



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**BANCO DI PROVA MECCATRONICO PER UN SOLLEVATORE DI CARICHI CON
CONTRAPPESO**

MECHATRONIC TEST BENCH FOR A LOAD LIFT WITH COUNTERWEIGHT

Relatore:

Prof. **Matteo Claudio Palpacelli**

Tesi di Laurea di:

Eros Morizio

A.A. 2020 / 2021

Sommario

Abstract	1
Capitolo 1-Introduzione.....	2
1.1 PRESENTAZIONE DEL BANCO DI PROVA.....	2
1.2 DESCRIZIONE GENERALE DI UN ACENSORE.....	2
Capitolo 2- Dati di partenza.....	2
Capitolo 3- Analisi del problema	3
3.1 FUNZIONAMENTO A REGIME	3
3.2 TRANSITORIO DI AVVIAMENTO/FRENATA	5
Capitolo 4- Scelta del diametro della puleggia.....	8
Capitolo 5- Scelta del motore e del riduttore.....	10
5.1 COPPIA MOTRICE DI INTERESSE	10
5.2 TIPO DI CONTROLLO DA ESEGUIRE.....	10
5.3 TIPO DI MOTORE	11
5.4 CURVA DEL CARICO	11
5.5 SCELTA EFFETTIVA DEL MOTORE.....	12
5.6 STIMA DELLA TENSIONE DI ALIMENTAZIONE A REGIME.....	14
Capitolo 6- Studio del transitorio	16
6.1 STIMA DELL'INERZIA DEL MOTORE	16
6.2 SCELTA PULEGGIA E CALCOLO DELL'INERZIA	17
6.2.1 RICERCA PULEGGE	17
6.3 TRASCURABILITA' DI J_m RISPETTO A J_p	20
6.4 FLUSSO DI POTENZA DURANTE IL TRANSITORIO.....	20
6.5 COPPIA ALL'AVVIAMENTO.....	21
6.6 DURATA DEL TRANSITORIO	22
Capitolo 7- Rapporto di intermittenza	23
7.1 TEMPO DI ATTIVITA'	23
7.2 COSTANTE DI TEMPO TERMICA.....	24
7.3 TEMPO DI RIPOSO E RAPPORTO DI INTERMITTENZA.....	24
Capitolo 8- Sistema di controllo	25
8.1 COMPONENTI E SCHEMA ELETTRICO	25
8.2 PID.....	27
Bibliografia.....	29

Abstract

L'obiettivo di questa tesi è stato quello di progettare un banco di prova mecatronico per testare un sollevatore di carichi con contrappeso, studiando i parametri di costruzione del progetto e cercando di evidenziare la relazione tra questi con l'obiettivo di fare la scelta migliore per il caso di studio.

A questo scopo ci si è serviti del software Matlab e di Excel, per ricavare funzioni che definissero i parametri studiati e per stimare valori di cui si aveva una conoscenza parziale grazie al metodo della regressione lineare.

Si è in primo luogo studiato il sistema nel suo complesso, descrivendone le diverse fasi di funzionamento. Nello specifico si sono studiate le fasi funzionamento a regime e di transitorio, grazie al quale si sono ottenuti i dati di partenza, ovvero le coppie e velocità richieste dal carico, grazie al quale si è potuto procedere alla scelta del motore e del riduttore e alla successiva stima delle tensioni di alimentazione per ogni condizione di funzionamento.

In secondo luogo si è passati al calcolo delle inerzie di puleggia e rotore ($J_m = 3,4 \times 10^{-7} \text{kgm}^2$). L'inerzia del rotore non era presente nel catalogo del motore, quindi si è utilizzato il metodo di regressione lineare per trovare una funzione che lo descrivesse in funzione delle caratteristiche del motore. Questi dati sono stati necessari per fare uno studio più approfondito del transitorio di cui si sono calcolati l'accelerazione, le coppie allo spunto, la durata e il rapporto di intermittenza che risulta essere $\lambda = 85\%$.

Infine è stato definito il sistema di controllo ad anello chiuso, scegliendone i componenti, definendo lo schema elettrico e descrivendo la funzione di controllo.

Capitolo 1-Introduzione

1.1 PRESENTAZIONE DEL BANCO DI PROVA

Lo studio affrontato in questa tesi riguarda la progettazione di un banco di prova mecatronico per testare un sollevatore di carichi munito di contrappeso (ascensore).

L'obiettivo è quindi quello di definire i parametri di costruzione del sistema di sollevamento tramite criteri di scelta che porteranno ad adottare la soluzione più consona al caso. Tali parametri sono talvolta legati tra di loro da un punto di vista meccanico e logistico, sarà fatta quindi un'analisi approfondita per capire come sono correlati per poter adottare la soluzione migliore.

Per tali analisi ci si servirà di "Matlab" che permetterà di plottare su grafici le funzioni interessate allo studio.

Tale studio inizierà con la scelta dei dati di partenza, come altezza di sollevamento e peso della cabina, per continuare poi con uno studio approfondito delle fasi di regime e transitorio di funzionamento del sistema in cui si analizzeranno i vari parametri necessari ad adattare il carico da sollevare ad un motore. Infine si definirà un sistema di controllo per far svolgere al sistema il tipo di moto desiderato.

1.2 DESCRIZIONE GENERALE DI UN ACENSORE

L'ascensore è un'applicazione che ha l'obiettivo di portare un carico da un punto di partenza A ad un punto finale B, questa funzione è svolta da un motore che fa ruotare una puleggia su cui è presente una fune collegata al carico. Negli ascensori il carico non è formato solo dalla cabina e dal suo carico trasportabile, ma anche da un contrappeso posizionato dal lato opposto della cabina che ha lo scopo di ridurre il lavoro svolto dal motore nel sollevamento, infatti questo si troverà così a dover muovere la differenza tra i due carichi che risulta essere un'azione meno dispendiosa in termini di energia rispetto al caso in cui il carico si trova solo da un lato.

Capitolo 2- Dati di partenza

I primi dati da scegliere sono i pesi che verranno alzati. Il peso della cabina e del carico massimo trasportabile non hanno un preciso criterio di scelta, ma essendo questo un banco di prova e quindi un'applicazione appositamente di dimensioni ridotte si è scelto un peso di cabina $M_c = 0,1\text{kg}$ e peso massimo trasportabile $M_u = 0,15\text{kg}$. La massa del contrappeso (M_q) invece va calcolata tramite questa formula: [1]

$$M_q = M_c + 0,4M_u$$

Facendo i calcoli si ottiene: $M_q = 0,16\text{ kg}$

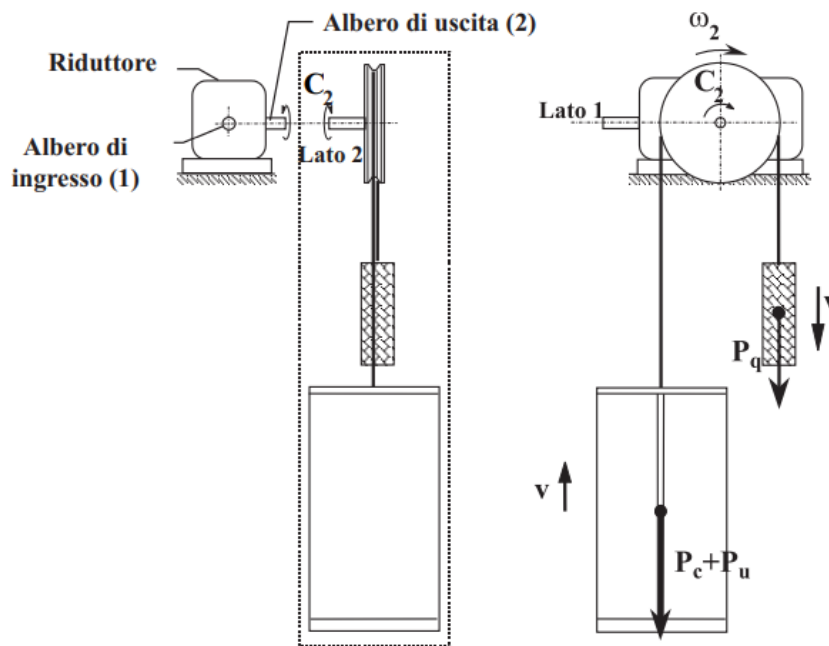
Si procede adesso alla scelta dei restanti dati. L'altezza a cui il carico dovrà essere sollevato va scelto considerando le dimensioni dell'applicazione da progettare, e dato che si vuole realizzare un banco di prova con dimensioni ridotte si è scelta un'altezza $H = 0,2\text{ m}$.

Considerando la velocità media degli ascensori in Italia (circa 1 m/s) e quella degli ascensori presenti in alcuni grattacieli (si può arrivare anche a 10 m/s) si è scelta una velocità di cabina di $V_c = 2\text{ m/s}$, ma lavorando con un dislivello di $H = 0,2\text{m}$ si è scalata la velocità a $V_c = 0,02\text{ m/s}$. [4]

Capitolo 3- Analisi del problema

Dato che il sistema in esame è un ascensore, funzionante a velocità costante ma soggetto a transitori di avviamento e frenate, si studierà sia il caso di funzionamento a regime, sia quello in transitorio.

3.1 FUNZIONAMENTO A REGIME



Schema dell'utilizzatore in condizioni di regime

A) Moto diretto o retrogrado

Prima di tutto si analizza il tipo di moto che svolge il sistema a seconda della condizione di carico e della direzione della cabina per sapere se si trova in condizioni di moto diretto o meno. Si divide quindi il sistema in due parti facendo un taglio sull'albero che collega la puleggia e la trasmissione e si considera la parte del carico composta da Puleggia, Cabina e Contrappeso, si ricava il sistema di forze e applico il bilancio di potenza : [1]

$$\text{➤ } \sum W = \frac{dE_c}{dt} = 0, \text{ (la variazione di energia cinetica è nulla in condizioni di regime)}$$

- se $Wr > 0$ si ha moto diretto e la potenza fluisce da motore a carico
- se $Wr < 0$ si ha moto retrogrado e la potenza fluisce da carico a motore

Per il caso di studio: $Wr - PV_c + PqV_c = 0$,

- se si ha pieno carico $P = P_c + P_u$
- se si ha la cabina vuota $P = P_c$

P_c	0,981	N
P_u	1,471	N

Pq	1,569	N
Vc	0,02	m/s

Tabella 1. Forze e velocità in gioco.

Prima di passare ai risultati per ogni caso, va specificato che è stato scelto come positivo il verso della velocità di cabina (Vc) in salita.

Wr	Salita	Discesa	U.M.
Pieno	0,0176	-0,0176	W
Vuoto	-0,0117	0,0117	W

Tabella 2. Potenza resistente (Wr) in diverse condizioni di moto.

Dai valori ricavati si può quindi dedurre che ci si trova in condizioni di flusso diretto nel caso di ascensore pieno in salita e ascensore vuoto in discesa, mentre ci si trova in condizioni di flusso retrogrado nel caso di ascensore pieno in discesa e vuoto in salita. Inoltre il caso in cui è richiesta più potenza è quello di ascensore pieno.

B) Calcolo del rendimento del riduttore:

Per avere la potenza motrice necessaria e per poter svolgere i calcoli successivi è necessario valutare il rendimento della trasmissione che verrà interposta tra motore e carico. E' stata fatta una stima sui valori dei rendimenti trovati in alcuni cataloghi [1] e avendo un'idea della grandezza e della qualità delle trasmissioni che si sarebbero potute trovare, si è deciso di usare valori bassi di rendimento a scopo cautelativo, così da non rischiare di scegliere motori di taglia più piccola rispetto a quella richiesta e permettere, una volta costruito il banco, di adattare velocità e coppia tramite semplice regolazione del controllore:

- Per flusso diretto $\eta_d = 0,6 = 60 \%$
- Per flusso retrogrado $\eta_r = 0,55 = 55\%$

Invece per quanto riguarda differenza tra rendimento diretto e retrogrado si è stimato una variazione di 5 punti percentuale, perché risulta essere la differenza più comune tra i due flussi di moto. [1]

C) Potenza motore:

Con a disposizione la stima dei rendimenti della trasmissione posso ricavare il valore della potenza motore necessaria e quindi la taglia dello stesso. Le formule per calcolare Wm in entrambe le condizioni di flusso sono :

- $Wr = \eta_d Wm$; in condizioni di flusso di potenza DIRETTO.
- $Wr = \frac{Wr}{\eta_r}$; in condizioni di flusso di potenza RETROGRADO.

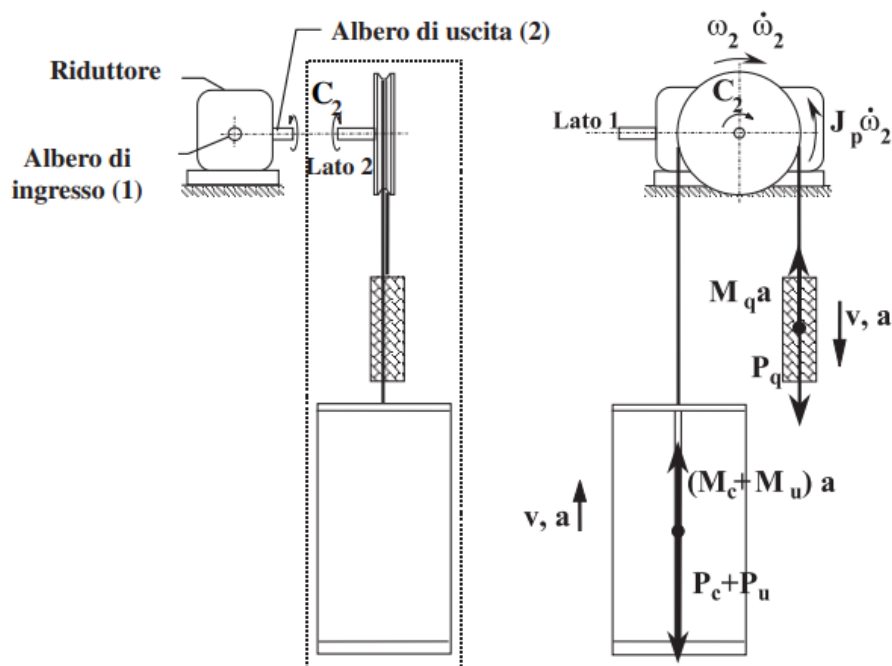
Wm	Salita	Discesa	U.M.
Pieno	0,029	-0,009	W
Vuoto	-0,006	0,019	W

Tabella 3. Potenza motrice in diverse condizioni di moto.

Adesso che si conoscono i valori di potenza motrice necessari è necessario scegliere un motore capace di erogare una potenza maggiore o uguale alla potenza richiesta nel caso di moto più gravoso, che nel caso in esame è quella dell'ascensore pieno in salita. [1]

3.2 TRANSITORIO DI AVVIAMENTO/FRENATA

Durante la fase di avviamento/frenata l'ascensore accelera/decelera, quindi non è sufficiente l'analisi fatta in precedenza in condizioni di regime, ma vanno considerate anche le forze e coppie d'inerzia in gioco dovute alla puleggia, la cabina con relativi carichi e il contrappeso. In questo paragrafo si analizzerà il sistema e saranno enunciate le formule, i calcoli saranno fatti successivamente.



Schema dell'utilizzatore in condizioni di transitorio

A) Calcolo delle condizioni di moto

La prima cosa da analizzare è in che situazione di moto si trova il sistema durante la fase di avviamento, nello specifico se si trova in condizioni di flusso di potenza diretto o retrogrado. Per farlo bisogna applicare il già visto bilancio di potenza, considerando questa volta anche il contributo dato dalle forze e coppie d'inerzia, per cui si ha:

$$W_i + W + W_r = 0$$

- W_i = potenza dovuta alle forze e coppie d'inerzia (assunta positiva da trasmissione a utilizzatore)
- W = potenza che fluisce dalla trasmissione al motore

- W_r = potenza dovuta al carico (cabina, carico massimo, contrappeso)
- J_p = inerzia della puleggia
- $w'r$ = accelerazione angolare del carico
- D = diametro puleggia

Facendo alcuni passaggi si arriva a questa equazione:

$$\bullet W = \left\{ (P - Pq) \frac{D}{2} + \left[(M + Mq) \frac{D^2}{4} + Jp \right] w'r \right\} wr$$

A questo punto si possono ricavare le condizioni di funzionamento per ogni singolo caso, per comodità si ricaveranno solo le condizioni per cui il flusso è diretto, in seguito basterà fare un'ipotesi di moto e fatti i calcoli si dedurranno le condizioni di flusso dal fatto che questa sia verificata o meno. Ecco i vari casi: [1]

1) Pieno carico in salita:

In questo caso l'ascensore è a pieno carico e sale, si avrà quindi $P = P_c + P_u$, $M = M_c + M_u$, $V_c > 0$, $wr > 0$.

La condizione di flusso di potenza diretto si verifica imponendo che $W > 0$ e cioè che il contenuto della parentesi graffa sia positivo, dopo qualche passaggio si ricava che il flusso di potenza è diretto se:

$$w'r > - \frac{(P_c + P_u - Pq) \frac{D}{2}}{Jp + (M_c + M_u + Mq) \frac{D^2}{4}}$$

2) Scarico in salita:

In questo caso si ha quindi $P = P_c$, $M = M_c$

La condizione per cui il flusso di potenza è definito diretto è :

$$w'r > - \frac{(P_c - Pq) \frac{D}{2}}{Jp + (M_c + Mq) \frac{D^2}{4}}$$

3) Pieno carico in discesa:

In questo caso si ha $P = P_c + P_u$, $M = M_c + M_u$, $V_c < 0$, $wr < 0$.

Per avere la condizione di flusso diretto si deve imporre che $W > 0$ e cioè che il contenuto della parentesi graffa sia negativo. Per cui dopo qualche passaggio:

$$w'r < - \frac{(Pc + Pu - Pq) \frac{D}{2}}{Jp + (Mc + Mu + Mq) \frac{D^4}{4}}$$

4) Scarico in discesa:

In questo caso si ha $P = Pc$, $M = Mc$

La condizione di flusso diretto che si ottiene dopo qualche passaggio è:

$$w'r < - \frac{(Pc - Pq) \frac{D}{2}}{Jp + (Mc + Mq) \frac{D^2}{4}}$$

Adesso che si conoscono le condizioni tali per cui il flusso è diretto durante il transitorio si possono calcolare i rispettivi valori di $w'r$, ma mancando sia il momento d'inerzia della puleggia che il diametro della stessa il flusso di potenza sarà calcolato in seguito.

A) Calcolo della coppia massima in avviamento

Adesso si devono ricavare le formule che permettono il calcolo della coppia, che darà al sistema l'accelerazione scelta in avviamento.

Per fare questo si deve applicare il teorema delle potenze al sistema, che in questo caso avrà il termine di variazione infinitesima dell'energia cinetica diverso da zero. Come prima ovviamente si considerano sia il caso di flusso diretto che retrogrado. [1]

1) Flusso di potenza diretto:

- Potenza motrice: $Wm = Cm \omega m$
- Potenza resistente: $Wr = - Pvc + Pqv$
- Potenza persa: $Wp = - (1 - \eta d) We$
- Potenza entrante nella trasmissione dal lato motore: $We = Cm \omega m - Jm \omega m \omega'm$
- Accelerazione angolare motore: $\omega'm$
- Accelerazione angolare carico: $\omega'r$
- Inerzia motore: Jm

Calcolo la derivata temporale dell'energia cinetica:

$$\frac{dEc}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} (M + Mq) Vc^2 + \frac{1}{2} Jm \omega m^2 + \frac{1}{2} Jp \omega r^2 \right)$$

$$\frac{dEc}{dt} = (M + Mq) Vc Ac + Jm \omega m \omega'm + Jp \omega r \omega'r$$

Facendo il bilancio di potenza:

$$Wm - Wr - Wp = \frac{dEc}{dt}$$

Con un po' di passaggi si arriva alla formula:

$$C'm = w'm \frac{\eta d}{\tau} \left[Jm + \frac{\tau^2}{\eta d} (M + Mq) \frac{D^2}{4} \right] + (P - Pq) \frac{D}{2}$$

Con cui si può ricavare quindi la C'm che il motore deve erogare all'avviamento per avere una certa accelerazione della cabina (Ac).

2) Flusso di potenza retrogrado:

- $Wp = - (1 - \eta r) We$
- $We = PqVc - Pvc - \left[Jp + (M + Mq) \frac{D^2}{4} \right] wr w'r$

Facendo il bilancio di potenza:

$$C'm = \frac{w'm}{\tau \eta r} \left[Jm + \tau^2 \eta r \left(Jp + (M + Mq) \frac{D^2}{4} \right) \right] + (P - Pq) \frac{D}{2}$$

Capitolo 4- Scelta del diametro della puleggia

Per scegliere il diametro della puleggia idoneo all'applicazione studiata si deve verificare come variano la velocità angolare dell'albero uscente dalla trasmissione e la coppia richiesta dal carico al variare del diametro, considerando però che l'obbiettivo è quello di abbassare il numero di giri dell'albero a valle della trasmissione per poter lavorare con velocità basse. Per far ciò prima di tutto si elencano le formule necessarie al caso: [1]

- $wr = \frac{2Vc}{D}; [\text{rad/s}]$
- $Nr = \frac{30}{\pi} wr; [\text{rpm}]$
- $Cr = (P - Pq) \frac{D}{2}; [\text{Nm}]$

Adesso con l'aiuto di Matlab si può plottare le seguenti funzioni su un grafico e verificare la scelta ottimale considerando per semplicità il caso dell'ascensore pieno in salita (essendo quello più gravoso in termini di Cr ed essendo gli altri casi speculari). Il range di diametro che si considera è 0÷0,1 m perché oltre i 10 cm la puleggia risulterebbe troppo ingombrante rispetto all'altezza a cui deve essere sollevato il carico che è di soli 20 cm e essendo i carichi molto piccoli ci si aspetta di aver bisogno di motori di taglia bassa con alberi di diametro contenuto che potrebbero non reggere il carico aggiunto da una puleggia troppo pesante, quindi onde evitare l'utilizzo di ulteriori componenti (come cuscinetti ad esempio) si rimane su questo range di valori.

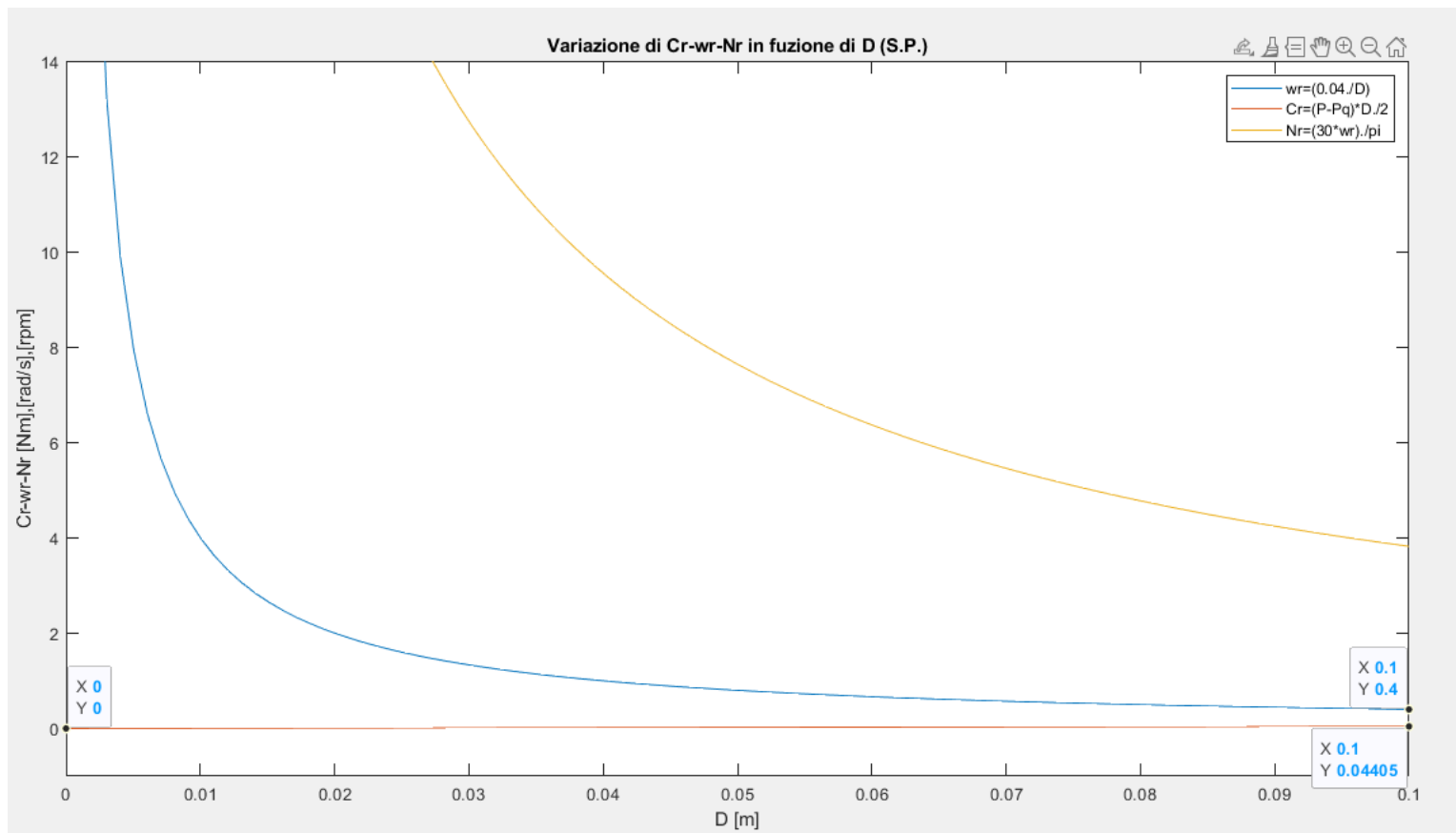


Grafico 1. Variazione delle variabili Cr-wr-Nr al variare di D in condizioni di pieno carico in salita

Come si può vedere dal Grafico 1. wr e Cr hanno andamenti completamente differenti al variare di D:

- wr è descritta da un'iperbole che tende ad infinito per D che tende a zero e tende a zero per D che tende ad infinito
- Cr invece è descritta da una retta che ha andamento crescente, ma un'inclinazione molto contenuta

Dato che il grafico di Cr varia pochissimo al variare di D, per la scelta ci si concentrerà sull'andamento di wr che come si può vedere oltre D = 0,06 m ha un andamento abbastanza "piatto" e non varia di molto il suo valore. La scelta del diametro ricade quindi su D = 0,08 m per cui i valori delle due variabili sono:

D = 0,08 [m]	Valore	U.M.
Cr	0,0352	Nm
wr	0,5	Rad/s

Tabella 4. Valori di coppia resistente e velocità angolare della puleggia per D = 0,08 m.

Questa scelta è motivata dal fatto che, come detto prima, oltre D = 0,06 m la curva di wr incomincia ad appiattirsi e infatti oltre D = 0,08 m non vi è più una variazione considerevole di wr, per cui scegliere diametri maggiori andrebbe solo a peggiorare la situazione di carico dell'albero che sorreggerà la puleggia e non porterebbe nessun vantaggio all'applicazione. Qui si riporta una tabella con i valori di velocità angolare e coppia per i singoli casi (la coppia viene considerata positiva quando ha verso discorde ad wr che fa salire la cabina):

		<i>Salita</i>	<i>Discesa</i>
<i>Pieno</i>	wr [rad/s]	0,5	-0,5
	Cr [Nm]	0,0352	0,0352
	Nr [rpm]	4,774	-4,774
<i>Vuoto</i>	wr	0,5	-0,5
	Cr	-0,0235	-0,0235
	Nr	4,774	-4,774

Tabella 5. Valori di wr-Cr-Nr per ogni condizione di funzionamento.

Adesso che si è scelto D si conoscono le velocità richieste dal carico e le coppie per ogni condizione di funzionamento dell'ascensore è possibile passare alla scelta del motore e del riduttore di velocità.

Capitolo 5- Scelta del motore e del riduttore

Per la scelta vanno fatte alcune considerazioni, che verteranno sulle caratteristiche importanti da considerare per scegliere un motore idoneo al caso in esame.

5.1 COPPIA MOTRICE DI INTERESSE

Gli ascensori sono applicazioni che non prevedono un funzionamento continuativo, ma intermittente, di conseguenza si potranno scegliere motori con coppie più basse e verificare solo che la curva caratteristica del motore ricopra adeguatamente la curva dei carichi. La caratteristica di interesse è quindi la massima coppia erogabile dal motore e non quella nominale, più nello specifico questa deve essere semplicemente maggiore della coppia richiesta (Cr) dal carico.

La Cr che si dovrà prendere in considerazione sarà quella che si ha nel caso di ascensore pieno, cioè Cr= 0,0352 Nm perché risulta essere quella maggiore.

5.2 TIPO DI CONTROLLO DA ESEGUIRE

Il sistema sarà azionato e controllato da un sistema adeguatamente programmato, ma di base bisogna capire che tipo di controllo va effettuato e su quali parametri del sistema. Se si considera un ascensore la cosa fondamentale durante il suo funzionamento è che vada da una posizione iniziale A ad una finale B con velocità costante e con l'accelerazione adeguatamente scelta durante l'avviamento/frenata. Una precisione assoluta nello spostamento è sì importante, ma non fondamentale, infatti come si ricorderà sicuramente negli ascensori che si utilizzano tutti i giorni spesso la base della cabina non è perfettamente complanare con il terreno esterno, ma è distanziata di qualche millimetro, questo perché di norma è importante che l'ascensore vada a destinazione, ma non importa che ci sia una precisione assoluta nell'arrivo e ovviamente anche per colpa di errori di posizione all'arrivo che si accumulano nel tempo (infatti quando la base dell'ascensore va oltre un certo dislivello di altezza rispetto al piano esterno, il sistema viene bloccato blocca e riposizionato correttamente). Detto questo quindi la scelta di controllo più adeguata è quella che avviene tramite un sistema ad anello chiuso, in particolare andrà fatta una regolazione in velocità che necessita di un sensore, in questo caso un encoder incrementale che sarebbe l'ideale visto la sua versatilità e

disponibilità anche per motori di piccolissima taglia. Ma l'encoder per funzionare deve essere fissato sull'albero motore, di solito si prolunga l'albero motore posteriormente per poter fissare li l'encoder, quindi sarà necessario un motore con un albero prolungato.

5.3 TIPO DI MOTORE

Per questa applicazione si è scelto di usare i motori brushed DC, che presentano la possibilità di essere regolati in velocità, sono poco costosi e possono essere controllati da schede a basso costo. Ciò non toglie che la stessa applicazione si possa fare con altri tipi di motori (come stepper, servo, ecc...)

5.4 CURVA DEL CARICO

Nel caso dell'ascensore ci si trova di fronte ad un carico statico, cioè che non varia con la velocità nel tempo, per cui la sua curva caratteristica sarà una retta nel piano (ω_r, C_r) parallela all'asse delle ascisse con i valori di C_r (con C_r positiva se discorde con ω_r in salita) relativi ad ogni condizione di carico e ω_r che va da $-0,5 \div 0,5$ a seconda che l'ascensore sia in salita o discesa. Plottando la curva dei carichi su Matlab si ottiene:

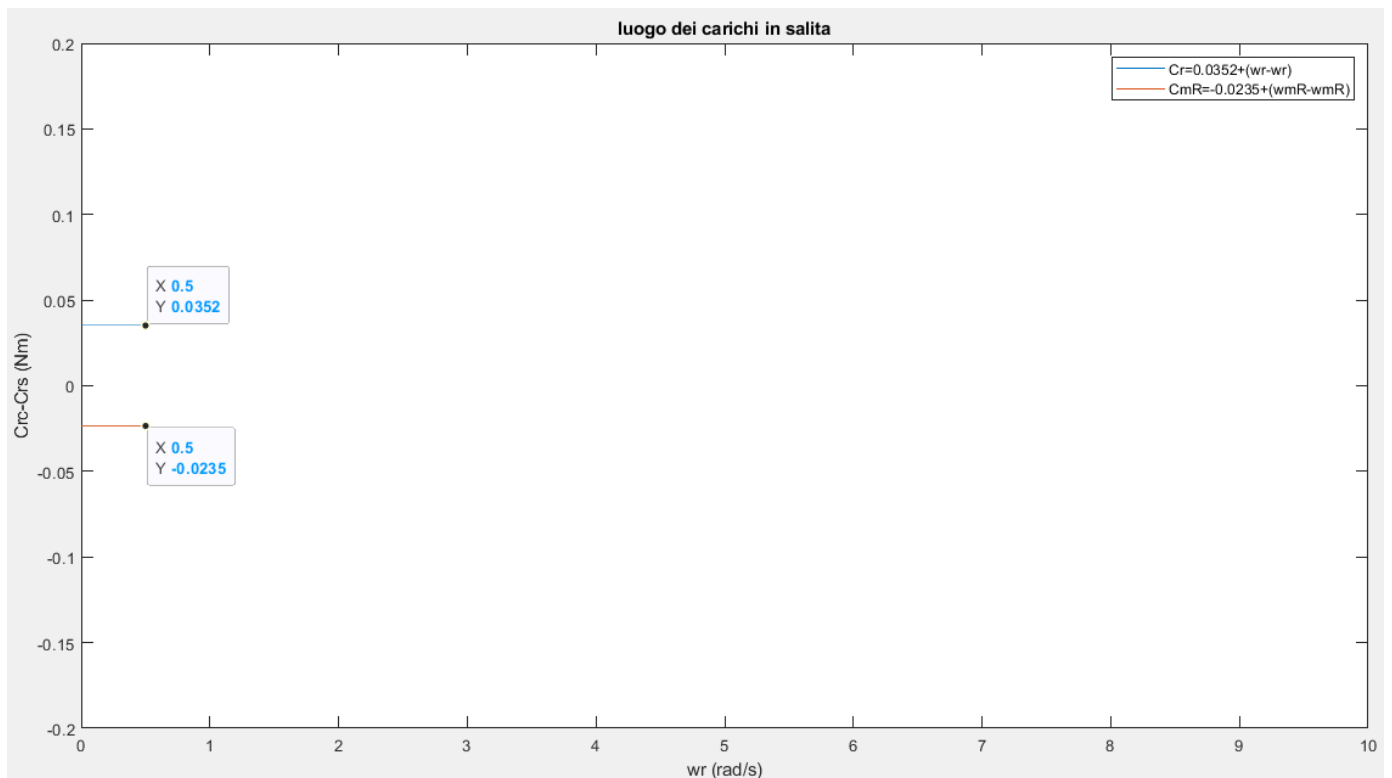


Grafico 2. Luogo dei carichi in salita.

che è il luogo dei carichi in condizioni di ascensore pieno e vuoto in salita, basta questo per analizzare il problema perché in discesa la situazione è identica ma speculare rispetto all'asse delle ordinate.

5.5 SCELTA EFFETTIVA DEL MOTORE

Confrontando diversi cataloghi di motori se n'è trovato uno che nel complesso rispecchia le caratteristiche richieste, è un Micro motoriduttore DC da 6 V con encoder N20. Tutte le caratteristiche necessarie al caso sono rispettate, infatti presenta range di coppia che coprono abbondantemente il carico, presenta un prolungamento posteriore dell'albero compreso di encoder già montato e riduttore integrato direttamente sul motore. Inoltre l'albero uscente dal riduttore presenta lunghezza totale di 9,3 mm e ha una sezione a D, ideale per calettare la puleggia. [7]

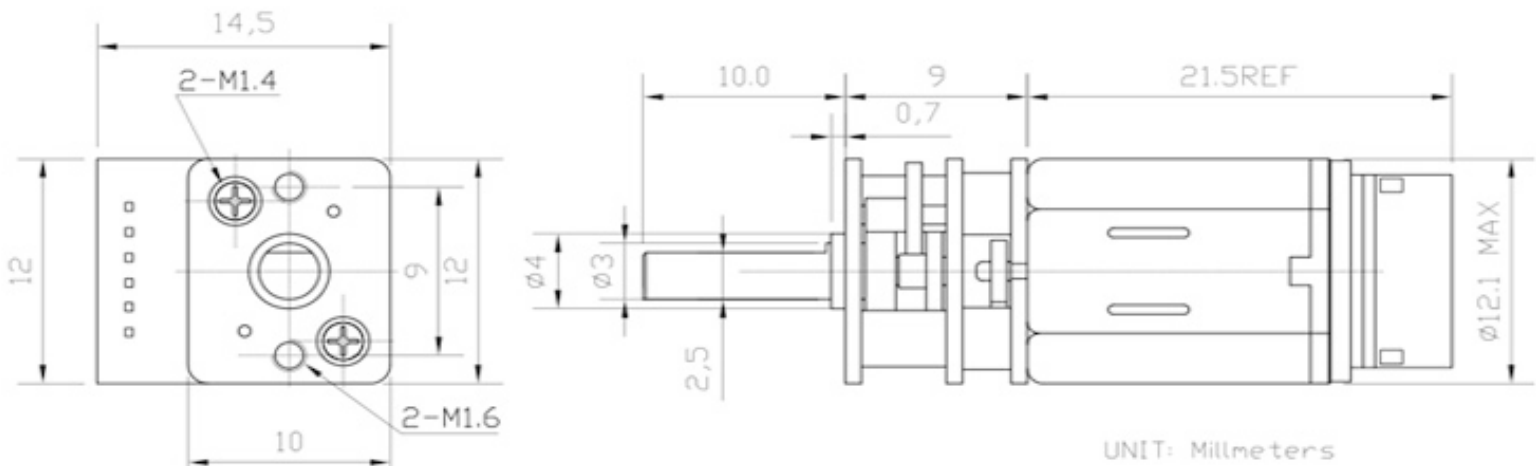


Figura 1. Disegno tecnico del motore.

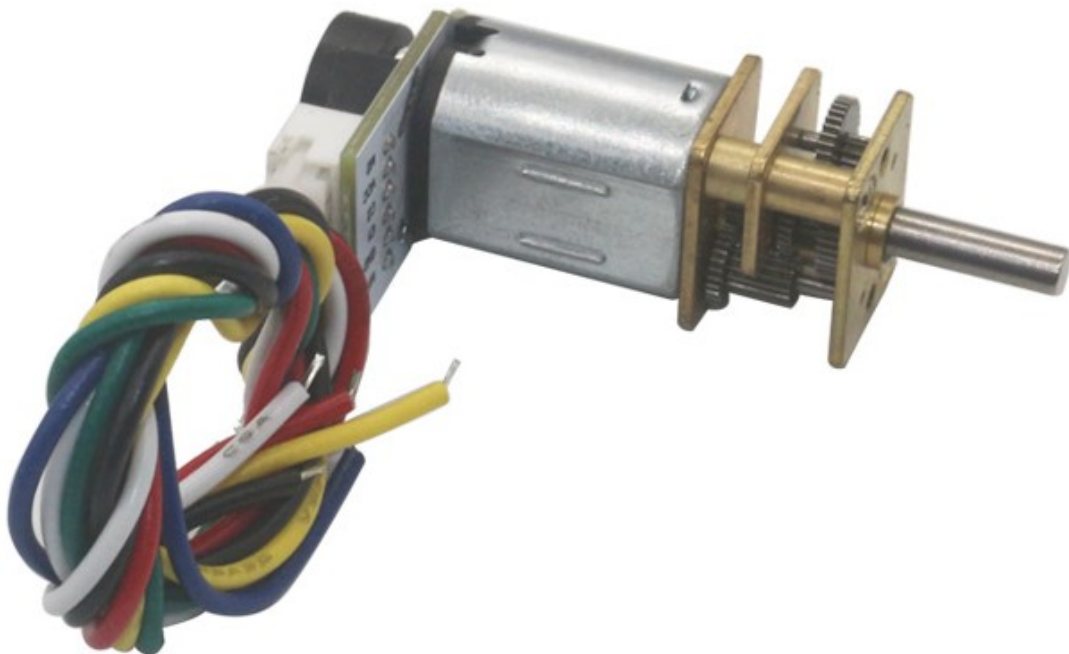


Figura 2. Immagine del motore compreso di encoder.

Adesso rimane da scegliere il rapporto di trasmissione(τ) adeguato all'applicazione, per farlo serviranno i dati relativi al motore forniti da catalogo:

Voltage(V)	No-load	Maximum efficiency			Stall		Speed Reducer	
	Speed(RPM)	Speed(RPM)	Torque(Nm)	Power(W)	Torque(Nm)	Current(A)	τ	L(mm)
6V(Rated)	1500	1050	0,0026	0,35	0,013	0,55	10	9
	500	375	0,0079		0,039		30	
	300	225	0,013		0,068		50	
	150	120	0,034		0,171		100	
	100	80	0,053		0,269		150	
	71	56	0,078		0,392		210	
	50	40	0,107		0,539		298	
	39	32	0,147		0,735		380	

Tabella 6. Scheda tecnica motore con diversi τ , i valori presenti sono quelli a valle del riduttore.

Per la scelta si devono considerare questi requisiti minimi:

- $C'm > 0,0352$ [Nm] (Coppia motrice ridotta all'albero resistente)
- $w'm \geq 0,5$ [Rad/s] = 4,77 [RPM] (w motore ridotta all'albero resistente)

A occhio si vede che in quanto a velocità tutti i rapporti di trasmissione sono idonei, mentre per quanto riguarda la coppia è possibile scartare a priori $\tau = 1/10$ che ha una coppia massima inferiore alla coppia richiesta, per cui rimangono da scegliere i successivi tre rapporti di trasmissione, perché oltre $\tau = 1/100$ la coppia di spunto diventa eccessiva per il caso in esame. Il rapporto $\tau = 1/30$ presenta una coppia allo spunto eccessivamente vicina alla coppia richiesta, quindi non è idoneo al caso e così rimane da scegliere tra due possibilità. La scelta ricade sul rapporto $\tau = 1/100$ per due motivi, il primo consiste nel fatto che all'avviamento sarà richiesta una coppia maggiore per via dell'inerzia e questo rapporto permette di coprire qualsiasi necessità di coppia, il secondo è che come già detto l'ascensore è un'applicazione che lavora in campo intermittente e il motore sarà soggetto a surriscaldamento, questa scelta permette di far funzionare il sistema con un rapporto di intermittenza ($\lambda = \frac{ta(\text{tempo di attività})}{tc(\text{tempo di ciclo})}$) maggiore limitando i fenomeni di surriscaldamento. Purtroppo nel catalogo non sono presenti i valori di coppia a monte della trasmissione, per cui il rendimento scelto in precedenza rimarrà tale e si dovranno confrontare i valori effettivi una volta costruito il banco.

5.6 STIMA DELLA TENSIONE DI ALIMENTAZIONE A REGIME

Adesso si procede alla stima della tensione di alimentazione per ogni caso di funzionamento a regime, essendo questo un motore DC brushed si devono usare le relative formule per il calcolo della costante di coppia ed elettrica: [1]

$$1. C = Kt$$

$$2. V = Ke\omega + RI + L \frac{dI}{dt}$$

Con:

- C = coppia motrice [Nm]
- Kt = costante di coppia del motore
- Ke = costante elettrica del motore
- R = resistenza [Ω]
- ω = velocità angolare del motore [rad/s]
- I = intensità di corrente [A]
- L = induttanza [H]
- V = tensione [V]

Prima di tutto dato che si hanno i dati di coppia e velocità a valle del riduttore andranno calcolati i dati a monte e per farlo si useranno queste formule:

- Cm flusso diretto: $Cm = \frac{Cr\tau}{\eta d}$
- Cm flusso retrogrado: $Cm = Cr\tau\eta r$
- $\omega m = \frac{\omega r}{\tau}$

In seguito si possono calcolare Kt, Ke ed R. Conoscendo i valori di Cm e corrente allo stallo (stall torque) si potrà calcolare Kt tramite la formula inversa della prima equazione:

$$Kt = \frac{Cm}{I}$$

Ke invece va calcolata considerando il valore della ωm senza carico (no load) utilizzando la seconda equazione e ricordando che la derivata nel tempo dell'intensità di corrente è nulla a regime, si ottiene quindi:

$$Ke = \frac{V}{\omega m}$$

La resistenza del motore invece va calcolata usando i dati del caso di stallo nella seconda equazione:

$$R = \frac{V}{I}$$

Ovviamente per i calcoli precedenti e per quelli successivi sarà necessario usare la tensione nominale(6V), perché tutti i dati disponibili sono riferiti a questa. Infine si può calcolare la tensione di esercizio usando la seconda equazione con i dati di ogni caso in esame.

➤ Calcolo delle caratteristiche del motore

- Coppia motore allo stallo (con moto diretto): $C_m = 2,85 \times 10^{-3} \text{ Nm}$
- ω_m (No load) = 1571 rad/s
- Intensità di corrente allo stallo: $I = 0,55 \text{ A}$

Quindi si ottiene: $K_t = 5,18 \times 10^{-3}$

$$K_e = 3,81 \times 10^{-3}$$

$$R = 10,9 \Omega$$

- Tensione di esercizio per ogni caso di funzionamento:

A) Ascensore pieno in salita

Si ottiene:

Flusso	$C_r[\text{Nm}]$	$C_m[\text{Nm}]$	$\omega_m[\text{rad/s}]$	$V[\text{V}]$
Diretto	0,0352	$5,86 \times 10^{-4}$	50	1,42

B) Ascensore pieno in discesa

Si ottiene:

Flusso	$C_r[\text{Nm}]$	$C_m[\text{Nm}]$	$\omega_m[\text{rad/s}]$	$V[\text{V}]$
Retrogrado	0,0352	$1,93 \times 10^{-4}$	-50	0,21

C) Ascensore scarico in salita

Si ottiene:

Flusso	$C_r[\text{Nm}]$	$C_m[\text{Nm}]$	$\omega_m[\text{rad/s}]$	$V[\text{V}]$
Retrogrado	-0,0235	$-1,29 \times 10^{-4}$	50	-0,08

D) Ascensore scarico in discesa

Si ottiene:

Flusso	$C_r[\text{Nm}]$	$C_m[\text{Nm}]$	$\omega_m[\text{rad/s}]$	$V[\text{V}]$
Diretto	-0,0235	$-3,91 \times 10^{-4}$	50	-1,01

Capitolo 6- Studio del transitorio

L'avviamento e la frenata sono fasi molto delicate in cui bisogna evitare accelerazioni troppo elevate per non rendere l'applicazione scomoda per chi la usa, infatti con un'accelerazione non idonea al caso si rischia di rendere queste fasi brusche facendo diventare pericolosa l'applicazione. Per sicurezza si è deciso di rispettare $Ac < \frac{1}{10}g$, verificando su libro [1] si trovano accelerazioni che rispettano questo limite e si è scelto tra quelle presenti $Ac = 0,7 \text{ m/s}^2$. L'obiettivo adesso è trovare i valori di coppia che permettono di ottenere questa accelerazione e calcolare la durata del transitorio, ma per farlo bisogna prima di conoscere le inerzie in gioco nel sistema, dato che la puleggia non è ancora stata scelta e l'inerzia del motore non viene fornita nel catalogo.

6.1 STIMA DELL'INERZIA DEL MOTORE

Avendo a disposizione sul libro [1] un piccolo catalogo di motori in corrente continua si è deciso di usarlo per definire una funzione che correli il momento d'inerzia del rotore con una delle caratteristiche del motore grazie al metodo di regressione lineare. Vedendo il catalogo si nota subito che rispetto al resto vi è una buona proporzionalità tra momento d'inerzia e coppia nominale quindi si procede con la correlazione di queste due variabili immettendo tutti i dati in un foglio Excel e interpolandoli per ricavare la funzione che li correla. Il risultato è una retta in un grafico (Cn,Jm):

Cn [Nm]	Jm [kgm ²]
0,024	3,18E-06
0,045	5,19E-06
0,145	2,81E-05
0,215	4,33E-05
0,445	0,00028
0,695	0,0004

Tabella 7. Valori di Cn e Jm presi da catalogo.

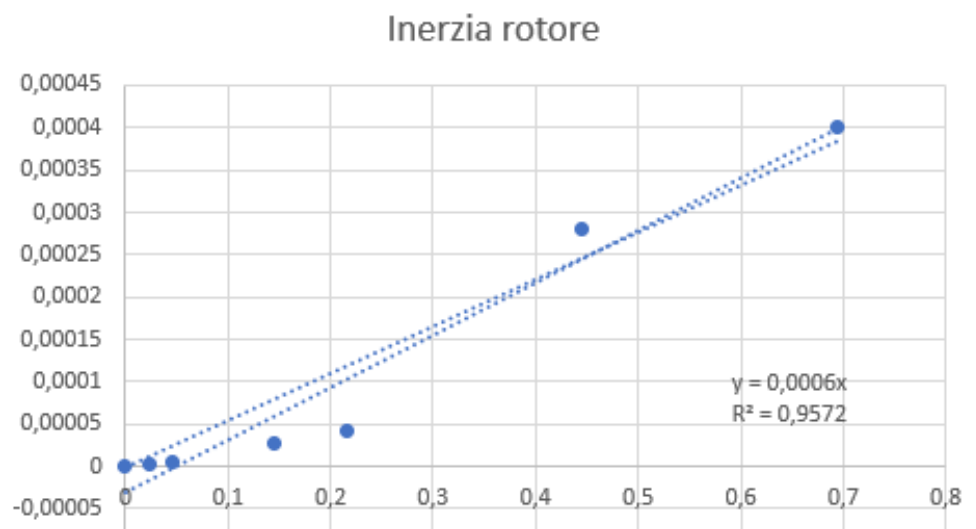


Grafico 3. Interpolazione lineare dei valori di Cn e Jm in un sistema cartesiano (Cn,Jm).

In un'interpolazione lineare l'indice R^2 dà un'idea dell'effettiva proporzionalità tra le due variabili, più questo è vicino ad uno, più la proporzionalità è marcata e in questo caso $R^2 = 0,9572$ quindi la funzione trovata è efficace:

$$Jm = 0,0006Cn$$

Il motore in questione alimentato a tensione nominale (6V) con il rapporto scelto dà una coppia nominale ridotta all'albero resistente pari a $C'n = 0,034$ [Nm]. Calcolando il suo valore all'albero motore si ottiene $C_n = 5,66 \times 10^{-4}$ [Nm], il momento d'inerzia del rotore è quindi pari a:

$$J_m = 3,4 \times 10^{-7} \text{ [kgm}^2\text{]}$$

6.2 SCELTA PULEGGIA E CALCOLO DELL'INERZIA

Prima di calcolare l'inerzia della puleggia questa va ovviamente scelta. Il criterio di scelta si basa innanzitutto sulla disponibilità di pulegge che rispecchino le caratteristiche necessarie al caso e in secondo luogo, in base alle inerzie trovate, si basa sulla possibilità di affidare il controllo dell'accelerazione durante l'avviamento completamente al controllore al posto di ottenere lo stesso risultato tramite l'inerzia della puleggia o di un volano aggiuntivo.

6.2.1 RICERCA PULEGGE

Avendo già scelto il diametro, la scelta della puleggia riguarda principalmente il materiale di costruzione ed i vantaggi in termini di inerzia che questo comporta. La necessità che sta alla base di questa scelta è quella di garantire un'accelerazione adeguata in avviamento, infatti si hanno due scelte:

1. Alimentare il motore alla tensione che servirà a regime e sfruttare la coppia di spunto corrispondente, ottenendo l'accelerazione desiderata tramite una scelta accurata dell'inerzia della puleggia, cioè impiegando una parte di energia cinetica nell'accelerazione della puleggia e del rotore.
2. Comandare l'avviamento tramite il controllore che gestirà il motore impostando una funzione, che grazie alla presenza dell'encoder, darà la giusta tensione al motore.

Si considera all'inizio la prima opzione e si enunciano le caratteristiche che la puleggia deve rispettare:

- Diametro primitivo: D.P. = 80 mm
- Gola ad U per aumentare la superficie di attrito tra fune e puleggia
- Foro preferibilmente di sezione a D o con sistema di blocco a vite
- Basso costo

Purtroppo facendo alcune ricerche si evince subito che gli articoli trovati nei più comuni siti di vendita online sono insoddisfacenti perché aventi informazioni parziali su dimensioni, materiale di costruzione e prezzo. L'unica puleggia che rispecchia complessivamente la maggior parte delle caratteristiche richieste è questa: [3]

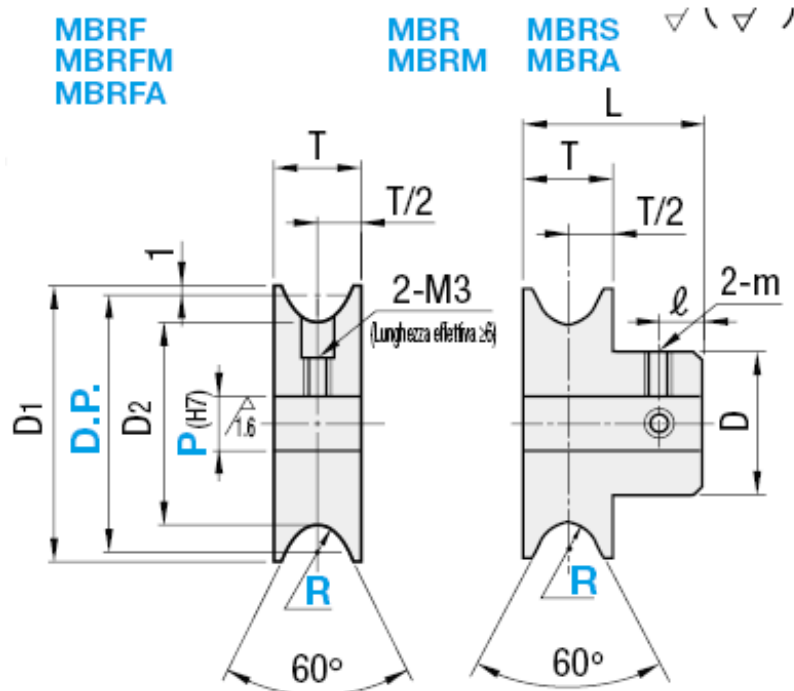


Figura 3. Disegno tecnico della puleggia.

Che presenta le seguenti caratteristiche:

Gola	D.P.[mm]	P[mm]	R[mm]	T[mm]	L[mm]	D[mm]	Materiale
U	80	5-12	2	10	16	20	Alluminio

Tabella 8. Principali caratteristiche della puleggia.

Ma il primo problema che si riscontrerebbe avanzando con questa scelta sarebbe l'incompatibilità in termini di diametro del foro e di larghezza della puleggia con l'albero a valle della trasmissione scelto in precedenza, oltre ad un prezzo elevato dovuto alla qualità del prodotto. L'incompatibilità può però essere aggirata tramite l'ausilio di eventuali supporti da interporre tra il foro e l'albero. Ma prima di approfondire questa opzione si valuta anche la seconda.

La seconda opzione rispetto alla prima non si preoccupa di adattare l'inerzia della puleggia al sistema per ottenere le condizioni di moto desiderate, ma di ottenere tali condizioni di moto tramite il sistema ad anello chiuso che governa l'applicazione, sfruttando una funzione che lega i giri del motore rilevati tramite encoder alla sua tensione di alimentazione. In questo modo in sostanza si è svincolati dal problema di avere un'inerzia insufficiente e avendo a disposizione una stampante 3D si potrebbe procedere alla sua progettazione autonoma e la successiva stampa. Un controllore a basso costo e capace di realizzare tale sistema è Arduino UNO, quindi si sceglierà come controllore del sistema. Il metodo di controllo ideale per questa situazione è il PID (Proporzionale, Integrativo, Derivativo), è un metodo di controllo ad anello chiuso che permette tramite l'ausilio di tre funzioni di controllare il motore in velocità, ed è applicabile alla scheda scelta.

Confrontando entrambe le opzioni si è deciso di applicare la seconda per la sua praticità e per la disponibilità di una stampante 3D a resina, quindi adesso è possibile procedere alla progettazione tramite “Solid Edge” della puleggia in questione e al successivo calcolo del momento d’inerzia. Per la progettazione si è preso spunto dalle dimensioni della puleggia in figura.3, che ad eccezione del foro, rispettava tutte le richieste, inoltre non si è utilizzato un sistema di fissaggio a vite, ma è stato progettato il foro con le stesse dimensioni e sezione dell’albero su cui verrà introdotta, questo è il risultato:

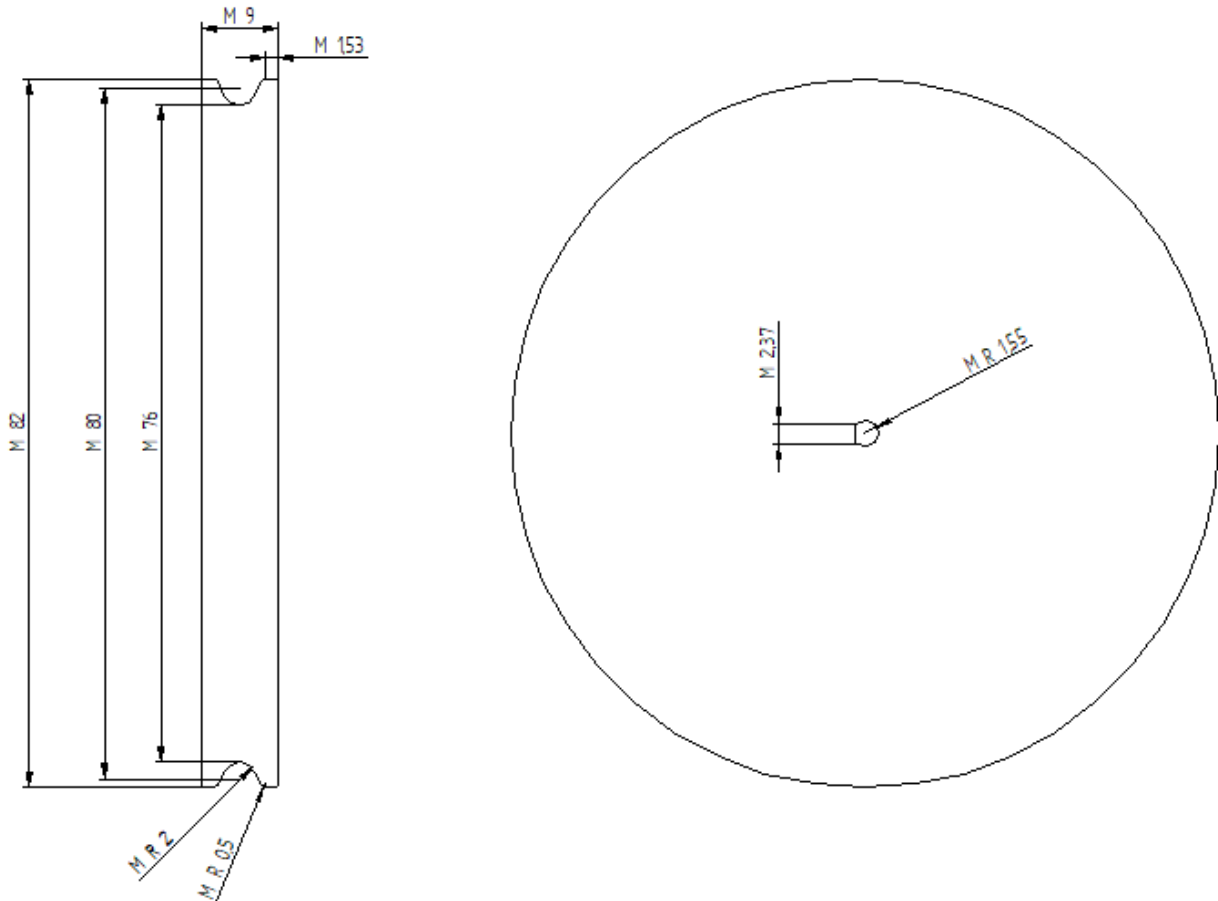


Figura 4. Disegno tecnico della puleggia da stampare in 3D.

Adesso va calcolato il momento d’inerzia, per il calcolo non si terrà conto dello scavo della gola e del foro, ma si considererà la puleggia come un cilindro uniforme pieno, questa approssimazione è valida perché le dimensioni e le masse in gioco sono molto basse, quindi considerarle non porterebbe a cambiamenti evidenti. La formula necessaria al calcolo è questa:[2]

$$Jp = \frac{1}{2}m \left(\frac{D2}{2}\right)^2$$

- Momento d’inerzia puleggia: Jp [kgm²]
- Massa della puleggia: m [kg]
- Diametro esterno: $D2$ [m]

Prima di passare al calcolo però si deve calcolare la massa totale della puleggia, si deve ricavare quindi la sua densità. Facendo una veloce ricerca si è visto che le resine più comuni hanno allo

stato solido una densità pari a $\rho = 1184 \text{ kg/m}^3$. Adesso è possibile calcolare la massa con questa formula:

$$m = \rho V$$

- Volume puleggia: $V [\text{m}^3]$

In questo caso la massa è pari a $m = 0,056 \text{ Kg}$ e quindi il momento d'inerzia è pari a:

$$J_p = 4,7 \times 10^{-5} \text{ Kgm}^2$$

6.3 TRASCURABILITA' DI J_m RISPETTO A J_p

I momenti d'inerzia trovati per puleggia e rotore si presentano con due ordini di grandezza differenti, nello specifico J_m è più piccolo di due ordini di grandezza rispetto a J_p , bisogna quindi verificare che questo sia trascurabile o meno. Per fare ciò ci si servirà del momento d'inerzia motore ridotto all'albero resistente:

- Flusso diretto: $J'm = \frac{J_m r d}{\tau^2}$
- Flusso retrogrado: $J'm = \frac{J_m}{r \tau^2}$

Calcolando si ottiene: Per flusso diretto $J'm = 2,04 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$

Per flusso retrogrado $J'm = 6,18 \times 10^{-3} \text{ Kgm}^2$

Dal calcolo si evince che con la riduzione il momento d'inerzia del rotore non può essere trascurato perché risulta addirittura maggiore di quello della puleggia.

6.4 FLUSSO DI POTENZA DURANTE IL TRANSITORIO

Prima di procedere al calcolo delle coppie necessarie allo spunto e della durata del transitorio bisogna prima verificare quale sia il flusso di potenza per ogni condizione di moto tramite le formule presenti nel paragrafo 3.2. Si procede con il calcolo delle condizioni per cui il flusso è diretto:

	Salita	Discesa
Pieno carico	$w'r > -49 \text{ rad/s}^2$ $w'm > -4900 \text{ rad/s}^2$	$w'r < -49 \text{ rad/s}^2$ $w'm < -4900 \text{ rad/s}^2$
Vuoto	$w'r > 49,58 \text{ rad/s}^2$ $w'm > 4958 \text{ rad/s}^2$	$w'r < 49,58 \text{ rad/s}^2$ $w'm < 4958 \text{ rad/s}^2$

Tabella 9. Condizioni per cui il flusso è diretto.

Adesso si deve calcolare il valore di $w'm$, sapendo che l'accelerazione della cabina è di $A_c = 0,7 \text{ m/s}^2$ è possibile usare questa formula per calcolare la corrispondente accelerazione angolare:

$$w'm = A_c \frac{2}{\tau D.P.}$$

- Diametro primitivo della puleggia: D.P. [m]
- Accelerazione della cabina: $A_c [\text{m/s}^2]$
- Rapporto di trasmissione: τ
- Accelerazione angolare del motore: $w'm [\text{rad/s}^2]$

Dal calcolo si ottiene: $w'm = 1750 \text{ rad/s}^2$

Quindi i flussi per ogni condizione di funzionamento sono:

	Salita	Discesa
Pieno carico	DIRETTO	RETROGRADO
Vuoto	RETROGRADO	DIRETTO

Tabella 10. Condizione di flusso di potenza a seconda del tipo di funzionamento.

6.5 COPPIA ALL'AVVIAMENTO

Adesso che si conosce il flusso di potenza per ogni condizione di funzionamento è possibile calcolare la coppia necessaria allo spunto, che servirà poi per calcolare il tempo di durata del transitorio. Le formule da usare sono: [1]

- Per flusso diretto: $C'm = w'm \frac{\eta d}{\tau} \left[Jm + \frac{\tau^2}{\eta d} \left(Jp + (M + Mq) \frac{D^2}{4} \right) \right] + (P - Pq) \frac{D}{2}$
- Per flusso retrogrado: $C'm = \frac{w'm}{\tau \eta r} \left[Jm + \tau^2 \eta r \left(Jp + (M + Mq) \frac{D^2}{4} \right) \right] + (P - Pq) \frac{D}{2}$

Con:

- Coppia motrice ridotta all'albero resistente: $C'm$ [Nm]
- Accelerazione angolare del rotore: $w'm$
- Massa del contrappeso: Mq
- Forza peso del contrappeso: Pq

Ora si calcola la coppia per i vari casi:

- A) Ascensore pieno in salita ($M = Mc + Mq$; $P = Pc + Pq$; $w'm = 1750 \text{ rad/s}^2$)

$$C'm = 0,083 \text{ Nm}$$

- B) Ascensore pieno in discesa ($M = Mc + Mq$; $P = Pc + Pq$; $w'm = -1750 \text{ rad/s}^2$)

$$C'm = -0,085 \text{ Nm}$$

- C) Ascensore vuoto in salita ($M = Mc$; $P = Pc$; $w'm = 1750 \text{ rad/s}^2$)

$$C'm = 0,092 \text{ Nm}$$

- D) Ascensore vuoto in discesa ($M = Mc$; $P = Pc$; $w'm = -1750 \text{ rad/s}^2$)

$$C'm = -0,067 \text{ Nm}$$

Guardando le coppie ottenute si capisce che la scelta del riduttore fatta in precedenza è stata idonea al caso. Le tensioni non verranno calcolate perché saranno controllate dal controllore in automatico tramite la funzione prima citata. Adesso si può calcolare il tempo di avviamento.

6.6 DURATA DEL TRANSITORIO

Per calcolare la durata del transitorio nei diversi casi di funzionamento si utilizzerà questa formula:
[1]

$$T_{avv} \cong J_{eq} \int_0^{0,99\omega_{m.reg}} \frac{d\omega_m}{C_m(\omega_m) - C_{r.eq}}$$

- Tempo di avviamento: T_{avv} [s]

- Inerzia equivalente: Per flusso diretto $J_{eq} = J_m + \frac{\tau^2}{\eta d} \left[J_p + (M + M_q) \frac{D^2}{4} \right]$

$$\text{Per flusso retrogrado } J_{eq} = J_m + \tau^2 \eta r \left[J_p + (M + M_q) \frac{D^2}{4} \right]$$

- Coppia motrice: C_m [Nm]

- Coppia resistente equivalente: Per flusso diretto $C_{r.eq} = \frac{\tau}{\eta d} (P - P_q) \frac{D}{2}$

$$\text{Per flusso retrogrado } C_{r.eq} = \tau \eta r (P - P_q) \frac{D}{2}$$

- Velocità angolare dell'albero motore a regime: $\omega_{m.reg}$ [rad/s]

Per questo calcolo si considererà per approssimazione $C_m(\omega_m)$ costante, date le coppie in gioco all'avviamento ed essendo solo una stima per calcolare il rapporto di intermittenza, risulta essere un'approssimazione accettabile. Si procede quindi al calcolo per ogni caso:

- A) Ascensore in salita pieno ($M = M_c + M_q$; $P = P_c + P_q$):

$$C_m = \frac{C' m \tau}{\eta d} = 1,38 \times 10^{-3} \text{ Nm}$$

$$T_{avv} \cong 0,0282 \text{ s}$$

- B) Ascensore in discesa pieno ($M = M_c + M_q$; $P = P_c + P_q$):

$$C_m = C' m \tau \eta r = -4,67 \times 10^{-4} \text{ Nm}$$

$$T_{avv} \cong 0,0283 \text{ s}$$

- C) Ascensore vuoto in salita ($M = M_c$; $P = P_c$):

$$C_m = C' m \tau \eta r = 5,06 \times 10^{-4} \text{ Nm}$$

$$T_{avv} \cong 0,0284 \text{ s}$$

- D) Ascensore vuoto in discesa ($M = M_c$; $P = P_c$):

$$C_m = \frac{C' m \tau}{\eta d} = -1,11 \times 10^{-3} \text{ Nm}$$

$$T_{avv} \cong 0,0286 \text{ s}$$

Capitolo 7- Rapporto di intermittenza

Come già accennato l'ascensore è un tipo di applicazione che non lavora in modo continuo, ma per periodi di intermittenza e questo comporta aumenti di temperatura nel motore che possono portare ad un danneggiamento permanente. E' bene quindi definire il tempo di riposo necessario per ogni ciclo di lavoro, quindi definire un rapporto di intermittenza λ :

$$\lambda = \frac{T_a}{T_c}$$

- Tempo di attività per ciclo: T_a [s]
- Durata del ciclo: $T_c = T_a + T_r$ [s]
- Tempo di riposo per ciclo: T_r [s]

Per ottenere questi dati si sfrutterà questa formula:

$$T_r \geq -\tau_{th} \ln \left(1 - \frac{C_{max}^2}{C_n^2} \left(1 - e^{-\frac{T_a}{\tau_{th}}} \right) \right) - T_a$$

- Costante di tempo termica: τ_{th}
- Coppia motrice massima: C_{max} [Nm]
- Coppia motrice nominale: C_n [Nm]

Per procedere al calcolo del tempo di riposo, si devono ricavare i valori del tempo di attività e della costante di tempo termica.

7.1 TEMPO DI ATTIVITA'

Per ricavare il tempo di attività basterà prima calcolare il tempo che impiega l'ascensore a velocità costante a salire e poi aggiungervi il tempo di avviamento e frenata calcolato in precedenza. La formula è questa: [1]

$$T_{a.reg} = \frac{H}{V_c}$$

- Altezza a cui sarà elevata la cabina: $H = 0,2$ m
- Velocità della cabina: $V_c = 0,02$ m/s

Si ottiene così: $T_{a.reg} = 10$ s

Adesso va sommato a questo valore il tempo che impiega il sistema a svolgere il transitorio, che in questo caso sono due, avviamento e frenata. Dato che i tempi differiscono solo per la terza cifra dopo la virgola si prenderà come valore comune $T_{a.tran} = 0,028$ s, per cui:

$$T_a = T_{a.reg} + 2T_{a.tran} = 10,056$$
 s

7.2 COSTANTE DI TEMPO TERMICA

La costante di tempo termica è stata ricavata dalla consultazione di cataloghi online, il valor medio trovato che più si addice al motore scelto è: $\tau_{th} = 45 \text{ s}$ [5]

7.3 TEMPO DI RIPOSO E RAPPORTO DI INTERMITTENZA

Prima di calcolare T_r si deve prima calcolare i valori di coppia massima e coppia nominale. Per quando riguarda la coppia massima di lavoro si userà la coppia massima necessaria a regime, che in questo caso corrisponde al caso in cui l'ascensore è a pieno carico:

$$C'_m = 0,0352 \text{ Nm}$$

Questo è il valore di coppia motrice ridotta all'albero resistente, va calcolata adesso la coppia all'albero motore, sia in caso di flusso diretto che retrogrado e infine, la coppia più grande verrà usata per il calcolo del tempo di riposo:

- Flusso diretto: $C_{max} = 5,86 \times 10^{-4} \text{ Nm}$
- Flusso retrogrado: $C_{max} = 1,93 \times 10^{-4} \text{ Nm}$

Si sceglie quindi la coppia massima in caso di flusso diretto che risulta essere maggiore.

L'ultimo dato da ricavare è la coppia nominale del motore, che viene fornita da catalogo ma solo quella in uscita dalla trasmissione, quindi basterà prendere il valore dato nel catalogo e ricavare la coppia in entrata per flusso diretto:

- Coppia nominale uscente dalla trasmissione: $C'_n = 0,034 \text{ Nm}$
- Coppia nominale entrante nella trasmissione: $C_n = 5,66 \times 10^{-4} \text{ Nm}$

Si procede al calcolo finale:

$$T_r \geq 0,779 \text{ s}$$

Ed il rapporto di intermittenza risulta quindi: $\lambda = \frac{T_a}{T_c} = \frac{10,056}{10,835} = 92\%$

Dato che non è stato possibile ricavare con precisione la costante di tempo termica non essendo questa presente nella scheda tecnica del motore scelto, si deve prendere in considerazione un rapporto di intermittenza minore, per cautela si sceglie $\lambda = 85\%$, da verificare una volta costruito il banco. [1]

Capitolo 8- Sistema di controllo

Come già accennato l'ascensore dovrà essere regolato in velocità tramite un sistema ad anello chiuso, il sistema scelto è il PID. Il PID sfrutta tre sistemi, Proporzionale, Derivativo e Integrativo, attraverso il metodo del Feedback, nello specifico si forma un sistema ad anello chiuso con un sensore che in questo caso è l'encoder posizionato dietro al motore, si imposta sul controllore un valore di velocità da rispettare e questo viene verificato dal sensore. Se l'encoder rileva una velocità minore di quella richiesta il sistema calcola l'errore rispetto al valore richiesto e provvede ad alimentare il motore con una tensione più alta, una volta soddisfatta la richiesta, il sistema oscilla sul valore di tensione corrispondente alla velocità desiderata. Tale sistema è ideale al caso in esame perché ci permette non solo di verificare a regime che la velocità sia quella desiderata e quindi di garantire lo spostamento della cabina facendola arrivare dal punto A al punto B con precisione accettabile, ma anche di far seguire al motore in avviamento una traiettoria di velocità idonea all'accelerazione scelta in precedenza senza l'ausilio di volani per aumentare il momento d'inerzia con lo scopo di abbassare l'accelerazione. Si procede adesso alla descrizione più nello specifico di tale sistema.

8.1 COMPONENTI E SCHEMA ELETTRICO

Per formare questo sistema ad anello chiuso sarà necessario avere un gruppo di controllo, uno di conversione, un trasduttore di velocità e un motore e questi comunicheranno seguendo la logica esposta nella figura 5: [1]

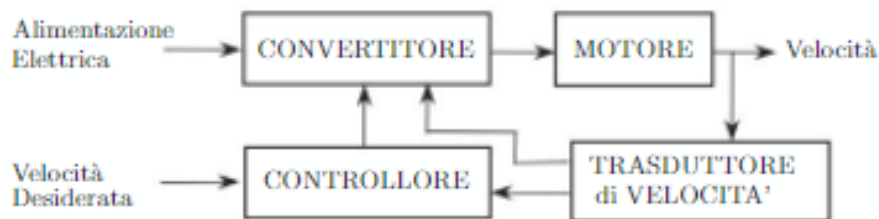


Figura 5. Schema del sistema di controllo.

I componenti addetti a queste funzioni sono:

A) Controllo: Scheda programmabile Arduino UNO

Arduino UNO è una scheda programmabile dotata di pin digitali e analogici che permettono il controllo di diverse apparecchiature elettroniche. La scheda viene alimentata ad una tensione di 9V connettendola direttamente al PC tramite cavo e può alimentare dispositivi mediante due uscite, una da 3V e una da 5,5V. Tale scheda risulta essere la soluzione migliore per l'applicazione in questione perché in grado di controllare Motori Brushed DC e per il suo basso costo.



B) Convertitore: MOTOR DRIVER L298N

Questo dispositivo è capace di far variare la tensione che alimenta il motore, il controllore una volta verificato l'errore invierà il segnale al Motor Driver indicando la tensione necessaria in quel momento.

C) Alimentazione esterna: Batteria da 6V

Come alimentazione esterna da collegare al Motor Driver si userà una semplice batteria da 6 volt.

D) Motore e trasduttore:

Si userà il motoriduttore compreso di encoder scelto in precedenza "Micro motoriduttore DC da 6 V con encoder N20".

Lo schema elettrico è il seguente:[6]

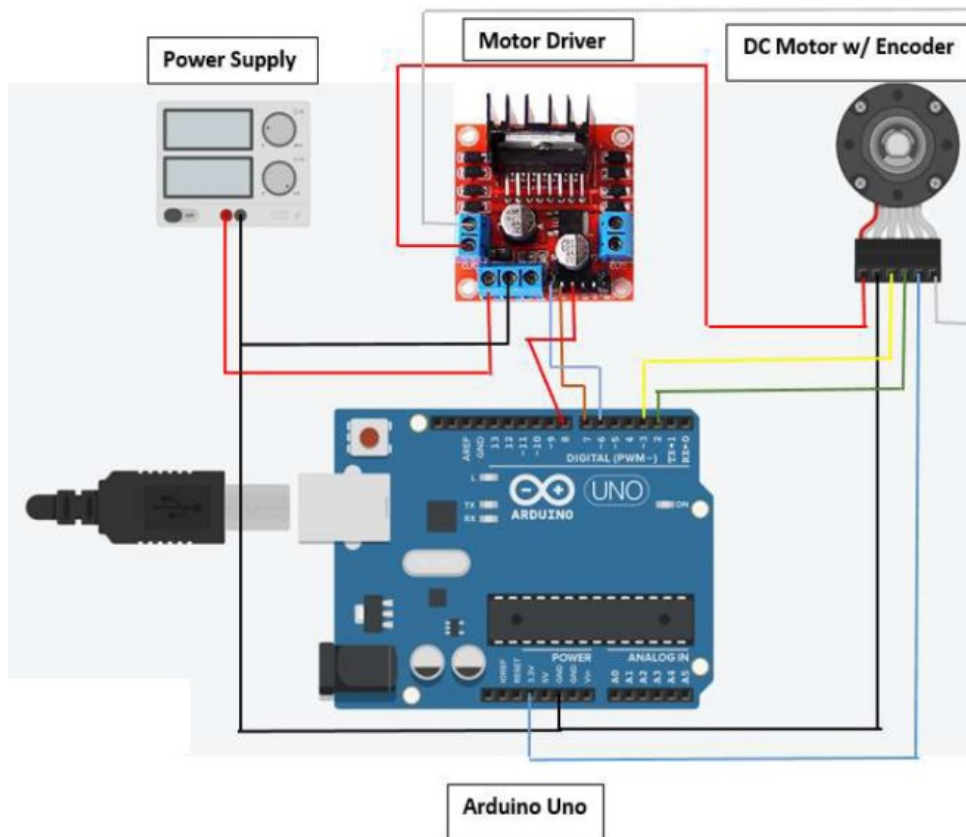


Figura 4. Schema elettrico del sistema ad anello chiuso.

8.2 PID

Si procede adesso alla descrizione più dettagliata del sistema di controllo PID. Come premesso il PID utilizza tre sistemi (Integrativo, Derivativo e Proporzionale), che formano una funzione di controllo che sfrutta l'errore che si ha sulla variabile controllata per variare la tensione di alimentazione e riportare tale variabile al suo valore desiderato. Nello specifico si ha: [6]

A) Controllo integrativo:

Tale sistema sfrutta il metodo trapezoidale che consiste nello stimare l'area sottostante al grafico della variabile controllata compresa tra due istanti di tempo molto vicini tramite un trapezio. Questo metodo permette di integrare l'errore e la funzione corrispondente è questa:

$$inte(K) = inte(k - 1) + \frac{(e(k) - e(k - 1))}{2} \Delta t$$

- Istante k-esimo di tempo: K
- Errore all'istante k: e(k)
- Intervallo di tempo: Δt [ms]

B) Controllo derivativo:

Questo sistema al contrario del precedente invece stima l'errore istantaneo facendone la derivata tra due istanti di tempo k e k-1, qui sotto è riportata la corrispondente funzione:

$$e'(k) = \frac{e(k) - e(k - 1)}{\Delta t}$$

- Derivata rispetto al tempo dell'errore: $e'(k)$

C) Controllo proporzionale

Questo sistema prende semplicemente il valore dell'errore all'istante k e lo immette nella funzione di controllo: e(k).

La funzione che deriva dall'unione di questi sistemi controlla il sistema globale e la sua formula generale è:

$$u(k) = Kp e(k) + Ki \int e dt + Kd e'(k)dt$$

- Costante proporzionale: Kp
- Costante integrativa: Ki
- Costante derivativa: kd

Infine la parte di programmazione sulla scheda vera e propria sarà fatta traducendo le funzioni elencate nel linguaggio di Arduino e adattandole al caso in esame implementando in queste i parametri e le variabili opportune al caso in esame. Va detto inoltre che andrà scritta una funzione che definisca la traiettoria di velocità che il motore dovrà eseguire, di conseguenza non si dovranno scrivere i valori di tensione a cui dovrà essere alimentato il motore, ma solo i suoi

estremi, perché il sistema provvederà in automatico ad aumentare e abbassare la tensione seguendo la curva di velocità programmata.

Bibliografia

- [1] G. Legnani, M. Tiboni, R. Adamini, D. Tosi, in Meccanica degli azionamenti, Esculapio, 2016
- [2] Lucio Demeio, in Elementi di meccanica classica per l'ingegneria, CittàStudi, 2016
- [3] "MISUMI"
<https://it.misumi-ec.com/vona2/detail/110300416440/#>
- [4] "Infobuild"
shorturl.at/hBN16
- [5] "FAULHABER"
<https://www.faulhaber.com/it/prodotti/motori-a-spazzole/ Faulhaber-s-g/>
- [6] "GEEKEE CEEBEE"
<http://geekeceebec.com/PID%20Controller.html>
- [7] "Aliexpress"
shorturl.at/muJN8