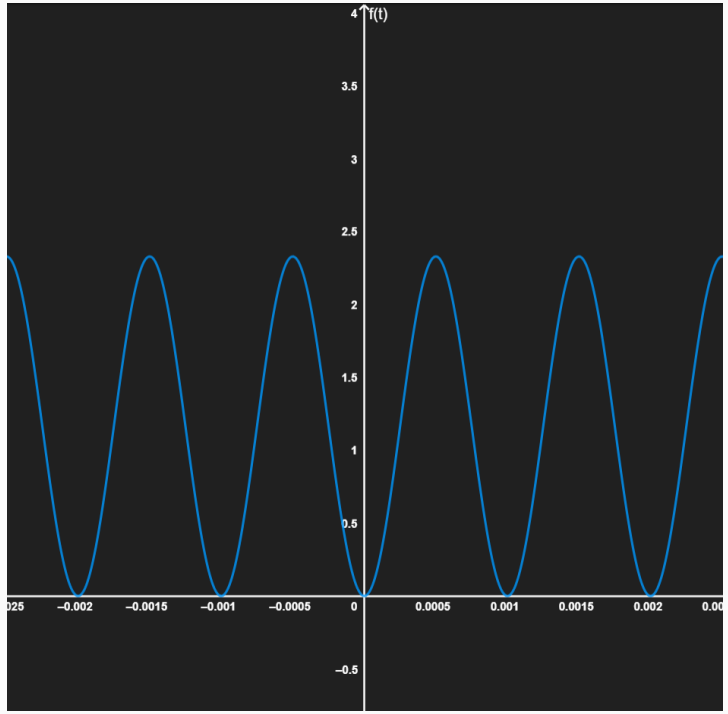
Collegamenti per test filtraggio dei segnali dai potenziometri



Test filtraggio segnali dai potenziometri



Nel generatore di funzioni diamo in input una sinusoide di ampiezza A=1,65V Voffset=1,65V e f=1kHz



Oscilloscopio misura una sinusoide di ampiezza A=1,165V Voffset=1,165V e f=1kHz

UNIVERSITÀ DI PADOVA · 1222

Si ringraziano:

Relatore: Prof. Roberto Oboe
Correlatore: Prof.ssa Giulia Michieletto
Tecnici di laboratorio: Roberto Losco – Andrea Petucco

20 Luglio 2026

UNIVERSITÀ
DI PADOVA