

Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria Informatica - Ramo Automazione

Tesina di progetto in Azionamenti ed Elettronica Industriale

**Progettazione di un azionamento per
motore in continua**

Candidato: Schettini Francesco
Matricola: A18000485

Relatore: Ing. Luigi Rubino

Indice

1	Introduzione	2
2	Applicazione, specifiche e scelta del motore	3
2.1	Specifiche di progetto	3
2.2	Struttura meccanica	3
2.3	Scelta del motore	4
2.4	Specifiche tecniche per la scelta del motore	5
2.5	Validazione della scelta e introduzione del riduttore	6
3	Modello del motore	9
3.1	Parametrizzazione	9
3.2	Schema a blocchi del motore	10
3.3	Blocchi aggiuntivi	12
3.3.1	Amplificatore di tensione	12
3.3.2	Dinamo tachimetrica	12
3.3.3	Saturatore clamping in corrente	14
3.3.4	Riduttore	15
3.4	Schema finale pre-regolatore	15
4	Progetto del controllore	16
4.1	Regolatore PI	16
4.1.1	Taratura del parametro K_p	16
4.1.2	Taratura del parametro K_i	18
4.2	Fenomeno del Wind-up: correzione	19
4.3	Feed Forward	21
5	Modellistica degli ingressi	22
5.1	Disturbo: coppia di carico	22
5.2	Riferimento: legge dei moti	23
6	Conclusioni	25

1 Introduzione

Lo scopo del presente progetto è la progettazione e simulazione di un azionamento per motore in corrente continua (DC) spazzolato, da impiegare in un'applicazione reale scelta dallo studente.

Si farà uso della tecnica del controllo d'armatura. Tale metodo di controllo consente di agire direttamente sulla tensione applicata all'armatura del motore, imponendo la sua corrente, mantenendo costante il campo magnetico.

L'obiettivo finale è quello di modellare l'intero sistema mecatronico, selezionare un motore adeguato, progettare l'anello di controllo per la velocità e la corrente, simulare il comportamento dinamico del sistema in ambiente Simulink/Matlab e verificare il rispetto delle specifiche prestazionali fissate.

2 Applicazione, specifiche e scelta del motore

2.1 Specifiche di progetto

Si vuole progettare un azionamento per lo scorrimento di un tapis roulant.



Figura 1: modello di tapis roulant

Le specifiche dell'applicazione sono le seguenti:

Caratteristica	Valore
Velocità regolabile	0 – 18 km/h
Tempo massimo per raggiungere la velocità desiderata	8 s
Portata massima	170 kg

Tabella 1: Specifiche primarie del tapis roulant

2.2 Struttura meccanica

Si prenda in esame la struttura meccanica descritta dal seguente CAD¹.

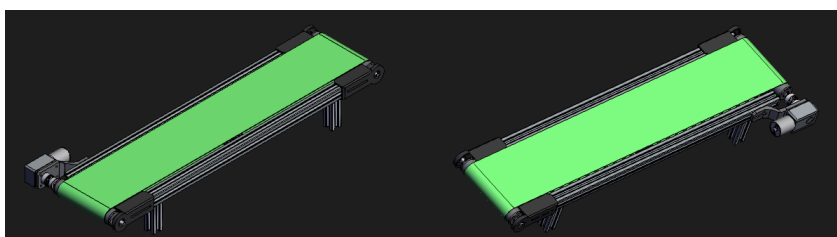


Figura 2: CAD struttura meccanica

La struttura meccanica analizzata è composta dai seguenti elementi principali:

- Due rulli identici, di cui uno motorizzato e uno inerte;
- Un tappeto scorrevole, ancorato ai due rulli;
- Un motore a corrente continua spazzolato, dotato di sensori;
- Cuscinetti, utilizzati per garantire uno scorrimento favorevole del tappeto.

¹<https://grabcad.com/library/conveyor-belt-123>.

Le dimensioni e caratteristiche geometriche dei componenti sono riassunte nella Tabella 2.

Componente	Valore
Dimensioni tappeto	120 cm × 50 cm
Massa tappeto	5 kg
Diametro rulli	5 cm
Massa di ciascun rullo	6 kg

Tabella 2: Parametri fisici della struttura

A partire da questi dati è possibile ricavare i corrispondenti **momenti d'inerzia** dei componenti per l'analisi dinamica del sistema².

$$J_{\text{rullo}} = \frac{1}{2} m_{\text{rullo}} r_{\text{rotazionale}}^2$$

$$J_{\text{tappeto}} = m_{\text{tappeto}} r_{\text{rotazionale}}^2$$

$$J_{\text{macchina}} = 2J_{\text{rullo}} + J_{\text{tappeto}} = 0.0069 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Ricordiamo che montato al rullo di trazione, dunque all'albero, ci sarà il nostro motore. Pertanto, nel conto totale dell'inerzia servirà anche la sua inerzia.

2.3 Scelta del motore

Il settore applicativo ci fa ipotizzare di aver bisogno di un motore da almeno 1 kW. In seguito, verificheremo che il motore scelto sia adatto alla nostra applicazione.

Scegliamo il motore modello L80B14 a magneti permanenti della casa produttrice Elip Tagliente, di cui presentiamo in Tabella 3 i dati di targa.

Caratteristica	Valore
Tensione nominale	24 V
Corrente nominale	54 A
Potenza nominale	1000 W (meccanica)
Velocità nominale	3000 RPM → 314 rad/s
Coppia nominale	3.18 Nm
Peso	6.15 kg
Diametro rotore	11 cm

Tabella 3: Dati di targa del motore

²Si è usato per il tappeto l'equivalente rotazionale di un'inerzia traslatoria

Si osservi che sul sito di vendita³ sono indicate le sue principali applicazioni e si può constatare che una di queste è proprio l'impiego per tapis roulant.

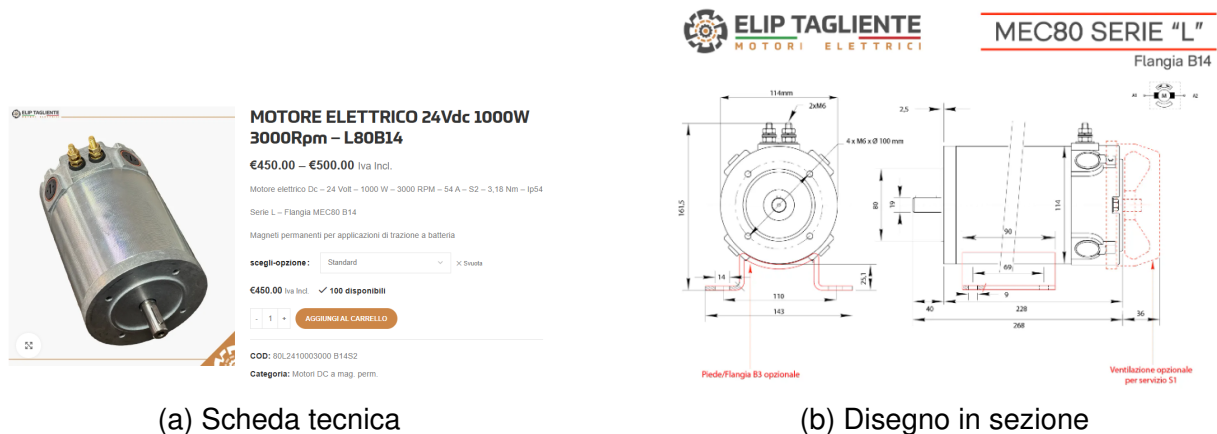


Figura 3: Motore Elip Tagliente

Dai dati di targa forniti è stato possibile ricavarne altri

$$P_{nom, elettr} = V_{nom} \cdot I_{nom} = 1296 \text{ W}$$

$$J_{motore} = \frac{1}{2} m_{motore} \left(\frac{d_{motore}}{2} \right)^2 = 0.009 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

2.4 Specifiche tecniche per la scelta del motore

Dalle specifiche primarie è possibile ricavare le seguenti grandezze utili per il dimensionamento del motore:

- Velocità rotazionale massima necessaria
- Coppia massima necessaria
- Potenza richiesta

Dalle specifiche sulla velocità e la struttura dei rulli, si ricava la velocità angolare massima⁴

$$\omega_{max} = \frac{v_{tapis, max}/3.6}{r_{rotazionale}} = 200 \text{ rad/s}$$

Dalle specifiche sull'accelerazione, sappiamo che il sistema deve raggiungere la velocità massima in un tempo prestabilito, trasportando un carico pari alla portata massima. Usiamo una massa campione pari a $1.25 \cdot p$, che offre due vantaggi:

³<https://www.shop.eliptagliente.it/prodotto/motore-elettrico-24vdc-1000w-3000rpm-l80b14/>.

⁴usando la relazione $v = \omega r$:

- un margine di robustezza ulteriore rispetto al semplice sovradimensionamento della potenza;
- una modellazione più realistica dei picchi di massa percepita durante la corsa, in particolare nella fase di atterraggio del piede.

Calcoliamo l'inerzia rotazionale del carico⁵:

$$m_{\text{carico}} = \text{sovradimensionamento}_{\text{carico}} \cdot p$$

$$J_{\text{carico}} = m_{\text{carico}} \cdot r_{\text{rotazionale}}^2 = 0.133 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Così è possibile calcolare l'inerzia totale vista sull'albero motore:

$$J_{\text{tot}} = J_{\text{macchina}} + J_{\text{motore}} + J_{\text{carico}} = 0.149 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Sapendo di dover raggiungere la velocità massima richiesta in un tempo fissato da specifica, si può calcolare l'accelerazione massima da imprimere:

$$\alpha_{\text{max}} = \frac{\omega_{\text{max}}}{\Delta t_{\text{acc,max}}} = 25 \text{ rad/s}^2$$

Dall'accelerazione massima, è possibile trovare la coppia massima che il motore deve generare:

$$C_{\text{max}} = J_{\text{tot}} \cdot \alpha_{\text{max}} = 3.72 \text{ Nm}$$

Infine, si può calcolare la potenza meccanica necessaria a coprire il set applicativo:

$$P_{\text{richiesta}} = C_{\text{max}} \cdot \omega_{\text{max}} = 745 \text{ W}$$

Grandezza	Valore richiesto
Velocità angolare massima	200 rad/s
Coppia massima	3.72 Nm
Potenza massima	745 W

Tabella 4: Specifiche richieste al motore

2.5 Validazione della scelta e introduzione del riduttore

Pur ipotizzando un 10% di perdite meccaniche (per attrito), la potenza effettiva del motore scelto risulta comunque ampiamente sufficiente per la nostra applicazione:

$$P_{\text{nom,mecc,eff}} = 0.9 P_{\text{nom,mecc}} = 900 \text{ W}$$

⁵Così come per il nastro, è stata considerata l'inerzia rotazionale equivalente, pur essendo un'inerzia traslatoria

Tuttavia, si osservi anche

- La coppia massima richiesta non è soddisfatta dalla coppia nominale del motore
- La velocità nominale del motore è ampiamente superiore a quella necessaria

Si decide dunque di adottare un riduttore con rapporto di trasformazione R_{rid} , scelto in modo tale da ottenere, a valle del riduttore:

$$\omega_{out,rid} = \omega_{max}$$

A tal fine è necessario avere un rapporto di riduzione

$$R_{rid} = \omega_{nom}/\omega_{max} = 1.57$$

Scegliamo il riduttore della SEW ad uno stadio⁶

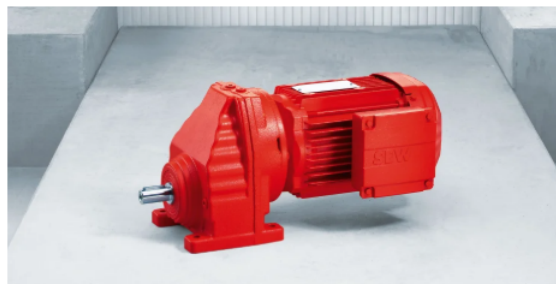


Figura 4: Riduttore SEW ad uno stadio

L'inerzia per questo tipo di riduttori è dell'ordine dei $10^{-3}/10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, dunque trascurabile rispetto alle nostre grandezze inerziali.

Inoltre, segnaliamo che in genere tali riduttori causano una perdita di efficienza introducendo perdite meccaniche. Tuttavia, noi lo supporremo ideale.

Con l'introduzione del riduttore, così sono cambiate le caratteristiche nominali

Velocità richiesta	200 rad/s	Velocità nominale ottenuta	200 rad/s
Coppia richiesta	3.72 Nm	Coppia nominale ottenuta	4.99 Nm

Tabella 5: Confronto tra grandezze richieste e ottenute

Pertanto, la coppia motore-riduttore così scelta rientra nelle specifiche per la mia applicazione.

⁶https://www.sew-eurodrive.it/prodotti/riduttori/riduttori_standard/riduttori_ad_ingranaggi_r/riduttori_ad_ingranaggi_r.html.

NOTA: è stato preferito avere un range largo in coppia piuttosto che in velocità, in quanto la velocità 200 rad/s è la massima da specifica della mia applicazione e non potrò mai averne di superiori.

Al contempo, poter generare una coppia ancor più alta di quella già ipotizzata per il caso peggiore, rende ancor più robusta l'applicazione e fornisce margini di miglioramento futuro.

3 Modello del motore

3.1 Parametrizzazione

Abbiamo bisogno di stimare o ricavare alcuni parametri fondamentali del motore:

- Resistenza d'armatura R_a
- Induttanza d'armatura L_a
- Coefficiente di attrito viscoso β
- Costanti del motore: k_t e k_v

La Resistenza d'armatura si può calcolare a partire dalle perdite elettriche:

$$P_{\text{perd,elett}} = P_{\text{nom,elett}} - P_{\text{nom,mecc}} = 296 \text{ W}$$

$$R_a = \frac{P_{\text{perdite, elett}}}{I_{\text{nom}}^2} = 0.10 \Omega$$

L'induttanza d'armatura non è possibile calcolarla direttamente dalle specifiche, sarebbe necessario effettuare prove sul motore. Pertanto, scegliamo un valore tipico per questa classe di motori:

$$L_a = 1 \cdot 10^{-4} \text{ H}$$

Il coeff. di attrito viscoso può essere calcolato a partire dalle perdite meccaniche (stimate al 10% della potenza meccanica):

$$\beta = \frac{P_{\text{perd,mecc}}}{\omega_{\text{nom}}^2} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ kg/ms}$$

Per le costanti macchina, sappiamo dalla teoria che:

$$k_t = \frac{C_{\text{nom}}}{I_{\text{nom}}} = 0.059$$

$$k_v = \frac{V_{\text{nom}} - R_a \cdot \omega_{\text{nom}} \cdot \beta / k_t}{\omega_{\text{nom}}} = 0.075$$

L'inerzia del motore, invece è stata già calcolata nei precedenti paragrafi.

Notifichiamo che nel nostro modello di motore, assumeremo per semplicità che abbia inerzia quella della macchina intera.

Infatti, la macchina è una componente fissa montata sull'albero motore. Preferiamo piuttosto modellare come carico tutto ciò che è variabile (come ad esempio persone che salgono sul tapis).

$$J_{mm} = J_{macchina} + J_{motore} = 0.0078 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Nelle Tabelle 6-7 sono riassunti i parametri del motore.

Parametro	Valore
Resistenza d'armatura	0.10Ω
Induttanza d'armatura	$1 \cdot 10^{-4} \text{ H}$
Inerzia (totale)	$0.0078 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Coefficiente attrito viscoso	$1 \cdot 10^{-3} \text{ kg/ms}$

Tabella 6: Parametri del motore

Parametro	Valore
k_t	0.059
k_v	0.075

Tabella 7: Costanti macchina del motore

3.2 Schema a blocchi del motore

Dalla teoria, il motore è descritto dal seguente schema a blocchi:

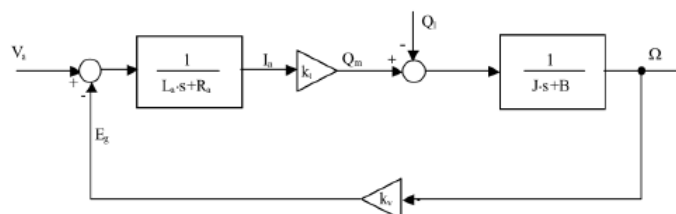


Figura 5: Schema a blocchi del motore

Dai parametri ricavati nella sezione precedente, è stato possibile determinare le funzioni di trasferimento relative al dominio elettrico e meccanico:

$$P_{\text{elet}}(s) = \frac{1}{L_a s + R_a} \quad P_{\text{mec}}(s) = \frac{1}{J_{mm} s + \beta}$$

Il modello del motore è stato implementato successivamente in Simulink, come riportato in Figura 6.

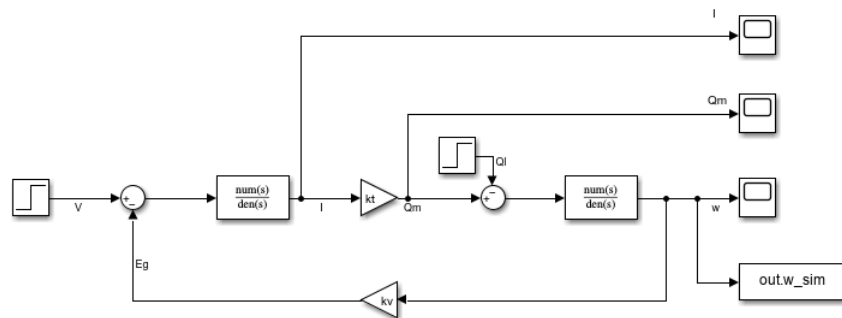


Figura 6: Modello motore in corrente continua in Simulink

Scegliendo i parametri calcolati in precedenza, eseguiamo la simulazione del modello applicando una tensione nominale $V_{nom} = 24 \text{ V}$. In figura 7 è riportato l'andamento della velocità angolare ω .

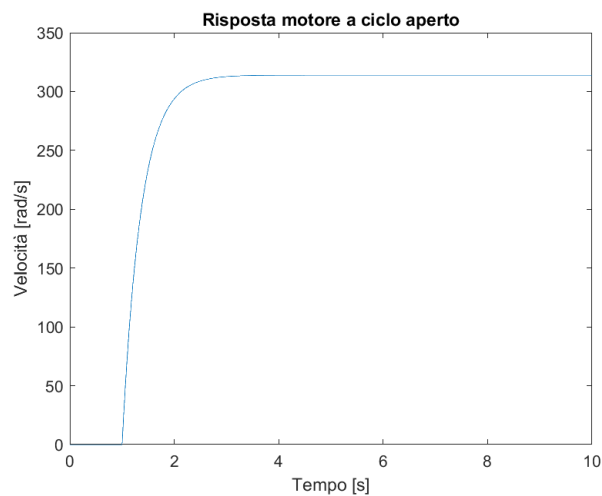


Figura 7: Risposta a gradino del motore a ciclo aperto

Il valore di regime risulta essere

$$\omega_{regime} = 314 \text{ rad/s} = \omega_{nom}$$

Il fatto che la velocità angolare a regime coincida con la velocità nominale del motore, secondo i dati di targa, certifica la bontà dello schema implementativo.

NOTA: non è stato tenuto conto del riduttore, che sarà modellato esternamente nello schema a blocchi finale.

3.3 Blocchi aggiuntivi

Per predisporre il motore al controllo, introduciamo i seguenti componenti:

- Amplificatore
- Dinamo tachimetrica
- Saturatore in corrente
- Riduttore

3.3.1 Amplificatore di tensione

Immaginiamo di impiegare per il controllo un microcontrollore, che può generare tensioni tra $Gnd = 0$ e $HighVoltage = 5V$. Avremo bisogno di un amplificatore con guadagno $V_{nom}/HighVoltage$ per arrivare alle tensioni del motore.

Lo supporremo lineare con guadagno:

$$K_{amp} = \frac{V_{nom}}{HighVoltage} = \frac{24V}{5V} = 4.8$$

Nello schema simulink, mostrato in Figura 11 è modellato come un puro guadagno con limite in saturazione.

3.3.2 Dinamo tachimetrica

Al fine di realizzare un controllo in velocità a ciclo chiuso, è necessario misurare tale grandezza e retroazionarla, in particolare, convertendola in tensione. A tale scopo viene utilizzato come trasduttore di velocità una dinamo tachimetrica.

Utilizzeremo la seguente dinamo, modello DT160 della casa produttrice Hohner.



Figura 8: Dinamo DT160 - Hohner SRL

Parametro	Valore
Tensione d'uscita a velocità fissata	60 V a 1000 RPM
Numero lamelle	33
Ripple Peak-to-Peak massimo	1% dell'output

Tabella 8: Dati di targa della dinamo

Dal suo datasheet⁷ è possibile estrarre alcuni suoi utili dati di targa, riportati in Tabella 8.

Dalla prima entry della tabella è possibile ricavare la costante tachimetrica.

$$k_{dt} = \frac{V_{nom,din}}{\omega_{nom,din}} = 0.57 V/(rad/s)$$

Tale segnale dev'essere compatibile con l'ingresso del microcontrollore, ovvero [Gnd, HighVoltage]. Pertanto, la sua uscita dev'essere mappata con un de-amplificatore.

$$k_{deamp} = \frac{High_voltage}{\omega_{nom} \cdot k_{dt}}$$

In questo modo, alla velocità massima del motore ω_{nom} corrisponderà una tensione in retroazione di $HighVoltage = 5V$ e a velocità nulla una tensione nulla.

Sceglieremo durante il progetto di fare simulazioni con una dinamo ideale o reale.

Per la dinamo reale modelleremo la componente rumorosa con la sua sola armonica fondamentale, che ha:

- Frequenza = $N_{lamelle} \cdot \omega$ (velocità di rotazione del motore)
- Ampiezza = Ripple di tensione (1% dell'uscita ideale)

In Simulink la dinamo è implementata come in Figura 9 ed è inserita nello schema di controllo come in Figura 10.

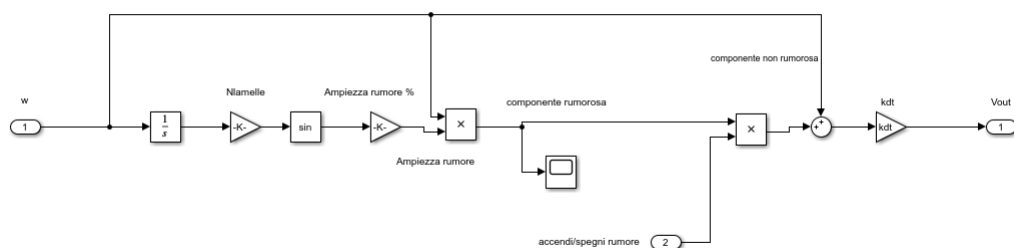


Figura 9: Modello simulink della dinamo

⁷https://hohner.it/datasheet/itaing/vari/Cat_DT1.pdf?x18985

3.3.4 Riduttore

Abbiamo discusso nei precedenti paragrafi dell'utilizzo del riduttore, al fine di adattare il motore alla nostra applicazione.

Mostriamo la sua modellazione Simulink in Figura 12.

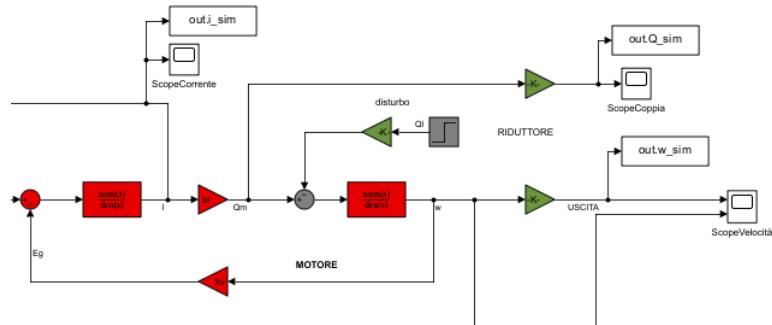


Figura 12: Riduttore nello schema di controllo

In pratica viene modellato con una serie di guadagni che scalano opportunamente le grandezze del motore.

$$C_{out} = C \cdot R_{rid} \quad ; \quad \omega_{out} = \frac{\omega}{R_{rid}} \quad ; \quad Q_{l,in} = \frac{Q_l}{R_{rid}}$$

NOTA: è stata scalata anche la coppia di carico, in quanto questa è applicata direttamente all'albero motore sul quale si agganciano direttamente gli ingranaggi. Questi poi trasferiscono la coppia scalata al motore.

3.4 Schema finale pre-regolatore

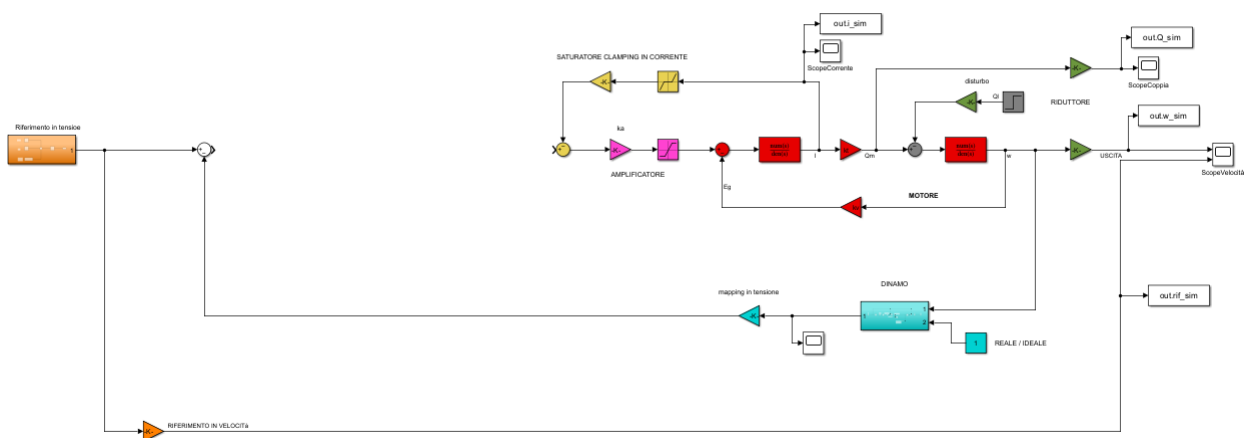


Figura 13: Schema finale prima del regolatore

4 Progetto del controllore

L'obiettivo di questo progetto è quello di controllare in velocità il sistema. A tal scopo bisogna trovare un regolatore che, chiudendo il loop in Figura 13, garantisca ottime caratteristiche a ciclo chiuso come tempo di risposta breve, sovraelongazione limitata e buoni margini di robustezza.

NOTA: in questa specifica applicazione l'asservimento in posizione non è necessario, dunque non viene realizzato.

4.1 Regolatore PI

Per il controllo di velocità del motore utilizziamo un regolatore PI.

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$$

La sola azione proporzionale infatti non basta, perché per seguire il riferimento a gradino abbiamo bisogno di un guadagno molto alto. Considerando la dinamo rumorosa (che è il modello più vicino alla realtà) viene amplificato anche il rumore stesso.

Questo causa un ripple di corrente molto alto, che usura il motore e ne riduce notevolmente il tempo di vita.

Allora s'introduce il termine integrale che garantisce l'astatismo a gradino e allo stesso tempo reietta il rumore, operando da filtro.

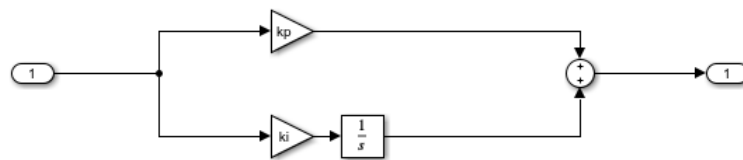


Figura 14: Schema PI Simulink

4.1.1 Taratura del parametro K_p

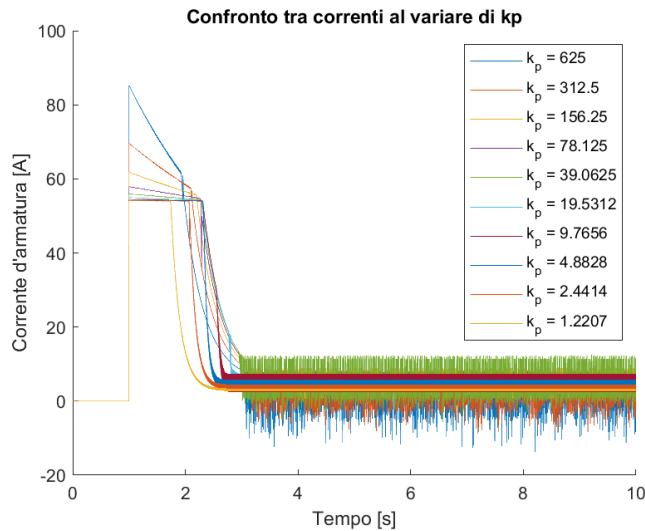
Spegniamo la parte integrativa.

Usiamo il modello di dinamo tachimetrica reale, che introduce il rumore responsabile di oscillazioni sulla corrente. Conduciamo simulazioni fino a soddisfare le seguenti condizioni:

- Il ripple della corrente deve essere inferiore all'1% di I_{nom} (specifica di progetto);
- La corrente deve rimanere entro il 10% di I_{nom} (per pochi secondi).

Per garantire la robustezza, consideriamo il caso peggiore: durante le simulazioni forniamo al motore la massima tensione d'ingresso, ovvero HighVoltage.

Sono state condotte delle simulazioni con uno script del tutto automatizzato che ci hanno restituito i seguenti valori:



K_p	Ripple (A)	I Max (A)
625.00	19.12	85.23
312.50	16.63	69.61
156.25	8.02	61.80
78.12	2.43	57.89
39.06	14.54	55.94
19.53	4.60	54.97
9.77	4.72	54.48
4.88	2.21	54.23
2.44	1.05	54.11
1.22	0.52	54.05

Tabella 9: Simulazioni

Figura 15: Ia al variare di K_p

Per il soddisfacimento delle specifiche si è scelto quindi:

$$K_p = 1.22$$

In figura è riportato l'andamento della corrente di armatura e della velocità con azione (solo) proporzionale trovata.

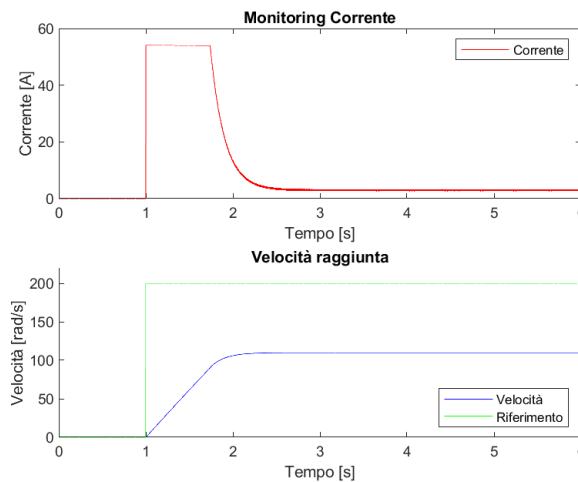


Figura 16: Corrente e velocità con $K_p=1.22$

Si osserva che la corrente ha una zona di saturazione approssimabile a piatta e il ripple di corrente è così piccolo da essere impercettibile sul grafico. In tali condizioni, il rumore di misura non induce alcuna conseguenza.

Riguardo invece l'inseguimento a gradino, come ci aspettavamo dalla teoria dei sistemi, il riferimento viene seguito con errore a regime finito, che però risulta essere notevole in quanto il guadagno è molto piccolo.

4.1.2 Taratura del parametro K_i

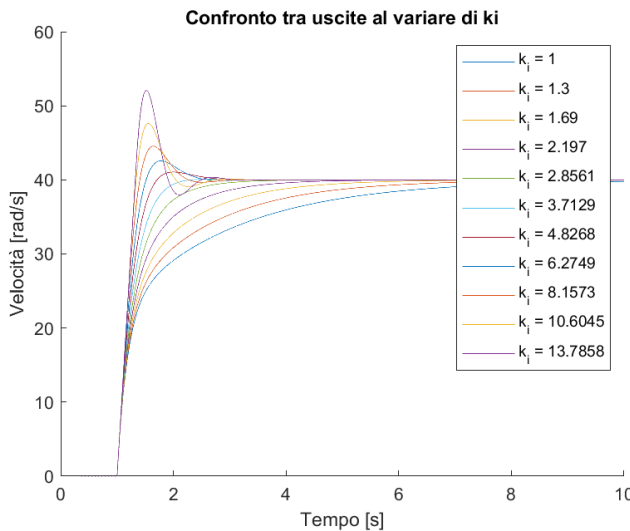
Studiamo la risposta a gradino del sistema al variare di K_i . Vogliamo:

- sovraelongazione della risposta a gradino in velocità, del massimo 20%

Stavolta diamo in ingresso un piccolo step, preoccupandoci che non mandi in saturazione il sistema.

Non avendo problemi sul disturbo con la parte integrativa e avendo già tarato appositamente la parte proporzionale, userò il modello di dinamo ideale, ignorando il rumore.

Sono state eseguite delle simulazioni con uno script del tutto automatizzato che ci ha restituito i seguenti valori:



K_i	Sovraelongazione (%)
1.00	0.0000
1.30	0.0000
1.69	0.0000
2.20	0.0000
2.86	0.0000
3.71	0.0021
4.83	0.0263
6.27	0.0641
8.16	0.1134
10.60	0.1902
13.79	0.3014

Tabella 10: Simulazioni

Figura 17: w_{out} al variare di k_i

Per il soddisfacimento delle specifiche si è scelto quindi:

$$K_i = 10.60$$

Il grafico delle risposte a gradino in funzione di K_i evidenzia che all'aumentare di K_i :

- aumenta la sovraelongazione $S\%$;
- diminuisce il tempo di risposta T_a .

Scegliendo un valore di K_i che garantisca una sovraelongazione limite al 20%, si è ottenuto un buon compromesso tra rapidità e stabilità della risposta.

Si osserva inoltre dalla Figura 18 che, con i valori scelti, il sistema è in grado di seguire correttamente il riferimento con errore nullo a regime, come previsto dalla t. dei sistemi.

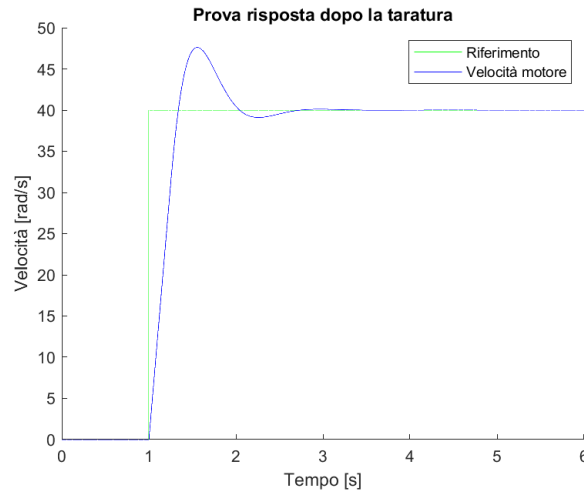


Figura 18: Risposta a gradino con $k_p=1.22$ e $k_i=10.60$

4.2 Fenomeno del Wind-up: correzione

Immaginiamo di voler far generare il controllo dallo stesso microcontrollore usato per generare il riferimento. Questo può generare il segnale di controllo solo in un range limitato [Gnd, HighVoltage], quindi per valori superiori (o inferiori), il controllo sarà saturato.

Le simulazioni⁸ mostrano che l'aggiunta del blocco di saturazione in simulink (vedi Figura 20) non degrada le prestazioni, in quanto a saturare era già il blocco amplificatore.

Si manifesta però il fenomeno del wind-up sul controllo!

Risolveremo tale fenomeno usando il seguente schema di de-saturazione:

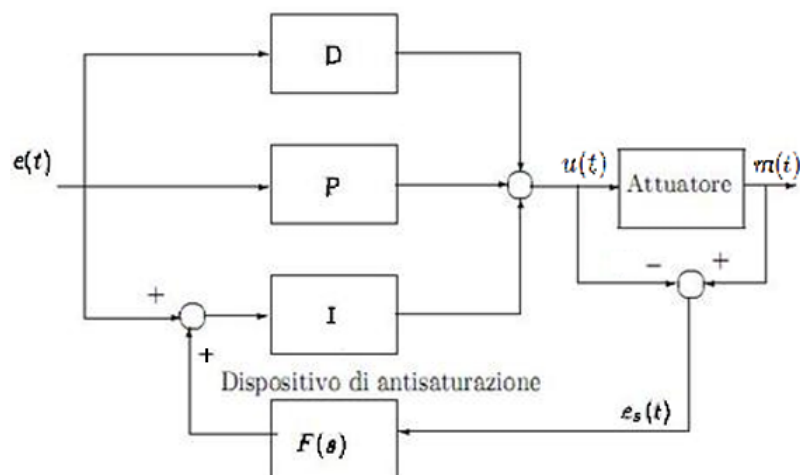


Figura 19: Schema anti wind-up

⁸Qui non riportate

The diagram illustrates a control system for wind-up monitoring. It features a feedback loop where the error signal e is processed through a summing junction, a gain of 2, and a saturation block to produce a control signal. This signal is then compared with a reference signal to produce an error signal, which is fed back into the summing junction. The control signal is also used to generate a 'wind up monitoring' signal and a 'controllo_sat' signal. A 'C-' block is used to generate a 'wind up on/off' signal.

Il coefficiente di desaturazione è stato trovato con una taratura manuale e fissato a $k_{desat} = 2$. Più è alto e migliore è l'effetto di de-saturazione, ma amplifica di più anche eventuali disturbi non reiettati dal controllo. Anche qui quindi si è scelto un trade-off.

Senza anti-windup

Controllo [V]

Tempo [s]

Controllo Controllo saturato

Con anti-windup

Controllo [V]

Tempo [s]

Controllo Controllo saturato

Confronto uscita con anti-windup vs no anti-windup

Velocità [rad/s]

Senza anti-windup

Con anti-windup

Tempo [s]

Tempo [s]	Senza anti-windup [rad/s]	Con anti-windup [rad/s]
0	0	0
1	0	0
2	120	120
2.2	150	140
2.8	185	125
3.5	105	120
4.2	120	120
6	120	120
10	120	120

Si osserva che, compensando il fenomeno del *wind-up*, aumentano notevolmente le prestazioni a ciclo chiuso:

- 20

4.3 Feed Forward

Introducendo la parte integrativa è stato garantito l'astatismo a gradino. Dalla teoria dei sistemi, sappiamo che un sistema di questo tipo segue la rampa con errore finito.

Per seguire la rampa con errore nullo, introduciamo il controllo in Feed Forward, azione in avanti che lega il controllo direttamente al riferimento, senza passare per l'errore.

In particolare, prende il riferimento di velocità desiderato e lo riporta, tramite un puro guadagno K_{ff} come contributo al controllo (vedi Figura 23).

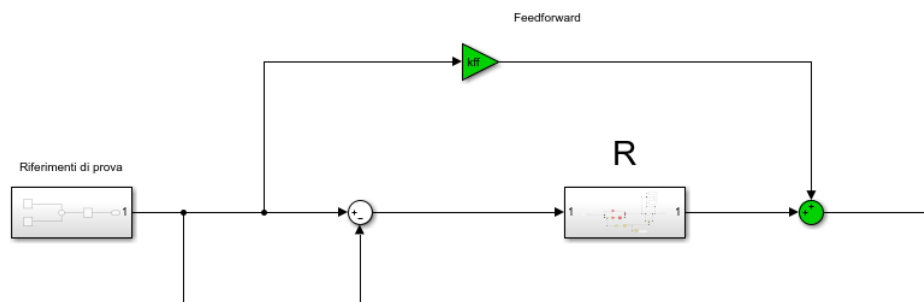


Figura 23: Azione Feed Forward in Simulink

Dalla teoria, il guadagno K_{ff} è calcolato come segue:

$$k_{ff} = \frac{k_v}{k_{amp} \cdot k_{dt} \cdot k_{deamp}} = 0.98$$

Come si può notare dalla Figura24, il sistema adesso segue con errore nullo a regime il riferimento a rampa.

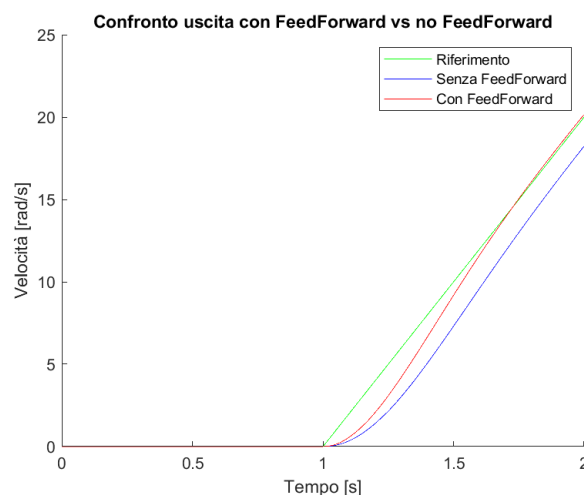


Figura 24: Risposta a rampa, confronto

5 Modellistica degli ingressi

Dopo aver progettato il controllore, ci occupiamo di modellare gli ingressi al sistema:

- disturbo in coppia
- riferimento di velocità

5.1 Disturbo: coppia di carico

Fin'ora abbiamo tenuto il nostro motore a vuoto, ovvero senza carico (eccetto la struttura meccanica, la cui inerzia però è stata inglobata in quella del motore).

Modelliamo la presenza di una persona sul nastro con una coppia di carico.

In prima approssimazione posso pensare ad una coppia d'attrito tra il tappeto e il rullo. Dunque, con tale semplice modellistica, per una massa m che sale sul tapis roulant e coefficiente d'attrito μ :

$$F_{\text{attr}} = m_{\text{carico}} \cdot g \cdot \mu$$
$$C_{\text{attr}} = F_{\text{attr}} \cdot r_{\text{rotazionale}}$$

Ad esempio, con una $m = 120 \text{ kg}$ otteniamo una coppia di carico di $Q_l = 1.47 \text{ Nm}$. Vediamo in Figura 25 la risposta del sistema a ingresso gradino + rampa, con e senza tale disturbo, modellato come un gradino.

Siccome l'attrito viene generato solo dalla partenza, la coppia di carico avrà lo step time in corrispondenza dell'avvio del moto.

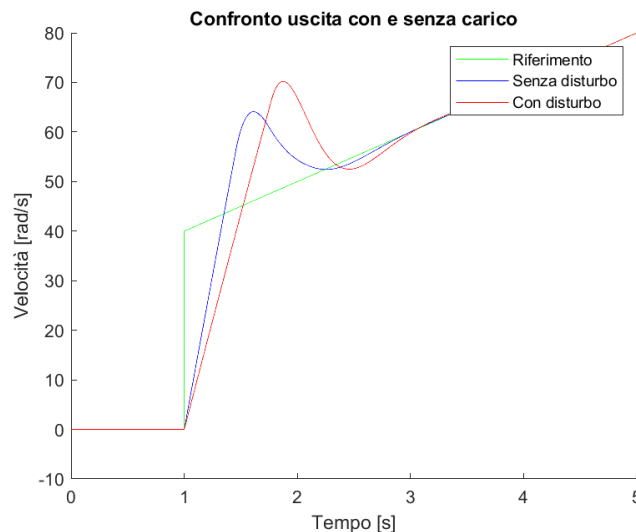


Figura 25: Risposta al disturbo

Nonostante il disturbo, il motore segue il riferimento con lieve, ma inevitabile degrado delle prestazioni.

5.2 Riferimento: legge dei moti

Quando un utilizzatore sceglie una data velocità di funzionamento del tapis roulant, è chiaro che non possiamo dare al sistema un riferimento a gradino, in quanto il tappeto avrebbe uno sbalzo improvviso. Il comfort d'utilizzo prevede che la velocità di regime si raggiunga dolcemente e senza brusche accelerazioni.

Genereremo pertanto dei riferimenti di velocità morbidi da accelerazione a forma triangolare.

Le scelte progettuali, su base empirica, saranno le seguenti:

- Il tempo di raggiungimento della velocità desiderata sarà ottenuto da:

$$T_{nec} : \omega_{fin} = \Delta t_{nec, max} : \omega_{max}$$

- La metà di tale intervallo di tempo sarà dedicato alla salita dell'accelerazione e la restante metà alla discesa.
- Con tale forma geometrica prevista per a_{max} , essendo la velocità finale (o comunque la variazione di velocità richiesta) l'integrale dell'accelerazione, si può trovare banalmente che:

$$\omega_{fin} = \frac{1}{2} a_{max} \cdot \left(\frac{T_{nec}}{2} \right) \Rightarrow a_{max} = \frac{4 \cdot \omega_{fin}}{T_{nec}}$$

Nelle Figure 26-27 è riportata una simulazione di partenza da fermo fino a una velocità $v_{fin} = 12 \text{ km/h} \Rightarrow \omega_{fin} = 133.3 \text{ rad/s}$ scelta dall'utente.

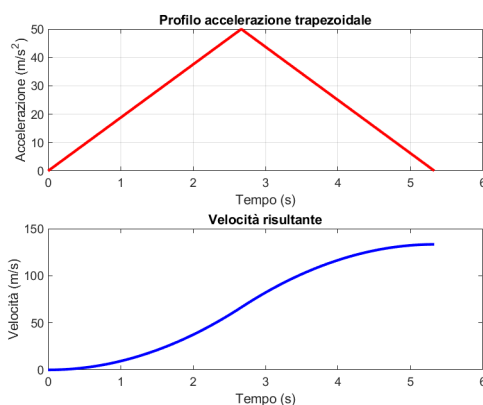


Figura 26: Riferimento, leggi di moto

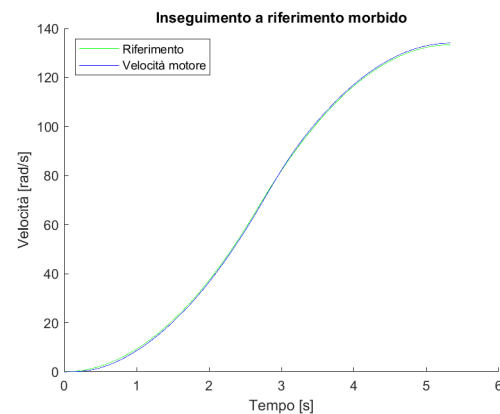


Figura 27: Risposta morbida

Come si vede, la risposta del motore segue il riferimento, pur con un piccolissimo errore (praticamente inavvertibile) durante il tratto in parabola.

Si osservi che tali leggi di moto sono facilmente generalizzabili al caso in cui si parta da qualsiasi velocità. L'integrale dell'accelerazione rappresenterà in quel caso la variazione della velocità a partire da un certo v_0 .

In Figura 28 ad esempio, è riportata la generazione di una decelerazione da $v_0 = 12 \text{ km/h} \Rightarrow w_0 = 133.3 \text{ rad/s}$ a velocità $v_{fin} = 5 \text{ km/h} \Rightarrow w_{fin} = 55.6 \text{ rad/s}$.

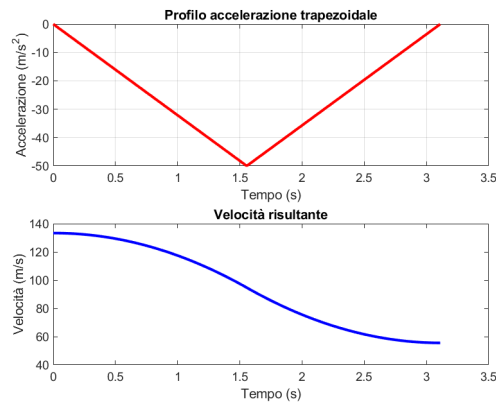


Figura 28: Riferimento in decelerazione

Daremo per scontato che il microcontrollore sappia generare tali riferimenti con appositi algoritmi.

6 Conclusioni

Il progetto ha avuto come obiettivo lo studio, la modellazione e il controllo di un sistema di trazione per tapis roulant basato su motore in corrente continua. Dopo un'accurata selezione del motore e la verifica delle sue prestazioni rispetto ai requisiti meccanici del sistema, è stato modellato e simulato in ambiente *Simulink*.

L'adozione di una logica di controllo PI, con integrazione delle tecniche di anti-windup e feedforward, ha permesso di ottenere un sistema stabile e conforme alle specifiche richieste: ripple di corrente contenuto, sovraelongazione contenuta, risposta fluida e robusta ai disturbi.

È stata inoltre sviluppata una logica di generazione del riferimento in velocità a forma triangolare, per garantire comfort e sicurezza d'uso durante il funzionamento del tapis roulant.

Tra gli sviluppi futuri si potrebbero considerare:

- lo studio approfondito di disturbi, attriti e parametri del motore al fine di avere una modellistica più coerente con la realtà;
- la scelta di un microcontrollore adatto allo scopo e la scrittura dell'algoritmo di controllo e generazione di riferimenti;
- l'utilizzo di tecniche di controllo alternative al classico controllo PI (ad esempio tecniche di controllo robusto per abbattere il peso delle numerose incertezze);
- l'implementazione e il testing su hardware reale con feedback da sensori fisici.

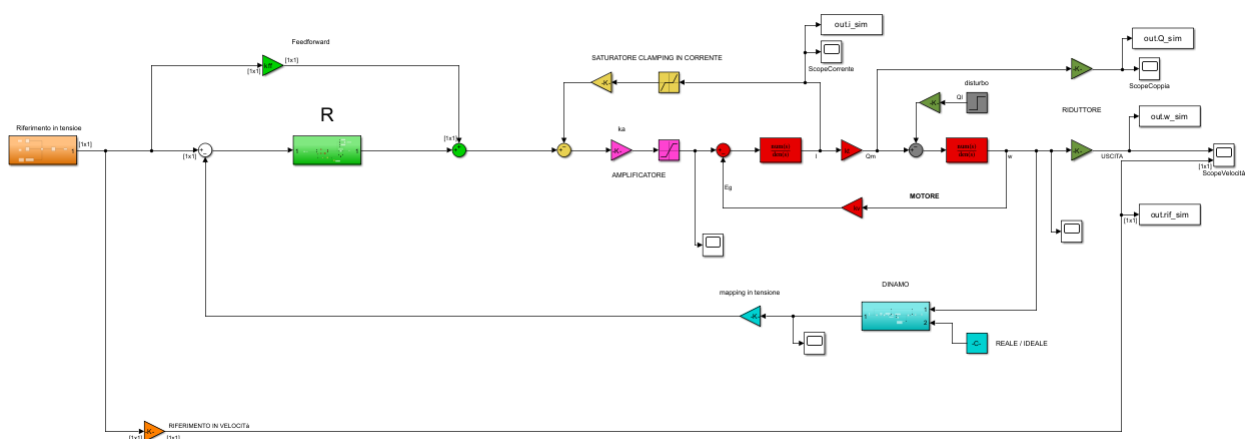


Figura 29: Schema finale

Riferimenti

Il progetto completo, comprensivo di script MATLAB e modello SIMULINK per la simulazione del sistema, è disponibile al seguente link:

https://github.com/francesco1203/DC_motor_drive