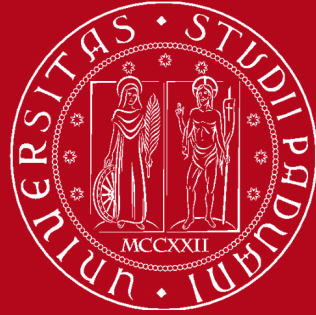


UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



1. Introduzione.
2. Dimensionamento.
3. Misura di peso.
4. Misura periodo.
5. Stima dell'inerzia.
6. Analisi degli errori.
7. Codice.
8. Conclusioni.



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



Corso di Laurea in Ingegneria Meccatronica

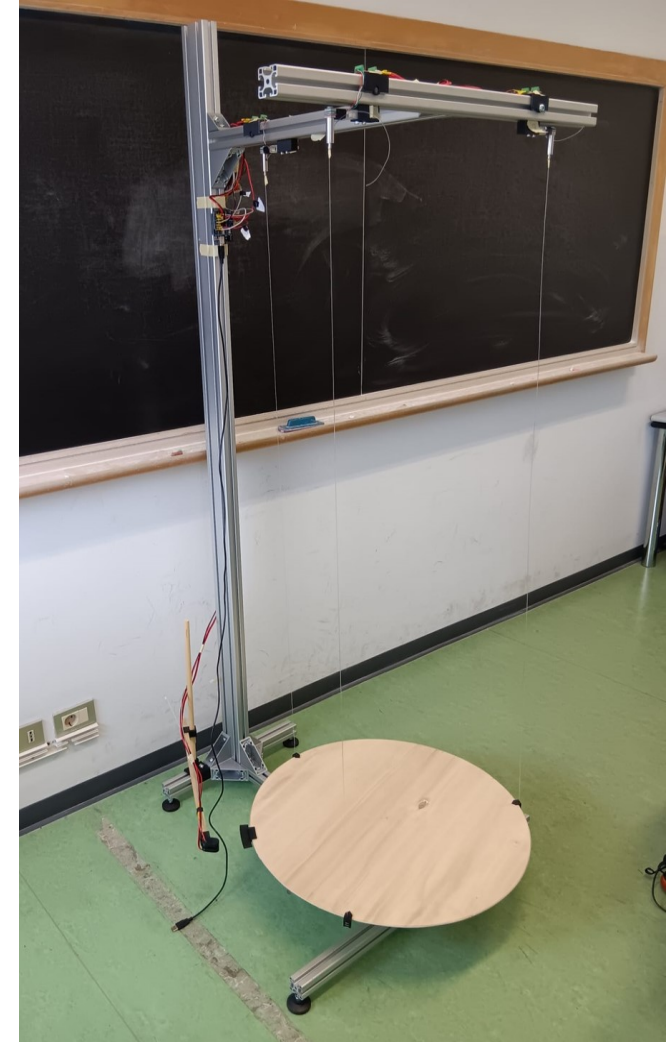
Realizzazione di un pendolo trifilare per la stima dei momenti d'inerzia

Introduzione

Obiettivo

L'obiettivo di questo progetto è il dimensionamento e la realizzazione di un pendolo trifilare, dispositivo che permette la stima del momento d'inerzia di un corpo.

Il momento d'inerzia di un corpo è importantissimo per lo studio della sua dinamica.



Proprietà inerziali

Le principali proprietà inerziali sono:

- Massa
- Momento d'inerzia
- Centro di massa

Motivazioni

Solitamente il momento d'inerzia viene calcolato con calcoli empirici o semplificati, CAD o software di discretizzazione, nel caso di corpi con geometria semplice.



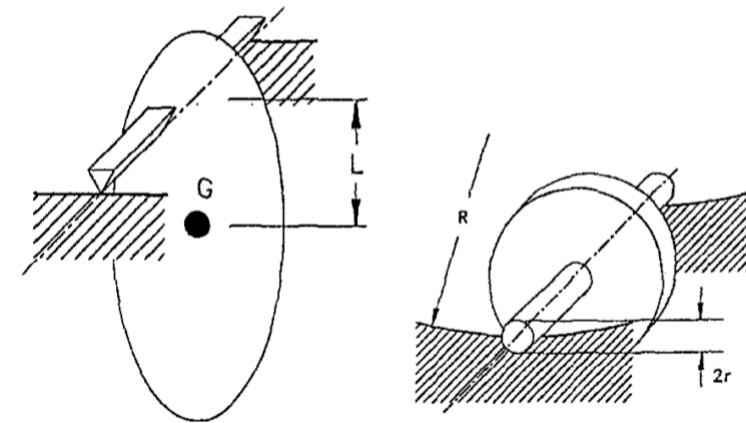
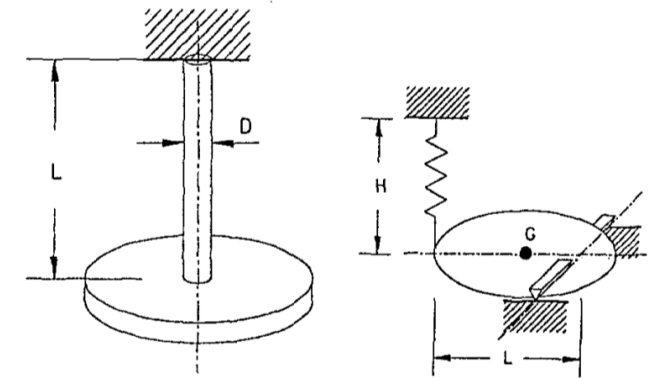
Nel caso di corpi complessi o non omogenei il calcolo del momento d'inerzia diventa poco pratico e spesso si preferisce stimarlo sperimentalmente.



Metodi di stima

L'unico modo per stimare il momento d'inerzia è tramite dei test dinamici, che si dividono principalmente in due categorie:

- Metodi per accelerazione: moto non periodico.
- Metodi per oscillazione: moto periodico.



Pendolo trifilare

Il pendolo trifilare rientra nei metodi per oscillazione e la stima del momento di inerzia ricavata dalla misura del periodo delle oscillazioni.

Nei metodi per oscillazione il momento di inerzia risulta sempre proporzionale al prodotto fra una costante tipica del sistema ed il quadrato del periodo misurato. In particolare nel caso del pendolo trifilare questa costante è dettata dalla geometria del sistema.

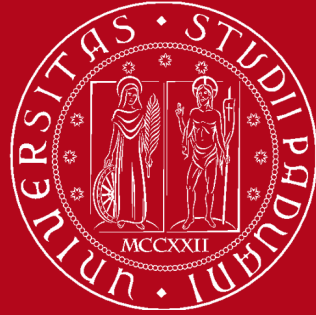
$$J = KT^2$$

$$K = \frac{k}{4\pi^2} = \frac{mgR^2}{4\pi^2 h}$$

Funzionalità

Per questo pendolo abbiamo implementato 3 principali funzionalità:

- Misura del peso e triangolazione del baricentro dell'oggetto
- Misura del periodo di oscillazione
- Stima del momento d'inerzia



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



Corso di Laurea in Ingegneria Meccatronica

Realizzazione di un pendolo trifilare per la stima dei momenti d'inerzia

Dimensionamento

Composizione

Gli elementi principali da dimensionare sono:

- Disco di appoggio
- Cavi di sostegno
- Struttura di supporto



Ipotesi preliminari

Per un corretto dimensionamento e funzionamento del dispositivo è necessario imporre alcuni vincoli e sottostare ad alcune ipotesi:

- Il centro del disco e il centro della circonferenza che collega i tre cavi si devono trovare sulla stessa linea verticale perpendicolare al terreno
- I tre cavi hanno tutti la stessa lunghezza
- Il momento d'inerzia del sistema a carico dev'essere molto maggiore del momento d'inerzia del sistema a vuoto

Oggetto della misura

Tutto il dimensionamento è stato fatto nell'ottica di poter misurare il momento d'inerzia del drone Holybro QAV 250, che per semplicità abbiamo idealizzato come un parallelepipedo a base quadrata di lato 40 cm, altezza 10 cm e una massa di 2kg. Così modellato il suo momento d'inerzia teorico risulta:



Corpo	Lato [cm]	Altezza [cm]	Massa [Kg]	Momento stimato [Kg^m²]
Parallelepipedo	40	10	2.0	0.0533

Piatto

La diagonale del modello misura 56 cm.

Il diametro scelto per il disco è di 65 cm.

Dalla teoria si vede come l'inerzia sia direttamente proporzionale al quadrato del raggio del piatto.

Questo parametro va limitato principalmente per:

- Ottenere un periodo facilmente misurabile.
- Limitare l'inerzia.

$$J_{tot} = m_{tot} \frac{g R^2}{4\pi^2 h} T^2$$

$$T = \sqrt{\frac{J_{tot} 4\pi^2 h}{m_{tot} g R^2}}$$

Piatto

Il materiale scelto per il disco inizialmente è stato il legno di pino ma per mancanza di materiale è stato utilizzato infine il compensato di pioppo con uno spessore di 4mm.



Materiale	Raggio del disco [m]	Massa del disco [kg]	Momento stimato [Kgm^2]
Vetro sintetico	0,325	0,9955	0,0526
Alluminio	0,325	0,8959	0,0473
Legno di quercia	0,325	0,7466	0,0394
Legno di pino	0,325	0,3484	0,0184
Compensato (pioppo)	0,325	0,571	0,03016

Semplificazione equazione

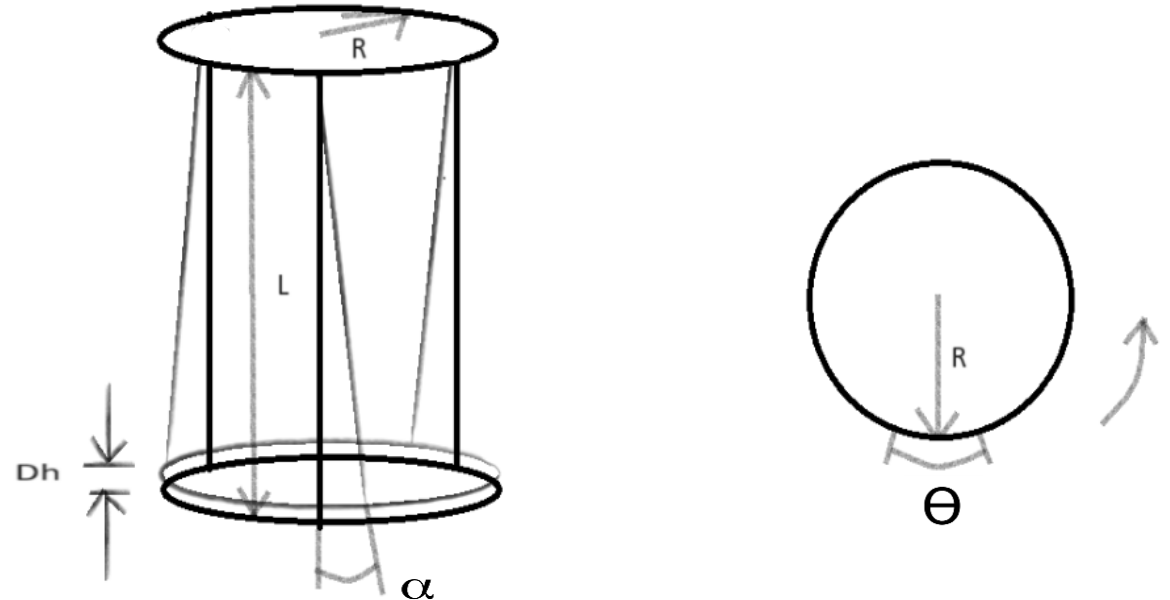
Per risolvere l'equazione del moto del pendolo si è dovuto linearizzare il sistema, nel farlo è stata fatta un'approssimazione che introduciamo ora:

- Il moto è composto di sole (piccole) oscillazioni attorno all'asse e non vi è nessuna traslazione

$$\sin(\theta) \approx \theta.$$

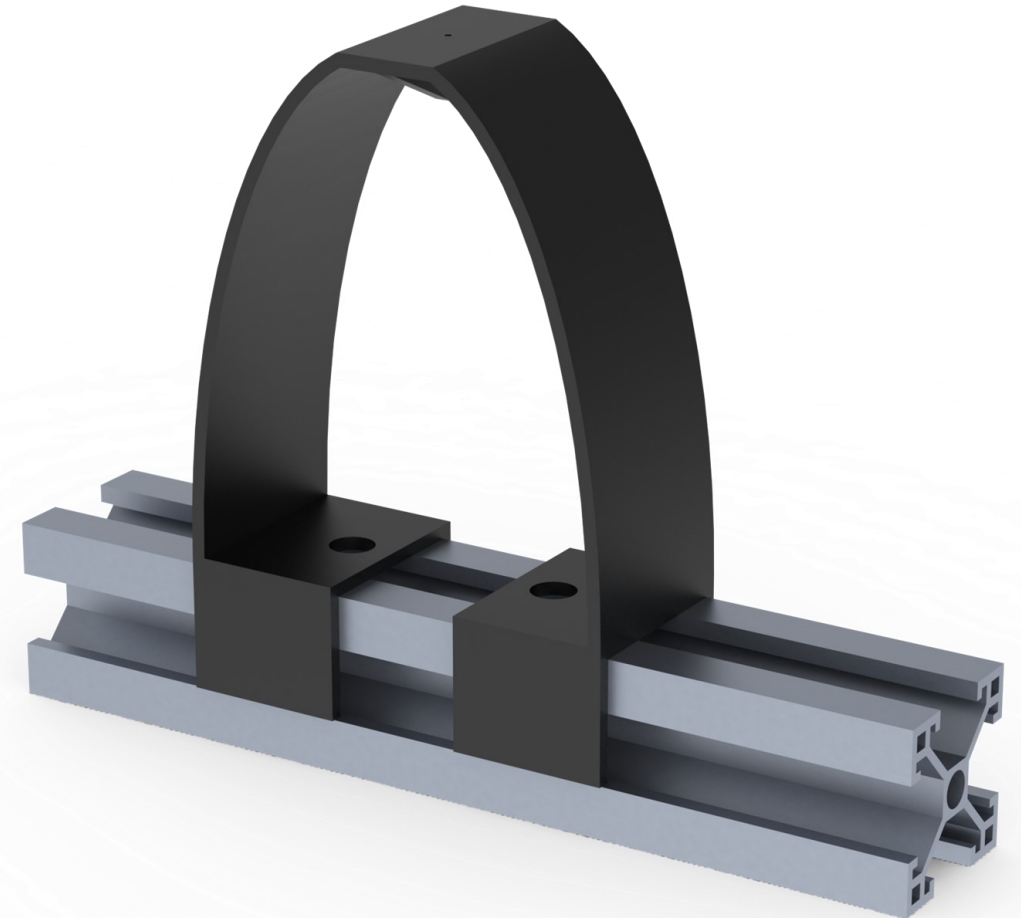
θ è legato all'angolo α dalla relazione:

$$\alpha = \frac{R}{L} \theta$$

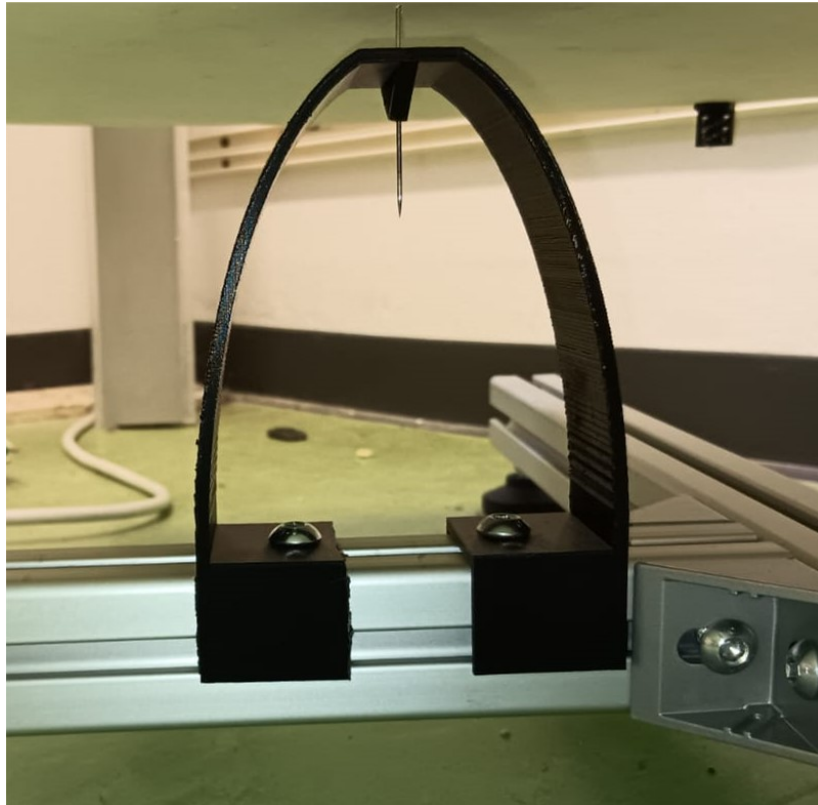


Stabilizzatore

Per rispettare la semplificazione fatta precedentemente riguardante le traslazioni nel piano faremo uso di uno stabilizzatore sotto la struttura, mentre per quanto riguarda le traslazioni verticali possiamo agire solo sulla lunghezza dei cavi.



Stabilizzatore



Cavi

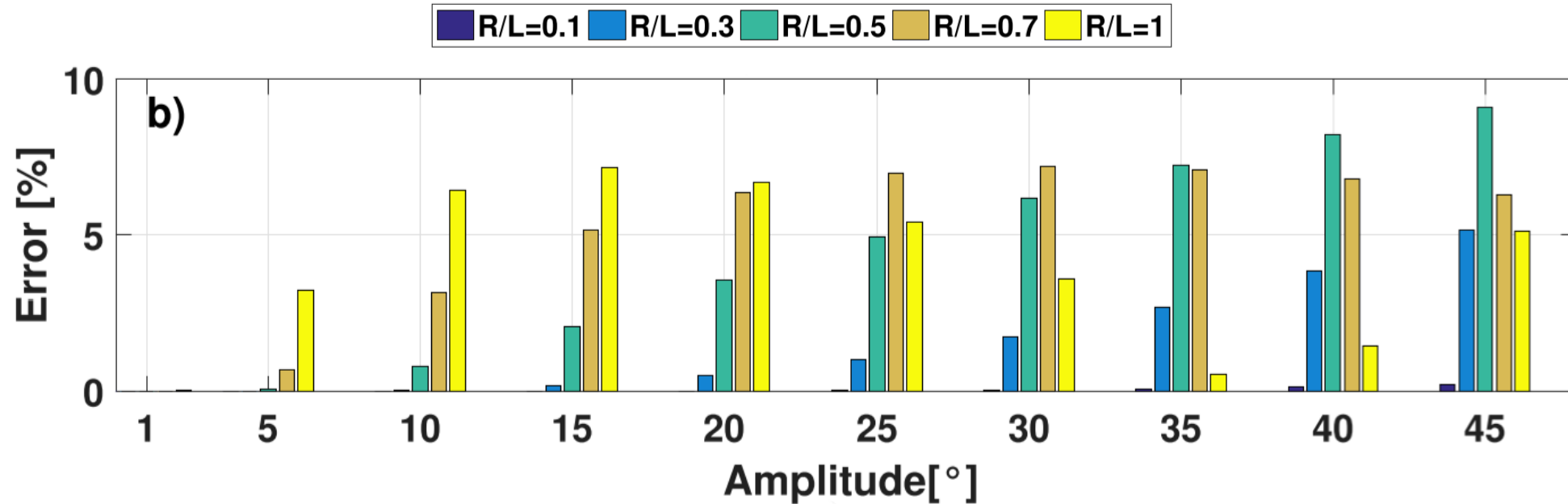
I cavi vanno dimensionati in coppia con il disco in quanto anche loro concorrono alla determinazione del periodo di oscillazione.

Per ridurre le traslazioni verticali è bene scegliere una lunghezza dei cavi molto grande, questo in quanto la variazione di altezza del piatto durante il moto sia minima.

E' importante, per quanto possibile, che la sezione del cavo sia la più piccola possibile, in modo da poter trascurare la loro torsione durante il moto.

Cavi

La lunghezza dei cavi scelta è di 1,5m ($R/L = 0,21$).



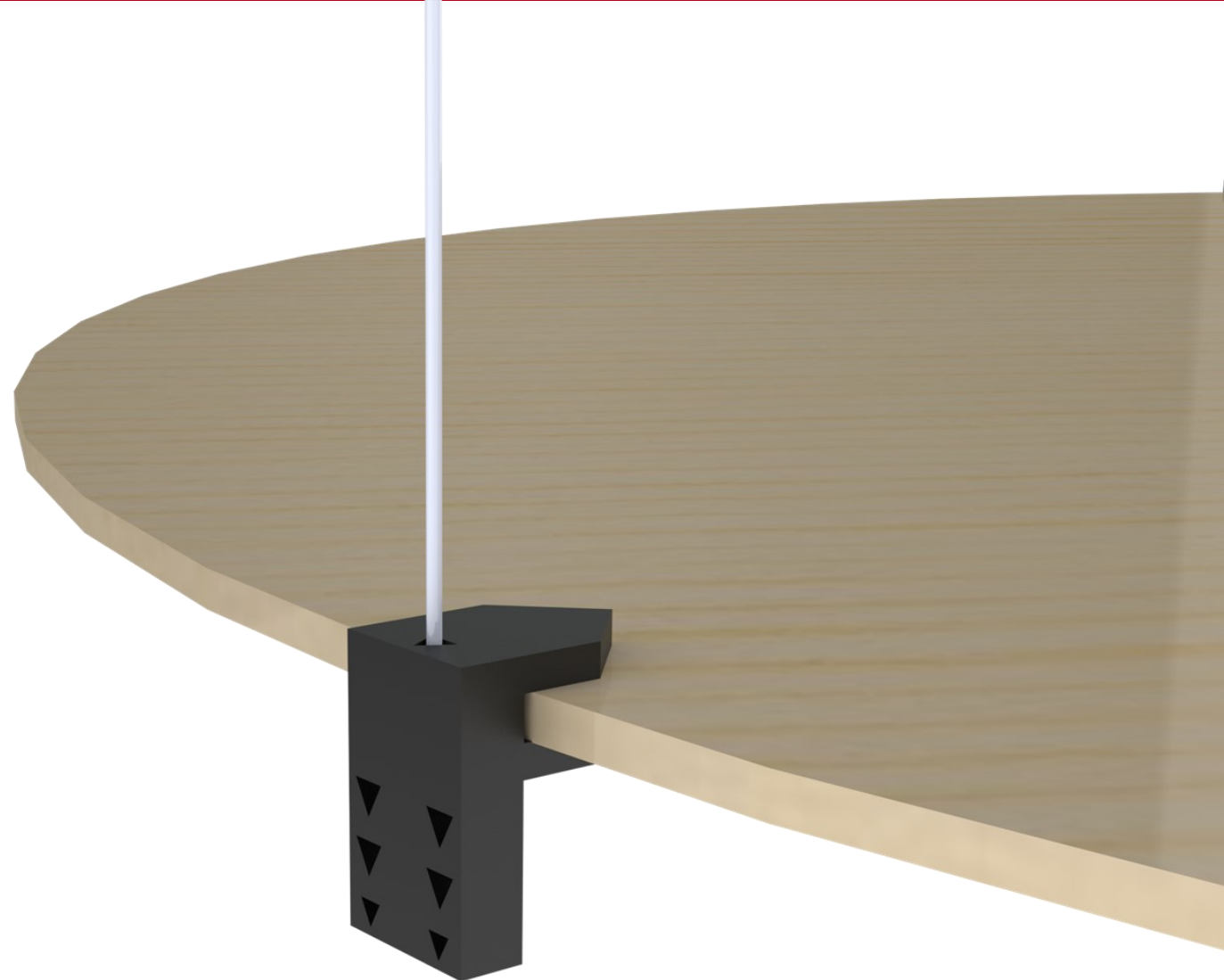
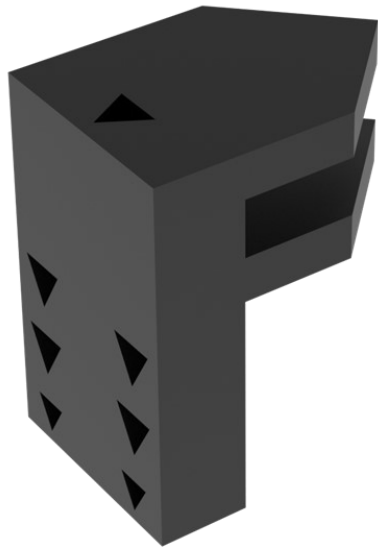
Cavi

Per il materiale è stato inizialmente scelto un filo in acciaio con diametro 1mm ma si è passati poi al nylon, sempre con un diametro di 1mm.

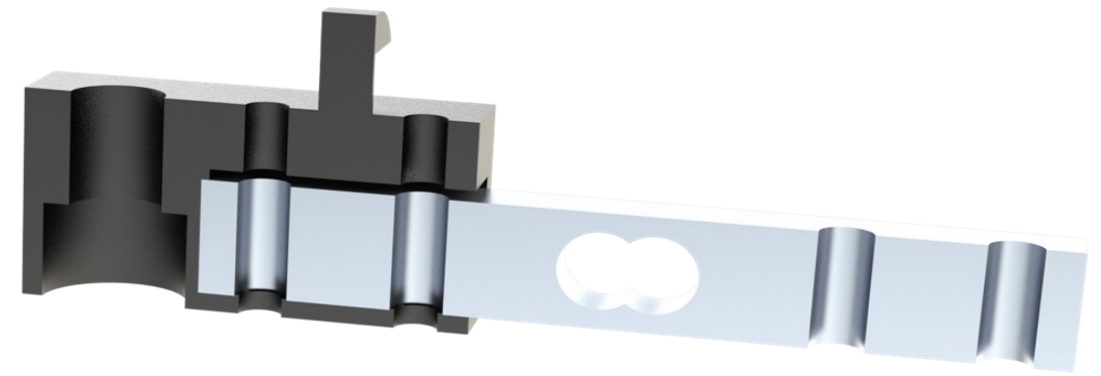
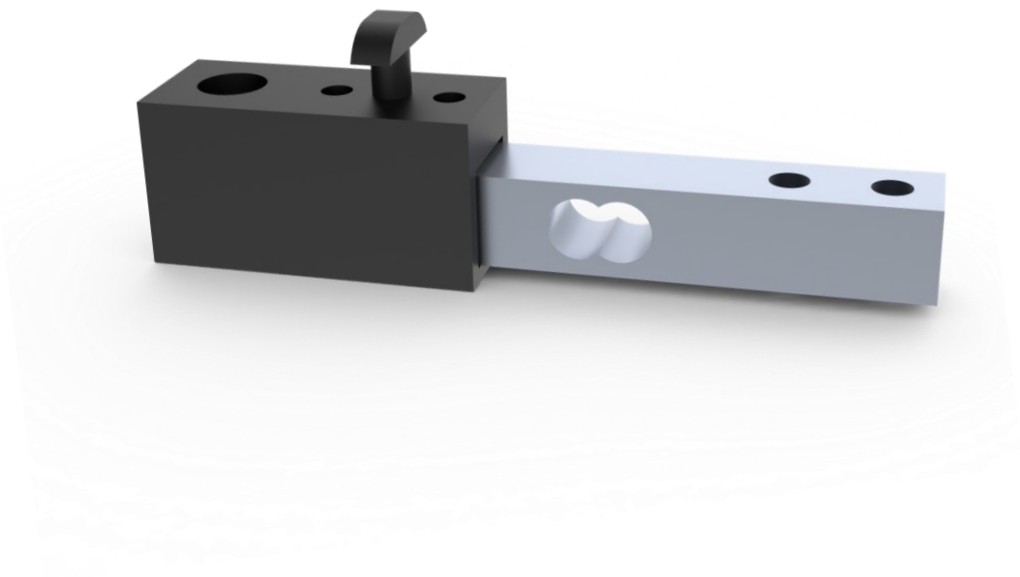
Tipo Cavo	Densità [Kg/m^3]	Diametro [mm]	Lunghezza [m]	Massa [Kg]
Acciaio inox 304	7900	1	1.5	0.009248
Polycarbonato	1200	1.75	1.5	0.004329
Nylon	1140	1	1.5	0.0013430
Tungsteno	19250	0.4	1.5	0.003628



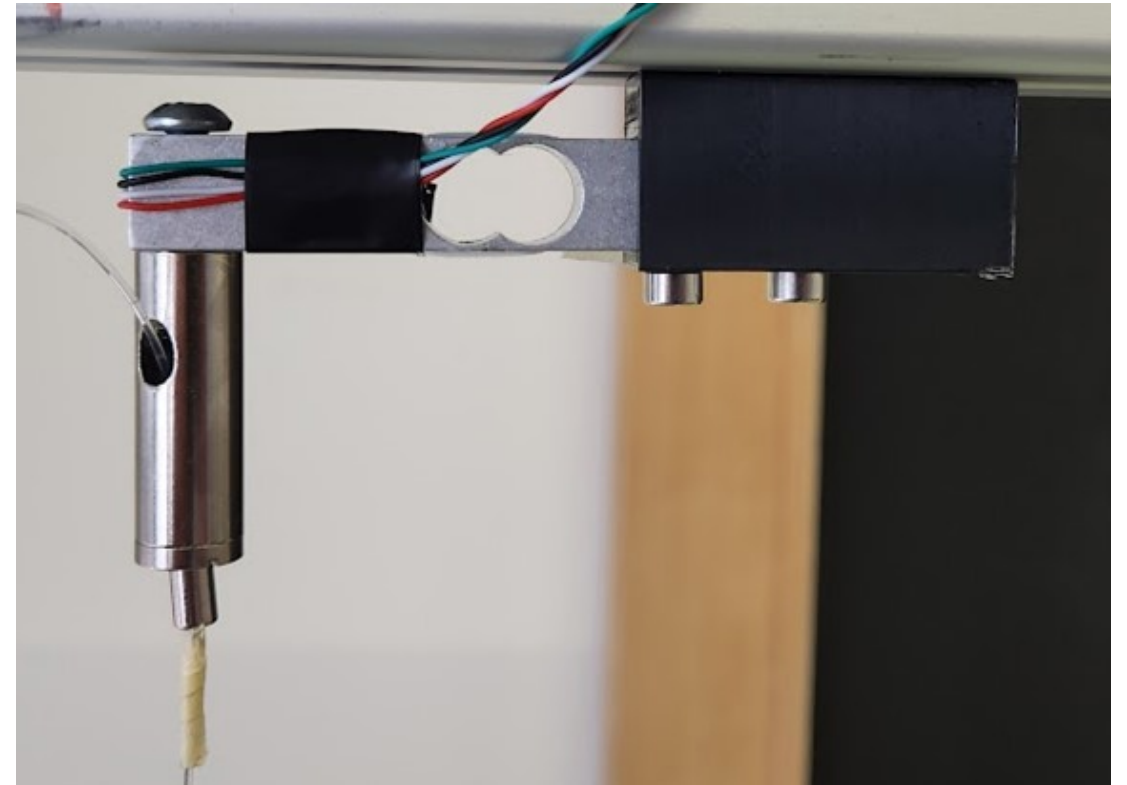
Supporti cavi-disco



Supporti cavi-struttura



Supporti cavi



Struttura

La struttura deve garantire stabilità e supportare il peso del sistema.

Per la struttura abbiamo utilizzato dei profilati di alluminio di dimensione 40*40 mm ad eccezione della stazza portante che è 40*80 mm.

Questi profilati consentono versatilità e di semplicità di assemblaggio.





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



Corso di Laurea in Ingegneria Meccatronica

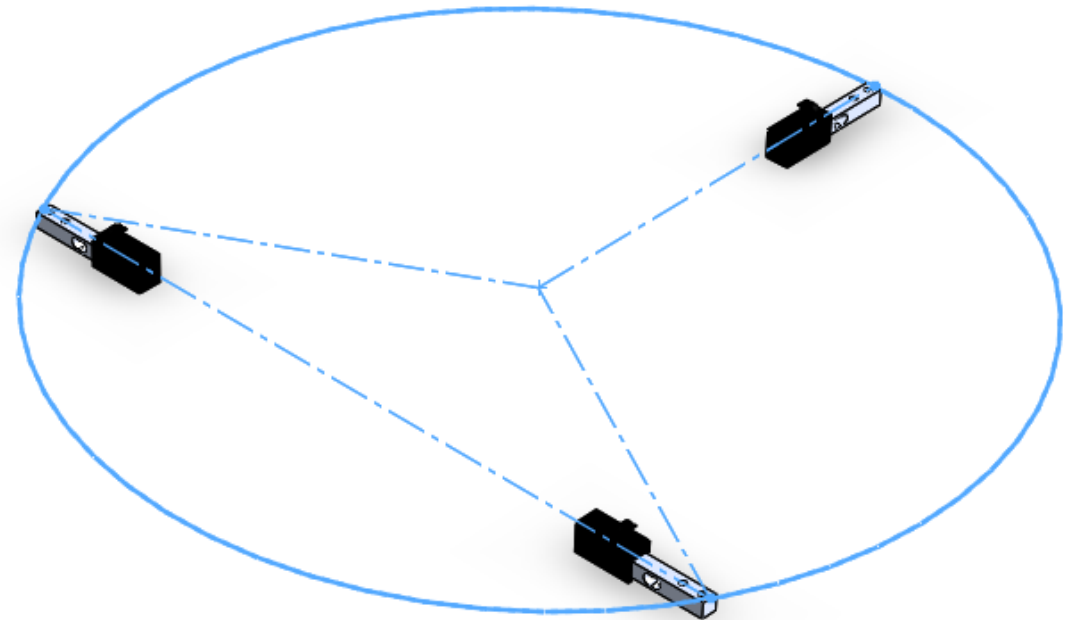
Realizzazione di un pendolo trifilare per la stima dei momenti d'inerzia

Misura di peso

Sistema di acquisizione

Affinché la stima dell'inerzia sia accurata il centro di massa deve coincidere con il centro del disco.

Il corpo è correttamente posizionato quando il peso misurato dalle 3 celle risulta uguale.

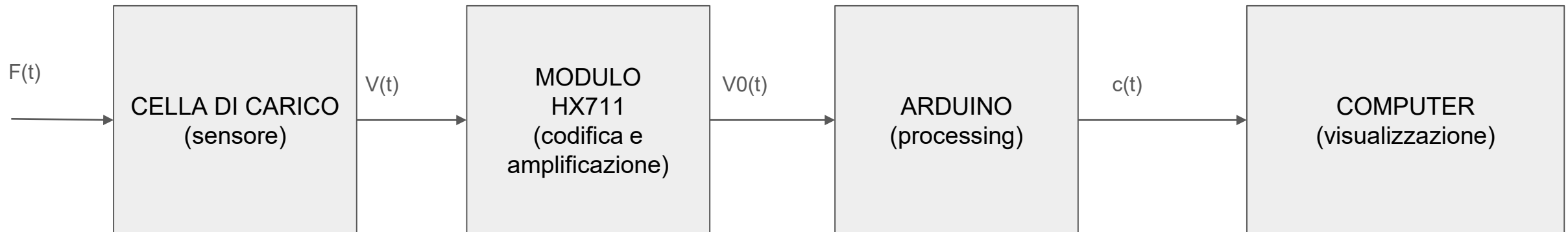


Sistema di acquisizione

La misura eseguita dalle celle di carico è utile per i seguenti motivi:

- Verificare che il piatto non sia inclinato.
- Verificare che l'oggetto di misura sia ben centrato.

Sistema di acquisizione



$F(t)$: peso rilevato dalle celle di carico (N).

$V(t)$: segnale di tensione in uscita dal sensore (mV).

$V0(t)$: segnale campionato e convertito in BIT dal chip.

$c(t)$: codice binario della misurazione processato da Arduino.

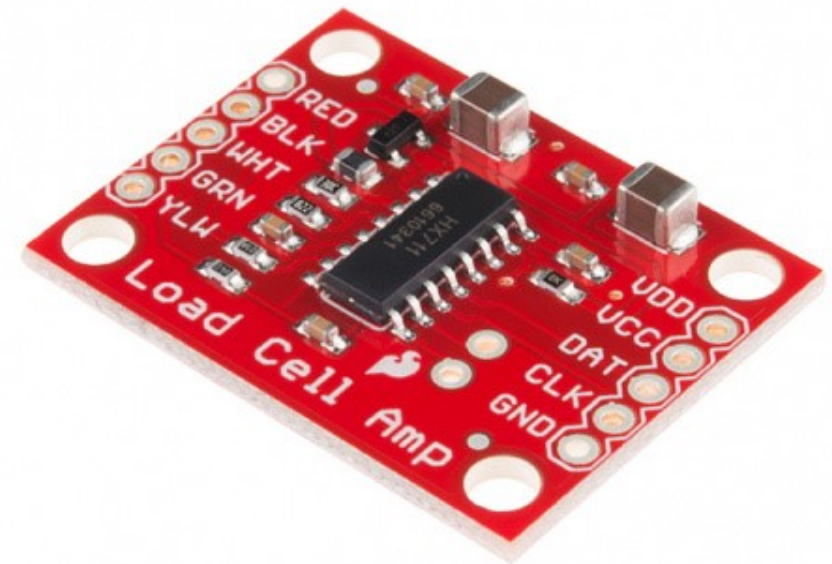
Cella di carico

Le celle di carico sono dei sensori in grado di convertire un peso applicato ad una delle estremità in un segnale di tensione.



HX711

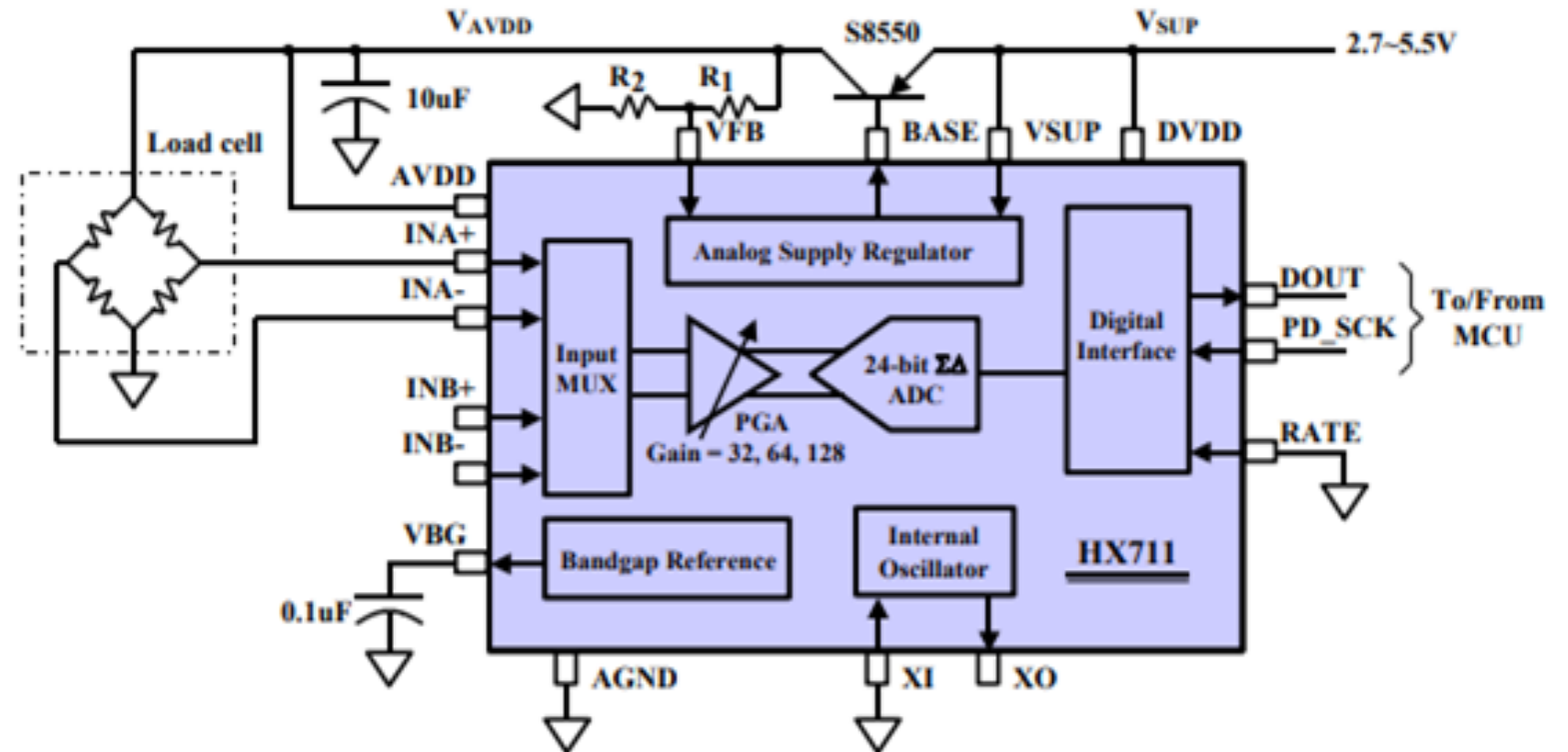
Si tratta di un modulo che svolge sia la funzione di amplificare il segnale proveniente dalla cella di carico, che quella di convertirlo in digitale.



Schema circuitale

Il CHIP ha un numero di BIT di conversione pari a 24 ed al suo interno sono presenti:

- Multiplexer
- Amplificatore
- ADC
- Interfaccia digitale





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



Corso di Laurea in Ingegneria Meccatronica

Realizzazione di un pendolo trifilare per la stima dei momenti d'inerzia

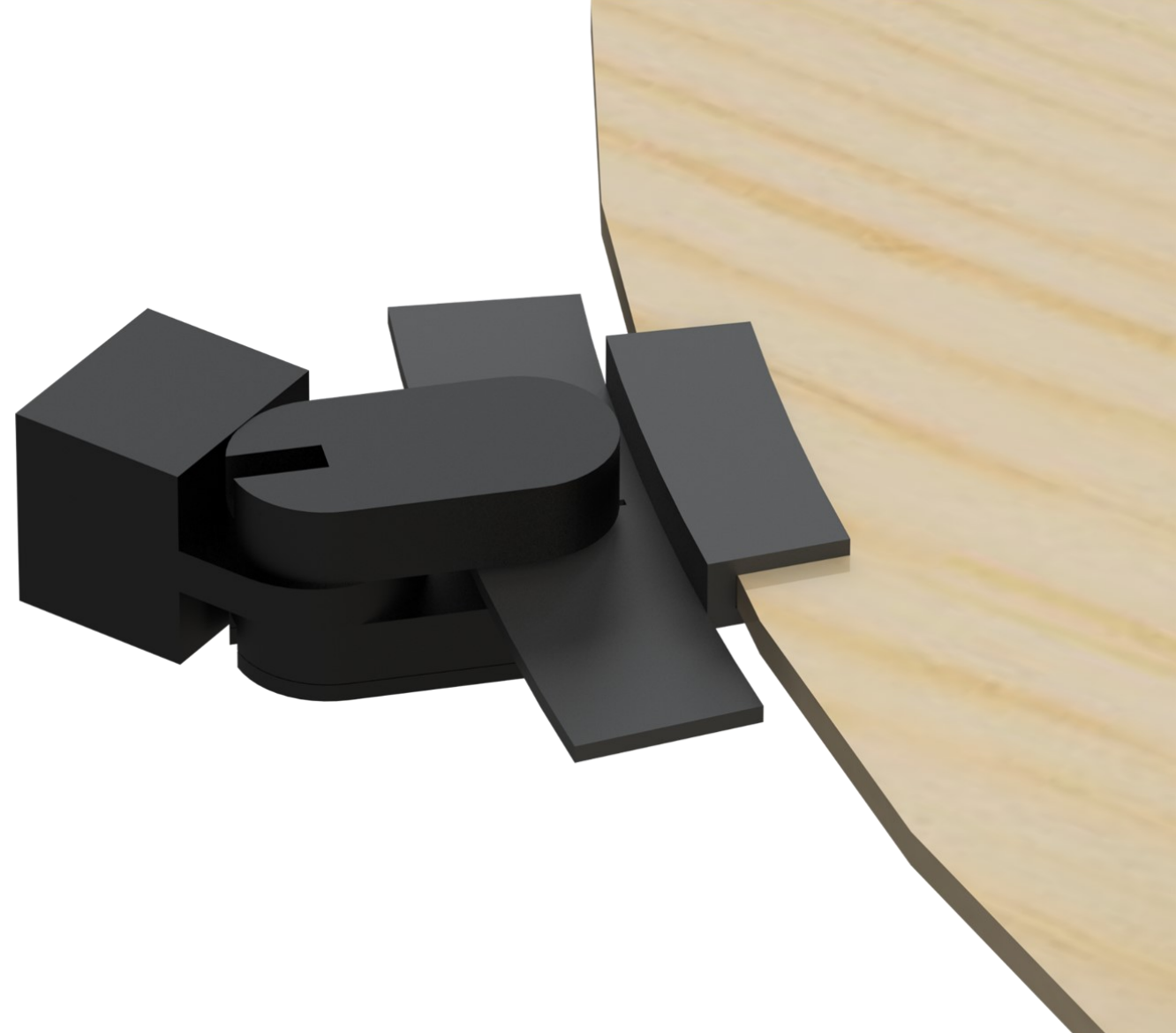
Misura di periodo

Sistema di acquisizione

Per la misura del periodo di oscillazione abbiamo realizzato una fotocellula.

Principio di funzionamento:

sfruttiamo le zone di luce ed ombra create dalla linguetta forata, come trigger per l'acquisizione del periodo.



Misurazione di periodo



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

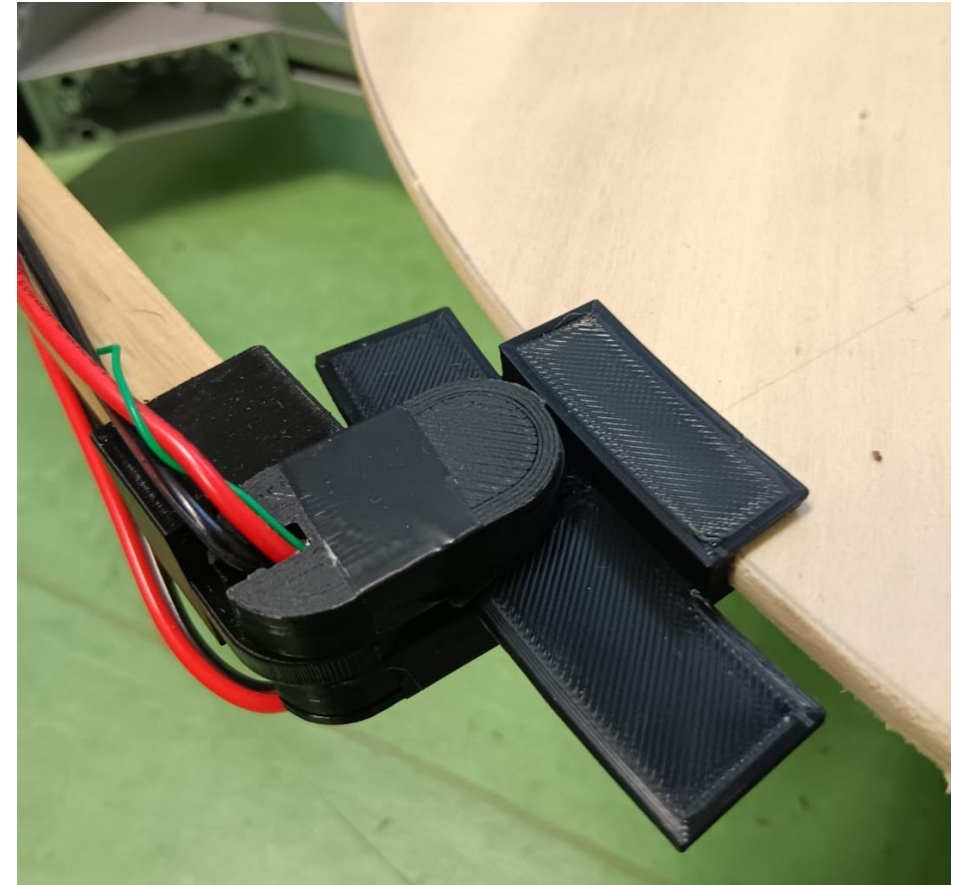


Componenti

LED, per generare il segnale luminoso.

Fotoresistenza per misurare le variazioni di luce.

Linguetta forata, per alternare zone di luce-ombra.



Fotocellula

Tensione V_{out} : dipende dalla resistenza della fotoresistenza.

Fotoresistenza: resistenza variabile, inversamente proporzionale alla luce che la colpisce.

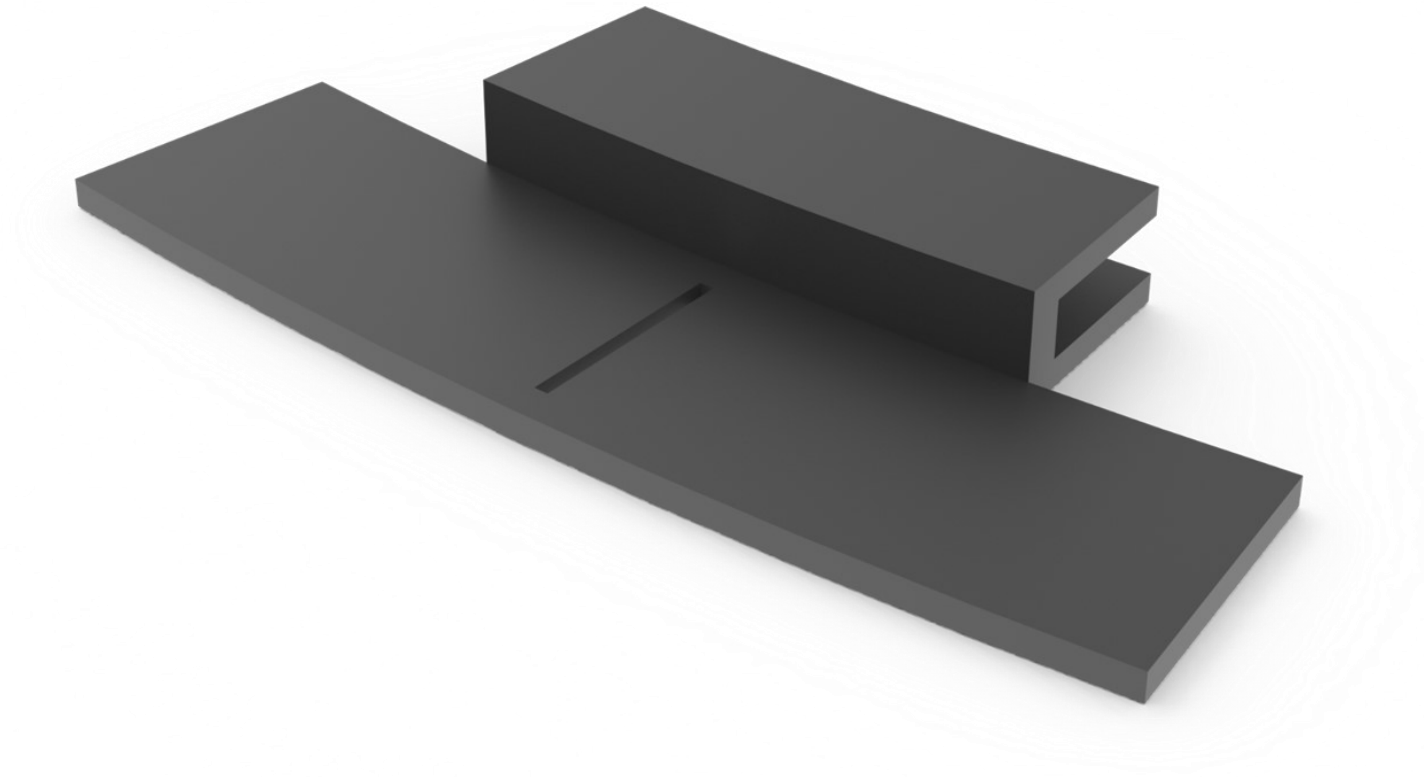
Maggiore luminosità \longrightarrow Minore resistenza \longrightarrow Maggiore V_{out}



Linguetta

Parametri:

- Larghezza: 8 cm.
- Corsa: 7° .
- Foro: 1mm.



Misurazione di periodo



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



Schema circuitale

Fotoresistenza

Cavo **rosso**: Alimentazione 5V.

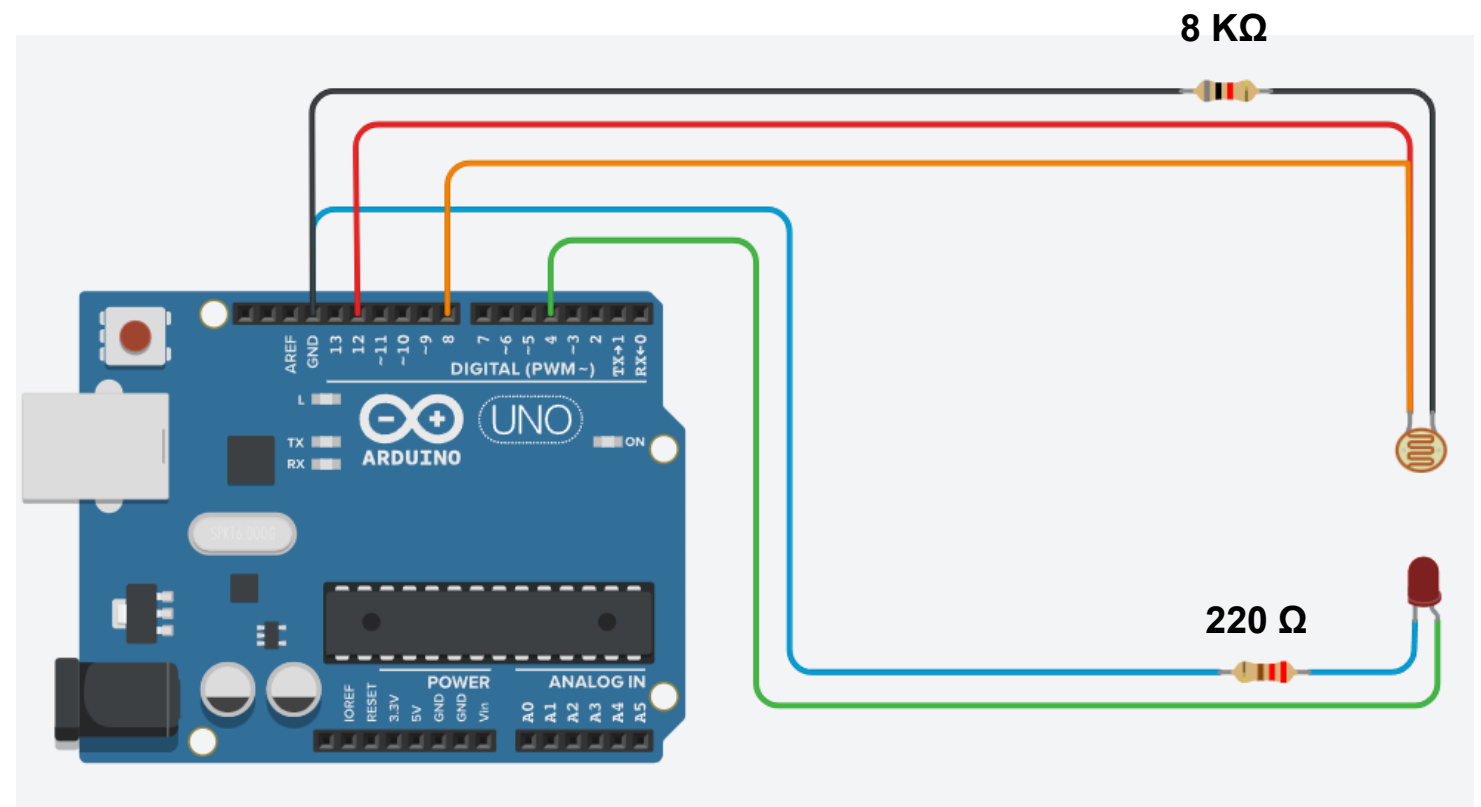
Cavo **giallo**: Tensione in uscita dalla fotoresistenza.

Cavo **nero**: Ground.

Led

Cavo **azzurro**: Ground.

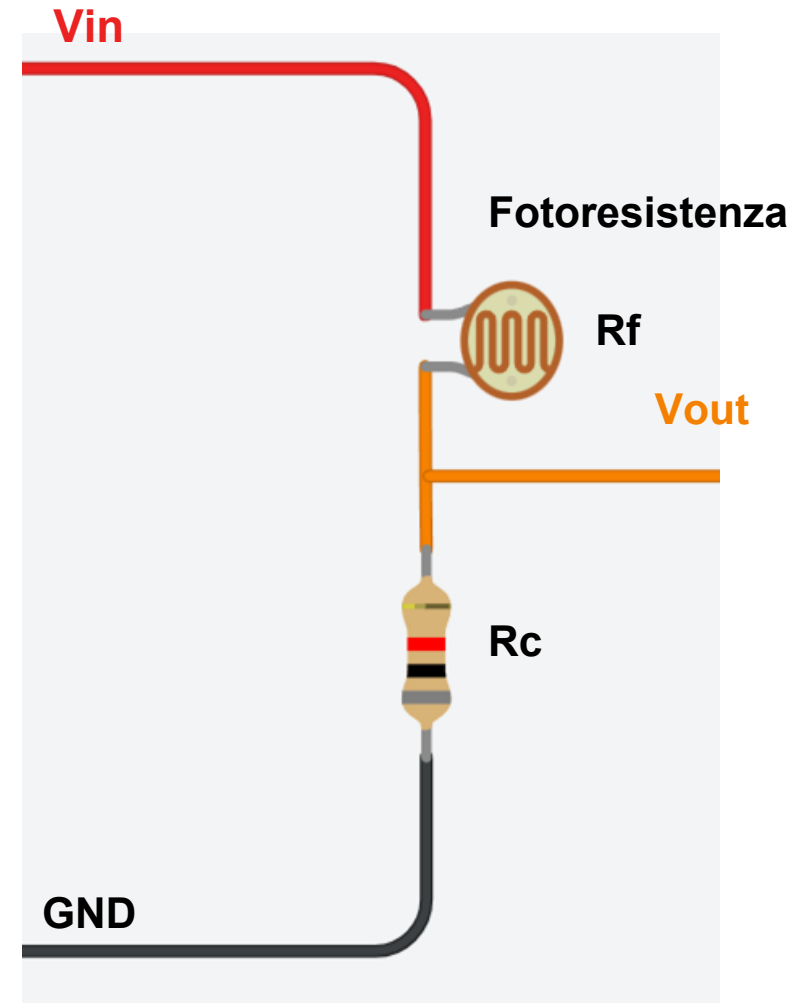
Cavo **verde**: Alimentazione 5 V.



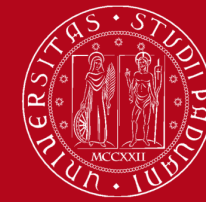
Tensione in uscita

Per misurare le variazioni della tensione utilizziamo un partitore di tensione:

Abbiamo caratterizzato la resistenza R_c in modo da massimizzare il gradino di tensione.

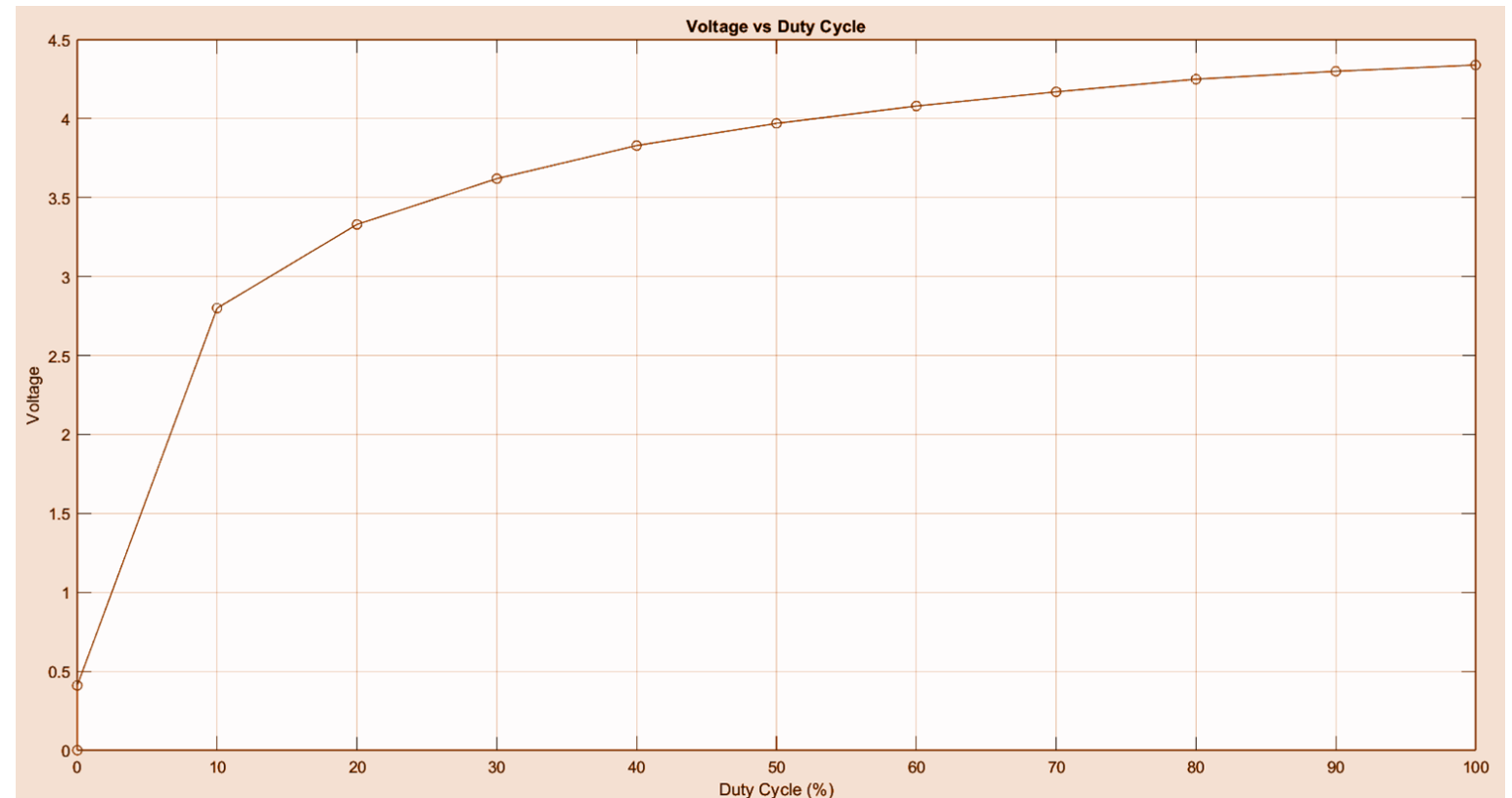


Misurazione di periodo



Caratterizzazione resistenza Rc

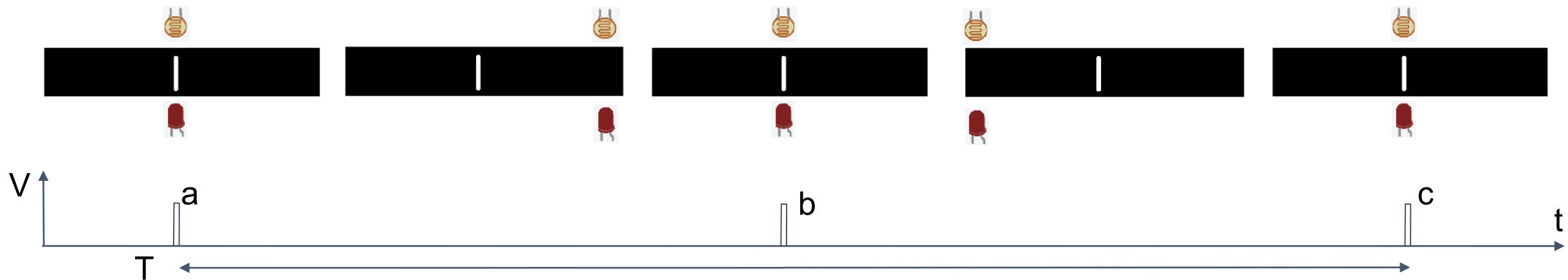
Rc [KΩ]	Range [V]
1	0,5-2,3
2	0,5-3,2
4	0,5-4
6	0,5-4,3
8	0,5-4,5
10	0,5-4,6



La resistenza da 8 KΩ permette un buon range di tensione senza sovradimensionare.

Acquisizione del periodo

La modalità input capture ci permette di generare un evento di trigger per ogni fronte di salita di V_{out} .



Istante a: Salvataggio istante T_a .
Istante b: Istante scartato.
Istante c: Salvataggio istante T_c .

Il periodo risulta quindi: $T = T_c - T_a$

Acquisizione ed elaborazione dati

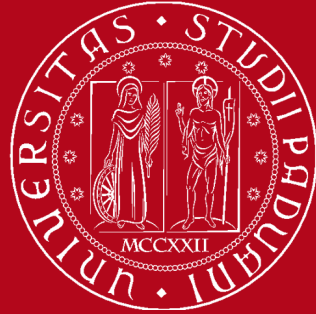
Per il calcolo del periodo abbiamo scritto le ISR del timer, con le seguenti funzioni:

- Scartare 1 fronte di trigger.
- Media mobile.

Transitorio e stabilizzazione

A causa della media mobile il periodo misurato presenta un transitorio iniziale.

Per ottenere una misura corretta è necessario aspettare che termini il transitorio e che la misurazione del periodo si stabilizzi per salvare il dato per poi calcolare il momento d'inerzia.



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



Corso di Laurea in Ingegneria Meccatronica

Realizzazione di un pendolo trifilare per la stima dei momenti d'inerzia

Stima dell'inerzia

Stima mediante costante geometrica

Nei metodi di stima per oscillazione, trascurando lo smorzamento delle oscillazioni, eventuali non linearità e l'attrito viscoso, il momento d'inerzia si può esprimere come il prodotto fra il periodo al quadrato e una costante tipica del sistema.

$$J = KT^2$$

Stima mediante costante geometrica

Nel caso del pendolo trifilare questa costante è totalmente definita dalla geometria:

$$J = KT^2$$

$$K = \frac{k}{4\pi^2} = \frac{mgR^2}{4\pi^2 h}$$

Stima mediante costante geometrica

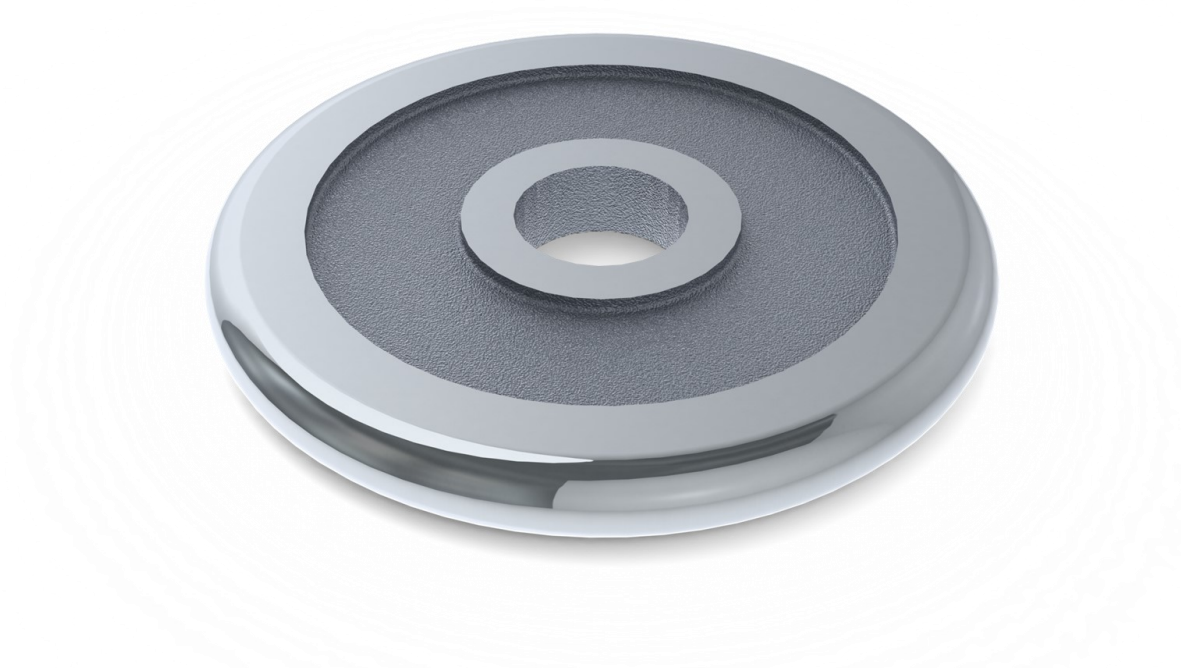
Possiamo allora calcolare il momento d'inerzia come:

$$J = J_{tot} - J_0$$

$$J_{tot} = m_{tot} \frac{gR^2}{4\pi^2 h} T^2$$

Misure sperimentali

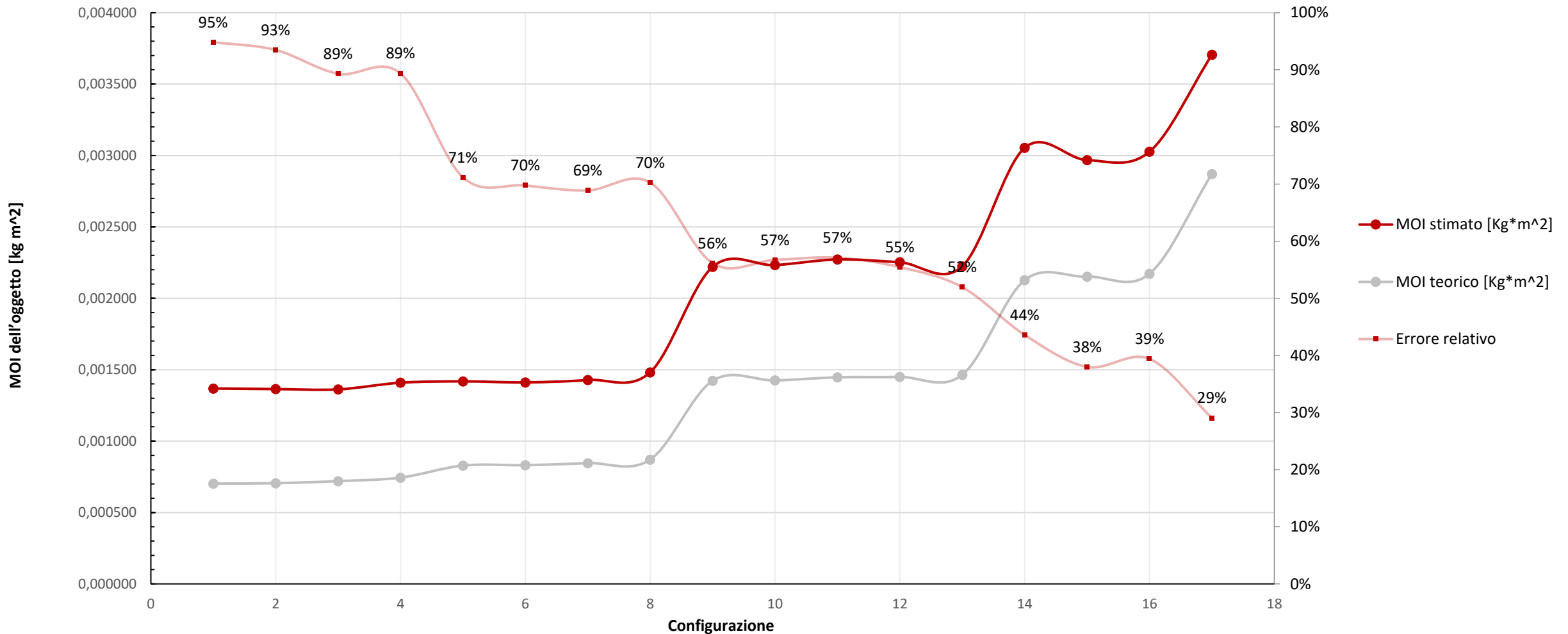
Le misure sono state effettuate testando dei dischi e confrontando i risultati con quelli teorici calcolati tramite una modellazione 3D.



Stima del momento d'inerzia



Calcolo MOI oggetto con costante geometrica del sistema



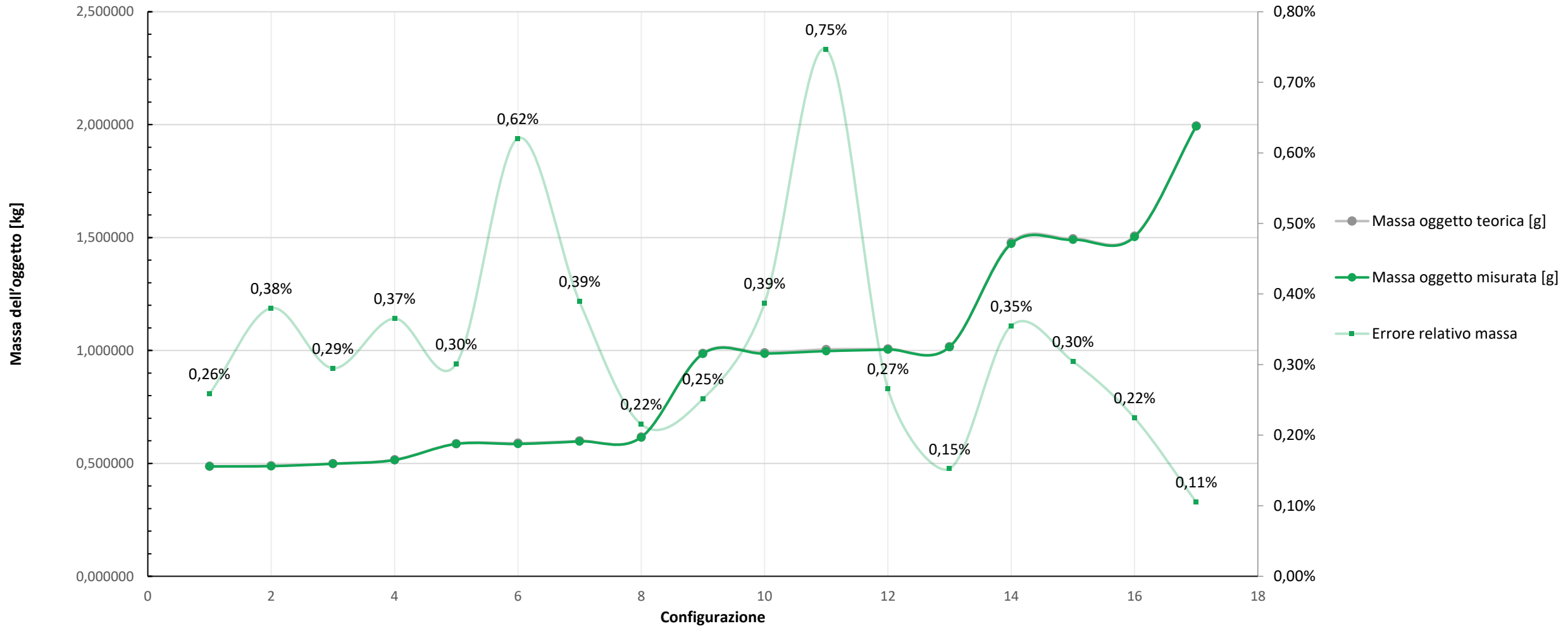
Stima del momento d'inerzia



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



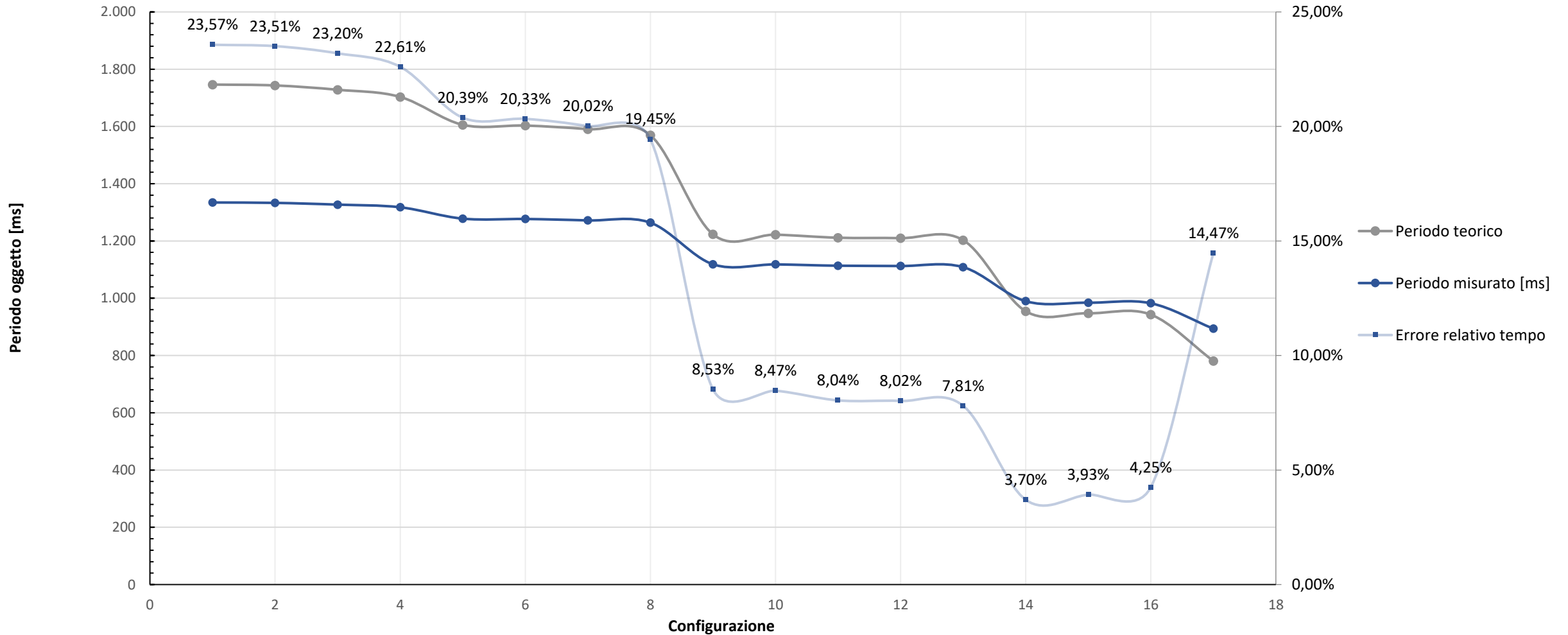
Massa misurata



Stima del momento d'inerzia



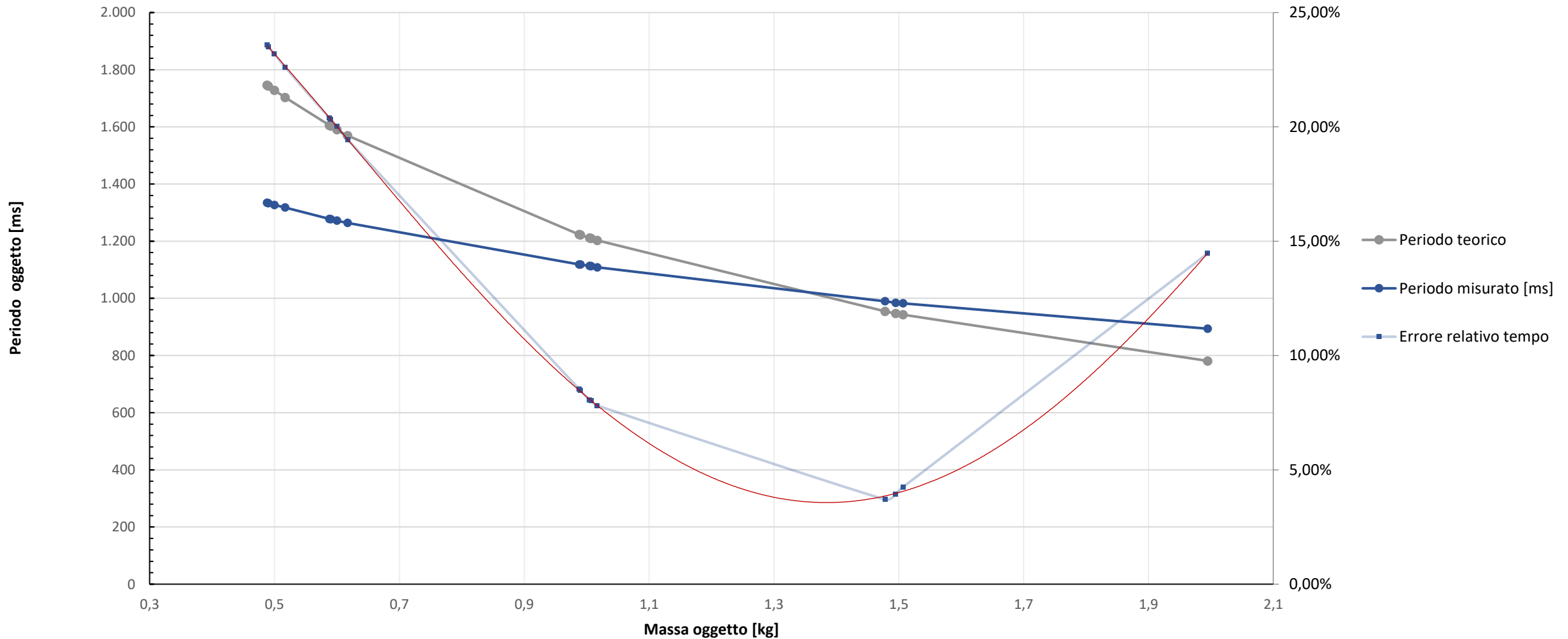
Periodo misurato



Stima del momento d'inerzia



Periodo misurato



Stima del momento d'inerzia



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



Stima mediante curva di calibrazione

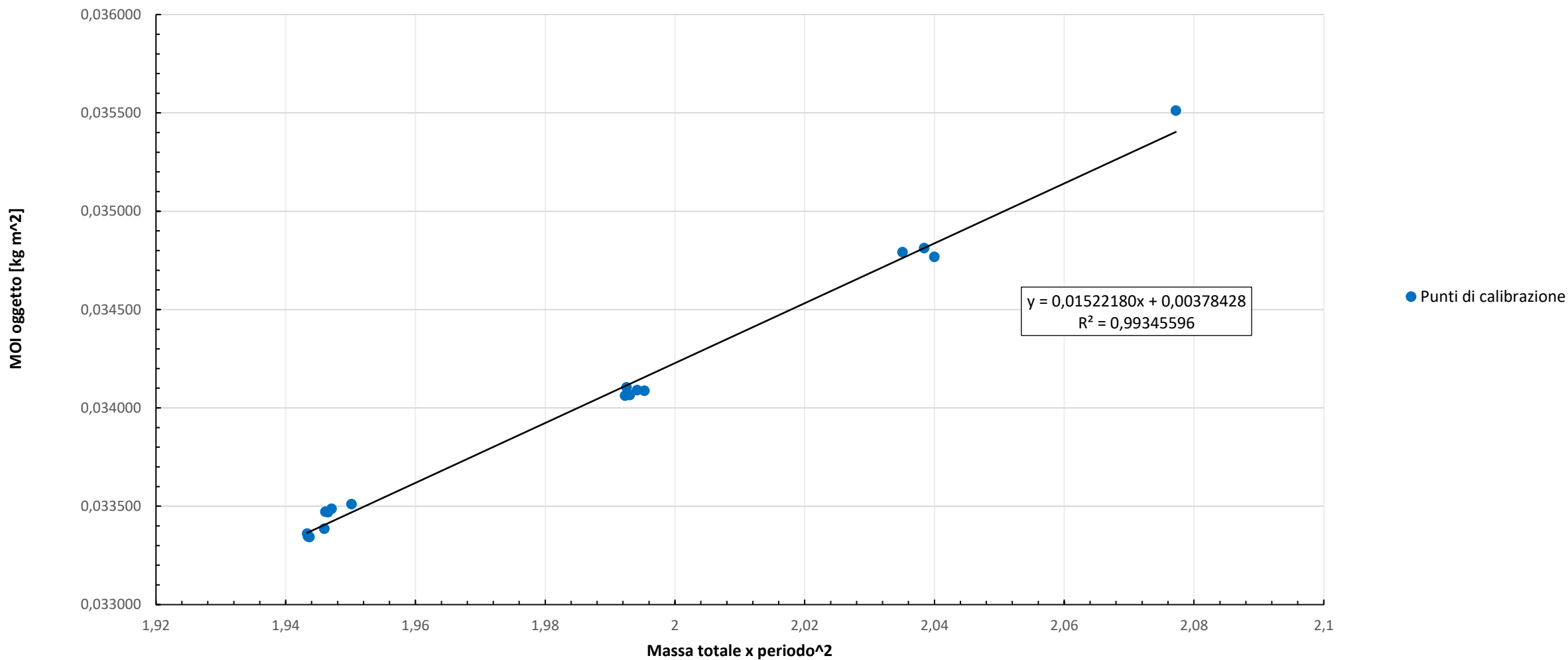
Per costruire la curva dobbiamo conoscere i seguenti dati:

$$J \quad (m_{tot} T^2)$$

Stima del momento d'inerzia



Curva di calibrazione



Stima del momento d'inerzia



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



Stima mediante curva di calibrazione

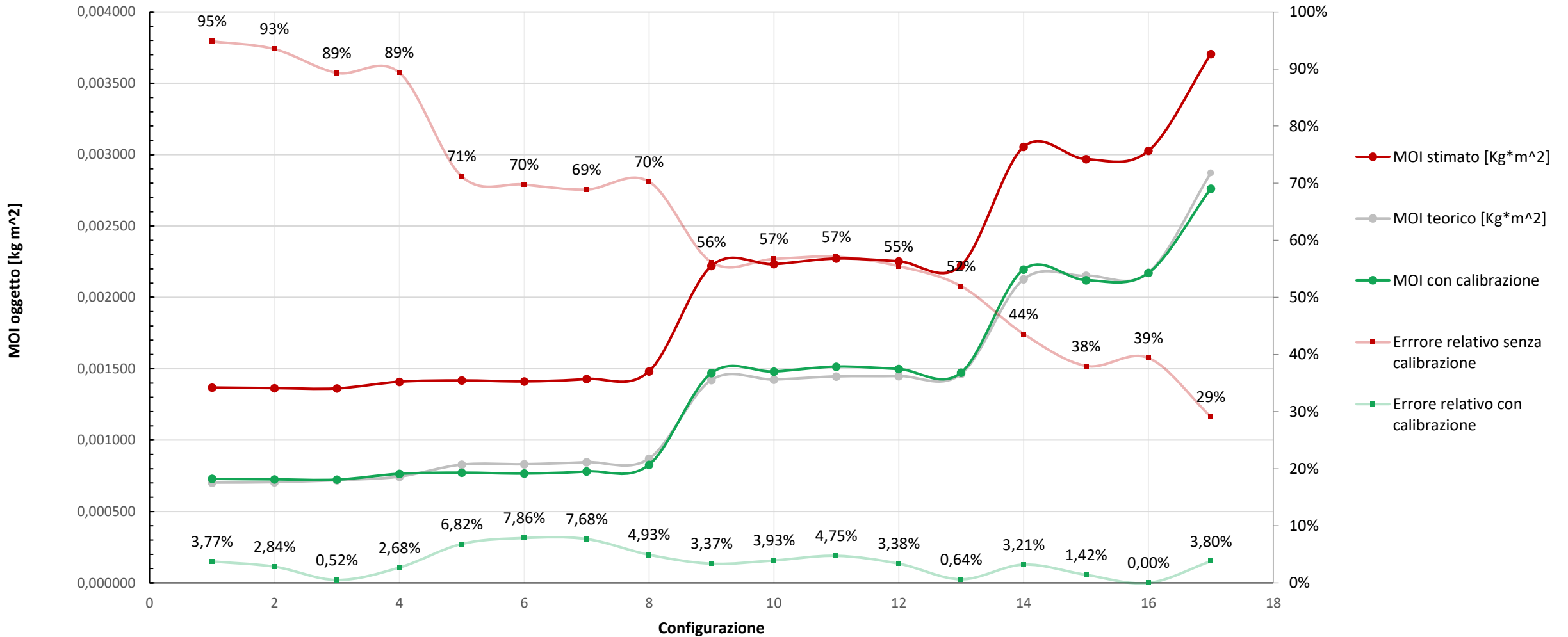
La stima del momento d'inerzia si effettua ora come:

$$J = F (m_{tot} T^2) + off$$

Stima del momento d'inerzia



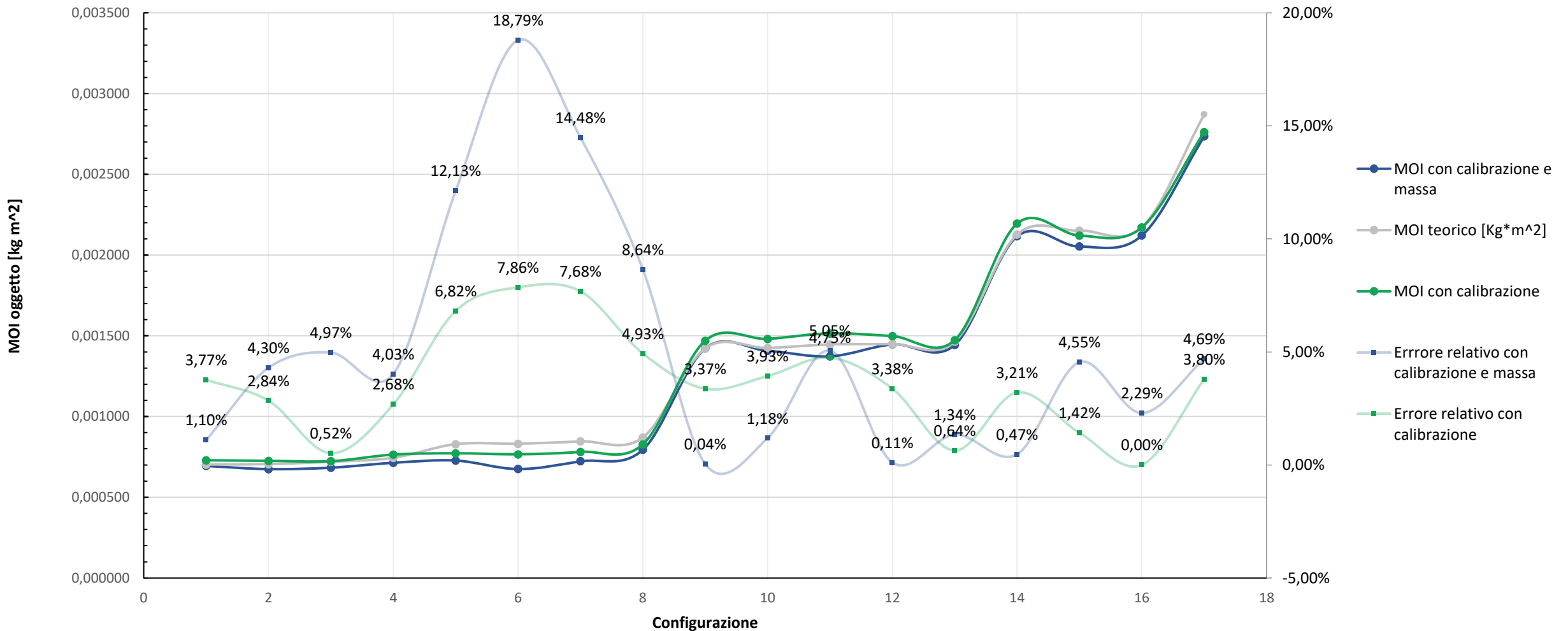
Calcolo MOI oggetto con curva di calibrazione



Stima del momento d'inerzia



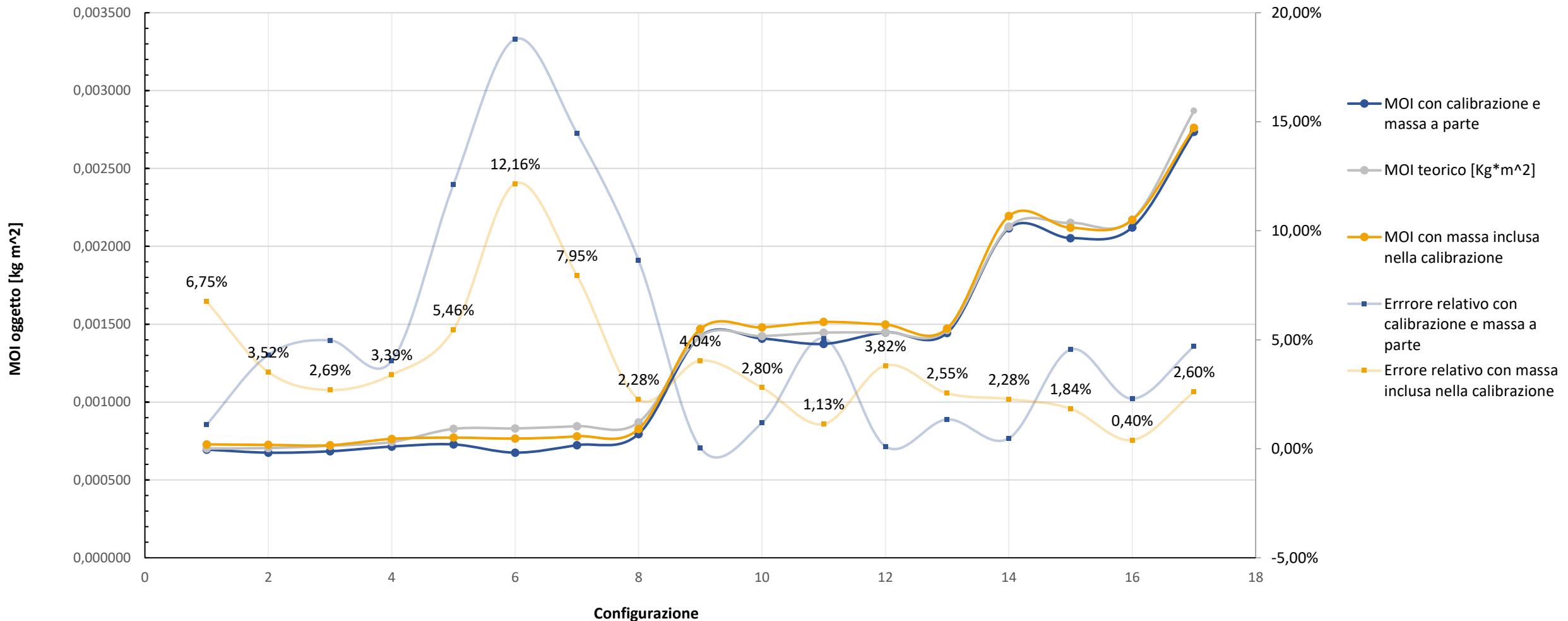
Calcolo MOI oggetto con curva di calibrazione e utilizzo della massa misurata



Stima del momento d'inerzia



Calcolo MOI oggetto con curva di calibrazione e utilizzo della massa misurata





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



Corso di Laurea in Ingegneria Meccatronica

Realizzazione di un pendolo trifilare per la stima dei momenti d'inerzia

Codice

Struttura codice

Attraverso uno **'switch-case'** abbiamo raggruppato tutte le operazioni in uno stesso codice .ino:

N: Per la **calibrazione** delle celle.

C: Per la **taratura** del piatto.

R: Per la **lettura** del peso.

T: Per la **misura** del periodo.

S: Per il **salvataggio** del valore di massa e periodo.

I: Per la **stima** dell'inerzia.

```
165 |         case 'N':  
166 > |         case 'n': ...  
229 |         case 'C':  
230 > |         case 'c': ...  
264 |         case 'R':  
265 > |         case 'r': ...  
292 |         case 'T':  
293 > |         case 't': ...  
315 |         case 'S':  
316 > |         case 's': ...  
361 |         case 'I':  
362 > |         case 'i': ...  
387 |         default:
```

Struttura codice

Scegliere una delle seguenti opzioni per proseguire:

- R) Eseguire una misura di peso
- T) Eseguire misura del periodo
- I) Calcolare il momento d'inerzia

Per salvare i risultati dopo una misura di peso o di periodo premere S)

- C) Eseguire una tara del sistema
- N) Eseguire una calibrazione delle celle di carico

Taratura

```
229 case 'C':
230 case 'c':
231
232     Ampli_LC_1.power_up();
233     Ampli_LC_2.power_up();
234     Ampli_LC_3.power_up();
235
236     //stampa messaggio a schermo
237     Serial.println(" ");
238     Serial.println("Tara del sistema, attendi");
239     Serial.println(" ");
240
241     //inizializza la scala a 0 per tutte ele 3 celle
242     Sistem_tara(300);
243
244     //stampa messaggio a schermo
245     Serial.println(" ");
246     Serial.println("Tara del sistema eseguita");
247     Serial.println("Lettura celle, attendi");
248     Serial.println(" ");
249
250     Read_load_cell(300);
251
252     Ampli_LC_1.power_down();
253     Ampli_LC_2.power_down();
254     Ampli_LC_3.power_down();
255
256     Print_Message();
257
258     break;
```

```
Tara del sistema, attendi
```

```
Tara del sistema eseguita
Lettura celle, attendi
```

```
Cella_1: -0.203 g
Cella_2: -0.171 g
Cella_3: -0.087 g
Totale: -0.461 g
```

Pesatura

```
264     case 'R':
265     case 'r':
266
267         Ampli_LC_1.power_up();
268         Ampli_LC_2.power_up();
269         Ampli_LC_3.power_up();
270
271         //stampa messaggio a schermo
272         Serial.println(" ");
273         Serial.println("Lettura celle, attendi.");
274         Serial.println(" ");
275
276         //lettura dalle celle
277         total_weight = Read_load_cell(300);
278
279         Ampli_LC_1.power_down();
280         Ampli_LC_2.power_down();
281         Ampli_LC_3.power_down();
282
283         //stampa messaggio a schermo;
284         Print_Message();
285
286         break;
```

```
Lettura celle, attendi.
```

```
Cella_1: 334.139 g
```

```
Cella_2: 335.561 g
```

```
Cella_3: 335.508 g
```

```
Totale: 1005.207 g
```

Calibrazione

```
165 case 'N':
166 case 'n':
167
168     Ampli_LC_1.power_up();
169     Ampli_LC_2.power_up();
170     Ampli_LC_3.power_up();
171
172     //stampa messaggio a schermo
173     Serial.print("Inserisci il peso che si utilizzerà come campione, in grammi,");
174
175     //flush Serial input
176     while (Serial.available()) Serial.read();
177
178     Serial.println(" e premi invio\n");
179
180     while (Serial.available() == 0)
181     |
182     |
183     uint32_t weight_calibrazione;
184
185     weight_calibrazione = 0;
186
187     while (Serial.peek() != '\n') {
188         if (Serial.available()) {
189             char ch = Serial.read();
190             if (isdigit(ch)) {
191                 weight_calibrazione *= 10;
192                 weight_calibrazione = weight_calibrazione + (ch - '0');
193             }
194         }
195     }
```

```
458
459 void calibrate(HX711 myScale, uint32_t peso_campione) {
460
461     Serial.print("Rimuovi qualsiasi peso dalla cella");
462
463     //flush Serial input
464     while (Serial.available()) Serial.read();
465
466     Serial.println(" e premi invio");
467
468     while (Serial.available() == 0)
469     |
470     |
471     Serial.println("-Tara a vuoto, attendi");
472
473     myScale.tare(200);
474
475     Serial.print("-Posiziona il peso noto sulla cella di carico");
476
477     //flush Serial input
478     while (Serial.available()) Serial.read();
479
480     Serial.println(" e premi invio");
481
482     while (Serial.available() == 0)
483     |
484     |
485     Serial.println("-Lettura, attendi");
486
487     myScale.calibrate_scale(peso_campione, 200);
488
489     float scale = myScale.get_scale();
490
491     Serial.print("\nCalibration factor : ");
492     Serial.print(scale, 6);
493     Serial.println(" ");
494 }
```


Misura periodo

```
548 ISR(TIMER1_CAPT_vect) {
549
550     if (fronte_pari_dispari == 0) {
551         //rimozione dalla somma dell'ultimo elemento dell'array circolare
552         somma_per_media = somma_per_media - time_from_event[circular_array_pos];
553
554         //salvataggio del conteggio di TIMER1 dal registro
555         CNT_from_event = ICR1;
556
557         //salvataggio numero totale di conteggi dall'ultima cattura
558         total_CNT_from_event = CNT_from_event + (STEPS * TI_OVERFLOW);
559
560         //azzeramento numero di overflow di TIMER1
561         TI_OVERFLOW = 0;
562
563         //conversione numero di conteggi in tempo in millisecondi
564         time_from_event[circular_array_pos] = total_CNT_from_event * PRESCALER * 1000.0 / F_CLK;
565
566         //aggiunta del tempo alla somma per la media
567         somma_per_media = somma_per_media + time_from_event[circular_array_pos];
568
569         //calcolo media
570         media_time = float(somma_per_media) / 10.0;
571
572         //stampa media
573         if (enable_print == 1) {
574
575             Serial.print("Misura ");
576             Serial.print(incremento);
577             Serial.print(" :");
578             Serial.print(media_time, 3);
579             Serial.println(" ms");
580         }
581
582         incremento++;
583         //incremento posizione per il salvataggio del tempo
584         circular_array_pos++;
585
586         //incremento variabile per esclusione prossimo evento di cattura
587         fronte_pari_dispari = 1;
588     } else {
589
590     }
```

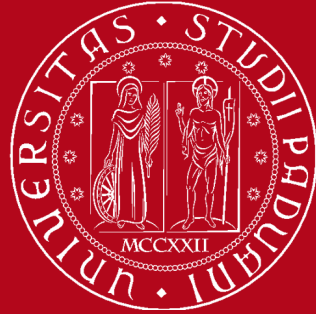
```
Misura 36 :1111.000 ms
Misura 37 :1110.800 ms
Misura 38 :1111.000 ms
Misura 39 :1111.100 ms
Misura 40 :1111.300 ms
Misura 41 :1111.500 ms
```

```
Variabili salvate :
Periodo: 1111.500
Massa: 1005.207
```

Stima dell'inerzia

```
370 case 'I':
371 case 'i':
372
373     Serial.print("Inerzia a vuoto : ");
374     Serial.print(inerzia_vuoto, 6);
375     Serial.println(" Kg m^2");
376
377
378     inerzia_tot = Compute_inerzia((PESO_SISTEMA + total_weight_save), media_time_
379     Serial.print("Inerzia totale con costante geometrica : ");
380     Serial.print(inerzia_tot, 6);
381     Serial.println(" Kg m^2");
382
383     inerzia_oggetto = inerzia_tot - inerzia_vuoto;
384     Serial.print("Inerzia oggetto con costante geometrica: ");
385     Serial.print(inerzia_oggetto, 6);
386     Serial.println(" Kg m^2");
387
388     inerzia_tot=Compute_inerzia2((PESO_SISTEMA+total_weight_save),media_time_save
389     Serial.print("Inerzia totale con parametri di calibrazione : ");
390     Serial.print(inerzia_tot, 6);
391     Serial.println(" Kg m^2");
392
393     inerzia_oggetto= inerzia_tot- inerzia_vuoto;
394     Serial.print("Inerzia oggetto con parametri di calibrazione : ");
395     Serial.print(inerzia_oggetto, 6);
396     Serial.println(" Kg m^2");
397
398
399     Print_Message();
400
401     break;
```

```
Inerzia a vuoto : 0.032644 Kg m^2
Inerzia totale con costante geometrica : 0.034776 Kg m^2
Inerzia oggetto con costante geometrica: 0.002132 Kg m^2
Inerzia totale con parametri di calibrazione : 0.034035 Kg m^2
Inerzia oggetto con parametri di calibrazione : 0.001391 Kg m^2
```



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



Corso di Laurea in Ingegneria Meccatronica

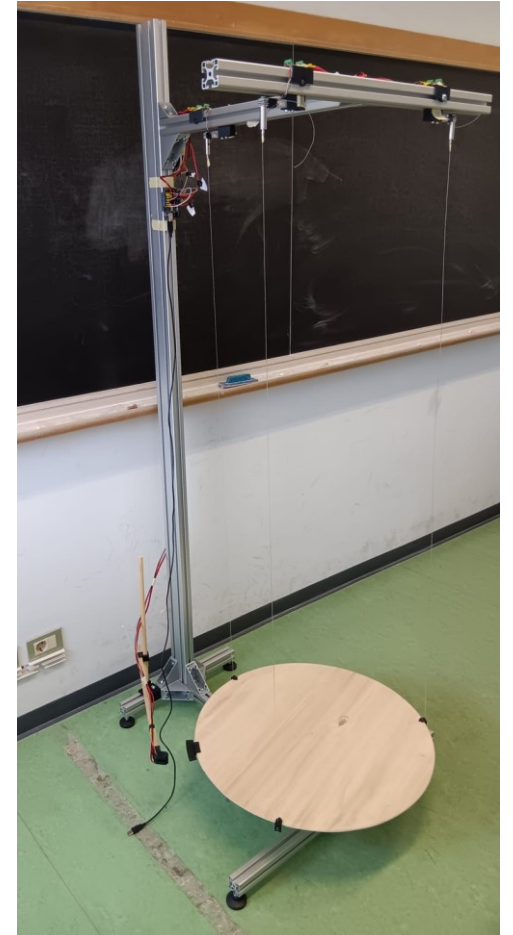
Realizzazione di un pendolo trifilare per la stima dei momenti d'inerzia

Conclusioni

Conclusioni

Lo strumento misura correttamente in tutto il range di inerzia analizzato.

L'errore introdotto dalla misura del periodo viene eliminato dalla calibrazione e l'inerzia è corretta.



Aspetti positivi

La struttura è modulabile, è infatti possibile modificare con facilità i seguenti parametri:

- Lunghezza dei cavi.
- Altezza della struttura.
- Piatto.
- Celle di carico.

Aspetti negativi

La curva di calibrazione è sensibile alle variazioni dei parametri del pendolo trifilare, quindi nel caso cambino i parametri di struttura o il range delle inerzie in misura è necessario calcolarne un'altra.

Se la massa di test è elevata il piatto si curva e introduce un errore nella stima.

Possibili future aggiunte

Per rendere il dispositivo più intuitivo e migliorare l'interazione sarà possibile implementare:

- Interfaccia con display e tastierino numerico.
- Avviamento automatico di oscillazione e misura.
- Stima della posizione del cm (triangolazione).

Riferimenti bibliografici

A. L. Korr , Cc Paul Hyer “A trifilar pendulum for the determination of moment of inertia”, Armed services technical information ,Arlington Hall Station, Arlington, 12, VIRGINIA, Agosto 1962

Lu Yi-ning, Lao Yao-xin, Liu Dan ”A new trifilar pendulum approach to identify all inertia parameters of a rigid body or assembly Hou Zhi-Chao” , 29 Agosto 2008

G. Genta ,C. Delprete “Some Considerations on the Experimental Determination of Moments of Inertia”, Politecnico di Torino, 9 Dicembre 1992.

G. Previati “Large oscillations of the trifilar pendulum: analytical and experimental study”, Politecnico di Milano,2020.



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

