

# Trevi

Lorenzo Perlo

October 2024

## Indice

1	Introduzione	2
2	Funzionamento complessivo	2
3	Materiali	2
4	Sfide	2
5	Elettronica	2
6	L'idea	3
7	Nuova sfida	3
8	Come impedire che la corrente aumenti?	3
9	Requisiti e obiettivi	4
10	Ipotesi di circuito di test	4
11	Il circuito di test	4
12	Componenti	5
13	Simulazione	6
14	Schematico	8
15	Modello 3D	9
16	BOM	9
17	Ottimizzazioni future	10
18	Conclusione	10

## 1 Introduzione

In questo documento si intende descrivere il comportamento di un sistema volto al controllo e test degli elettromagneti presenti nei JF di casa Trevi. Al momento della scrittura, il sistema è ancora in fase di valutazione.

## 2 Funzionamento complessivo

Il JF ha dai quattro agli otto elettromagneti che vengono continuamente azionati per far saltare un piatto appoggiato sopra questi.

Il sistema studiato serve a controllare precisamente le correnti all'interno e i tempi di azionamento degli elettromagneti, preservando le temperature di questi. Per far ciò è meglio dividere il circuito in tre parti:

- potenza, due transistor MOSFET, relativi gate driver e diodi di freewheel per controllare le correnti all'interno dell'elettromagnete;
- analogica, un current sensor per misurare le correnti nel carico e un comparatore per verificare che sia stata superata una certa soglia o meno;
- digitale, per creare il segnale PWM che controllerà accensione e spegnimento dei mosfet.

## 3 Materiali

Gli elettromagneti scelti sono gli N200 di Cei Elettromagneti, con un power rating di 25W a 24V, resistenza serie di 23  $\Omega$  e induttanza di 330 mH. Perciò per rimanere a temperature e potenze consigliate e testate dal produttore la corrente all'interno non dovrebbe superare 1.1 A.

Questi possono essere alimentati a tensioni più grandi per raggiungere potenze maggiori, ma la loro temperatura esterna non deve superare i 100 °C.

La massima forza espressa è di 4 Kg con una corsa massima di 15 mm.

Vengono solo eccitati e una volta diseccitati una molla li riporta alla posizione di partenza, quindi il verso della corrente applicata deve sempre essere lo stesso.

## 4 Sfide

Il problema principale sta nella frequenza con cui questi magneti possono essere controllati attraverso un semplice controllore on-off e evitando allo stesso tempo di non eccedere con la corrente interna per non danneggiare sia l'elettromagnete che il transistor di controllo.

Nel mettere un diodo di freewheel si "salva" il transistor a costo della velocità con cui i magneti "saltano". La velocità è importante perché gli elettromagneti hanno un'inerzia nel movimento meccanico, perciò andare ad alta velocità può in prima approssimazione sembrare controintuitivo, ma il vantaggio del JF risiede proprio nella capacità di controllare quanto forte saltare a seconda del pezzo messo sul piatto.

Quindi controllare la corrente nel carico e la sua frequenza di salto è fondamentale per adattare il salto al tipo di pezzo. Meno corrente significa una corsa più lenta e più corta, ad alta frequenza significa non lasciare il tempo al sistema inerziale di raggiungere la massima escursione, evitando salti spropositati per pezzi piccoli e leggeri. Viceversa per prodotti più pesanti.

Corrente e frequenza sono le due variabili indipendenti principali per il corretto controllo del funzionamento.

## 5 Elettronica

La difficoltà dunque risiede nell'andar veloce pur riuscendo a fare tutta l'escursione a seconda dei pezzi sul piatto, controllando la corrente nel carico per evitare il surriscaldamento dei componenti.

Perciò sono stati scelti mosfet di potenza in grado di resistere alle tensioni in gioco (che saranno nell'ordine dei 48-60 Volt).

## 6 L'idea

L'idea sta nell'alzare la tensione per rendere la dinamica più veloce. L'elettromagnete è in pratica una serie di resistenza e induttanza, perciò mi aspetto che se in un circuito RL applico una tensione, la corrente inizierà a crescere in maniera esponenziale fino ad un massimo dato da:

$$i_{max} = \frac{VDD}{R}$$

Se VDD fosse di 24 Volt, su 23  $\Omega$  nominali, mi aspetto 1.04 Ampere in un tempo molto lungo.

$$i(t) = \frac{VDD}{R}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

dove  $\tau = \frac{L}{R}$ .

Il problema è che a me serve un Ampere per muovere l'induttanza con una certa accelerazione e per superarne l'inerzia, almeno in quelle applicazioni dove il pezzo (non proprio leggero) deve saltare per ribaltarsi in una certa direzione. Tirando giù due calcoli, spiego il motivo della scelta di alzare la tensione:

$$t = -\tau \ln(1 - \frac{I_{nom}}{i_{max}}) = 41.45 \text{ ms} \quad VDD = 24V$$

$$t = -\tau \ln(1 - \frac{I_{nom}}{i_{max}}) = 8.5 \text{ ms} \quad VDD = 48V$$

$$t = -\tau \ln(1 - \frac{I_{nom}}{i_{max}}) = 6.3 \text{ ms} \quad VDD = 60V$$

dove  $I_{nom} = 1A$ .

Quelli calcolati sono i tempi che ci vogliono per raggiungere nel carico una corrente di 1A, da qui poi il magnete inizierà a muoversi con la sua accelerazione (data da forza magnetica, direttamente proporzionale alla corrente, e dalla sua massa).

Se alzo la tensione, posso aumentare la frequenza di salto senza dover abbassare la corrente. Notare che è deleterio anche per carichi leggeri andare ad alta frequenza (il sistema reagisce lentamente) e a bassa corrente, il risultato finale sarebbe un piatto che non si muove in maniera percettibile all'applicazione.

## 7 Nuova sfida

Chiarito il motivo per lavorare a tensione più grande, bisogna controllare che nel carico non scorra troppa corrente. A 48V, può arrivare a 2.09A, con una potenza media dissipata dalla resistenza serie del carico pari a:

$$P = I_{rms}^2 R = 100W$$

Ciò comporta l'aumento delle temperature all'interno dell'elettromagnete e maggiore stress sull'elettronica di controllo non molto distante. Ovviamente i 2A sarebbero raggiunti comunque in un tempo abbastanza lungo per cui se lo switch si spegne prima, il carico non raggiungerà mai quel picco. Ma di nuovo, non bisogna dimenticarsi che per riportare su (o giù a seconda di come funziona la molla) si deve portare la corrente nell'elettromagnete a zero, perciò i tempi di scarica sono un compromesso da considerare (altrimenti il piatto non si muove).

## 8 Come impedire che la corrente aumenti?

Con un current peak controller: sento la corrente che scorre nel carico e se è sopra una certa soglia apro lo switch e inizio a scaricare l'induttanza.

L'effetto finale deve essere un magnete che oscilla (salta) su e giù con un periodo di 40ms (20ms giù e 20 su, 50% di duty cycle) per esempio, ma durante i 20 ms di ON, il transistor viene controllato per avere all'interno dell'induttanza una corrente media settata da una soglia.

Durante l'ON il transistor viene acceso/spento ad una frequenza di 20-100KHz con un duty cycle variabile dato dal circuito di feedback che parte dal sensore di corrente. Quest'applicazione non è nuova (vedasi il DRV110 di Texas Instrument), il documento è pensato puramente a scopo descritto della sua funzione, utile in Trevi per testare diversi elettromagneti (anche con R e L diversi) a seconda dell'applicazione.

## 9 Requisiti e obiettivi

L'obiettivo principale rimane controllare indipendentemente la corrente all'interno del carico e la frequenza di salto. Il controllore non sarà complesso (c'è un buon numero di modi con cui si può fare la stessa cosa) e non avrà requisiti estremi sulla precisione della corrente interna o della frequenza di salto.

Il sistema è usato come test per elettromagneti fruibile a qualsiasi dipendente di Trevi, quindi si vedrà più avanti che molte opzioni che avrebbero potuto ottimizzare il controllo, la potenza dissipata, la sensibilità di misura non sono state implementate in favore di semplicità sia di costruzione/progetto del sistema che di utilizzo. Dunque anche i costi non saranno eccessivi.

Inoltre, se dovesse funzionare particolarmente bene, sarebbe, almeno in linea concettuale, la base per il vero controller industriale. Quindi il sistema serve anche come prova di concetto.

## 10 Ipotesi di circuito di test

Ci sono diversi modi per controllare un carico induttivo, il più famoso è sicuramente il ponte H, circuito che però ha bisogno di un preciso controllo per evitare di stressare i transistor.

Quando un'induttanza viene scollegata dalla rete, la sua corrente non scompare nel nulla ma inizia a spingere nel nodo del transistor che è ora spento. Così facendo si ha una corrente non piccola forzata in un nodo ad alta impedenza (switch aperto), perciò la tensione ai capi del mosfet aumenta fino a valori che possono causare la rottura del mosfet e il sicuro surriscaldamento.

Il ponte H agisce su questa corrente da scaricare via quando il mosfet si chiude aggiungendo altri switch per portare a massa questa corrente. Ma il controllo deve essere preciso, minimo ritardo nell'azionamento degli switch ausiliari e la tensione ai capi del mosfet può averne già causato la rottura. Ma con i driver e l'elettronica di oggi tutto è possibile quindi questa è una soluzione valida. Viene scartata anche perché non si conosce il comportamento degli elettromagneti con una corrente in direzione opposta.

## 11 Il circuito di test

Siccome la scheda servirà meramente per testare gli elettromagneti, caratterizzarli e sceglierli in base all'applicazione, il circuito scelto è un mezzo ponte H con due diodi di freewheel.

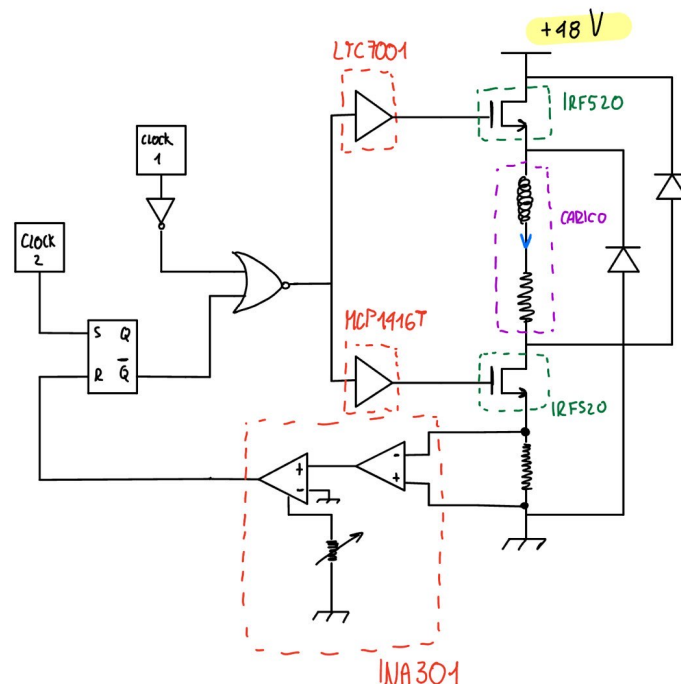


Figura 1: Circuito completo

In questo modo la funzione di protezione è automaticamente offerta dai diodi: non appena le tensioni ai capi dei MOSFET sale dopo il loro spegnimento, i diodi si accendono dando un doppio percorso di scarica della corrente nell'induttanza, garantendo una scarica veloce.

In un circuito come quello in figura 1 i transistor sono accesi e spenti insieme e all'inizio, quando la corrente è nulla nel carico, devono rimanere attivi fino a quando la corrente misurata non supera la soglia stabilita.

I due clock sono a frequenze molto diverse:

- uno deve creare la frequenza "più visibile" all'esterno, ovvero la frequenza di salto dell'elettromagnete (10-30 Hz);
- l'altro creerà una frequenza ben maggiore (20-100 KHz) per accendere e spegnere i mosfet in modo da controllare la corrente dentro l'induttanza durante il periodo di ON del primo clock (e soprattutto mantenere in CCM il carico).

## 12 Componenti

- I mosfet scelti sono degli IRF520, sul loro gate arriverà una tensione di 12V che garantisce resistenze di accensione inferiori ai 270 mΩ. Gestiscono fino a 100V sul loro drain e le correnti del carico sono ben sopportate dai transistor. Sono ottimizzati per accensione e spegnimento veloci.
- I diodi Schottky sono stati scelti in favore dei diodi PIN per la loro velocità di accensione. Alle tensioni di lavoro (48-60V), ci si può risparmiare il discorso riguardante la reverse recovery charge  $Q_{rr}$ .
- La resistenza di sensing per la misura di corrente è stata scelta di 50 mΩ con una tolleranza dello 0.5%, in grado di sopportare correnti ben più alte di quelle raggiungibili persino in caso di cortocircuito. Non può essere scelta troppo grande perché aumenterebbe il consumo di potenza e darebbe una diversa tensione  $V_{gs}$  da quella che si vuole per accendere il transistor in basso, ma neppure troppo piccola visto che misuro la tensione differenziale che si sviluppa ai suoi capi e più le tensioni sono piccole più diventa difficile la scelta dell'amplificatore (difficile trovare amplificatori con offset inferiori a 1mV)
- L'amplificatore che misura la corrente è l'INA301 di Texas Instrument. Integra al suo interno un comparatore con soglia attraverso un pin su cui vengono imposti 80  $\mu$ A, quindi piazzando un potenziometro si possono scegliere soglie pari a

$$V_{th} = R_{pot} * 80\mu A$$

L'amplificatore funziona a 5V e può lavorare con common mode tra 0 e 36V, perciò la resistenza di sense può essere messa sotto il source del transistor in basso. Ha un basso offset, decine di  $\mu$ V, ma si è limitati dall'offset del comparator nell'ordine di mV. Il suo guadagno è di 20, quindi con 1A su 50mΩ mi aspetto che la sua uscita (ingresso del comparatore) sarà di 1V. L'uscita alert è in transparent mode ed è compatibile con CMOS input, è open collector ed è invertita (quindi prima di andare nel flip-flop SR deve passare per un inverter CMOS).

- I gate CMOS scelti per la realizzazione della parte digitale a 5V sono della famiglia MC140 di Onsemi.
- L'oscillatore scelto per creare i due clock è l'icm7556 di Analog Devices. Essendo un 555 CMOS, non ho problemi di spike sulla linea a 5V e posso raggiungere un perfetto duty cycle del 50% con una resistenza e una capacità. Anche qui dei potenziometri sono usati al posto della resistenza, non verrà cambiato il duty cycle ma direttamente la frequenza di operazione. Un clock sarà veloce e un clock sarà lento cambiando le capacità.
- Dalla parte digitale si arriva con un livello di tensione di 5V, non abbastanza per accendere i transistor oltre la soglia voluta. Perciò servono due gate driver, uno low side (MCP1415/16 di Microchip) e uno high side (LTC7004 di Analog Devices). In particolare l'high side deve essere in grado di tenere chiuso il mosfet in alto continuamente, perché all'inizio per raggiungere la corrente voluta gli switch vanno messi tenuti chiusi entrambi fino a quando la corrente non raggiunge la soglia stabilita. Per questo oltre alla capacità di bootstrap da 1  $\mu$ F è stato scelto anche un diodo a bassa corrente di leakage per garantire il corretto funzionamento del charge pump interno al gate driver. LTC7004 lavora fino a 60V.

## 13 Simulazione

Il software scelto è PowerSim. Nella simulazione sono stati considerati mismatch tra i due gate driver, un non perfetto current sensor e un timer con un duty cycle non del 50%. Per il resto, essendo una simulazione, i risultati vanno presi con le pinze, ma aiutano a farsi un'idea del funzionamento, almeno della parte digitale.

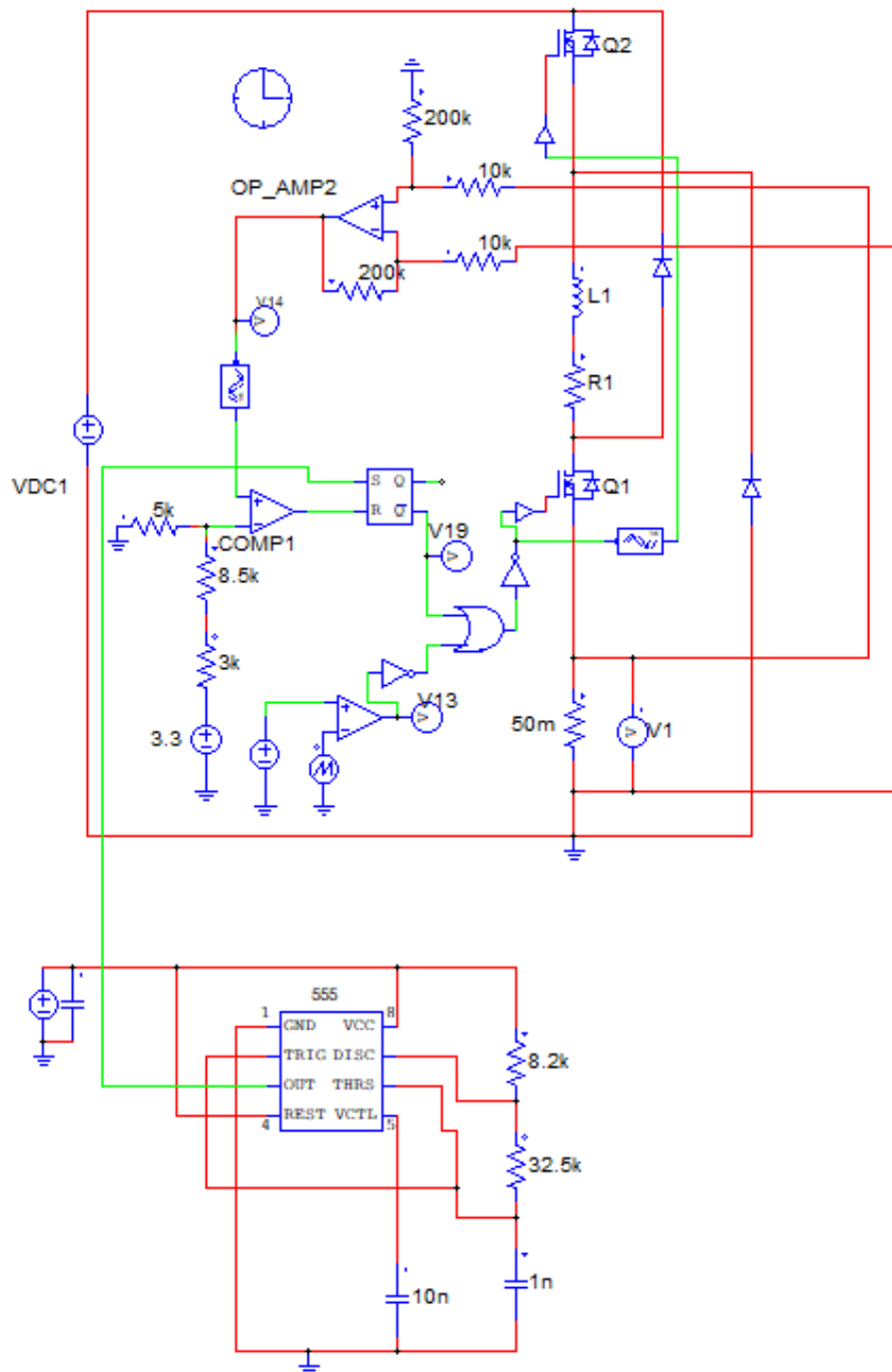


Figura 2: Circuito simulato

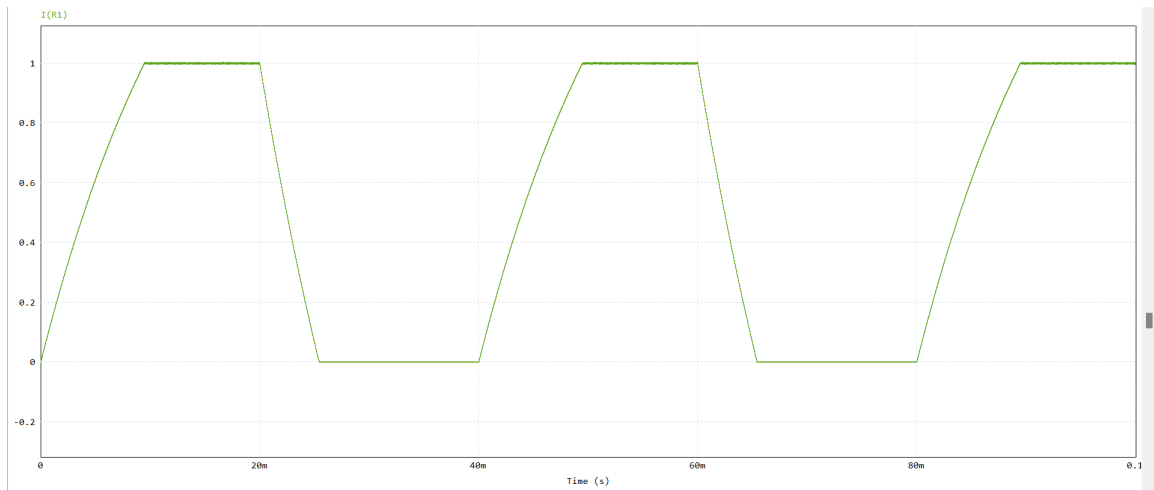


Figura 3: Corrente nel carico

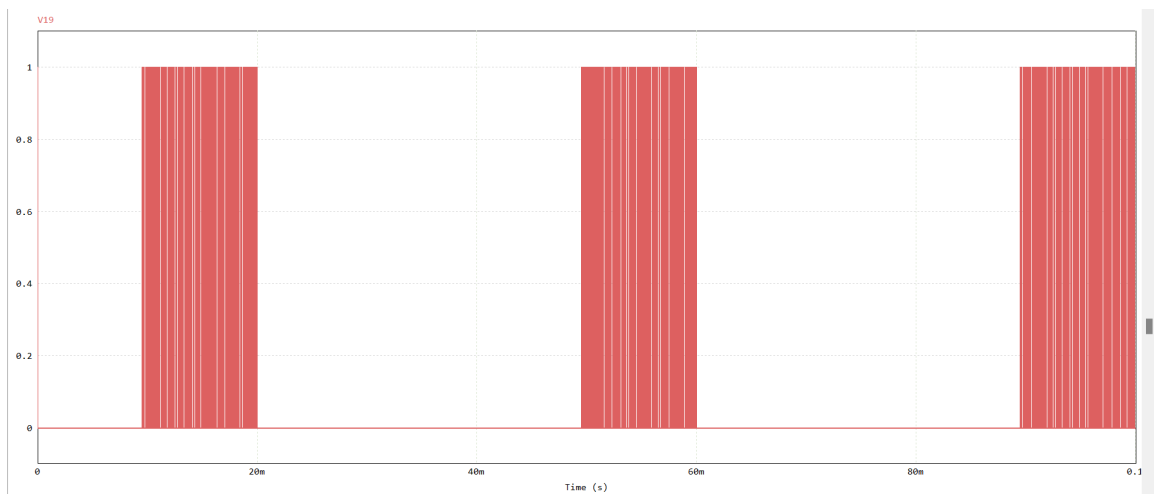


Figura 4: PWM quando ON

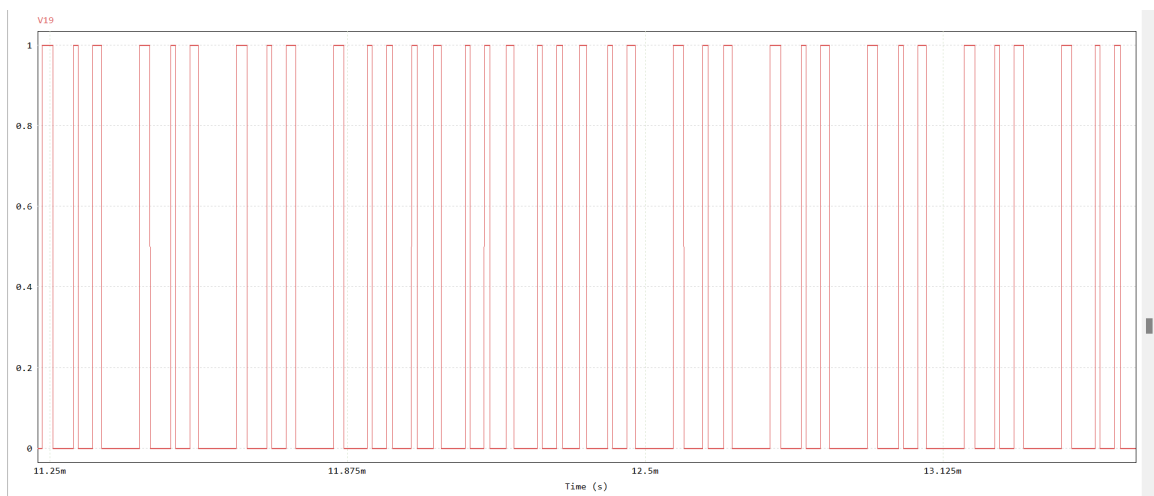


Figura 5: PWM zoom

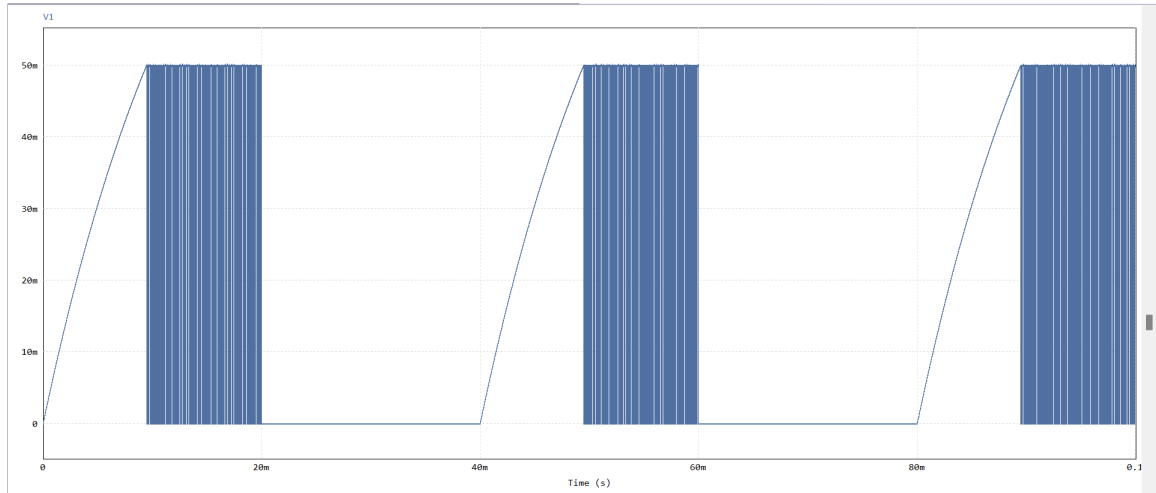


Figura 6: Tensione misurata sui 50 mΩ

Nelle figure si vedono i risultati delle simulazioni con frequenza di salto a 25 Hz e corrente interna da 1A. Durante il periodo di ON, la frequenza di switch dei transistor è pari a 20 KHz.

Ovviamente in base alle applicazioni questi tre parametri si possono cambiare. In più non si sa da questi grafici come il carico risponderà, ma è il motivo del progetto di questo sistema. Anche un completo malfunzionamento del sistema di test, ci darà comunque la direzione verso altre soluzioni.

## 14 Schematico

Il software usato per il PCB layout è KiCAD. Notare l'aggiunta di un converter 12-5V per alimentare la logica digitale e l'INA301. In più quattro header pin servono a misurare le frequenze generate dai due timer per calibrarli con un oscilloscopio esterno.

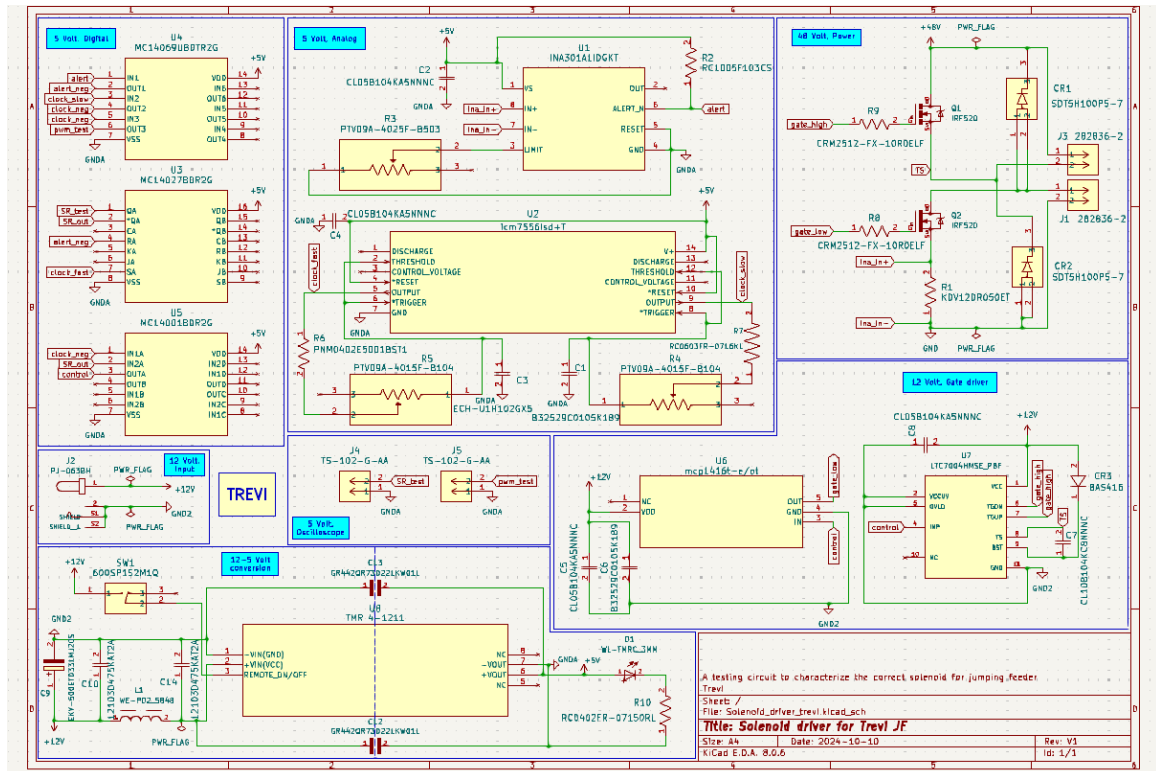


Figura 7: Schematico Kicad



Varie capacità e induttanze sono state aggiunte per debouncing dell'alimentazione come consigliato dai datasheet e garantire compatibilità elettromagnetica classe A. Gli alimentatori esterni da 48V e 12V vanno scelti in base alle correnti che devono essere in grado di fornire.

## 15 Modello 3D

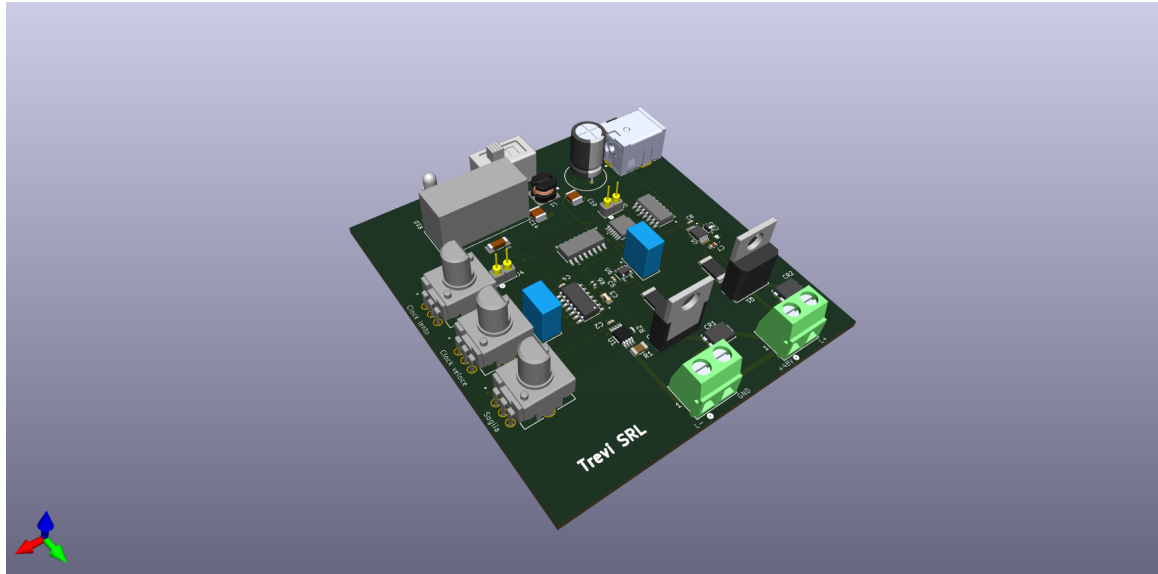


Figura 8: 82mm x 75.5mm

## 16 BOM

Part number	Shop	Shop Number	Name	Description	Datasheet	Link to shop	Price per unit	Quantity	Plus	Price per quantity
MC14161E/OT	DigiKey	MC14161E/OTDKR-ND	MC14161E/OT	Low-Side Gate Driver IC 1	<a href="https://www120.com">https://www120.com</a>	<a href="https://www.digikey.it/en">https://www.digikey.it/en</a>	\$0.74	1		\$0.74
LTC7004HSE#PBF	DigiKey	LTC7004HSE#PBF-ND	LTC7004	High-Side Gate Driver IC 1	<a href="https://www.analog.com">https://www.analog.com</a>	<a href="https://www.digikey.it/en">https://www.digikey.it/en</a>	\$9.71	1		\$9.71
BA5416.115	DigiKey	1727-4807-6-ND	BA5416.115	Diode 75 V 200mA Surface	<a href="https://assets.nex">https://assets.nex</a>	<a href="https://www.digikey.it/en">https://www.digikey.it/en</a>	\$0.15	1		\$0.15
CL10B104K03NNNC	DigiKey	1276-4807-6-ND	CL10B104K03NNNC	0.1 µF ±10% 100V Ceram	<a href="https://mm.digike">https://mm.digike</a>	<a href="https://www.digikey.it/en">https://www.digikey.it/en</a>	\$0.10	1		\$0.10
CRM2512-FX-10REL	DigiKey	CRM2512-FX-10RELFDN	CRM2512-FX-10REL	10 Ohms ±1% 2W Chip R	<a href="https://www.bourn">https://www.bourn</a>	<a href="https://www.digikey.it/en">https://www.digikey.it/en</a>	\$0.56	1	<a href="https://electr">https://electr</a>	\$0.56
IRFS20PBF-BE3	DigiKey	742-IRFS20PBF-BE3-ND	IRFS20	N-Channel 100 V 9.2A (T	<a href="https://www.vishay">https://www.vishay</a>	<a href="https://www.digikey.it/en">https://www.digikey.it/en</a>	\$1.37	2		\$2.74
SDT5H100P5-7	DigiKey	SDT5H100P5-7DICT-ND	SDT5H100P5-7	DIODE SCHOTTKY 100V	<a href="https://www.diode">https://www.diode</a>	<a href="https://www.digikey.it/en">https://www.digikey.it/en</a>	\$0.52	2		\$1.04
MC1406UBDTR2G	DigiKey	MC1406UBDTR2G0SDK	MC1406UB	IC INVERTER 6CH 1-IMP	<a href="https://www.onse">https://www.onse</a>	<a href="https://www.digikey.it/en">https://www.digikey.it/en</a>	\$0.98	1		\$0.98
MC14027BDR2G	DigiKey	MC14027BDR2G0SDKH	MC14027BDR2G	Flip Flop 2 Element JK Ty	<a href="https://www.onse">https://www.onse</a>	<a href="https://www.digikey.it/en">https://www.digikey.it/en</a>	\$0.64	1		\$0.64
MC14001BDR2G	DigiKey	MC14001BDR2G0SCT-NI	MC14001B	NOR Gate IC 4 Channel 1	<a href="https://www.onse">https://www.onse</a>	<a href="https://www.digikey.it/en">https://www.digikey.it/en</a>	\$0.55	1		\$0.55
INA301A1IDGKT	DigiKey	296-43928-6-ND	INA301A1IDGKT	Current Monitor Regulator	<a href="https://www.ti.co">https://www.ti.co</a>	<a href="https://www.digikey.it/en">https://www.digikey.it/en</a>	\$4.11	1		\$4.11
PTV09A-401SF-B104	DigiKey	PTV09A-401SF-B104-ND	PTV09A-401SF-B104	100k Ohm 1 Gang Linear	<a href="https://www.bourn">https://www.bourn</a>	<a href="https://www.digikey.it/en">https://www.digikey.it/en</a>	\$0.90	2		\$1.80
PTV09A-402SF-B503	DigiKey	PTV09A-402SF-B503-ND	PTV09A-402SF-B503	50k Ohm 1 Gang Linear 1	<a href="https://www.bourn">https://www.bourn</a>	<a href="https://www.digikey.it/en">https://www.digikey.it/en</a>	\$1.02	1		\$1.02
PNM0402E5001B5T1	DigiKey	541-1901-1-ND	PNM0402E5001B5T1	5kOhms ±0.1% 0.05W, 1/	<a href="https://www.vishay">https://www.vishay</a>	<a href="https://www.digikey.it/en">https://www.digikey.it/en</a>	\$1.20	1		\$1.20
ECA-2WHG010	DigiKey	P5872-ND	ECA-2WHG010	1 µF 450 V Aluminum Ele	<a href="https://industrial">https://industrial</a>	<a href="https://www.digikey.it/en">https://www.digikey.it/en</a>	\$0.49	3		\$1.47
832529C0109K189	DigiKey	495-2470-2-ND	832529C0109K189	1 µF Film Capacitor 40V	<a href="https://product.id">https://product.id</a>	<a href="https://www.digikey.it/en">https://www.digikey.it/en</a>	\$0.52	2		\$1.04
CL05B104K03NNNC	DigiKey	1276-4720-6-ND	CL05B104K03NNNC	0.1 µF ±10% 25V Ceramic	<a href="https://mm.digike">https://mm.digike</a>	<a href="https://www.digikey.it/en">https://www.digikey.it/en</a>	\$0.10	5		\$0.50
EOH-U1H103GK5	DigiKey	PCF12960KR-ND	EOH-U1H103GK5	1000 µF Film Capacitor 3	<a href="https://industrial">https://industrial</a>	<a href="https://www.digikey.it/en">https://www.digikey.it/en</a>	\$0.53	1		\$0.53
EOH-U1H103GK5	DigiKey	PCF12960KR-ND	EOH-U1H103GK5	10000 µF Film Capacitor	<a href="https://industrial">https://industrial</a>	<a href="https://www.digikey.it/en">https://www.digikey.it/en</a>	\$0.63	2	Optional	\$1.26
TMR-4-1211	DigiKey	1951-TMR4-1211-ND	TMR-4-1211	Isolated Module DC-DC C	<a href="https://www.trace">https://www.trace</a>	<a href="https://www.digikey.it/en">https://www.digikey.it/en</a>	\$15.47	1		\$15.47
12103D475KAT2A	DigiKey	478-KM32JRS1E475KUJ	12103D475KAT2A	4.7 µF ±10% 25V Ceramic	<a href="https://datasheet">https://datasheet</a>	<a href="https://www.digikey.it/en">https://www.digikey.it/en</a>	\$0.51	1		\$0.51
GR4402FR30221KW01L	DigiKey	490-6104-6-ND	GR4402FR30221KW01L	220 µF ±10% 2000V (2X)	<a href="https://search.myl">https://search.myl</a>	<a href="https://www.digikey.it/en">https://www.digikey.it/en</a>	\$1.09	1		\$1.09
744774168	DigiKey	732-1277-6-ND	744774168	68 µH Unshielded Drum C	<a href="https://www.wes-e">https://www.wes-e</a>	<a href="https://www.digikey.it/en">https://www.digikey.it/en</a>	\$1.87	1		\$1.87
EKY-500ETD331M20S	Mouseer	661-EKY500ETD331M2ZC	EKY-500ETD331M20S	330µF 50 Volt Aluminium	<a href="https://eu.mouse">https://eu.mouse</a>	<a href="https://www.mouse.com/E">https://www.mouse.com/E</a>	\$0.72	1		\$0.72
PJ-063BH	DigiKey	CP-063BH-ND	PJ-063BH	Power Barrel Connector	<a href="https://www.sams">https://www.sams</a>	<a href="https://www.digikey.it/en">https://www.digikey.it/en</a>	\$1.98	1	<a href="https://www.s">https://www.s</a>	\$1.98
282836-2	DigiKey	A88076-ND	282836-2	2 Position Wire to Board	<a href="https://www.te.co">https://www.te.co</a>	<a href="https://www.digikey.it/en">https://www.digikey.it/en</a>	\$0.60	2		\$1.20
600SP1S2M1Q	Mouseer	612-600SP1S2M1Q	600SP1S2M1Q	Slide Switch SPDT Throu	<a href="https://configured">https://configured</a>	<a href="https://www.mouse.it/P">https://www.mouse.it/P</a>	\$2.59	1		\$2.59
TS-102-G-AA		612-TS-102-G-AA-ND	TS-102-G-AA	2 Position Header Conne	<a href="https://mm.digike">https://mm.digike</a>	<a href="https://www.digikey.it/en">https://www.digikey.it/en</a>	\$0.70	3	1 is optional	\$2.10
ERA-2AER022X	DigiKey	P2-0KDCCTND	ERA-2AER022X	2kOhms ±0.1% 0.063W	<a href="https://industrial">https://industrial</a>	<a href="https://www.digikey.it/en">https://www.digikey.it/en</a>	\$0.18	1		\$0.18
ICM7556SD+T	DigiKey	ICM7556SD+TDKR-ND	ICM7556SD+T	555 Type, Timer/Oscillator	<a href="https://www.analog">https://www.analog</a>	<a href="https://www.digikey.it/en">https://www.digikey.it/en</a>	\$8.26	1		\$8.26
KDV12DR050ET	DigiKey	273-KDV12DR050ETDKR	KDV12DR050ET	50 mOhms ±0.5% 0.5W, 1	<a href="https://www.abnro">https://www.abnro</a>	<a href="https://www.digikey.be/en">https://www.digikey.be/en</a>	\$0.38	1		\$0.38
151031V506000	DigiKey	732-5015-ND	151031V506000	Blue 470nm LED Indicatio	<a href="https://www.wes-e">https://www.wes-e</a>	<a href="https://www.digikey.it/en">https://www.digikey.it/en</a>	\$0.26	1		\$0.26
151031V506000	DigiKey	732-5008-ND	151031V506000	Green 568nm LED Indicat	<a href="https://www.wes-e">https://www.wes-e</a>	<a href="https://www.digikey.it/en">https://www.digikey.it/en</a>	\$0.16	1		\$0.16
RC0402FR-07150RL	DigiKey	311-150RLDKR-ND	RC0402FR-07150RL	150 Ohms ±1% 0.063W, 1/	<a href="https://www.yage">https://www.yage</a>	<a href="https://www.digikey.it/en">https://www.digikey.it/en</a>	\$0.10	1		\$0.10
RC0603FR-07432RL	DigiKey	311-432HRTFR-ND	RC0603FR-07432RL	432 Ohms ±1% 0.1W, 1/1	<a href="https://www.yage">https://www.yage</a>	<a href="https://www.digikey.it/en">https://www.digikey.it/en</a>	\$0.10	1		\$0.10
RC100SF103CS	DigiKey	1276-3431-6-ND	RC100SF103CS	10 kOhms ±1% 0.063W, 1	<a href="https://mm.digike">https://mm.digike</a>	<a href="https://www.digikey.it/en">https://www.digikey.it/en</a>	\$0.10	1		\$0.10
RC0603FR-0716KL	DigiKey	311-16.0KRDKR-ND	RC0603FR-0716KL	16 kOhms ±1% 0.1W, 1/1	<a href="https://www.yage">https://www.yage</a>	<a href="https://www.digikey.it/en">https://www.digikey.it/en</a>	\$0.10	1		\$0.10
TOTAL										\$67.31

Figura 9: Lista della spesa

## 17 Ottimizzazioni future

- Inutile elencare la quantità di modi possibili per rendere la lettura di corrente più efficiente, sensibile e robusta a rumore e offset. Il metodo scelto qui esemplifica di molto il sistema e lo rende meno costoso, ma anche meno preciso (accettabile, infatti il controllo della corrente è più volto a farla muovere in un certo range, senza considerare troppo importanti variazioni di decine di mA). Interessanti i senseFET, verranno valutati in futuro.
- L'isolamento tra i circuiti non è stata presa in considerazione dato che i gate driver, i più vicini agli switch dove si concentrano le interferenze, possono sopportare le tensioni in gioco. Ma soprattutto perché la grande induttanza degli elettromagneti riduce di molto la dinamica delle correnti in gioco, riducendo la possibilità di emissioni radiative. Inoltre in caso di switch danneggiati e chiusi, la loro resistenza più quella del carico impedirebbero la costruzione di un common mode elevato ai capi dell'INA301.
- I timer e i gate CMOS usati possono essere tutti portati in un microcontrollore. Dato che un JF è di solito costituito da 4-8 elettromagneti e questo circuito va dunque replicato per ognuno, un microcontrollore sarebbe inadatto a rispondere delle variazioni in ognuno in tempo reale. La scelta sarà su un FPGA per implementare i gate con un PLL per la creazione dei clock. Il microcontrollore può servire come collegamento al mondo esterno e per impostare dinamicamente soglia e frequenza. Qui diventerà cruciale l'uso di un digital isolator tra logica e parte ad alta potenza per il corretto funzionamento delle CPU.
- Con un microcontrollore si potrebbe introdurre un ulteriore variabile per il controllo del salto degli elettromagneti, ovvero il duty cycle del clock lento. Anche qui bisognerà testare sul campo cosa significa un DC del 10% contro uno del 70% per il carico.
- La soglia e le frequenze sono stabilite da potenziometri. In futuro da DAC, per sopperire alle vibrazioni del macchinario.
- Un sensore di temperatura attaccato alla carcassa del carico diminuirà la corrente se la temperatura è troppo vicina ai rate massimi specificati dal produttore. Qui il microcontrollore sarà cruciale, come in tutti i collegamenti con il mondo esterno.
- Con l'elettronica di oggi, non si esclude la possibilità di importare direttamente sulla scheda la conversione da 48V a 12V e poi da 12 a 3.3V (pensando a microcontrollori e fpga sulla scheda). I requisiti dell'alimentatore 220V AC - 48V DC saranno però maggiori, siccome dovrà fornire correnti piuttosto elevate anche ai gate driver (per il momento gestite da un alimentatore separato a 12V e 5A).
- Level shifter per il collegamento con elettronica a 24V (I/O PLC, telecamere e robot industriali).
- Le dimensioni totali dovranno essere compatibili con il quadro elettrico in cui il controllore verrà installato (e soprattutto il calore andrà dissipato). Il modello 3D è quindi una prima versione.

## 18 Conclusione

Sarà la prima scheda PCB custom progettata internamente, perciò siamo pronti ad eventuali errori, i quali sarebbero comunque le migliori risposte alle nostre domande.

Grazie per aver letto. Se ci sono incomprensioni e/o errori di battitura e domande al riguardo, contattatemi a [lorenzoperlo@gmail.com](mailto:lorenzoperlo@gmail.com).