

Frizione Elettroattuata

Report Anno 2015

Marco ZORZI

September 19, 2015

e-mail: marcozorzi@icloud.com

1 Introduzione

A seguito della mia tesi di laurea triennale riguardante il dimensionamento di un motore Brushless DC per l'attuazione frizione, sono riuscito a contattare la Maxon Motors e a ricevere in sponsorizzazione i materiali risultanti dal dimensionamento, quindi motore, riduttore e un modulo di controllo (driver). Prima del montaggio e dell'effettivo utilizzo in macchina si è scelto di testare sia il motore sia il suo controllo, in modo da capire come movimentarlo. Inoltre, grazie al recente acquisto di una cella di carico da parte del team, si è scelto di effettuare dei test molto veloci per rilevare i carichi in modo un pò migliore rispetto alla mia tesi (una chiave dinamometrica, ndr). La prova di tiraggio, effettuata a mano da Marco Guglielmo, è stata effettuata con il seguente setup:

- un cavo attaccato all'alberino frizione con un braccio di circa 22-24 mm
- la cella di carico collegata al cavo
- un altro cavo collegato ad una vite usata come maniglia

La prova ha dato, come valore indicativo, un valore di 700N arrivando in battuta e di 450 N con un valore parziale. Questo valore, di 450N è stato quindi utilizzato come valore di riferimento per i successivi calcoli. Dopo queste prove lo sviluppo è proseguito, e la frizione è stata montata a bordo della MG X-15. Questo report è iniziato come resoconto dei test statici ed è stato ultimato a seguito delle competizioni. Mi scuso in partenza per frasi sconnesse, tempi verbali casuali e cambi di punti di vista nella scrittura ma, suavia, siamo ingegneri, le parole non interessano a nessuno.

2 Obiettivo

Lo scopo di questi test era di studiare una movimentazione efficace ed esercitare le forze necessarie all'attuazione frizione. Inoltre, essendo stato effettuato un

dimensionamento termico dell'attuatore, ho ritenuto necessario caratterizzare l'input-output dell'intero sistema, analizzando quindi la corrente assorbita dal sistema al variare del ciclo di carico. Grazie all'aiuto del reparto motore siamo riusciti a realizzare un banco di test per il motore, rappresentato in figura.

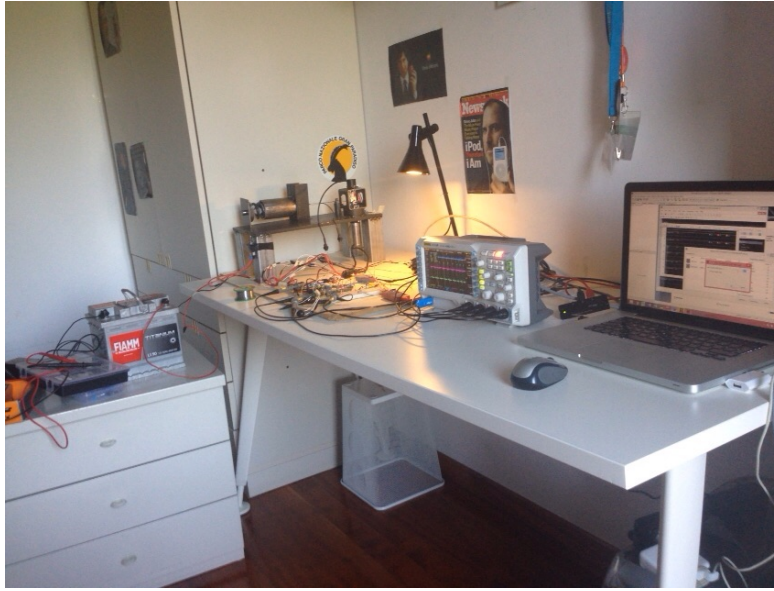


Figure 1: Foto setup banchetto

In questo setup si sono utilizzati i seguenti componenti:

- Piastra di acciaio con 4 gambe saldate, un supporto per una molla da ammortizzatori con foro coassiale per passaggio cavi e supporto motore.
- la cella di carico collegata al cavo e ad una apposita boccola attaccata ad una piastra agente sulla molla.
- una puleggia sulla quale passa il cavo da cella di carico a puleggia motore
- una puleggia attaccata all'uscita dal riduttore per mezzo di grani. (diverse versioni realizzate)
- il cablaggio test della MG0914 per collegare ADL2 a sensori.
- un sensore di corrente, un potenziometro rotativo sopra alla puleggia per coppia e velocità.

Il motore, posto in rotazione, avvolgeva il cavo generando una compressione sulla molla e, quindi, un carico lineare. Si è considerato questo carico discretamente simile quello della frizione e un buon compromesso per testare il tutto. Gli obiettivi di questi test erano i seguenti:

- Stabilire un criterio per l'assegnazione di una corretta legge di moto per il ritorno in seguito ad un tiraggio. Questo può essere inteso come rilascio del leveraggio.
- Ricerca del corretto diametro della puleggia motore in modo da ottenere la massima velocità raggiungibile dal sistema.
- Valutare se la scheda fornita dalla Maxon forniva un controllo sufficientemente preciso o quantomeno ripetibile per poter avere una movimentazione ripetibile e senza accumuli nell'azionamento (dannosi in ottica endurance).

Eseguiti i test, ci si poteva ritenere tranquilli nel montare il sistema in macchina e validarne il funzionamento prima da fermo e successivamente in pista. Nei prossimi paragrafi tratteremo prima i test svolti sul banchetto, poi il montaggio in macchina, poi l'utilizzo in pista e, infine, trarremo delle conclusioni.

3 Test Statici

Si sono svolte diverse sessioni e si sono salvati, per alcune prove, gli screenshot dell'oscilloscopio. Questo presenta 4 canali, uno giallo che indica il segnale di richiesta attuazione, uno azzurro che è il segnale di input generato, uno rosa che è molto spesso la tensione di alimentazione e uno blu che è il segnale di "ready" in output dalla schedina di controllo Maxon. Caldeggio il lettore ad osservare le acquisizioni dati relative ai commenti qui sotto, unico modo di capire le scelte fatte. I canali da osservare sono i seguenti:

- Angolo di uscita: il potenziometro
- Velocità: la derivata della posizione
- Forza di Tiraggio: misura della cella di carico
- Input V: il comando dato
- Corrente motore: la corrente assorbita

3.1 Legge per il ritorno

Per la legge di moto del ritorno si è scelto di utilizzare una legge trapezia in velocità scalata di una certa percentuale rispetto a quella di tiraggio. Definisco quindi una "percentuale di ritorno" come una percentuale usata per scalare il trapezio. Moltiplichiamo per questa percentuale il tempo di velocità costante e il livello di velocità massimo.

3.1.1 1

- Percentuale di ritorno: 80
- Sessione: 4
- Ms inseriti: 175
- Ms misurati 224

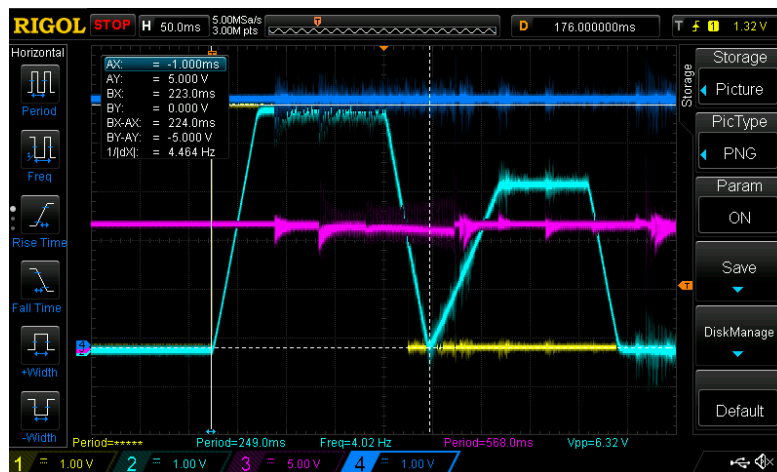


Figure 2: 1.png

Risultato: Angolo che varia troppo, scelgo di ridurre il ritorno al 70

3.1.2 2

- Percentuale di ritorno: 70
- Sessione: 5
- Ms inseriti: 175
- Ms misurati 224

Risultato: C'è una deriva nell'angolo, si vede che non ritorna completamente, scelto di aumentare il ritorno.

3.1.3 3

- Percentuale di ritorno: 75
- Sessione: 6

- Ms inseriti: 175
- Ms misurati 224

Risultato: Permane deriva, mi sposto al 68

3.1.4 4

- Percentuale di ritorno: 78
- Sessione: 7
- Ms inseriti: 175
- Ms misurati 224

Risultato: Permane aleatorietà nel ritorno, difficile da valutare bontà, torno all'80

3.1.5 5

- Percentuale di ritorno: 80
- Sessione: 8
- Ms inseriti: 175
- Ms misurati 224



Figure 3: 2.png

Risultato: C'era un problema nella rampa di salita del ritorno, si vede in 2.png e risolto in 3.png. Permane deriva, ci si sposta al 90

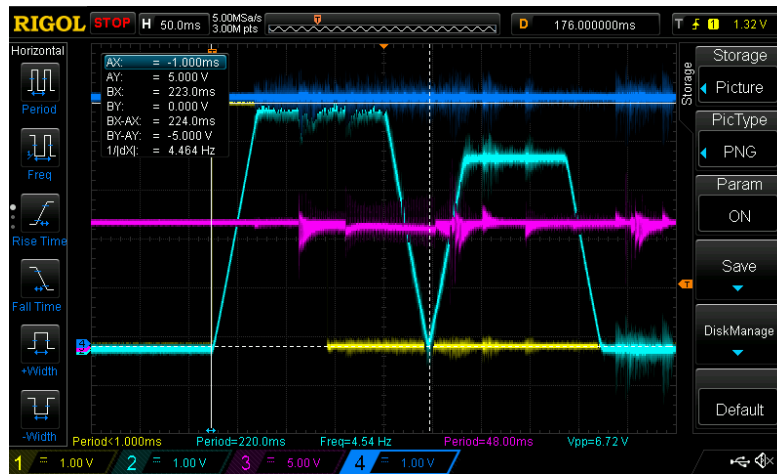


Figure 4: 3.png

3.1.6 6

- Percentuale di ritorno: 90
- Sessione: 9
- Ms inseriti: 175
- Ms misurati 224

Risultato: Situazione migliorata

3.1.7 7

- Percentuale di ritorno: 95
- Sessione: 10
- Ms inseriti: 175
- Ms misurati 224

Risultato: Troppa deriva negativa

3.1.8 8

- Percentuale di ritorno: 90
- Sessione: 11
- Ms inseriti: 175



Figure 5: 4.png

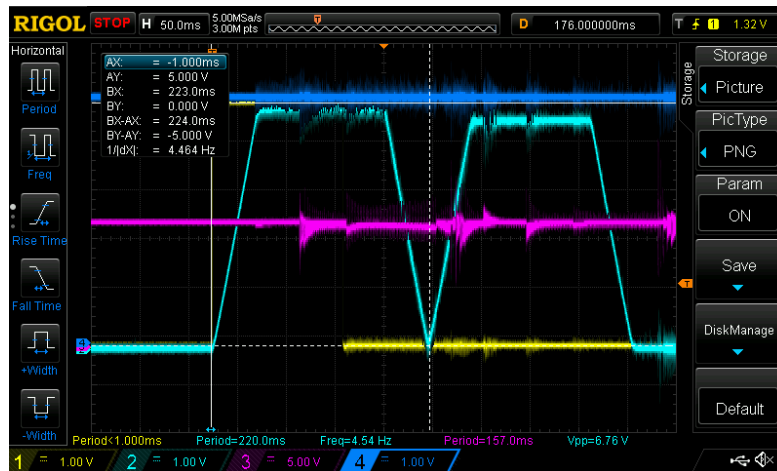


Figure 6: 5.png

- Ms misurati 224

Risultato: Soluzione mediamente buona, errore medio circa a 0.

3.2 Sistema di controllo

3.2.1 1

- Percentuale di ritorno: 90

- Sessione: 11
- Ms inseriti: 175
- Ms misurati 224
- Angolo medio: $[61.1 \pm 4.5]$ deg

3.2.2 2

- Percentuale di ritorno: 20
- Sessione: 12
- Ms inseriti: 150
- Ms misurati 177
- Angolo medio: $[50.9 \pm 3.3]$ deg



Figure 7: 6.png

3.2.3 3

- Percentuale di ritorno: 20
- Sessione: 13
- Ms inseriti: 100
- Ms misurati 120

- Angolo medio: Non rilevato

Si è rotto il cavo che dava il segnale in input, presentando un problema, salvato nelle seguenti foto.



Figure 8: 7.png



Figure 9: 8.png

3.2.4 1

Ripartiti il giorno seguente con nuove prove per la velocità.

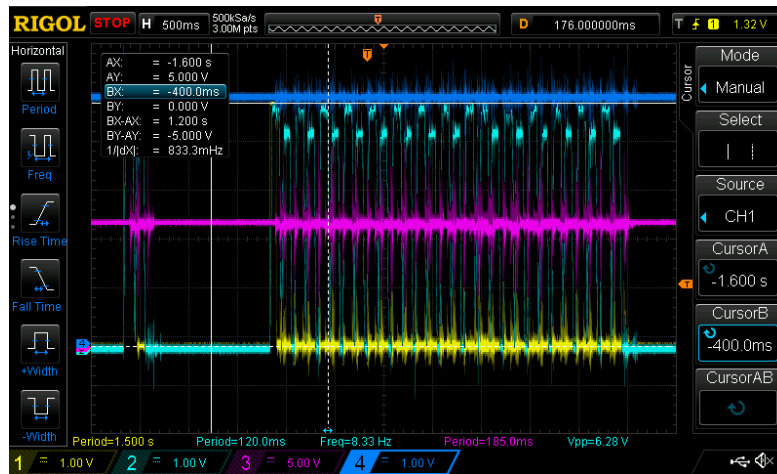


Figure 10: 9.png



Figure 11: 10.png

- Percentuale di ritorno: 80
- Sessione: 14
- Ms inseriti: 200
- Ms misurati 213
- Angolo medio: $[60.8 \pm 2.4]$ deg

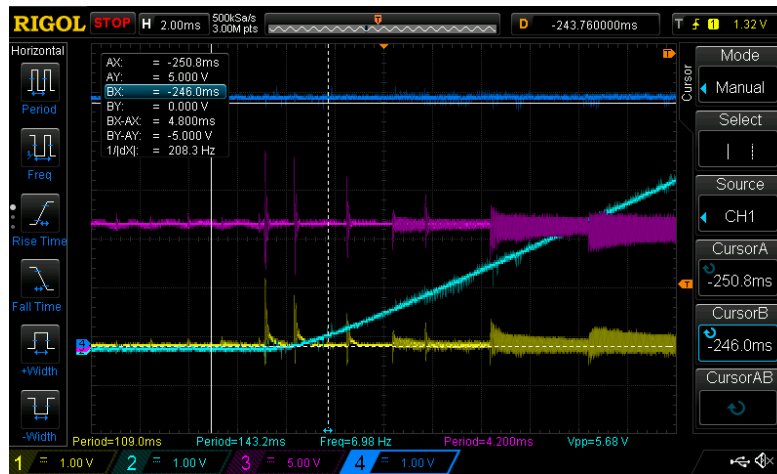


Figure 12: 11.png

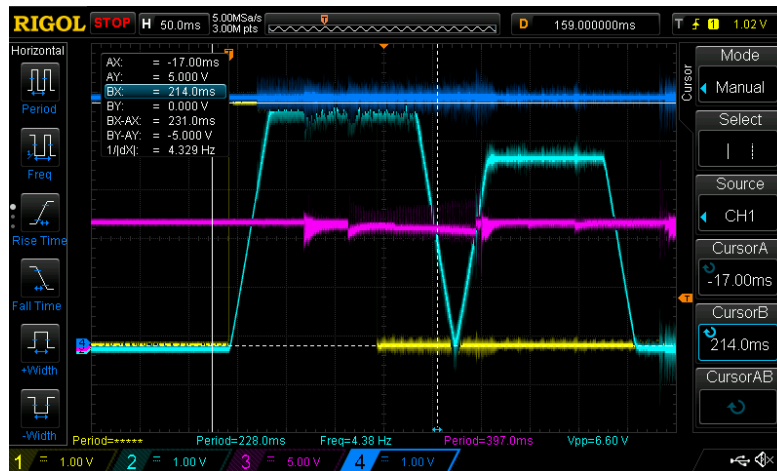


Figure 13: 12.png

3.2.5 2

- Percentuale di ritorno: 90
- Sessione: 15
- Ms inseriti: 225
- Ms misurati 262

- Angolo medio: $[73.4 \pm 1.6]$ deg

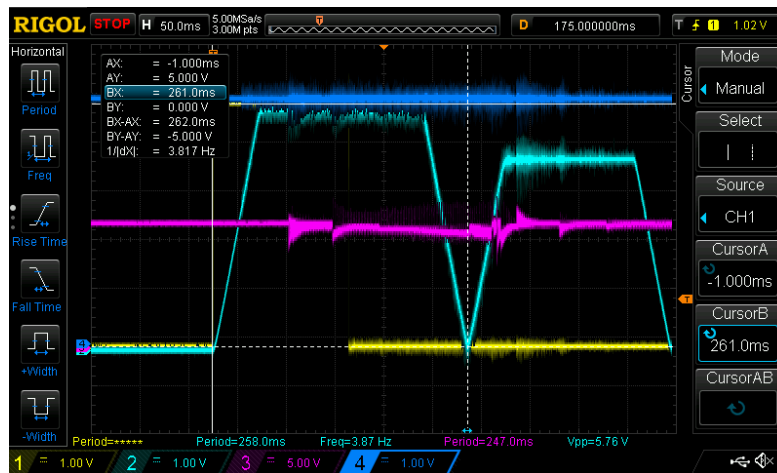


Figure 14: 13.png

Nelle varie prove si è affinata la percentuale di ritorno

3.2.6 3

- Percentuale di ritorno: 80
- Sessione: 16
- Ms inseriti: 250
- Ms misurati 292
- Angolo medio: $[77.8 \pm 1.9]$ deg

3.2.7 4

- Percentuale di ritorno: 80
- Sessione: 17
- Ms inseriti: 350
- Ms misurati 408
- Angolo medio: $[108.1 \pm 0.7]$ deg

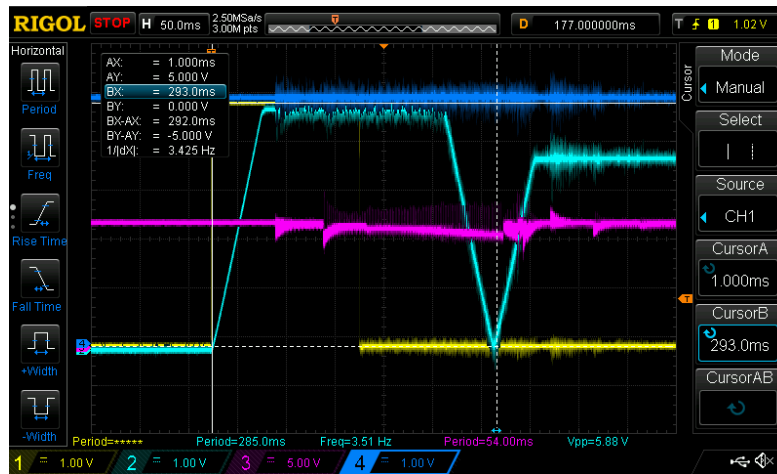


Figure 15: 14.png



Figure 16: 15.png

3.3 Diametro puleggia

In questa fase si è sostituita la puleggia in uscita dal riduttore con una puleggia più grossa. In particolare, la prima puleggia presentava un braccio di 10 mm mentre quella utilizzata in queste sessioni aveva un braccio di 22mm. Si è, quindi, provato a raggiungere il limite del motore in termini di velocità. Ho riscontrato che la puleggia più grossa favorisce un ritorno "naturale", rendendo più delicata la calibrazione del ritorno. Questo ha introdotto un fenomeno di

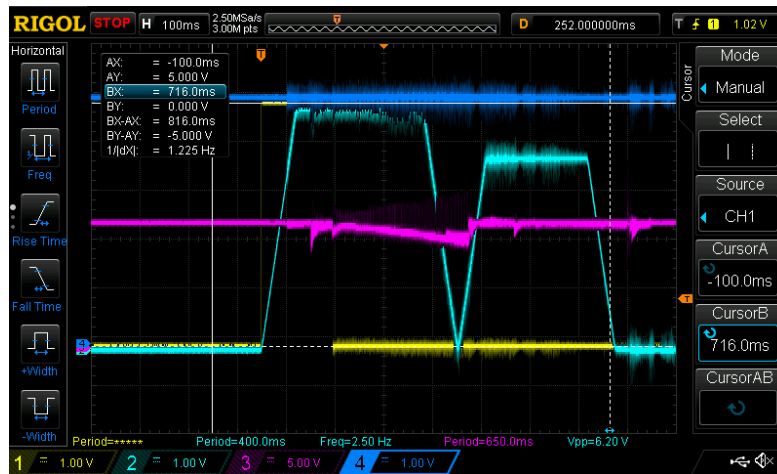


Figure 17: 16.png

”rimbalzo” dovuto a velocità eccessiva del motore rispetto al cavo. si presume che il cavo venisse scaricato prima che la molla di carico fosse in grado di esercitare forza sul motore. Si è, inoltre, introdotta una variabile maxDuty per specificare la velocità massima da far raggiungere al motore.

3.3.1 1

- Percentuale di ritorno: 50
- Sessione: 18
- Ms inseriti: 70
- Ms misurati 74
- MaxDuty: 700

Risultato: sembra ci sia rimbalzo

3.3.2 2

- Percentuale di ritorno: 20
- Sessione: 19
- Ms inseriti: 90
- Ms misurati 92
- MaxDuty: 800

Risultato: Sembra poco ritorno, si prova al 50

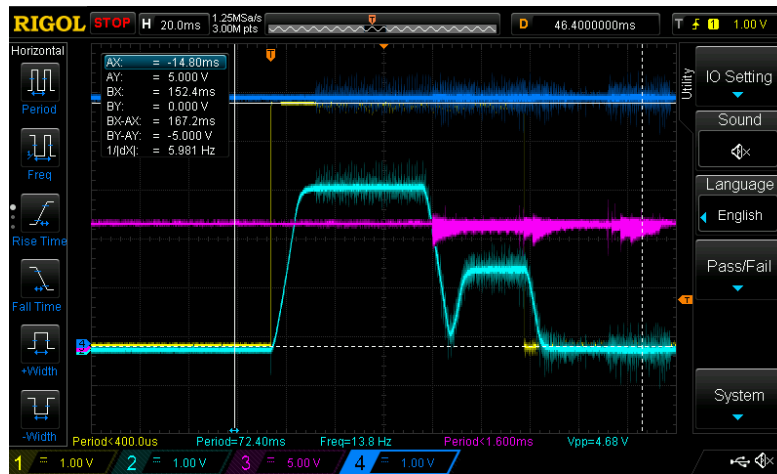


Figure 18: 17.png

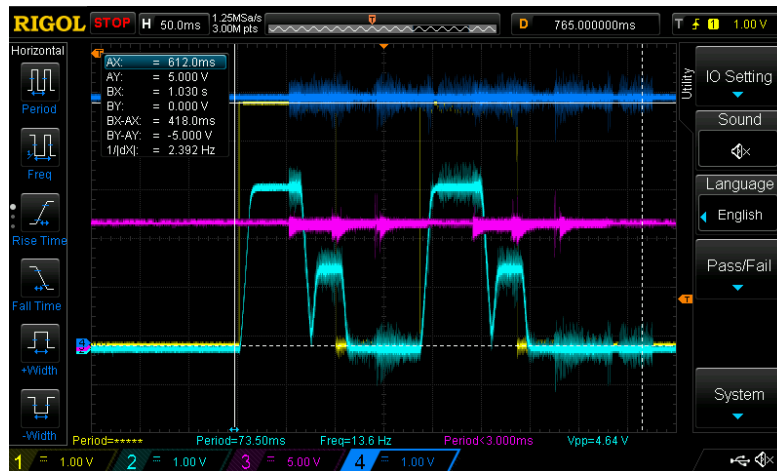


Figure 19: 18.png

3.3.3 3

- Percentuale di ritorno: 50
- Sessione: 20
- Ms inseriti: 90
- Ms misurati 98

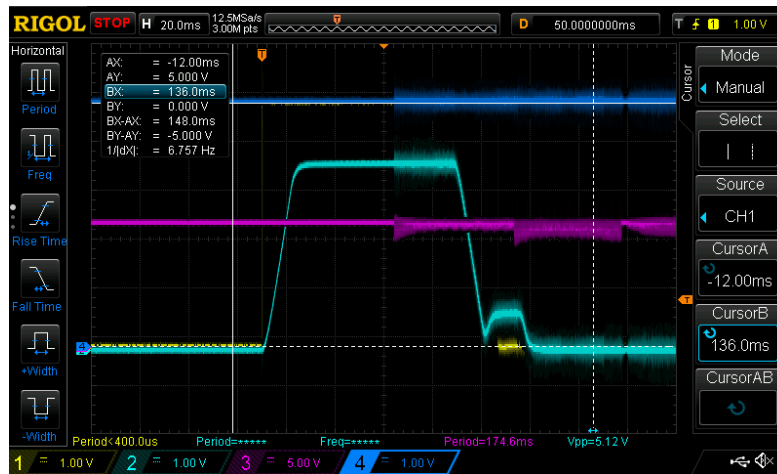


Figure 20: 19.png

- MaxDuty: 1023

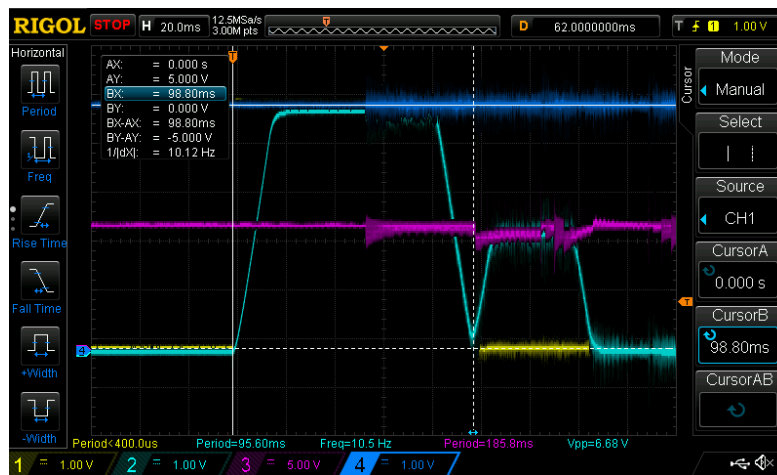


Figure 21: 20.png

Risultato: 50

3.3.4 4

- Percentuale di ritorno: 35

- Sessione: 21
- Ms inseriti: 90
- Ms misurati 92
- MaxDuty: 1023

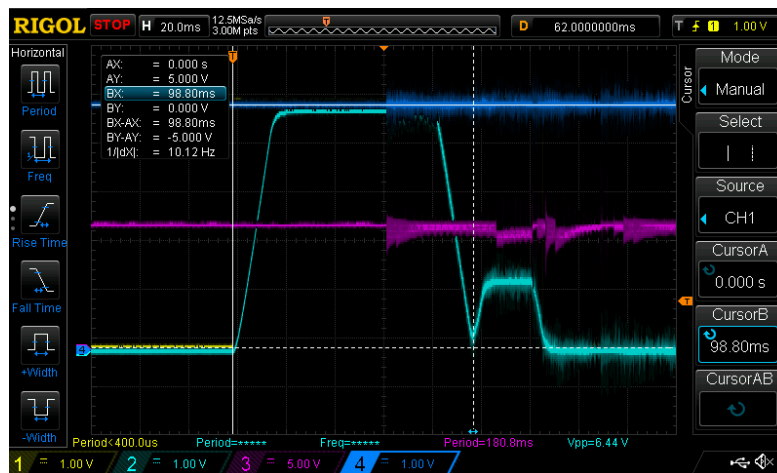


Figure 22: 21.png

Risultato: Permane strano rimbalzo, provo ad eliminare il ritorno

3.3.5 5

- Percentuale di ritorno: Non effettuato il ritorno
- Sessione: 22
- Ms inseriti: 90
- Ms misurati 92
- MaxDuty: 1023

Risultato: Si vede che il motore ha bisogno di essere accompagnato. Apparentemente no rimbalzo ma guardare le conclusioni finali.

3.3.6 6

- Percentuale di ritorno: 25
- Sessione: 23

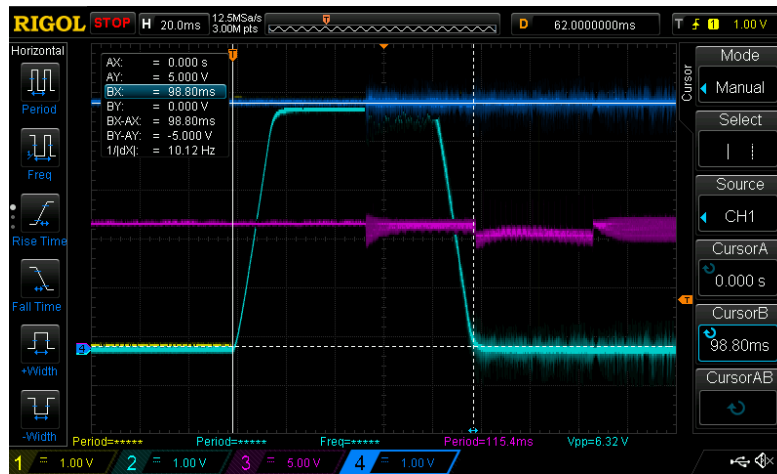


Figure 23: 22.png

- Ms inseriti: 90
- Ms misurati 92
- MaxDuty: 1023

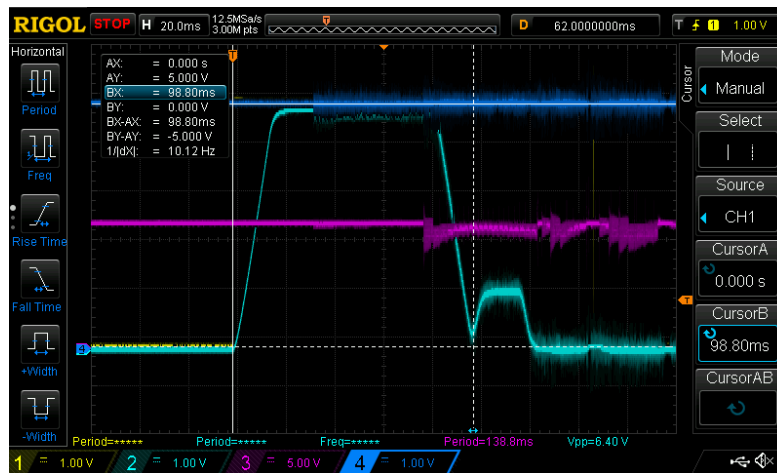


Figure 24: 23.png

Risultato: A questo punto ricompare il rimbalzo, dovuto a cause apparentemente ignote.

3.3.7 7

- Percentuale di ritorno: 25
- Sessione: 24
- Ms inseriti: 90
- Ms misurati 92
- MaxDuty: 1023



Figure 25: 24.png

Risultato: Cercato di stabilizzare il rimbalzo via codice con scarsi risultati

3.3.8 8

- Percentuale di ritorno: 25
- Sessione: 25
- Ms inseriti: 90
- Ms misurati 92
- MaxDuty: 1023

Risultato: Poiché il problema persisteva ed era sera tardi, ho scelto di ignorare il problema e andare avanti a caricare il motore in modo da ottenere almeno i 450 N della prova effettuata.

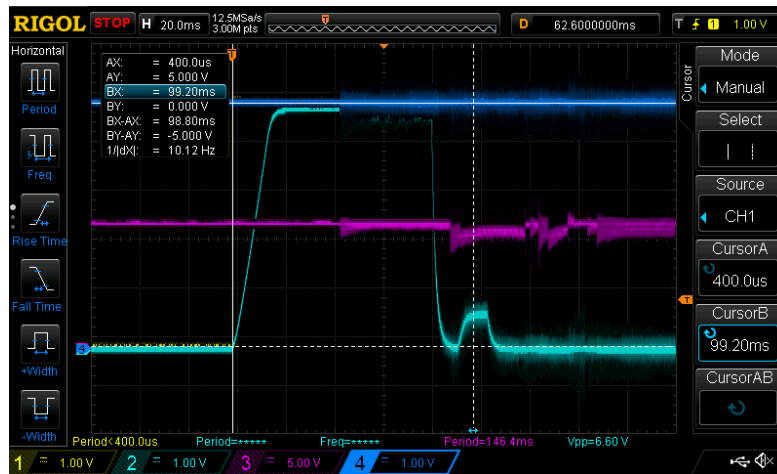


Figure 26: 25.png

3.3.9 9

- Percentuale di ritorno: 15
- Sessione: 26
- Ms inseriti: 90
- Ms misurati 92
- MaxDuty: 1023

Risultato: Ritorno molto lento e con rimbalzo

3.3.10 10

- Percentuale di ritorno: 25
- Sessione: 27
- Ms inseriti: 110
- Ms misurati ?
- MaxDuty: 1023

Risultato: rilevati 179 N. Il motore sembra tornare lento, prima curva sbagliata, permane rimbalzo e corrente che raggiunge i 6A.

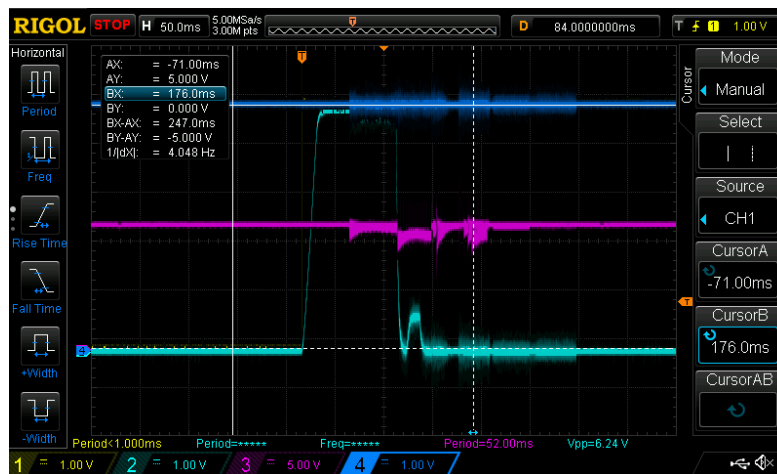


Figure 27: 26.png

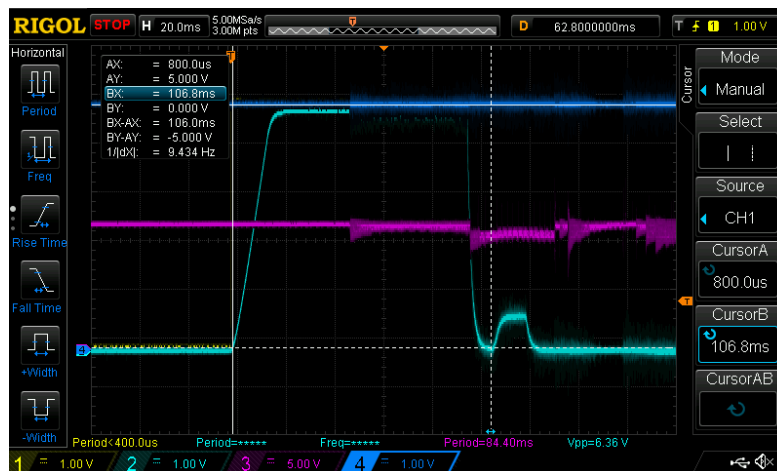


Figure 28: 27.png

3.3.11 11

- Percentuale di ritorno: 50
- Sessione: 28
- Ms inseriti: 140
- Ms misurati 163



Figure 29: 28.png

- MaxDuty: 1023

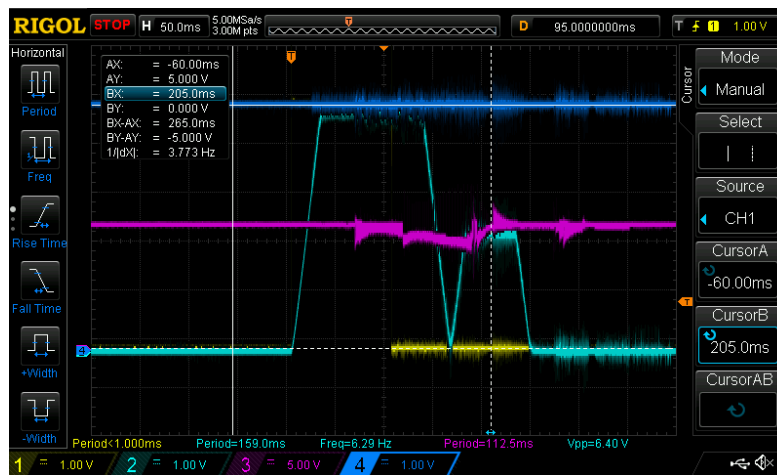


Figure 30: 29.png

Risultato: Il rimbalzo sparisce esercitando più forza e sembra sia un buon carico.

3.3.12 12

- Percentuale di ritorno: 70

- Sessione: 29
- Ms inseriti: 160
- Ms misurati 180
- MaxDuty: 1023



Figure 31: 30.png

Risultato: Ritorno eccessivo e raggiunti i 293N di picco massimi per 7.93 A. Questi saranno i valori di picco delle prove.

3.3.13 13

- Percentuale di ritorno: 60
- Sessione: 30
- Ms inseriti: 200
- Ms misurati ??
- MaxDuty: 1023

Risultato: troppo ritorno

3.3.14 14

- Percentuale di ritorno: 40
- Sessione: 31

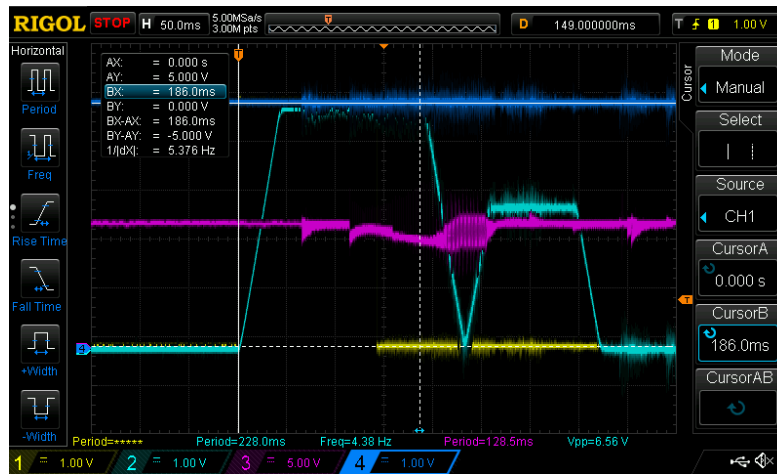


Figure 32: 31.png

- Ms inseriti: 200
- Ms misurati ??
- MaxDuty: 1023

Risultato: Stessi di prima ma deciso di lasciare stare il ritorno

3.3.15 15

- Percentuale di ritorno: 25
- Sessione: 32
- Ms inseriti: 240
- Ms misurati 278
- MaxDuty: 1023

Risultato: Il motore pare fermarsi

3.3.16 16

- Percentuale di ritorno: 25
- Sessione: 33
- Ms inseriti: 280
- Ms misurati ?



Figure 33: 32.png

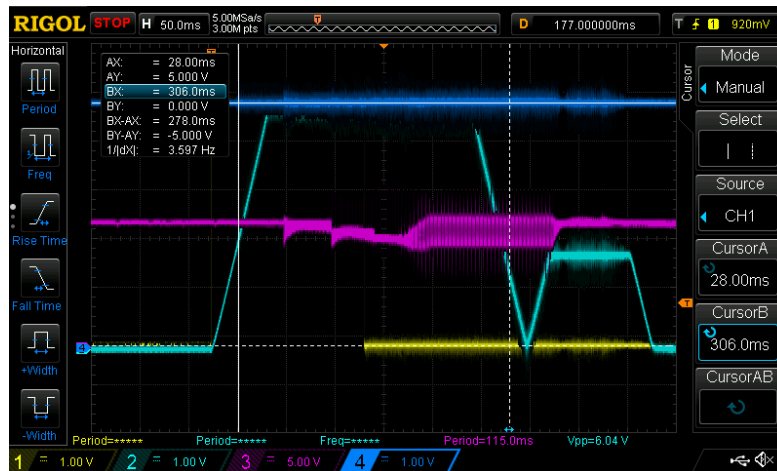


Figure 34: 33.png

- MaxDuty: 1023

Risultato: Il motore si ferma e la forza trasmessa spiana, raggiunta coppia e valori di tenuta. Senza accorgermi era già successo nelle acquisizioni precedenti. Con questo tempo si percepisce un leggero sibilo durante qualche ms di stallo.

3.4 Verifica Matlab per durata

A seguito delle prove svolte, si è voluto verificare la stima di corrente effettuata nel mio lavoro di tesi. Per fare ciò si è scelto di interpolare una curva di corrente con la richiesta di scalata e calcolare il valore efficace di corrente così come il surriscaldamento.

Sovrapponendo il ciclo più gravoso nel quale il motore stalla si ottengono i seguenti dati:

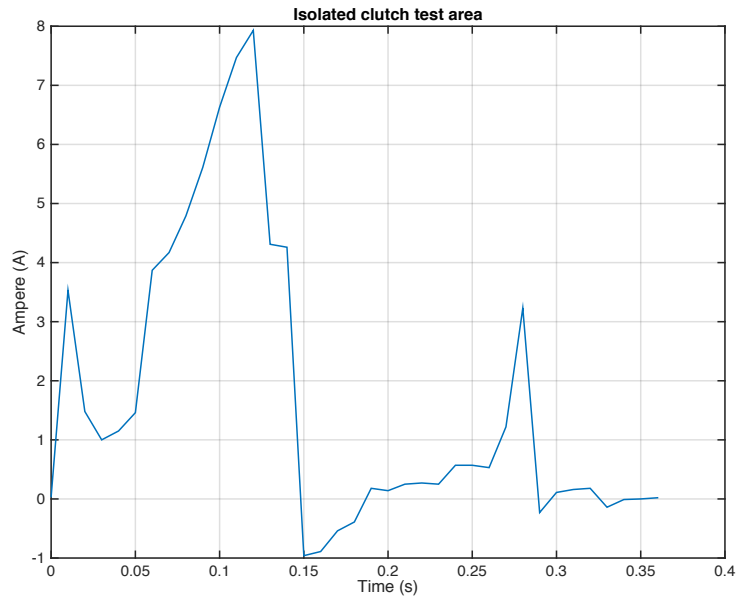


Figure 35: Andamento della corrente in un tiraggio alla massima forza

Come dimostrano i grafici 35, 36 e 37, si può capire che nella mia tesi è stata fatta un'assunzione sbagliata. La richiesta di corrente simulata risulta, infatti, molto diversa se confrontata con quella reale misurata in fase di test. Questo avviene perché i rendimenti del motore e del riduttore inficiano moltissimo la performance dell'attuazione, riducendo la coppia di stallo e limitando quindi l'assorbimento di corrente. Calcolando quindi la corrente efficace si ottiene, dunque un valore di 0.5642 che è ben sotto i circa 4.5 A continuativi ammessi dal motore.

3.5 Conclusioni tratte

Raccolgo qui le conclusioni tratte per ogni sezione.

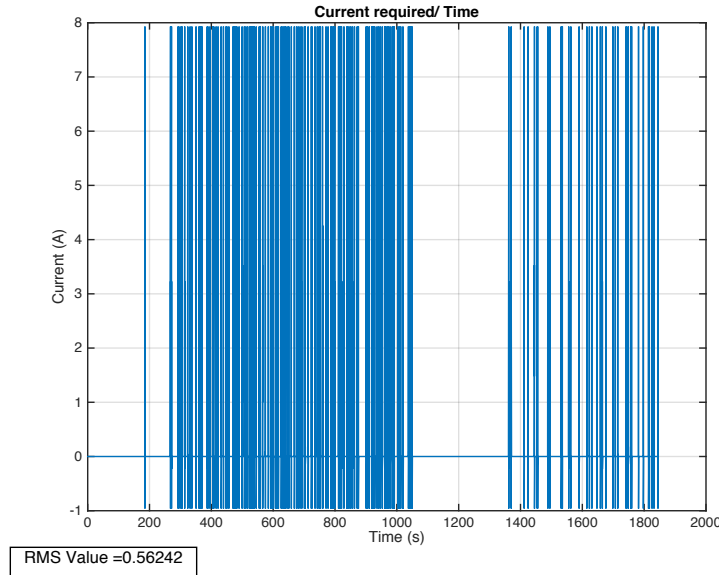


Figure 36: Corrente RMS di un'endurance simulata

3.5.1 Legge per il ritorno

Il ritorno, come dimostrato con la puleggia grande, dipende fortemente dal sistema. Si pensa che le variabili che influenzano un buon ritorno siano le seguenti: tensionamento del cavo, diametro della puleggia e ovviamente il carico. Allo scopo di avere un buon rientro quello che si deduce da questo test è che non esiste un valore esatto di percentuale "universale" per tutti i carichi ma va studiata ad hoc una volta applicato il carico reale. Quello che abbiamo appreso da questi test è che per trovare la percentuale corretta vanno effettuati dei test "a salire", dando sempre più ritorno. Una buona percentuale di ritorno si può definire tale se lascia il cavo leggermente tensionato, ma non troppo. Si è osservato che questo garantisce una buona ripetibilità.

3.5.2 Sistema di controllo

Ho notato che la scheda ha un leggero ritardo rispetto al suo input, per ragioni a noi ignote. In aggiunta a questo, la velocità prodotta e analizzata dal potenziometro non è affatto simile a quella introdotta ma assomiglia più ad una sinusoide a scalini. Tuttavia, sebbene non appare essere presente alcun sistema di controllo, perlomeno nessuno efficace, rimane un fatto che la scheda sia deterministica. A richieste costanti risponde con spazi percorsi compatibili. Vorrei far notare che i valori degli angoli misurati e riportati in questo documento

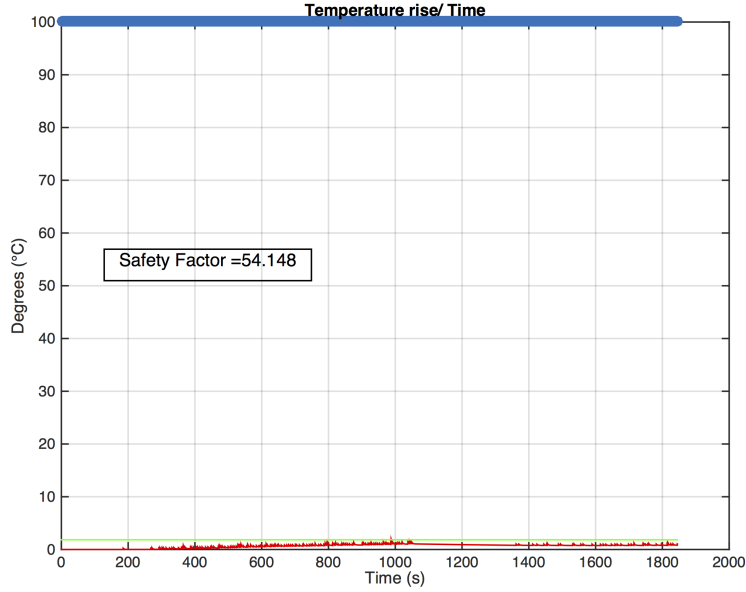


Figure 37: stima termica su dati reali

sono medie aritmetiche di 15 valori dove l'errore presentato è un'incertezza estesa espressa come intervallo di tolleranza. Da letteratura sappiamo che, con un approccio gaussiano, l'intervallo di incertezza si può calcolare dividendo per radice di 3. Inoltre, i valori di angolo a più basso errore (gli ultimi, ndr) sono quelli con carico più alto. Questo suggerisce che, una volta tensionato il cavo, il motoriduttore e scheda si comporta in modo deterministico. Queste due osservazioni mi portano a pensare che nonostante il banchetto sia realizzato molto bene, presenta inevitabili giochi dovuti a componenti normalmente trascurate tra cui elasticità del cavo, puleggia che si inclina a causa dell'azione tagliente esercitata del cavo, attrito della puleggia, massa della molla e giochi generali del sistema. Il sistema in macchina presenta un collegamento molto più breve e di qualità certamente superiore. Ciò ci porta a pensare che una complicazione della logica del controllo non sia necessaria, specie vista l'assenza di tempo.

3.5.3 Diametro puleggia

Per quanto riguarda la scelta della puleggia, questa è stata critica in quanto influenza molto le richieste in termini di coppia e velocità al motore. Avendo raggiunto la coppia di stallo con la puleggia grande siamo riusciti a calcolare a fare i seguenti calcoli: Dato che:

$$C_{puleggia} = F_{cavo} \cdot b_{puleggia} \quad (1)$$

Sappiamo che nel momento in cui il motore stalla, avendo che $b = 22\text{mm}$, possiamo ricavare che:

$$C_{stallo} = F_{max} \cdot b_{puleggia} = 293 \cdot 0.022 = 6.45 \text{ N} \quad (2)$$

Introducendo rapporto di riduzione e rendimento massimo ottenibile posso ricavare la coppia di stallo fornita dal motorino in quella acquisizione:

$$C_{stallo_{mot}} = \frac{C_{stallo}}{\eta_{mot} \cdot \eta_{rid} \cdot ratio} = \frac{6.45 \text{ N}}{0.8 \cdot 0.65 \cdot 98} = 126.5 \text{ mNm} \quad (3)$$

Questa risulta essere ben inferiore ai 385 mNm citati a datasheet. Tuttavia, il riduttore inficia pesantemente i valori limiti dei datasheet e questa riduzione può considerarsi nella norma, specie dato un utilizzo così gravoso del motore. Volendo dimensionare una nuova puleggia intermedia abbiamo calcolato:

$$b_{desiderato} = \frac{C_{stallo_{mot}}}{F_{progetto}} = 0.1265 \cdot 0.8 \cdot 0.65 \cdot 98500 = 12.8 \text{ mm} \quad (4)$$

Essendo la puleggia piccola di 10 mm di braccio, si è optato per una soluzione intermedia, contando sulla bontà del motore. È stata quindi realizzata una puleggia da 15mm di braccio, che permette, in seguito a test effettuati in data 17/07/2015, di erogare una coppia di 470N. (Dati in via di aggiornamento).

3.5.4 Dimensionamento effettuato

A seguito di quanto osservato riguardo all'andamento della corrente nel tempo è facile capire che in questo design ciò che è stato il limite di fatto del progetto è stato il riduttore. Esso, infatti, ha ridotto notevolmente il rendimento del sistema, facendo sì che la coppia massima ottenibile sia di circa un terzo quella del datasheet del motore. Inoltre, anche considerando questo fattore, è stata completamente sbagliata la stima della corrente utilizzando la popolarissima equazione nota in letteratura, equazione 5:

$$C = K_t \cdot i \quad (5)$$

Questa, a quanto pare, risulta essere valida solo ed esclusivamente in regime stazionario dove non sono presenti effetti induttivi e transitori. Questo errore ha portato, unito ad un occhio critico derivante dall'esperienza pregressa, ha l'acquisto di materiale sovradimensionato che si è rivelato essere appropriato. Tutto ciò implica che il dimensionamento termico effettuato è risultato ampiamente non necessario in quanto la corrente stimata era sbagliata, portando ad un coefficiente di sicurezza termico di 54. Tutto ciò non significa, però, che il sistema sia stato sottodimensionato, anzi! Essendo stati spannometricamente stimati 30W necessari al carico e avendo comprato un attuatore da 60W usato in regime intermittente, è abbastanza lecito dire che, con un rendimento di circa il 30% ci si è avvicinati ad un intorno di quei valori utilizzando però peso addizionale.

4 Montaggio a bordo macchina

Dopo aver svolto i test statici sul banchetto prova abbiamo quindi stabilito queste cose:

- Il braccio della puleggia da usare era inizialmente di 15 mm e, eventualmente, abbassarlo in caso di stallo. Questo è stato deciso in quanto la forza del carico (la frizione) non è mai stata rilevata in condizioni di utilizzo ma solo tramite test simili. Si voleva, inoltre, essere sicuri di ottenere la massima velocità ottenibile dal sistema.
- La percentuale di ritorno e il tempo totale di tiraggio vanno settati con la frizione ma almeno abbiamo ottenuto un sistema deterministico che fa quello che gli si dice di fare. Siamo riusciti ad isolare la scheda e a debuggarla con il banchetto, capendo i problemi e come si comporta.
- Il sistema era funzionante fuori bordo e bisognava testare la variabile cablaggio e montaggio in macchina e, infine, il test in pista.

Come primo test si è scelto di cambiare una sola variabile mantenendo costante tutto il setup del banchetto a meno del carico. Per fare ciò abbiamo utilizzato la stessa batteria esterna, la stessa scheda e lo stesso computer ma abbiamo montato il motorino frizione in macchina con la stessa puleggia e collegato il tutto. In questo modo l'unica variabile che cambiava era il carico e avremmo avuto un metro di confronto con il banchetto. I test sulla frizione reale sono andati benissimo, il motore si è comportato esattamente come le aspettative e hanno dato valori di corrente confrontabili con le prove effettuate sul banchetto, assicurandoci la bontà dei test fatti fino a quel punto.

Dati i numerosi tacconi fatti sulla scheda di prova si è scelto di utilizzare una seconda board per implementare la versione finale e, dopo le saldature del caso, si è scelto di testare con il cablaggio. Il lettore deve tenere presente che questi test sono stati fatti 2 settimane prima della competizione in Germania e c'era la ferma volontà di fare almeno una sessione di test del sistema per poterlo montare all'evento. Le saldature e il setup hanno portato via un intero sabato ed essendo la domenica, il giorno successivo, l'unica possibilità di test abbiamo finito di lavorare alle 23.30. L'ultimo test fatto a quell'ora non è stato soddisfacente e il motore sembrava non avere forza sufficiente al tiraggio del leveraggio. La mattina dopo abbiamo scelto comunque di montare la scheda ma, purtroppo, abbiamo avuto un cortocircuito con la scatola interna della powerbox. Fortunatamente il corto è stato fatto con il cavo di alimentazione entrante nella scheda, non rovinando la stessa. Nei giorni seguenti abbiamo scoperto che il motivo della mancata forza era l'assenza di una fase, saldata male nella scheda. Questo comportava potenza ridotta da parte del motore con successivo stallo. Fortunatamente siamo riusciti a sistemare questo problema velocemente e, grazie ad un addizionale test, siamo riusciti a provare il sistema prima dell'evento.

5 Test in pista

Prima della partenza per il test si è scelto di valutare i parametri di tempo totale e di ritorno del leveraggio assieme ai ragazzi del gruppo motore e con una banale ispezione visiva si sono scelti dei valori di tempo totale e di ritorno. I test in pista sono stati stupefacenti, personalmente mi aspettavo almeno una giornata di tuning per ottenere una scalata affidabile e invece il sistema si è dimostrato utilissimo sin dal primo secondo. I piloti erano incredibilmente soddisfatti e giudicavano il sistema come “una figata”. Il motorino frizione ha permesso la scalata in curva dando la possibilità al pilota di uscire dalla curva con la marcia giusta. Ovviamente il funzionamento del sistema non era così perfetto e si presentavano 3 problemi, poco frequenti ma comunque presenti:

1. Scalata mancata.
2. Sfrizionate senza alcuna richiesta di scalata.
3. Richiesta di scalata non accettata dalla centralina e imputate dal pilota alla frizione.

Data la mancanza di test per risolvere questi problemi si è scelto di tenere la situazione invariata per la gara in Germania e di sistemare il tutto per la competizione italiana di settembre. All’FSG la macchina non si è comportata male. Sfortunatamente non ha finito l’endurance a causa di un problema al differenziale, si presume troppo olio che andando in pressione ha fatto saltare il paraolio. Per questa ragione siamo stati squalificati al cambio pilota quindi abbiamo solo metà endurance guidata da Davide Fogliato. In ogni caso da acquisizione e sentendo il suo parere la frizione si è comportata sufficientemente bene e ha permesso il posizionamento all’ottava posizione nell’autocross.

Tornati in Italia si è continuato lo sviluppo del sistema cercando di fare delle analisi migliori. Purtroppo non avevamo in macchina tutti i dati a disposizione nel banchetto ma avevamo il potenziometro in uscita dal motorino frizione il quale ci dava dati sufficienti per giudicare se il tiraggio del cavo fosse deterministico e il ritorno corretto. Nei primi test abbiamo quindi deciso di operare nei seguenti modi riguardo ai tre problemi sopraelencati:

1. Migliorato sincronismo con il sistema cambio.
2. Riprogettata una scheda più solida.
3. Istruito il pilota che non può chiedere scalate a 11000 rpm e alzato il limite.

Inoltre, è nato il problema di valutare **quantitativamente** la performance del sistema frizione per confrontare i run. Abbiamo quindi inventato questi coefficienti

$$Percentuale_{scalate} = \frac{Scalate_{richieste\ totali} - Scalate_{mancate\ totali}}{Scalate_{richieste\ totali}} \cdot 100 \quad (6)$$

$$Eventi_{strani} = \frac{\# \text{ assoluto di eventi strani}}{\text{tempo del run}} \cdot 1000 \quad (7)$$

Il coefficiente dell'equazione 6 ci ha aiutato a migliorare il sincronismo con il sistema cambio mentre il secondo ci ha aiutato a valutare la differenza tra le schede.

Quello che abbiamo fatto è stato ritardare l'intervento del sistema frizione per far sì che intervenisse solo quando il pistone era al massimo della forza sul leveraggio cambio. Così facendo la frizione poteva scaricare gli alberi del cambio per permettere la disingranata. Il secondo coefficiente invece ci ha permesso di stabilire che l'ultima scheda fatta, realizzata con componenti through-hole più grossi presentava una migliore stabilità rispetto alla prima scheda senza però risolvere completamente i problemi.

Nella gara di Varano la macchina si è classificata seconda nell'autocross e se non si fosse persa l'ala l'auto avrebbe ottenuto sicuramente il secondo posto se non, forse, addirittura il primo. Il sistema si è comportato nel seguente modo:

Pilota	Davide Fogliato	Nicola Cardinali
Cambiate totali	112	122
Mancate per sincronismo	1	0
Mancate per errore pilota	1	0
Mancate totali	2	0
Cose strane	1	11
Cose positive	1	4
$Percentuale_{cambiate}$	98.2%	100%
$Eventi_{strani}$	1.36	20.95

Le voci citate si riferiscono alle seguenti cose:

- Cambiate totali: Numero di richieste di scalate richieste dal pilota.
- Mancate per sincronismo: scalata non effettuata a nonostante corretto tiraggio e attuazione cambio.
- Mancate per errore pilota: richiesta non accettata dalla centralina.
- Mancate totali: numero totale di scalate non effettuate.
- Cose strane: problemi dovuti a comandi errati del motorino frizione. In alcuni casi si parla di sfrizionate, in altri casi si parla di 3 sfrizionate con 2 richieste o, similmente, di 2 sfrizionate con una richiesta.
- Cose positive: il pilota ha scalato due marce con una sola sfrizionata.
- $Percentuale_{cambiate}$: il coefficiente sopra introdotto.
- $Eventi_{strani}$: il coefficiente sopra introdotto.

Si noti che per calcolare la voce $Eventi_{strani}$ si è considerato un tempo medio di 52.5 secondi a giro assunto costante per i 14 giri di Davide Fogliato e 10 di Nicola Cardinali, ovviamente espressa in minuti.

6 Conclusioni dell'anno

In questa sezione vorrei raccogliere quelle che sono le mie conclusioni dopo l'anno trascorso e, avendo personalmente seguito il progetto di questo sistema sin dall'inizio vorrei sfruttare questa opportunità per fare un checkpoint generale del know-how da me acquisito sperando venga successivamente sfruttato dai futuri membri del team.

6.1 Tempistiche

L'attuazione della frizione tramite motorino non è stato un argomento banale e ha richiesto una grossa quantità di tempo. La conoscenza dei motori elettrici si è rivelata fondamentale ed ha permesso un notevole risparmio di tempo. Ricevere il motorino con riduttore e scheda di controllo a febbraio-Marzo si è rivelato cruciale nel successo di questo sistema. Una volta prodotta la scheda di controllo (fine maggio) ci sono voluti quasi due mesi per avere il tutto montato in macchina. Forse si sarebbe potuto montare prima in macchina ma ritengo che lo studio fatto sul banchetto sia stato essenziale allo scopo di avere del know-how applicabile in fase di test. Questo ha permesso di limitare al minimo le attese del resto del team permettendo agli altri reparti di procedere al miglioramento della macchina. Per il futuro si raccomanda di iniziare prima questa fase di debug, possibilmente per inizio marzo in modo da essere pronti per fine aprile. Questo implica un contatto con gli sponsor da novembre per avere il prodotto in mano ad inizio Marzo e, a mio avviso, questo è il problema più grosso per il seguente sistema. Avendo tutte le componenti in casa ad inizio marzo permette un lavoro più preciso dando quindi risultati finali consistenti ed un avanzamento del know-how e una certa robustezza del sistema. In parole povere, bisogna essere consci della propria ignoranza e bisogna capire che ci saranno problemi ma, soprattutto, che se anche per qualche fortuito caso non ce ne fossero, **arrivare in anticipo sulla data della consegna non fa MAI male a nessuno.**

6.2 Dimensionamento

Dopo un intenso lavoro di tesi, realizzare il tutto e scoprire la bontà del lavoro è stato per me un'opportunità di apprendimento e da la possibilità al team di pesare il mio lavoro di tesi valutandone l'applicabilità. Come già spiegato nella sezione 3.5.4 il dimensionamento termico è stato utile ma sbagliato: il vero limite del mio design è stato in realtà il riduttore. Fortunatamente il motore era sovradimensionato, cosa che ha permesso comunque delle tempistiche ragionevoli e una performance accettabile. Se tornassi indietro dedicherei più tempo alla scelta del riduttore cercando di privilegiare un design con meno stadi di riduzione in modo da alzare i rendimenti del sistema e ridurre il peso totale del sistema. Resta di fatto che il dimensionamento termico è una buona tecnica da perseguire perchè permette di capire veramente se il limite è il motore. Una cosa che ho invece azzeccato bene nel mio lavoro di tesi è la scelta della temperatura ambiente, cosa che avevo ipotizzato essere sui 55°C ma essendo in

realità misurata sui 49°C. Inoltre, le mie simulazioni stimavano come efficienza del sistema quella massima ed essendo data da:

$$\eta_{totale} = \eta_{motore} \cdot \eta_{riduttore} = 0.8 \cdot 0.65 = 0.52 \quad (8)$$

In verità, a misure fatte, il rendimento si assesta attorno ad un 30% circa, quindi si parla di un 60% di quello massimo ottenibile. Questo parametro è riferito, nel nostro caso, alla coppia di stallo, poichè, come spiegherò nelle sezioni successive, il motore va considerato sempre alla massima velocità. Quindi, in conclusione, non tutto il dimensionamento è da buttare, in linea generale il processo totale è da considerarsi valido, specie l’ottimizzazione del rapporto di riduzione, ma restano da migliorare dei passaggi per avere stime più precise che aiutano nella scelta delle componenti rendendo il sistema più veloce ma soprattutto più leggero.

6.3 Scelta dell’attuatore

Avendo stabilito nella sezione precedente che il riduttore inficia particolarmente sul rendimento del sistema e quindi sul peso, mi sono chiesto quale fosse la causa. Guardando i datasheet dei riduttori ho notato che il rendimento dipende dal numero di stadi di riduzione del riduttore (cosa abbastanza ovvia). Ciò che non è ovvio, o almeno non lo era durante il mio lavoro di tesi, che la scelta del motore è **estremamente** vincolata dal riduttore. Per ridurre peso, quindi, sarebbe preferibile non avere alcun riduttore. Ovviamente ciò non è possibile, però è sicuramente cercare di limitare il numero di stadi a 2 o addirittura 1. Usando un riduttore a 2 stadi invece che a 3 porta facilmente ad un efficienza del riduttore dell’80% o del 90% con uno stadio:

$$\eta_{totale} = \eta_{motore} \cdot \eta_{riduttore} = 0.8 \cdot 0.8 = 0.64 \quad (9)$$

$$\eta_{totale} = \eta_{motore} \cdot \eta_{riduttore} = 0.8 \cdot 0.9 = 0.72 \quad (10)$$

Questo mi ha fatto capire che, forse, la mia ipotesi fatta nel lavoro di tesi ovvero che *“I motori brushless sono più densi di potenza e portano quindi ad un vantaggio in termini di peso”*, seppur validissima in ambito teorico, non tiene alcun riguardo dell’utilizzo da farsi ed è quindi utile solo per vantarsi al bar di sapere la teoria. Quindi, essendo la movimentazione da fare lenta ma gravosa in termini di coppia (dove per “lenta” si intende rispetto alle velocità dei motori elettrici) è possibile che un motore BLDC non sia la scelta ideale per l’applicazione. Questo viene dalle seguenti considerazioni:

- I motori Brushless DC sono generalmente pensati per le alte velocità perchè essendo privi di spazzole hanno attriti inferiori rispetto ad un motore DC.
- Sebbene in termini di densità siano migliori, i BLDCM necessitano di riduttori con livelli maggiori di riduzione per riportare la velocità a quella

del carico. Il riduttore deve quindi contenere più stati e, quindi, essere più grosso e pesare di più.

- Se, come sto teorizzando, un BLDC e un DC sono comparabili in termini di peso, il primo necessita di driver per commutazione e complicazione nel controllo.

Con questo non sto dicendo che il progetto sia completamente errato, credo di aver discusso ampiamente i benefici del sistema ma ciò non toglie che ci sia un buon margine di miglioramento e, forse, nel prossimo progetto considererei un motore in corrente continua.

6.4 Montaggio in macchina

Il montaggio in macchina è stato realizzato con due attacchi a telaio vicino all'alberino, risultando in una buona configurazione totale anche se un pò difficile da montare. Inoltre, durante le prove sul banchetto ci siamo resi conto che era necessario un potenziometro che dicesse la rotazione del motore e abbiamo dovuto aggiungerlo con dei supporti non troppo eleganti. Anche qui, tornando indietro mi farei fornire un sensore incluso nel motore che assembla maxon direttamente nelle loro soluzioni avendo accesso in modo facile e affidabile alla posizione del rotore. Non credo, invece, che cambierei il design come è stato fatto. Il concetto di puleggia che lavora in parallelo al cavo frizione non è male e nell'ipotesi di sostituzione totale della frizione bisogna valutare gli assorbimenti di un tiraggio continuo per il dimensionamento. Non ho idea se ciò comporti un grosso aumento nel motore richiesto o meno, so solo che va confrontato il peso di un sistema manuale e elettrico con uno puramente elettrico, includendo nell'analisi anche i rischi del caso in termini di affidabilità.

6.5 Hardware di controllo

La scheda realizzata da noi per il controllo della frizione è stato, a mio avviso, l'elemento più critico di tutto il design e ciò che ha causato più problemi di tutto. La scheda con PIC ha sofferto problemi elettronici di qualsiasi tipo, probabilmente perchè come team è sbagliata l'idea di realizzarsi schede. Ho rivalutato molto la questione ultimamente e devo ammettere che nell'Università di Padova mancano le competenze tecniche per saper progettare le schede a livello professionale. Dico questo non perchè Daniele Zaccaria e Sebastiano Busolin non siano stati in grado di realizzarle, anzi, i coefficienti riportati nella tabella 5 dimostrano che tutto sommato si è comportata discretamente bene, ma mi riferisco al fatto che le schede elettroniche fatte in casa hanno i seguenti problemi realizzativi:

- non esistono tecniche sui libri per fare una progettazione fatta bene che garantisca un funzionamento, sono segreti industriali che le aziende si tengono stretti.

- la produzione delle schede fatte fare da Petrini pagando anche fior di soldi (200 euro di 2 schede) era di pessima qualità con una soldermask che si grattava via con il cacciavite.
- Saldare componenti smd, per quando uno possa riuscirci, è come giocare al lotto e personalmente non mi fido nemmeno delle mie saldature.
- L'elettronica in campo automotive è uno schifo, calore e vibrazioni riescono ad alterare anche le schede più robuste, figuriamoci quelle fatte da noi.

So che con la MG0509 sono state fatte delle schede a PIC per il cambio e anch'esse davano problemi. Ora il team è maturo e, se fosse per me, eliminerei del tutto la produzione di schede fatte in casa, non perchè non sia fattibile ma perchè sono lunghe da fare, sono necessarie diverse iterazioni e settimane di debugging, costano e la conoscenza tra un anno e l'altro è difficile da trasferire in quanto ogni anno dipende se si trovano persone (che sono rare dati gli insegnamenti al DEI).

Per queste ragioni, l'hardware del sottosistema frizione deve, a mio avviso, essere a prova di bomba e trasparente alla programmazione, il che significa che il codice viene programmato ed eseguito sempre con solidità e ripetibilità. Troppo spesso, infatti, è capitato di essere in fase di debugging del codice e non capire se il problema fosse nel codice o nell'Hardware. Troppo spesso abbiamo avuto problemi con computer, porte USB e persino IDE di sviluppo, cose assolutamente inconcepibili in un settore dove il lavoro va ribaltato in termini di secondi guadagnati. La creazione di schede e programmazione di microcontrollori su schede ad hoc è sicuramente stimolante e interessante ma fa perdere troppo tempo senza far guadagnare secondi su giro. Se spettasse a me nel futuro mi limiterei a comprare schede pronte e a gestirne l'implementazione e integrazione nel veicolo: questo permette di sviluppare molte più funzioni in modo molto più veloce senza dover sbattersi a far funzionare componenti ma limitandosi ad un lavoro intellettuale di programmazione.

Durante quest'anno abbiamo fatto un controllo molto semplice in catena aperta e, nonostante fossero neanche 100 righe di codice, abbiamo avuto problemi a non finire di qualsiasi tipo e, nonostante tutto, continuavamo ad avere sfrizionate random senza richiesta dalla centralina, identificando il problema nella scheda o nel codice da noi scritto.

6.6 Strategia di controllo

Come scritto qui sopra, quest'anno ci siamo limitati ad un controllo in catena aperta per un motivo di difficoltà. Pensare di fare il primo anno un controllo in retroazione senza aver alcuna esperienza pregressa ci è sembrato un pò utopistico e per questo abbiamo lasciato perdere. Tuttavia, anche avendo voluto, il debugging dell'hardware ha portato via talmente tanto tempo che anche volendo non sarebbe stato possibile svilupparlo. Nonostante il sistema abbia funzionato egregiamente, ingegneristicamente parlando sarebbe bene avere un controllo in

catena chiusa sulla posizione. Questo sarebbe necessario per permettere la scalata di due marce in velocità. Per contestualizzare questa affermazione, riporto una situazione presentatasi più volte sia in gara che in fase di test:

Il pilota, in seguito ad un rettilineo, deve affrontare un tornantino e, in staccata scala due marce. Riporto qui sotto dei parametri di configurazione della centralina e del sistema:

- Tempo di attuazione della frizione = 250 ms.
- Arm delay in ECU, ovvero tempo minimo dopo cui nuove richieste di cambiata vengono accettate = 30 ms.
- Tempo attuazione del pistone 100 ms circa.
- Distanza tra prima e seconda chiamata 150-200 ms.
- Tempo nel quale il pilota si rende conto che la seconda chiamata non è entrata e ne chiama un'altra = 500-600 ms.

Questo significa che in 250 ms il pilota riesce tranquillamente a chiamare 2 marce e a scalarle, rendendo i requisiti di progetto molto più stringenti. Abbiamo notato, come menzionato prima nella tabella 5 che se il pilota riesce a chiamare la seconda marcia appena il pistone ha finito il suo movimento si riesce anche a scalare due marce di fila con un solo tiraggio frizione.

Tutto ciò fa capire come un controllo in posizione permette di ascoltare meglio le richieste del pilota e, in caso di chiamata multipla, permette di riuscire a scalare due marce prolungando il tensionamento del cavo. Tuttavia, questo tipo di studio va fatto, in mio parere, su Matlab e/o Simulink. Mi sembra abbastanza ovvio che tale studio va portato avanti da inizio anno e va tenuto aggiornato mentre le cose vengono costruite. Inoltre, un controllo in catena chiusa va testato, sondato e debuggato ampiamente e, date le dinamiche della vettura, ciò è tutt'altro che semplice.

7 Possibili sviluppi futuri

Nonostante i buoni risultati raggiunti siamo ancora distanti dall'arrivo. Il sistema può essere migliorato ampiamente e cercherò di dare delle linee guida che possono aiutare i membri futuri:

- Realizzazione modello simulink per stima della corrente dati i dati sul carico.
- Utilizzo del modello simulink per la progettazione di un controllore
- Utilizzo del modello sopracitato per programmare direttamente tramite Matlab e Simulink l'hardware.
- Ovviamente utilizzo di schede programmabili via matlab.

- Utilizzare come target di progetto l'attuazione in 80-100 ms.
- Utilizzare come target peso 500g.
- Implementazione di un controllo in posizione con conteggio delle scalate.
- Valutazione convenienza di un sistema puramente elettroattuato, anche per la partenza.
- Valutazione convenienza di avere un sistema in grado di fare rampe di rilascio per la partenza in acceleration e nelle gare con launch control.
- Implementazione algoritmo di stima termica per motori ancora più tirati che possono sopprimere funzionalità in caso di eccesso di temperatura. (ad esempio se ho un sistema di partenza e il motorino è surriscaldato accendo una spia a cruscotto e impedisco la modalità partenza).

Volutamente non mi dilungo su questa sezione, ritengo che la FSAE sia un modo fenomenale di imparare e credo sia compito del membro del team essere propositivo e creativo riguardo alle possibilità di un sistema del genere.

Credo che questo report sia diventato sufficientemente esaustivo e penso possa essere una buonissima base di partenza per chiunque sia alimentato dalla stessa passione che mi ha mosso in questi anni di sviluppo di progetto. Non mi resta che augurare

Buon Lavoro!

#KeepPushing

Marco Zorzi