

SUPSI

Controllo di un pendolo inverso con volano

Studente/i

Martino Rinaldi

Relatore

Roberto Bucher

Correlatore

Walter Amaro

Committente

Faulhaber

Corso di laurea

**Bachelor of Science in
Ingegneria Meccanica**

Modulo

C10057

Anno

2018/2019

Data

30 agosto 2019

STUDENTSUPSI

"La meccanica è il paradiso delle scienze matematiche, perché con quella si viene al frutto matematico",

Leonardo da Vinci

Indice

Abreviazioni e acronimi	xiii
1 Abstract	1
2 Sintesi	3
3 Introduzione	5
4 Progetto assegnato	7
4.1 Descrizione	7
4.2 Compiti	7
4.3 Obiettivi	7
4.4 Tecnologie	8
5 Stato dell'arte	9
5.1 Il pendolo semplice	9
5.1.1 Le equazioni del moto e la loro soluzione	9
5.2 Il pendolo inverso	11
5.2.1 Il pendolo inverso nella teoria del controllo	11
5.2.2 Pendoli inversi con volano	13
6 Progettazione meccanica	15
6.1 Specifiche tecniche	15
6.1.1 Requisisti di progetto	15
6.1.2 Funzioni e sotto funzioni	16
6.1.3 Caratteristiche meccaniche	19
6.1.3.1 Ingombri	19
6.1.3.2 Motore	19
6.1.3.3 Encoder incrementale	21
6.1.3.4 Pendolo	21
6.1.3.5 Volano	22
6.1.4 Allineamento e centraggio degli assi	22

6.1.5 Elementi rotativi e attriti	22
6.2 Caisse Morfologique	22
6.2.1 Funzione di supporto del pendolo	22
6.2.1.1 Variante 1	23
6.2.1.2 Variante 2	23
6.2.1.3 Valutazione tecnica	24
6.2.2 Funzione di supporto dell'albero del pendolo	25
6.2.2.1 Variante 1	26
6.2.2.2 Variante 2	26
6.2.2.3 Valutazione tecnica	26
6.2.3 Funzione di passaggio dei cavi di alimentazione e controllo del motore	27
6.2.3.1 Variante 1	28
6.2.3.2 Variante 2	28
6.2.3.3 Valutazione tecnica	28
6.2.4 Funzione di accoppiamento tra albero e pendolo	29
6.2.4.1 Variante 1	30
6.2.4.2 Variante 2	30
6.2.4.3 Variante 3	30
6.2.4.4 Variante 4	32
6.2.4.5 Variante 5	32
6.2.4.6 Variante 6	33
6.2.4.7 Valutazione tecnica	33
6.2.5 Funzione di accoppiamento tra albero del volano e motore	34
6.2.5.1 Variante 1	35
6.2.5.2 Variante 2	35
6.2.5.3 Valutazione tecnica	35
6.2.6 Funzione di accoppiamento tra albero e volano	36
6.2.6.1 Variante 1	37
6.2.6.2 Variante 2	37
6.2.6.3 Variante 3	38
6.2.6.4 Variante 4	38
6.2.6.5 Variante 5	39
6.2.6.6 Valutazione tecnica	40
6.3 Schizzo di concetto	40
6.4 Progettazione CAD	40
6.4.1 Volano	40
6.4.1.1 Calcolo della massa del volano	43
6.4.1.2 Calcolo del momento di inerzia del volano	43
6.4.1.3 Calcolo degli sforzi rotazionali nell'anello esterno	44

6.4.1.4	Calcolo degli sforzi rotazionali nelle razze	45
6.4.1.5	Ottimizzazione	45
6.4.2	Albero del volano	46
6.4.3	Albero del pendolo	49
6.5	Pendolo	49
6.6	Supporto del pendolo	50
6.7	Supporto encoder	51
6.8	Base del pendolo	52
7	Modellazione del pendolo	53
7.1	Modellazione in posizione stabile	53
7.1.1	Calcolo dell'energia potenziale	54
7.1.2	Calcolo dell'energia cinetica	55
7.1.3	Lagrangiana ed equazione di Lagrange	56
7.2	Modellazione in posizione instabile	60
7.3	Modellazione del sistema bilanciato	61
7.3.1	Calcolo dell'energia potenziale	63
7.3.2	Calcolo dell'energia cinetica	63
7.3.3	Langrangiana ed equazioni di Lagrange	64
8	Progettazione dei controllori	67
8.1	Controllo ottimo	68
8.2	Progettazione dell'osservatore di stato	69
8.2.1	Osservatore ridotto	71
8.2.2	Osservabilità	73
8.3	Simulazione	74
8.3.1	Simulazione in posizione di equilibrio stabile	75
8.3.1.1	Simulazione in tempo continuo	75
8.3.1.2	Simulazione in tempo discreto	76
8.3.2	Simulazione in posizione di equilibrio instabile	77
8.3.2.1	Simulazione in tempo continuo	77
8.3.2.2	Simulazione in tempo discreto	81
8.3.2.3	Simulazione in tempo discreto del sistema di quarto ordine .	84
8.3.3	Swing-up del pendolo	85
8.3.3.1	Sistema non lineare	86
8.3.3.2	Swing-up con metodo di risonanza	87
8.3.3.3	Swing-up con metodo delle energie	88

9 Controllo in tempo reale	91
9.1 Sistemi di controllo ed acquisizione dati	91
9.2 Identificazione dei paramenti del sistema	95
9.3 Modello Simulink RT	95
9.4 Controllo RT in posizione di equilibrio stabile.	96
9.5 Controllo RT in posizione di equilibrio instabile	97
10 Sviluppi futuri	103
10.1 Meccanica ed elettronica	103
10.2 Controllore	105
11 Conclusioni	107
A Valutazioni tecniche	109
B Disegni costruttivi	117
B.1 Disegni di costruzione	117
B.2 Disegni di assieme	152
C Schede tecniche	165
D Ordini e preventivi	187
E Codici MATLAB	205
E.1 Simulazioni	205
E.2 Controllo RT	219

Elenco delle figure

5.1	Schema di un pendolo semplice	10
5.2	Schema di un pendolo semplice con le forze agenti su di esso	10
5.3	Schema di un pendolo inverso generico	11
5.4	Schema di un corpo umano come pendolo inverso	12
5.5	Schema di un pendolo Furuta	12
5.6	Schema di un <i>ballbot</i>	13
5.7	Pendolo <i>Cubli</i>	13
6.1	Diagramma delle funzioni	18
6.2	Schema del volume di ingombro massimo ammesso.	19
6.3	Motore BLDC	19
6.4	Encoder ottico incrementale	21
6.5	Variante 1	23
6.6	Variante 1	24
6.7	Variante 2	24
6.8	Variante 2	25
6.9	Variante 1	26
6.10	Variante 2	26
6.11	Variante 1	28
6.12	Variante 2	28
6.13	Variante 1	30
6.14	Variante 2	31
6.15	Variante 3	31
6.16	Variante 4	32
6.17	Variante 5	32
6.18	Variante 6	33
6.19	Variante 1	35
6.20	Variante 2	36
6.21	Variante 1	37
6.22	Variante 2	38

6.23 Variante 3	38
6.24 Variante 4	39
6.25 Variante 5	39
6.26 Schizzo di concetto della realizzazione meccanica	41
6.27 Geometria ideale del volano	42
6.28 Foglio di calcolo per l'ottimizzazione del volano	46
6.29 Modello CAD del volano	47
6.30 Modello CAD dell'albero del volano	47
6.31 Modello CAD dell'albero del pendolo	49
6.32 Modello CAD del sotto assieme del pendolo	50
6.33 Modello CAD del sotto assieme del supporto del pendolo	51
6.34 Modello CAD del sotto assieme del supporto dell'encoder	52
6.35 Modello CAD del sotto assieme della base del pendolo	52
7.1 Pendolo in posizione di equilibrio stabile	55
7.2 Modello di pendolo bilanciato con volano.	62
8.1 Schema a blocchi di un sistema dinamico	67
8.2 Controllore di stato	68
8.3 Controllore di stato con osservatore	69
8.4 Schema di un osservatore con anello di retroazione dell'errore e_y	70
8.5 Schema a blocchi dell'osservatore ridotto con stato w non disponibile.	72
8.6 Diagramma a blocchi dell'osservatore ridotto	73
8.7 Modello Simulink con tempo discreto	75
8.8 Modello Simulink con tempo continuo	75
8.9 Risultati in equilibrio stabile in continuo, 10°	76
8.10 Risultati in equilibrio stabile in continuo, 25°	77
8.11 Risultati in equilibrio stabile in discreto, 10°	78
8.12 Risultati in equilibrio stabile in discreto, 25°	78
8.13 Risultati in equilibrio instabile in continuo, 0 rad s^{-1}	79
8.14 Risultati in equilibrio instabile in continuo, 5 rad s^{-1}	80
8.15 Risultati in equilibrio instabile in continuo, -5 rad s^{-1}	81
8.16 Risultati in equilibrio instabile in discreto, 0 rad s^{-1}	82
8.17 Risultati in equilibrio instabile in discreto, 5 rad s^{-1}	82
8.18 Risultati in equilibrio instabile in discreto, -5 rad s^{-1}	83
8.19 Modello Simulink con tempo discreto e sistema di 4° ordine	84
8.20 Risultati in equilibrio instabile in discreto, modello di 4° ordine	85
8.21 Modello Simulink non lineare	86
8.22 Modello Simulink per la fase di swing-up con approccio di risonanza	87
8.23 Posizione angolare del pendolo durante la fase di swing-up metodo di risonanza	88

8.24 Modello Simulink per la fase di swing-up con approccio delle energie	89
8.25 Posizione angolare del pendolo durante la fase di swing-up metodo delle energie	89
9.1 Pendolo inverso utilizzato per la realizzazione dei controllori in tempo reale . .	92
9.2 Schema dei cablaggi	94
9.3 Dettagli dei collegamenti della scheda elettrica	94
9.4 Modelli Simulink per il controllo in tempo reale	95
9.5 Sottosistema di collegamento con i controllori MC del pendolo	96
9.6 Modello Simulink del sistema controllato in posizione di equilibrio stabile . .	97
9.7 Modello Simulink del sistema controllato in posizione di equilibrio instabile .	98
9.8	98
9.9 Avvio del programma di controllo in posizione instabile	99
9.10	99
9.11 Pendolo inverso in posizione di equilibrio instabile	100
9.12 Pendolo inverso stabilizzato in posizione verticale per 8 min e 42 s	101

Elenco delle tabelle

6.1	Ingombri	19
6.2	Serie 4221 024 BXT H - Dati tecnici	20
6.3	Serie BDK 16.05A1000-5-5 - Dati tecnici	21
6.4	Limiti di ottimizzazione dei parametri	42
6.5	Cuscinetto radiale a sfere	47
6.6	Giunto elastico a soffietto	48
9.1	Motion Controller MC 5005 S CO - Dati tecnici	93
9.2	Motion Controller MC 3002 S CO - Dati tecnici	93
A.1	Supporto del pendolo	110
A.2	Supporto dell'albero del pendolo	110
A.3	Passaggio dei cavi di alimentazione e controllo del motore	111
A.4	Accoppiamento albero pendolo	111
A.5	Accoppiamento albero pendolo (continuazione 1)	112
A.6	Accoppiamento albero pendolo (continuazione 2)	112
A.7	Accoppiamento tra albero e motore	113
A.8	Accoppiamento tra albero e motore	113
A.9	Accoppiamento tra albero e volano	114
A.10	Accoppiamento tra albero e volano (continuazione)	114
A.11	Accoppiamento tra albero e volano (continuazione)	115

Abreviazioni e acronimi

FSF	<i>Full State Feedback</i>	Controllo di stato con retroazione
LQR	<i>Linear Quadratic Regulator</i>	Regolatore lineare quadratico
BLDC	<i>Brush Less Direct Current electric motor</i>	Motore a corrente continua <i>Brush Less</i>
MC	<i>Motion Controller</i>	
RT	<i>Real Time</i>	Tempo reale
RWIP	<i>Reaction Wheel Inverted Pendulum</i>	Pendolo inverso con volano
RW	<i>Reaction Wheel</i>	Ruota innerziale o volano
EUR	<i>End User Requirements</i>	
CAD	<i>Computer Aided Design</i>	
LTI		Sistema Lineare Tempo Invariante
MCDC	<i>Direct Current Motion Controller</i>	

Capitolo 1

Abstract

This project is an elaboration of an earlier bachelor's thesis [1] on the subject of control on an inverted pendulum with reaction wheel. A mechanical redesign, a mathematical modelling, a design of **LQR optimum controllers** with reduce state observers and the real time control of the system has been carried out. The inverted pendulum has been conceived as a demonstrator for the newest **BLDC servomotors** produced by **Faulhaber**.

In the first phase of this project, different construction variant has been analysed resulting in mechanical design that considers the influence of control of the system. Particular attention has been given on the optimization of the design of the reaction wheel with the objective of maximise the moment of inertia while minimise his mass. At the end of the design, the various mechanical components were made and assembled.

At the same time four different model of the pendulum has been develop. Two linearized model has been developed, one around the stable equilibrium point along with one around the instable equilibrium point. After these models, two more were derived one for the swing up of the pendulum and one of a balanced configuration.

Once the mathematical models has been calculated, the design of **state controllers** including the **reduced observers** to estimate unmeasured states has begun. In the main time, numerous **Simulink** simulation has been carried out in order to evaluate and compare the various controllers designed. Implementing the position acquisition and motor control system on the mechanics with the **Faulhaber's Motion Controller** boards was possible to continue with the real time control of the system.

The controller identified as most effective were later implemented on the real time control of the inverted pendulum using **Matlab** and a machine with **Linux Real Time** operative system. At this point more value for the LQR controller's **Q** and **R** weight has been tested identifying

a series of parameters suited for the realization of an effective controller.

Capitolo 2

Sintesi

In questo progetto, elaborato partendo da un precedente progetto di tesi [1], è stato svolto un lavoro di riprogettazione meccanica, di modellazione matematica, di progettazione di una serie di **controllori di stato con osservatori ridotti** tramite **controllore ottimo LQR** ed in fine di controllo in tempo reale di un pendolo inverso con volano ideato come dimostratore per i nuovi **servomotori BLDC** recentemente lanciati da **Faulhaber**.

In una prima fase sono state analizzate diverse varianti costruttive ed è stata realizzata una progettazione meccanica considerando l'influsso di questa sul controllo del sistema. In particolare è stata realizzata un'ottimizzazione del volano allo scopo di massimizzare il momento di inerzia di questo componente minimizzandone però la massa. Al termine della progettazione sono stati realizzati ed assemblati i vari componenti meccanici.

Contemporaneamente alla realizzazione del pendolo sono stati elaborati quattro differenti modelli, uno per il sistema linearizzato attorno al punto di equilibrio stabile, uno per il sistema linearizzato attorno al punto di equilibrio instabile, uno per la fase di *swing-up* ed uno per il pendolo in configurazione bilanciata.

Ottenuti i modelli matematici si è cominciata la progettazione dei controllori di stato compresi di **osservatori ridotti** per stimare gli stati non misurati. In parallelo sono state svolte numerose simulazioni tramite **Simulink** allo scopo di valutare e confrontare i vari controllori progettati. Implementando alla componente meccanica i sistemi di acquisizione della posizione e controllo del motore realizzati tramite le schede **Motion Controller** di Faulhaber è stato possibile proseguire con il controllo in tempo reale.

I controllori identificati come più efficaci sono stati in seguito implementati per un controllo in tempo reale del pendolo inverso utilizzando **Matlab** e una macchina **Linux** con sistema operativo **Real Time**. A questo punto si sono testati differenti valori dei pesi **Q** e **R** per il

controllore LQR identificando una serie di parametri per la realizzazione di un controllore efficace.

Capitolo 3

Introduzione

Fin dall'antichità l'idea di sistemi e macchine in grado di agire in maniera autonoma hanno affascinato ed incantato la mente degli uomini, Aristotele ne **La Politica** diceva:

"Se ogni strumento riuscisse a compiere la sua funzione o dietro un comando o prevedendolo in anticipo e, [...], così anche le spole tessessero da sé e i plettri toccassero la cetra, i capi artigiani non avrebbero davvero bisogno di subordinati, né i padroni di schiavi."

E numerose sono le macchine in grado di muoversi autonomamente come sotto l'effetto di magie e sortilegi nate dalla mente degli antichi ingegneri, da Erone di Alessandria¹ a Leonardo gli automi furono utilizzati per generare stupore e meraviglia negli occhi degli spettatori.

È tuttavia solo nella seconda metà del XIX secolo che, grazie al lavoro svolto dal fisico scozzese **James Clerk Maxwell**² sui regolatori centrifughi, nacque una formale teoria del controllo. Sebbene i controllori centrifughi fossero già applicati come regolatori di velocità nei mulini a vento [2] le osservazioni di Maxwell sul comportamenti instabili di questi sistemi generarono un certo fermento attorno all'argomento. Fu nell'entusiasmo di quel periodo che dal lavoro di Maxwell, **Edward John Routh**³ generalizzò i risultati del compagno di studi per una più larga categoria di sistemi lineari. Indipendentemente al lavoro di Routh il matematico tedesco **Adolf Hurwitz**⁴ analizzò la stabilità dei sistemi dinamici tramite l'utilizzo delle equazioni differenziali, il lavoro di questi due studiosi culminò nel **teorema di Routh-Hurwitz**.

È a partire dalla seconda guerra mondiale che la teoria del controllo diventa finalmente un importante campo di ricerca. Nel 1953 la tedesca **Irmgard Flügge-Lotz**⁵ pubblico il primo testo che trattava i sistemi discreti [3].

¹Matematico, ingegnere ed inventore greco vissuto attorno al I secolo dopo cristo.

²Edinburgh, 13 giugno 1831 - Cambridge, 5 novembre 1879

³Quebec, 20 gennaio 1831 - Cambridge, 7 giugno 1907

⁴Hildesheim, 26 marzo 1859 - Zurigo, 18 novembre 1919

⁵Hamelin, 16 luglio 1903 - Palo Alto, 22 maggio 1974

Fu nel 1960 che **James K. Roberge**⁶ dimostrò, nella sua tesi di laurea [4], per la prima volta una soluzione al problema del pendolo inverso [5], si aprì così la porta ad uno dei più classici problemi della moderna teoria del controllo.

⁶ Jersey City, 1938 - 2014

Capitolo 4

Progetto assegnato

4.1 Descrizione

In un precedente progetto è stata analizzata la trattabilità di realizzare un pendolo inverso controllato tramite un volano allacciato alla sua sommità. Purtroppo si è arrivati solo ad un controllo minimale per il fatto che i motori Fauhaber sul mercato in quel momento non erano in grado di fornire i momenti necessari per poter controllare efficacemente il sistema.
con questo progetto di diploma si vuole ripartire su una base nuova, con nuovi motori Fauhaber appena entrati nel mercato, ed un nuovo approccio meccanico con la possibilità di semplificare il sistema attuale. La modellazione del sistema reale esiste, manca l'identificazione dei parametri, che sarà anche compito del progetto.

4.2 Compiti

- Realizzare la meccanica del pendolo inverso con volano;
- Identificare i parametri del sistema;
- Riprendere la modellazione preesistente e adattarla ai nuovi parametri; Fare il design del sistema di controllo utilizzando metodologie ottime (una introduzione di questa tecnologia verrà fatta durante l svolgimento del lavoro);
- Implementare il sistema finale in Matlab/Simulink, compreso per effettuare:
 - Validazione;
 - Simulazione;
 - Realizzazione RT

4.3 Obiettivi

- Realizzazione della nuova meccanica;

- Integrazione dei motori e sensori;
- Identificazione dei parametri;
- Design del sistema di controllo, simulazione e realizzazione RT;
- documentazione finale

4.4 Tecnologie

- Modellazione e costruzione meccanica;
- Modellazione del sistema e identificazione parametrica;
- Matlab/Simulink;
- Sistemi di controllo

Capitolo 5

Stato dell'arte

5.1 Il pendolo semplice

Il pendolo semplice è un sistema fisico costituito da un filo (o un asta) infinitamente rigido e da una massa puntiforme fissata ad uno dei capi, mentre il secondo capo è fissato in modo tale da permettere la rotazione della massa attorno al punto di ancoraggio (figura 5.1). La massa puntiforme essendo soggetta ad una forza gravitazionale¹ esercita una forza sul filo tale da agire come una forza centripeta forzando dunque un moto di tipo circolare. Il pendolo semplice fu reso celebre dal lavoro sia teorico che sperimentale svolto dal fisico italiano Galileo Galilei² che ne descrisse per primo l'**isocronismo**³.

5.1.1 Le equazioni del moto e la loro soluzione

Nel caso in cui l'accelerazione gravitazionale, la velocità iniziale e la direzione del filo giassero su di un medesimo piano, il moto del pendolo avviene su questo stesso piano verticale. In particolare agendo la forza di reazione esercitata dal filo inestensibile sulla massa similmente ad una forza centripeta, troveremmo che il pendolo compie una traiettoria circolare. Descrivendo il sistema per mezzo di coordinate polari come illustrato in figura 5.2 è possibile scrivere le equazioni che descrivono il moto del pendolo come riportato qui di seguito:

$$m(\ddot{r} - r\dot{\theta}^2) = mg \cos(\theta) - T_f \quad (5.1a)$$

$$m(r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta}) = -mg \sin(\theta) \quad (5.1b)$$

¹Supponiamo come ipotesi esemplificativa l'uniformità nello spazio e la costanza nel tempo dell'attrazione gravitazionale.

²Pisa, 15 febbraio 1564 - Arcetri, 8 gennaio 1642

³"Ugual tempo" al greco *isos* che significa uguale, pari e *Kronos* che significa tempo. L'isocronismo è la caratteristica di un fenomeno che impiega un medesimo intervallo di tempo per realizzarsi.

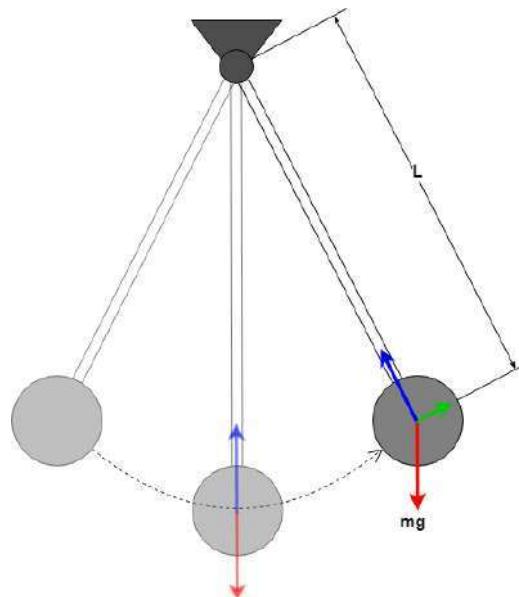


Figura 5.1

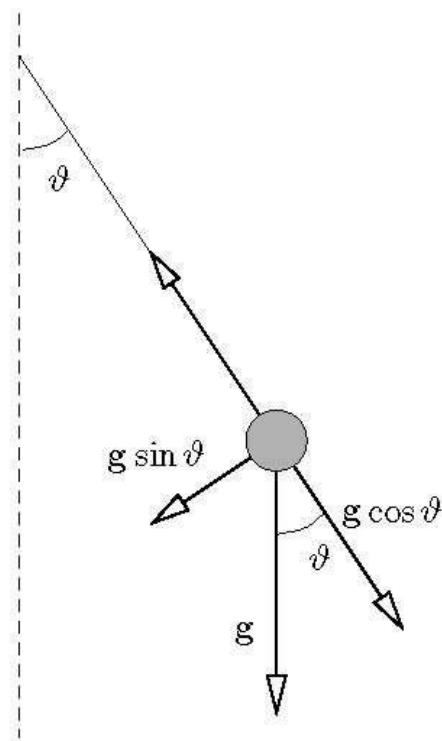


Figura 5.2

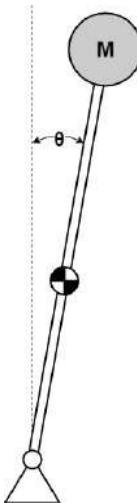


Figura 5.3

5.2 Il pendolo inverso

Il pendolo inverso è un caso particolare di pendolo caratterizzato dal fatto che il proprio centro di massa si trovi posizionato al disopra del centro di rotazione (figura 5.3), questa caratteristica ne determina la natura instabile.

Esistono innumerevoli varianti di pendoli inversi ed alcuni esempi possono essere fatti, sicuramente il meno ovvio e tuttavia quello con cui abbiamo più familiarità è il corpo umano in posizione eretta. Di fatto è possibile rappresentare il corpo umano come un pendolo inverso dove il centro di rotazione corrisponde ai piedi (figura 5.4) mentre il centro di massa risulta posizionato all'incirca all'altezza dell'ombelico.

Un altro esempio può essere riscontrato in ambito aerospaziale dove i missili sono stabilizzati utilizzando un modello che fa riferimento al pendolo inverso. Dagli inizi degli anni duemila sì assistito al sempre maggiore utilizzo di mezzi di trasporto individuali basati sul pendolo inverso, il capostipite di questi mezzi è il Segway presentato nel 2001 da Dean Kamen⁴.

5.2.1 Il pendolo inverso nella teoria del controllo

La sfida di riuscire a stabilizzare il pendolo inverso è divenuta nel tempo un comune problema affrontato dai laboratori che si occupano di robotica e teoria del controllo, ed in questo senso si possono trovare numerose varianti di pendoli i più comuni sono i pendoli con carrello che si possono presentare come pendoli semplici o multipli montati su di un carrello capace di muoversi in una o più direzioni. Una seconda categoria è costituita dei pendoli Furuta (figura 5.5) che consiste in un pendolo inverso montato su di un braccio in grado

⁴Long Island (NY), 5 aprile 1951

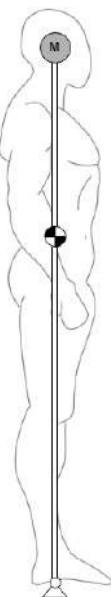


Figura 5.4

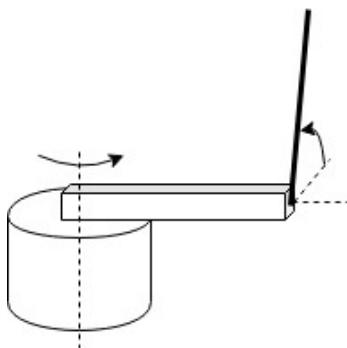


Figura 5.5

di ruotare nel piano perpendicolare al pendolo; questo sistema è caratterizzato da un'importante non-linearietà e pertanto sono numerosi gli articoli che trattano di metodologie di controllo non lineare sfruttando questa tipologia di pendoli.

Un ulteriore categoria di pendoli mobili può essere trovata nel campo della robotica mobile, dove oltre che ai robot umanoidi che presentano le medesime caratteristiche della controparte biologica, nei cosiddetti *ballbot*⁵ (figura 5.6).

Un'ultima categoria è costituita da tutti quei pendoli che utilizzano un volano posto in rotazione da un motore, per generare una coppia di reazione nel punto di rotazione.

⁵I *ballbot* sono robot mobili in grado di bilanciarsi per mezzo di una palla su di un unico punto di contatto e muoversi così nello spazio.

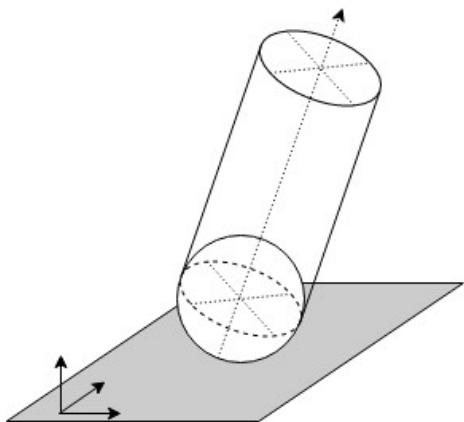


Figura 5.6



Figura 5.7: Cubli: pendolo inverso triassiale

5.2.2 Pendoli inversi con volano

In questo capitolo ci concentreremo in particolar modo proprio su quest'ultima tipologia di pendoli inversi poiché si tratta del caso specifico del progetto assegnato. La tipologia a ruota di reazione o inerziale⁶ presenta anch'essa numerose varianti che spaziano dai casi più semplici a sistemi in grado di orientarsi nelle tre dimensioni [6]⁷. In generale i sistemi che sfruttano l'effetto di una ruota inerziale.

Svolgendo una breve ricerca tra la letteratura, riguardo al tema del pendolo inverso con volano, ci si può ben presto rendere conto di come questo argomento venga largamente affrontato. È possibile trovare articoli che trattano il controllo sia di sistemi linearizzati[7] che di sistemi non lineari [8]. Di particolare interesse per questo progetto è sicuramente la metodologia di progettazione del pendolo inverso utilizzata dall'istituto tecnologico di Buenos Aires[9] dove allo scopo di realizzare un'ottimizzazione del pendolo hanno sfruttato le simulazioni per come la variazione dei parametri dimensionali del braccio del pendolo e del volano. Questo approccio potrebbe risultare in parte applicabile allo sviluppo della progettazione meccanica di questo progetto.

⁶In inglese *Reaction Wheel* o abbreviato come RW

⁷Un esempio di pendolo inverso nello spazio che sfrutta l'approccio RW è il sistema *Cubli* sviluppato al Politecnico Federale di Zurigo.

Capitolo 6

Progettazione meccanica

Prima di poter iniziare a sviluppare nei dettagli la modellazione matematica del sistema (la trattazione di questa fase è svolta nel capitolo 7 a pagina 53) ed il controllore è necessario procedere alla fase di progettazione meccanica del sistema. A questo scopo la progettazione è stata suddivisa in cinque fasi di lavoro:

1. Definizione delle specifiche tecniche;
2. Identificazione delle funzioni e delle sottofunzioni;
3. Identificazione e valutazione delle varianti;
4. Predimensionamenti, progettazione meccanica e verifica delle varianti scelte;
5. Realizzazione.

6.1 Specifiche tecniche

6.1.1 Requisisti di progetto

Discutendo con il committente del progetto sono stati definiti gli *End User Requirements*¹ distinguendoli in due categorie:

1. Primari
2. Secondari

Per quanto riguarda gli EUR primari sono stati identificati i seguenti aspetti:

- I. Il pendolo deve poter essere controllato affinché si stabilizzi nella posizione di equilibrio stabile;

¹da ora in avanti EUR

- II. Il pendolo deve poter essere controllato affinché si stabilizzi nelle posizioni di equilibrio instabile;
- III. Il *design* meccanico deve essere sviluppato tenendo in considerazioni anche caratteri di tipo estetico;
- IV. Gli ingombri massimi devono essere tali da permettere l'inserimento del pendolo all'interno delle vetrine di esposizione della ditta **Faulhaber Minimotor SA**;
- V. Il pendolo deve essere sviluppato tenendo in considerazione un suo utilizzo in una configurazione bilanciata;

Per quanto riguarda gli EUR secondari sono stati identificati i seguenti aspetti:

- VI. Il pendolo deve poter essere controllato affinché si riesca a compiere la cosiddetta fase di *swing-up*;
- VII. Il pendolo bilanciato deve poter essere controllato affinché possa stabilizzarsi in una qualunque posizione angolare.

È stato inoltre posto come vincolo di utilizzare come principale materiale per la realizzazione del pendolo l'alluminio in quanto è possibile realizzare una colorazione dei componenti tramite anodizzazione.

6.1.2 Funzioni e sotto funzioni

Analizzando il sistema ed i requisiti sono state identificate le seguenti funzioni e sotto funzioni:

- Supporto del pendolo, struttura (telaio);
- Rotazione del pendolo;
 - Supporto dell'albero (cuscinetti volventi);
 - Accoppiamento albero-pendolo;
 - Passaggio dei cavi di alimentazione e controllo del motore;
- Rotazione del volano;
 - Accoppiamento volano-motore;
 - Accoppiamento blocco volano-motore e pendolo;
- Sensori;
 - Posizionamento e supporto dell'*encoder*;

- Accoppiamento pendolo-*encoder*;
- Alimentazione e trasferimento dati dell’*encoder*;
- Gestione dell’elettronica;
 - Posizionamento dell’elettronica di controllo;
 - Alimentazione dell’elettronica di controllo;
 - Raffreddamento dell’elettronica di controllo (esclusivamente se in fase di test se ne rileva la necessità);
 - Messa a terra;
 - Protezione dell’elettronica.

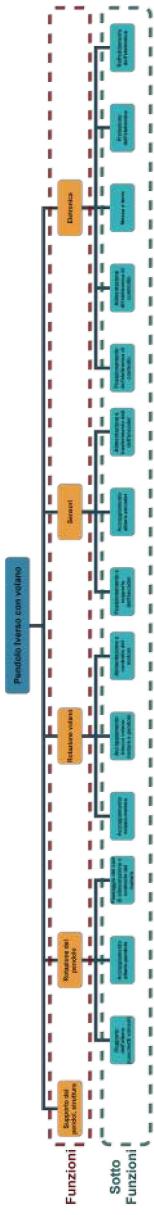


Figura 6.1: Diagramma delle funzioni

Tabella 6.1: **Ingombri**

Altezza (mm)	Larghezza (mm)	Profondità (mm)
300	300	300

6.1.3 Caratteristiche meccaniche

6.1.3.1 Ingombri

Come definito dagli EUR gli ingombri sono dettati dalle dimensioni delle vetrine di esposizione utilizzate dalla ditta Faulhaber Minimotor SA.

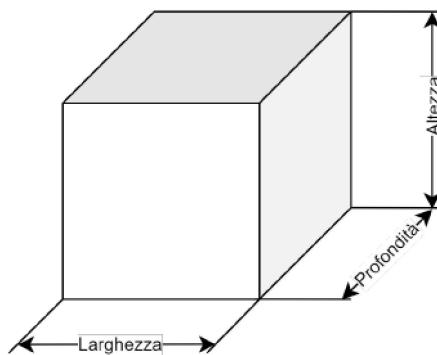


Figura 6.2: Schema del volume di ingombro massimo ammesso.

6.1.3.2 Motore

Il motore utilizzato per questo progetto è fornito dalla ditta Fauhlaber e si tratta di un servomotore *brushless* a corrente continua della serie **Falt servomotor BLDC 42221 024 BXT H** in grado di erogare una coppia nominale di 112 mN m con una potenza di 100 W.



Figura 6.3: Motore BLDC

Tabella 6.2: Serie 4221 024 BXT H - Dati tecnici

Voltaggio nominale	U_n	24	V
Coppia nominale	M_n	112	mN m
Corrente nominale	I_n	2,87	A
Velocità nominale	n_n	4'380	min ⁻¹
Pendenza nominale della curva n-M	$\frac{\Delta n}{\Delta M}$	14,8	min ⁻¹ mN ⁻¹ m
Resistenza terminale, fase-fase	R	0,76	Ω
Induttanza terminale, fase-fase	L	664	μH
Efficienza, max.	η_{max}	87	%
Corrente a vuoto	I_0	0,139	A
Velocità a vuoto	n_0	6'040	min ⁻¹
Velocità massima	n_{max}	10'000	min ⁻¹
Coppia all'avviamento ²	M_A	1'220	mN m
Accelerazione angolare	α_{max}	177	mrad ² s ⁻¹
Costante di velocità	k_n	253	min ⁻¹ V ⁻¹
Costante di tempo	τ_s	3,59	ms
Pendenza curva n-M	$\frac{\Delta n}{\Delta M}$	4,97	min ⁻¹ mN ⁻¹
Diametro nominale dell'albero		5	mm
Carico radiale ³ massimo a 3000 min ⁻¹		25	N
Carico assiale massimo a 3000 min ⁻¹		4	N
Gioco radiale	≤	0,015	mm
Gioco assiale	=	0	mm
Diametro esterno nominale		42	mm
Spessore		22	mm
Massa		142	g

Tabella 6.3: Serie BDK 16.05A1000-5-5 - Dati tecnici

Tensione di alimentazione	U_n	5 ± 10 %	V ⁴
Corrente nominale	I	60	mA
Impulsi per rivoluzione	max.	1'000	
Modalità di trasduzione		ottica	
Frequenza del segnale	≤	100	kHz
Velocità di rotazione	max.	12'000	min ⁻¹
Coppia di carico		1,4	mN m
Diametro flangia		30	mm
Diametro albero		5	mm
Carico radiale	max.	10	N
Carico assiale	max.	10	N
Massa	≈	85	g

6.1.3.3 Encoder incrementale

Allo scopo di conoscere la posizione angolare del pendolo si è deciso di utilizzare un encoder rotativo accoppiato con l'albero del pendolo. Il sensore utilizzato è un encoder rotativo incrementale **BDK 16.05°1000-5-5** prodotto dalla ditta Baumer Elettric.



Figura 6.4: Encoder ottico incrementale

6.1.3.4 Pendolo

Con il termine pendolo in questo capitolo ci si riferirà esclusivamente al braccio che collega l'albero di rotazione accoppiato all'encoder e il blocco motore-volano. Facendo riferimento ai EUR il pendolo deve soddisfare i requisiti meccanici di rigidezza e resistenza meccanica tali da permettere il corretto funzionamento del dispositivo. Inoltre è importante tenere conto dei requisiti estetici richiesti dai EUR.

²All'interno di questo documento i termini **coppia all'avviamento** e **coppia di spunto** sono da considerarsi come sinonimi.

³5 mm di distanza dalla flangia

6.1.3.5 Volano

Con il termine volano in questo capitolo ci si riferirà esclusivamente alla ruota inerziale⁵. In riferimento alle specifiche del motore è necessario dimensionare la ruota in maniera tale da massimizzare il momento di inerzia (e quindi la coppia di reazione generata sull'albero del pendolo) minimizzando tuttavia la massa.

6.1.4 Allineamento e centraggio degli assi

Al fine di garantire il corretto funzionamento del dispositivo è necessario considerare eventuali errori di allineamento dovuti alle lavorazioni e all'assemblaggio, prevenendo delle soluzioni che non risultino pertanto suscettibili a questi. È necessario pertanto prestare particolare attenzione all'accoppiamento tra albero del pendolo e encoder e all'accoppiamento tra motore e volano.

6.1.5 Elementi rotativi e attriti

Allo scopo di ridurre gli attriti e le fonti di dissipazione dell'energia è necessario prevedere delle soluzioni che tengano conto di questi aspetti. In particolare è necessario prevedere l'utilizzo di cuscinetti volventi per l'albero del pendolo e il volano.

6.2 Caisse Morfologique

La *caisse morphologique* è una metodologia di scelta ed analisi della varianti meccaniche utilizzata per determinare la combinazione di soluzioni che meglio svolgono l'insieme delle funzioni.

6.2.1 Funzione di supporto del pendolo

La funzione di supporto del pendolo determina la posizione relativa dei carichi sull'albero rispetto ai cuscinetti di supporto. Queste varianti vengono valutate secondo i seguenti criteri:

- **Rigidezza:** con questo criterio si valuta la rigidezza complessiva considerando sia il posizionamento degli appoggi sull'albero che il telaio. Una struttura rigida comporterebbe una minor suscettibilità del sistema alle continue variazioni di coppia necessari al controllo, pertanto la valutazione di questo criterio premierà soluzioni maggiormente rigide.;
- **Stabilità:** con questo criterio si valuta soprattutto la stabilità del telaio rispetto alle variazioni di carico dovuti al movimento del pendolo. Strutture più stabili comportano un minor errore sul controllo e saranno pertanto valutate meglio di soluzioni più instabili.;

⁵All'interno di questo documento i termini **ruota inerziale** e **reaction wheel** o **RW** sono da considerarsi come sinonimi

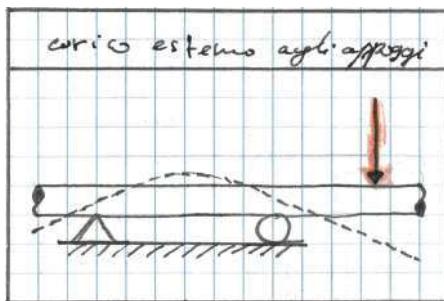


Figura 6.5: Variante 1 - Carico esterno agli appoggi

- **Intralcio della traiettoria:** questo criterio ha lo scopo di valutare l'intralcio alla traiettoria del pendolo dati dalla struttura del telaio. Strutture che tendono, o rischiano, di intralciare il percorso del pendolo risultano sicuramente meno soddisfacenti e pertanto verranno penalizzate dalla valutazione.;
- **Ostacolo visivo:** data la volontà di utilizzare questa costruzione meccanica come dimostratore si è reso necessario valutare l'impatto visivo del telaio. In particolare questo criterio ha lo scopo di valutare l'ostacolo all'osservatore generato dalle varianti, si premieranno dunque le soluzioni meno invasive.;
- **Allineamento dei supporti:** questo criterio intende valutare l'impatto della variante sulla precisione di allineamento dei supporti. Poiché nel caso di un mancato allineamento si introdurrebbero degli sforzi supplementari nell'albero che potrebbero compromettere il corretto funzionamento del sistema, si valuteranno con punteggi migliori quelle varianti che garantiscono migliori allineamenti al montaggio.

6.2.1.1 Variante 1 - Carico posto esternamente agli appoggi

La prima variante per il posizionamento del carico prevede di porlo esternamente agli appoggi dell'albero (cuscinetti volventi), questo comporta una maggiore sollecitazione in flessione dell'albero e un maggiore carico radiale dell'appoggio posto a maggiore distanza dal carico. Tuttavia questa variante presenta il vantaggio di limitare gli errori di allineamento dei supporti in quanto questi possono essere posti su di un medesimo supporto.

6.2.1.2 Variante 2 - Carico posto internamente agli appoggi

La seconda variante per il posizionamento del carico prevede di porlo internamente agli appoggi dell'albero, questo comporta una migliore ripartizione del carico assiale su entrambi i supporti (in special modo qualora il carico fosse posto in corrispondenza della mezzeria dell'interasse tra i supporti). Malgrado i vantaggi dal punto di vista della statica questa soluzione presenta alcuni svantaggi, in particolare per quello che riguarda l'allineamento dei supporti. Inoltre una soluzione di questo tipo prevederebbe un telaio simile a quello

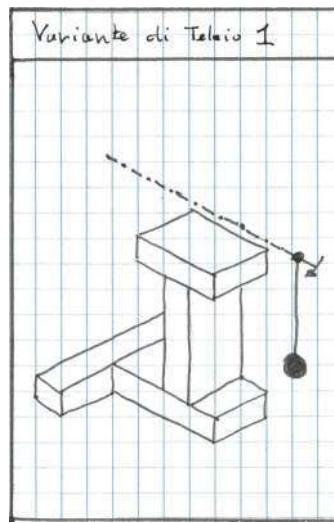


Figura 6.6: Variante 1 - Telaio con carico posto esternamente agli appoggi.

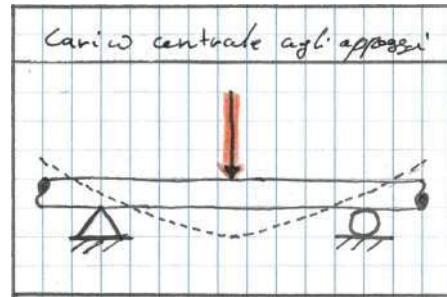


Figura 6.7: Variante 2 - Carico interno agli appoggi

riportato nella figura 6.8 che presenta in maggiori ostacoli visivi e alla traiettoria del pendolo rispetto alla variante di telaio riportato in figura 6.6 utilizzato dalla prima variante.

6.2.1.3 Valutazione tecnica

La valutazione tecnica dettagliata di queste varianti può essere trovata al capitolo A nella tabella A.1. Considerando i criteri selezionati si è elaborata una valutazione delle varianti, calcolando i punteggi, e confrontandoli con il punteggio massimo raggiungibile, si sono ottenuti i seguenti risultati:

- **Variante 1**, carico posto esternamente agli appoggi: 0,775;
- **Variante 2**, carico posto internamente agli appoggi: 0,675.

Possiamo dunque notare che la variante che prevede di porre il carico esternamente agli appoggi ha totalizzato una valutazione maggiore della seconda variante, si sceglie pertanto questa soluzione.

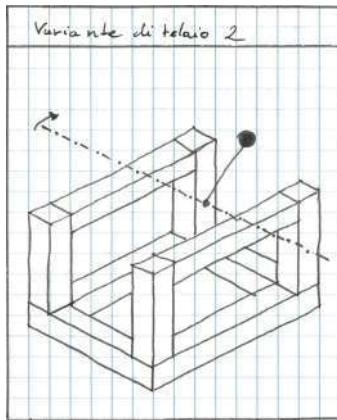


Figura 6.8: Variante 2 - Telaio con carico posto internamente agli appoggi

6.2.2 Funzione di supporto dell'albero del pendolo

La funzione di supporto dell'albero del pendolo serve a garantire dei supporti dell'albero capaci di ridurre l'attrito volvente e quindi le fonti di dissipazione di energia. Questa funzione deve inoltre garantire la tenuta dei carichi radiali e assiali derivati dalle forze di reazione ai carichi applicati all'albero. Allo scopo di valutare le varianti sono stati identificati i seguenti criteri:

- **Ingombro radiale:** il criterio di ingombro radiale serve a valutare la compattezza delle varianti allo scopo di limitare gli ingombri generali della soluzione finale. Sono pertanto da favorire le varianti con ingombri radiali inferiori.
- **Attrito:** poiché l'attrito risulta essere la principale fonte di dissipazione energetica all'interno del sistema, è fondamentale ridurla il più possibile. In tal senso questo criterio di valutazione ha lo scopo di premiare le varianti in grado di ridurre l'attrito dato dalla rotazione dell'albero del pendolo.
- **Costo:** questo criterio risulta utile allo scopo di valutare l'impatto sul *budget* delle varianti premiando quelle più economiche.
- **Facilità di montaggio:** questo criterio serve a valutare la facilità di montaggio ed implementazione delle varanti allo scopo di evitare costruzioni meccaniche esageratamente complicate. Le varianti più pratiche per il montaggio verranno dunque valutate con punteggi più alti.
- **Tenuta assiale:** malgrado i carichi assiali risultino teoricamente nulli a causa di fenomeni dinamici quali le continue correzioni apportate dal controllore e le possibili vibrazioni che queste potrebbero causare risulta necessario garantire una, seppur minima, capacità di sopportare dei carichi assiali.

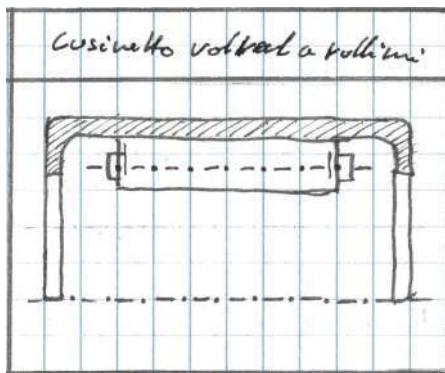


Figura 6.9: Variante 1 - Cuscinetti a rullini

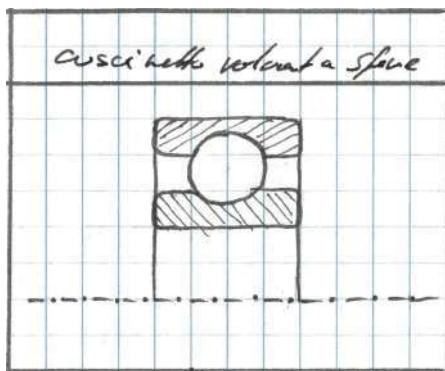


Figura 6.10: Variante 2- cuscinetti radiali ad una corona di sfere

6.2.2.1 Variante 1 - Cuscinetto a rullini

I cuscinetti a rullini sono una tipologia di cuscinetti volventi caratterizzati dall'utilizzo di rulli cilindrici con un rapporto diametro-lunghezza particolarmente ridotto. Vengono generalmente utilizzati in applicazioni che richiedono un ridotto ingombro radiale ma con elevate capacità di carico, soffrono tuttavia carichi assiali anche di ridotte intensità.

6.2.2.2 Cuscinetti radiali a sfere

I cuscinetti radiali ad una corona di sfere sono dei componenti meccanici comunemente utilizzati per ridurre gli attriti tra parti rotanti e parti ferme. Questo genere di cuscinetti è fondamentalmente ideato per sopportare carichi radiali, ma possono essere utilizzati anche per sopportare ridotti carichi assiali.

6.2.2.3 Valutazione tecnica

La valutazione tecnica dettagliata di queste varianti può essere trovata al capitolo A nella tabella A.2. Considerando i criteri selezionati si è elaborata una valutazione delle varian-

ti, calcolando i punteggi, e confrontandoli con il punteggio massimo raggiungibile, si sono ottenuti i seguenti risultati:

- **Variante 1**, cuscinetti a rullini: 0,529;
- **Variante 2**, cuscinetti a sfere: 0,618.

Possiamo dunque notare che la variante che prevede l'utilizzo di cuscinetti a sfere ha totalizzato una valutazione maggiore della prima variante, si sceglie pertanto questa soluzione.

6.2.3 Funzione di passaggio dei cavi di alimentazione e controllo del motore

Permettendo il passaggio dei cavi lungo l'albero del pendolo e utilizzando un collettore rotante è possibile realizzare un collegamento elettrico tra una parte fissa (la centralina di controllo del motore) ed una parte mobile (il motore) che permetta al pendolo di ruotare liberamente. I **collettori rotanti** (o *slip ring*) possono essere differenziati per la tecnologia utilizzata per la trasmissione del segnale elettrico, le principali tipologie che si possono identificare sono:

- Collettori rotanti a blocchetti conduttori;
- Collettori rotanti a metalli liquidi;
- Collettori rotanti a spazzole;
- Collettori rotanti *wireless* o *contactless*.

Le prestazioni e la capacità di trasmissione della corrente evidentemente variano da una tecnologia all'altra. Per il tipo di utilizzi previsti in questa costruzione non vi sono esigenze tali da scartare a una tecnologia. Tuttavia possiamo, considerando i costi, ipotizzare l'utilizzo di un collettore a blocchetti conduttori o a spazzole.

Per permettere il corretto funzionamento del collettore rotante è comunque necessario identificare un efficace metodo per permettere i passaggio dei cavi lungo l'albero del pendolo, per valutare queste soluzioni sono pertanto stati identificati i seguenti criteri:

- **Costo**: il costo di realizzazione dei passaggi per i cavi viene considerato premiando le soluzioni più economiche.
- **Fabbricabilità**: il criterio di fabbricabilità risulta necessario per selezionare la variante meno problematica da realizzare in fase di fabbricazione.
- **Sicurezza dei cavi**: al fine di evitare eventuali danni ai cavi, che potrebbero rendere problematico il controllo del sistema, è necessario valutare le varianti anche in base alla sicurezza che offrono ai cavi.

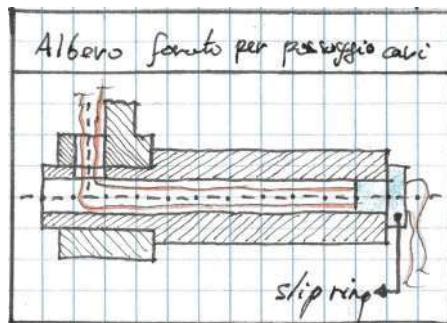


Figura 6.11: Variante 1 - Albero con passaggio centrale

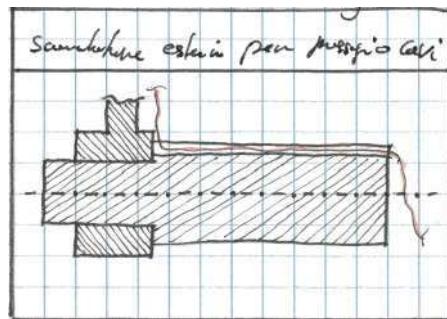


Figura 6.12: Variante 2 - Albero con scanalatura esterna

- **Ingombro ed inerzia:** con questo criterio si intende valutare l'impatto delle varianti sul *design* generale del albero del pendolo. Valutando questo criterio si considererà vantaggiosa una variante che limiti l'effetto sull'inerzia e l'ingombro dell'albero.

6.2.3.1 Variante 1 - Albero con passaggio centrale

Questa variante prevede di realizzare un foro passante per il centro dell'albero del pendolo allo scopo di permettere il passaggio dei cavi al suo interno. La realizzazione di questo passaggio può essere realizzata per la più parte direttamente durante la tornitura dell'albero e prevede solamente un ulteriore foro realizzato radialmente per permettere l'uscita dei cavi.

6.2.3.2 Variante 2 - Albero con scanalatura esterna

Questa variante prevede di realizzare una scanalatura esterna sull'albero per permettere il passaggio dei cavi. Sebbene questa variante permetta una maggiore facilità nel posizionamento dei cavi comporterebbe anche una maggiore esposizione degli stessi ad eventuali danni.

6.2.3.3 Valutazione tecnica

La valutazione tecnica dettagliata di queste varianti può essere trovata al capitolo A nella tabella A.3. Considerando i criteri selezionati si è elaborata una valutazione delle varian-

ti, calcolando i punteggi, e confrontandoli con il punteggio massimo raggiungibile, si sono ottenuti i seguenti risultati:

- **Variante 1**, albero con passaggio centrale: 0,833;
- **Variante 2**, albero con scanalatura esterna: 0,438.

Possiamo dunque notare che la variante che prevede realizzazione di un passaggio centrale ha totalizzato una valutazione maggiore della seconda variante, si sceglie pertanto questa soluzione.

6.2.4 Funzione di accoppiamento tra albero e pendolo

La funzione di accoppiamento tra albero e pendolo permette di realizzare una costruzione meccanica più facilmente realizzabile e assemblabile, evitando di dover fabbricare un braccio del pendolo che integrasse direttamente l'albero di rotazione del pendolo. La realizzazione di due componenti (l'albero ed il braccio del pendolo) permette di semplificare la fabbricazione ma richiede di trasmettere la coppia di reazione, generata dal volano sul pendolo, dal pendolo all'albero. Per valutare questa funzione sono stati identificati i seguenti criteri:

- **Fabbricabilità**: l'accoppiamento deve essere realizzabile in entrambe le parti, si valuterà dunque la difficoltà di fabbricazione di entrambi i componenti dell'accoppiamento e si premieranno el varianti che pongono meno problematiche per quanto riguarda le lavorazioni meccaniche.
- **Resistenza**: l'accoppiamento, sebbene non venga sottoposto a coppie di particolare intensità, deve comunque garantire sia il trasferimento di coppia dal pendolo all'albero, sia la resistenza meccanica a tali coppie.
- **Assemblabilità**: l'accoppiamento non deve essere solamente realizzabile e resistente ma è necessario anche poter assemblare tra loro i vari componenti senza intralciarne l'assemblaggio di parti non comprese nell'accoppiamento. Verranno pertanto penalizzate quelle varianti che renderebbero il montaggio difficoltoso.
- **Assenza di gioco (precisione)**: l'accoppiamento deve essere, considerando i limiti di realizzazione, il più preciso possibile al fine di limitare il gioco tra albero e pendolo che porterebbe ad un errore della misura di posizione angolare. Questo errore di misura influenzerebbe a sua volta le prestazioni del controllore, che non potrebbe affidarsi ad una misurazione precisa e, nel peggiore dei casi, consistente nel tempo.
- **Simmetricità**: data la richiesta di prevedere la possibilità di applicare al pendolo un contrappeso è necessario valutare le varianti considerando una condizione di carico

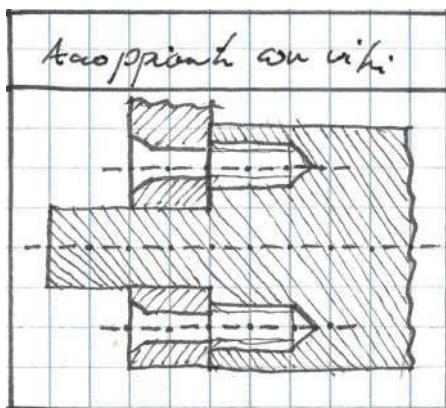


Figura 6.13: Variante 1 - Accoppiamento con viti

simmetrica e soprattutto considerare se a realizzazione possa impedire in qualche modo il montaggio del contrappeso.

6.2.4.1 Variante 1 - Accoppiamento con viti

L'accoppiamento tramite viti può essere considerato di facile esecuzione in quanto prevede la realizzazione di una serie di fori di passaggio posti sul pendolo ed una serie di fori filettati corrispondente ai precedenti posti sull'albero. Questa variante garantisce inoltre una buona simmetria in quanto permette di posizionare le viti in maniera tale da garantire la tenuta in tutte le condizioni di carico.

6.2.4.2 Variante 2 - Accoppiamento con serraggio e mozzo in due parti

L'accoppiamento per serraggio per mezzo di un mozzo in due parti garantisce un'ottima assemblabilità del sistema. Anche per quanto riguarda la simmetria è possibile realizzare un contrappeso che funzioni tramite questa tipologia di accoppiamento, tuttavia questo accoppiamento risulta problematico per quanto riguarda la precisione in quanto non permette un posizionamento tra albero e pendolo ripetibile.

6.2.4.3 Variante 3 - Accoppiamento con coppia conica e vite

L'accoppiamento con coppia conica sfrutta la forza di attrito tra le due superfici generata dalla forza assiale di una vite, o una ghiera. Questo permette di realizzare accoppiamenti che presentino una buona precisione, seppur anche in questo caso per quanto riguarda il posizionamento angolare non ripetibili, tuttavia il vincolo dell'utilizzo della vite renderebbe più complesso l'assemblaggio del sistema.

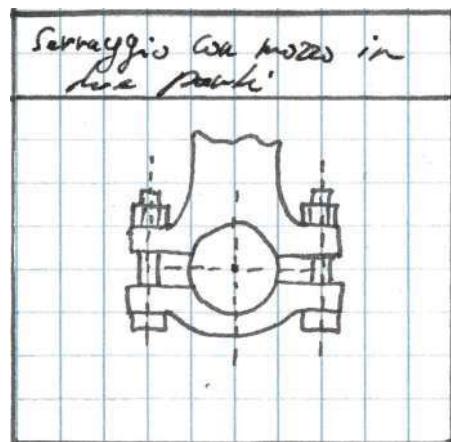


Figura 6.14: Variante 2 - Accoppiamento con serraggio e mozzo in due parti

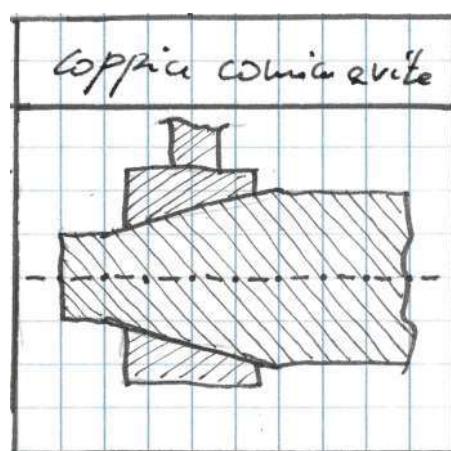


Figura 6.15: Variante 3 - Accoppiamento con coppia conica e vite

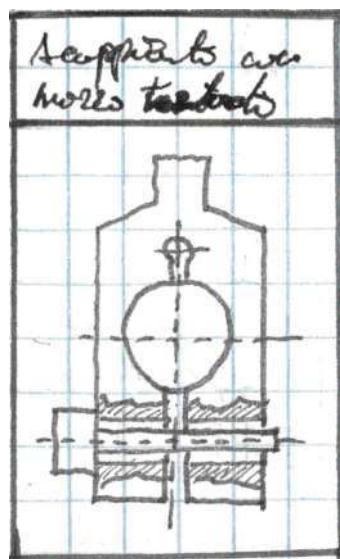


Figura 6.16: Variante 4 - Accoppiamento con serraggio e mozzo tagliato

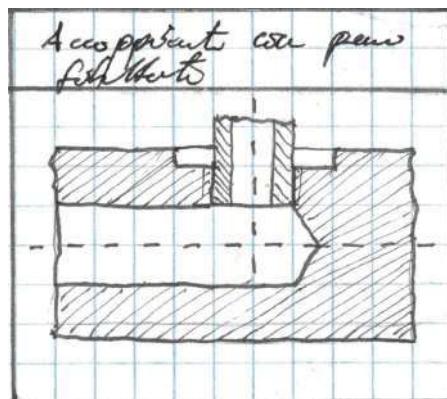


Figura 6.17: Variante 5 - Accoppiamento con perno filettato

6.2.4.4 Variante 4 - Accoppiamento con serraggio e mozzo tagliato

Simile per funzionamento alla variante 2 il mozzo tagliato propone un vantaggio sulla realizzazione del componente, tuttavia questa soluzione pone diversi problemi per quello che riguarda il criterio di simmetria in quanto è per sua stessa natura asimmetrico.

6.2.4.5 Variante 5 - Accoppiamento con perno filettato

Questo accoppiamento di semplice realizzazione prevede l'utilizzo di un asta filettata che viene inserita in un foro filettato nell'albero, questo permette di realizzare un accoppiamento relativamente semplice in grado di trasmettere la coppia di reazione,. Tuttavia questa soluzione potrebbe soffrire di problemi legati alla resistenza del collegamento oltre che a diversi problemi di precisione. La maggiore problematica si trova comunque nell'ambito del contrappeso che richiederebbe di realizzare un ulteriore foro nell'albero.

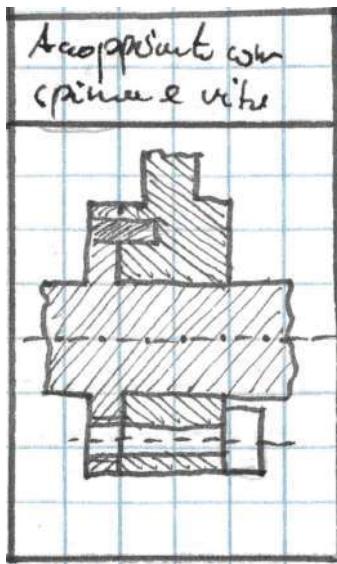


Figura 6.18: Variante 6 - Accoppiamento con vite e spina

6.2.4.6 Variante 6 - Accoppiamento con vite e spina

Questa variante risulta fondamentalmente una variazione della prima variante dove si sostituiscono alcune viti con spine con l'intento di evitare la filettatura di tutti i fori dell'albero. Sebbene presenti più o meno i vantaggi della prima variante non presenta rilevanti vantaggi rispetto alla stessa, anzi, questa variante, potrebbe risultare più suscettibile alla condizione di carico simmetrico.

6.2.4.7 Valutazione tecnica

La valutazione tecnica dettagliata di queste varianti può essere trovata al capitolo A nelle tabelle A.4, A.5 e A.6. Considerando i criteri selezionati si è elaborata una valutazione delle varianti, calcolando i punteggi, e confrontandoli con il punteggio massimo raggiungibile, si sono ottenuti i seguenti risultati:

- **Variante 1**, accoppiamento con viti: 0,794;
- **Variante 2**, accoppiamento con serraggio e mozzo in due parti: 0,603;
- **Variante 2**, accoppiamento con coppia conica e vite: 0,603;
- **Variante 2**, accoppiamento con serraggio e mozzo tagliato: 0,426;
- **Variante 2**, accoppiamento con perno filettato: 0,544;
- **Variante 2**, accoppiamento con vite e spina: 0,779.

Possiamo dunque notare che la variante che prevede l'utilizzo delle viti ha totalizzato una valutazione maggiore delle altre varianti, si sceglie pertanto questa soluzione.

6.2.5 Funzione di accoppiamento tra albero del volano e motore

Questa funzione ha lo scopo di analizzare l'accoppiamento tra il motore e l'albero del volano. In particolare si vuole realizzare un'analisi preliminare che tenga in considerazione due varianti generiche:

- Accoppiamento mediante giunto elastico;
- Accoppiamento senza l'utilizzo di un giunto elastico

Questa analisi primaria viene svolta principalmente allo scopo di verificare se la realizzazione senza l'utilizzo di un giunto elastico torsionalmente rigido possa presentare maggiori vantaggi di un assemblaggio che utilizzi un giunto. A questo scopo sono stati identificati i seguenti criteri di valutazione:

- **Fabbricabilità:** questo criterio ha lo scopo di valutare quale variante risulti meno difficoltosa da realizzare.
- **Resistenza:** il criterio di resistenza risulta relativamente poco importante in quanto si ipotizza che le varianti di accoppiamento che verranno eventualmente analizzate in seguito risultino ragionevolmente dimensionate allo scopo di resistere alla coppia erogata dal motore. Si vuole tuttavia elaborare una valutazione in tal senso per confrontare le due varianti preliminari.
- **Suscettibilità agli errori:** con questo criterio si ha l'intenzione di analizzare quanto una variante risenta di eventuali errori di posizionamento causati da tolleranze dimensionali e di forma. In tal senso è fondamentale prestare attenzione ai carichi massimi ammissibili dai vari componenti e agli effetti delle tolleranze su questi. Per quanto riguarda la valutazione un eventuale variante che risulti sensibile agli errori dati dalle tolleranze sarà valutata con una nota inferiore.
- **Allineamento:** questo criterio ha lo scopo di valutare la difficoltà di realizzazione dell'allineamento tra gli assi di rotazione di entrambi gli alberi.
- **Assemblabilità:** il criterio di assemblabilità ha lo scopo di valutare come le due varianti potrebbero semplificare, o complicare, il montaggio dei componenti coinvolti nell'accoppiamento.

In seguito ai risultati di questa prima analisi si valuteranno, se risultasse necessario, ulteriori varianti di accoppiamento che tengano conto delle considerazioni elaborate con queste varianti.

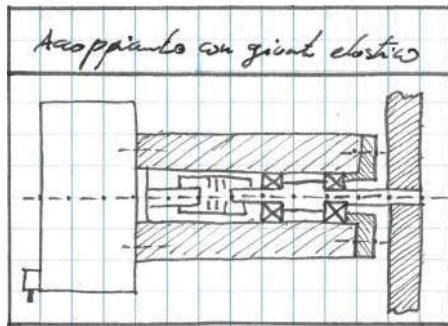


Figura 6.19: Variante 1 - Esempio di accoppiamento mediante giunto elastico

6.2.5.1 Variante 1 - Accoppiamento mediante giunto elastico

I giunti elastici torsionalmente rigidi sono dei componenti comunemente utilizzati nelle costruzioni meccaniche allo scopo di limitare le sollecitazioni generate dal disallineamento tra albero condotto ed albero conduttore. È possibile trovare una larga serie di prodotti commerciali in grado di coprire una ampia offerta di dimensioni, coppie trasmesse e campi di applicazione, in questa prima analisi non è fondamentale tenere già in considerazione tutte queste caratteristiche in quanto si vuole esclusivamente valutare i vantaggi offerti dall'utilizzo di questi componenti. Generalmente i giunti elastici vengono montati sugli alberi per mezzo di accoppiamenti per serraggio che sfruttano una vite ed un intaglio o due viti, per quanto riguarda le considerazioni riguardanti l'assemblabilità e la fabbricabilità si considereranno pertanto queste tipologie di giunti.

6.2.5.2 Variante 2 - Accoppiamento senza giunto elastico torsionalmente rigido

La possibilità di realizzare questo accoppiamento senta l'utilizzo di un giunto elastico presenta alcuni vantaggi, primo fra tutti si eviterebbe di introdurre nella catena di trasmissione della coppia tra motore e volano un ulteriore elemento che porterebbe la costruzione meccanica ad avere un maggiore ingombro, e di conseguenza una maggiore inerzia. Inoltre evitando di utilizzare un giunto, si potrebbe rendere il montaggio del motore meno complesso che rispetto alla prima variante. Questi vantaggi risultano tuttavia al costo di una maggiore suscettibilità del sistema, ad eventuali errori di posizionamento che richiederebbero dunque tolleranze più strette al fine di non costituire un intralcio al corretto funzionamento del pendolo.

6.2.5.3 Valutazione tecnica

La valutazione tecnica dettagliata di queste varianti può essere trovata al capitolo A nella tabella A.8. Considerando i criteri selezionati si è elaborata una valutazione delle varianti, calcolando i punteggi, e confrontandoli con il punteggio massimo raggiungibile, si sono ottenuti i seguenti risultati:

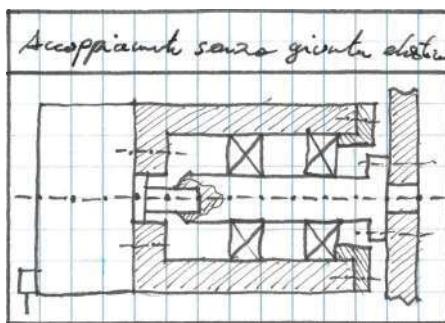


Figura 6.20: Variante 2 - Esempio di accoppiamento senza giunto elastico

- **Variante 1**, accoppiamento mediante giunto elastico torsionalmente rigido: 0,817;
- **Variante 2**, accoppiamento senza giunto elastico torsionalmente rigido: 0,567;

Possiamo dunque notare che la variante che prevede l'utilizzo di un giunto elastico torsionalmente rigido ha totalizzato una valutazione maggiore della seconda variante, si sceglie pertanto questa soluzione. Confrontando i giunti elastici in commercio si è scelto di utilizzare un giunto a soffietto che garantisce un range operazionale relativamente ampio rispetto alla coppia trasmessa e all'ingombro del componente.

6.2.6 Funzione di accoppiamento tra albero e volano

Questa funzione ha lo scopo di trasmettere la coppia dall'albero al volano così da generare una coppia di reazione sull'albero del pendolo e permettere la stabilizzazione del sistema. I criteri identificati per la valutazione delle varianti per questa funzione sono i seguenti:

- **Fabbricabilità**: il criterio di fabbricabilità non serve esclusivamente a valutare se una variante può essere realizzata, ma soprattutto a valutare le difficoltà riscontrabili nella realizzazione delle varianti. Si prediligono pertanto quelle varianti che per il loro corretto funzionamento, non richiedono particolari lavorazioni.
- **Resistenza**: sebbene la coppia da trasmettere risulti ridotta è necessario che l'accoppiamento possa trasmetterla senza inficiare la resistenza dei componenti coinvolti nell'accoppiamento. Soluzioni che presenteranno eventuali criticità per quanto riguarda la resistenza verranno dunque penalizzate dalla valutazione tecnica.
- **Assemblabilità**: questo criterio ha la funzione di valutare come le varianti possano influenzare l'assemblaggio del sistema. La valutazione premierà quelle varianti che risultano essere più facili da assemblare in fase di montaggio.
- **Assenza di gioco (precisione)**: questo accoppiamento, allo scopo di garantire un corretto trasferimento di coppia, deve essere realizzato in maniera da limitare eventuali giochi tra albero e volano poiché questi potrebbero comportare un ritardo nella

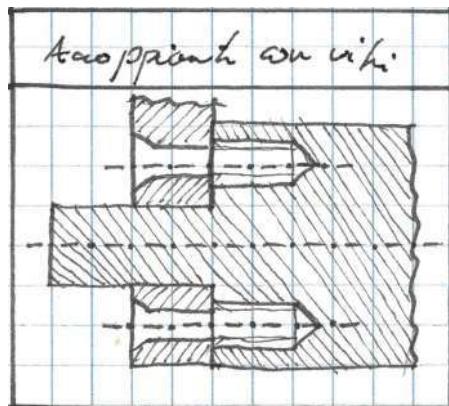


Figura 6.21: Variante 1 - Accoppiamento con vite

risposta del sistema ai segnali di input, che renderebbero difficoltoso il controllo del sistema. Le varianti che possono garantire il minor gioco saranno dunque valutate con punteggi più alti.

- **Simmetricità:** sebbene il controllo non preveda una rotazione continua del volano è ipotizzabile che per ragioni di inerzia si instauri una condizione per la quale la velocità del volano non scenda mai al disotto di un determinato valore di giri al minuto. Qualora si instauri questa condizione è necessario che l'accoppiamento garantisca una minima oscillazione del volano a causa della rotazione, in tal senso si può ipotizzare che accoppiamenti che presentino una notevole simmetria garantiscono una migliore tenuta.

6.2.6.1 Variante 1 - Accoppiamento con viti

L'accoppiamento tramite viti può essere considerato di facile esecuzione in quanto prevede la realizzazione di una serie di fori di passaggio posti sul pendolo ed una serie di fori filettati corrispondente ai precedenti posti sull'albero. Questa variante garantisce inoltre una buona simmetria in quanto permette di posizionare le viti in maniera tale da garantire la tenuta in tutte le condizioni di carico.

6.2.6.2 Variante 2 - Accoppiamento con vite e spina

Questa variante risulta fondamentalmente una variazione della prima variante dove si sostituiscono alcune viti con delle spine con l'intento di evitare la filettatura di tutti i fori dell'albero. Sebbene presenti più o meno i vantaggi della prima variante non presenta rilevanti vantaggi rispetto alla stessa, anzi, questa variante potrebbe risultare più suscettibile alla condizione di rotazione.

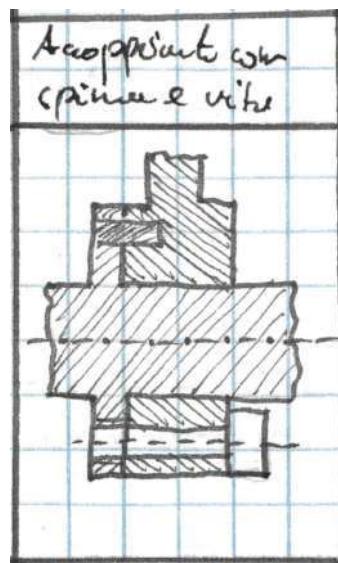


Figura 6.22: Variante 2 - Accoppiamento con vite e spina

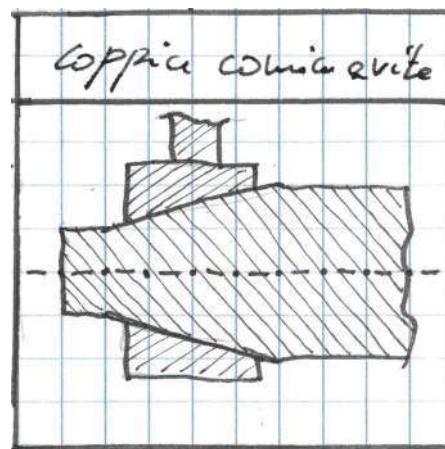


Figura 6.23: Variante 3 - Accoppiamento con coppia conica e vite

6.2.6.3 Variante 3 - Accoppiamento con coppia conica e vite

L'accoppiamento con coppia conica sfrutta la forza di attrito tra le due superfici generate dalla forza assiale di una vite, o una ghiera. Questo permette di realizzare un accoppiamento che presenti una buona precisione.

6.2.6.4 Variante 4 - Accoppiamento con inserto quadrato e vite

L'accoppiamento con inserto quadrato sfrutta la geometria dei due componenti per trasmettere la coppia dall'albero al volano, utilizzando una vite posta assialmente allo scopo di garantire il posizionamento del volano contro la battuta dell'albero. Questa tipologia di accoppiamento presenta buone prestazioni di robustezza, assemblabilità e simmetricità, tut-

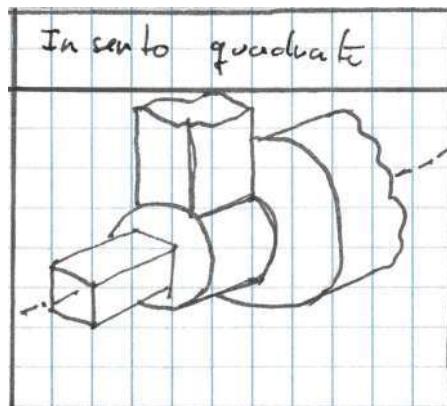


Figura 6.24: Variante 4 - Accoppiamento con inserto quadrato e vite

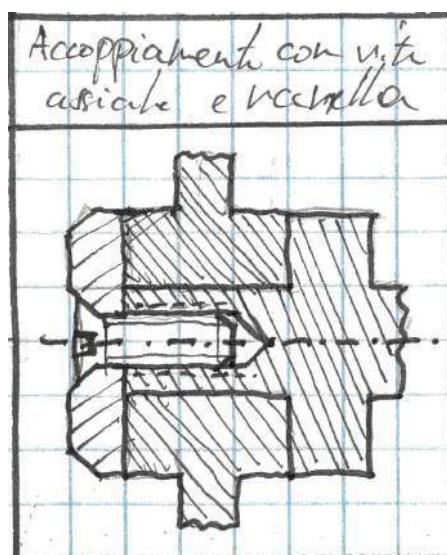


Figura 6.25: Variante 5 - Accoppiamento con vite assiale e ranella

tavia risulta poco soddisfacente per quanto che riguarda la realizzazione soprattutto del foro di forma quadrata necessario al coretto funzionamento dell'accoppiamento.

6.2.6.5 Variante 5 - Accoppiamento con vite assiale e ranella

L'accoppiamento con vite assiale e ranelle sfrutta la forza assiale generata dalla vite per garantire il posizionamento del volano contro la battuta dell'albero e generare una forza di attrito sufficiente all'albero per trascinare il volano. La realizzazione di questo accoppiamento è relativamente facile in quanto prevede di lavorare l'albero per ottenere una battuta sufficientemente precisa, un diametro di guida su cui viene inserito il volano ed un foro filettato per la vite.

6.2.6.6 Valutazione tecnica

La valutazione tecnica dettagliata di queste varianti può essere trovata al capitolo A nelle tabelle A.9 e A.10. Considerando i criteri selezionati. Si è elaborata una valutazione delle varianti, calcolando i punteggi, e confrontandoli con il punteggio massimo raggiungibile, si sono ottenuti i seguenti risultati:

- **Variante 1**, accoppiamento con viti: 0,750;
- **Variante 2**, accoppiamento con vite e spina: 0,779;
- **Variante 3**, accoppiamento con coppia conica e vite: 0,794;
- **Variante 4**, accoppiamento con inserto quadro e vite: 0,735;
- **Variante 5**, accoppiamento con vite assiale e ranella: 0,912.

Possiamo dunque notare che la variante che prevede l'utilizzo delle vite assiale e ranella ha totalizzato una valutazione maggiore delle altre varianti, si sceglie pertanto questa soluzione.

6.3 Schizzo di concetto

6.4 Progettazione CAD

6.4.1 Volano

Per elaborare un sistema che rispetti i requisiti ed i vincoli imposti dalle specifiche tecniche, risulta conveniente definire dapprima le caratteristiche generali del volano in quanto queste, sono limitate dalla coppia fornita dal motore e limitano a loro volta la lunghezza massima del pendolo.

Allo scopo di ottimizzare il volano consideriamo una geometria ideale (come riportato in figura 6.27) composta da un mozzo forato, un anello esterno e tre razze, definita la struttura di base possiamo identificare i seguenti parametri necessari all'ottimizzazione della geometria:

- Il diametro esterno del volano D_e ;
- Il diametro interno del anello del volano D_i ;
- lo spessore dell'anello del volano T_1 ;
- Il diametro del mozzo d ;
- Lo spessore del mozzo T_2 ;

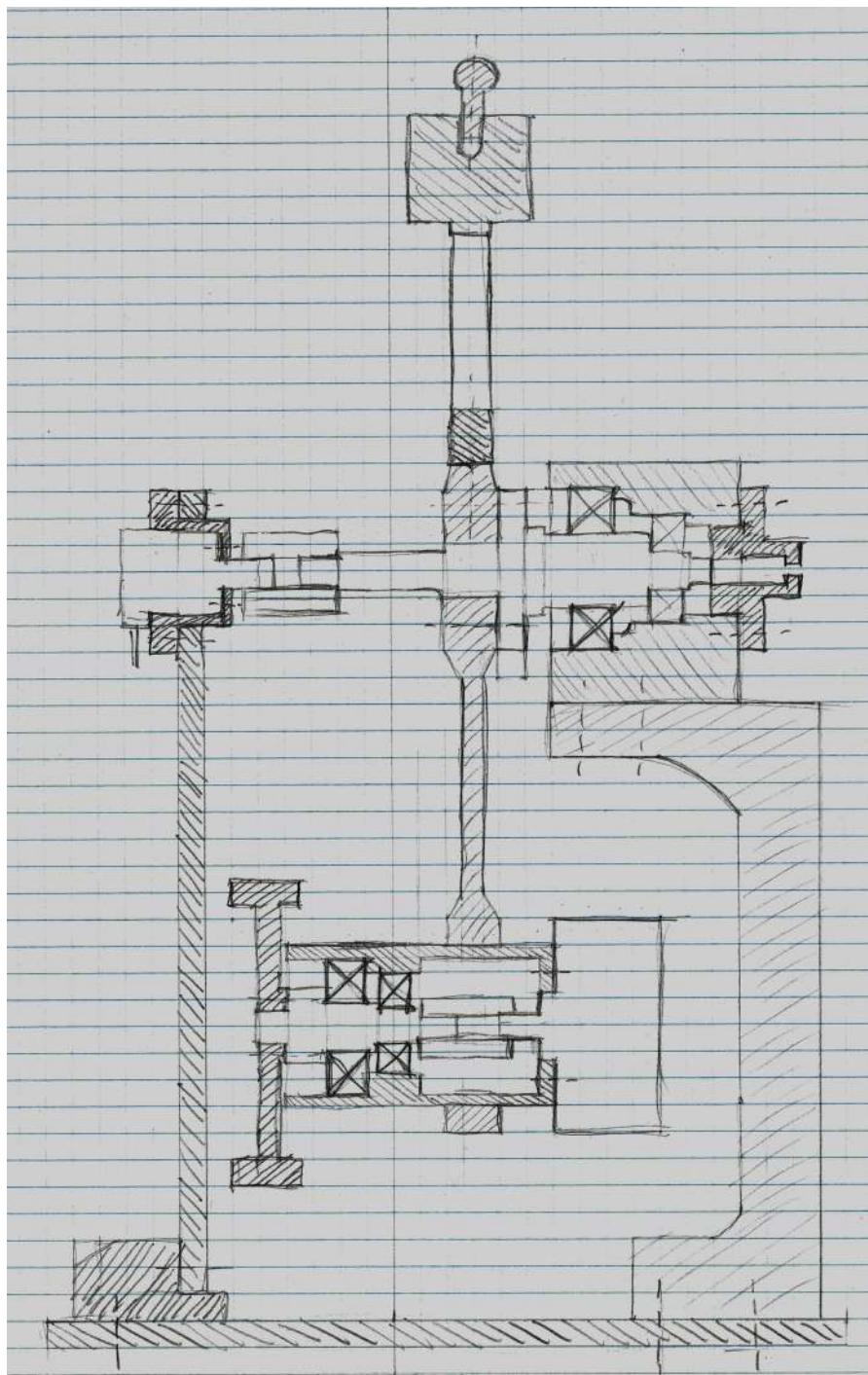


Figura 6.26: Schizzo di concetto della realizzazione meccanica

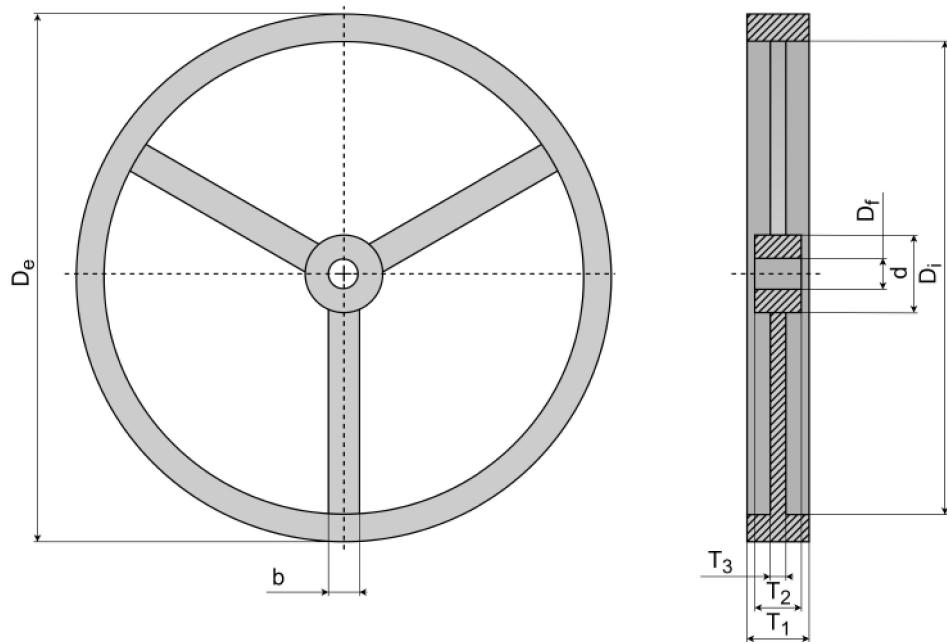


Figura 6.27: Geometria ideale del volano

- La larghezza delle razze b ;
- Lo spessore delle razze T_3

Definiti i parametri da ottimizzare è necessario definire i limiti entro i quali operare la nostra ottimizzazione ed i criteri per valutare il volano. Si decide dunque di ottimizzare il volano secondo i seguenti criteri:

- Massimizzare il momento di inerzia Id_w del volano;
- Minimizzare la massa M_w del volano;
- Garantire la resistenza dell'anello esterno agli sforzi generati dalla rotazione;

Tabella 6.4: Limiti di ottimizzazione dei parametri

Parametro	minimo mm	massimo mm
D_e	-	95
D_i	60	85
T_1	5	10
D	-	16
T_2	5	10
b	3	10
T_3	3	10

- Garantire la resistenza delle razze agli sforzi di trazione generati dall'effetto centrifugo.

6.4.1.1 Calcolo della massa del volano

Allo scopo di ottimizzare il volano è necessario calcolare in forma parametrica la massa, ed il momento di inerzia del volano, dato che il calcolo del momento di inerzia risulta semplificato dall'utilizzo delle masse risulta maggiormente conveniente iniziare proprio da quest'ultima. Definiamo dunque la massa del volano come:

$$M_w = M_1 + M_2 + 3 \cdot M_3 \quad (6.1)$$

dove:

- M_1 è la massa dell'anello esterno del volano;
- M_2 è la massa del mozzo del volano;
- M_3 è la massa della singola razza.

Per semplificare il calcolo della massa consideriamo ora di realizzare il volano con un unico materiale con densità costante (ad esempio alluminio) otteniamo dunque che la massa dell'anello esterno sia pari a

$$M_1 = \rho_{\text{Al}} \frac{(D_e^2 - D_i^2)}{4} \pi T_1 \quad (6.2)$$

quella del mozzo a

$$M_2 = \rho_{\text{Al}} \frac{d^2}{4} \pi T_2 \quad (6.3)$$

e quella di una singola razza a

$$M_3 = \rho_{\text{Al}} \frac{(D_i - d)}{2} b T_3 \quad (6.4)$$

da cui sostituendo nella (6.1) le equazioni (6.2), (6.3) e (6.4) otteniamo

$$M_w = \frac{(T_2 d^2 + (D_e^2 - D_i^2) T_1) \pi \rho_{\text{Al}}}{4} + \frac{3 \cdot T_3 b (D_i - d) \rho_{\text{Al}}}{2} \quad (6.5)$$

6.4.1.2 Calcolo del momento di inerzia del volano

Calcoliamo ora il momento di inerzia del volano definito come

$$I_w = I_1 + I_2 + 3 \cdot I_3 \quad (6.6)$$

dove:

- I_1 è il momento di inerzia dell'anello esterno del volano;
- I_2 è il momento di inerzia del mozzo del volano;
- I_3 è il momento di inerzia della singola razza.

Utilizzando le equazioni per la massa trovate in precedenza otteniamo che il momento di inerzia attorno all'asse di rotazione del volano dell'anello esterno è pari a

$$I_1 = \frac{1}{2} M_1 \frac{(D_e^2 + D_i^2)}{4} \quad (6.7)$$

quello del mozzo a

$$I_2 = \frac{1}{2} M_2 T_2 \cdot \frac{d^2}{4} \quad (6.8)$$

e quello della singola razza a

$$I_3 = \frac{1}{12} M_3 \left(T_3^2 + \frac{(D_i - d)^2}{4} \right) + \rho_{\text{Al}} \cdot M_3 \frac{d^2}{4} \quad (6.9)$$

da cui sostituendo nella (6.6) le equazioni (6.7), (6.8) e (6.9) otteniamo

$$\begin{aligned} I_w = & \frac{\rho_{\text{Al}}}{32} \left((T_2 d^4 + (D_e^4 - D_i^4) T_1) \pi \right. \\ & \left. + T_3 b (-14 \cdot d^3 + 18 \cdot D_1 d^2 - 4 \cdot T_3^2 d - 6 \cdot D_i^2 d + 4 D_i T_3^2 + 2 \cdot D_i^3) \right) \end{aligned} \quad (6.10)$$

6.4.1.3 Calcolo degli sforzi rotazionali nell'anello esterno

Gli elementi rotanti sono sottoposti a condizioni di carico dipendenti dalla rotazione (ad esempio forze di inerzia e campo centrifugo) e carichi indipendenti dalla rotazione (ad esempio forze assiali e condizioni di interferenza). Allo scopo di calcolare i carichi derivati dalla rotazione nell'anello esterno del volano, è necessario adottare alcune ipotesi semplificative:

- La geometria del solido è assialsimmetrica di forma cilindrica ;
- I carichi agiscono in direzione ortogonale all'asse di simmetria
- Il materiale è isotropo;
- Il carico è assialsimmetrico
- Consideriamo un problema piano.

Determiniamo l'equazioni di equilibrio radiale e di compatibilità troviamo la soluzione del problema risolvendole in funzione della posizione radiale

$$\sigma_r = \left(1 + \beta^2 - \frac{\beta^2}{r_n^2} - r_n^2 \right) c\sigma_0 \quad (6.11)$$

e

$$\sigma_t = \left(1 + \beta^2 + \frac{\beta^2}{r_n^2} - \frac{1+2\nu}{3+\nu} r_n^2 \right) c\sigma_0 \quad (6.12)$$

dove $r_n = \frac{2 \cdot r}{D_e}$, $\beta = \frac{D_i}{D_e}$, $c = \frac{3+\nu}{8}$ e $\sigma_0 = \rho\omega^2 \frac{D_e^2}{4}$

6.4.1.4 Calcolo degli sforzi rotazionali nelle razze

Anche in questo caso la rotazione porta all'instaurarsi di una condizione di carico da essa dipendente, allo scopo di quantificare tale tensione, ipotizziamo di porre in rotazione una razza applicando ad una sua estremità una massa pari ad un terzo della massa dell'anello esterno del volano, calcoliamo dunque la forza centrifuga agente in tale condizione

$$F_c = \frac{M_1}{3} \omega^2 A \frac{D_i}{2} \quad (6.13)$$

consideriamo ora come ipotesi semplificativa uno stato tensionale di pura trazione della razza, otteniamo dunque

$$\sigma_z = \frac{F_c}{T_3 b} \quad (6.14)$$

6.4.1.5 Ottimizzazione

Per calcolare i valori ottimali dei parametri del volano si è deciso di realizzare una tabella tramite foglio elettronico Excell implementando le equazioni appena trovate allo scopo di sfruttare il risolutore offerto dal software.

Ipotizzando una velocità massima di rotazione di 5000 min^{-1} e come materiale un alluminio con le seguenti caratteristiche:

- Densità pari a 2.7 g cm^{-3} ;
- Coefficiente di Poisson pari a 0,33;
- Tensione di snervamento pari a 120 MPa

otteniamo come risultato dell'ottimizzazione i seguenti parametri:

- Il diametro esterno del volano $D_e = 95 \text{ mm}$;
- Il diametro interno dell'anello del volano $D_i = 84.6 \text{ mm}$;
- Lo spessore dell'anello del volano $T_1 = 10 \text{ mm}$;

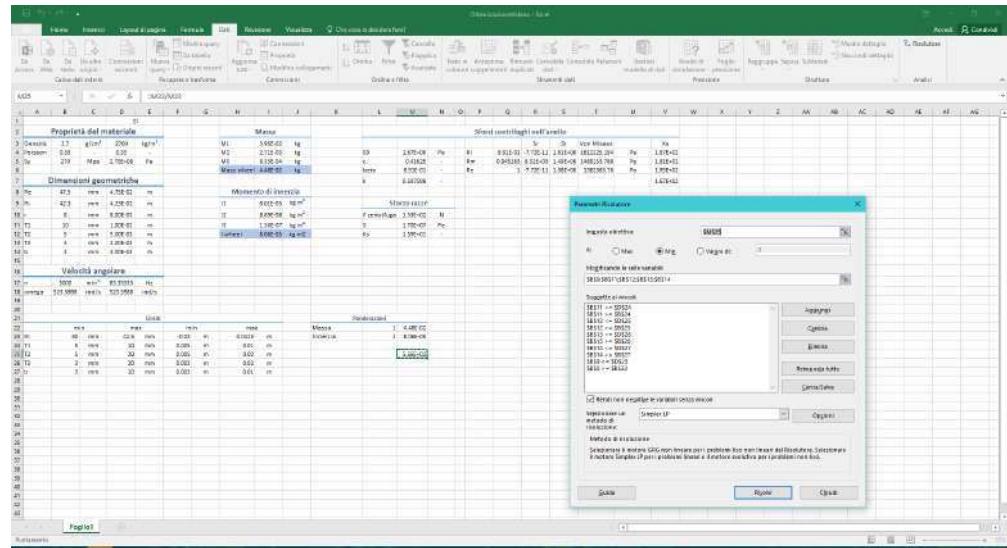


Figura 6.28: Foglio di calcolo per l'ottimizzazione del volano

- Il diametro del mozzo $d = 16$ mm;
- Lo spessore del mozzo $T_2 = 5$ mm;
- La larghezza delle razze $b = 3$ mm;
- Lo spessore delle razze $T_3 = 3$ mm

6.4.2 Albero del volano

Per la progettazione dell'albero del volano (o albero motore) è necessario come primo passo determinare le principali dimensioni quali diametri ed interassi. A questo scopo è necessario definire i cuscinetti volventi ed il giunto elastico che intendiamo utilizzare in combinazione con questo albero.

Allo scopo di semplificare la fase di montaggio dell'albero prevediamo l'utilizzo di due cuscinetti con diametro esterno differente. Questo permette di inserire il primo cuscinetto senza che sfreghi lungo la sede del secondo. Scegliamo dunque di utilizzare due cuscinetti radiali a sfere della serie 60 . . . , questi cuscinetti risultano adatti a questo utilizzo in quanto teoricamente le condizioni di carico non presentano forze assiali significative, possiamo pertanto utilizzare dei semplici cuscinetti radiali, utilizzo di questa serie è determinato dal fatto che risulta essere la più compatta.

Per quanto riguarda il giunto elastico, anche in questo caso andremo a ricercare una soluzione che privilegi i ridotti ingombri. A questo scopo è stato scelto un giunto elastico a soffietto in alluminio.



Figura 6.29: Modello CAD del volano



Figura 6.30: Modello CAD dell'albero del volano

Tabella 6.5: **Cuscinetto radiale a sfere**

Cuscinetto	Dimensioni			Carichi radiali nominali			Velocità Massima	Massa
	d mm	D mm	B mm	Dinamico kN	Statico kN	kN		
607-2Z	7	19	6	2,34	0,95	0,04	43'00	7,5
6000-2Z	10	26	8	4,75	1,96	0,083	34'000	19

Tabella 6.6: Giunto elastico a soffietto

Giunto elastico	$B^{+0,03}$	Dimensioni			Disallineamento		Velocità Massima	Coppia operativa	Massa
		B massimo	L ₁	L ₂	D ₁	Angolare			
mm	mm	mm	mm	mm	°	mm	min ⁻¹	N m	g
602 708 00	4	6	19,05	6	12,70	5	0,127	0,9	10
602 714 00	5	6,35	20,30	6	15,87	5	0,127	1,5	22



Figura 6.31: Modello CAD dell'albero del pendolo

Progettando con l'obbiettivo di limitare la lunghezza dell'albero, otteniamo la geometria riportata nel disegno di costruzione **RWIP_MR_E001_DW1**. Osservando questo pezzo e conoscendo indicativamente il carico esercitato dal volano, possiamo affermare che questo componente risulta chiaramente sovradimensionato, pertanto non procederemo oltre con ulteriori verifiche riguardanti questo componente.

6.4.3 Albero del pendolo

In maniera simile a quanto fatto per l'albero del volano, anche per la progettazione dell'albero del pendolo procediamo definendo in una prima fase le geometrie dettate dall'utilizzo dei cuscinetti (per una questione di semplicità si è deciso di utilizzare la stessa coppia di cuscinetti dell'albero del volano), del giunto elastico e del collettore rotante otteniamo l'albero riportato nel disegno di costruzione **RWIP_MR_E005_DW1**. L'utilizzo del collettore rotante e la variante scelta per il passaggio dei cavi fanno sì che questo albero presenti un foro assiale che permetta, il passaggio dei cavi, ciò nonostante anche in questo caso dati i carichi particolarmente ridotti possiamo affermare che di fatto l'albero risulta chiaramente sovradimensionato, non procederemo pertanto a nessuna ulteriore verifica.

6.5 Pendolo

Il pendolo costituisce il sotto assieme principale di questo sistema ed è composto dai seguenti componenti:

- Il braccio del pendolo;
- Il contrappeso;
- L'alloggiamento dei cuscinetti del volano;
- Il contrappeso di aggiustaggio;
- L'albero del volano o albero motore;
- Il motore BLDC;

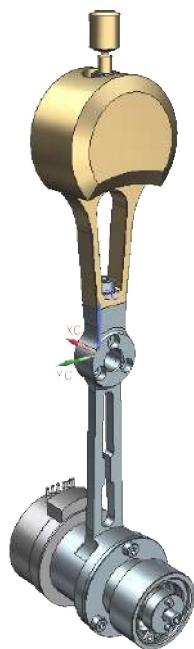


Figura 6.32: Modello CAD del sotto assieme del pendolo

- Una coppia di cuscinetti
 - Un cuscinetto 607-2Z;
 - Un cuscinetto 6000-2Z;
- Il giunto elastico 602 708 00.

Osservando il disegno di assieme **RWIP_MR_G001_DW1** risultano maggiormente chiare le funzioni dei vari componenti. L'alloggiamento dei cuscinetti del volano ha la funzione di ospitare i cuscinetti e l'albero su di essi montato, questo viene inseguito collegato mediante viti al braccio del pendolo sul quale era stato precedentemente montato il motore. Posto a collegamento tra l'albero ed i motori possiamo trovare il giunto elastico. Possiamo notare come il braccio del pendolo abbia la funzione di collegare il blocco volano-motore all'albero del pendolo (non presente in questo sotto assieme). Sempre sul braccio del pendolo viene eventualmente montato, tramite una vite, il contrappeso con il contrappeso di aggiustaggio.

6.6 Supporto del pendolo

Il supporto del pendolo è il sotto assieme che collega il pendolo alla struttura di base del sistema. Osservando il disegno di assieme **RWIP_MR_G002_DW1** possiamo notare i seguenti componenti:

- L'albero pendolo;



Figura 6.33: Modello CAD del sotto assieme del supporto del pendolo

- Il contrappeso;
- L'alloggiamento dei cuscinetti del pendolo;
- L'albero del pendolo;
- Una coppia di cuscinetti
 - Un cuscinetto 607-2Z;
 - Un cuscinetto 6000-2Z;
- Il collettore rotante o slipring;
- Il giunto di collegamento del collettore.

6.7 Supporto encoder

Il supporto dell'encoder è un sotto assieme composto, come possiamo notare dal disegno di assieme **RWIP_MR_G003_DW1**, da:

- La staffa dell'encoder,
- La Flangia dell'encoder;
- L'encoder digitale;
- Il giunto elastico.

Questo sotto assieme ha la funzione di mantenere in posizione l'encoder digitale e di collegarlo mediante il giunto elastico all'albero del pendolo.



Figura 6.34: Modello CAD del sotto assieme del supporto dell'encoder



Figura 6.35: Modello CAD del sotto assieme della base del pendolo

6.8 Base del pendolo

La base del pendolo è un sotto assieme che funge da base di montaggio per i precedenti sotto assiemi. Osservando il disegno di assieme **RWIP_MR_G004_DW1** possiamo notare che la base del pendolo è composta dai seguenti componenti:

- Una piastra di base;
- La base per il supporto del pendolo;
- La base del supporto dell'encoder.

Capitolo 7

Modellazione del pendolo

Come prima fase necessaria alla realizzazione di un controllore per il pendolo inverso, risulta necessario definire un modello matematico che descriva, tramite un sistema di equazioni, il comportamento del pendolo reale. Siccome i *EUR* richiedono lo sviluppo di più controllori distinti, risulta conveniente differenziare la modellazione in tre casi:

- modello per lo sviluppo del controllo in posizione stabile;
- modello per lo sviluppo del controllo in posizione instabile,
- modello per lo sviluppo del controllo in posizione del pendolo bilanciato.

7.1 Modellazione del pendolo inverso con volano in posizione di equilibrio stabile

Come primo passo risulta utile definire le coordinate generalizzate necessarie per una completa descrizione del sistema. A questo scopo è possibile identificare le coordinate di posizione e di velocità angolare del volano (ϕ e ω) e quelle del pendolo (θ e ψ). Per una corretta modellazione è necessario identificare le caratteristiche fisiche che determinano il comportamento del sistema, nel caso del pendolo possiamo identificare i seguenti parametri:

- la distanza L_p del centro di massa del volano dal centro di rotazione del pendolo;
- la distanza L_c del centro di massa del pendolo dal centro di rotazione del pendolo;
- la massa M_w del volano;
- la massa M_p del pendolo;
- il momento di inerzia I_w del volano e

- il momento di inerzia I_p del pendolo.

A questo punto, definiti i sistemi di coordinate e note le caratteristiche fisiche del sistema, si può procedere con la modellazione del pendolo. Allo scopo di ottenere le equazioni del moto necessarie alla descrizione del sistema si è deciso di utilizzare l'approccio della **meccanica lagrangiana**¹ derivandole dal bilancio tra energia potenziale ed energia cinetica.

7.1.1 Calcolo dell'energia potenziale

Osservando il sistema possiamo notare l'assenza di elementi in grado di conservare l'energia potenziale nella forma elastica, similmente possiamo trascurare qualunque azione di campi magnetici sul pendolo e considerare dunque l'energia potenziale magnetica nulla. In seguito a queste osservazioni è sensato ritenere che l'energia potenziale del sistema convertibile in energia cinetica sia esclusivamente di natura gravitazionale, questa per un corpo di massa m posto all'interno di un campo gravitazionale uniforme caratterizzato da un'accelerazione considerabile costante g ad un'altezza h può essere dunque calcolata secondo la seguente formula:

$$U = mgh \quad (7.1)$$

Allo scopo di calcolare i vari contributi all'energia potenziale gravitazionale, risulta più semplice definire una serie di coordinate cartesiane dipendenti dalle coordinate generalizzate identificate in precedenza, ponendo il valore di energia potenziale nulla in posizione di equilibrio stabile e l'origine in corrispondenza del centro di rotazione del pendolo otteniamo:

$$y_p = L_p - L_c \cos(\theta) \quad (7.2)$$

$$y_w = L_p - L_c \cos(\theta) \quad (7.3)$$

Da cui utilizzando l'equazione (7.1) otteniamo:

$$U_p = M_p g y_p \quad (7.4)$$

$$U_w = M_w g y_w \quad (7.5)$$

Sostituendo i termini y_p e y_w nelle equazioni (7.4) e (7.5) otteniamo:

$$U_p = M_p g (L_p - L_c \cos(\theta)) \quad (7.6)$$

¹Joseph-Louis Lagrange nato Giuseppe Luigi Lagrangia (Torino, 25 gennaio 1736 - Parigi, 10 aprile 1813) fu un matematico e astronomo italiano attivo principalmente a Parigi, considerato tra i più influenti matematici del XVIII secolo. Nell'opera *Mécanique analytique*, pubblicata nel 1788, formulò la meccanica lagrangiana che risulta essere alla base della meccanica razionale.

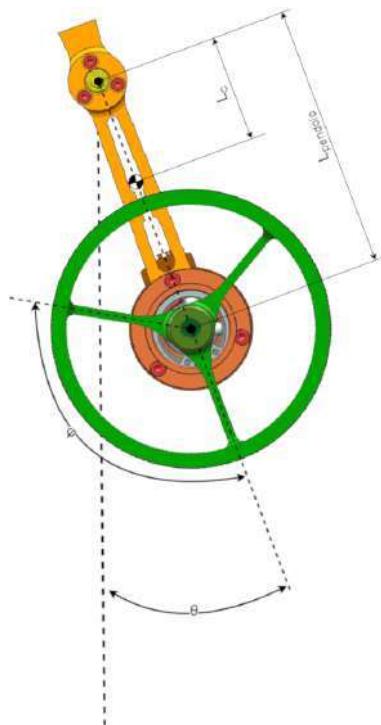


Figura 7.1: Pendolo in posizione di equilibrio stabile

$$U_w = M_w g (L_p - L_p \cos(\theta)) \quad (7.7)$$

Sommando entrambi i contributi (7.6) e (7.7) otteniamo l'energia potenziale del sistema in funzione della coordinata generalizzata θ .

$$U = U_p + U_w = [(-L_p M_w - L_c M_p) \cos(\theta) + (L_p M_w + L_p M_p)] g \quad (7.8)$$

7.1.2 Calcolo dell'energia cinetica

Il sistema preso in considerazione è caratterizzato da un energia cinetica di tipo rotazionale esprimibile secondo la seguente relazione:

$$T = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (7.9)$$

Utilizzando dunque la relazione (7.9) possiamo esprimere l'energia cinetica del pendolo come:

$$T_p = \frac{1}{2} I_p \psi^2 \quad (7.10)$$

Tuttavia per calcolare l'energia cinetica del volano un parziale utilizzo delle coordinate cartesiane permette di semplificare la definizione dell'energia cinetica di rotazione considerando

la somma delle componenti traslatorie lungo gli assi y e x come:

$$T = \frac{1}{2}m(v_x^2 + v_y^2) \quad (7.11)$$

Utilizzando dunque il precedente sistema di riferimento otteniamo la seguente relazione:

$$x_w = L_p \sin(\theta) \quad (7.12)$$

Ottenute le coordinate cartesiane del volano è dunque necessario risalire alle velocità di traslazione lungo i due assi, a questo scopo deriviamo dunque le equazioni (7.12) e (7.3) nel tempo per ottenere le rispettive velocità:

$$v_{xw} = \frac{dx_w}{dt} = L_p \cos(\theta)\dot{\theta} = L_p \cos(\theta)\psi \quad (7.13)$$

$$v_{yw} = \frac{dy_w}{dt} = L_p \sin(\theta)\dot{\theta} = L_p \sin(\theta)\psi \quad (7.14)$$

A questo punto possiamo considerare i contributi traslatori e rotativi per ottenere la seguente relazione:

$$T_w = \frac{1}{2}I_w\omega^2 + \frac{1}{2}M_w(v_{xw}^2 + v_{yw}^2) \quad (7.15)$$

sostituendo le relazioni (7.13) e (7.14) nelle (7.15) otteniamo:

$$T_w = \frac{1}{2}[I_w\omega^2 + M_wL_p^2\psi^2] \quad (7.16)$$

Sommando entrambi i contributi calcolati nella (7.10) e nella (7.16) otteniamo l'energia cinetica del sistema in funzione delle coordinate generalizzate ψ e ω .

$$T = T_p + T_w = \frac{1}{2}[(I_p + M_wL_p^2)\psi^2 + I_w\omega^2] \quad (7.17)$$

7.1.3 Lagrangiana ed equazione di Lagrange

Data una funzione L , detta **lagrangiana**, dipendente dalla coordinata q e dalla sua derivata nel tempo \dot{q} definita come:

$$L(q, \dot{q}) = T(q, \dot{q}) - U(q, \dot{q}) \quad (7.18)$$

Possiamo derivare, a partire dalla (7.18), le equazioni del moto del sistema grazie alle **equazioni di Lagrange**:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial R}{\partial \dot{q}_i} = \tau_i \quad \text{dove } i = \theta, \phi \quad (7.19)$$

Nell'equazione (7.19) è possibile notare la funzione dissipativa di Rayleigh² R e la funzione τ_i che descrive il momento applicato. Per calcolare correttamente le equazioni del moto è dunque necessario definire tali funzioni:

$$R(\psi, \omega) = \frac{1}{2} (\eta_\theta \psi^2 + \eta_\phi \omega^2) \quad (7.20)$$

$$\tau_\theta = -I_w \dot{\omega} \quad (7.21)$$

$$\tau_\phi = \tau_m - I_w \dot{\psi} \quad (7.22)$$

Sostituendo le equazioni (7.8) e (7.17) nella (7.18) otteniamo la funzione lagrangiana

$$L(\theta, \psi, \phi, \omega) = \frac{1}{2} [(M_w L_p^2) \psi^2 + g (2M_w L_p + 2M_p L_c) (\cos(\theta) - 1) I_w \omega^2] \quad (7.23)$$

Calcolando la (7.19) per $i = \theta, \phi$ troviamo il seguente sistema:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \psi} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} + \frac{\partial R}{\partial \psi} = \tau_\theta \quad (7.24a)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \omega} \right) - \frac{\partial L}{\partial \phi} + \frac{\partial R}{\partial \omega} = \tau_\phi \quad (7.24b)$$

Da cui:

$$(L_p^2 M_w + I_p) \dot{\psi} + \eta_\theta \psi + (L_p M_w + L_c^2 M_p) g \sin(\theta) = -I_w \dot{\omega} \quad (7.25a)$$

$$I_w \dot{\omega} + \eta_\phi \omega = \tau - I_w \dot{\psi} \quad (7.25b)$$

Risolvendo il sistema per $\dot{\psi}$ e $\dot{\omega}$ otteniamo:

$$\dot{\psi} = -\frac{(L_p M_w + L_c M_p) g \sin(\theta) + \tau + \eta_\theta \psi - \eta_\phi \omega}{L_p^2 M_w - I_w + I_p} \quad (7.26a)$$

$$\dot{\omega} = \frac{(I_w L_p M_w + I_w L_c M_p) g \sin(\theta) + L_p^2 (M_w + I_p) (\tau - \eta_\phi \omega) I_w \eta_\theta \psi}{I_w L_p^2 M_w - I_w^2 + I_p I_w} \quad (7.26b)$$

$$(7.26c)$$

Definiamo ora il seguente sistema di equazioni:

²Jhon William Strutt, terzo barone di Rayleigh (Langford Grove, 12 novembre 1842 - Terling Place, 30 giugno 1919) fu un fisico britannico vincitore del Premio Nobel nel 1904.

$$\theta = \psi \quad (7.27a)$$

$$\psi = \dot{\psi} = -\frac{(L_p M_w + L_c M_p) g \cos(\theta) + \tau + \eta_\theta \psi - \eta_\phi \omega}{L_p^2 M_w - I_w + I_p} \quad (7.27b)$$

$$\phi = \omega \quad (7.27c)$$

$$\omega = \dot{\omega} = \frac{(I_w L_p M_w + I_w L_c M_w) g \cos(\theta) + (L_p^2 M_w + I_p) (\tau - \eta_\phi \omega) I_w \eta_\theta \psi}{I_w L_p^2 M_w - I_w^2 + I_p I_w} \quad (7.27d)$$

$$(7.27e)$$

Allo scopo di poter operare con il sistema per mezzo della rappresentazione matriciale

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \theta \\ \psi \\ \phi \\ \omega \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} \tau \end{bmatrix} \quad (7.28)$$

é necessario dapprima calcolare le **matrici jacobiane**³ relative al sistema di equazioni (7.27).

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta}{\partial \theta} & \frac{\partial \theta}{\partial \psi} & \frac{\partial \theta}{\partial \phi} & \frac{\partial \theta}{\partial \omega} \\ \frac{\partial \psi}{\partial \theta} & \frac{\partial \psi}{\partial \psi} & \frac{\partial \psi}{\partial \phi} & \frac{\partial \psi}{\partial \omega} \\ \frac{\partial \phi}{\partial \theta} & \frac{\partial \phi}{\partial \psi} & \frac{\partial \phi}{\partial \phi} & \frac{\partial \phi}{\partial \omega} \\ \frac{\partial \omega}{\partial \theta} & \frac{\partial \omega}{\partial \psi} & \frac{\partial \omega}{\partial \phi} & \frac{\partial \omega}{\partial \omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{(L_p M_w + L_c M_p) g \cos(\theta)}{L_p^2 M_w - I_w + I_p} & -\frac{\eta_\theta}{L_p^2 M_w - I_w + I_p} & 0 & \frac{\eta_\phi}{L_p^2 M_w - I_w + I_p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{(I_w L_p M_w + I_w L_c M_w) g \cos(\theta)}{I_w L_p^2 M_w - I_w^2 + I_p I_w} & \frac{I_w \eta_\theta}{I_w L_p^2 M_w - I_w^2 + I_p I_w} & 0 & \frac{-(L_p^2 M_w + I_p) \eta_\phi}{I_w L_p^2 M_w - I_w^2 + I_p I_w} \end{bmatrix} \quad (7.29a)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \\ \frac{\partial \psi}{\partial \tau} \\ \frac{\partial \phi}{\partial \tau} \\ \frac{\partial \omega}{\partial \tau} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{L_p^2 M_w - I_w + I_p} \\ 0 \\ \frac{L_p^2 M_w + I_p}{I_w L_p^2 M_w - I_w^2 + I_p I_w} \end{bmatrix} \quad (7.29b)$$

Osservando queste matrici, ed in particolare la (7.29a), è possibile notare la non-linearità del sistema, risulta quindi necessario linearizzare il sistema attorno al punto di equilibri. È possibile, ipotizzando τ nullo, trovare i punti di equilibrio risolvendo la seguente equazione:

$$Ax_{\text{eq}} = 0 \quad (7.30)$$

Da cui troviamo:

³In analisi matematica la matrice di Jacobi di una funzione f tale da avere dominio e codominio in uno spazio euclideo è la matrice i cui elementi sono costituiti dalle derivate parziali prime della funzione f .

$$x_{\text{eq}1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; x_{\text{eq}2} = \begin{bmatrix} \pi \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7.31)$$

Linearizzando dunque il sistema attorno al punto di equilibrio stabile $x_{\text{eq}1}$ e considerando nulli gli effetti degli attriti, otteniamo la seguente rappresentazione nello spazio degli stati:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{(L_p M_w + L_c M_p)g}{L_p^2 M_w - I_w + I_p} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{(I_w L_p M_w + I_w L_c M_w)g}{I_w L_p^2 M_w - I_w^2 + I_p I_w} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7.32a)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{L_p^2 M_w - I_w + I_p} \\ 0 \\ \frac{L_p^2 M_w + I_p}{I_w L_p^2 M_w - I_w^2 + I_p I_w} \end{bmatrix} \quad (7.32b)$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7.32c)$$

$$D_1 = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \quad (7.32d)$$

Da queste matrici è possibile operare una ulteriore semplificazione, prestando esclusivamente attenzione agli stati relativi al pendolo è infatti possibile ridurre il sistema ad una forma 2×2 .

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{(L_p M_w + L_c M_p)g}{L_p^2 M_w - I_w + I_p} & 0 \end{bmatrix} \quad (7.33a)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{L_p^2 M_w - I_w + I_p} \end{bmatrix} \quad (7.33b)$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (7.33c)$$

$$D_1 = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \quad (7.33d)$$

Come ultimo passaggio risulta necessario controllare che il sistema appena ottenuto possa essere controllato per mezzo di un controllore di stato. A questo scopo si può analizzare il rango della matrice di controllabilità definita come:

$$\mathcal{C} = \begin{bmatrix} B & A \cdot B & A^2 \cdot B & \dots & A^{n-1} \cdot B \end{bmatrix} \quad (7.34)$$

Da cui sostituendo nella (7.34) le matrici (7.33a) e (7.33b) otteniamo:

$$\mathcal{C}_1 = \begin{bmatrix} B_1 & A_1 \cdot B_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_p^2 M_w - I_w + I_p} \\ -\frac{1}{L_p^2 M_w - I_w + I_p} & 0 \end{bmatrix} \quad (7.35)$$

Osservando la matrice (7.35) risulta evidente che:

$$\text{rg} (\mathcal{C}_1) = 2 \quad (7.36)$$

Da questa osservazione possiamo quindi concludere che si tratta di un sistema controllabile in quanto il rango della matrice \mathcal{C}_1 è uguale al numero di stati di cui è necessario un controllo.

7.2 Modellazione del pendolo inverso con volano in posizione di equilibrio instabile

Allo scopo di modellare il comportamento del pendolo inverso in posizione di equilibrio instabile, è possibile sfruttare in gran parte il lavoro svolto in precedenza per il modello linearizzato nel punto di equilibrio stabile (capitolo 7.1). Possiamo dunque considerare il sistema (7.25) da cui otteniamo la matrice A non-linearizzata (7.29a) e la matrice B non-linearizzata (7.29b). Da queste matrici è dunque possibile ottenere un sistema linearizzato attorno al punto di equilibrio instabile x_{eq2} in maniera simile a quanto fatto per il punto di equilibrio stabile.

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{(L_p M_w + L_c M_p)g}{L_p^2 M_w - I_w + I_p} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{(I_w L_p M_w + I_w L_c M_w)g}{I_w L_p^2 M_w - I_w^2 + I_p I_w} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7.37a)$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{L_p^2 M_w - I_w + I_p} \\ 0 \\ \frac{L_p^2 M_w + I_p}{I_w L_p^2 M_w - I_w^2 + I_p I_w} \end{bmatrix} \quad (7.37b)$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7.37c)$$

$$D_2 = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \quad (7.37d)$$

Anche in questo caso, dato che l'interesse è limitato agli stati relativi al pendolo, risulta possibile ridurre il sistema ad una forma 2×2 .

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{(L_p M_w + L_c M_p)g}{L_p^2 M_w - I_w + I_p} & 0 \end{bmatrix} \quad (7.38a)$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{L_p^2 M_w - I_w + I_p} \end{bmatrix} \quad (7.38b)$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (7.38c)$$

$$D_2 = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \quad (7.38d)$$

Trovatele matrici che descrivono il sistema non resta che verificarne la controllabilità

$$\mathcal{C}_2 = \begin{bmatrix} B_2 & A_2 \cdot B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_p^2 M_w - I_w + I_p} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (7.39)$$

Osservando la matrice (7.39) risulta evidente che:

$$\text{rg} (\mathcal{C}_2) = 2 \quad (7.40)$$

Da questa osservazione possiamo quindi concludere che si tratta di un sistema controllabile in quanto il rango della matrice \mathcal{C}_2 è uguale al numero di stati di cui è necessario un controllo.

7.3 Modellazione del pendolo in configurazione bilanciata

Nel caso si volesse posizionare il pendolo ad un angolo arbitrario θ differente da 0 e π con il sistema utilizzato fino a questo punto non risulterebbe possibile in quanto il suo centro di massa non sarebbe coincidente con l'asse di rotazione. Questa mancata coincidenza del centro di massa e dell'asse di rotazione risulterebbe pertanto nella presenza di una forza di ritorno, che non per posizioni differenti da quelle di equilibrio, non potrebbe essere compensata allo scopo di stabilizzare la posizione del sistema. Allo scopo di realizzare un sistema in grado di posizionarsi e stabilizzarsi in una qualsiasi posizione angolare, è necessario controbilanciare l'azione di questa forza di ritorno per mezzo di un contrappeso che agisca in maniera tale da spostare il centro di massa complessivo così da coincidere con l'asse di rotazione.

Nel sistema in configurazione bilanciata possiamo trovare i seguenti parametri necessari a caratterizzare il sistema:

- la distanza L_p del centro di massa del volano dal centro di rotazione del pendolo;
- la distanza L_c del centro di massa del pendolo dal centro di rotazione del pendolo;

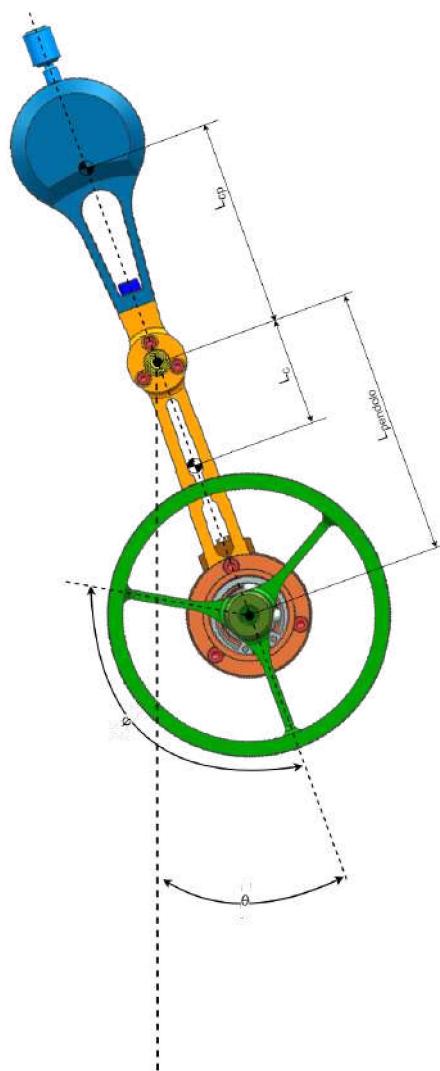


Figura 7.2: Modello di pendolo bilanciato con volano.

- la distanza L_{cp} del centro di massa del contrappeso dal centro di rotazione del pendolo;
- la massa M_w del volano;
- la massa M_p del pendolo;
- la massa M_{cp} del contrappeso;
- il momento di inerzia I_w del volano;
- il momento di inerzia I_p del pendolo;
- il momento di inerzia I_{cp} del contrappeso.

Similmente a quanto fatto in precedenza, e utilizzando le stesse coordinate generalizzate θ , ψ , ϕ e ω , possiamo sfruttare la meccanica lagrangiana per ricavare le equazioni del moto del sistema.

7.3.1 Calcolo dell'energia potenziale

Come in precedenza risulta più facile calcolare l'energia potenziale gravitazionale per mezzo di un sistema di coordinate cartesiane. Riprendendo dunque le equazioni (7.6) e (7.7) a cui aggiungiamo:

$$y_{cp} = L_p + L_{cp} \cos(\theta) \quad (7.41)$$

e

$$U_{cp} = M_{cp}gy_{cp} = M_{cp}g(L_p + L_{cp} \cos(\theta)) \quad (7.42)$$

Otteniamo dunque un'energia potenziale gravitazionale totale pari alla somma delle energie potenziali parziali. Tuttavia il contrappeso è progettato per posizionare il centro di massa del sistema in maniera tale da farlo coincidere con l'asse di rotazione, per tanto otteniamo che l'energia totale è pari a:

$$U = U_p + U_w + U_{cp} = (M_p + M_w + M_{cp}) g L_p \quad (7.43)$$

7.3.2 Calcolo dell'energia cinetica

Anche per quanto riguarda il calcolo dell'energia cinetica possiamo sfruttare, in parte, il lavoro svolto in precedenza. In particolare possiamo mantenere le energie cinetiche precedentemente calcolate sia per il pendolo che per il volano, risulta necessario calcolare solamente l'energia cinetica relativa al contrappeso. Otteniamo dunque:

$$T_{\text{cp}} = \frac{1}{2} I_{\text{cp}} \dot{\psi}^2 \quad (7.44)$$

Da cui:

$$T = T_p + T_w + T_{\text{cp}} = \frac{1}{2} [(I_p + M_w L_p^2 + I_{\text{cp}}) \dot{\psi}^2 + I_w \omega^2] \quad (7.45)$$

7.3.3 Langrangiana ed equazioni di Lagrange

Nota l'energia potenziale gravitazionale totale (7.43) e l'energia cinetica totale (7.45) è dunque possibile calcolare la lagrangiana del sistema bilanciato.

$$L(\theta, \psi, \phi, \omega) = \frac{1}{2} [(I_p + M_w L_p^2 + I_{\text{cp}}) \dot{\psi}^2 + I_w \omega^2] - (M_p + M_w + M_{\text{cp}}) g L_p \quad (7.46)$$

Sostituendo la funzione lagrangiana appena calcolata e utilizzando la funzione dissipativa di Rayleigh (7.20) e le funzioni τ_i (7.21) e (7.22) nella (7.19) e risolvendo per $i = \theta, \phi$ troviamo il seguente sistema di equazioni differenziali:

$$(L_p^2 M_w + I_p + I_{\text{cp}}) \ddot{\psi} + \eta_\theta \psi = -I_w \dot{\omega} \quad (7.47a)$$

$$I_w \ddot{\omega} + \eta_\phi \omega = \tau - I_w \dot{\psi} \quad (7.47b)$$

Risolvendo il sistema per $\dot{\psi}$ e $\dot{\omega}$ otteniamo:

$$\dot{\psi} = -\frac{\tau + \eta_\theta \psi - \eta_\phi}{L_p^2 M_w - I_w + I_p + I_{\text{cp}}} \quad (7.48a)$$

$$\dot{\omega} = \frac{(L_p^2 M_w + I_p + I_{\text{cp}})(\tau - \eta_\phi \omega) + I_w \eta_\theta \psi}{I_w L_p^2 M_w - I_w^2 + (I_p + I_{\text{cp}}) I_w} \quad (7.48b)$$

Definiamo ora il seguente sistema di equazioni:

$$\theta = \psi \quad (7.49a)$$

$$\psi = \dot{\psi} = -\frac{\tau + \eta_\theta \psi - \eta_\phi}{L_p^2 M_w - I_w + I_p + I_{\text{cp}}} \quad (7.49b)$$

$$\phi = \omega \quad (7.49c)$$

$$\omega = \dot{\omega} = \frac{(L_p^2 M_w + I_p + I_{\text{cp}})(\tau - \eta_\phi \omega) + I_w \eta_\theta \psi}{I_w L_p^2 M_w - I_w^2 + (I_p + I_{\text{cp}}) I_w} \quad (7.49d)$$

Calcoliamo adesso le matrici di Jacobi necessarie per rappresentare il sistema secondo al rappresentazione matriciale (7.28)

$$A_3 = \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta}{\partial \theta} & \frac{\partial \theta}{\partial \psi} & \frac{\partial \theta}{\partial \phi} & \frac{\partial \theta}{\partial \omega} \\ \frac{\partial \psi}{\partial \theta} & \frac{\partial \psi}{\partial \psi} & \frac{\partial \psi}{\partial \phi} & \frac{\partial \psi}{\partial \omega} \\ \frac{\partial \phi}{\partial \theta} & \frac{\partial \phi}{\partial \psi} & \frac{\partial \phi}{\partial \phi} & \frac{\partial \phi}{\partial \omega} \\ \frac{\partial \omega}{\partial \theta} & \frac{\partial \omega}{\partial \psi} & \frac{\partial \omega}{\partial \phi} & \frac{\partial \omega}{\partial \omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\eta_\theta}{L_p^2 M_w - I_w + I_p + I_{cp}} & 0 & \frac{\eta_\phi}{L_p^2 M_w - I_w + I_p + I_{cp}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{I_w \eta_\theta}{I_w L_p^2 M_w - I_w^2 + (I_p + I_{cp}) I_w} & 0 & \frac{-(L_p^2 M_w + I_p - I_{cp}) \eta_\phi}{I_w L_p^2 M_w - I_w^2 + (I_p + I_{cp}) I_w} \end{bmatrix} \quad (7.50a)$$

$$B_3 = \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \\ \frac{\partial \psi}{\partial \tau} \\ \frac{\partial \phi}{\partial \tau} \\ \frac{\partial \omega}{\partial \tau} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{L_p^2 M_w - I_w + I_p + I_{cp}} \\ 0 \\ \frac{L_p^2 M_w + I_p + I_{cp}}{I_w L_p^2 M_w - I_w^2 + I_p I_w} \end{bmatrix} \quad (7.50b)$$

Osservando le matrici possiamo notare che il sistema, differentemente da quelli ottenuti in precedenza, risulta essere lineare. Questa sua proprietà ci conferma la possibilità di realizzare un controllore che stabilizzi il sistema in una qualunque posizione angolare. È comunque possibile operare una riduzione delle matrici ad un sistema 2×2 in quanto, come in precedenza, gli unici stati di interesse per il controllore riguardano il pendolo, considerando inoltre gli effetti degli attriti nulli otteniamo per tanto la seguente rappresentazione nello spazio degli stati:

$$A_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7.51a)$$

$$B_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{L_p^2 M_w - I_w + I_p + I_{cp}} \end{bmatrix} \quad (7.51b)$$

$$C_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (7.51c)$$

$$D_3 = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \quad (7.51d)$$

Verifichiamo ora la controllabilità di questo sistema.

$$\mathcal{C}_3 = \begin{bmatrix} B_3 & A_3 \cdot B_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_p^2 M_w - I_w + I_p + I_{cp}} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (7.52)$$

Osservando la matrice (7.52) risulta evidente che:

$$\text{rg}(\mathcal{C}_3) = 2 \quad (7.53)$$

Da questa osservazione possiamo quindi concludere che si tratta di un sistema controllabile in quanto il rango della matrice \mathcal{C}_3 è uguale al numero di stati di cui è necessario un controllo.

Capitolo 8

Progettazione dei controllori

Lo scopo di un controllore é quello di modulare un segnale di **input** ad un sistema dinamico (figura 8.1), così da regolarne il comportamento. In particolare l'utilizzo di controllori permette di stabilizzare un processo intorno ad un punto di equilibrio del sistema, questa caratteristica risulta fondamentale qualora si volesse operare in un punto di equilibrio instabile o qualora la risposta dinamica del sistema in prossimità di un punto di equilibrio stabile, non soddisfi determinate specifiche (ad esempio tempo di *setting*¹ o *overshooting* percentuale² o l'errore allo stato finito).

Il sistema preso in considerazione (il pendolo inverso) é di base un sistema non lineare che presenta due punti di equilibrio attorno ai quali é possibile operare una linerizzazione del sistema. Questa semplificazione del sistema da non-lineare a lineare ci permette di sfruttare i metodi di controllo comunemente utilizzati per i sistemi **LTI**³, in particolare per lo sviluppo dei controllori del pendolo inverso verranno utilizzati dei metodi a **controllo ottimo**.

¹ Il **tempo di setting** T_s é definito come il tempo necessario affinché la risposta di un sistema dinamico resti entro il limite di $\pm 2\%$ del valore finale.

² Il valore di **overshooting percentuale** $\%OS$ é definito come: $\%OS = 100 \cdot \frac{y_{\max} - y_{\text{finale}}}{y_{\text{finale}}}$

³ Un sistema lineare tempo-invariante (LTI) é un sistema dinamico caratterizzato dal principio di superposizione degli effetti e tale da presentare un comportamento costante nel tempo.

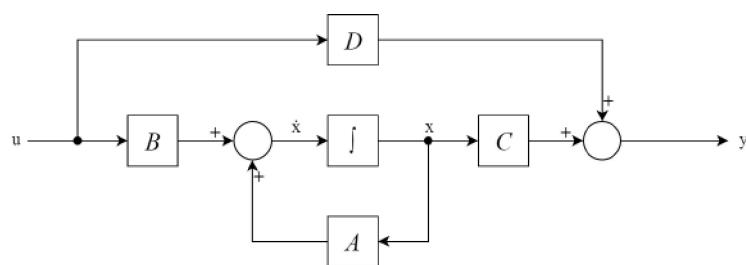


Figura 8.1: Schema a blocchi di un sistema dinamico

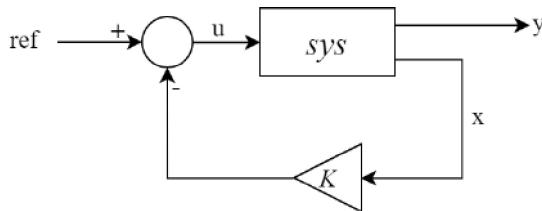


Figura 8.2: Controllore di stato

8.1 Controllo ottimo

Il controllo ottimo è una tipologia di controllori utilizzati nell'ambito della stabilizzazione di sistemi dinamici che lavorano minimizzando una **funzione di costo** dipendente dagli stati del sistema e dal vettore degli ingressi. Esistono varie tipologie di controllori a controllo ottimo, ma in questo progetto verrà utilizzato esclusivamente un controllore del tipo **LQR (regolatore lineare quadratico)**. L'obbiettivo di questo controllore è di minimizzare la differenza tra stato attuale e stato desiderato e di minimizzare il consumo di energia tramite la ricerca del valore minimo della funzione di ottimizzazione

$$J = \lim_{t_f \rightarrow \infty} \frac{1}{2} \cdot \int_0^{t_f} x^T \cdot Q \cdot x + u^T \cdot R \cdot u \, dt \quad (8.1)$$

dove Q e R sono delle matrici diagonali positive dette pesi. L'utilizzo dei pesi serve a definire il compromesso tra i differenti obbiettivi da soddisfare. Dato un sistema LTI

$$\begin{cases} \dot{x} = A \cdot x + B \cdot u \\ y = C \cdot x + D \cdot u \end{cases} \quad (8.2)$$

è possibile trovare i valori dei coefficienti di guadagno K di un normale controllore di stato risolvendo per la matrice P l'**equazione di Riccati**⁴.

$$A^T \cdot P + P \cdot A - Q - P \cdot B \cdot R^{-1} \cdot B^T \cdot P = 0 \quad (8.3)$$

Dalla soluzione dell'equazione (8.3) possiamo calcolare il coefficienti di guadagno del controllore di stato (figura 8.2) come:

$$K = R^{-1} \cdot B^T \cdot P \quad (8.4)$$

Questa tipologia di controllore presenta tuttavia la necessità di un sistema che presenti un segnale di uscita per ciascuno stato. Osservando le uscite dei sistemi presi in considerazione si noterà che comprendono esclusivamente lo stato della posizione angolare.

⁴ Jacopo Francesco Riccati (Venezia, 28 maggio 1676 - Treviso, 15 aprile 1754) fu un matematico italiano. Si occupò di idrodinamica e collaborò all'introduzione della meccanica newtoniana in Italia. È ricordato per lo studio di una famiglia di equazioni differenziali che porta il suo nome.

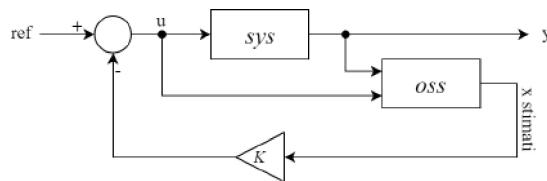


Figura 8.3: Controllore di stato con osservatore

Tenendo conto di questa considerazione parrebbe che un controllore di stato risulti inapplicabile, quantomeno direttamente. Si rende pertanto necessario un metodo che ci permetta di risalire a tutti gli stati del sistema.

8.2 Progettazione dell'osservatore di stato

Un controllore di stato permette di modificare il comportamento di un sistema dinamico, inserendo un segnale di retroazione basato sulle variabili di stato dello stesso sistema. Tuttavia una misura delle variabili di stato non è sempre disponibile, o disponibile solo parzialmente. Talvolta è possibile ricavare alcune grandezze sfruttando altre misure (ad esempio è possibile ottenere all'accelerazione di un veicolo derivando le misure delle velocità). Ciò nonostante, qualora fosse il caso di un sistema di cui è possibile la misura solo parziale degli stati, risulta possibile **stimare il valore delle variabili di stato** ed utilizzare queste stime per realizzare l'anello di *feedback* del controllore di stato (vedi 8.3).

Per realizzare un **osservatore di stato** è necessario conoscere il modello matematico del sistema. Conoscendo il modello e sfruttando il segnale di *input* è possibile stimare il valore delle variabili di stato utilizzandole per il controllo.

È possibile verificare l'accuratezza dell'osservatore di stato confrontando i valori dei segnali di *output* forniti dal modello e dal sistema reale quando soggetti ad un medesimo segnale di *input*. Consideriamo un sistema dato da (8.2) e da un modello:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A \cdot \hat{x} + B \cdot u \\ \hat{y} = C \cdot \hat{x} + D \cdot u \end{cases}$$

dove gli stati \hat{x} rappresentano la stima degli stati x , consideriamo ora l'errore tra uscita reale e uscita stimata:

$$\begin{cases} \dot{e}_x = \dot{x} - \dot{\hat{x}} = A \cdot (x - \hat{x}) = A \cdot e_x \\ e_y = y - \hat{y} = C \cdot (x - \hat{x}) = C \cdot e_x \end{cases} \quad (8.5)$$

Osservando la (8.5) possiamo notare che si tratta di un'equazione differenziale omogenea che presenta quindi una risposta naturale (la componente della risposta dovuta alla forzante risulta nulla). Qualora il sistema fosse stabile, l'errore e_x tra il valore reale ed il valore stimato,

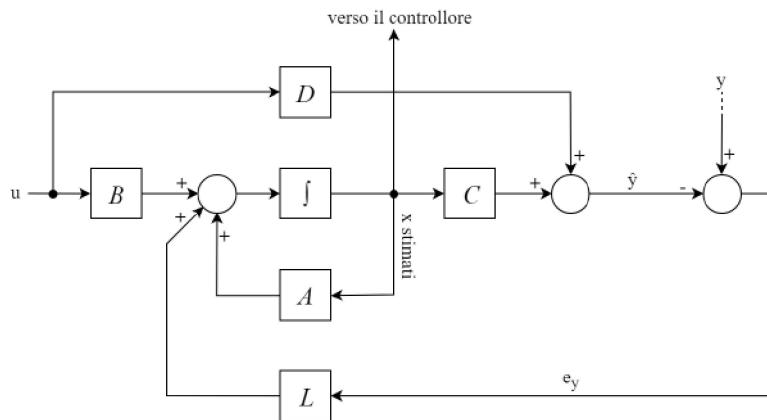


Figura 8.4: Schema di un osservatore con anello di retroazione dell'errore e_y

tenderebbe naturalmente a 0, potremmo inoltre osservare che la velocità di convergenza dell'errore corrisponde alla velocità di convergenza della risposta al transiente del sistema. Nel caso in cui la velocità di convergenza di un sistema risulta essere troppo bassa, o nel caso di sistemi instabili non è possibile ottenere una stima degli stati utilizzando semplicemente un modello matematico del sistema. In questi casi è comunque possibile realizzare un osservatore che sfrutti i segnali di *output* misurati realizzando un anello di retroazione moltiplicando il segnale di errore e_y per il valore di guadagno L (come mostrato nella figura 8.4).

Otteniamo dunque in questo modo un osservatore che può essere descritto in forma matriciale come:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A \cdot \hat{x} + B \cdot u + L \cdot (y - \hat{y}) \\ \hat{y} = C \cdot x + D \cdot u \end{cases} \quad (8.6)$$

Calcolando l'errore tra segnali reali e segnali stimati come nella (8.5) otteniamo:

$$\begin{cases} \dot{e}_x = \dot{x} - \dot{\hat{x}} = (A - L \cdot C) \cdot e_x \\ e_y = y - \hat{y} = C \cdot e_x \end{cases} \quad (8.7)$$

Anche in questo caso otteniamo un'equazione differenziale di tipo omogeneo con una risposta esclusivamente naturale. Tuttavia la (8.7) presenta una matrice del sistema pari a $(A - L \cdot C)$, questo implica che rispetto alla (8.5) è possibile modificare la risposta dell'osservatore grazie ai parametri L .

Qualora tutti gli autovalori determinati dalla soluzione dell'equazione:

$$\det(\lambda \cdot I - (A - L \cdot C)) = 0 \quad (8.8)$$

si trovino nel semipiano negativo complesso l'errore di stima, si tenderà a zero più velocemente tanto quanto questi autovalori si trovino distanti dall'asse immaginario. È dunque

possibile scegliere gli autovalori dell'osservatore in maniera tale da garantirne la stabilità e una risposta al transiente sufficientemente rapida. Generalmente è buona prassi posizionare i poli dell'osservatore in maniera tale da determinarne una risposta al transiente da 5 a 10 volte più rapida di quella del sistema controllato.

8.2.1 Osservatore ridotto

Un'osservatore ridotto è una particolare tipologia di osservatore costruito in maniera tale da riportare in uscita i valori esatti delle variabili di stato direttamente misurate, questo comporta una maggior affidabilità dell'osservatore in quanto le uniche grandezze stimate risultano essere quelle non misurabili. Allo scopo di realizzare questa tipologia di osservatore definiamo la matrice :

$$P = \begin{bmatrix} C \\ T \end{bmatrix}$$

dove la sottomatrice T viene scelta così che la matrice P si di rango intero (e conseguentemente invertibile). Tramite questa matrice di trasformazione possiamo dunque definire gli stati:

$$P \cdot x = \begin{bmatrix} C \\ T \end{bmatrix} \cdot x = \begin{bmatrix} C \cdot x \\ T \cdot x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y \\ w \end{bmatrix} \quad (8.9)$$

da cui risolvendo per x otteniamo:

$$x = P^{-1} \cdot \begin{bmatrix} y \\ w \end{bmatrix} \quad (8.10)$$

Possiamo dunque riscrivere il sistema (8.2) come

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = P \cdot A^{-1} \cdot \begin{bmatrix} y \\ w \end{bmatrix} + P \cdot B \cdot u = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y \\ w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \cdot u \\ y = C \cdot P^{-1} \cdot \begin{bmatrix} y \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y \\ w \end{bmatrix} \end{cases}$$

Considerando le entrate y e u otteniamo:

$$\begin{cases} \dot{w} = A_{22} \cdot w + \begin{bmatrix} B_2 & A_{21} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ y \end{bmatrix} \\ y_r = \begin{bmatrix} A_{12} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot w + \begin{bmatrix} B_1 & A_{11} \\ 0 & I \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y \\ w \end{bmatrix} \end{cases} \quad (8.11)$$

dove $y_r = \begin{bmatrix} \dot{y} \\ y \end{bmatrix}$, definiamo ora un osservatore per questo sistema

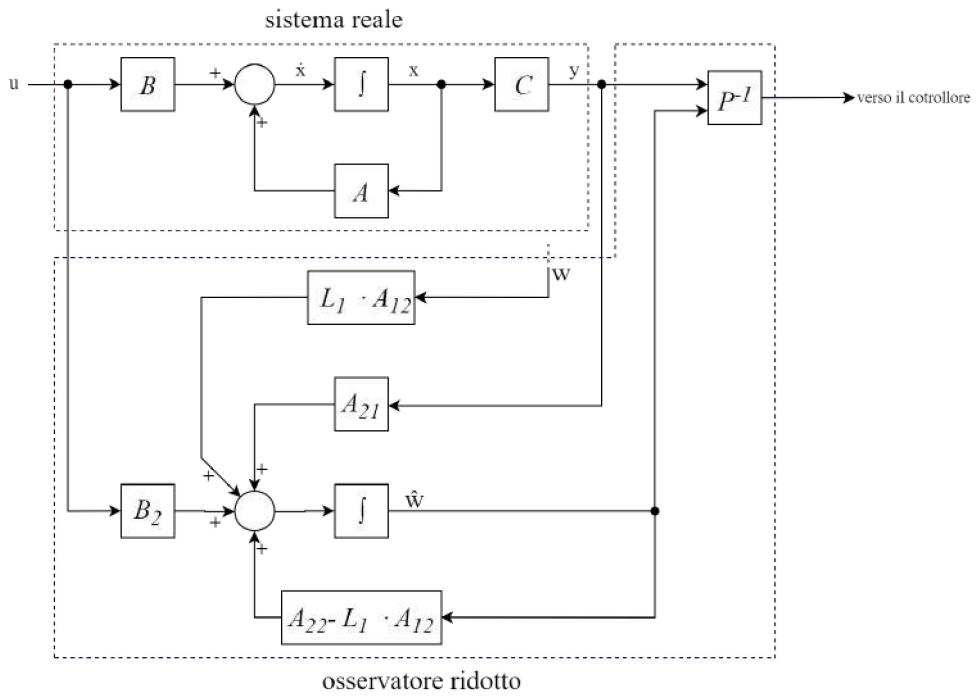


Figura 8.5: Schema a blocchi dell'osservatore ridotto con stato w non disponibile.

$$\begin{cases} \dot{\hat{w}} = A_{22} \cdot \hat{w} + [B_2 \quad A_{21}] \cdot \begin{bmatrix} u \\ y \end{bmatrix} + L_1 \cdot A_{12} \cdot (w - \hat{w}) \\ \hat{y}_r = \begin{bmatrix} A_{12} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \hat{w} + \begin{bmatrix} B_1 & A_{11} \\ 0 & I \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ y \end{bmatrix} \end{cases}$$

dove tramite la matrice $L = [L_1 \quad L_2]$ è possibile determinare i poli della matrice $A_{22} - L_1 \cdot A_{12}$ ⁵ che ritroviamo nel calcolo dell'evoluzione dell'errore

$$\dot{e}_w = \dot{w} - \dot{\hat{w}} = (A_{22} - L_1 \cdot A_{12}) \cdot (w - \hat{w}) = (A_{22} - L_1 \cdot A_{12}) \cdot e_w \quad (8.12)$$

Tuttavia il segnale w non è disponibile all'osservatore ne può essere tantomeno derivato da x grazie alla (8.10) poiché l'obiettivo dell'osservatore è quello di stimare il valore di x . Per ovviare a questo problema possiamo tuttavia introdurre una trasformazione di variabili:

$$v = \hat{w} - L_1 \cdot y \quad (8.13)$$

Finalmente, sostituendo la (8.13) nella (8.2.1) otteniamo:

⁵Risulta possibile dimostrare che nel caso la coppia di matrici A e C sia osservabile anche la coppia di matrici A_{22} e A_{12} risulta osservabile. Questo permette di piazzare i poli del sistema liberamente senza alcuna restrizione.

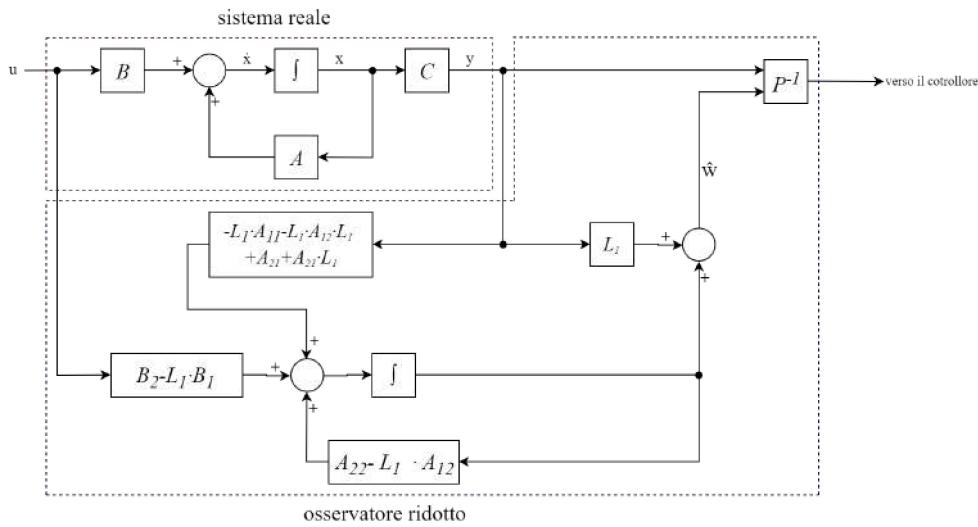


Figura 8.6: Diagramma a blocchi dell'osservatore ridotto

$$\begin{cases} \dot{v} = (A_{22} - L_1 \cdot A_{12}) \cdot v + (B_2 - L_1 \cdot B_1) \cdot u + (-L_1 \cdot A_{11} - L_1 \cdot A_{12} \cdot L_1 + A_{21} + A_{22} \cdot L_1) \cdot y \\ \hat{x} = P^{-1} \cdot \begin{bmatrix} y \\ v + L_1 \cdot y \end{bmatrix} \end{cases} \quad (8.14)$$

Il diagramma a blocchi, completo dell'osservatore ridotto è dato dalla figura 8.6

8.2.2 Osservabilità

Allo scopo di verificare la realizzabilità di un osservatore di stato è necessario dapprima calcolare l' **osservabilità** del sistema che intendiamo osservare. È possibile determinare l'osservabilità del sistema calcolando il rango della **matrice di osservabilità**:

$$\mathcal{O} = \begin{bmatrix} C \\ C \cdot A \\ C \cdot A^2 \\ \vdots \\ C \cdot A^{n-1} \end{bmatrix} \quad (8.15)$$

Calcoliamo ora le matrici di osservabilità dei tre sistemi considerati:

$$\mathcal{O}_1 = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_1 \cdot A_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(L_p M_w + L_c M_p)g}{L_p^2 M_w - I_w + I_p} & 0 \\ 0 & \frac{(L_p M_w + L_c M_p)g}{L_p^2 M_w - I_w + I_p} \end{bmatrix} \quad (8.16)$$

$$\mathcal{O}_2 = \begin{bmatrix} C_2 \\ C_2 \cdot A_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_p^2 M_w - I_w + I_p} \\ -\frac{1}{L_p^2 M_w - I_w + I_p} & 0 \end{bmatrix} \quad (8.17)$$

$$\mathcal{O}_3 = \begin{bmatrix} C_3 \\ C_3 \cdot A_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_p^2 M_w - I_w + I_p + I_{cp}} \\ -\frac{1}{L_p^2 M_w - I_w + I_p + I_{cp}} & 0 \end{bmatrix} \quad (8.18)$$

Verifichiamo ora i ranghi delle matrici di osservabilità

$$\text{rg}(\mathcal{O}_1) = 2 \quad (8.19)$$

$$\text{rg}(\mathcal{O}_2) = 2 \quad (8.20)$$

$$\text{rg}(\mathcal{O}_3) = 2 \quad (8.21)$$

Verificata l'osservabilità dei sistemi possiamo, procedere alla realizzazione dei controllori e in seguito degli osservatori.

8.3 Simulazione

Allo scopo di realizzare un controllore in grado di soddisfare le specifiche tecniche richieste, sono state svolte delle simulazioni del comportamento dinamico dei sistemi controllati. Per la realizzazione di queste simulazioni è stato utilizzato il software di modellazione e simulazione di sistemi dinamici **MATLAB Simulink**⁶. Sfruttando le simulazioni è stato possibile testare differenti pesi per il controllore LQR allo scopo di determinarne l'ordine di grandezza. Dato l'elevato numero di simulazioni svolte si è deciso di riportare esclusivamente risultati finali utilizzati come punto di partenza per lo sviluppo del controllo in tempo reale. Per discriminare i risultati delle simulazioni si sono valutati i seguenti criteri:

- minimizzare l'overshooting;
- minimizzare il tempo di setting;
- massimizzare il discostamento iniziale dal punto di equilibrio e
- mantenere la coppia richiesta al motore inferiore al valore di coppia allo spunto.

I codici riportati nell'allegato E.1 sono stati utilizzati per la definizione dei differenti sistemi dinamici oltre che per la realizzazione tramite la funzione MATLAB **lqr** dei controllori di stato e degli osservatori. Una volta definiti i parametri di *gain* dei controllori e le matrici di stato

⁶sviluppato da MathWorks.

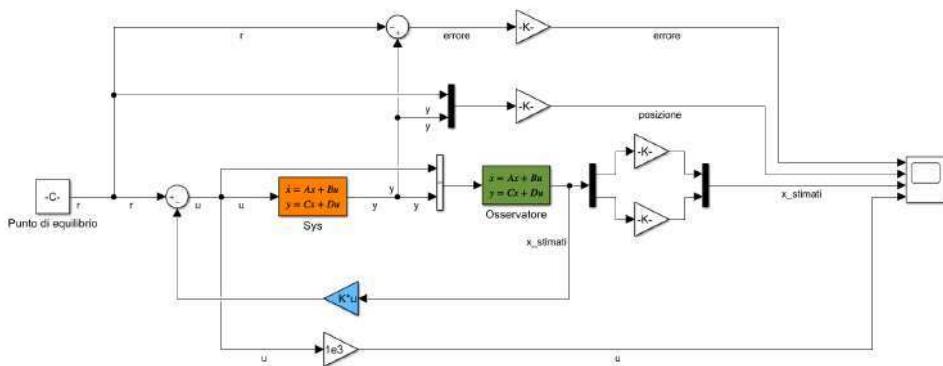


Figura 8.7: Modello Simulink con tempo continuo per il controllo del pendolo inverso in posizione di equilibrio stabile ed instabile.

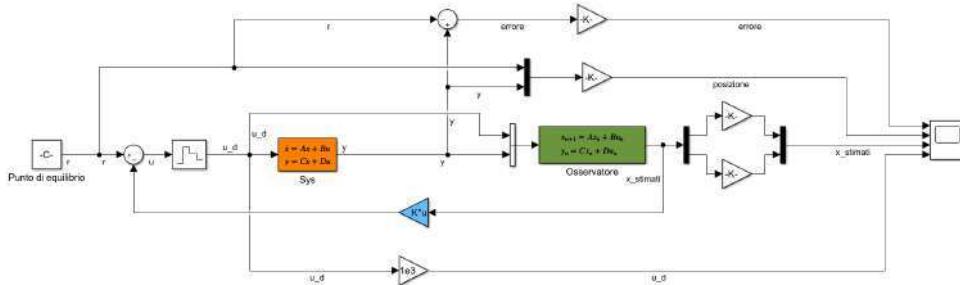


Figura 8.8: Modello Simulink con tempo discreto per il controllo del pendolo inverso in posizione di equilibrio stabile ed instabile.

dei sistemi dinamici da controllare e degli osservatori è possibile eseguire delle simulazioni tramite dei modelli Simulink sia in tempo continuo (figura 8.7), che in tempo discreto⁷ (figura 8.8) con tempo di campionamento pari a 10 ms.

8.3.1 Simulazione in posizione di equilibrio stabile

8.3.1.1 Simulazione in tempo continuo

In queste simulazioni si analizza il comportamento di un pendolo posto attorno al punto di equilibrio ma con uno scostamento iniziale di 10° e 25° dalla verticale. L'obiettivo del controllore in questa simulazione è di evitare che i sistemi oscillino attorno al punto di equilibrio, stabilizzandolo tramite l'effetto della coppia di reazione data dalla coppia applicata al volano.

⁷In analisi dei segnali e teoria del controllo per **segnale discreto** o **segnale a tempo discreto** si intende una serie di valori che si succedono nel tempo in corrispondenza di valori discreti di tempo. Ponendo la questione in altri termini è possibile immaginare un segnale discreto come il risultato di un'osservazione ad intervalli regolari di un segnale analogico (o continuo), questo processo è detto **campionamento**.

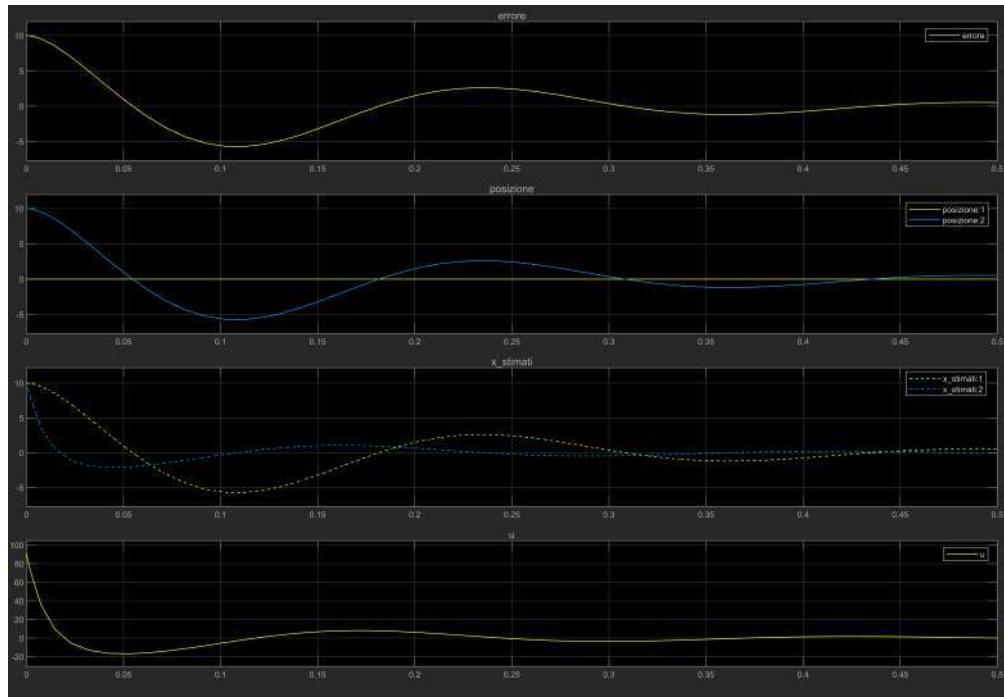


Figura 8.9: Risultati della simulazione del pendolo in posizione di equilibrio stabile in tempo continuo, posizione iniziale a 10°

Osservando i grafici riportati in figura 8.9 possiamo notare, riportato nel primo riquadro l'errore tra la posizione angolare del pendolo e la posizione di riferimento (in questo caso la posizione di equilibrio stabile), si osserva che l'errore si annulla ta 0.6 s e 0.7 s dall'inizio della simulazione. Nel secondo riquadro possiamo osservare l'evoluzione nel tempo della posizione angolare (riportata in blu), possiamo notare come l'overshooting massimo risulti attestarsi attorno al valore di 5° . Nell'ultimo riquadro viene riportato il segnale di coppia richiesta al motore (espressa in mN m), si può notare come in questo caso il valore massimo di coppia risulti inferiore al valore nominale di 112 mN m del motore.

Dai grafici in figura 8.10 possiamo osservare come il tempo di setting risulti pressoché invariato rispetto alla simulazione con condizione iniziale a 10° (t_s compreso tra 0.6 s e 0.7 s). dal secondo riquadro notiamo un overshooting massimo di circa 10° , dato il maggiore scostamento delle condizioni iniziali del sistema rispetto alla posizione di equilibrio in questa simulazione la coppia richiesta al motore risulta maggiore rispetto alla precedente. Tuttavia la coppia rimane poco al disopra del doppio del valore nominale attestandosi a 228 mN m .

8.3.1.2 Simulazione in tempo discreto

Partendo dal modello Simulink in tempo continuo possiamo realizzare un modello in tempo discreto inserendo dei blocchi di mantenimento del segnale discreto, nello specifico utilizziamo un blocco **zero-order hold**. Questo blocco ha la funzione di ricevere un segnale

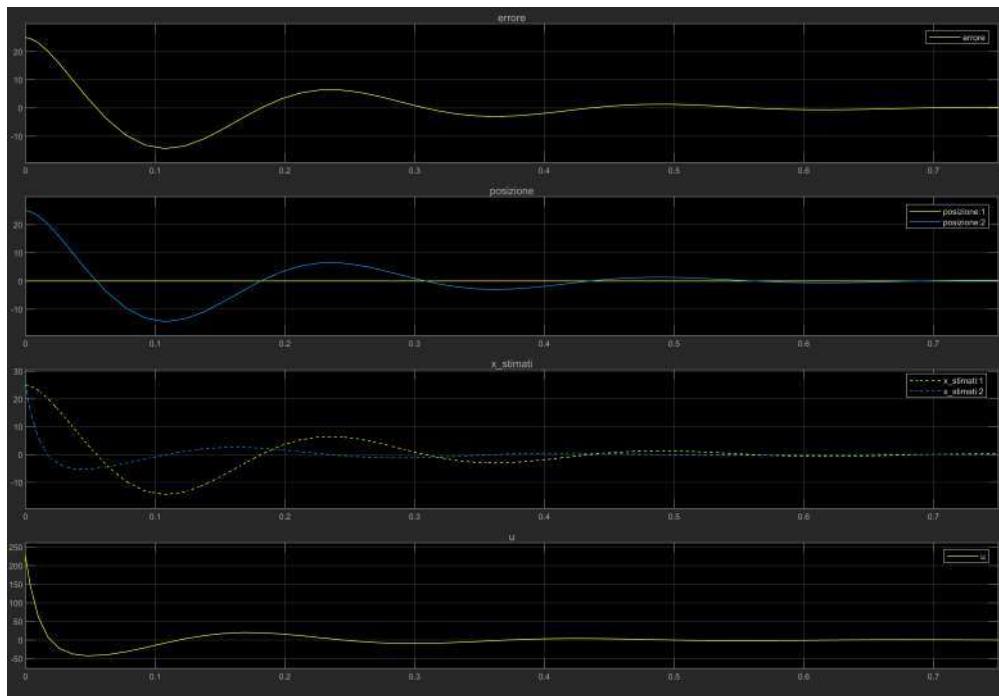


Figura 8.10: Risultati della simulazione del pendolo in posizione di equilibrio stabile in tempo continuo, posizione iniziale a 25°

discreto e lo converte in un segnale continuo nel tempo mantenendo il segnale al valore campionato per un intervallo di campionamento. Per quanto riguarda le condizioni iniziali ed i pesi utilizzati per queste simulazioni sono identici a quelli utilizzati per la simulazione in tempo continuo.

Le figure 8.11 e 8.12 riportano i grafici delle simulazioni in tempo discreto, confrontando i risultati ottenuti in continuo e in discreto notiamo che questi ultimi risultano pressoché identici ai primi.

In generale possiamo considerare i pesi L e Q utilizzati per queste simulazioni e riportati nello script pari a :

$$Q_{down} = \begin{bmatrix} 10^6 & 0 \\ 0 & 10^{-3} \end{bmatrix}; \quad R_{down} = 7 \cdot 10^7 \quad (8.22)$$

come un buon punto di partenza per lo sviluppo del controllore in tempo reale.

8.3.2 Simulazione in posizione di equilibrio instabile

8.3.2.1 Simulazione in tempo continuo

In queste simulazioni si analizza il comportamento di un pendolo posto attorno al punto di equilibrio ma con uno scostamento iniziale di 15° dalla verticale e velocità angolare nulla nella prima simulazione, una velocità angolare di 5 rad s^{-1} nella seconda e -5 rad s^{-1} nel-

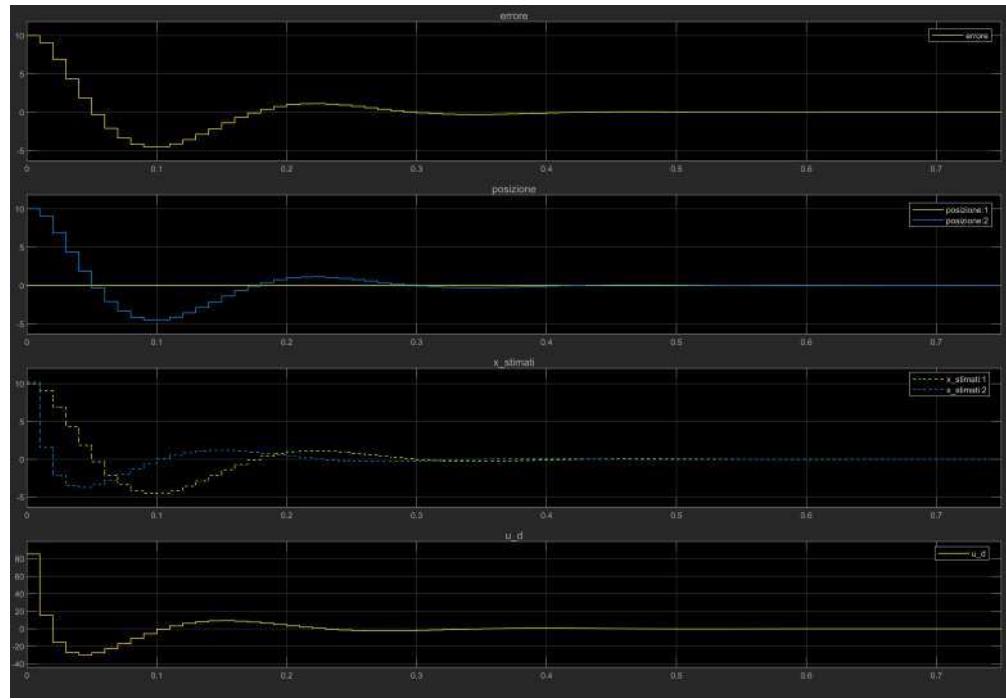


Figura 8.11: Risultati della simulazione del pendolo in posizione di equilibrio stabile in tempo discreto, posizione iniziale a 10°

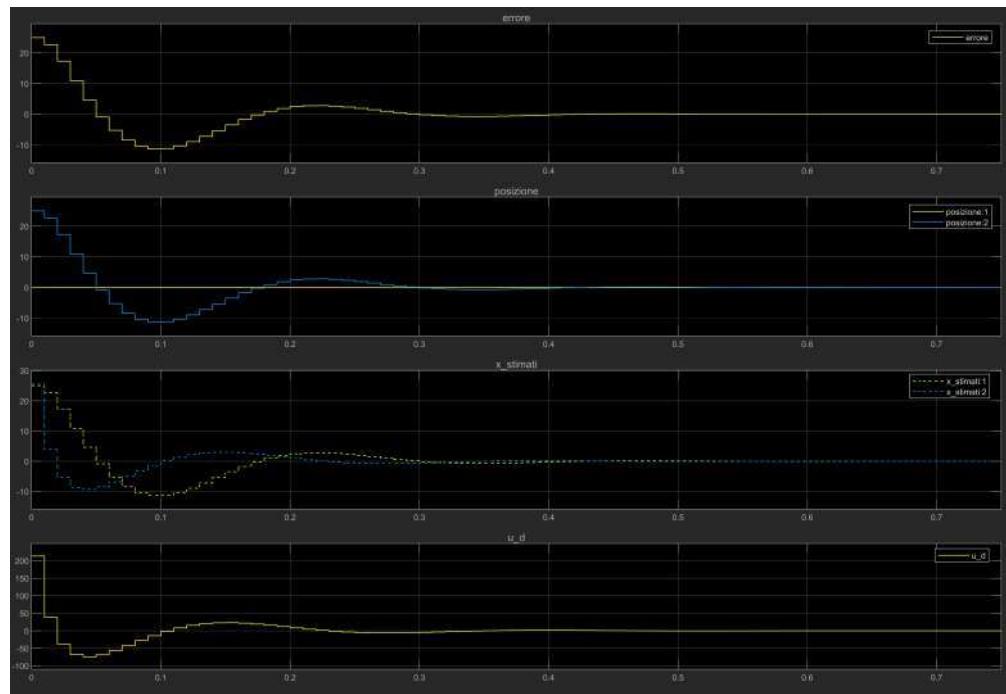


Figura 8.12: Risultati della simulazione del pendolo in posizione di equilibrio stabile in tempo discreto, posizione iniziale a 25°

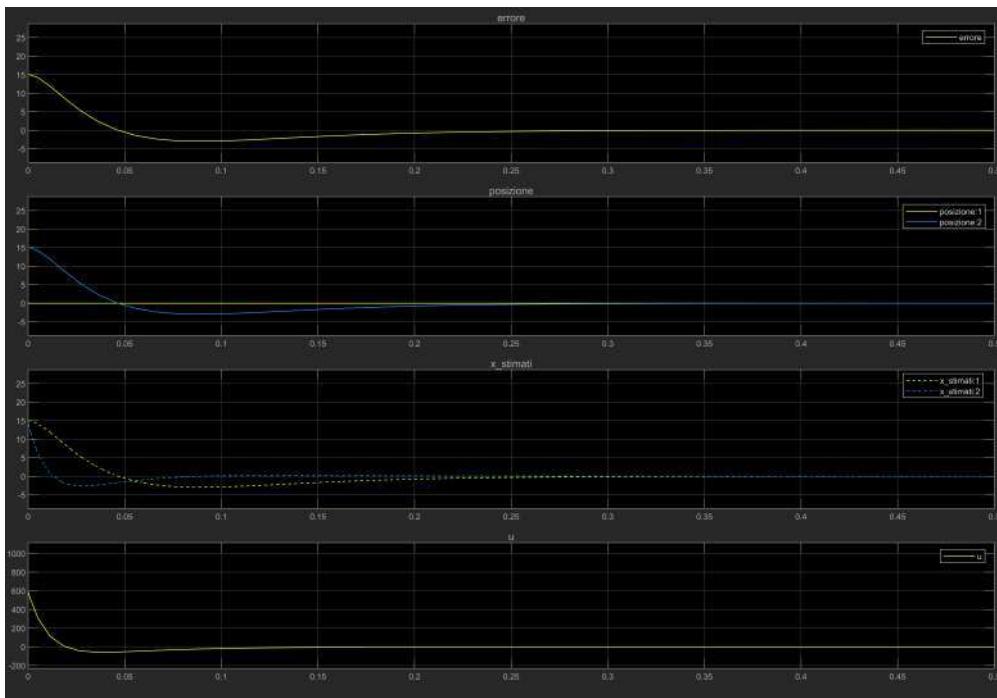


Figura 8.13: Simulazione del pendolo in posizione di equilibrio instabile con modello Simulink in tempo continuo, condizioni iniziale a 15° e 0 rad s^{-1}

la terza. L'obiettivo del controllore in questa simulazione è di evitare che i sistemi oscilli attorno al punto di equilibrio instabile compensando la forza di richiamo e stabilizzandolo tramite l'effetto della coppia di reazione data dalla coppia applicata al volano.

Osservando i grafici riportati in figura 8.13 possiamo notare riportato nel primo riquadro l'errore tra la posizione angolare del pendolo e la posizione di riferimento (in questo caso la posizione di equilibrio instabile), si osserva che l'errore si annulla ta 0.35 s e 0.40 s dall'inizio della simulazione. Nel secondo riquadro possiamo osservare l'evoluzione nel tempo della posizione angolare (riportata in blu), possiamo notare come l'overshooting massimo risulti attestarsi al disotto di 5 gradi. Nell'ultimo riquadro viene riportato il segnale di coppia richiesta al motore (espressa in , si può notare come in questo caso il valore massimo di coppia risulti ampiamente superiore al valore nominale di 112 mN m del motore piuttosto attorno ai 600 mN m . È tuttavia possibile elaborare alcune considerazioni aggiuntive a proposito del valore massimo di coppia richiesto dal controllore simulato. In primo luogo la coppia massima richiesta al motore dal controllore sebbene circa cinque volte superiore alla coppia nominale risulta comunque inferiore al valore di coppia Il spunto di 1220 mN m . Una seconda osservazione che si può fare riguardo alla coppia richiesta è come questa passi dal valore massimo di circa 600 mN m a essere quasi nulla in meno di 0.05 s , terza ed ultima considerazione è possibile per il motore erogare coppie superiori a quella nominale ed inferiori a quella allo spunto per brevi periodi sebbene questo comporti dover alimentare

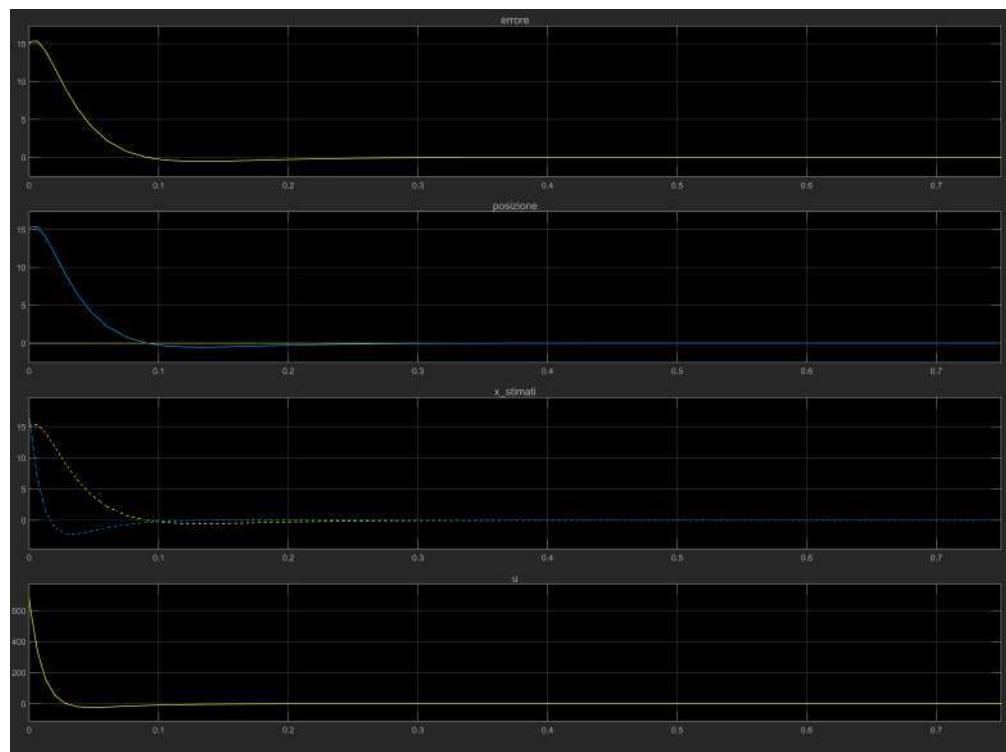


Figura 8.14: Simulazione del pendolo in posizione di equilibrio instabile con modello Simulink in tempo continuo, condizioni iniziale a 15° e 5 rad s^{-1}

il motore con una tensione maggiore a quella nominale di 24 .

Osservando i grafici in figura 8.14 possiamo notare come introducendo come condizione iniziale una velocità angolare del pendolo di 5 rad s^{-1} che corrisponde ad una velocità tangenziale del pendolo di 0.45 m s^{-1} la coppia necessaria a stabilizzare il pendolo in posizione di equilibrio instabile risulti solo di circa 80 mN m superiore al caso precedente. Possiamo inoltre notare che in questo caso l'overshooting massimo del sistema risulti pressoché nullo. Osservando i grafici in figura 8.15 possiamo notare alcune sostanziali differenze rispetto ai risultati delle precedenti simulazioni. In primo luogo malgrado si imponga una condizione iniziale relativa alla velocità angolare di -5 rad s^{-1} si osserva il valore più basso di coppia massima richiesta al motore. Questa riduzione di coppia ci suggerisce, in accordo con il modello matematico, che una condizione iniziale di velocità angolare negativa presuppone che il pendolo si stesse già muovendo in direzione del punto di equilibrio instabile. Possiamo inoltre notare che malgrado l'energia introdotta nel sistema sia minore rispetto ai casi precedenti il valore di overshooting risulta tuttavia il più alto superando 6° di scostamento dalla posizione desiderata. Questo ci suggerisce che nel caso il pendolo tenda già a muoversi nella direzione desiderata il controllore riuscirà comunque a stabilizzare il sistema ma anche che sebbene introduca una quantità di energia inferiore al caso opposto il controllore presenterà maggiori difficoltà a gestire l'energia già contenuta nel sistema risultando in un overshooting maggiore.

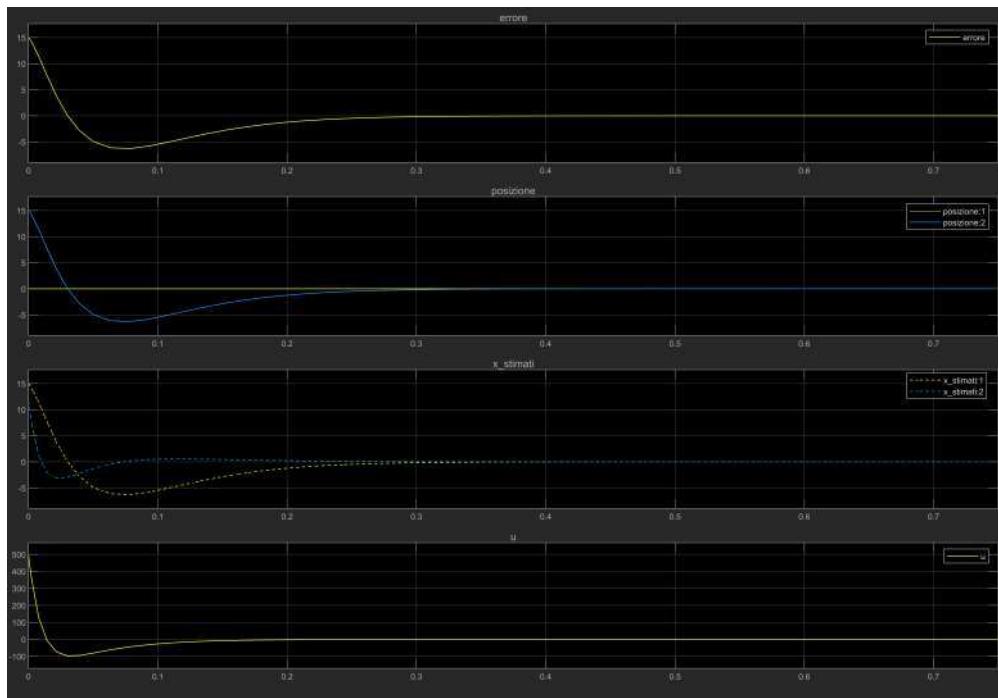


Figura 8.15: Simulazione del pendolo in posizione di equilibrio instabile con modello Simulink in tempo continuo, condizioni iniziale a 15° e -5 rad s^{-1}

8.3.2.2 Simulazione in tempo discreto

similmente a quanto fatto per le simulazioni in tempo discreto per il sistema nel punto di equilibrio stabile anche in questo caso ripetiamo le tre simulazioni svolte in continuo allo scopo di confrontare risultati ottenuti.

Osservando i grafici riportati in figura 8.16 notiamo un comportamento pressoché identico a quello osservabile nella simulazione in tempo continuo con medesime condizioni iniziali (figura 8.13), in particolare si nota anche in questo caso un valore di overshooting di poco al disotto di 5° . Nel caso del sistema in tempo discreto osserviamo una leggera riduzione della coppia massima richiesta al motore, tuttavia questa riduzione comporta anche un aumento della coppia richiesta al motore (200 mN m nel caso della simulazione discreta contro qualche decina nella simulazione in continuo) per correggere l'overshooting del sistema.

Osservando i grafici in figura 8.17 possiamo notare che anche in questo caso la simulazione in discreto presenta un comportamento principalmente paragonabile alla simulazione in continuo tranne per quanto riguarda il valore di overshooting e di coppia massima richiesta al motore. Notiamo infatti che il valore massimo di overshooting risulta essere di qualche grado, questo si discosta in maniera più rilevante dalla simulazione in continuo rispetto al caso precedente. Similmente a quanto osservato in precedenza anche in questo caso il valore di coppia massima richiesta dal controllore discreto al motore risulta inferiore a quella del controllore continuo, tuttavia anche in questo caso si richiede un maggiore intervento al

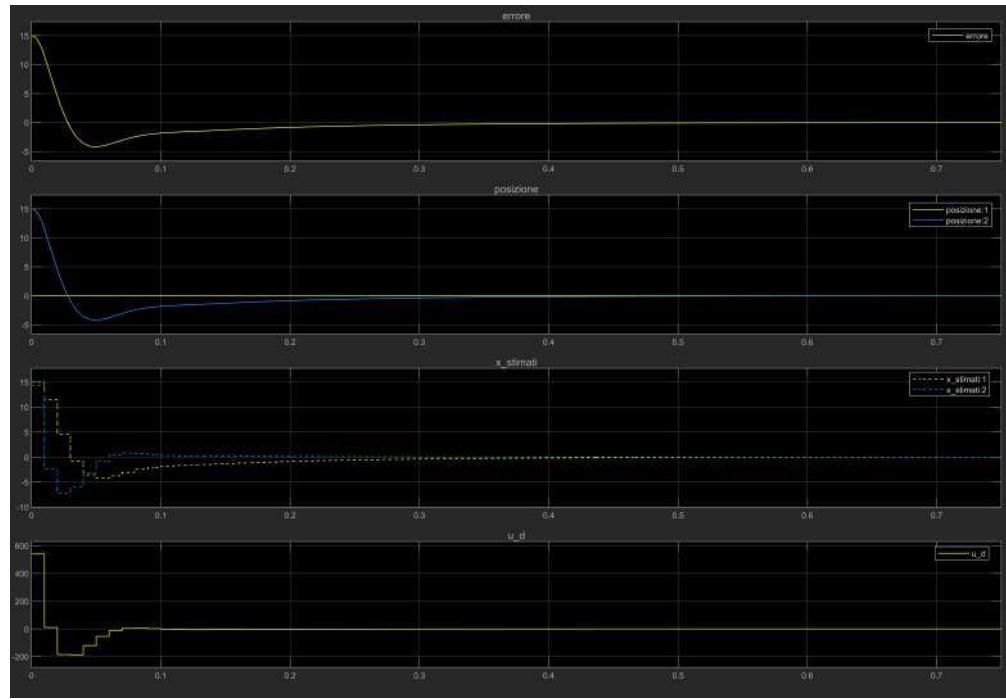


Figura 8.16: Simulazione del pendolo in posizione di equilibrio instabile con modello Simulink in tempo discreto, condizioni iniziale a 15° e 0 rad s^{-1}

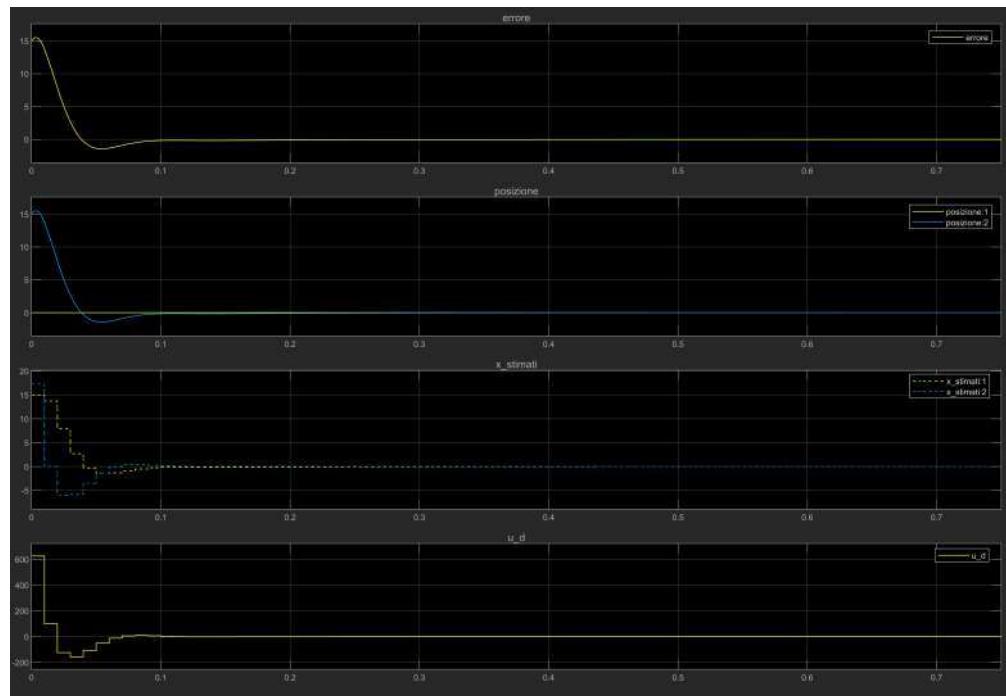


Figura 8.17: Simulazione del pendolo in posizione di equilibrio instabile con modello Simulink in tempo discreto, condizioni iniziale a 15° e 5 rad s^{-1}

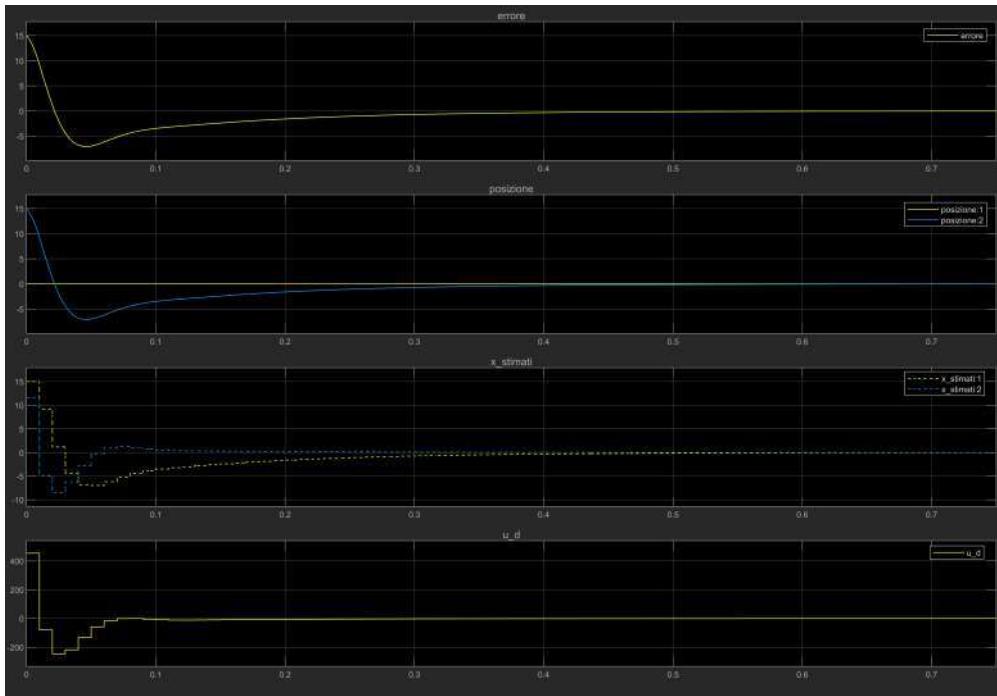


Figura 8.18: Simulazione del pendolo in posizione di equilibrio instabile con modello Simulink in tempo discreto, condizioni iniziale a 15° e -5 rad s^{-1}

motore per bilanciare l'overshooting maggiore.

Osservando i grafici riportati in figura 8.18 possiamo confermare le osservazioni fatte in precedenza per cui il comportamento generale del sistema non varia in maniera significativa da controllore discreto e controllore continuo. Possiamo inoltre notare grosso modo le stesse differenze riscontrate nei casi precedenti, un maggiore overshooting del sistema discreto accompagnato da una minore coppia massima richiesta al motore e un intervento più incisivo per correggere la deviazione della posizione data dall'overshooting.

In generale possiamo affermare che nelle simulazioni discrete sebbene il comportamento non differisca drasticamente da quello osservato nelle simulazioni in continuo il controllore discreto risulta essere meno "aggressivo" il che si traduce in una dinamica inferiore rispetto al controllore continuo. Questo si rende particolarmente evidente dal fatto che i sistemi discreti presentino le tre condizioni simulate una minore coppia massima ed una maggiore coppia di correzione dell'overshooting.

In generale possiamo comunque considerare i pesi L e Q utilizzati per queste simulazioni e riportati nello script pari a :

$$Q_{down} = \begin{bmatrix} 10^3 & 0 \\ 0 & 10^{-4} \end{bmatrix}; \quad R_{down} = \cdot 10^{16} \quad (8.23)$$

come un discreto punto di partenza per lo sviluppo del controllore in tempo reale.

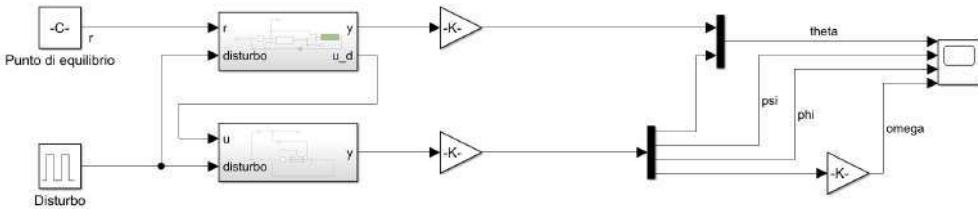


Figura 8.19: Modello Simulink con tempo continuo per il controllo del pendolo inverso in posizione di equilibrio instabile con modello di 4° ordine.

8.3.2.3 Simulazione in tempo discreto del sistema di quarto ordine

Allo scopo di meglio comprendere quale potrebbe essere il reale comportamento del sistema fisico è stato realizzato un modello Simulink che implementi un modello del sistema di 4° ordine.

Il modello Simulink riportato nella figura 8.19 è composto da un sottosistema che raccoglie un modello simile a quello utilizzato per le simulazioni in tempo discreto eccetto per il fatto che il sistema del pendolo è realizzato tramite rappresentazione a blocchi (come il sistema riportato in figura 8.1) allo scopo di poter introdurre un disturbo sul segnale di posizione. Si può notare inoltre un secondo sottosistema composto da un modello a blocchi del sistema di quarto ordine costruito in maniera tale da presentare un uscita per ciascuno degli stati, utilizzando questo sistema possiamo pertanto visualizzare l'andamento nel tempo dei quattro stati del sistema di 4° ordine.

La simulazione è stata eseguita utilizzando i pesi L e Q identificati in precedenza per il controllore in posizione di equilibrio instabile e con una condizione iniziale di posizione angolare del pendolo pari a 15°.

Osservando i grafici riportati in figura 8.20 si può notare nel primo riquadro l'andamento della posizione restituita da entrambi i sistemi. Questo grafico ha lo scopo, oltre di illustrare lo stato di posizione angolare del pendolo, di confrontare il comportamento dei due sistemi allo scopo di verificare che non si instauri una discrepanza tra i due. Possiamo notare che le due curve risultano perfettamente sovrapposte in ogni istante della simulazione, pertanto possiamo considerare gli stati riportati nei grafici successivi validi e corrispondenti al comportamento del sistema controllato. Dal primo grafico possiamo inoltre notare la condizione iniziale di posizione angolare e i disturbi pari a 10° di spostamento inseriti ad intervalli regolari di 0.2 s a partire da $t = 0.4$ s. Da questo grafico possiamo anche notare come il controllore riesca a riportare ogni volta il sistema in posizione di equilibrio instabile.

Nel secondo riquadro possiamo notare il grafico riportante l'andamento della velocità an-



Figura 8.20: Simulazione del pendolo in posizione di equilibrio instabile con modello Simulink in tempo discreto, condizioni iniziale a 15° e -5 rad s^{-1}

Iare del pendolo, le considerazioni che possiamo trarre da questa curva non differiscono da quelle tratte dallo stato di posizione. Il terzo riquadro presenta il valore di posizione angolare del volano nel tempo, questo grafico assieme a quello riportato nel quarto ed ultimo riquadro risultano essere i più interessati e quelli da cui possiamo trarre alcune considerazioni sul sistema reale che finora non era stato possibile elaborare. In particolare dall'andamento della velocità angolare del volano (in questo caso espressa in giri al minuto) possiamo notare un comportamento alquanto inaspettato. Se si osserva attentamente il grafico si può notare come la velocità del volano tenda ad aumentare ogni qualvolta qì l'controllore intervenga richiedendo una variazione di coppia al motore allo scopo di stabilizzare il pendolo. Sebbene l'incremento di velocità risulti più marcato all'inizio e tenda a ridursi in seguito si instaura un regime di rotazione continua del volano. Di fatto questa rotazione non comporta tuttavia una perdita di efficacia del controllore come si può ben notare dai primi due grafici.

8.3.3 Swing-up del pendolo

Sono stati realizzati anche due modelli Simulink per la simulazione della fase di swing-up, questi modelli utilizzano due apporci differenti. La prima simulazione sfrutta un segnale di input costituito da una pulsazione con periodo pari a $\frac{1}{f_n}$ dove f_n rappresenta la frequenza naturale del pendolo. Questo segnale sfrutta di fatto il fenomeno di risonanza, questo porta

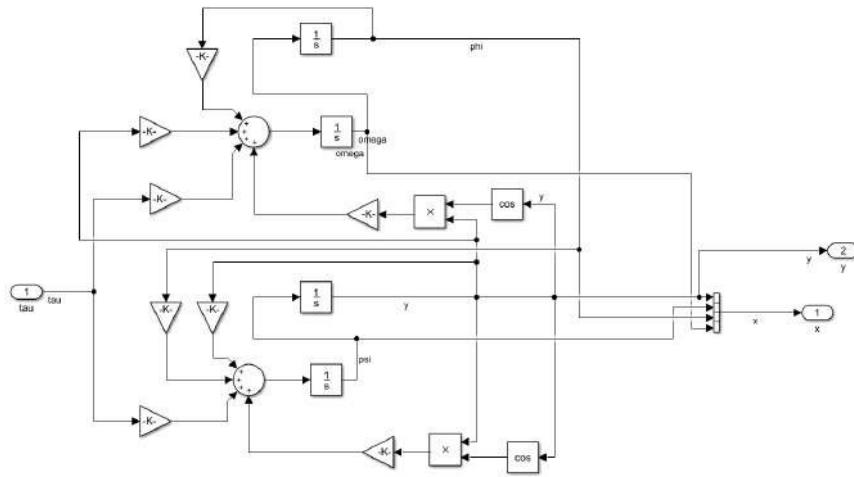


Figura 8.21: Modello Simulink non lineare

il sistema ad oscillare alla propria frequenza naturale con un'ampiezza via via crescente. Il secondo approccio si basa sulla conversione dell'energia cinetica immagazzinata nella rotazione del volano in energia potenziale gravitazionale. In questo approccio si accelera il volano fino al punto in cui l'energia cinetica rotazionale immagazzinata in esso è pari all'energia potenziale gravitazionale del pendolo in posizione di equilibrio instabile. Quando la velocità di rotazione è sufficiente si ferma improvvisamente il motore questo fa sì che l'energia precedentemente immagazzinata nel volano viene trasformata in energia potenziale del sistema, questa trasformazione porta il pendolo ad alzarsi in posizione verticale.

8.3.3.1 Sistema non lineare

Allo scopo di realizzare una simulazione che rappresentasse fedelmente il sistema reale si è deciso di realizzare un modello Simulink non lineare del pendolo.

Essendo la fase di swing-up uno spostamento del pendolo dalla posizione di equilibrio stabile alla posizione di equilibrio instabile non è possibile attuare le semplificazioni fatte in precedenza. Riprendendo le equazioni del sistema (7.27) a pagina 57

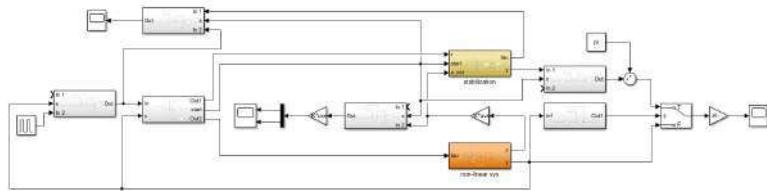


Figura 8.22: Modello Simulink per la fase di swing-up con approccio di risonanza

$$\theta = \psi$$

$$\psi = \dot{\psi} = -\frac{(L_p M_w + L_c M_p) g \cos(\theta) + \tau + \eta_\theta \psi - \eta_\phi \omega}{L_p^2 M_w - I_w + I_p}$$

$$\phi = \omega$$

$$\omega = \dot{\omega} = \frac{(I_w L_p M_w + I_w L_c M_w) g \cos(\theta) + (L_p^2 M_w + I_p) (\tau - \eta_\phi \omega) I_w \eta_\theta \psi}{I_w L_p^2 M_w - I_w^2 + I_p I_w}$$

che descrivono nel dettaglio il comportamento del sistema possiamo notare che l'equazione (7.27b) e l'equazione (7.27a) contengono entrambe dei membri con funzioni trigonometriche. Queste qualora si lavorasse in prossimità di un punto di equilibrio potrebbero essere eliminate tramite linearizzazione del sistema applicando l'approssimazione per piccoli angoli,⁸ tuttavia a causa dello spostamento da una posizione all'altra questa approssimazione non è valida. Osservando il modello Simulink riportato in figura 8.21 possiamo notare lo schema a blocchi corrispondente al pendolo non linearizzato.

8.3.3.2 Swing-up con metodo di risonanza

La prima simulazione eseguita utilizza l'approccio legato al fenomeno di risonanza, si è realizzato un modello Simulink (riportato in figura 8.22) che produce un segnale impulsivo con periodo pari a $\frac{1}{f_n}$, questo dovrebbe portare il sistema pendolo ad oscillare con ampiezza crescente fino a che la posizione angolare non ricada nella finestra di stabilizzazione del controllore. Come il pendolo entra nella finestra di stabilizzazione il controllore interverrà allo scopo di stabilizzare il sistema in posizione di equilibrio instabile.

Utilizzando il codice Matlab riportato a pagina 213 sono stati calcolati i valori dei vari *gain* utilizzati nel modello non lineare ed è inoltre stato calcolato il periodo corrispondente alla

⁸L'approssimazione per piccoli angoli è una semplificazione per angoli tendenti a zero delle funzioni trigonometriche di base a funzioni più basilari. Queste approssimazioni sono correntemente utilizzate in numerosi ambiti di fisica ed ingegneria. Si notti infatti che le funzioni trigonometriche generalmente utilizzate in questi ambiti si possono risultare essere delle approssimazioni lineari e quadratiche, si ha infatti $\sin(\theta) \sim \theta$, $\cos(\theta) \sim 1 - \frac{\theta^2}{2}$, $\tan(\theta) \sim \theta$.

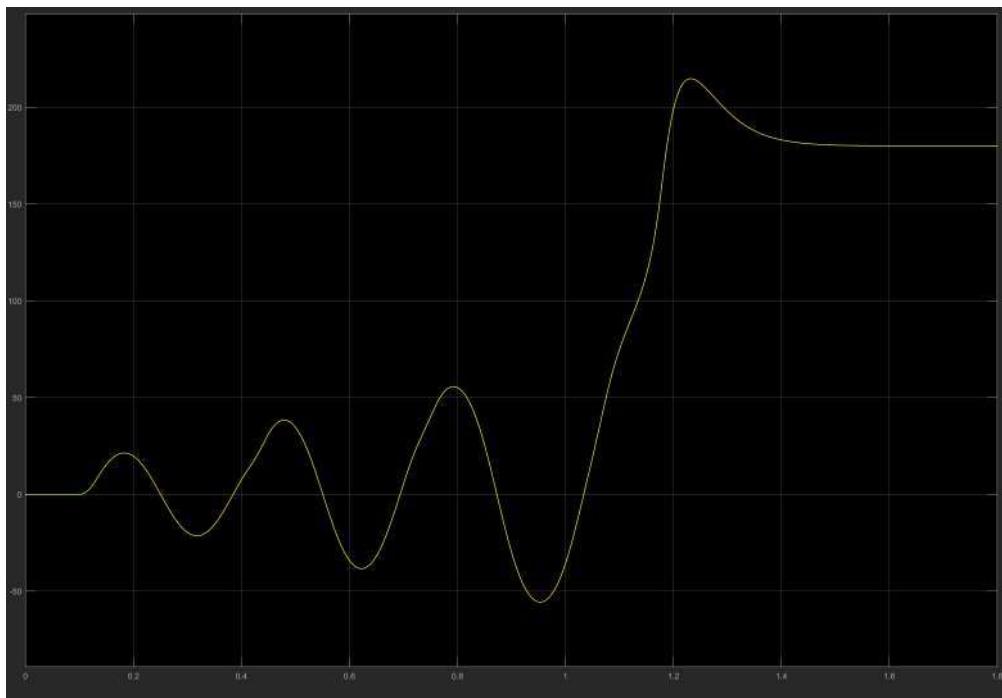


Figura 8.23: Posizione angolare del pendolo durante la fase di swing-up metodo di risonanza

frequenza naturale del pendolo

$$T_n = 2\pi \sqrt{\frac{I_p + I_w + M_w L_p^2}{M_p} + M_w g L_c} \quad (8.24)$$

Dalla simulazione otteniamo il grafico della posizione riportato in figura 8.23 dove possiamo notare chiaramente il comportamento oscillatorio del pendolo prima della stabilizzazione da parte del controllore in posizione di equilibrio instabile.

Osservando il grafico della posizione possiamo notare come il sistema impiaghi relativamente poche oscillazioni per entrare nell'intervallo operativo del controllore, questo comportamento è dato dal fatto che il trasferimento di energia dal motore al sistema è massimizzato sfruttando la risonanza del sistema. Si può inoltre osservare come il controllore tenda ad accelerare il sistema, questo si può capire dalla variazione di pendenza della curva a circa $t = 1.15$ s e dal overshooting molto accentuato del sistema.

8.3.3.3 Swing-up con metodo delle energie

La seconda simulazione eseguita utilizza invece l'approccio legato al trasferimento di energia da cinetica a potenziale, si è realizzato un modello Simulink (riportato in figura 8.24) che sfrutta il segnale definito nel codice Matlab riportato a pagina 213 in maniera da accelerare il sistema fino a raggiungere l'energia cinetica necessaria a sollevare il pendolo. similmente a quanto avviene nel approccio utilizzato in precedenza nel momento in cui il pendolo en-

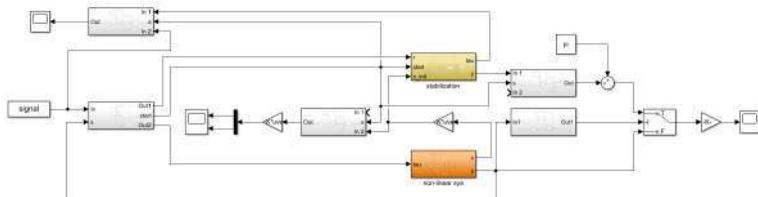


Figura 8.24: Modello Simulink per la fase di swing-up con approccio delle energie

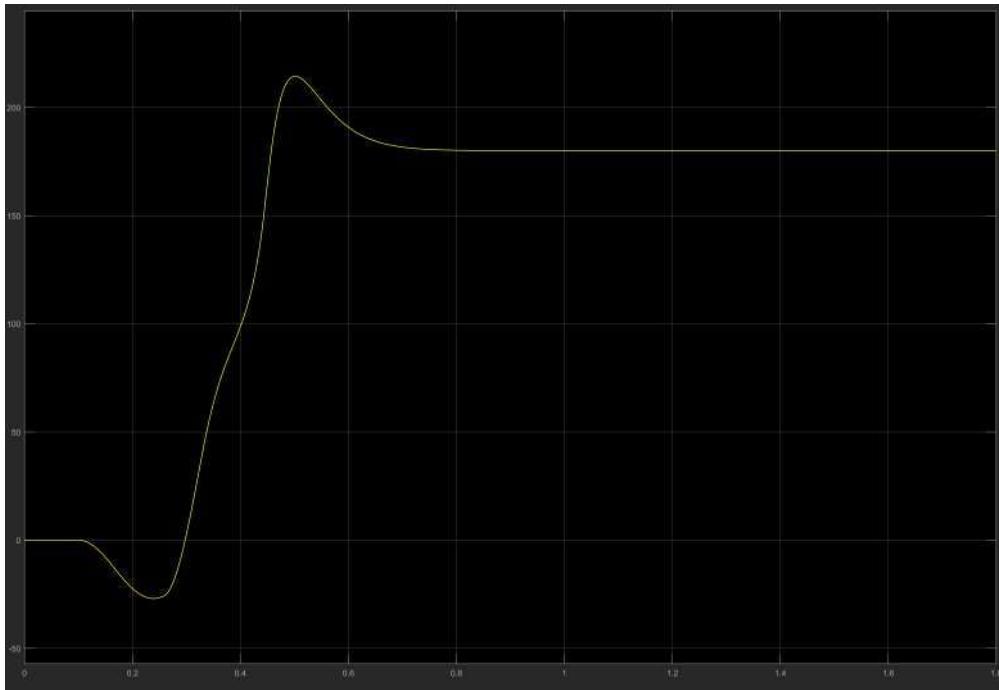


Figura 8.25: Posizione angolare del pendolo durante la fase di swing-up metodo delle energie

tra nell'intervallo operativo del controllore quest'ultimo subentra allo scopo di stabilizzare il sistema in posizione di equilibrio instabile.

Il segnale di coppia necessario alla fase di swing-up è definito partendo dall'energia potenziale del sistema per trovare il valore di velocità angolare minima del volano come

$$\omega_{min} = \sqrt{2 \frac{(T_c M_p + L_p M_w) g}{I_w}} \quad (8.25)$$

Dalla simulazione otteniamo il grafico della posizione riportato in figura 8.23 dove possiamo notare chiaramente come il comportamento del pendolo prima della stabilizzazione da parte del controllore in posizione di equilibri instabile si comporti differentemente rispetto all'approccio oscillatorio.

Osservando il grafico della posizione possiamo notare come il sistema inizialmente rispon-

da all'accelerazione del volano con una leggera oscillazione compensata in breve tempo dal blocco del motore e dall'immediata risposta del sistema che inizia a sollevarsi. Si può inoltre notare come in precedenza il momento in cui il sistema entra nell'intervallo di azione del controllore, questo è reso evidente come in nel caso precedente dalla variazione di pendenza della curva che suggerisce l'intervento del controllore. Anche in questo caso il controllore ha la tendenza ad accelerare il sistema per facilitarne la salita in posizione di equilibrio instabile. come in precedenza questo inserimento di energia nel sistema si traduce in overshooting del sistema relativamente marcato.

Capitolo 9

Controllo in tempo reale

Definiti i valori preliminari dei pesi delle funzioni di costo è dunque possibile passare alla realizzazione di un controllore in tempo reale, a questo scopo è necessario tuttavia la corretta caratterizzazione del sistema reale allo scopo di ridurre l'errore legato ai parametri di massa ed inerzia.

9.1 Sistemi di controllo ed acquisizione dati

Allo scopo di poter controllare il motore e misurare tramite l'encoder la posizione angolare si è scelto di utilizzare delle schede di controllo sviluppate da Faulhaber. Per il controllo in coppia del motore è stato scelto il controllore **MC 5005 S CO** mentre per l'acquisizione della posizione si è utilizzato il controllore **MCDC 3002 S CO**, per permettere la trasmissione dati tramite protocollo CAAOpen è stato utilizzato anche una scheda adattatore specifica per i moduli MC¹ di Faulhaber della serie **6501.00121**.

Allo scopo di alimentare tutti i componenti elettronici si è scelto di utilizzare un generatore di tensione da laboratorio, in grado di erogare corrente continua ad una tensione di 24 V e 5 V in quanto si tratta ancora di un prototipo. Per quanto riguarda i cablaggi, dato che al momento del montaggio non era ancora arrivato il collettore rotante e che, trattandosi di un prototipo, è possibile che si renda necessario modificare i cablaggi si è deciso di non inserire i cavi nel passaggio nell'albero del pendolo per non complicare eventuali interventi in fase di sperimentazione. Per permettere di alimentare l'encoder ad una tensione di 5 V e collegarlo alla scheda MC 3002 S CO è stato realizzato un piccolo circuito elettrico che ha l'ulteriore funzionalità di collegare mediante un unico collegamento BUSCAN anche il controllore del motore. La figura 9.2 illustra i collegamenti realizzati.

¹Motion Controller

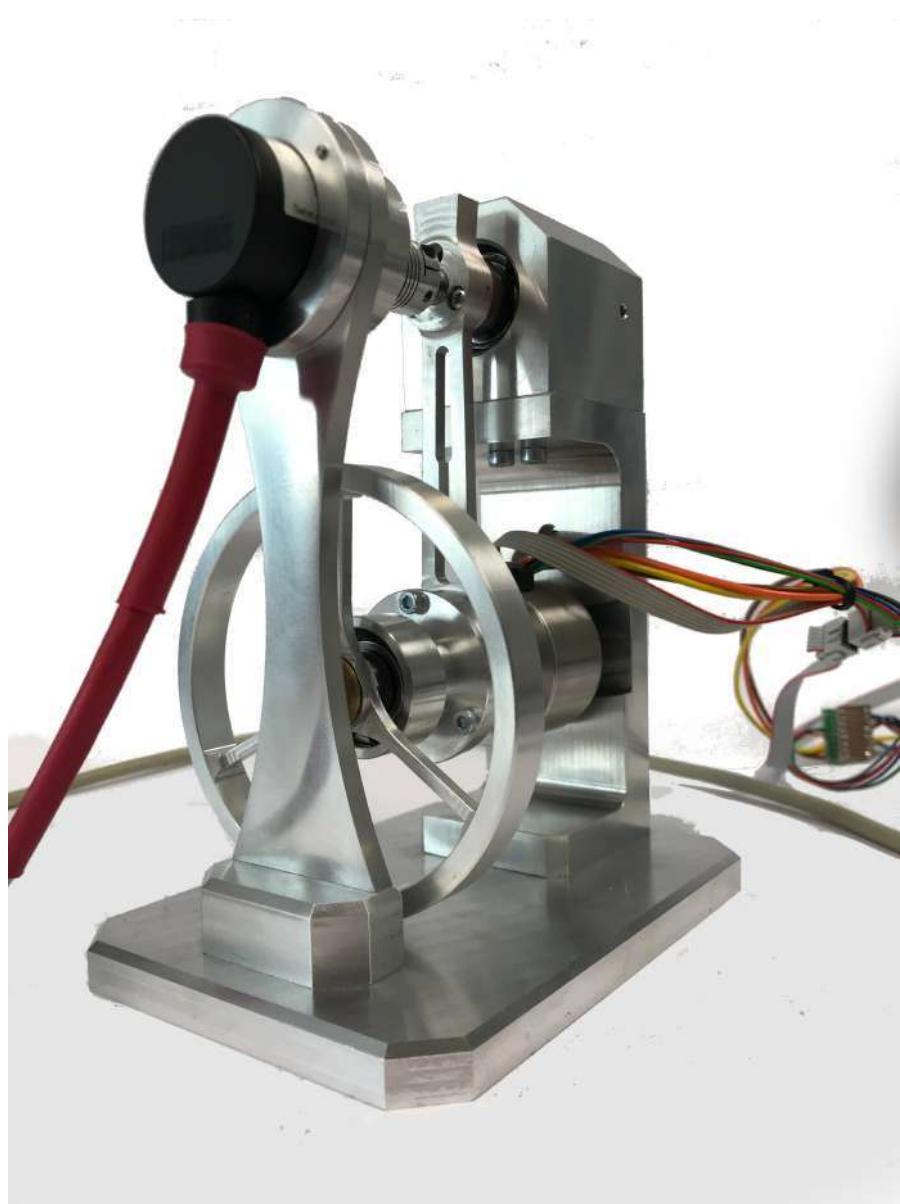


Figura 9.1: Pendolo inverso utilizzato per la realizzazione dei controllori in tempo reale

Tabella 9.1: **Motion Controller MC 5005 S CO - Dati tecnici**

Valori a 22 °C			
Alimentazione	U_p	12 ... 50	V DC
Alimentazione motore	U_{mot}	0 ... 50	V DC
Frequenza di modulazione di larghezza di impulso	f_{PWM}	100	kHz
Efficienza elettrica	η	97	%
Valore massimo di corrente (in continuo)	I_{cont}	5	A
Valore massimo di corrente (picco)	I_{max}	15	A
Corrente di <i>standby</i> (a $U_p = 24$ V)	I_{el}	0,06	A
Temperatura operativa		-40 ... +85	°C
Massa		230	g
Configurazione da Motion Manager 6.0		CANopen/USB	
Fieldbus		CANopen	

Tabella 9.2: **Motion Controller MC 3002 S CO - Dati tecnici**

Valori a 22 °C			
Alimentazione	U_p	8 ... 30	V DC
Alimentazione motore	U_{mot}	0 ... 30	V DC
Frequenza di modulazione di larghezza di impulso	f_{PWM}	78,12	kHz
Efficienza elettrica	η	95	%
Valore massimo di corrente (in continuo)	I_{cont}	2	A
Valore massimo di corrente (picco)	I_{max}	3	A
Corrente di <i>standby</i> (a $U_p = 24$ V)	I_{el}	0,04	A
Temperatura operativa		-25 ... +85	°C
Massa		16	g
Interfaccia		CAN (CiA)	
Protocollo		CANopen	

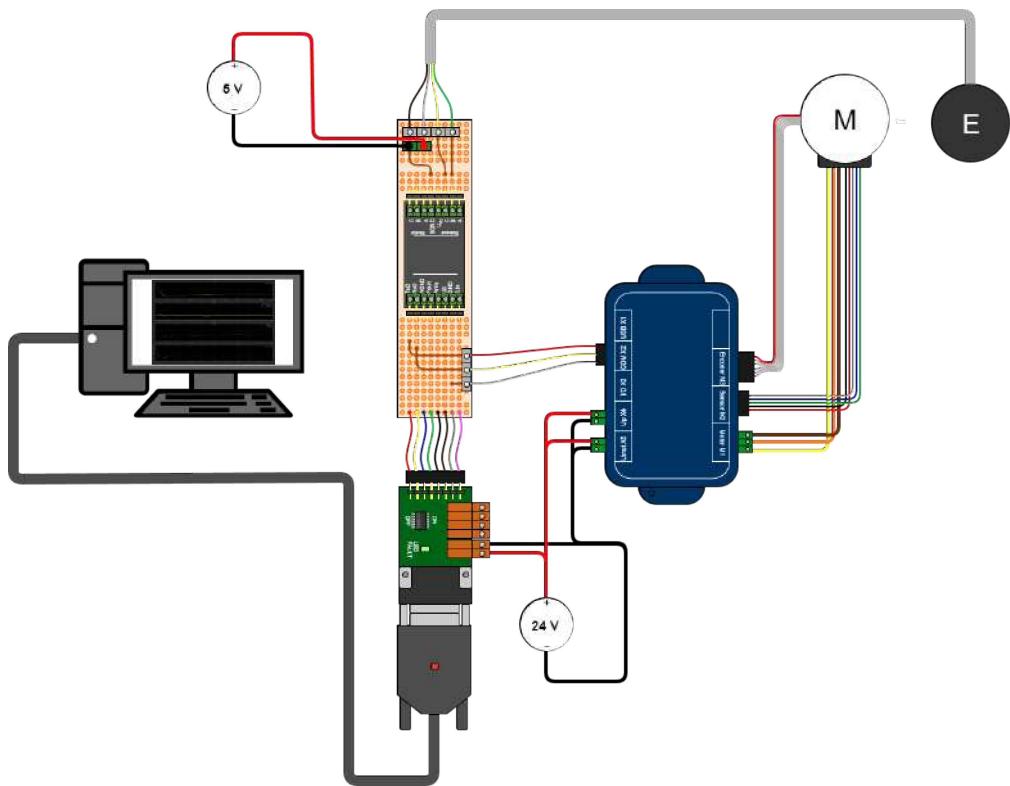
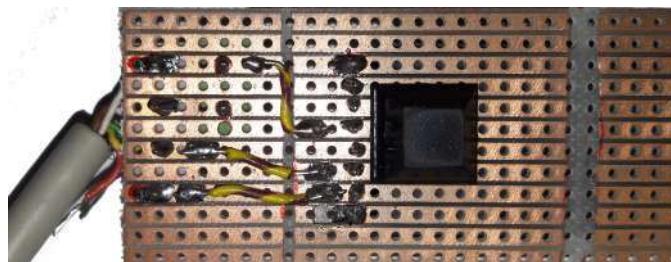
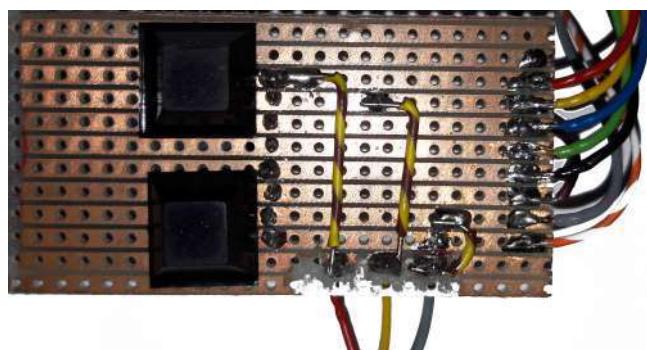


Figura 9.2: Schema dei cablaggi



(a) Collegamento con l'encoder



(b) Collegamento con l'adattatore BUSCAN

Figura 9.3: Dettagli dei collegamenti della scheda elettrica

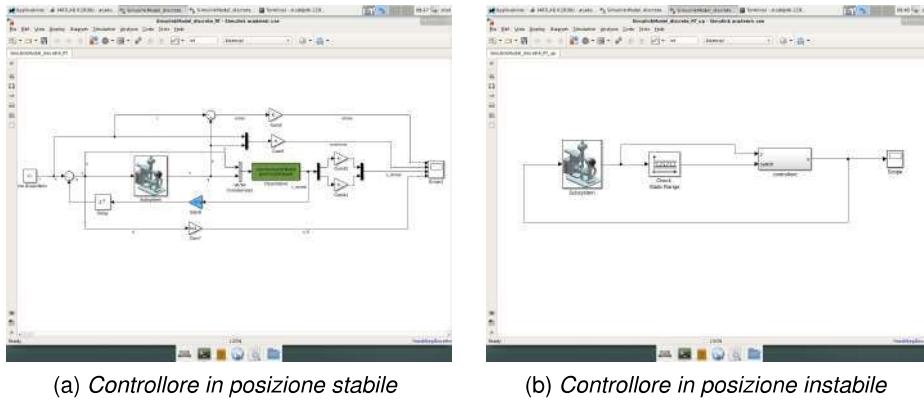


Figura 9.4: Modelli Simulink per il controllo in tempo reale

9.2 Identificazione dei paramenti del sistema

L'identificazione dei paramenti del sistema ha lo scopo di misurare i valori di massa e inerzie dei componenti realizzati in modo da realizzare un modello matematico che sia il più vicino possibile al modello reale. I principali paramenti da valutare sono:

- Il momento di inerzia dei carichi applicati al motore;
- Il momento di inerzia del pendolo;
- La frequenza naturale del pendolo.

Allo scopo di identificare il momento di inerzia del carico² applicato al motore è possibile sfruttare l'encoder fornito da Faulhaber assieme al motore ed analizzare la risposta del sistema ad una coppia con segnale a gradino come segnale di ingresso. Questa metodologia permette di misurare con accuratezza i carichi e quindi realizzare un controllore del motore più accurato, inoltre è possibile realizzare un'analisi di questo tipo anche con il software di *setup* dei moduli MC **Motion Manage 6.0**. Sfortunatamente a causa dell'encoder difettoso non è stato possibile realizzare questa analisi, possiamo tuttavia, allo scopo di validare i sistemi di controllo simulati, considerare i valori di inerzia forniti dal software di progettazione CAD NX sufficientemente attendibili.

9.3 Modello Simulink RT

Allo scopo di monitorare il comportamento del sistema reale tramite Simulink è necessario realizzare dei file che utilizzino il modello specificatamente realizzato.

²Il carico applicato al motore può essere considerato come la somma delle inerzie dei componenti messi in rotazione dal motore.

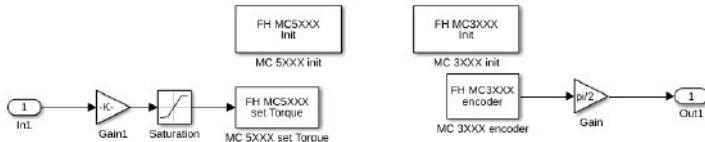


Figura 9.5: Sottosistema di collegamento con i controllori MC del pendolo

I modelli utilizzati per il controllo sono riportati in figura 9.4, osservando questi modelli possiamo notare chiaramente il sottosistema che rappresenta il pendolo fisico nel modello Simulink. Il sottosistema del pendolo (riportato in figura 9.5) ha la funzione di permettere la comunicazione tra il sistema di controllo³ operato dal computer e i driver di controllo del motore⁴ e di acquisizione dati dell'encoder⁵. Osservando lo schema riportato si può inoltre notare la presenza di un blocco di *gain* e uno di saturazione per trattare il segnale di coppia inviato al *Motion controller*, questi blocchi hanno la funzione di convertire il valore di coppia richiesta dal controllore al motore da un valore millesimale basato sulla coppia nominale M_n del motore e di limitare il valore massimo di coppia richiesta al motore saturando il segnale per valori superiori a 1'500 ed inferiori a -1'500. Si può anche notare un blocco di *gain* posto a condizionare il segnale dell'encoder, questo si rende necessario in quanto il driver dell'encoder restituisce la posizione angolare come segnale incrementale dove una rotazione del pendolo di 180° corrisponde ad un incremento, o decremento a dipendenza della direzione, di 2.

Allo scopo di evitare di danneggiare il sistema e per calibrare correttamente i modelli Simulink prima di realizzare i controllori di posizione sono stati eseguiti dei test atti a verificare il corretto funzionamento sia dei moduli MC che del sottosistema utilizzato per l'acquisizione dei dati. I risultati di tali test hanno portato a i parametri riportati nel paragrafo precedente

9.4 Controllo RT in posizione di equilibrio stabile.

Il primo controllore realizzato in tempo reale è riportato nella figura 9.6, osservando la figura notiamo la medesima struttura dei sistemi utilizzati in precedenza per le simulazioni⁶.

Allo scopo di ottenere un controllore efficace iniziamo a testare il sistema utilizzando i pesi trovati nel capitolo 8.3.1. Procedendo tramite un approccio iterativo sono stati testati numerosi valori di pesi identificando alla fine i seguenti valori

³In questo caso il sistema di controllo è composto dall'osservatore ridotto e dal controllore di stato.

⁴*Motion Controller MC5005 S CO*

⁵*Motion Controller MCDC 3002 S CO*

⁶capitolo 8.3 a pagina 74

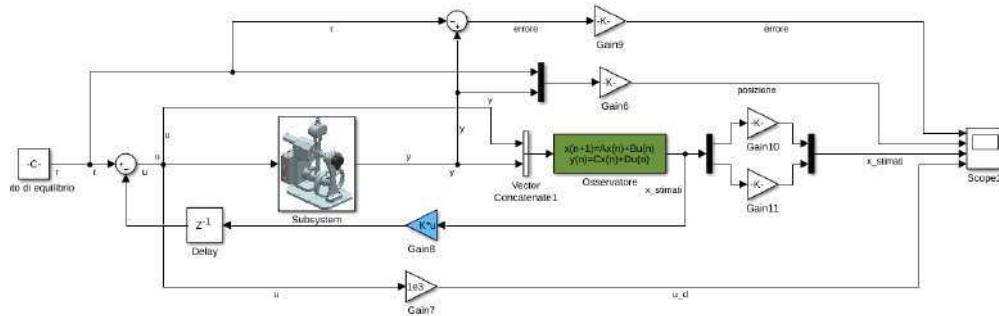


Figura 9.6: Modello Simulink del sistema controllato in posizione di equilibrio stabile

$$Q_{downRT} = \begin{bmatrix} 8 \cdot 10^{16} & 0 \\ 0 & 10^{-3} \end{bmatrix}; \quad R_{downRT} = 5 \cdot 10^{14} \quad (9.1)$$

L'utilizzo di questi pesi ha permesso la realizzazione di un controllore in grado di riportare rapidamente il pendolo in posizione di equilibrio stabile. In particolare il sistema sviluppato presenta un comportamento caratterizzato da un ridotto *overshooting* e dalla capacità di smorzare rapidamente la naturale tendenza del sistema ad oscillare. Osservando il pendolo controllato è stato possibile notare come il sistema risultasse pressoché insensibile ad eventuali piccoli disturbi di posizione contrastandoli rapidamente.

9.5 Controllo RT in posizione di equilibrio instabile

Il secondo controllore realizzato in tempo reale è riportato nella figura 9.7, possiamo notare la presenza di un blocco di controllo (*Check Static Range*). Quest'ultimo ha lo scopo di restituire un segnale di attivazione per il controllore qualora il pendolo si trovasse in una posizione angolare compresa tra 170° e 190° . L'utilizzo di questo intervallo operativo del controllore è reso necessario da due aspetti del sistema, in primo luogo il pendolo deve essere inizializzato in posizione di equilibrio stabile allo scopo fissare la posizione di riferimento dell'encoder. In secondo luogo è necessario limitare l'intervallo di lavoro del controllore attorno al punto di equilibrio per evitare che la coppia richiesta al motore vada a saturazione e rimanga tale per un intervallo di tempo troppo elevato, questo è dovuto ai sistemi di protezione del motore che intervengono per limitare l'accelerazione dello stesso allo scopo di evitare eventuali guasti al sistema.

Possiamo inoltre notare il blocco denominato controllore, questo sottosistema contiene al suo interno lo schema a blocchi necessario alla realizzazione del controllo di stato del sistema. Osservando la figura 9.8, che riporta lo schema contenuto nel sottosistema, possiamo notare la presenza di un blocco *switch*. Questo blocco ha la funzione di selezionare, in base

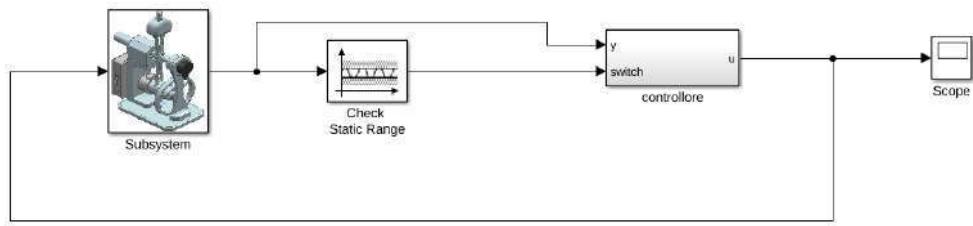


Figura 9.7: Modello Simulink del sistema controllato in posizione di equilibrio instabile

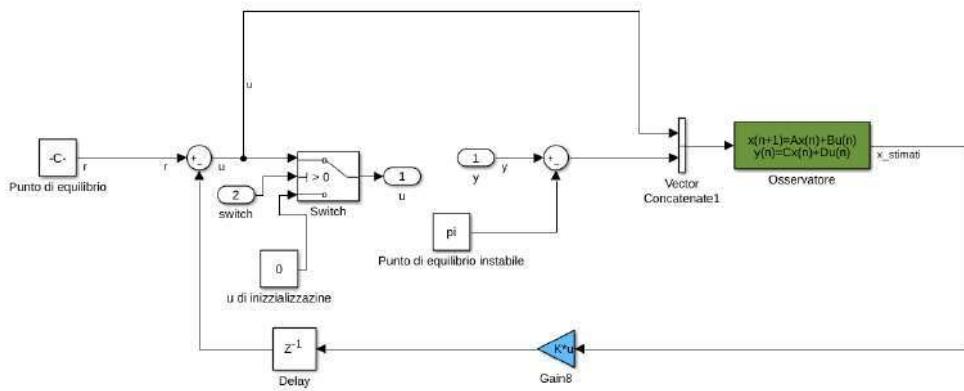


Figura 9.8

all'entrata *switch*, il segnale di coppia tra il valore calcolato dal controllore e zero, di fatto questo blocco funge da interruttore per attivare o disattivare il controllore.

Allo scopo di ottenere un controllore efficace iniziamo a testare il sistema utilizzando i pesi trovati nel capitolo 8.3.2. Procedendo tramite un approccio iterativo sono stati testati numerosi valori di pesi identificando alla fine i seguenti valori

$$Q_{upRT} = \begin{bmatrix} 5 \cdot 10^{16} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad R_{upRT} = 5 \cdot 10^{14} \quad (9.2)$$

In figura 9.10 possiamo osservare i grafici di coppia richiesta al motore espressa in valori millesimali, la coppia richiesta dal controllore espressa in la posizione in gradi.

Osservando il grafico della posizione (riportato nel terzo riquadro) possiamo notare come il sistema si stabilizzi in posizione di equilibrio instabile⁷. Dai grafici risulta chiaro l'intervento del controllore per stabilizzare il pendolo, in particolare dal grafico riportato nel primo riquadro notiamo come la coppia richiesta al motore continui ad oscillare tra i valori di -1'500 e di 1'500.

⁷Da notare che questo modello è realizzato fissando la posizione di equilibrio stabile a 180° pertanto la posizione di equilibrio instabile risulta essere a 0°

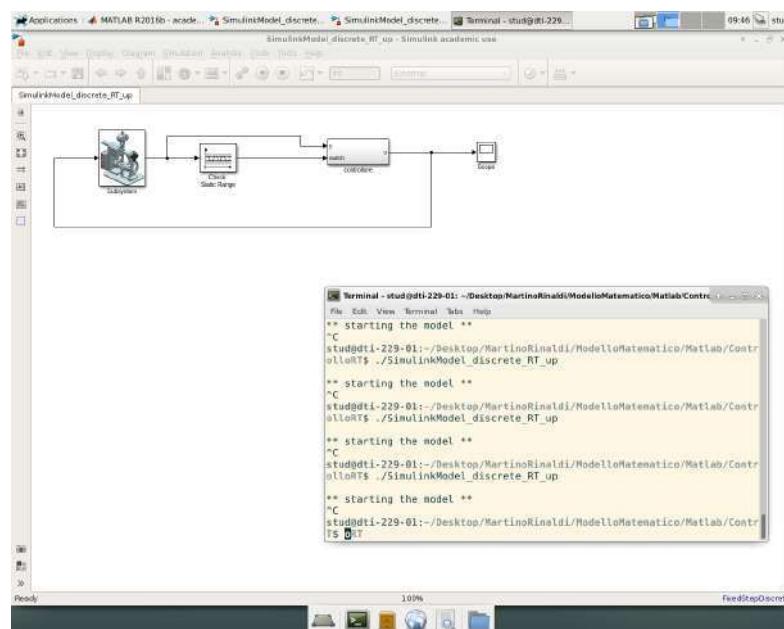


Figura 9.9: Avvio del programma di controllo in posizione instabile

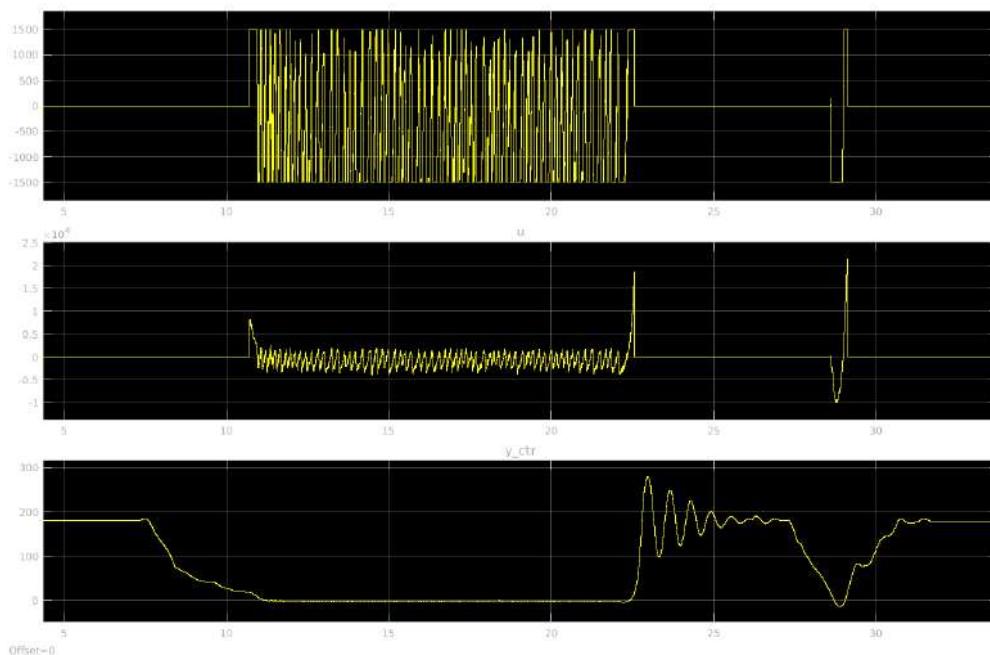


Figura 9.10

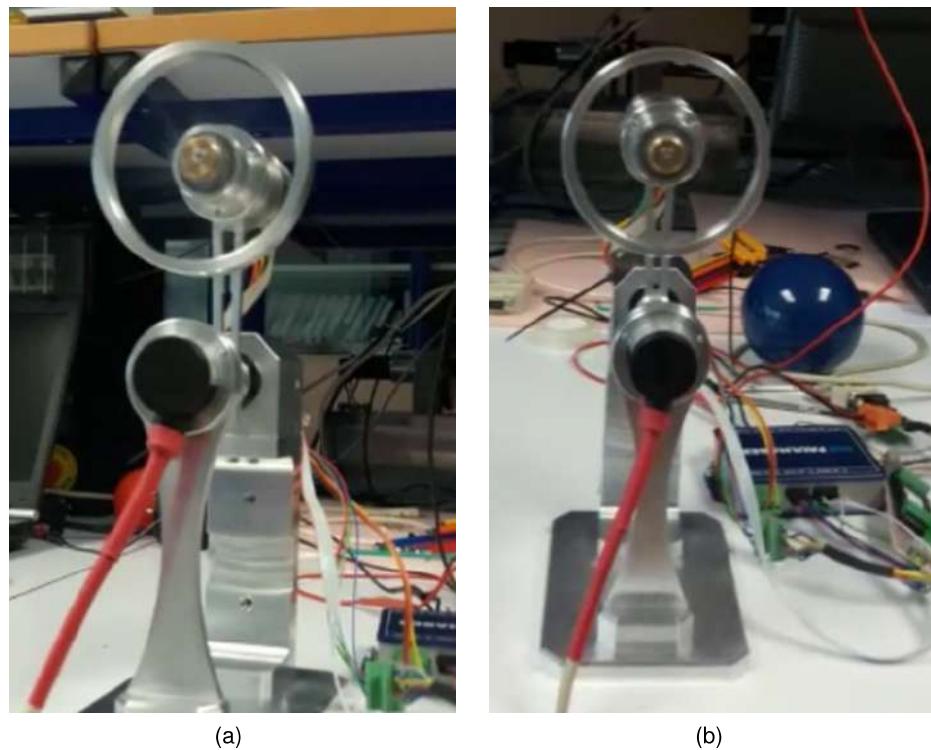


Figura 9.11: Pendolo inverso in posizione di equilibrio instabile

Riportato in figura 9.11 si può osservare il pendolo fisico stabilizzato in posizione di equilibrio instabile. Ulteriori test sono stati eseguiti e si sono constatate due problematiche che impediscono il corretto funzionamento del pendolo come dimostratore. La prima problematica è da ricondurre all'encoder che essendo incrementale necessita di essere in qualche modo azzerato in maniera ripetibile poiché qualunque errore in tal senso si ripercuoterebbe sulla stabilizzazione in posizione instabile del sistema. La seconda è da ricondurre al comportamento osservato simulando il sistema di 4° ordine⁸. È infatti possibile nel sistema reale notare come il volano tenda a ruotare costantemente ed anzi ad aumentare la velocità di rotazione tanto più il sistema viene perturbato. Questo comportamento può portare al blocco del motore da parte del modulo di controllo di Faulhaber allo scopo di evitare eventuali danni al motore. La combinazione di queste due problematiche risulta in un controllore con una relativamente bassa ripetibilità e particolarmente sensibile alla posizione iniziale del pendolo al momento dell'attivazione del programma.

Nonostante le difficoltà legate all'attivazione del controllore qualora si riuscisse a lanciare il programma ed a ottenere un sistema correttamente tarato è possibile controllare il pendolo stabilizzandolo in posizione di equilibrio instabile per un relativo lungo periodo di tempo. Il vincolo principale in tal senso è legato al motore che lavorando con una dinamica relativa-

⁸capitolo 8.3.2.3 a pagina 84

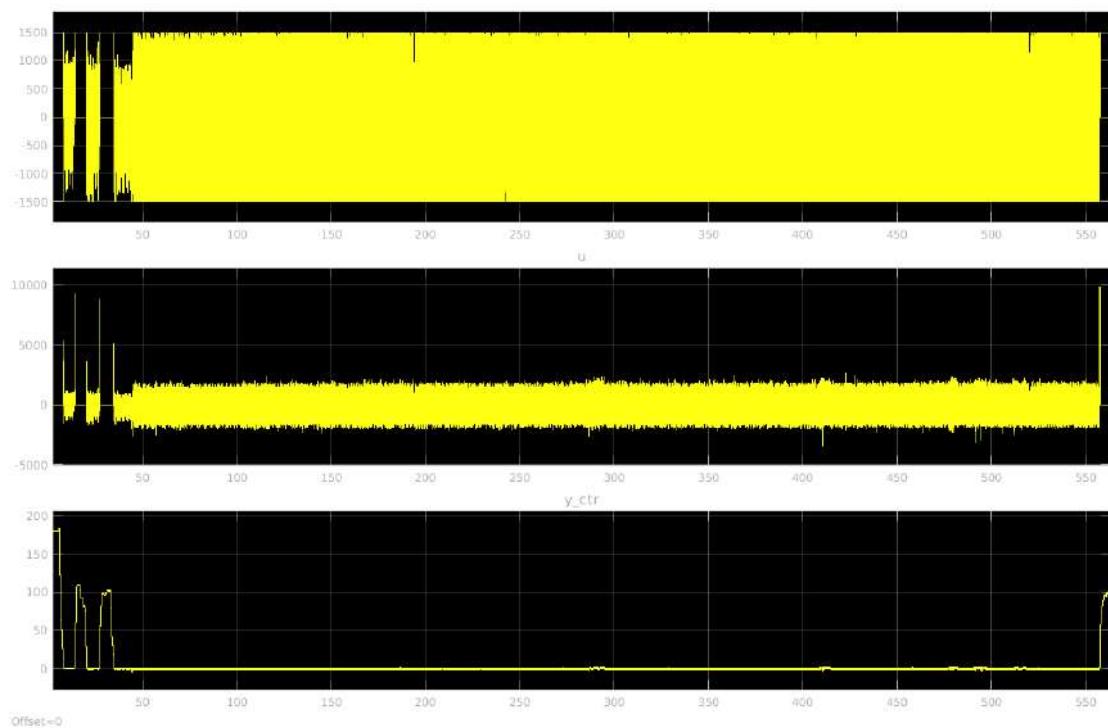


Figura 9.12: Pendolo inverso stabilizzato in posizione verticale per 8 min e 42 s

mente alta tende a scaldarsi. La figura 9.12 riporta i grafici della stabilizzazione più lunga eseguita, osservando il terzo riquadro possiamo notare che il pendolo rimane stabile attorno alla posizione di equilibrio instabile per circa 8 min e 42 s, al termine dei quali si è deciso di fermare il sistema poiché il motore risultava particolarmente caldo.

Capitolo 10

Sviluppi futuri

Il sistema realizzato in questo progetto risulta, di fatto , essere lo sviluppo di un precedente progetto di diploma del corso di ingegneria elettronica [1]. Partendo da quanto fatto in precedenza, nel corso di questo progetto, si è riprogettato e ridisegnato il pendolo cambiando inoltre il motore utilizzato. Questo ha permesso di realizzare un pendolo più leggero del precedente che, in concomitanza all'utilizzo di un motore più potente, ha permesso di aumentare il rapporto peso potenza del sistema. Questo ha portato di fatto ad un miglioramento delle prestazioni del sistema controllato. Inoltre il fatto che durante la progettazione meccanica del pendolo si sia tenuto conto di una configurazione con un pendolo bilanciato ha permesso di realizzare un sistema in grado di offrire ancora numerose opportunità di sviluppo. Per praticità divideremo i possibili sviluppi futuri in ue capitoli trattando distintamente quelli che sono gli sviluppi legati alla parte meccanica e di elettronica e quelli che sono gli sviluppi futuri legati al controllo del sistema.

10.1 Meccanica ed elettronica

Per quanto riguarda lì I miglioramento della meccanica è sicuramente possibile operare alcune modifiche allo scopo di migliorare le prestazioni dl sistema. Prima fra tutte, allo scopo di permettere un corretto funzionamento del collettore rotante, è di riprogettare l'albero del pendolo allo scopo di semplificare il montaggio. Ad esempio prevedendo l'inserimento nell'alloggiamento dei cuscinetti dell'albero del pendolo di un sottoinsieme costituito da albero, cuscinetti e sliring. Questa possibilità permetterebbe di semplificare la fase di assemblaggio. Un ulteriore possibilità è quella di progettare una realizzazione che non preveda l'utilizzo di un giunto di collegamento tra il collettore rotante e l'albero del pendolo. Questo oltre che a semplificare il sistema potrebbe permettere un migliore inserimento dei cavi di alimentazione e controllo del motore. Sempre legato all'albero del pendolo e all'alimentazione del motore un ulteriore miglioramento è effettuabile sull'albero, realizzando una nuova geometria sarebbe conveniente rivalutare il diametro del foro di passaggio dei cavi per facilitare

l'inserimento degli stessi.

Un'altra serie di migliorie può essere eseguita sul contrappeso, prima fra tutte la realizzazione di un nuovo contrappeso di aggiustaggio più grande allo scopo di compensare la massa del pendolo. Questa modifica è data dal fatto che al momento il contrappeso non risulta sufficientemente pesante per bilanciare correttamente la massa del pendolo. Tuttavia questo problema può essere facilmente risolto modificando solamente il contrappeso di aggiustaggio. Un ulteriore modifica del contrappeso potrebbe essere fatta sull'interfaccia con il pendolo, in particolare si potrebbe prevedere una realizzazione che utilizzi la geometria dei due componenti per evitare che questi possano ruotare tra di essi, questo permetterebbe di eliminare le spine che tengono fisso il contrappeso.

Per quanto riguarda la componente elettronica un primo miglioramento potrebbe essere effettuato prevedendo un alimentazione tramite una comune presa della corrente utilizzando un trasformatore che porti la corrente alternata dai 230 V della rete a 24 V e 5 V necessari ad alimentare rispettivamente MC driver, motore e encoder questo permetterebbe di realizzare una versione del sistema molto più facile da trasportare rispetto al prototipo attualmente realizzato. Un ulteriore miglioramento in funzione del possibile utilizzo fatto da Faulhaber del sistema potrebbe essere di prevedere un alimentazione tramite batterie, questo permetterebbe non solo di trasportare il sistema in maniera compatta ma anche di alimentarlo in assenza di allacciamenti alla rete elettrica.

Sebbene l'encoder attualmente realizzato permetta di realizzare un controllo sufficiente accurato da stabilizzare il sistema per diversi minuti, tuttavia il sistema soffre in parte di un errore dovuto alla calibrazione al momento dell'attivazione del controllore che risulta in una lettura non ottimale dell'angolo. Essendo l'encoder attualmente utilizzato di tipo incrementale il controllore utilizza la posizione rilevata come riferimento di posizione zero. Questo comporta che qualora il sistema non si trovi perfettamente allineato sulla verticale al momento dell'attivazione, quando l'encoder leggerà il valore di posizione angolare pari a 180° corrispondente in teoria alla posizione di equilibrio instabile in questa situazione l'errore accumulato all'inizio si ripercuterà in maniera tale da rende difficoltosa se non impossibile la stabilizzazione in questa posizione del sistema. Per ovviare a questa problematica si potrebbe sfruttare un encoder di tipo assoluto, questo permetterebbe di realizzare una prima calibrazione particolarmente accurata. In seguito essendo la posizione misurata dall'encoder assoluta il sistema non necessiterà più di definire un valore di zero aumentando la ripetibilità del controllo.

Infine un ultimo miglioramento riguardo la gestione dell'elettronica riguarda la realizzazione di un circuito stampato che vada a sostituire la scheda realizzata per collegare tra loro i

motion controller di Faulhaber, questa modifica potrebbe essere sviluppata anche in maniera tale da integrare direttamente alcune delle funzionalità dei driver attualmente utilizzati, in particolare per quanto riguarda il collegamento tramite bus can e la lettura dell'encoder digitale.

10.2 Controllore

Per quanto riguarda gli sviluppi futuri legati al controllore allo scopo di realizzare un sistema che risulti portatile è necessario implementare i controllori su un sistema *Raspberry Pi*¹. Il passaggio a questa tipologia di macchine renderebbe il sistema di controllo nettamente più compatto permettendo l'utilizzo del pendolo come dimostratore.

Per quanto riguarda lo sviluppo di ulteriori controllori qualora si correggesse le problematiche legate la contrappeso e al collettore rotante sarebbe possibile realizzare un controllo in grado di stabilizzare i pendolo bilanciato in qualunque posizione angolare. Questo controllore necessiterebbe, qualora dovesse essere sfruttato da Faulhaber come dimostratore, la programmazione di una più routine particolari come ad esempio un orologio in grado di segnare i minuti. L'implementazione di queste routine oltre che a rendere più accattivante il sistema potrebbe presentare di per se un interessante problema di controllo.

Il controllo sicuramente più interessante è complesso riguarda tuttavia la fase di swing-up del pendolo, in questo caso sarebbe necessario valutare in maniera più approfondita dapprima quale approccio convenga adottare in quanto le simulazioni attualmente eseguite tramite Simulink si sono rilevate equivalenti. In ogni caso lo sviluppo di un controllo di swing up permetterebbe la realizzazione di una serie di routine per un eventuale dimostratore che permettano al sistema di passare da una stabilizzazione in posizione di equilibrio stabile ad una stabilizzazione in posizione di equilibrio instabile in maniera autonoma e senza l'intervento di un operatore.

Come ultimo sviluppo futuro si potrebbe prevedere la realizzazione di una serie di controllori che utilizzino metodologie di controllo differenti dai controllori ottimi allo scopo di realizzare un confronto tra le metodologie. Questo lavoro potrebbe inoltre essere sviluppato anche come laboratorio di controllo in maniera da permettere ad eventuali studenti futuri di confrontarsi con un sistema largamente trattato in letteratura e che permette di affrontare numerose tematiche legate alla teoria del controllo.

¹ Il **Raspberry Pi** è un *single-board computer* sviluppato nel Regno Unito e presentato per la prima volta nel febbraio del 2012. La scheda è progettata per ospitare sistemi operativi basati principalmente su kernel Linux. Esistono vari modelli che variano tra loro per prezzi (i prezzi possono variare tra i 5 e i 65 USD) e prestazioni.

Capitolo 11

Conclusioni

Ad inizio progetto sono stati assegnati diversi compiti ed obiettivi tra i quali possiamo trovare:

- La realizzazione di una nuova meccanica;
- L'integrazione del motore e dell'encoder;
- L'identificazione dei parametri del pendolo;
- Il design del sistema di controllo con:
 - Simulazione dei sistemi tramite Simulink;
 - Realizzazione dei controllori in tempo reale.

Dovendo garantire al pendolo un movimento continuo a 360° si sono vincolati alcuni aspetti della costruzione meccanica risultati critici, nonostante i problemi legati al collettore rotante è stato possibile utilizzare il prototipo realizzato. Un limite che non è stato possibile risolvere, ma che comunque non ha influenzato il lavoro sul controllo in tempo reale del sistema, è dato dal contrappeso. Questo risulta infatti più leggero di quanto preventivato in fase di progettazione, tuttavia a causa del poco tempo non è stato possibile realizzarne un design o un pezzo alternativo.

Tramite la realizzazione della scheda di collegamento dei moduli MC, dopo alcune iterazioni e cambiamenti nel design di questo componente è stato possibile realizzare una scheda che permettesse il corretto collegamento con il computer. In questo senso anche l'implementazione del controllore id coppia sul modulo MC 5005 S CO si è rilevata più laboriosa del previsto a causa di alcuni cablaggi inizialmente sbagliati e al malfunzionamento dell'encoder di posizione del motore. Questi ritardi non hanno tuttavia impedito di giungere ad un pendolo correttamente funzionante sul quale sviluppare i controllori in tempo reale.

Il malfunzionamento dell'encoder del motore ha impedito di eseguire un'analisi sufficientemente precisa per realizzare l'identificazione dei carichi del motore tramite l'analisi della dinamica. A questo punto è stato necessario ricorrere ai parametri calcolati mediante l'utilizzo del software di progettazione CAD. Le inerzie così identificate si sono comunque rivelate sufficientemente precise da permettere la realizzazione di un sistema di controllo.

La realizzazione dei controllori in tempo reale, inizialmente resa difficoltosa dalla scheda di collegamento dei *Motion Controller* difettosa, si è rapidamente risolta riuscendo a realizzare un controllo del pendolo in posizione di equilibrio stabile ed un controllo del pendolo in posizione di equilibrio instabile. Per quanto riguarda il controllo in posizione del pendolo in configurazione bilanciata e lo sviluppo di un metodo di *swing-up* non è stato possibile realizzarli, in parte a causa della meccanica incompleta ed in parte a causa dello scarso tempo disponibile.

Nonostante le difficoltà riscontrate al termine del progetto si è ottenuto un pendolo di ridotte dimensioni e da un'estetica in grado di attirare l'attenzione su di esso. I componenti meccanici progettati e realizzati soddisfano i requisiti imposti nelle specifiche tecniche e si dimostrano perfettamente funzionanti. In particolare dall'ottimizzazione eseguita sulla geometria del volano è scaturito un componente di notevole effetto estetico e in grado di adempiere in maniera ottimale alla propria funzione meccanica.

Per quanto riguarda i controlli sono stati implementati due controllori di posizione, il primo in grado di stabilizzare il pendolo in posizione di equilibrio stabile risultando così in un comportamento paragonabile ad un sistema criticamente smorzato ed il secondo in grado di stabilizzare il pendolo inverso in posizione di equilibrio instabile. In particolare quest'ultimo risulta presentare un notevole incremento di prestazione rispetto al sistema realizzato nel precedente progetto riuscendo a stabilizzare il pendolo in un range di $\pm 10^\circ$ dal punto di equilibrio stabile per diversi minuti. Questo controllore presenta inoltre un'elevata stabilità risultando in una minima oscillazione, si tratta infatti di uno scostamento inferiore a qualche grado a dipendenza dei disturbi sul sistema, attorno al punto di equilibrio instabile. Queste caratteristiche fanno del pendolo inverso realizzato un ottimo dimostratore capace di mostrare e potenzialità sia del motore utilizzato che dei sistemi di controllo in tempo reale sviluppati.

Appendice A

Valutazioni tecniche

STUDENTSUPSI

Tabella A.1: **Supporto del pendolo**

Criteri di valutazione	Peso		Variante 1		Variante 2			
	Descrizione	g	Valutazione	Nota	Punti	Valutazione	Nota	Punti
1 Rigidezza	Importante	3	Buona	3	9	Eccellente	4	12
2 Stabilità	Molto importante	4	Soddisfacente	2	8	Eccellente	4	16
3 Intralcio alla traiettoria	Poco importante	2	Eccellente	4	8	Soddisfacente	2	6
4 Facilità di montaggio	Importante	3	Buona	3	9	Soddisfacente	2	6
5 Ostacolo visivo	Molto importante	4	Eccellente	4	16	Soddisfacente	2	8
6 Allineamento dei supporti	Molto importante	4	Buona	3	12	Soddisfacente	2	8
Valutazione tecnica				0,775			0,675	

Tabella A.2: **Supporto dell'albero del pendolo**

Criteri di valutazione	Peso		Variante 1		Variante 2			
	Descrizione	g	Valutazione	Nota	Punti	Valutazione	Nota	Punti
1 Ingombro radiale	Molto importante	4	Eccellente	4	16	Soddisfacente	2	8
2 Attrito	Molto importante	4	Soddisfacente	2	8	Buona	3	12
3 Costo	Considerabile	1	Buona	3	3	Buona	3	3
4 Facilità di montaggio	Importante	3	Buona	3	9	Buona	3	9
5 Tenuta assiale	Fondamentale	5	Insufficiente	0	0	Soddisfacente	2	10
Valutazione tecnica				0,529			0,618	

Tabella A.3: Passaggio dei cavi di alimentazione e controllo del motore

Criteri di valutazione	Peso		Variante 1			Variante 2		
	Descrizione	g	Valutazione	Nota	Punti	Valutazione	Nota	Punti
1 Costo	Considerabile	1	Soddisfacente	2	2	Buona	3	3
2 Fabricabilità	Importante	3	Buona	3	9	Eccellente	4	12
3 Sicurezza dei cavi	Fondamentale	5	Eccellente	4	20	Insufficiente	0	0
4 Ingombri ed inerzia	Importante	3	Buona	3	9	Soddisfacente	2	6
Valutazione tecnica				0,833			0,438	

Tabella A.4: Accoppiamento albero pendolo

Criteri di valutazione	Peso		Variante 1			Variante 2		
	Descrizione	g	Valutazione	Nota	Punti	Valutazione	Nota	Punti
1 Fabricabilità	Importante	3	Eccellente	4	12	Buona	3	9
2 Resistenza	Importante	3	Buona	3	9	Soddisfacente	2	6
3 Assemblabilità dei cavi	Importante	3	Soddisfacente	2	6	Eccellente	4	12
4 Assenza di gioco (precisione)	Fondamentale	5	Buona	3	15	Sufficiente	1	5
5 Simmetricità	Importante	3	Eccellente	4	12	Soddisfacente	2	6
Valutazione tecnica				0,794			0,559	

Tabella A.5: Accoppiamento albero pendolo (continuazione 1)

Criteri di valutazione	Peso		Variante 3			Variante 4		
	Descrizione	g	Valutazione	Nota	Punti	Valutazione	Nota	Punti
1 Fabbricabilità	Importante	3	Buona	3	9	Eccellente	4	12
2 Resistenza	Importante	3	Buona	3	9	Soddisfacente	2	6
3 Assemblabilità dei cavi	Importante	3	Soddisfacente	2	6	Soddisfacente	2	6
4 Assenza di gioco (precisione)	Fondamentale	5	Sufficiente	1	5	Sufficiente	1	5
5 Simmetria	Importante	3	Eccellente	4	12	Insufficiente	0	0
Valutazione tecnica				0,603			0,426	

Tabella A.6: Accoppiamento albero pendolo (continuazione 2)

Criteri di valutazione	Peso		Variante 5			Variante 6		
	Descrizione	g	Valutazione	Nota	Punti	Valutazione	Nota	Punti
1 Fabbricabilità	Importante	3	Buona	4	3	Eccellente	4	12
2 Resistenza	Importante	3	Soddisfacente	2	6	Buona	3	9
3 Assemblabilità dei cavi	Importante	3	Eccellente	4	12	Soddisfacente	2	6
4 Assenza di gioco (precisione)	Fondamentale	5	Soddisfacente	2	5	Eccellente	4	20
5 Simmetricità	Importante	3	Insufficiente	0	0	Soddisfacente	2	6
Valutazione tecnica				0,544			0,779	

Tabella A.7: Accoppiamento tra albero e motore

Criteri di valutazione	Peso		Variante 1			Variante 2		
	Descrizione	g	Valutazione	Nota	Punti	Valutazione	Nota	Punti
1 Fabbricabilità	Importante	3	Eccellente	4	9	Buona	3	9
2 Resistenza	Poco importante	2	Buona	3	6	Buona	3	6
3 Suscettibilità agli errori	Molto importante	4	Eccellente	4	16	Sufficiente	1	4
4 Allineamento	Importante	3	Buona	3	9	Buona	3	9
5 Assemblabilità	Importante	3	Soddisfacente	2	6	Soddisfacente	2	6
Valutazione tecnica			0,817			0,567		

Tabella A.8: Accoppiamento tra albero e motore

Criteri di valutazione	Peso		Variante 1			Variante 2		
	Descrizione	g	Valutazione	Nota	Punti	Valutazione	Nota	Punti
1 Fabbricabilità	Importante	3	Eccellente	4	9	Buona	3	9
2 Resistenza	Poco importante	2	Buona	3	6	Buona	3	6
3 Suscettibilità agli errori	Molto importante	4	Eccellente	4	16	Sufficiente	1	4
4 Allineamento	Importante	3	Buona	3	9	Buona	3	9
5 Assemblabilità	Importante	3	Soddisfacente	2	6	Soddisfacente	2	6
Valutazione tecnica			0,817			0,567		

Tabella A.9: Accoppiamento tra albero e volano

Criteri di valutazione	Descrizione	Peso	Variante 1			Variante 2			Variante 3		
			g	Valutazione	Nota	Punti	Valutazione	Nota	Punti	Valutazione	Nota
1 Fabbricabilità	Importante	3	Eccellente	4	12	Eccellente	4	12	Buona	3	9
2 Resistenza	Importante	3	Buona	3	9	Buona	3	9	Buona	3	9
3 Assemblabilità	Importante	3	Soddisfacente	2	6	Soddisfacente	2	6	Buona	3	9
4 Assenza di gioco (precisione)	Fondamentale	5	Buona	3	15	Eccellente	4	20	Buona	3	15
5 Simmetricità	Importante	3	Buona	3	9	Soddisfacente	2	6	Eccellente	4	12
Valutazione tecnica		0,750			0,779			0,794			

Tabella A.10: Accoppiamento tra albero e volano (continuazione)

Criteri di valutazione	Descrizione	Peso	Variante 4			Variante 5		
			g	Valutazione	Nota	Punti	Valutazione	Nota
1 Fabbricabilità	Importante	3	Sufficiente	1	3	Eccellente	4	12
2 Resistenza	Importante	3	Buona	3	9	Buona	3	9
3 Assemblabilità	Importante	3	Buona	3	9	Buona	3	9
4 Assenza di gioco (precisione)	Fondamentale	5	Buona	4	20	Eccellente	4	20
5 Simmetricità	Importante	3	Buona	3	9	Eccellente	4	12
Valutazione tecnica			0,735				0,912	

Tabella A.11: Accoppiamento tra albero e volano (continuazione)

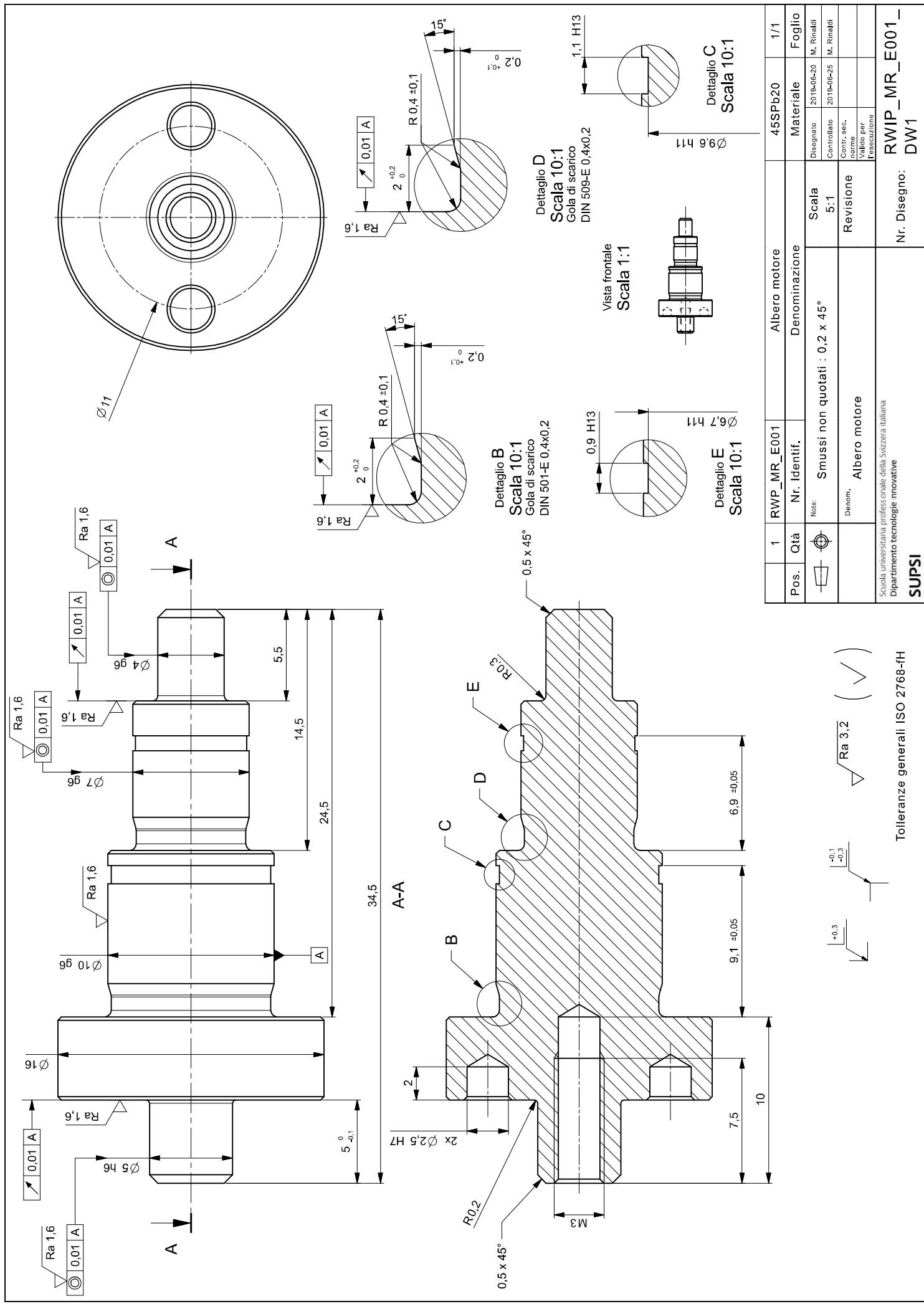
Criteri di valutazione	Peso			Variante 4			Variante 5		
	Descrizione	9	Valutazione	Nota	Punti	Valutazione	Nota	Punti	
1 Fabbricabilità	Importante	3	Sufficiente	1	3	Eccellente	4	12	
2 Resistenza	Importante	3	Buona	3	9	Buona	3	9	
3 Assemblabilità	Importante	3	Buona	3	9	Buona	3	9	
4 Assenza di gioco (precisione)	Fondamentale	5	Buona	4	20	Eccellente	4	20	
5 Simmetricità	Importante	3	Buona	3	9	Eccellente	4	12	
Valutazione tecnica			0,735			0,912			

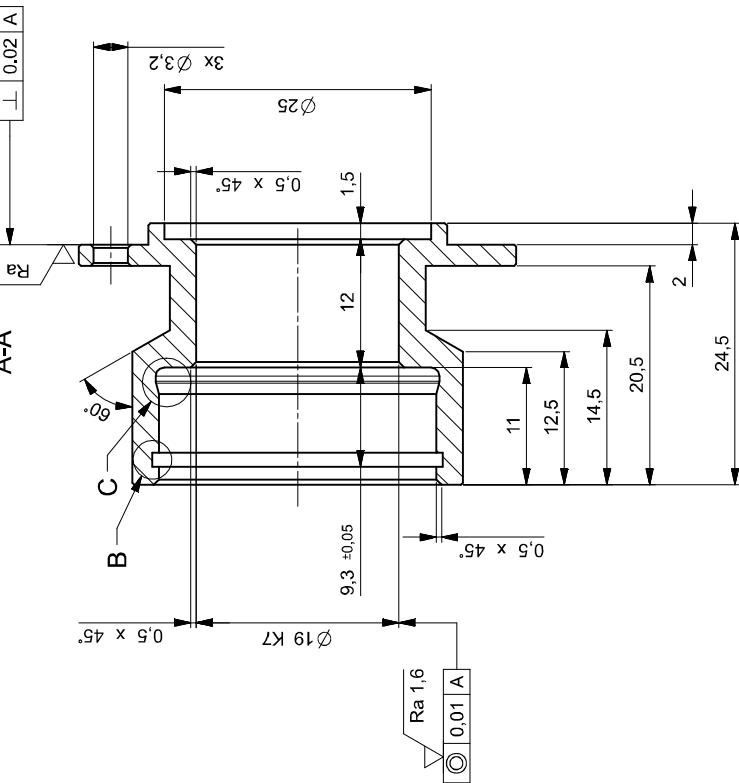
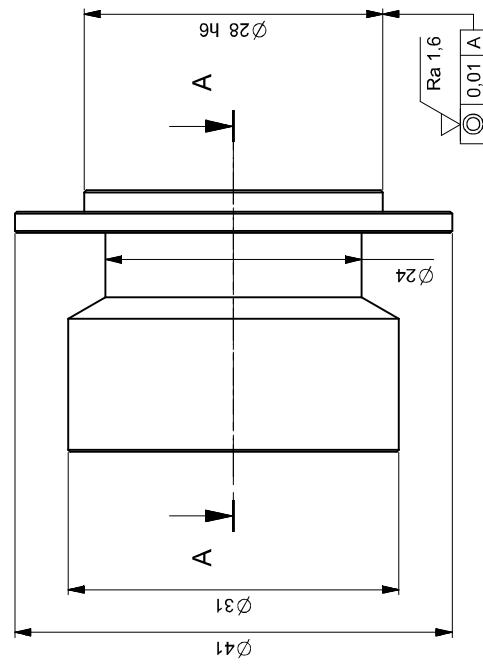
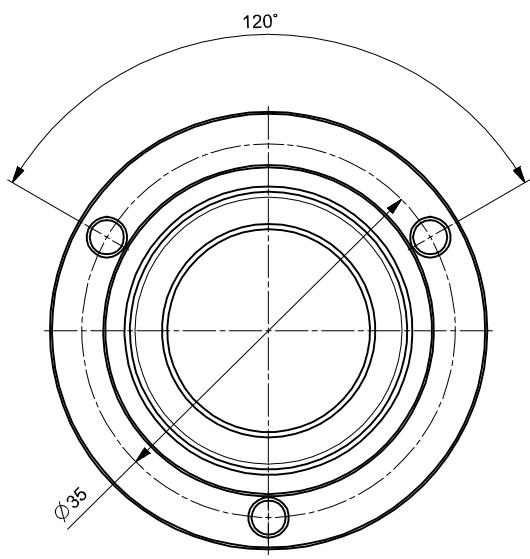
Appendice B

Disegni costruttivi

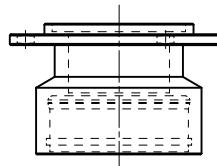
B.1 Disegni di costruzione

STUDENTSUPSI

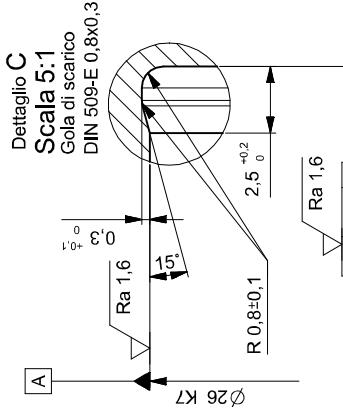
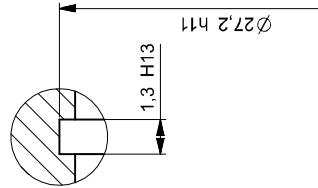




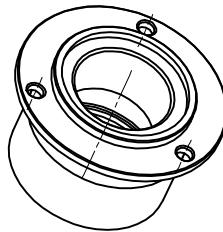
Vista frontale
Scala 1:1



Dettaglio B
Scala 5:1



Vista trimentrica
Scala 1:1



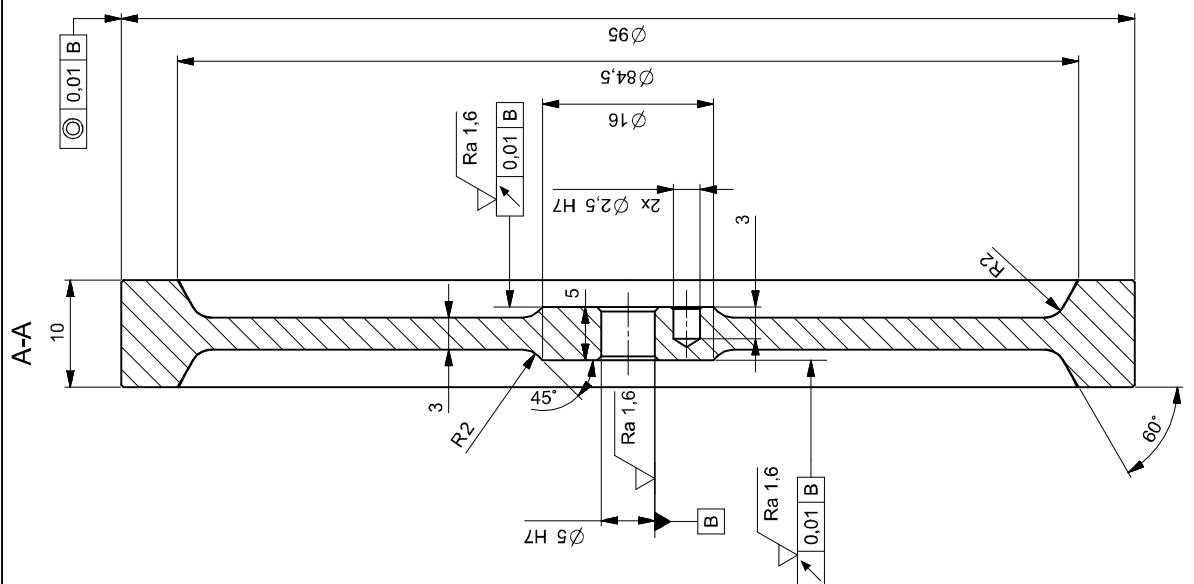
Tolleranze generali ISO 2768-fH



Pos.	1	RWIP_MR_E002	Alloggiamento cuscinetti volano	EN AW 6082	1/1
Pos.	Qta	Nr. Identif.	Denominazione	Materiale	Foglio
			Note: Smussi non quotate: 0,2x45°	Scalino	2019-06-20 M. Rinaldi
			Denom., Alloggiamento cuscinetti volano	Controllato	2019-06-27 M. Rinaldi
				Contr. sec. norme	
				Valido per	
				I'esecuzione	

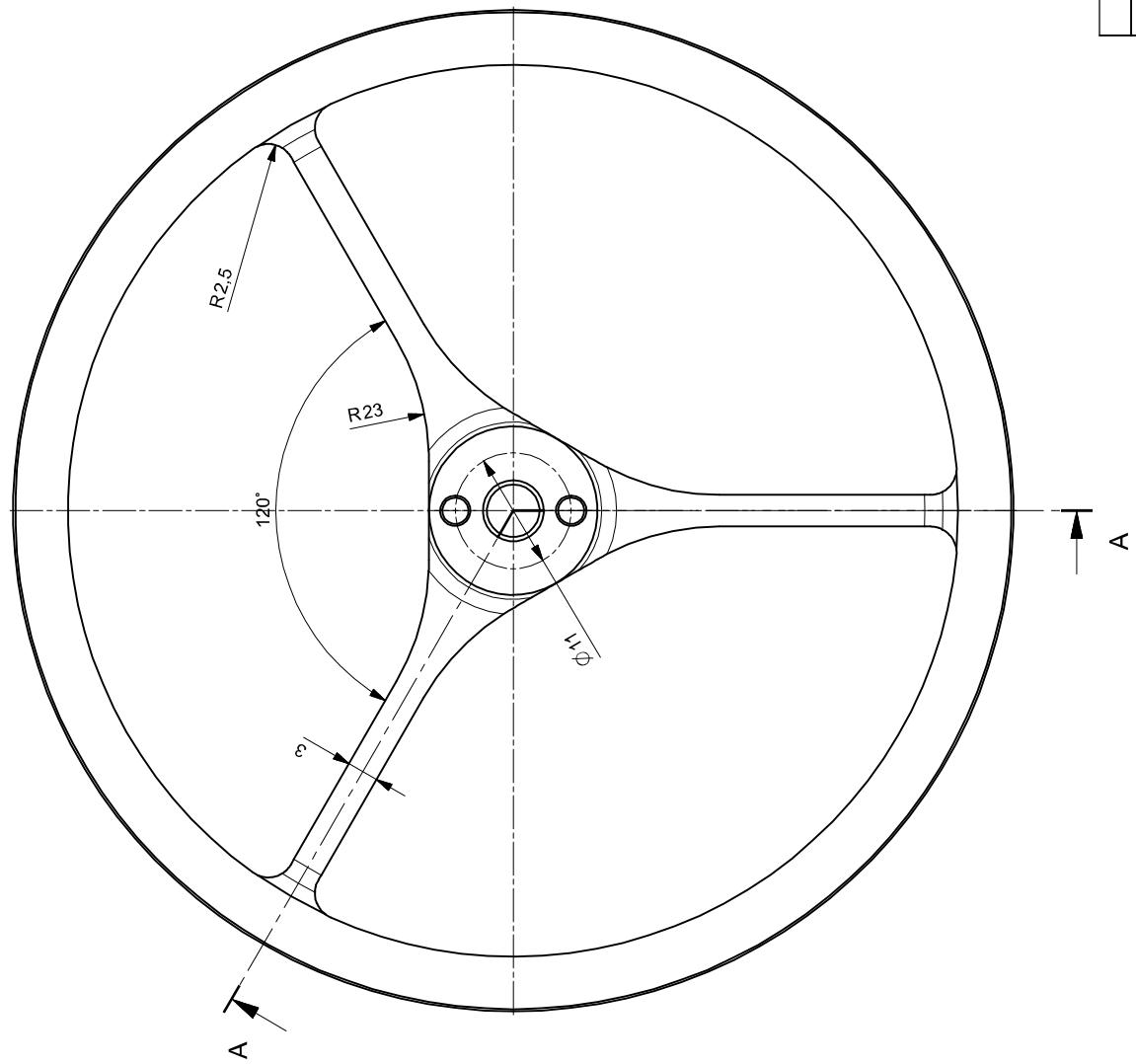
Scuola universitaria professionale della Svizzera Italiana
Dipartimento tecnologie innovative
SUPSI

RWIP_MR_E002-
DW1



Volano			EN AW 6082	1/1
Pos.	Qta	RWIP_MR_E004	Materiale	Foglio
-	-	Note: Smussi non quotati: 0,2x45° Denom. Volano	Scalma 2:1 Revisione	Disegnato 2019-06-20 M. Rinaldi Controllato 2019-06-25 M. Rinaldi Contr. sec. norme Valido per l'esecuzione

Nr. Disegno: RWIP_MR_E004 - DW1



Tolleranze generali ISO 2768-fH

(✓)

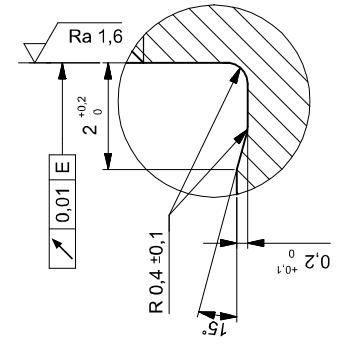
Ra 3,2

+0,3
-0,1
-0,3

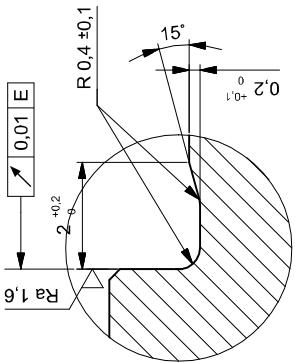
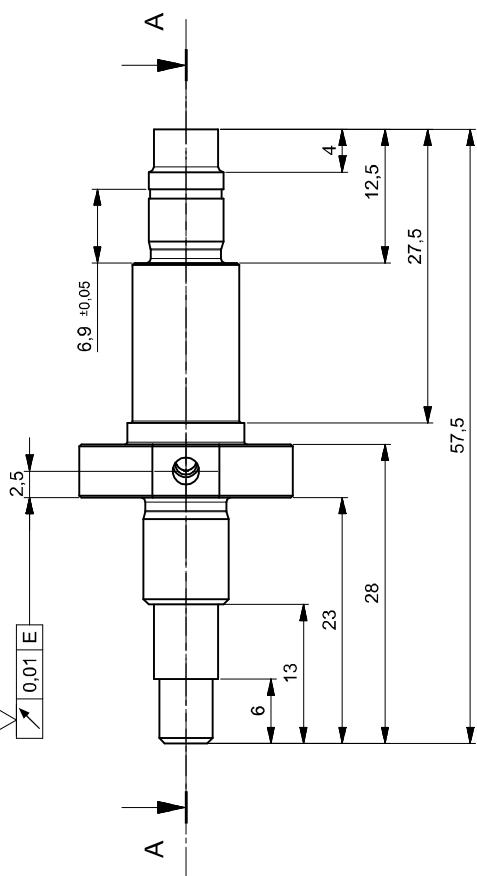
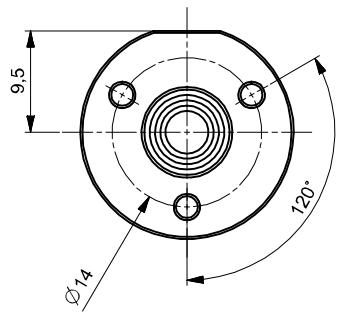
Scuola universitaria professionale della Svizzera Italiana
Dipartimento tecnologie innovative

SUPSI

RWIP_MR_E004 -
DW1

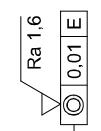
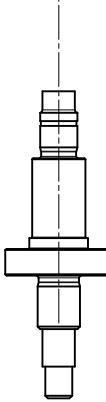


Dettaglio B
Scala 10:1
Gola di scarico
DIN 509-E 0,4x0,2

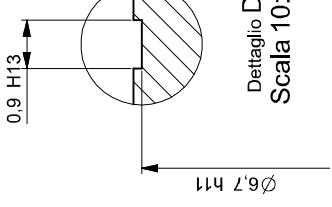


Dettaglio C
Scala 10:1
Gola di scarico
DIN 509-E 0,4x0,2

Vista frontale
Scala 1:1



Dettaglio D
Scala 10:1



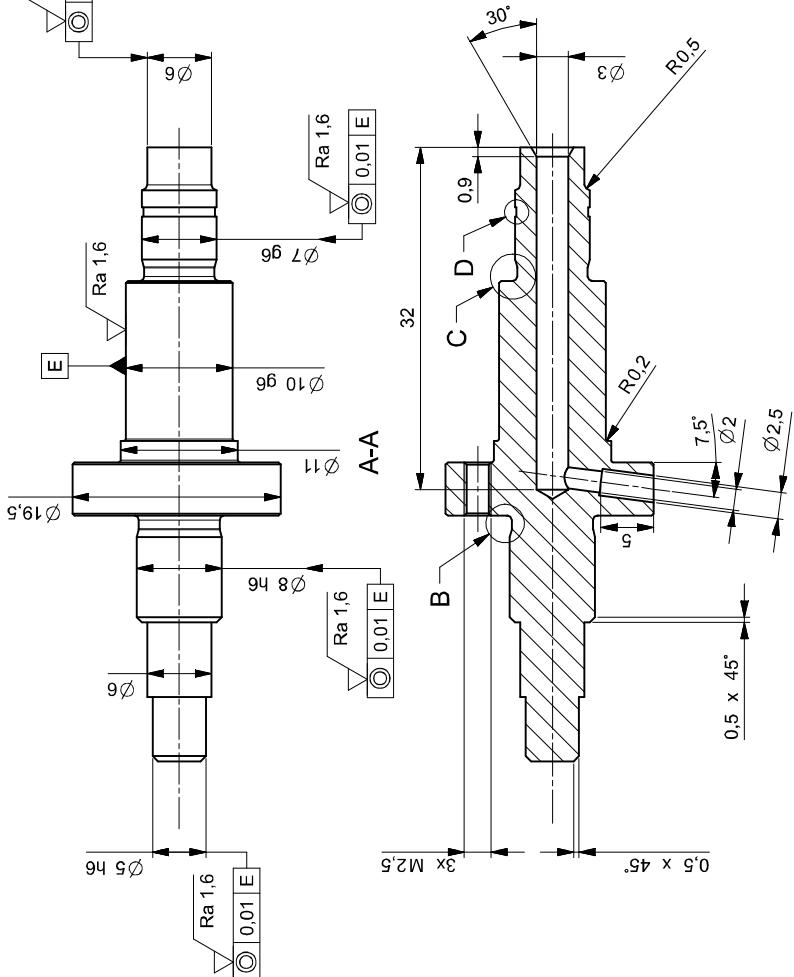
Tolleranze generali ISO 2768-fH

Tolleranze generali ISO 2768-fH				Materiale	Foglio
Pos.	1	RWIP_MR_E005	Albero pendolo	45SPb20	1/1
Qta.		Nr. Identif.	Denominazione	Scal. 2:1	
				Revisione	

Note:
 Smussi non quotati: 0,2x45°
 Denom. Albero pendolo

Scuola universitaria professionale della Svizzera Italiana
Dipartimento tecnologie innovative

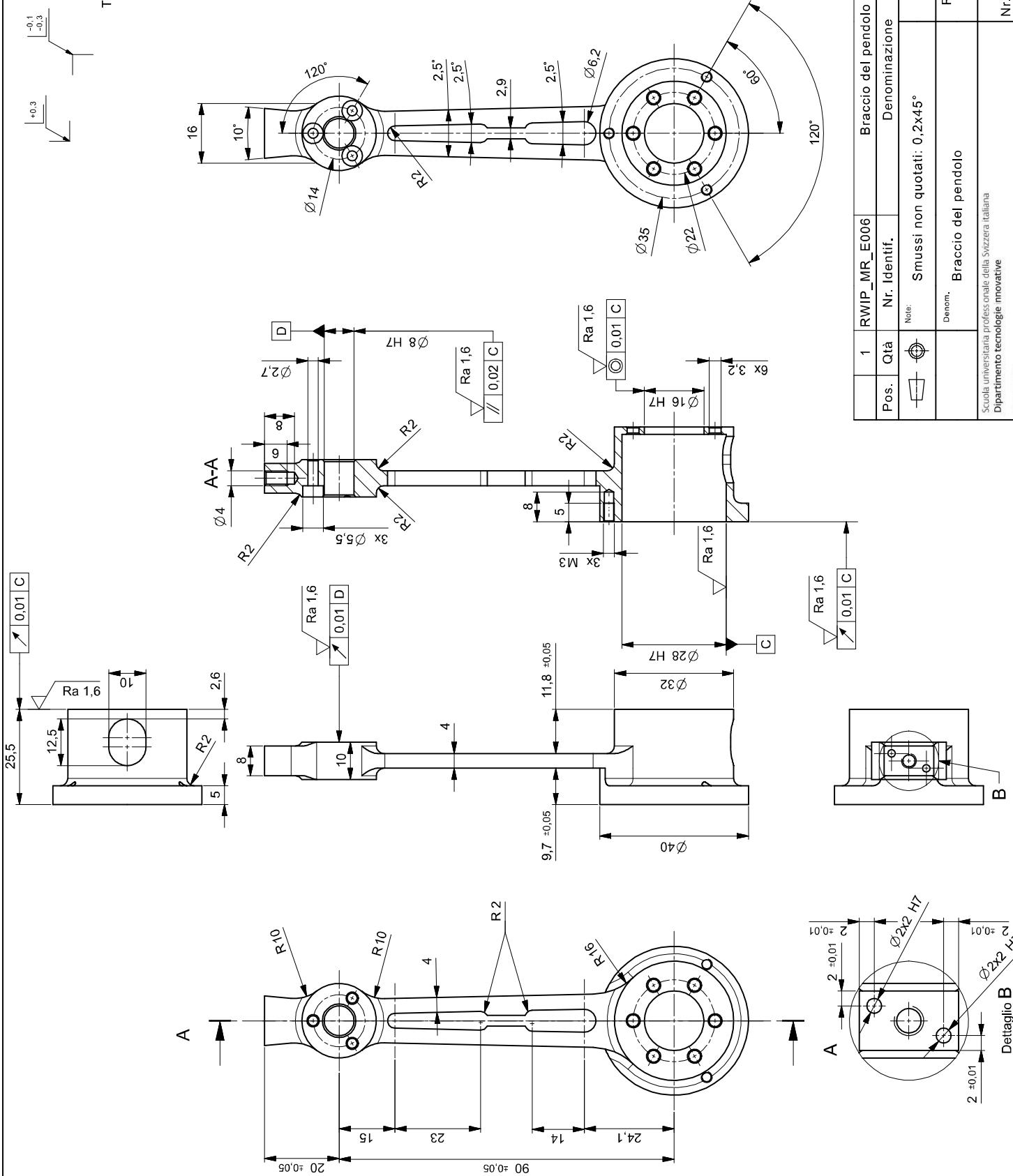
SUPSI

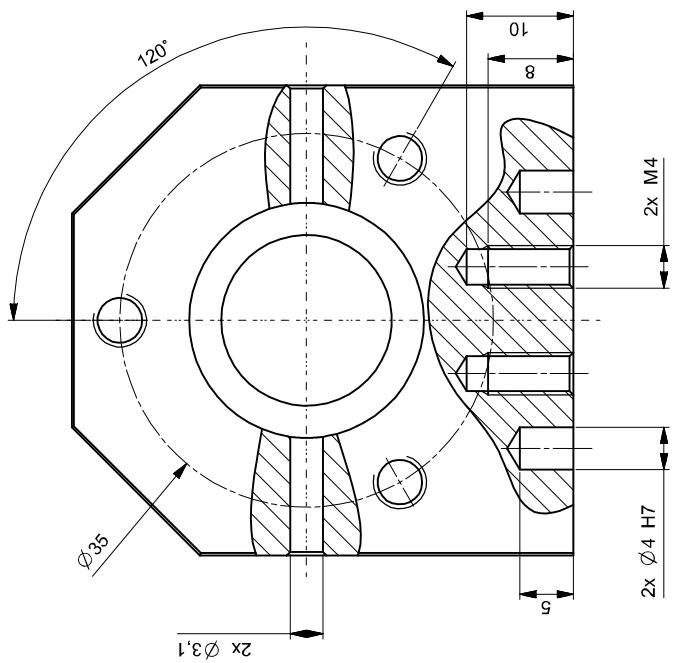
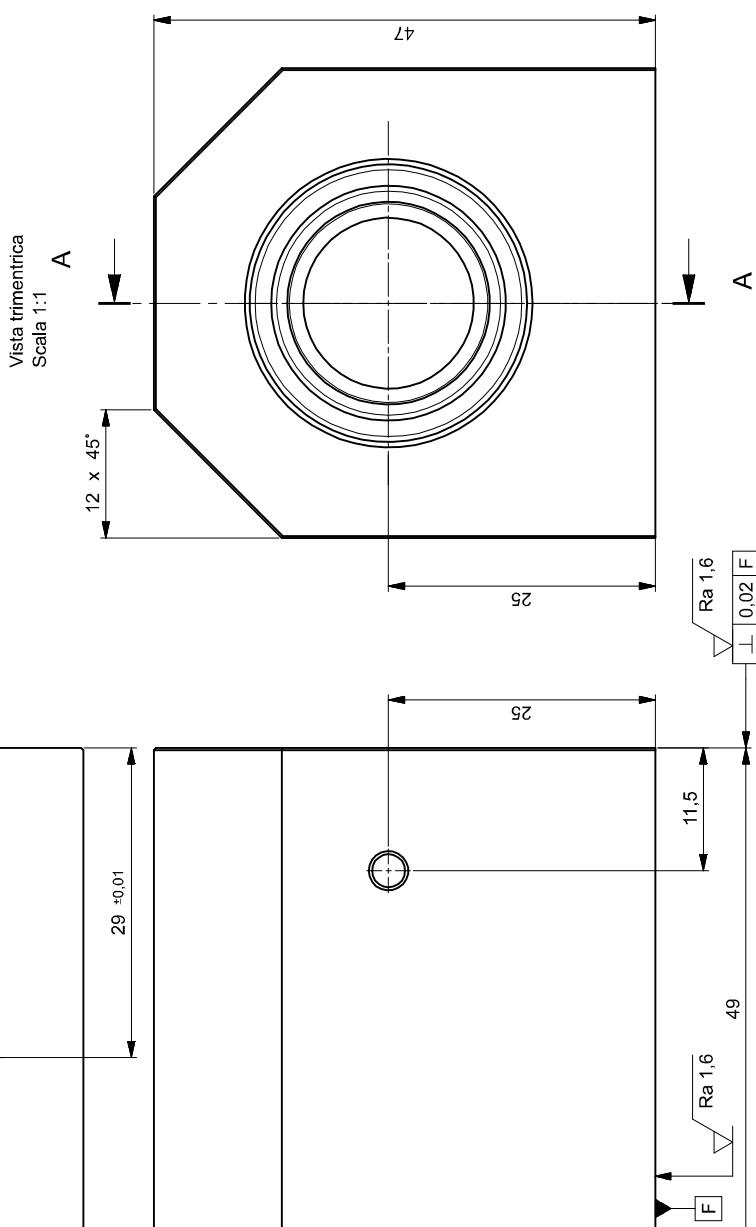
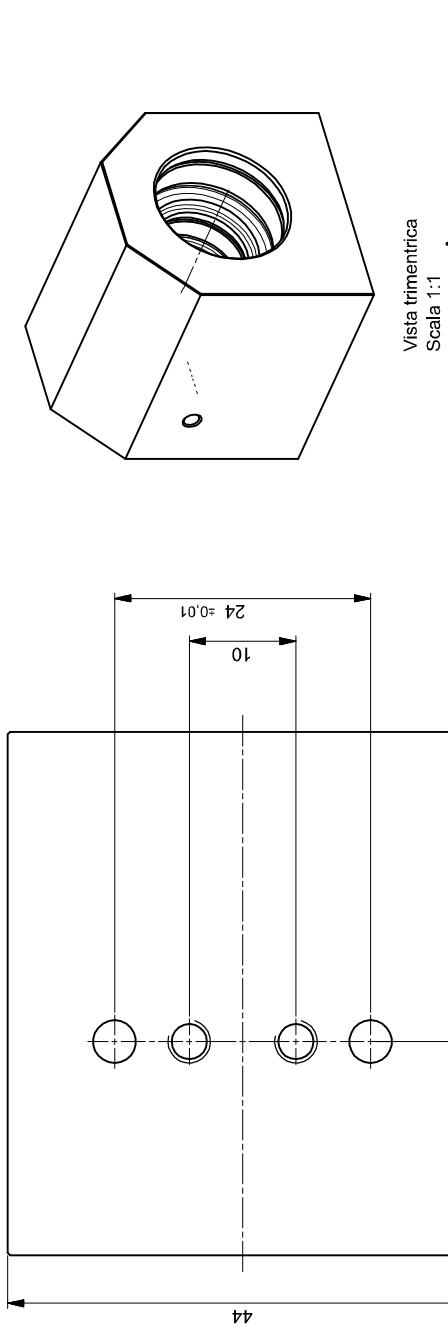


RWIP_MR_E005 –
DW1

$\nabla \sqrt{\text{Ra } 3,2}$ (✓)

Tolleranze generali ISO 2768-fH





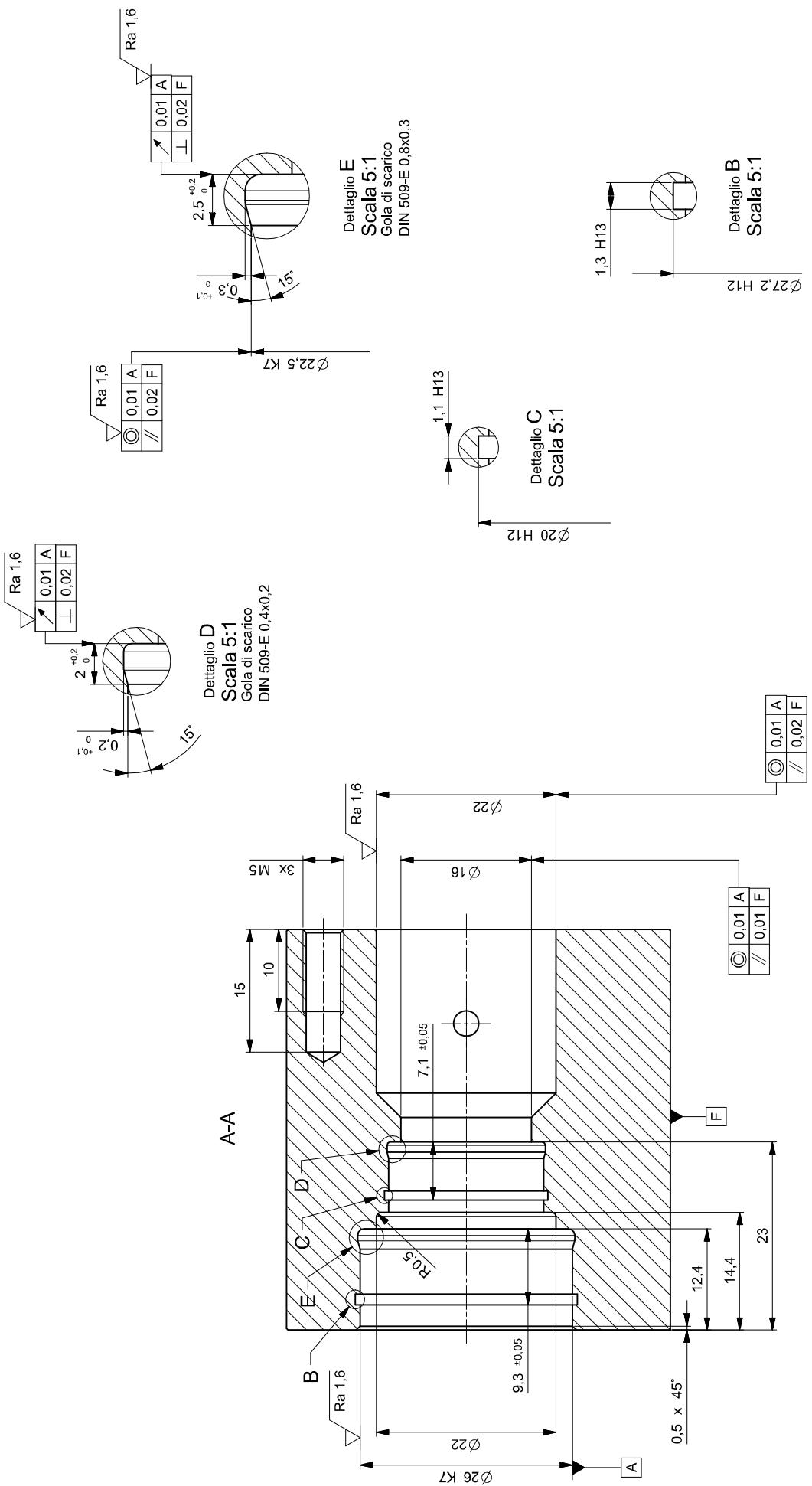
Pos.	1	RWIP_MR_E007	Alloggiamento cuscinetti pendolo	EN AW 6082	1/2
Scal.	2:1			Materiale	Foglio
Qta	Nr. Identif.	Denominazione			
		Note: Smussi non quotati: 0,2 x 45°	Scal. 2:1	Disegnato 2019-06-20 M. Rinaldi	
		Denom., Alloggiamento cuscinetti pendolo	Revisione	Controllato 2019-06-27 M. Rinaldi	
				Confr. sec. norme	
				Valido per l'esecuzione	

Scuola universitaria professionale della Svizzera Italiana
Dipartimento tecnologie innovative

SUPSI

Tolleranze generali ISO 2768-fH

RWIP_MR_E007 -
DW1



RWIP_MR_E007				Alloggiamento cuscinetti pendolo		EN AW 6082		2/2	
Pos.	Qtà	Nr. Identif.	Denominazione	Scala	Disegnato	Materiale	Foglio		
		Note: Smussi non quotati: 0,2 x 45°		2:1	2019-06-20	M. Rinaldi			
		Denom. Alloggiamento cuscinetti pendolo		Revisione	Controllato	2019-06-27	M. Rinaldi		

Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana
Dipartimento tecnologie innovative

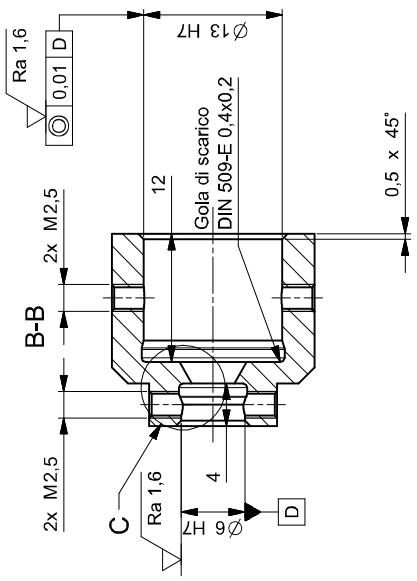
Nr. Disegno: **RWIP_MR_E007**
Nr. Disegno: **DW2**

Dipartimento tecnologie innovative

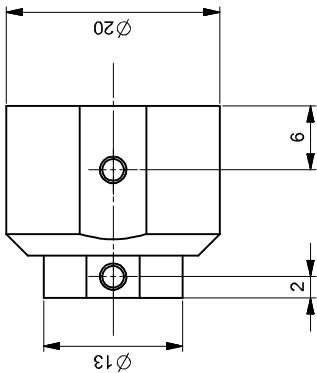
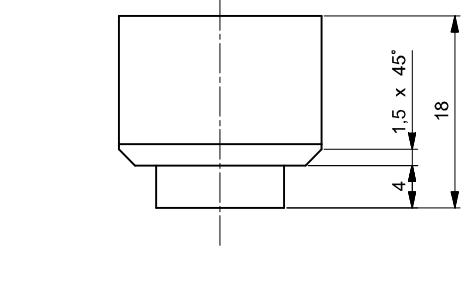
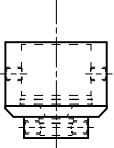
SUPPS

Tolleranze generali | SO 2768-fH





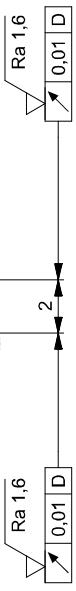
Vista frontale
Scalma 1:1



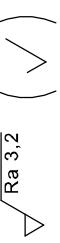
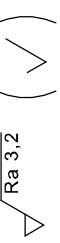
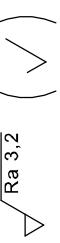
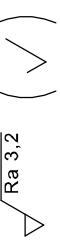
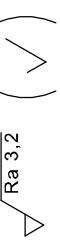
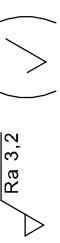
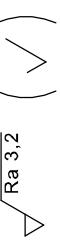
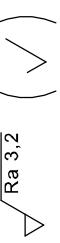
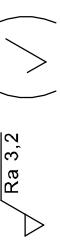
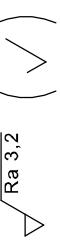
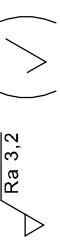
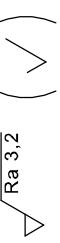
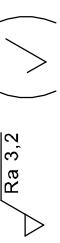
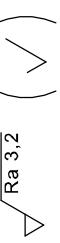
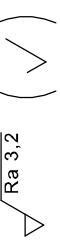
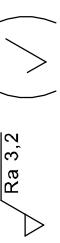
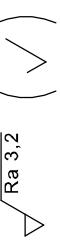
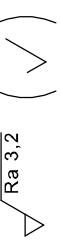
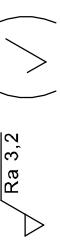
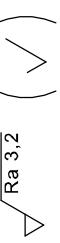
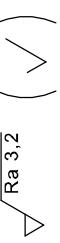
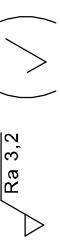
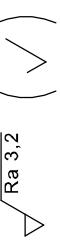
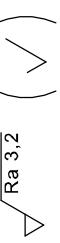
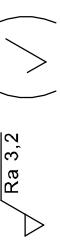
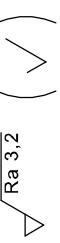
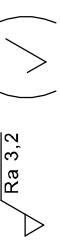
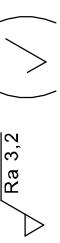
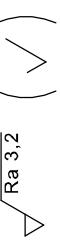
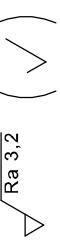
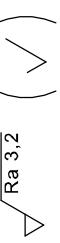
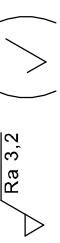
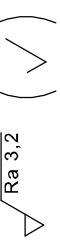
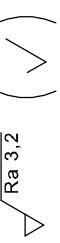
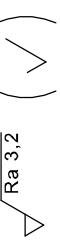
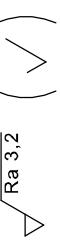
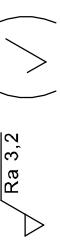
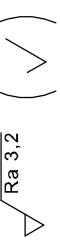
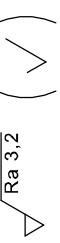
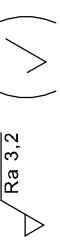
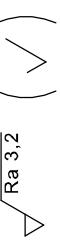
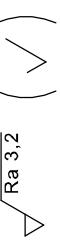
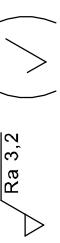
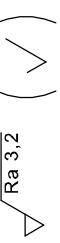
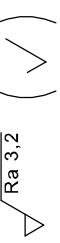
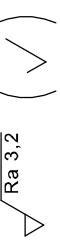
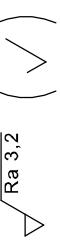
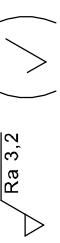
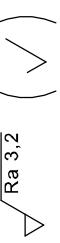
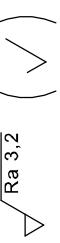
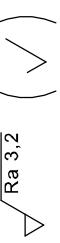
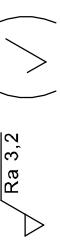
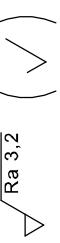
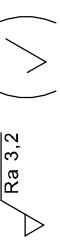
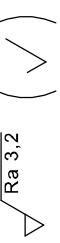
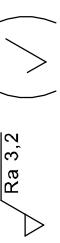
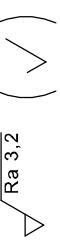
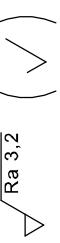
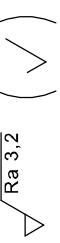
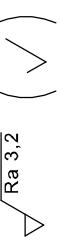
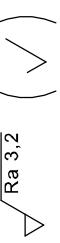
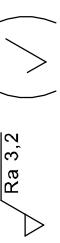
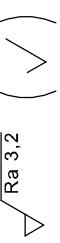
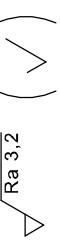
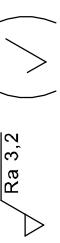
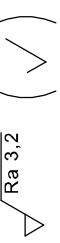
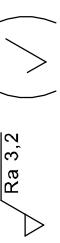
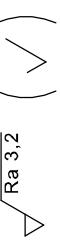
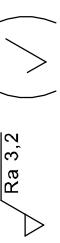
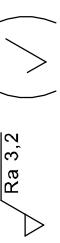
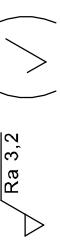
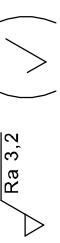
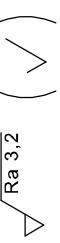
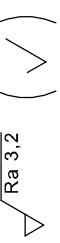
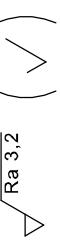
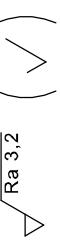
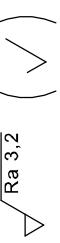
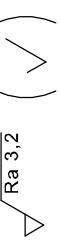
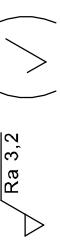
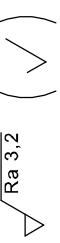
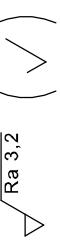
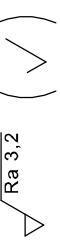
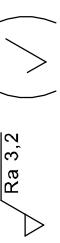
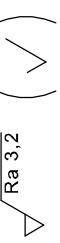
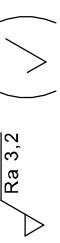
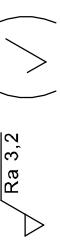
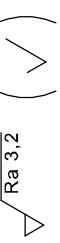
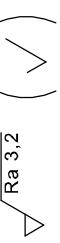
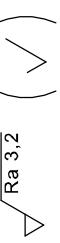
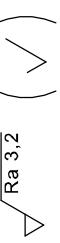
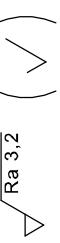
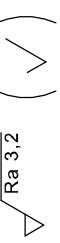
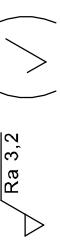
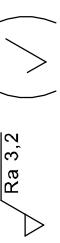
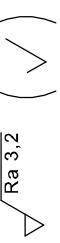
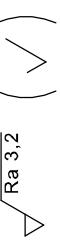
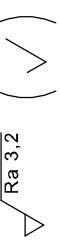
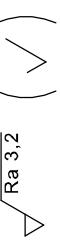
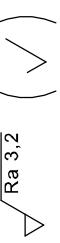
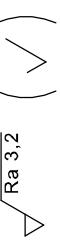
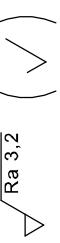
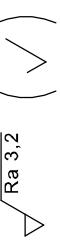
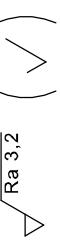
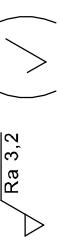
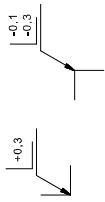
B

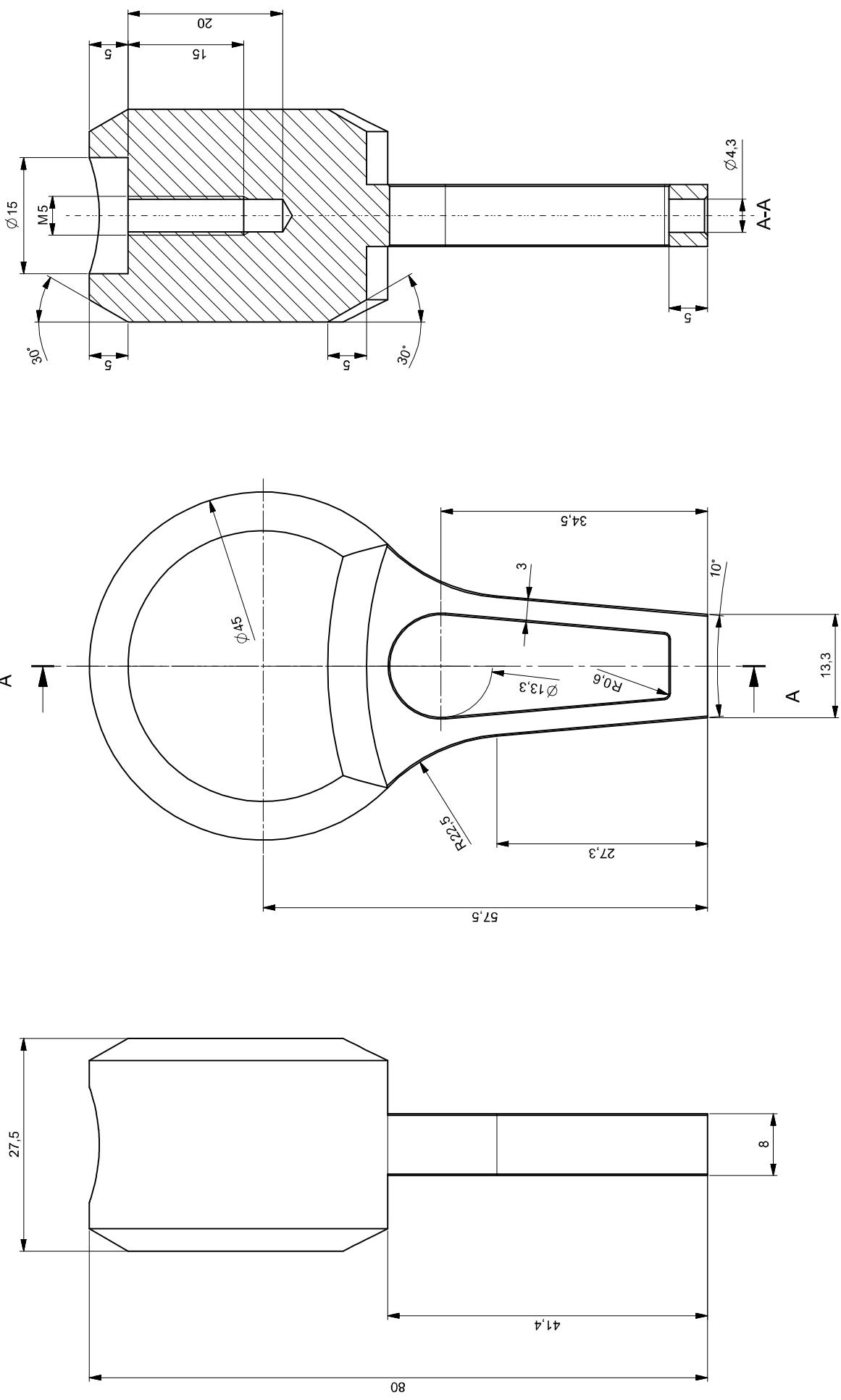
B

C (5:1)



Tolleranze generali ISO 2768-fH





Contrappeso				Ottone	1/2
Pos.	Qta	Nr. Identif.	Denominazione	Materiale	Foglio
-	-	Note: Smussi non quotati: 02, x45°		Disegnato 2:1	2019-06-21 M. Rinaldi
-	-	Denom. Contrappeso		Controllato Revisione	2019-06-27 M. Rinaldi
				Contr. sec. norme Valido per l'esecuzione	

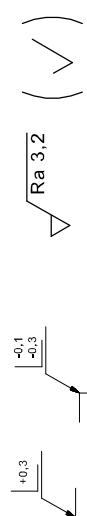
RWIP_MR_E009
N. Disegno: DW1

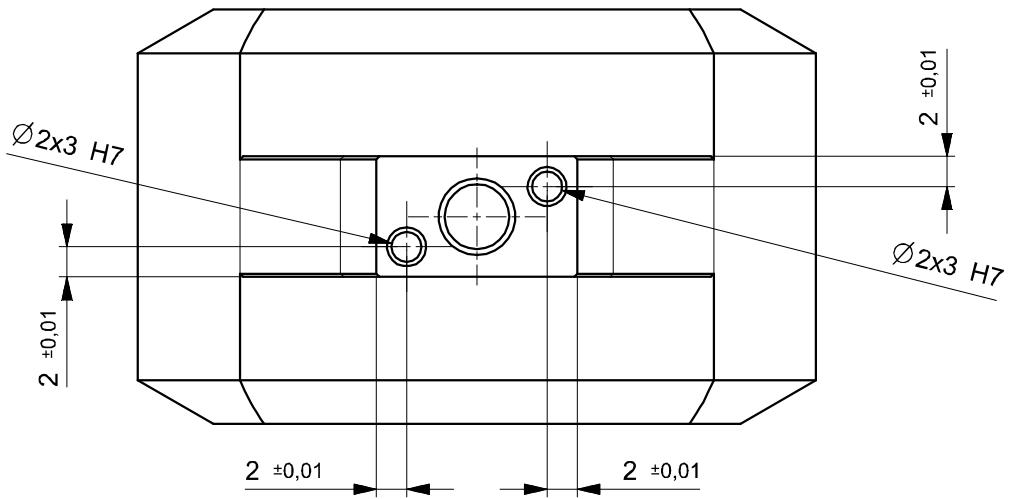
SUPSI

Scuola universitaria professionale della Svizzera Italiana
Dipartimento tecnologie innovative

SUPSI

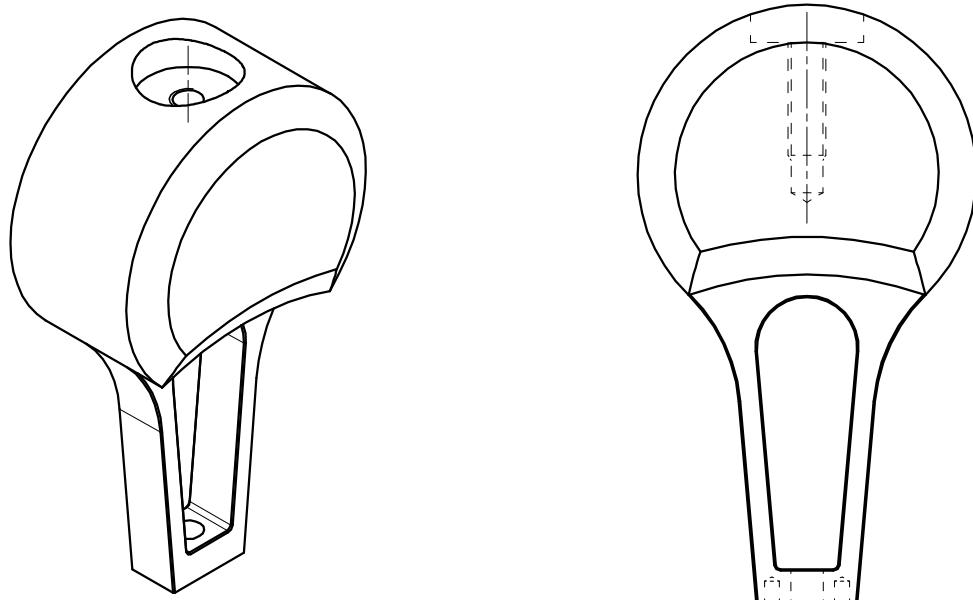
Tolleranze generali ISO 2768-fH





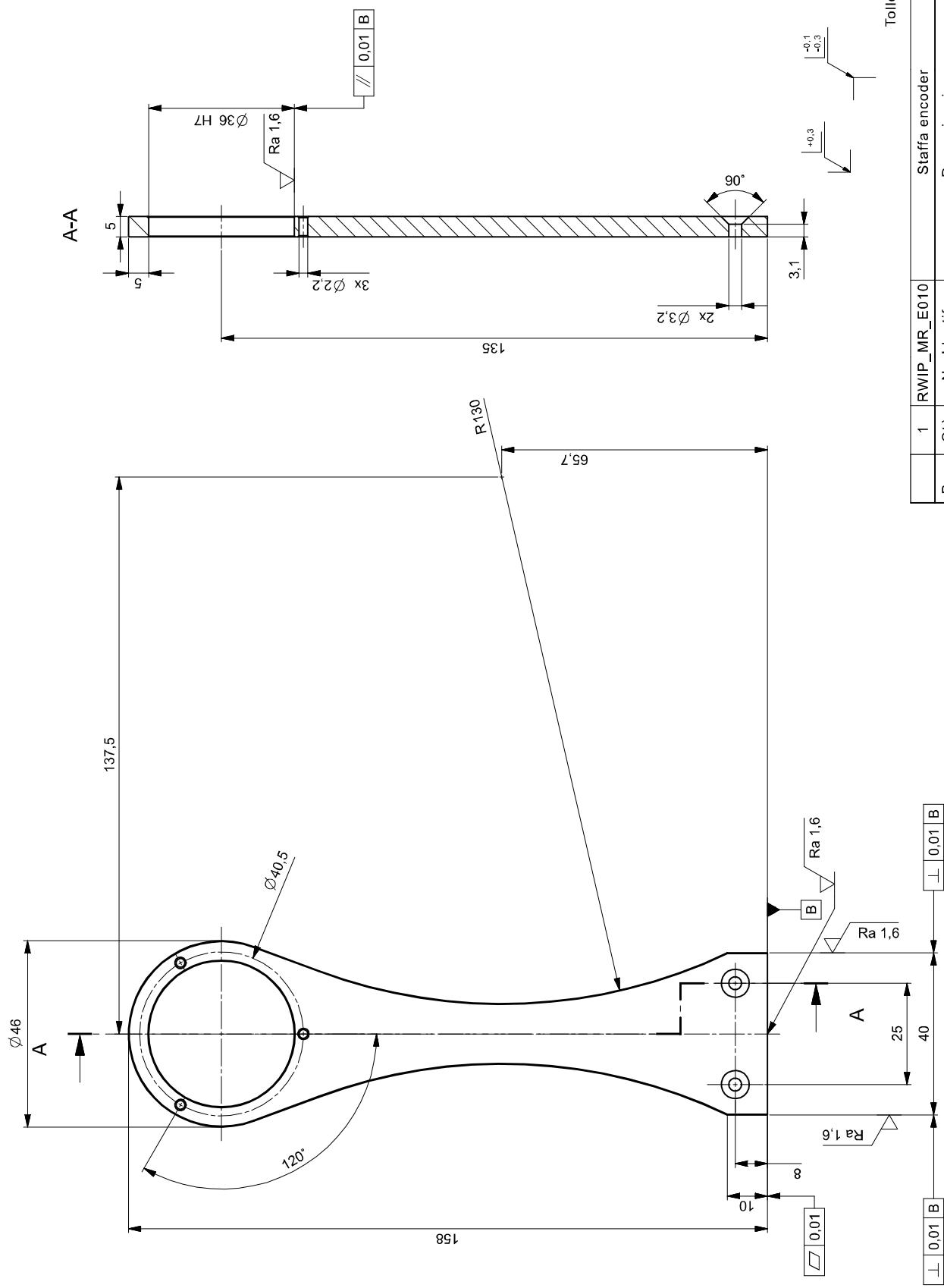
Vista isometrica
Scala 1:1

Vista dall'alto
Scala 1:1



Tolleranze generali ISO 2768-fH

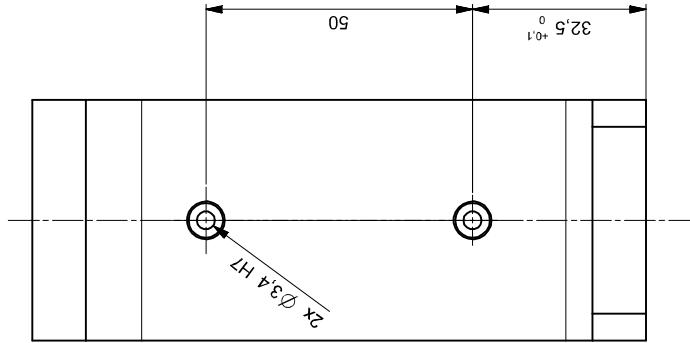
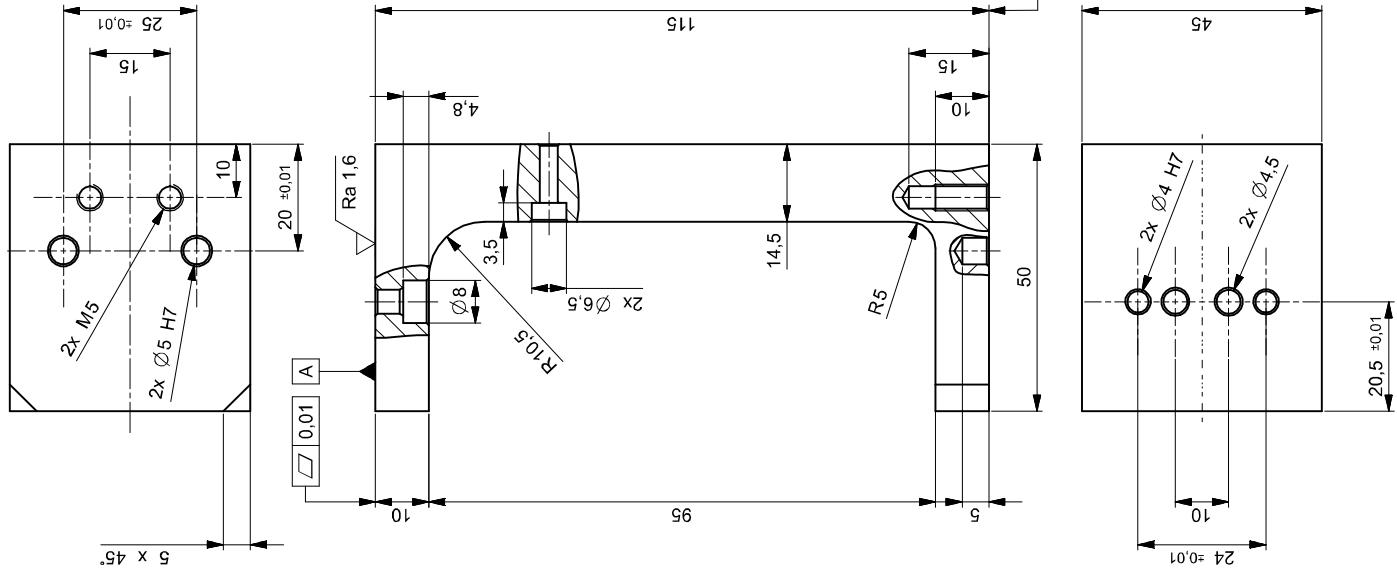
	1	RWIP_MR_E009	Contrappeso	Ottone	2/2
Pos.	Qtà	Nr. Identif.	Denominazione	Materiale	Foglio
		Note: Smussi non quotati: 0,2x45°	Scala 2:1	Disegnato 219-06-21	M. Rinaldi
		Denom. Contrappeso	Revisione	Controllato	
				Contr. sec. norme	
				Valido per l'esecuzione	
Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana Dipartimento tecnologie innovative SUPSI			Nr. Disegno:	RWIP_MR_E009_DW2	



Tolleranze generali ISO 2768-fH

	EN AW 6082	1/1
Pos.	1	RWIP_MR_E010
Qta	Nr. Identif.	Denominazione
		Note: Smussi non quotati: 0,2x45°
		Denom. Staffa encoder
		Scala 1:1
		Revisione
		Disegnato M. Rinaldi Controlato M. Rinaldi Contr. sec. norme Valido per l'esecuzione
		Foglio

RWIP_MR_W010
DW1
Scuola universitaria professionale della Svizzera Italiana
Dipartimento tecnologie innovative
SUPSI

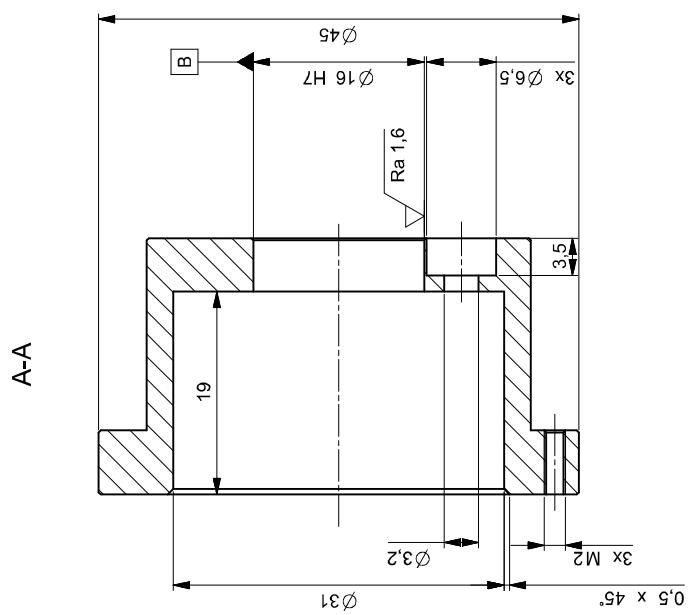
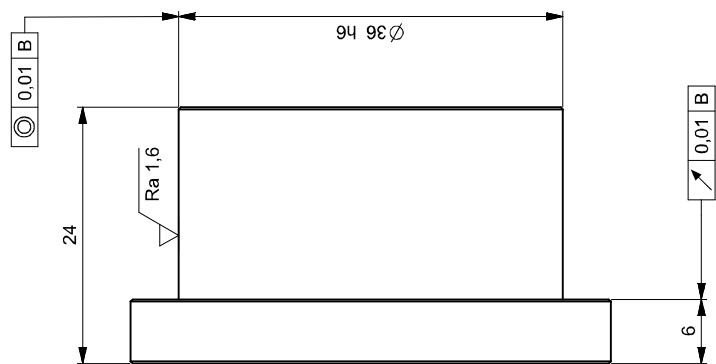
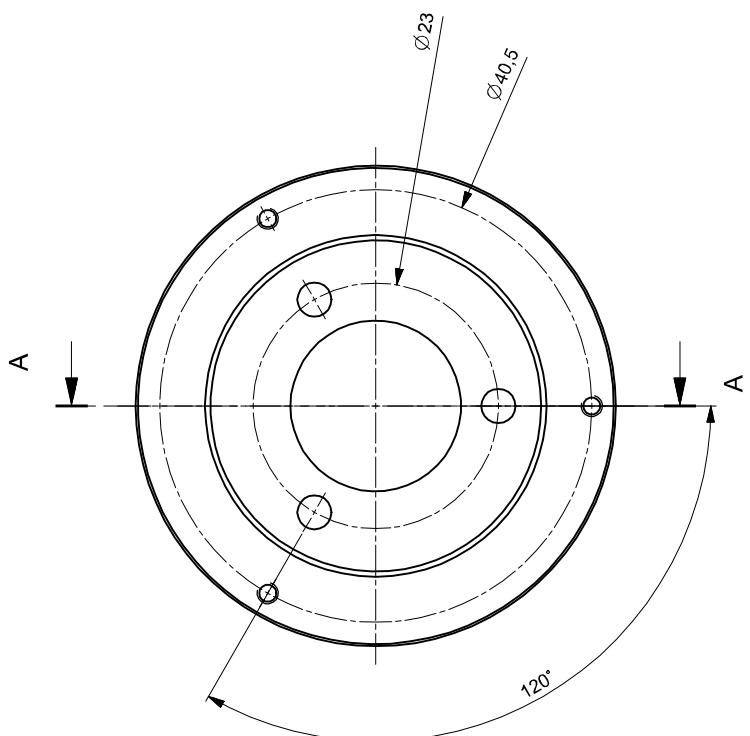


$\sqrt{Ra} 3,2$ (✓)
 $\sqrt{Ra} 0,3$
 $\sqrt{Ra} -0,3$

Tolleranze generali ISO 2768-fH

RWIP_MR_E011			Base supporto pendolo		EN AW 6082		1/1	
Pos.	Qta	Nr. Identif.	Denominazione		Scala	Materiale	Foglio	
			Note: Smussi non quotati: 0,2x45°		1:1	Disegnato M. Rinaldi	2019-07-25	
			Denom. Base supporto pendolo		Revisione	Controllato M. Rinaldi	2019-07-25	
						Norme Valido per l'esecuzione		

RWIP_MR_E011-
DW1
Nr. Disegno:



Vista frontale
Scalma 1:1



$\sqrt{Ra\ 3,2}$ (✓)

$\sqrt{Ra\ 0,1}$

$\sqrt{Ra\ 0,3}$

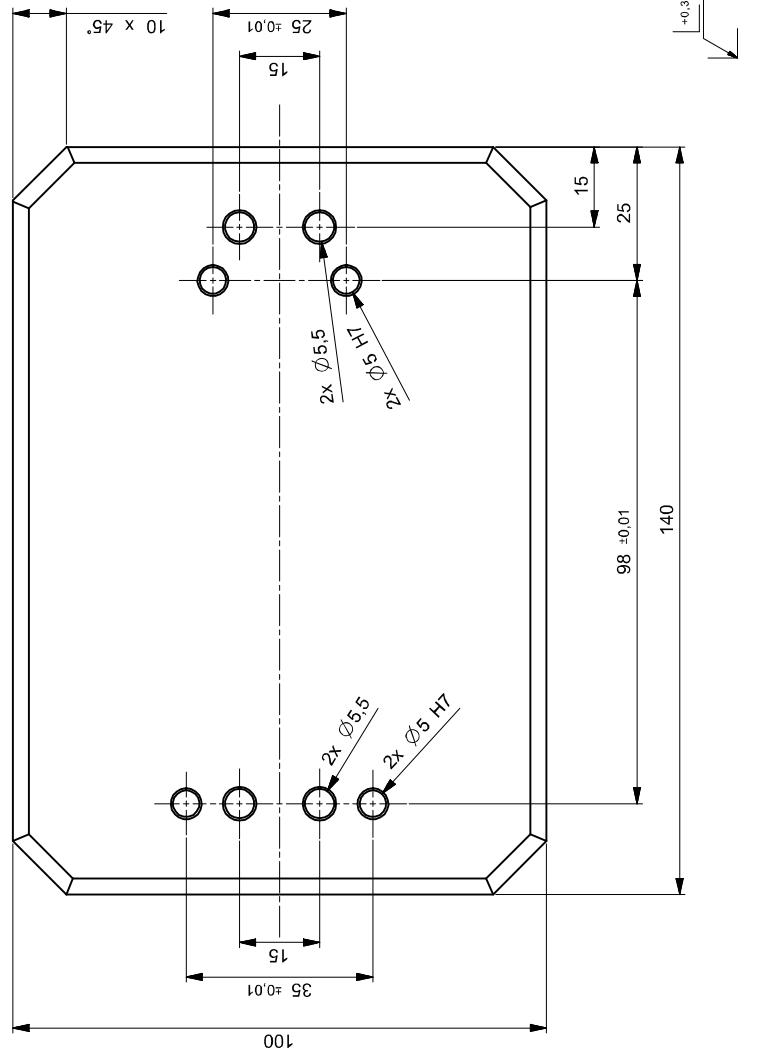
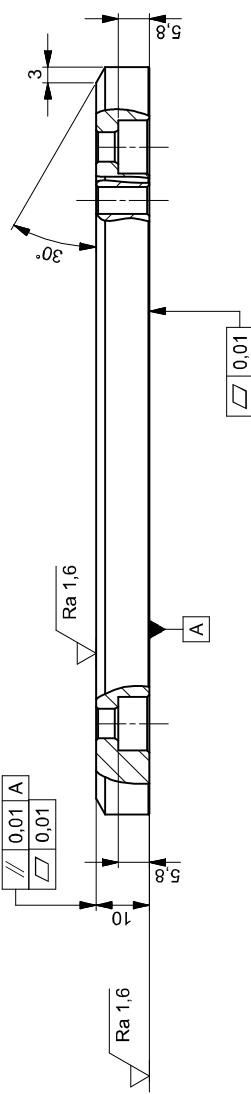
Tolleranze generali ISO 2768-fH

	1	RWIP_MR_E012	Flangia encoder	EN AW 6082	1/1
Pos.	Qta	Nr. Identif.	Denominazione	Materiale	Foglio
		Note: Smussi i ppon quottati: 0,2x45°		Disegnato M. Rinaldi 2019-06-21	
			Scalma 2:1	Controllato M. Rinaldi 2019-06-27	
			Revisione	Contr. sec. norme Valido per l'esecuzione	

Nr. Disegno: RWIP_MR_E012-DW1

SUPSI

Scuola universitaria professionale della Svizzera Italiana
Dipartimento tecnologie innovative



Tolleranze generali ISO 2768-fH



EN AW 6082 1/1

Materiale Foglio

Disegnato 2019-06-22 M. Rinaldi

Controllato 2019-06-27 M. Rinaldi

Contr. sec.

Norme

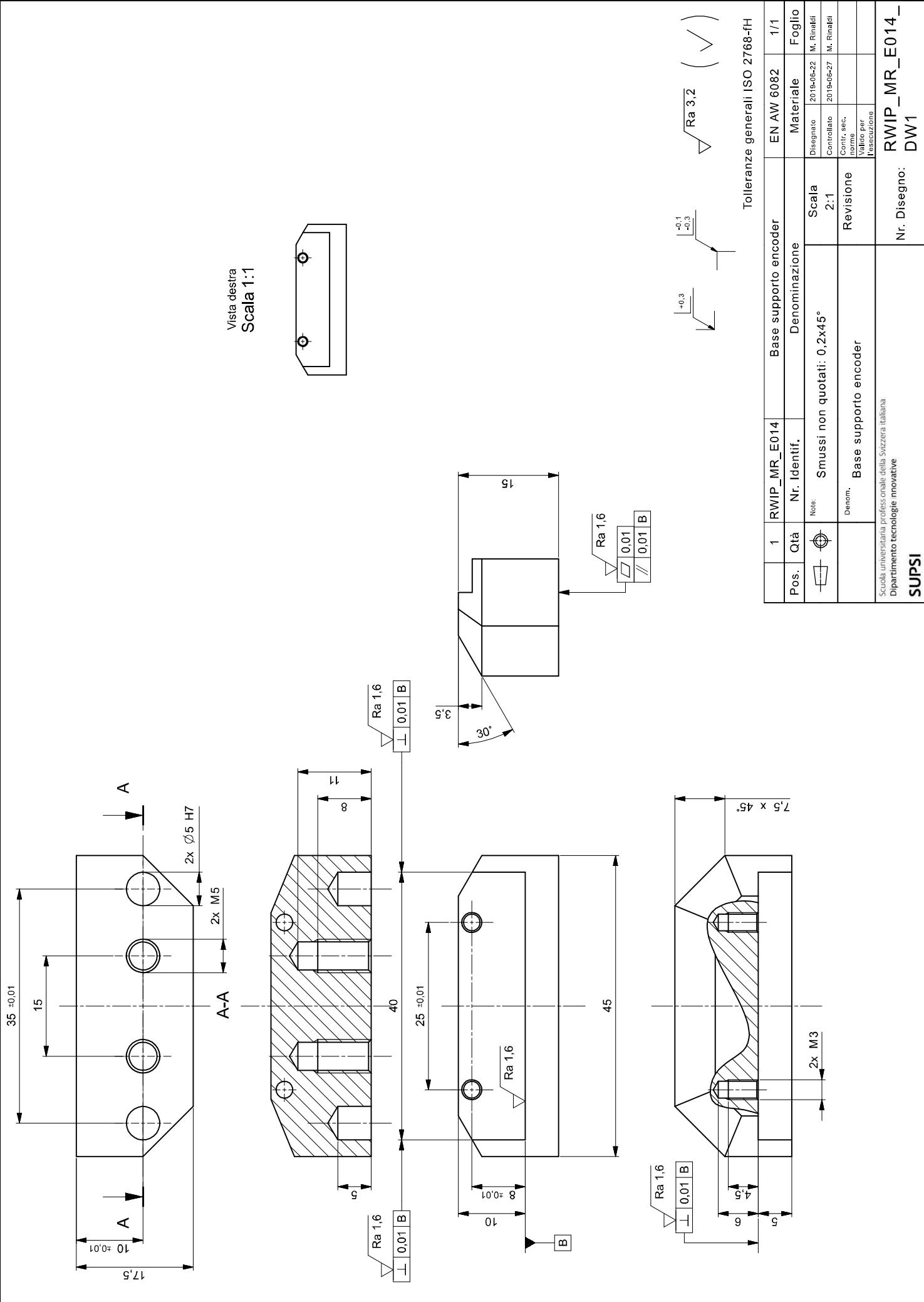
Valido per

l'esecuzione

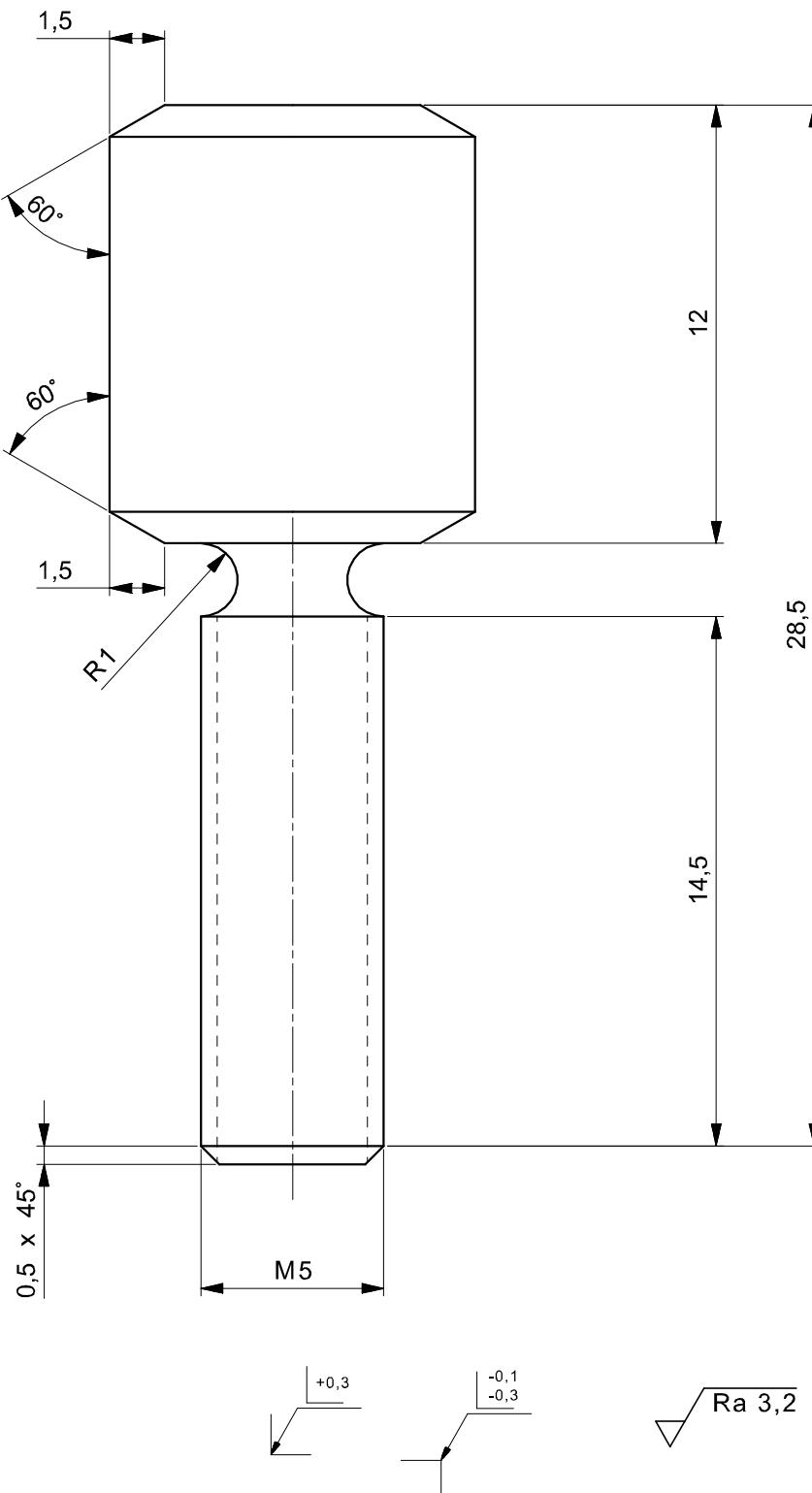
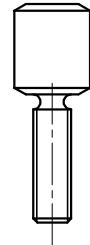
Nr. Disegno:

RWIP_MR_E013_DW1

SUPSI

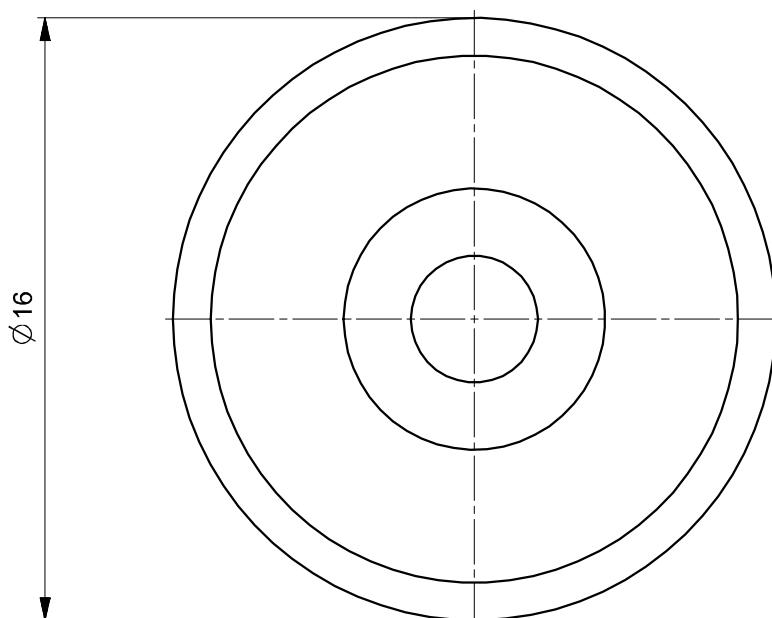
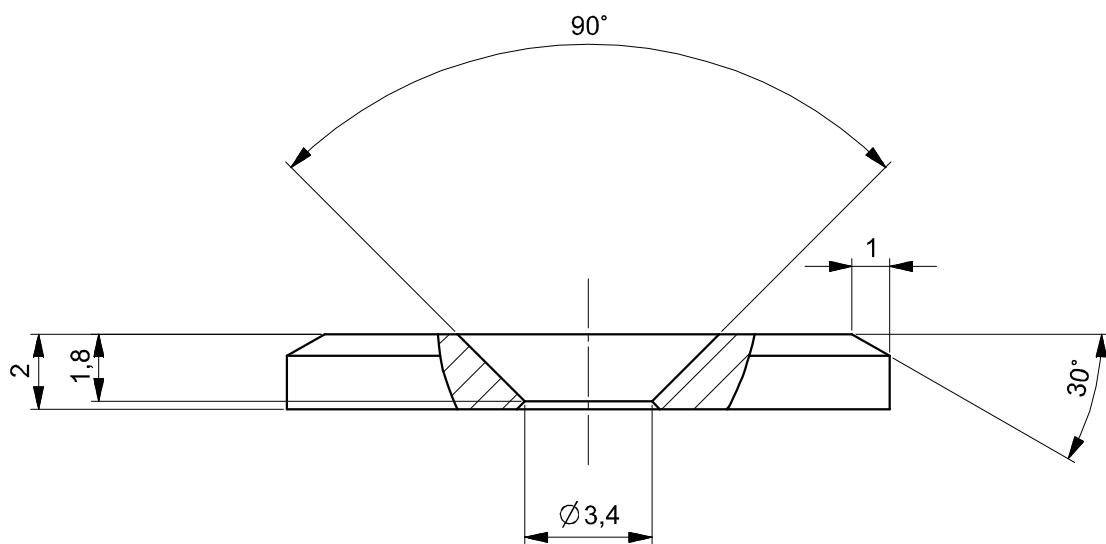


Vista frontale
Scala 1:1

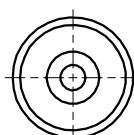


Tolleranze generali ISO 2768-fH

	1	RWIP_MR_E015	Contrappeso di aggiustaggio	Ottone	1/1			
Pos.	Qtà	Nr. Identif.	Denominazione	Materiale	Foglio			
		Note:	Denom. Contrappeso di aggiustaggio	Scala 5:1	Disegnato 2019-07-10 M. Rinaldi			
					Controllato 2019-07-10 M. Rinaldi			
		Denom. Contrappeso di aggiustaggio	Revisione	Contr. sec. norme				
				Valido per l'esecuzione				
				Nr. Disegno:	RWIP_MR_E015_ DW1			



Vista dall'alto
Scala 1:1



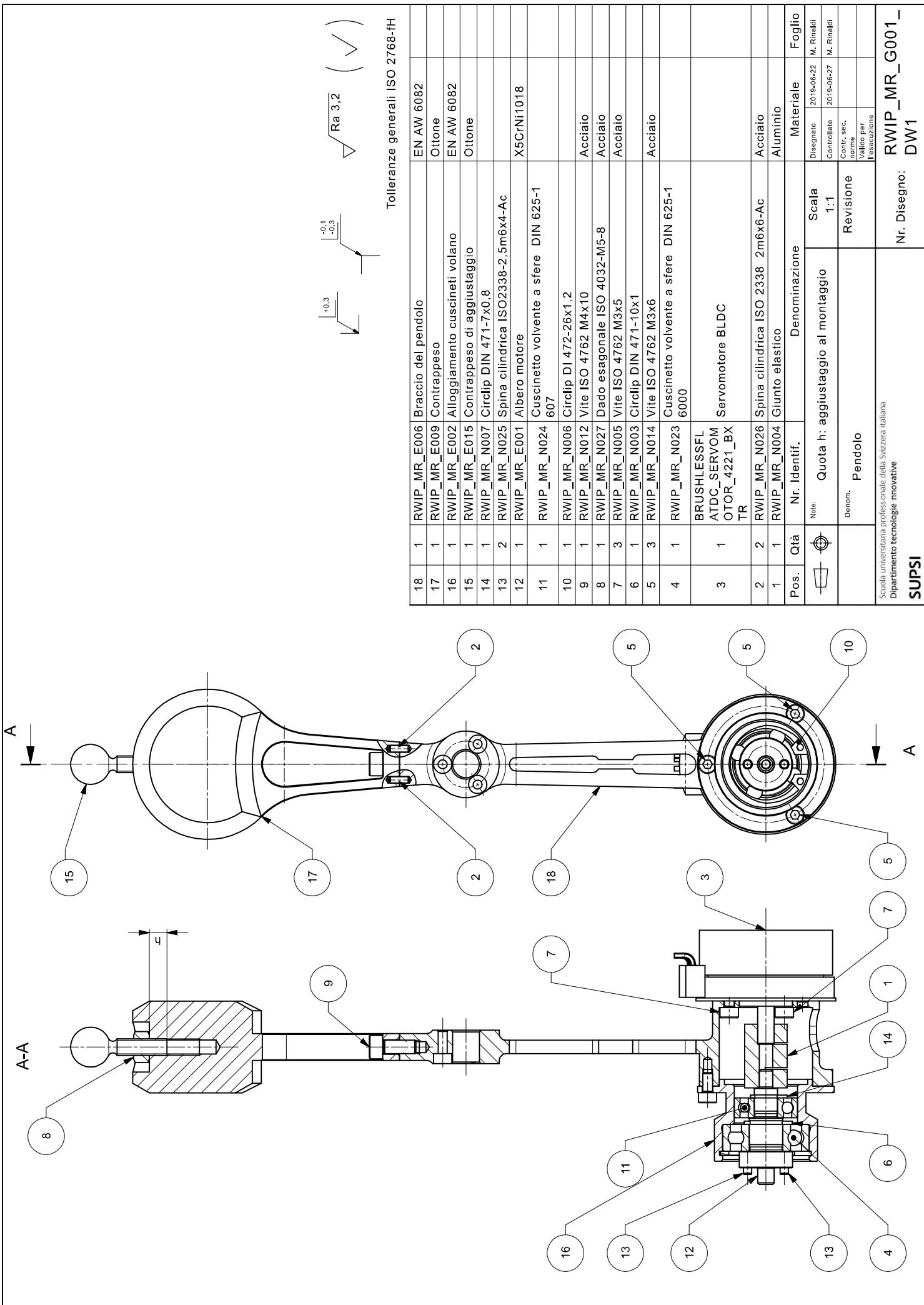
$+0,3$ $-0,1$

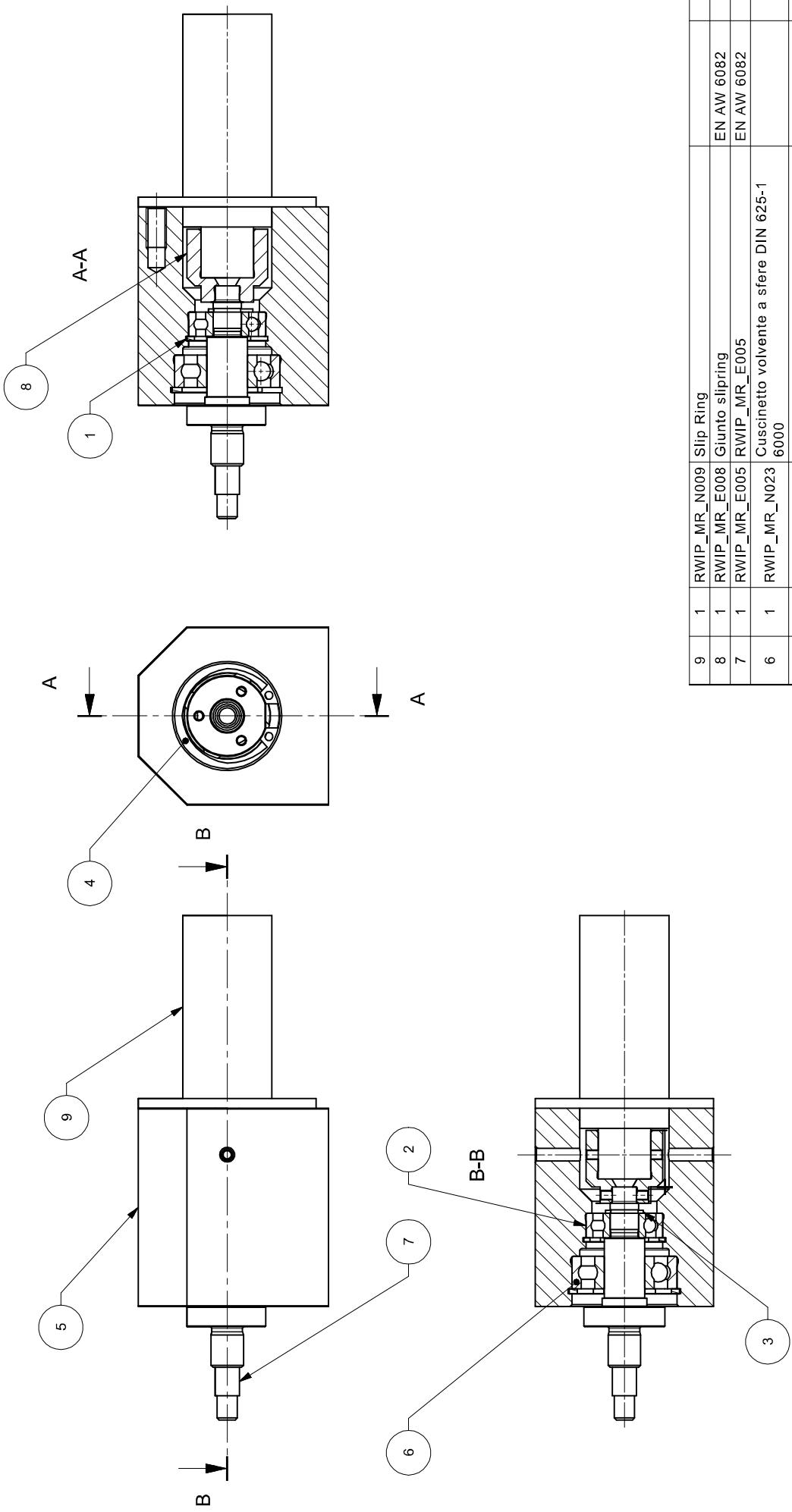
∇ Ra 3,2 (✓)

Tolleranze generali ISO 2768-fH

	1	RWIP_MR_E017	Ranelle volano	Ottone	1/1
Pos.	Qtà	Nr. Identif.	Denominazione	Materiale	Foglio
	Note:	Smussi non quotati: 0,2x45°	Scala 5:1	Disegnato 2019-06-23 M. Rinaldi	
				Controllato 2019-07-01 M. Rinaldi	
	Denom.	Ranella volano	Revisione	Contr. sec. norme Valido per l'esecuzione	
Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana Dipartimento tecnologie innovative SUPSI			Nr. Disegno: RWIP_MR_E017_DW1		

B.2 Disegni di assieme





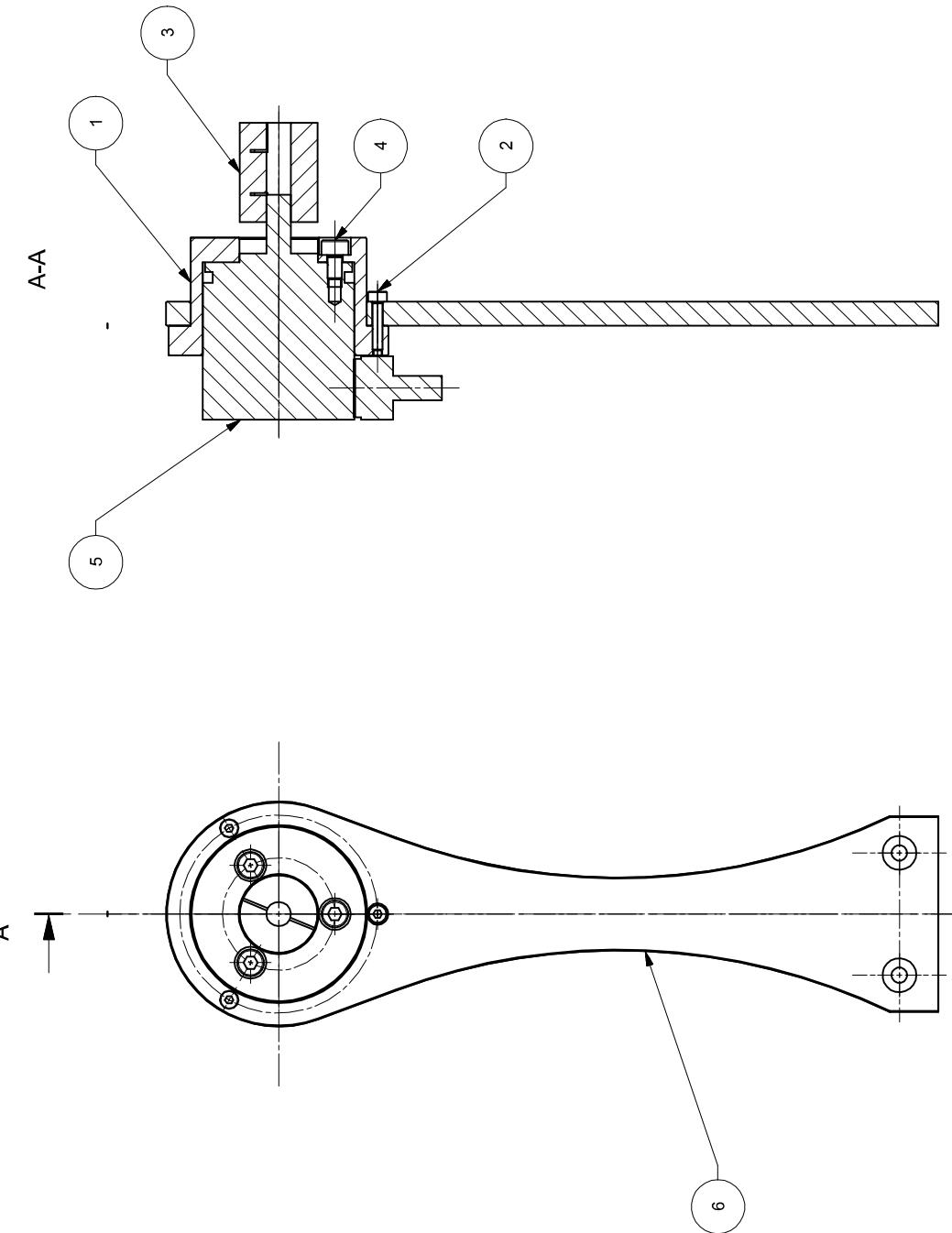
Pos.	Qta	Nr. Identif.	Denominazione	Materiale	Foglio
			Note:	Scalma	Disegnato 2019-06-22 M. Rinaldi
			(Denom. Supporto pendolo)	1:1	Controllato 2019-06-27 M.Rinaldi
				Revisione	Contr. sec. norme
					Valido per l'esecuzione
					Nr. Disegno: RWIP_MR_G002_DW1



Tolleranze generali ISO 2768-IH

RWIP_MR_G002_DW1

cleardoublepage



6	1	RWIP_MR_E010	Staffa encoder	EN AW 6082	
5	1	RWIP_MR_N010	Encoder digitale		
4	3	RWIP_MR_N005	Vite ISO 4762 M3x5	Acciaio	
3	1	RWIP_MR_N011	Giunto elastico	Aluminio	
2	3	RWIP_MR_N018	Vite ISO 4762 M2x10	Acciaio	
1	1	RWIP_MR_E012	Flangia encoder	EN AW 6082	
Pos.	Qta	Nr. Identif.	Denominazione	Materiale	Foglio
			Note: Denom. Supporto Encoder	Scalma 1:1 Revisione	Disegnato 2019-06-22 M. Rinaldi Controllato 2019-06-27 M. Rinaldi Contr. sec. norme Valido per l'esecuzione

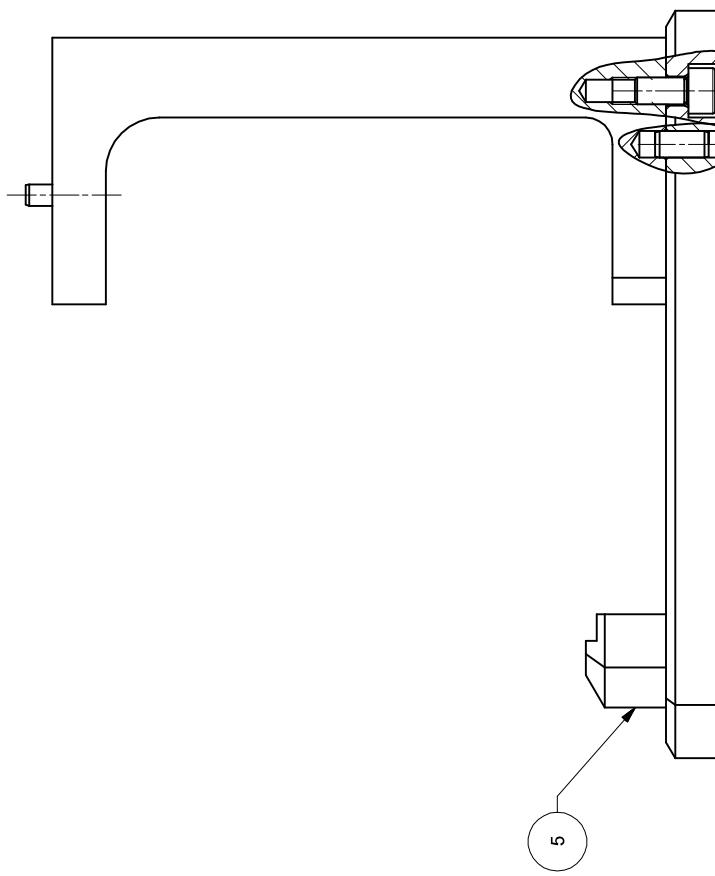
$\sqrt{Ra\ 3,2}$ (✓)

$+0,3$ $-0,1$
 $-0,3$

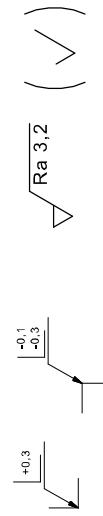
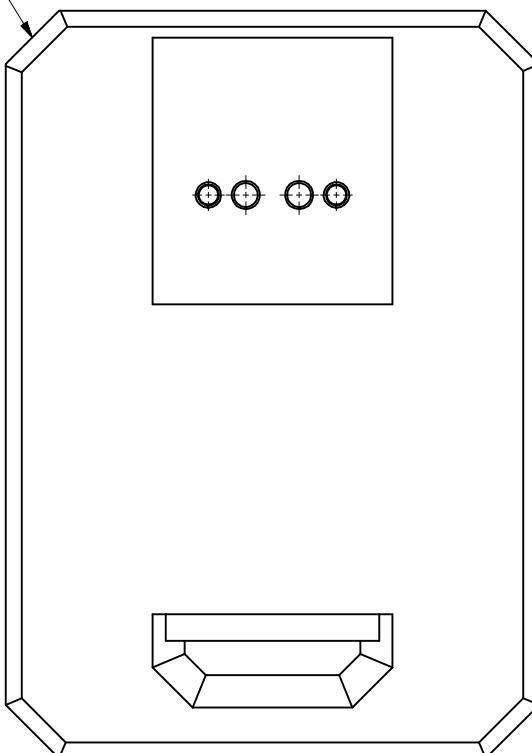
Tolleranze generali ISO 2768-IH

RWIP_MR_G003_DW1
Nr. Disegno:

6



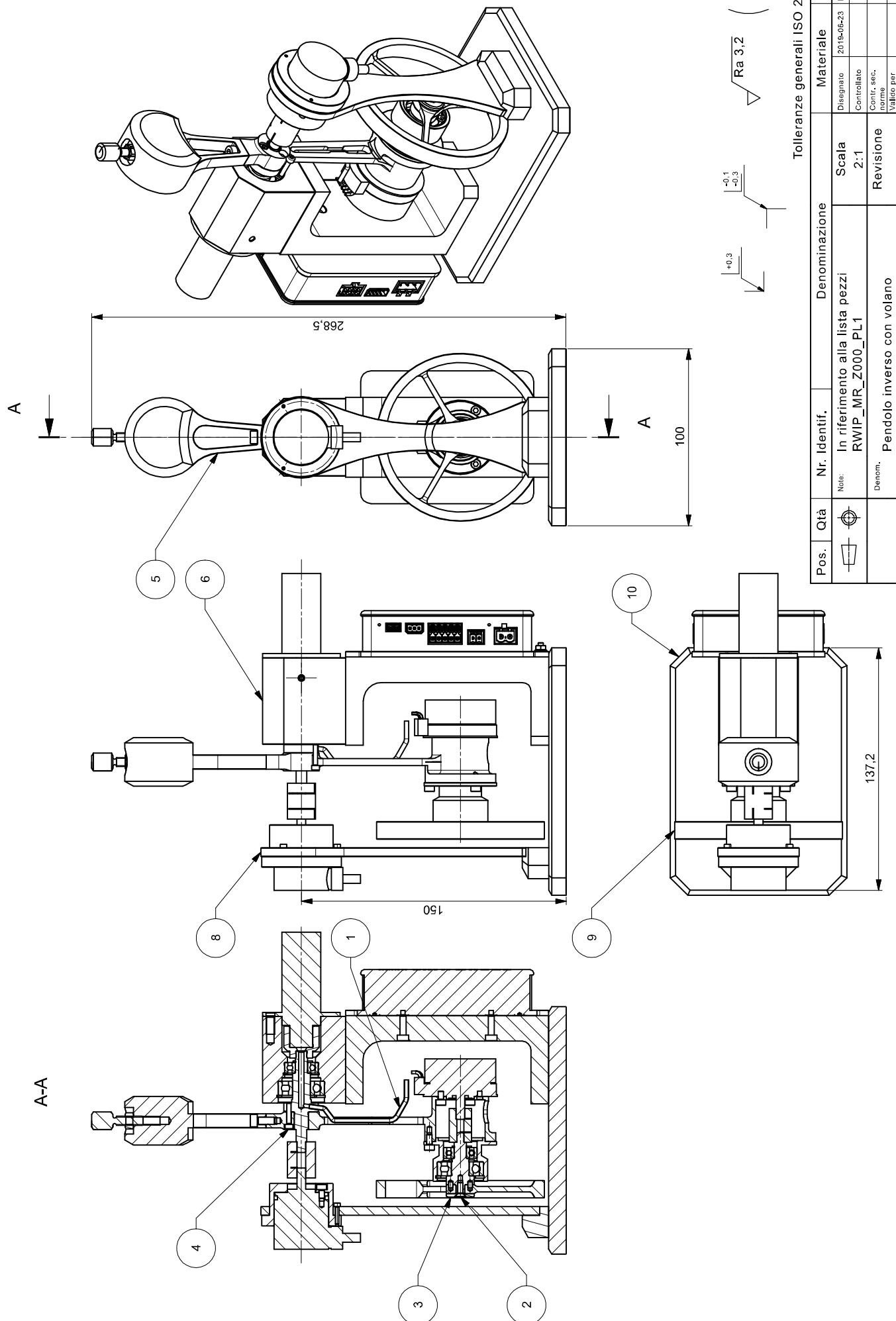
2



Tolleranze generali ISO 2768-fH

Pos.	Qta	Nr. Identif.	Denominazione	Materiale	Foglio
			Note:	Scalino	M. Rinaldi
			(Denom. Base)	1:1	Controlato 2019-06-22 M. Rinaldi
				Revisione	Contr. sec. 2019-06-27 M. Rinaldi
				Norme	Valido per
					l'esecuzione

RWIP_MR_G004-
DW1
Nr. Disegno:



Tolleranze generali ISO 2768-fH		Materiale	Foglio
Disegnato	2019-06-23	M. Rinaldi	
Controllato			
Contr. sec.			
Denom. norme			
Valido per			
I'esecuzione			

Note: In riferimento alla lista pezzi RWIP_MR_Z000_PL1

Pos.	Qta	Nr. Identif.	Denominazione	Scala	Revisione
			Pendolo inverso con volano	2:1	

Nr. Disegno: RWIP_MR_Z000_DW1



Tolleranze generali ISO 2768-fH

10	1	Base			1/2
9	1	Volano	EN AW 6082		1/2
8	1	Supporto encoder			1/2
7	2	Vite ISO 4762 M4x10			1/2
6	1	Supporto pendolo			1/2
5	1	Pendolo			1/2
4	3	Vite ISO 4762 M2,5x12			1/2
3	1	Ranella volano	Ottone		1/2
2	3	Vite ISO7046-2 M3x8			1/2
1	1	Passacavi			1/2
Pos.	Qtà	Nr. Identif.	Denominazione	Materiale	Foglio
		Note: In riferimento al disegno RWIP_MR_Z000_DW1	Scala	Disegnato	2019-06-23
				Controllato	
		Denom. Pendolo inverso con volano	Revisione	Contr. sec. norme	
				Valido per l'esecuzione	
				Nr. Disegno:	RWIP_MR_Z000_PL1

Appendice C

Schede tecniche

STUDENTSUPSI

NEW

 FAULHABER

Brushless Flat DC-Servomotors

External rotor technology, with housing

9,7 mNm

6 W

Series 2214 ... BXT H

Values at 22°C and nominal voltage	2214 S	006 BXT H	012 BXT H	024 BXT H	
1 Nominal voltage	U_N	6	12	24	V
2 Terminal resistance, phase-phase	R	2,42	6,95	25,9	Ω
3 Efficiency, max.	$\eta_{max.}$	72	74	69	%
4 No-load speed	n_0	5 760	6 500	6 970	min^{-1}
5 No-load current, typ. (with shaft ø 3 mm)	I_0	0,061	0,04	0,016	A
6 Starting torque	M_A	23,5	29,1	29,6	mNm
7 Speed constant	k_n	997	561	296	min^{-1}/V
8 Back-EMF constant	k_E	1	1,78	3,37	mV/min^{-1}
9 Torque constant	k_M	9,58	17	32,2	mNm/A
10 Current constant	k_I	0,104	0,0588	0,031	A/mNm
11 Slope of n-M curve	$\Delta n/\Delta M$	252	229	238	min^{-1}/mNm
12 Terminal inductance, phase-phase	L	271	884	3 150	μH
13 Mechanical time constant	τ_m	8,7	7,92	8,22	ms
14 Rotor inertia	J	3,3	3,3	3,3	gcm^2
15 Angular acceleration	$\alpha_{max.}$	71,1	88,2	89,7	$\cdot 10^3 rad/s^2$
16 Operating temperature range:					
– motor	-40 ... +100				°C
– winding, max. permissible	+125				°C
17 Shaft bearings		ball bearings, preloaded			
18 Shaft load max.:					
– with shaft diameter	3				mm
– radial at 3 000 min ⁻¹ (5 mm from mounting flange)	6				N
– axial at 3 000 min ⁻¹ (push / pull)	2				N
– axial at standstill (push / pull)	50				N
19 Shaft play:					
– radial	\leq	0,015			mm
– axial	=	0			mm
20 Mass		28,9			g
21 Direction of rotation		electronically reversible			
22 Speed up to	$n_{max.}$	10 000			min^{-1}
23 Number of pole pairs		7			
24 Hall sensors		digital			
25 Magnet material		NdFeB			
Rated values for continuous operation					
26 Rated torque	M_N	9,4	9,7	9,7	mNm
27 Rated current (thermal limit)	I_N	1,16	0,653	0,36	A
28 Rated speed	n_N	1 260	2 630	2 710	min^{-1}
29 Rated slope of n-M curve	$\Delta n/\Delta M$	479	399	439	min^{-1}/mNm

Note: Rated values are measured at nominal voltage and 22°C ambient temperature.

Note:

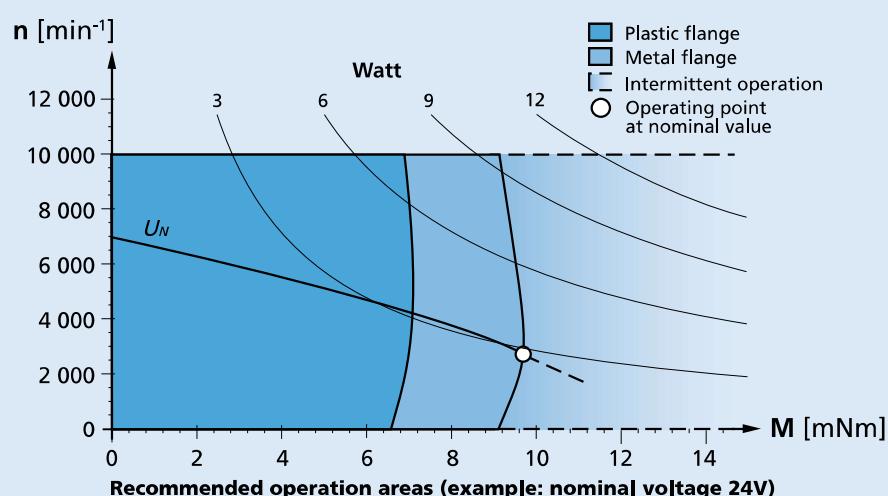
The display shows the range of possible operation points of the drives at a given ambient temperature of 22°C.

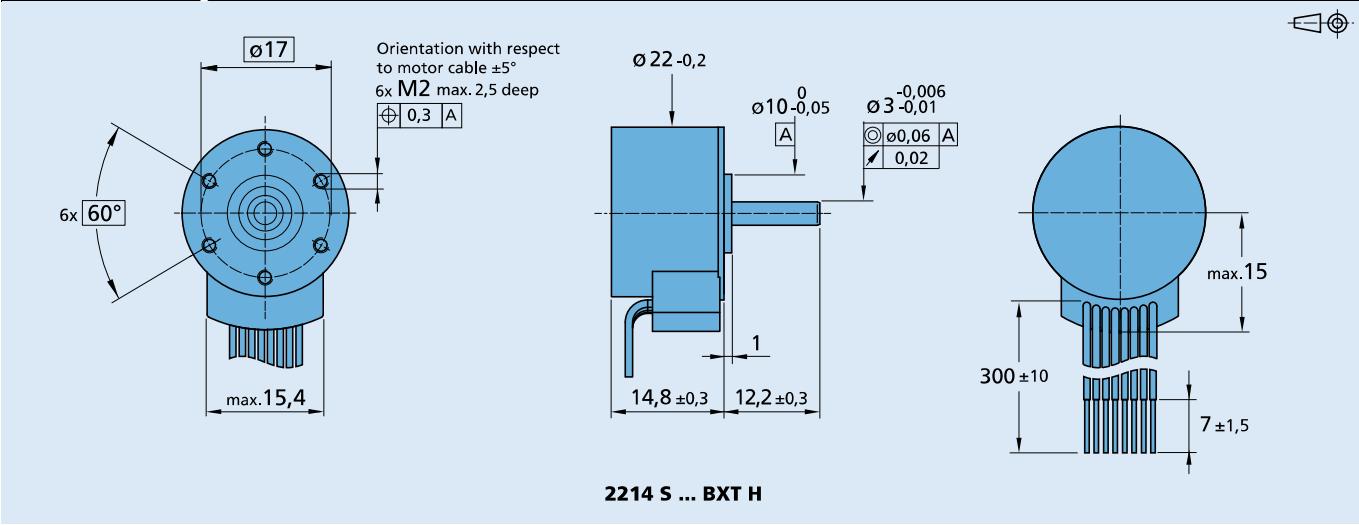
The diagram indicates the recommended speed in relation to the available torque at the output shaft.

It includes the assembly on a plastic- as well as on a metal flange (assembly method: IM B 5).

The nominal voltage linear slope describes the maximal achievable operating points at nominal voltage.

Any points of operation above this linear slope will require a supply voltage $U_{mot} > U_N$.



Dimensional drawing

Option, cable and connection information

Example product designation: **2214S012BXTH-3830**

Option	Type	Description	Connection
3830	Connector	Standard cable with connector MOLEX Microfit 3.0, 43025-0800, recommended mating connector 43020-0800	Function Phase C yellow Phase B orange Phase A brown GND black U_{DD} (+5V) red Hall sensor C grey Hall sensor B blue Hall sensor A green
4337	Gearhead combination	For combination with gearhead 20/1R	Standard cable Single wires, material PVC, AWG 26, Phase A/B/C, AWG 26, Hall A/B/C, U_{DD} , GND

Product combination

Precision Gearheads / Lead Screws	Encoders	Drive Electronics	Cables / Accessories
20/1R 22F 26/1 R	IE3-1024 IE3-1024 L IERS3-500 IERS3-500 L IER3-10000 IER3-10000 L	SC 1801 P SC 1801 S SC 2402 P SC 2804 S MC 5004 P MC 5005 S	To view our large range of accessory parts, please refer to the "Accessories" chapter.

Motion Controllers

V3.0, 4-Quadrant PWM
with RS232, CANopen or EtherCAT interface

MC 5005 S

Values at 22°C		MC 5005 S	
Power supply electronic	U_p	12 ... 50	V DC
Power supply motor	U_{mot}	0 ... 50	V DC
PWM switching frequency	f_{PWM}	100	kHz
Efficiency electronic	η	97	%
Max. continuous output current	I_{cont}	5	A
Max. peak output current ¹⁾	I_{max}	15	A
Standby current for electronic (at $U_p=24V$)	I_{el}	RS / CO: 0,06 ET: 0,07	A
Operating temperature range		-40 ... +85	°C
Housing material		aluminium, powder-coated	
Mass		RS / CO: 230 ET: 270	g

¹⁾ S2 mode for max. 60s

Interfaces	MC 5005 S RS	MC 5005 S CO	MC 5005 S ET
Configuration from Motion Manager 6.0	RS232 / USB RS232	CANopen / USB CANopen	RS232 / USB EtherCAT
Fieldbus			

Basic features

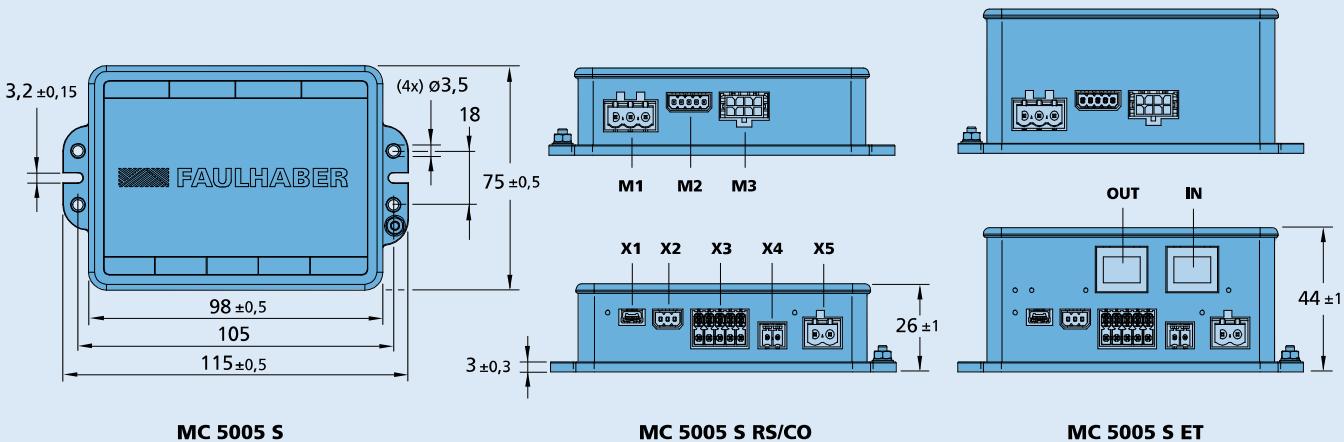
- Control of brushless, DC- and linear motors
- Supported sensor systems: absolute encoders (AES or SSI), incremental encoders (optical or magnetic), Hall sensors (digital or analog), tachometers
- Positioning resolution when using analog Hall sensors as position encoder: 4096 increments per revolution
- 3 digital inputs, 2 digital outputs, 2 analog inputs, flexible configuration
- Setpoint specification via fieldbus, quadrature signal, pulse and direction or analog inputs
- Optional stand-alone operation via application programs in all interface versions

Range of functions

Operating modes	PP, PV, PT, CSP, CSV, CST and homing acc. to IEC 61800-7-201 or IEC 61800-7-301 as well as position-, speed- and torque control via analog setpoint or voltage controller
Speed range for brushless motors with number of pole pairs 1	0 min ⁻¹ ... 30 000 min ⁻¹ with sinusoidal commutation (optionally to 60 000 min ⁻¹ with block commutation)
Application programs	Max. 8 application programs (BASIC), one of which is an autostart function
Additional functions	Touch-probe input, connection of a second incremental encoder, control of a holding brake
Indicator	LEDs for displaying the operating state Trace as recorder (scope function) or logger
Motor types	DC, BL- and linear motors

Dimensional drawing

Scale reduced


Options and connection information

 Example product designation: **MC 5005 S RS**

Option	Type	Description	Connection			
			Name	Function	Input/Output	Description
			X1	Configuration interface		USB
			X2	Fieldbus		RS: RS232
			X3	Input/Output	DigIn1, DigIn2, DigIn3 DigOut1, DigOut2 AnIn1, AnIn2 U _{out} / GND	CO: CANopen TTL or PLC level max. 0.7A cont. current ± 10V against AGND 5V
			X4	Electronic power supply		
			X5	Motor power supply		
			M1	Motor phases	A, B, C	
			M2	Hall sensors	A, B, C U _{out} / GND	digital or analog 5V
			M3	Encoder	A, \overline{A} , B, \overline{B} , I, \overline{I} EN, \overline{EN} , CLOCK, \overline{CLOCK} , DATA, \overline{DATA} U _{out} / GND	max. 5MHz AES orSSI 5V
			IN	Fieldbus		EtherCAT IN
			OUT	Fieldbus		EtherCAT OUT

Note: For details on the connection assignment, see device manual for the MC 5005.

Product combination

DC-Motors	Brushless DC-Motors	Linear DC-Servomotors	Cables / Accessories
2237 ... CXR	1645 ... BHS	LM 1247 ... 11	An extensive range of accessories is available for the products of the MC 5010 and MC 5005 controller series.
2342 ... CR	1660 ... BHT	LM 1483 ... 11	
2642 ... CR	2036 ... B	LM 2070 ... 11	
2642 ... CXR	2057 ... B		Included here are connection cables for controller and motor supply, sensors and interfaces, connector sets for motor- and supply side as well as mechanical components for optional top hat rail mounting.
2657 ... CR	2214 ... BXT H		
2657 ... CXR	2232 ... BX4		To view our large range of accessory parts, please refer to the „Accessories“ chapter.
2668 ... CR	2250 ... BX4		
3242 ... CR	2250 ... BX4 S		
3257 ... CR	2444 ... B		
3272 ... CR	3056 ... B		
	3216 ... BXT H		
	3242 ... BX4		
	3268 ... BX4		
	3564 ... B		
	4221 ... BXT H		

Motion Controllers

V2.5, 4-Quadrant PWM
with RS232 or CAN interface

MCDC 3002 S

Values at 22°C		MCDC 3002 S	
Power supply electronic	U_B/U_{EL}	8 ... 30	V DC
Power supply motor ¹⁾	$-/U_B$	0 ... 30	V DC
PWM switching frequency	f_{PWM}	78,12	kHz
Efficiency electronic	η	95	%
Max. continuous output current	I_{cont}	2	A
Max. peak output current ²⁾	I_{max}	3	A
Standby current for electronic (at $U_B=24V$)	I_{el}	0,04	A
Operating temperature range		-25 ... +85	°C
Housing material		Hotmelt	
Mass		16	g

¹⁾ Only available for option 3085 (separate power supply)

²⁾ S2 mode for max. 5s

Interfaces	MCDC 3002 S RS	MCDC 3002 S CF	MCDC 3002 S CO
Interface	RS232	CAN (FAULHABER channel)	CAN (CiA)
Protocol	FAULHABER - ASCII	CANopen	CANopen

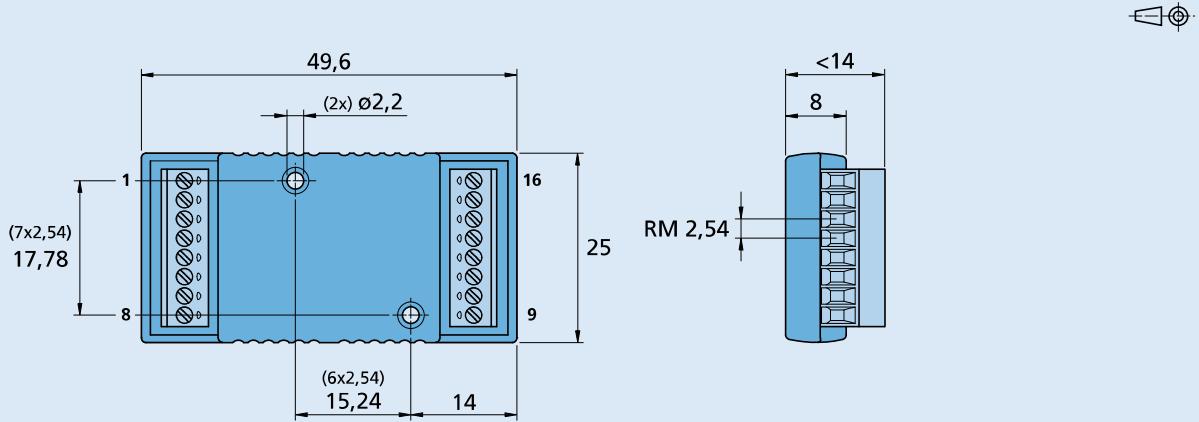
Basic features

- Operation of brushed DC-Micromotors
- Supported sensor systems: incremental encoders
- Positioning resolution per revolution depending on the used encoder type
- Max. 5 digital inputs, max. 1 digital output, 1 analog input. Not all I/Os available depending on wiring
- Setpoint specification via fieldbus, quadrature signal, pulse and direction or analog inputs
- Optional stand-alone operation via application programs with the RS232 interface version

Range of functions

Operating modes (RS and CF Versions)	Position, speed and torque control with setpoint specification via interface or analog. Position control with Gearing Mode or stepper motor operation. Operation as Servo Amplifier in voltage controller mode
Operating modes (CF and CO Versions)	Profile Position Mode (PP), Profile Velocity Mode (PV), Homing Mode.
Operating modes (CO Version)	Cyclic Synchronous Position Mode (CSP) acc. to IEC 61800-7-201 or IEC 61800-7-301
Speed range	5 min ⁻¹ ... 30 000 min ⁻¹
Application programs	Available in versions with RS232 interface
Additional functions	Overload protection for electronics and motor, self-protection from overheating, over-voltage protection in generator mode.
Indicator	Trace as logger
Motor types	Brushed DC-Micromotors with incremental encoders

Dimensional drawing



MCDC 3002 S

Options and connection information

Example product designation: **MCDC 3002 S RS 3085**

Option	Type	Description	Connection																																				
3085	Supply	Separate power supply for motor and electronics	<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th><th>Function</th><th>No.</th><th>Function</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td><td>TxD / CAN_H</td><td>9</td><td>4. In</td></tr> <tr> <td>2</td><td>RxD / CAN_L</td><td>10</td><td>Ch A</td></tr> <tr> <td>3</td><td>AGND</td><td>11</td><td>Ch B</td></tr> <tr> <td>4</td><td>Fault</td><td>12</td><td>U_{cc}</td></tr> <tr> <td>5</td><td>AnIn</td><td>13</td><td>SGND</td></tr> <tr> <td>6</td><td>U_B</td><td>14</td><td>Mot +</td></tr> <tr> <td>7</td><td>GND</td><td>15</td><td>Mot -</td></tr> <tr> <td>8</td><td>3. In</td><td>16</td><td>5. In</td></tr> </tbody> </table>	No.	Function	No.	Function	1	TxD / CAN_H	9	4. In	2	RxD / CAN_L	10	Ch A	3	AGND	11	Ch B	4	Fault	12	U_{cc}	5	AnIn	13	SGND	6	U_B	14	Mot +	7	GND	15	Mot -	8	3. In	16	5. In
No.	Function	No.	Function																																				
1	TxD / CAN_H	9	4. In																																				
2	RxD / CAN_L	10	Ch A																																				
3	AGND	11	Ch B																																				
4	Fault	12	U_{cc}																																				
5	AnIn	13	SGND																																				
6	U_B	14	Mot +																																				
7	GND	15	Mot -																																				
8	3. In	16	5. In																																				

Note: For details on the connection assignment, see device manual MC.

Product combination

DC-Motors	Cables / Accessories		
0615 ... S	2342 ... CR		
0816 ... SR	2642 ... CXR	To view our large range of accessory parts, please refer to the „Accessories“ chapter.	
1016 ... SR			
1024 ... SR			
1224 ... SR			
1319 ... SR			
1331 ... SR			
1336 ... CXR			
1516 ... SR			
1524 ... SR			
1717 ... SR			
1724 ... SR			
1727 ... CXR			
1741 ... CXR			
2224 ... SR			
2230 ... S			
2232 ... SR			
2233 ... S			
2237 ... CXR			

Accessories

Programming Adapter MC for Motion Controller V2.5 RS232/CAN interface

Part No.: 6501.00121

Temperature range:

– Operating temperature

6501.00121

– 10 ... + 65

°C

Dimension and Weight:

– Dimension (L x B x H)

47,5 x 31,5 x 15

mm

– Mass

21

g

Note: All switches are in the "OFF" position in the as-delivered condition. These switches must be set accordingly depending on the application.

General information

The programming adapter is used to connect and for the parameter set-up of Motion Controller series MCxx 3002 S / F with serial RS232 or CAN interface.

The different operating modes can be selected using the 6 DIP switches. A Motion Controller can be connected to each programming adapter.

Description of DIP switch (S1) settings

1: Fault	ON	Pull-up resistor with LED connected to programming adapter.
	OFF	Open collector
2: Term	ON	120Ω terminating resistor for the final node in the CAN network connected to the programming adapter.
	OFF	Terminating resistor not connected
3: CAN ¹⁾	ON	Operation with CAN interface
	OFF	Deactivated
4: RS232 ¹⁾	ON	Operation with RS232 interface
	OFF	Deactivated
5: NETMODE	ON	Pull-down resistor (2,2 kΩ) for RS232 wiring connected. This may only be connected to a node in the RS232 network.
	OFF	Deactivated
6: AGND	ON	AGND and GND interconnected.
	OFF	AGND and GND disconnected (with separate ground).

Pin assignment

at RS232 operation¹⁾

Pin	Connection X1
2	RS-232 / RxD
3	RS-232 / TxD
5	GND

at CAN operation¹⁾

Pin	Connection X1
2	CAN_L
3	GND
7	CAN_H

Pin Connection X2 / X3

1	+24V
2	GND
3	An In
4	AGND
5	Fault
6	3. In

Pin Connection X4

1	RS232 TxD / CAN-H
2	RS232 RxD / CAN-L
3	AGND
4	Fault
5	AnIn
6	U _b
7	GND
8	3. In

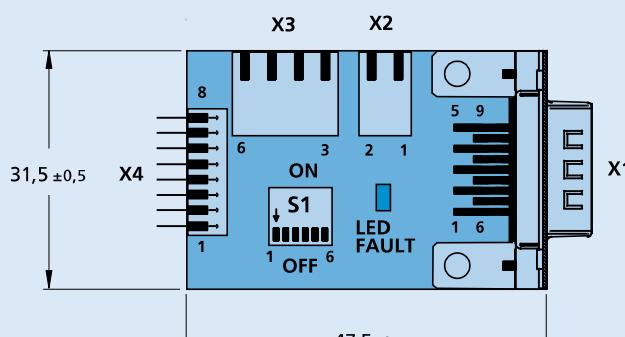
LED Status

	LED illuminates	no error
	LED does not illuminate	fault output switched to GND

	LED illuminates	error
	LED does not illuminate	fault output high-impedance

¹⁾ The pin assignments of X1 depend on the position of switches 3 and 4 of DIP switch S1.

Dimensional drawing and connection information



6501.00121

Connection

No.	Function
X1,	RS232 / CAN
X2 / X3	Supply connector; I/O
X4	Controller connector

Switch

No.	Switch
S1	DIP-switch (6 switches)

Incremental encoders

Micro series - shaft ø5 mm

10...2048 pulses per revolution

BDK



BDK with shaft

Features

- Mini encoder with solid shaft ø5 mm
- Optical sensing method
- Max. 2048 pulses per revolution
- Housing ø30 mm
- Operation speed max. 12000 rpm
- Synchro flange

Technical data - electrical ratings

Voltage supply	5 VDC ±10 % 10...30 VDC
Consumption typ.	60 mA (5 VDC, w/o load) 30 mA (24 VDC, w/o load)
Pulses per revolution	10...2048
Reference signal	Zero pulse, width 90°
Sensing method	Optical
Output frequency	≤100 kHz
Output signals	A 90° B, N + inverted
Output stages	Linedriver/RS422 Push-pull short-circuit proof
Interference immunity	DIN EN 61000-6-2
Emitted interference	DIN EN 61000-6-3
Approval	UL approval / E217823

Technical data - mechanical design

Size (flange)	ø30 mm
Shaft type	ø5 mm solid shaft
Admitted shaft load	≤10 N axial ≤10 N radial
Flange	Synchro flange
Protection DIN EN 60529	IP 42, IP 65
Operating speed	≤12000 rpm (IP 42) ≤6000 rpm (IP 64)
Operating torque typ.	0.0014 Nm (IP 42) 0.0075 Nm (IP 64)
Materials	Housing: polyamide black Flange: aluminium
Operating temperature	-20...+85 °C
Relative humidity	95 % non-condensing
Resistance	DIN EN 60068-2-6 Vibration 10 g, 16-200 Hz DIN EN 60068-2-27 Shock 50 g, 11 ms
Connection	Connector M9, 5-pin Connector M9, 8-pin Cable 1 m
Weight approx.	85 g

Incremental encoders

Micro series - shaft ø5 mm

10...2048 pulses per revolution

BDK

Part number

BDK 16. [] - [] - []

			Connection
			4 Cable 1 m, axial
			5 Cable 1 m, radial
			9 Connector radial
Solid shaft			
5	ø5 mm, IP 42		
L5	ø5 mm, IP 64		

Pulse number - see table

Voltage supply / signals

05A 5 VDC / antivalent (TTL compatible)
24K 10...30 VDC / push-pull short-circuit proof

Pulse number

10	50	120	360	1024
20	60	200	500	2000
30	100	250	1000	2048

Other pulse numbers on request.

Trigger level

Outputs 05A	Complementary Linedriver RS422
Output level High	>2,4 V (I = -20 mA)
Output level Low	<0,4 V (I = 20 mA)
Load High	<20 mA
Load Low	<20 mA

Outputs 24K (125 Ω)	Push-pull short-circuit protection
Output level High	>+Vs - 5,7 V (I = -30 mA)
Output level Low	<5,7 V (I = 30 mA)
Load High	<30 mA
Load Low	<30 mA

Accessories

Connectors and cables

10132983	Female connector M9, 8-pin, straight
11094664	Female connector M9, 8-pin, straight, 2 m cable
11094665	Female connector M9, 8-pin, straight, 5 m cable
11094660	Female connector M9, 5-pin, straight, 2 m cable
11094662	Female connector M9, 5-pin, straight, 5 m cable

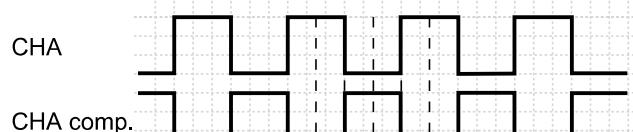
Mounting accessories

10106004	Clamp set ø10 mm
----------	------------------

Output signals

Counter clockwise rotating direction when looking at the flange.

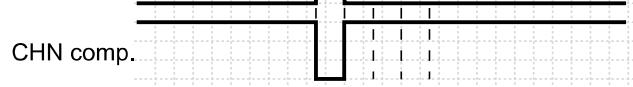
05A



CHB

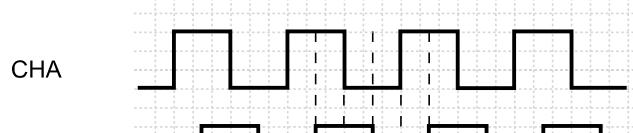


CHN

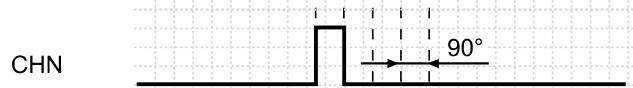


Counter clockwise rotating direction when looking at the flange.

24K



CHB



Incremental encoders

Micro series - shaft ø5 mm

10...2048 pulses per revolution

BDK

Terminal assignment

Cable

for connection references **-4** and **-5**

05A **24K**

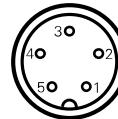
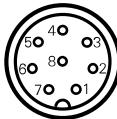
Core colour	Signals	Core colour	Signals
brown	+Vs	brown	+Vs
green	CHA	green	CHA
red	CHA compl.	—	—
yellow	CHB	yellow	CHB
blue	CHB compl.	—	—
pink	CHN	pink	CHN
gray	CHN compl.	—	—
white	0 V	white	0 V
Cable data	8 x 0.14 mm ²	5 x 0.14 mm ²	
Screen	connected to housing		

Connector M9 male

for connection reference **-9**

05A **24K**

Connector	Signals	Signals
Pin 1	0 V	0 V
Pin 2	+Vs	+Vs
Pin 3	CHA	CHA
Pin 4	CHB	CHB
Pin 5	CHN compl.	CHN
Pin 6	CHN	—
Pin 7	CHB compl.	—
Pin 8	CHA compl.	—



Incremental encoders

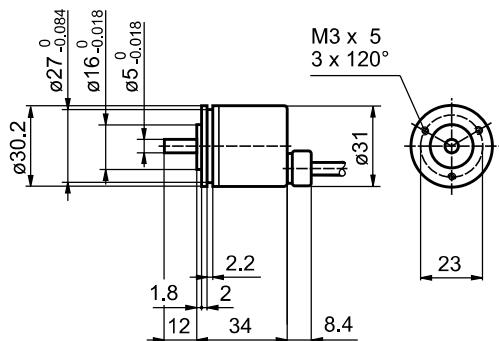
Micro series - shaft ø5 mm

10...2048 pulses per revolution

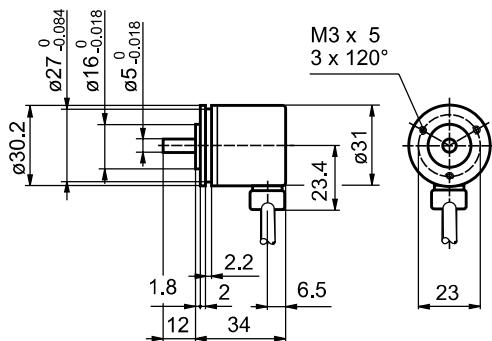
BDK

Dimensions

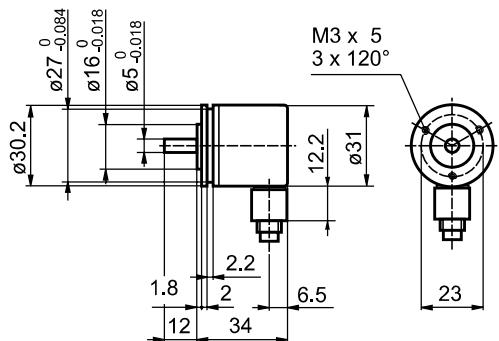
BDK cable axial



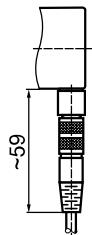
BDK cable radial



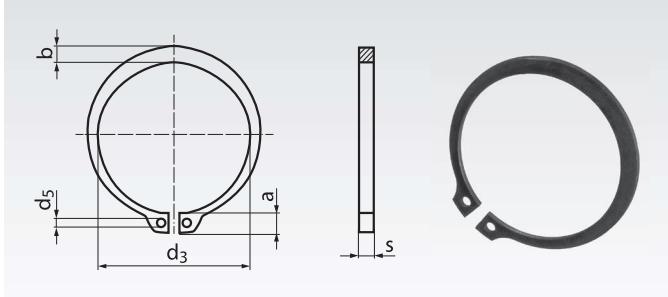
BDK connector output radial



BDK connector dimensions



Retaining Rings DIN 471 for shafts



Material: Feather steel, phosphated, oiled.

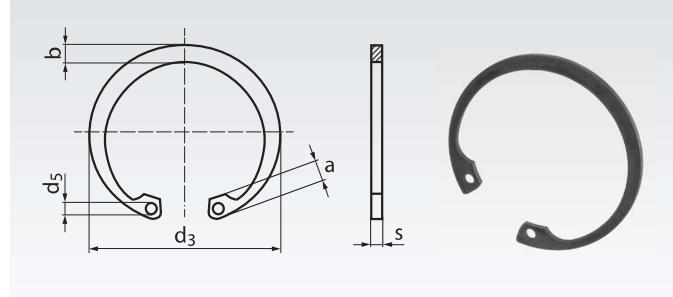
External rings for axial fixing a machine part on a shaft.

Ordering Details: e.g.: Product No. 617 403 00, Retaining Ring DIN 471, 3mm

Product No. DIN 471	Nominal Size* mm	s mm	d ₃ mm	a mm	b mm	d ₅ mm	Weight pro% kg
617 403 00	3	0,4	2,7	1,9	0,8	1,0	0,002
617 404 00	4	0,4	3,7	2,2	0,9	1,0	0,002
617 405 00	5	0,6	4,7	2,5	1,1	1,0	0,007
617 406 00	6	0,7	5,6	2,7	1,3	1,2	0,008
617 407 00	7	0,8	6,5	3,1	1,4	1,2	0,012
617 408 00	8	0,8	7,4	3,2	1,5	1,2	0,016
617 409 00	9	1,0	8,4	3,3	1,7	1,2	0,030
617 410 00	10	1,0	9,3	3,3	1,8	1,5	0,034
617 411 00	11	1,0	10,2	3,3	1,8	1,5	0,041
617 412 00	12	1,0	11,0	3,3	1,8	1,7	0,050
617 414 00	14	1,0	12,9	3,5	2,1	1,7	0,064
617 415 00	15	1,0	13,8	3,6	2,2	1,7	0,067
617 416 00	16	1,0	14,7	3,7	2,2	1,7	0,070
617 417 00	17	1,0	15,7	3,8	2,3	1,7	0,082
617 418 00	18	1,2	16,5	3,9	2,4	2,0	0,111
617 419 00	19	1,2	17,5	3,9	2,5	2,0	0,122
617 420 00	20	1,2	18,5	4,0	2,6	2,0	0,130
617 422 00	22	1,2	20,5	4,2	2,8	2,0	0,150
617 424 00	24	1,2	22,2	4,4	3,0	2,0	0,177
617 425 00	25	1,2	23,2	4,4	3,0	2,0	0,190
617 426 00	26	1,2	24,2	4,5	3,1	2,0	0,196
617 428 00	28	1,5	25,9	4,7	3,2	2,0	0,292
617 430 00	30	1,5	27,9	5,0	3,5	2,0	0,332
617 432 00	32	1,5	29,6	5,2	3,6	2,5	0,354
617 435 00	35	1,5	32,2	5,6	3,9	2,5	0,400
617 438 00	38	1,75	35,2	5,8	4,2	2,5	0,562
617 440 00	40	1,75	36,5	6,0	4,4	2,5	0,60
617 445 00	45	1,75	41,5	6,7	4,7	2,5	0,75
617 447 00	47	1,75	43,5	6,8	4,9	2,5	0,75
617 450 00	50	2,0	45,8	6,9	5,1	2,5	1,02
617 455 00	55	2,0	50,8	7,2	5,4	2,5	1,14
617 460 00	60	2,0	55,8	7,4	5,8	2,5	1,29
617 462 00	62	2,0	57,8	7,5	6,0	2,5	1,43
617 475 00	75	2,5	70,5	8,4	7,0	3,0	2,46

* Shaft diameter.

Retaining Rings DIN 472 for boreholes



Material: Feather steel, phosphated, oiled.

Internal rings for axial fixing a machine part inside a bore.

Ordering Details: e.g.: Product No. 617 608 00, Retaining Ring DIN 472, 8mm

Product No. DIN 472	Nominal Size* mm	s mm	d ₃ mm	a mm	b mm	d ₅ mm	Weight pro% kg
617 608 00	8	0,8	8,7	2,4	1,1	1,0	0,010
617 610 00	10	1,0	10,8	3,2	1,4	1,2	0,026
617 611 00	11	1,0	11,8	3,3	1,5	1,2	0,031
617 612 00	12	1,0	13,0	3,4	1,7	1,5	0,037
617 613 00	13	1,0	14,1	3,6	1,8	1,5	0,042
617 614 00	14	1,0	15,1	3,7	1,8	1,7	0,052
617 615 00	15	1,0	16,2	3,7	2,0	1,7	0,056
617 616 00	16	1,0	17,3	3,8	2,0	1,7	0,060
617 617 00	17	1,0	18,3	3,9	2,1	1,7	0,065
617 618 00	18	1,0	19,5	4,1	2,2	2,0	0,074
617 619 00	19	1,0	20,5	4,1	2,2	2,0	0,073
617 620 00	20	1,0	21,5	4,1	2,3	2,0	0,090
617 621 00	21	1,0	22,5	4,2	2,4	2,0	0,100
617 622 00	22	1,0	23,5	4,2	2,5	2,0	0,110
617 624 00	24	1,2	25,9	4,3	2,6	2,0	0,142
617 625 00	25	1,2	26,9	4,5	2,7	2,0	0,150
617 626 00	26	1,2	27,9	4,7	2,8	2,0	0,160
617 628 00	28	1,2	30,1	4,8	2,9	2,0	0,180
617 630 00	30	1,2	32,1	4,8	3,0	2,0	0,206
617 632 00	32	1,2	34,4	5,4	3,2	2,5	0,221
617 635 00	35	1,5	37,8	5,4	3,4	2,5	0,354
617 637 00	37	1,5	39,8	5,5	3,6	2,5	0,374
617 638 00	38	1,5	40,8	5,5	3,7	2,5	0,39
617 640 00	40	1,75	43,5	5,8	3,9	2,5	0,47
617 642 00	42	1,75	45,5	5,9	4,1	2,5	0,54
617 645 00	45	1,75	48,5	6,2	4,3	2,5	0,60
617 647 00	47	1,75	50,5	6,4	4,4	2,5	0,61
617 650 00	50	2,0	54,2	6,5	4,6	2,5	0,73
617 652 00	52	2,0	56,2	6,7	4,7	2,5	0,82
617 655 00	55	2,0	59,2	6,8	5,0	2,5	0,83
617 658 00	58	2,0	62,2	6,9	5,2	2,5	1,05
617 660 00	60	2,0	64,2	7,3	5,4	2,5	1,11
617 662 00	62	2,0	66,2	7,3	5,5	2,5	1,12
617 668 00	68	2,5	72,5	7,8	6,1	3,0	1,60
617 672 00	72	2,5	76,5	7,8	6,4	3,0	1,81
617 675 00	75	2,5	79,5	7,8	6,6	3,0	1,88
617 680 00	80	2,5	85,5	8,5	7,0	3,0	2,20
617 685 00	85	3,0	90,5	8,6	7,2	3,5	2,53
617 690 00	90	3,0	95,5	8,6	7,6	3,5	3,30
617 700 00	100	3,0	105,5	9,2	8,4	3,5	4,20
617 710 00	110	4,0	117,0	10,4	9,0	3,5	6,45

* Borehole diameter.

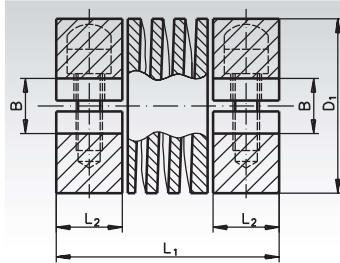
Self-Aligning Couplings KA, Short Version

Material: Plastic polyacetal.
Aluminium 2014A.
Stainless steel 1.4305.



- Torsionally rigid design.
- Zero backlash.
- Perfect transmission of torque.
- Very low restoring force.
- Speed max. 5,000 min⁻¹.

Number of screws: at plastic and steel 2 screws on each side.
At aluminium: 1 screw on each side.



Ordering Details: e.g.: Product No. 602 608 00, Coupling KA, Plastic, Bore 4mm

Product No. Plastic	Product No. Alu	Product No. Stainless Steel	Max. Operating Torque* Plastic Nm	Bore B+0,03 mm	Bore max ¹⁾ mm	L ₁ mm	L ₂ ^{**} mm	D ₁ mm	Angular Misalignment Degrees	Parallel mm	Weight Plastic g	Alu g	Stainl. g		
-	-	602 996 00*** -	-	0,45	2	3,00	12,7	3,2	6,35	3	0,07	-	-	2	
-	602 702 00	602 996 02	-	0,4	0,5	3	3,18	14,2	4,5	9,52	3	0,1	-	2	6
602 608 00	602 708 00	602 996 08	0,24	0,9	1,0	4	6,00	19,05	6	12,70	5	0,127	2	6	10
602 610 00	602 710 00	602 996 10	0,24	0,9	1,0	6	6,00	19,05	6	12,70	5	0,127	2	6	10
602 612 00	602 712 00	602 996 12	0,35	1,5	1,8	4	6,35	20,3	6	15,87	5	0,127	3	8	22
602 614 00	602 714 00	602 996 14	0,35	1,5	1,8	5	6,35	20,3	6	15,87	5	0,127	3	8	22
602 616 00	602 716 00	602 996 16	0,35	1,5	1,8	6	6,35	20,3	6	15,87	5	0,127	3	8	22
602 620 00	602 720 00	602 996 20	0,64	2,5	2,7	6	8,00	22,85	6,5	19,05	5	0,127	8	12	34
602 622 00	602 722 00	602 996 22	0,64	2,5	2,7	8	8,00	22,85	6,5	19,05	5	0,127	8	12	34
602 624 00	602 724 00	602 996 24	1,4	4,0	6,0	6	11,00	31,75	9	25,40	5	0,127	13	32	90
602 626 00	602 726 00	602 996 26	1,4	4,0	6,0	8	11,00	31,75	9	25,40	5	0,127	13	32	90
602 628 00	602 728 00	602 996 28	1,4	4,0	6,0	10	11,00	31,75	9	25,40	5	0,127	13	32	90
602 630 00	602 730 00	602 996 30	2,5	6,0	10,0	10	14,00	44,45	12	31,75	5	0,127	35	76	220
602 632 00	602 732 00	602 996 32	2,5	6,0	10,0	12	14,00	44,45	12	31,75	5	0,127	35	76	220
602 634 00	602 734 00	602 996 34	2,5	6,0	10,0	16	16,00	44,45	12	31,75	5	0,127	35	76	220

* Please regard the operating factors page 357. ** Shaft can be pushed in further. Middle of coupling is relieved. *** Set-screw style. ¹⁾ Against surcharge.

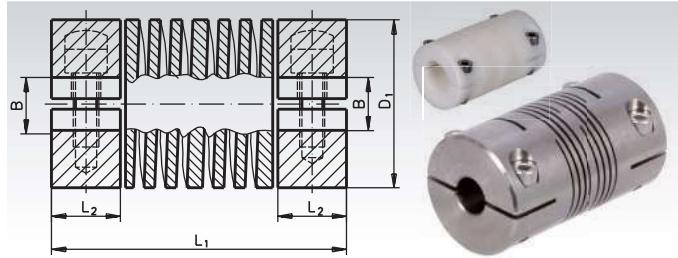
Self-Aligning Couplings LA, Long Version

Material: Plastic polyacetal.
Aluminium 2014A.
Stainless steel 1.4305.



- torsionally rigid design.
- zero backlash.
- perfect transmission of torque.
- very low restoring force.
- speed max. 5,000 min⁻¹.

Number of screws: at plastic and steel 2 screws on each side.
At aluminium up to Ø D₁=31.75mm only 1 screw on each side.



Ordering Details: e.g.: Product No. 602 806 00, Coupling LA, Plastic, Bore 4mm

Product No. Plastic	Product No. Alu	Product No. Stainless Steel	Max. Operating Torque* Plastic Nm	Bore B+0,03 mm	Bore max ¹⁾ mm	L ₁ mm	L ₂ ^{**} mm	D ₁ mm	Angular Misalignment Degrees	Parallel mm	Weight Plastic g	Alu g	Stainl. g		
-	602 900 00	602 998 00	-	0,6	0,9	3	4,76	19,55	5,3	9,52	3	0,12	-	4	8
-	602 902 00	602 998 02	-	1	1,5	4	4,76	19,55	5,3	9,52	3	0,12	-	4	8
602 806 00	602 906 00	-	0,51	1,3	-	4	6,35	22,85	6,5	12,7	5	0,17	4	8	-
602 808 00	602 908 00	-	0,32	2	-	6	6,35	22,85	6,5	12,7	5	0,17	4	8	-
-	-	602 998 12	-	-	1,9	4	6,35	25,40	6,5	12,7	5	0,17	-	-	18
-	-	602 998 14	-	-	3	6	6,35	25,40	6,5	12,7	5	0,17	-	-	18
-	602 916 00	-	-	3,4	-	4	8,00	25,40	6,5	15,87	5	0,2	-	10	-
602 818 00	602 918 00	602 998 18	0,61	2	3,4	5	8,00	25,40	6,5	15,87	5	0,2	6	10	30
602 820 00	602 920 00	602 998 20	0,91	3,4	5	6	8,00	25,40	6,5	15,87	5	0,2	6	10	30
602 824 00	602 924 00	-	0,87	3	-	6	10,00	26,50	6,5	19,05	7	0,25	12	16	-
602 826 00	602 926 00	-	1,3	5,3	-	8	10,00	26,50	6,5	19,05	7	0,25	12	16	-
-	-	602 998 30	-	-	4,8	6	10,00	28,00	6,5	19,05	7	0,25	-	-	46
-	-	602 998 32	-	-	8	8	10,00	28,00	6,5	19,05	7	0,25	-	-	46
602 834 00	602 934 00	602 998 34	1,67	5	10	6	12,70	38,10	11	25,4	7	0,38	20	44	115
602 836 00	602 936 00	602 998 36	2,5	10	16	8	12,70	38,10	11	25,4	7	0,38	20	44	115
602 838 00	602 938 00	602 998 38	2,5	10	16	10	12,70	38,10	11	25,4	7	0,38	20	44	115
602 840 00	602 940 00	602 998 40	4	15	25	10	16,00	57,15	16	31,75	7	0,5	58	100	290
602 842 00	602 942 00	602 998 42	4	15	25	12	16,00	57,15	16	31,75	7	0,5	58	100	290
602 844 00	602 944 00	602 998 44	4	15	25	16	16,00	57,15	16	31,75	7	0,5	58	100	290
602 846 00	602 946 00	602 998 46	6	22	36	12	19,00	66,67	18	38,1	7	0,6	86	160	440
602 848 00	602 948 00	602 998 48	6	22	36	16	19,00	66,67	18	38,1	7	0,6	86	160	440
602 850 00	602 950 00	602 998 50	6	22	36	19	19,00	66,67	18	38,1	7	0,6	86	160	440
-	602 954 00	602 998 54	-	30	48	16	22,00	76,20	20,00	44,5	7	0,8	-	240	730
-	602 956 00	602 998 56	-	30	48	19	22,00	76,20	20,00	44,5	7	0,8	-	240	730
-	602 958 00	602 998 58	-	40	37	16	26,00	95,30	25,06	50,8	7	0,9	-	405	1045
-	602 960 00	602 998 60	-	40	73	19	26,00	95,30	25,06	50,8	7	0,9	-	405	1045
-	602 962 00	602 998 62	-	40	73	24	26,00	95,30	25,06	50,8	7	0,93	-	405	1045
-	602 966 00	602 998 66	-	55	102	24	30,00	130,00	32	57,15	7	0,95	-	800	2155
-	602 968 00	602 998 68	-	55	102	30	30,00	130,00	32	57,15	7	0,95	-	800	2155

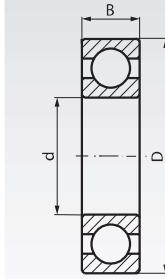
* Please regard the operating factors page 357.

*** Shaft must not be pushed in any further. ¹⁾ Against surcharge.

Single Row Deep Groove Ball Bearings SKF®, inner diameter 3 - 17 mm

Material: Bearing steel.

- Standard ball bearings in premium-quality.
- Most common bearing type.
- Usable for high speed.
- Inensitive in use and maintenance.
- On choice: Open, with friction-free metal shields 2Z (= ZZ) or with contacting rubber NBR seals 2RS1 / 2RSH.



Temperature range: -30°C to +90°C (for short time up to +110°C).

Clearance CN: Normal bearing play. Clearance C3: Greater play.

Other versions or other bearing types on request.

Ordering Details: e.g.: Product No., quantity

Product No. Clearance CN	Product No. Clearance C3	Main dimensions			Version	Load rating radial			Speed base min⁻¹	Speed limit min⁻¹	Weight g
		d mm	D mm	B mm		dyn.C kN	stat.C ₀ kN	P _u * kN			
623-2Z-SKF	623-2Z-C3-SKF	3	10	4	shielded on both sides	0,54	0,18	0,007	130.000	60.000	1,5
624-2Z-SKF	624-2Z-C3-SKF	4	13	5	shielded on both sides	0,94	0,29	0,012	110.000	53.000	3,1
625-SKF	-	5	16	5	open	1,14	0,38	0,016	95.000	60.000	5
625-2Z-SKF	625-2Z-C3-SKF	5	16	5	shielded on both sides	1,14	0,38	0,016	95.000	48.000	5
625-2RS1-SKF	-	5	16	5	sealed on both sides	1,14	0,38	0,016	95.000	48.000	5
626-SKF	626-C3-SKF	6	19	6	open	2,34	0,95	0,04	80.000	50.000	8,4
626-2Z-SKF	626-2Z-C3-SKF	6	19	6	shielded on both sides	2,34	0,95	0,04	80.000	40.000	8,4
626-2RSH-SKF	626-2RSH-C3-SKF	6	19	6	sealed on both sides	2,34	0,95	0,04	-	24.000	8,4
607-2Z-SKF	607-2Z-C3-SKF	7	19	6	shielded on both sides	2,34	0,95	0,04	85.000	43.000	7,5
607-2RSH-SKF	607-2RSH-C3-SKF	7	19	6	sealed on both sides	2,34	0,95	0,04	-	24.000	7,5
627-2Z-SKF	627-2Z-C3-SKF	7	22	7	shielded on both sides	3,45	1,37	0,057	70.000	36.000	13
627-2RSH-SKF	627-2RSH-C3-SKF	7	22	7	sealed on both sides	3,45	1,37	0,057	-	22.000	12
608-SKF	-	8	22	7	open	3,45	1,37	0,057	75.000	48.000	12
608-2Z-SKF	608-2Z-C3-SKF	8	22	7	shielded on both sides	3,45	1,37	0,057	75.000	38.000	12
608-2RSH-SKF	608-2RSH-C3-SKF	8	22	7	sealed on both sides	3,45	1,37	0,057	-	22.000	12
609-2Z-SKF	609-2Z-C3-SKF	9	24	7	shielded on both sides	3,9	1,66	0,071	70.000	34.000	14
609-2RSH-SKF	609-2RSH-C3-SKF	9	24	7	sealed on both sides	3,9	1,66	0,071	-	19.000	14
629-2Z-SKF	629-2Z-C3-SKF	9	26	8	shielded on both sides	4,75	1,96	0,083	60.000	30.000	20
629-2RSH-SKF	629-2RSH-C3-SKF	9	26	8	sealed on both sides	4,75	1,96	0,083	-	19.000	20
61800-SKF	-	10	19	5	open	1,38	0,59	0,025	80.000	48.000	5,5
61800-2Z-SKF	-	10	19	5	shielded on both sides	1,38	0,59	0,025	-	38.000	5,5
61800-2RS1-SKF	-	10	19	5	sealed on both sides	1,38	0,59	0,025	-	22.000	5,5
6000-SKF	6000-C3-SKF	10	26	8	open	4,75	1,96	0,083	67.000	40.000	19
6000-2Z-SKF	6000-2Z-C3-SKF	10	26	8	shielded on both sides	4,75	1,96	0,083	67.000	34.000	19
6000-2RSH-SKF	6000-2RSH-C3-SKF	10	26	8	sealed on both sides	4,75	1,96	0,083	-	19.000	19
6200-SKF	6200-C3-SKF	10	30	9	open	5,4	2,36	0,1	56.000	34.000	32
6200-2Z-SKF	6200-2Z-C3-SKF	10	30	9	shielded on both sides	5,4	2,36	0,1	56.000	28.000	32
6200-2RSH-SKF	6200-2RSH-C3-SKF	10	30	9	sealed on both sides	5,4	2,36	0,1	-	17.000	32
6300-2Z-SKF	6300-2Z-C3-SKF	10	35	11	shielded on both sides	8,52	3,4	0,143	50.000	26.000	53
6300-2RSH-SKF	6300-2RSH-C3-SKF	10	35	11	sealed on both sides	8,52	3,4	0,143	-	15.000	53
61801-SKF	-	12	21	5	open	1,43	0,67	0,028	70.000	43.000	6,3
61801-2Z-SKF	-	12	21	5	shielded on both sides	1,43	0,67	0,028	70.000	36.000	6,3
61801-2RS1-SKF	-	12	21	5	sealed on both sides	1,43	0,67	0,028	-	20.000	6,3
6001-SKF	6001-C3-SKF	12	28	8	open	5,4	2,36	0,1	60.000	38.000	22
6001-2Z-SKF	6001-2Z-C3-SKF	12	28	8	shielded on both sides	5,4	2,36	0,1	60.000	30.000	22
6001-2RSH-SKF	6001-2RSH-C3-SKF	12	28	8	sealed on both sides	5,4	2,36	0,1	-	17.000	22
6201-SKF	6201-C3-SKF	12	32	10	open	7,28	3,1	0,132	50.000	32.000	37
6201-2Z-SKF	6201-2Z-C3-SKF	12	32	10	shielded on both sides	7,28	3,1	0,132	50.000	26.000	37
6201-2RSH-SKF	6201-2RSH-C3-SKF	12	32	10	sealed on both sides	7,28	3,1	0,132	-	15.000	37
6301-2Z-SKF	6301-2Z-C3-SKF	12	37	12	shielded on both sides	10,1	4,15	0,176	45.000	22.000	60
6301-2RSH-SKF	6301-2RSH-C3-SKF	12	37	12	sealed on both sides	10,1	4,15	0,176	-	14.000	60
61802-2Z-SKF	-	15	24	5	shielded on both sides	1,56	0,8	0,034	60.000	30.000	7,4
61802-2RS1-SKF	-	15	24	5	sealed on both sides	1,56	0,8	0,034	-	17.000	7,4
6002-SKF	6002-C3-SKF	15	32	9	open	5,85	2,85	0,12	50.000	32.000	30
6002-2Z-SKF	6002-2Z-C3-SKF	15	32	9	shielded on both sides	5,85	2,85	0,12	50.000	26.000	30
6002-2RSH-SKF	6002-2RSH-C3-SKF	15	32	9	sealed on both sides	5,85	2,85	0,12	-	14.000	30
6202-SKF	6202-C3-SKF	15	35	11	open	8,06	3,75	0,16	43.000	28.000	45
6202-2Z-SKF	6202-2Z-C3-SKF	15	35	11	shielded on both sides	8,06	3,75	0,16	43.000	22.000	45
6202-2RSH-SKF	6202-2RSH-C3-SKF	15	35	11	sealed on both sides	8,06	3,75	0,16	-	13.000	45
6302-SKF	6302-C3-SKF	15	42	13	open	11,9	5,4	0,228	38.000	24.000	82
6302-2Z-SKF	6302-2Z-C3-SKF	15	42	13	shielded on both sides	11,9	5,4	0,228	38.000	19.000	82
6302-2RSH-SKF	6302-2RSH-C3-SKF	15	42	13	sealed on both sides	11,9	5,4	0,228	-	12.000	82
61803-2Z-SKF	-	17	26	5	shielded on both sides	1,68	0,93	0,039	56.000	28.000	8,2
61803-2RS1-SKF	-	17	26	5	sealed on both sides	1,68	0,93	0,039	-	16.000	8,2
6003-SKF	6003-C3-SKF	17	35	10	open	6,37	3,25	0,137	45.000	28.000	39
6003-2Z-SKF	6003-2Z-C3-SKF	17	35	10	shielded on both sides	6,37	3,25	0,137	45.000	22.000	39
6003-2RSH-SKF	6003-2RSH-C3-SKF	17	35	10	sealed on both sides	6,37	3,25	0,137	-	13.000	39
6203-SKF	6203-C3-SKF	17	40	12	open	9,95	4,75	0,2	38.000	24.000	65
6203-2Z-SKF	6203-2Z-C3-SKF	17	40	12	shielded on both sides	9,95	4,75	0,2	38.000	19.000	65
6203-2RSH-SKF	6203-2RSH-C3-SKF	17	40	12	sealed on both sides	9,95	4,75	0,2	-	12.000	65
6303-SKF	6303-C3-SKF	17	47	14	open	14,3	6,55	0,275	34.000	22.000	120
6303-2Z-SKF	6303-2Z-C3-SKF	17	47	14	shielded on both sides	14,3	6,55	0,275	-	17.000	120
6303-2RSH-SKF	6303-2RSH-C3-SKF	17	47	14	sealed on both sides	14,3	6,55	0,275	-	11.000	120

* Fatigue load limit.

Single Row Deep Groove Ball Bearings SKF®, inner diameter 20 - 50 mm

Material: Bearing steel.

- Standard ball bearings in premium-quality.
- Most common bearing type.
- Usable for high speed.
- Inensitive in use and maintenance.
- On choice: Open, with friction-free metal shields ZZ (= ZZ) or with contacting rubber NBR seals 2RS1 / 2RSH.



Temperature range: -30°C to +90°C (for short time up to +110°C).

Clearance CN: Normal bearing play. Clearance C3: Greater play.

Other versions or other bearing types on request.

Ordering Details: e.g.: product No., quantity

Product No. Clearance CN	Product No. Clearance C3	Main dimensions			Version	Load rating radial			Speed base min⁻¹	Speed limit min⁻¹	Weight g
		d mm	D mm	B mm		dyn.C kN	stat.C _o kN	P _u * kN			
6004-SKF	6004-C3-SKF	20	42	12	open	9,95	5	0,212	38.000	24.000	69
6004-2Z-SKF	6004-2Z-C3-SKF	20	42	12	shielded on both sides	9,95	5	0,212	38.000	19.000	69
6004-2RSH-SKF	6004-2RSH-C3-SKF	20	42	12	sealed on both sides	9,95	5	0,212	-	11.000	69
6204-SKF	6204-C3-SKF	20	47	14	open	13,5	6,55	0,28	32.000	20.000	110
6204-2Z-SKF	6204-2Z-C3-SKF	20	47	14	shielded on both sides	13,5	6,55	0,28	32.000	17.000	110
6204-2RSH-SKF	6204-2RSH-C3-SKF	20	47	14	sealed on both sides	13,5	6,55	0,28	-	10.000	110
6304-SKF	6304-C3-SKF	20	52	15	open	16,8	7,8	0,335	30.000	19.000	140
6304-2Z-SKF	6304-2Z-C3-SKF	20	52	15	shielded on both sides	16,8	7,8	0,335	30.000	15.000	140
6304-2RSH-SKF	6304-2RSH-C3-SKF	20	52	15	sealed on both sides	16,8	7,8	0,335	-	9.500	140
6005-SKF	6005-C3-SKF	25	47	12	open	11,9	6,55	0,275	32.000	20.000	80
6005-2Z-SKF	6005-2Z-C3-SKF	25	47	12	shielded on both sides	11,9	6,55	0,275	32.000	16.000	80
6005-2RSH-SKF	6005-2RSH-C3-SKF	25	47	12	sealed on both sides	11,9	6,55	0,275	-	9.500	80
6205-SKF	6205-C3-SKF	25	52	15	open	14,8	7,8	0,335	28.000	18.000	130
6205-2Z-SKF	6205-2Z-C3-SKF	25	52	15	shielded on both sides	14,8	7,8	0,335	28.000	14.000	130
6205-2RSH-SKF	6205-2RSH-C3-SKF	25	52	15	sealed on both sides	14,8	7,8	0,335	-	8.500	130
6305-SKF	6305-C3-SKF	25	62	17	open	23,4	11,6	0,49	24.000	16.000	230
6305-2Z-SKF	6305-C3-SKF	25	62	17	shielded on both sides	23,4	11,6	0,49	24.000	13.000	230
6305-2RS1-SKF	6305-2RS1-C3-SKF	25	62	17	sealed on both sides	23,4	11,6	0,49	-	7.500	230
6006-SKF	6006-C3-SKF	30	55	13	open	13,8	8,3	0,355	28.000	17.000	120
6006-2Z-SKF	6006-2Z-C3-SKF	30	55	13	shielded on both sides	13,8	8,3	0,355	28.000	14.000	120
6006-2RS1-SKF	6006-2RS1-C3-SKF	30	55	13	sealed on both sides	13,8	8,3	0,355	-	8.000	120
6206-SKF	6206-C3-SKF	30	62	16	open	20,3	11,2	0,475	24.000	15.000	200
6206-2Z-SKF	6206-2Z-C3-SKF	30	62	16	shielded on both sides	20,3	11,2	0,475	24.000	12.000	200
6206-2RS1-SKF	6206-2RS1-C3-SKF	30	62	16	sealed on both sides	20,3	11,2	0,475	-	7.500	200
6306-SKF	6306-C3-SKF	30	72	19	open	29,6	16	0,67	20.000	13.000	350
6306-2Z-SKF	6306-2Z-C3-SKF	30	72	19	shielded on both sides	29,6	16	0,67	20.000	11.000	350
6306-2RS1-SKF	6306-2RS1-C3-SKF	30	72	19	sealed on both sides	29,6	16	0,67	-	6.300	350
6007-SKF	6007-C3-SKF	35	62	14	open	16,8	10,2	0,44	24.000	15.000	160
6007-2Z-SKF	6007-2Z-C3-SKF	35	62	14	shielded on both sides	16,8	10,2	0,44	24.000	12.000	160
6007-2RS1-SKF	6007-2RS1-C3-SKF	35	62	14	sealed on both sides	16,8	10,2	0,44	-	7.000	160
6207-SKF	6207-C3-SKF	35	72	17	open	27	15,3	0,66	20.000	13.000	290
6207-2Z-SKF	6207-2Z-C3-SKF	35	72	17	shielded on both sides	27	15,3	0,66	20.000	10.000	290
6207-2RS1-SKF	6207-2RS1-C3-SKF	35	72	17	sealed on both sides	27	15,3	0,66	-	6.300	290
6307-SKF	6307-C3-SKF	35	80	21	open	35,1	19	0,82	19.000	12.000	460
6307-2Z-SKF	6307-2Z-C3-SKF	35	80	21	shielded on both sides	35,1	19	0,82	19.000	9.500	460
6307-2RS1-SKF	6307-2RS1-C3-SKF	35	80	21	sealed on both sides	35,1	19	0,82	-	6.000	460
6008-SKF	6008-C3-SKF	40	68	15	open	17,8	11,6	0,49	22.000	14.000	190
6008-2Z-SKF	6008-2Z-C3-SKF	40	68	15	shielded on both sides	17,8	11,6	0,49	22.000	11.000	190
6008-2RS1-SKF	6008-2RS1-C3-SKF	40	68	15	sealed on both sides	17,8	11,6	0,49	-	6.300	190
6208-SKF	6208-C3-SKF	40	80	18	open	32,5	19	0,8	18.000	11.000	370
6208-2Z-SKF	6208-2Z-C3-SKF	40	80	18	shielded on both sides	32,5	19	0,8	18.000	9.000	370
6208-2RS1-SKF	6208-2RS1-C3-SKF	40	80	18	sealed on both sides	32,5	19	0,8	-	5.600	370
6308-SKF	6308-C3-SKF	40	90	23	open	42,3	24	1,02	17.000	11.000	630
6308-2Z-SKF	6308-2Z-C3-SKF	40	90	23	shielded on both sides	42,3	24	1,02	17.000	8.500	630
6308-2RS1-SKF	6308-2RS1-C3-SKF	40	90	23	sealed on both sides	42,3	24	1,02	-	5.000	630
6009-SKF	6009-C3-SKF	45	75	16	open	22,1	14,6	0,64	20.000	12.000	250
6009-2Z-SKF	6009-2Z-C3-SKF	45	75	16	shielded on both sides	22,1	14,6	0,64	20.000	10.000	250
6009-2RS1-SKF	6009-2RS1-C3-SKF	45	75	16	sealed on both sides	22,1	14,6	0,64	-	5.600	250
6209-SKF	6209-C3-SKF	45	85	19	open	35,1	21,6	0,92	17.000	11.000	410
6209-2Z-SKF	6209-2Z-C3-SKF	45	85	19	shielded on both sides	35,1	21,6	0,92	17.000	8.500	410
6209-2RS1-SKF	6209-2RS1-C3-SKF	45	85	19	sealed on both sides	35,1	21,6	0,92	-	5.000	410
6309-SKF	6309-C3-SKF	45	100	25	open	55,3	31,5	1,34	15.000	9.500	830
6309-2Z-SKF	6309-2Z-C3-SKF	45	100	25	shielded on both sides	55,3	31,5	1,34	15.000	7.500	830
6309-2RS1-SKF	6309-2RS1-C3-SKF	45	100	25	sealed on both sides	55,3	31,5	1,34	-	4.500	830
6010-SKF	6010-C3-SKF	50	80	16	open	22,9	16	0,71	18.000	11.000	260
6010-2Z-SKF	6010-2Z-C3-SKF	50	80	16	shielded on both sides	22,9	16	0,71	18.000	9.000	260
6010-2RS1-SKF	6010-2RS1-C3-SKF	50	80	16	sealed on both sides	22,9	16	0,71	-	5.000	260
6210-SKF	6210-C3-SKF	50	90	20	open	37,1	23,2	0,98	15.000	10.000	460
6210-2Z-SKF	6210-2Z-C3-SKF	50	90	20	shielded on both sides	37,1	23,2	0,98	15.000	8.000	460
6210-2RS1-SKF	6210-2RS1-C3-SKF	50	90	20	sealed on both sides	37,1	23,2	0,98	-	4.800	460
6310-SKF	6310-C3-SKF	50	110	27	open	65	38	1,6	13.000	8.500	1050
6310-2Z-SKF	6310-2Z-C3-SKF	50	110	27	shielded on both sides	65	38	1,6	13.000	6.700	1050
6310-2RS1-SKF	6310-2RS1-C3-SKF	50	110	27	sealed on both sides	65	38	1,6	-	4.300	1050

* Fatigue load limit.

Product code

(go to page 9 for the detailed coding system)

SVTS A  -  -  - / -   /   -  -  

A Series

 Model IP grade¹ Flange type Power circuits Signal circuits Cable length (brush side) Cable length (ring side) Temperature range² Special options³¹ IP51 [S]; IP65 [U]² Standard [ST]; Extended [ET]³ Ethernet 100BaseT [E1M]; Ethernet 1000BaseT [E1G]

Features

Current	1A: continuous - 2A peak: AWG28 2A: AWG26 4A: AWG22 6A: AWG20 8A: AWG16
Voltage	240 VDC / 240 VAC
Cables	Silver plated / PTFE insulated / colour coded
Cables length	Standard: 250mm; custom cable length increase possible as multiples of 250mm
Dielectric strength	500 VAC @ 60Hz @ 60 sec
Insulation resistance	> 500 MΩ / 500 VDC
Dynamic contact resistance	< 10 mΩ
Nominal speed	250 rpm (higher speed, up to 600 rpm, upon request)
Bearings	Miniature high-precision stainless steel ball bearings
Housing	ABS (hard plastic); Alluminium (SVTS A04)
Contact	Gold-gold (alloy)
Temperature	-20°C to +80°C (-40°C as option)
Protection	IP51; IP65*
Expected lifetime	10 ⁷ revolutions (depending on speed, environmental conditions and size)

*Optional: SVTS A 03 only

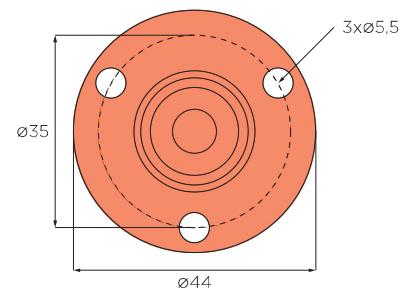
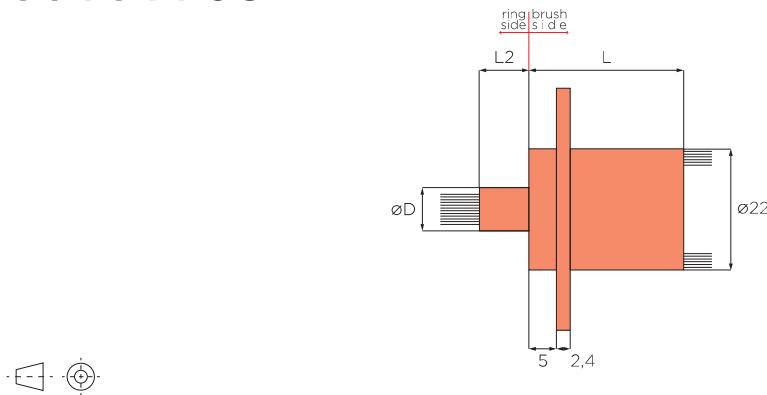
Combinations

Electric Signals	Fieldbus	Fluidic (combined solutions)
EtherCAT	Air	
Profinet	Oil	
Sercos	Water	
Powerlink		
Ethernet		

Customizations

Cables Materials	Mechanical design	Flange

SVTS A 03



See page 26 for different flange options

Custom cable length increase possible as multiples of 250mm

Model	Number of circuits			Dimensions			Housing		
	Total	Signals	Power	Outside Ø	L	L2			
	1-2A	6A	8A			D			
SVTS A 03-S-A-00/06	6	6	-	-	22	19	7,8	ABS	
SVTS A 03-S-A-00/12	12	12	-	-	22	28	9	7,8	ABS
SVTS A 03-S-A-02/02	4	2	2	-	22	28	9	7,8	ABS
SVTS A 03-S-A-00/15	15	15	-	-	22	29,5	9	7,8	ABS
SVTS A 03-S-A-00/18	18	18	-	-	22	33,4	9	7,8	ABS
SVTS A 03-S-A-03/00	3	-	-	3	22	33,4	9	7,8	ABS
SVTS A 03-S-A-00/24	24	24	-	-	22	41,2	9	7,8	ABS
SVTS A 03-S-A-04/06	10	6	4	-	22	41,2	9	7,8	ABS
SVTS A 03-S-A-00/30	30	30	-	-	22	49,2	6	7,8	ABS
SVTS A 03-S-A-00/36	36	36	-	-	22	57	9	7,8	ABS
IP65	SVTS A 03-U-A-00/06	6	6	-	-	22	23	12,5	AI
	SVTS A 03-U-A-00/12	12	12	-	-	22	32	12,5	AI
	SVTS A 03-S-A-02/02	4	2	2	-	22	33,5	12,5	AI
	SVTS A 03-S-A-00/15	15	15	-	-	22	38	12,5	AI
	SVTS A 03-S-A-00/18	18	18	-	-	22	38	12,5	AI
	SVTS A 03-U-A-00/24	24	24	-	-	22	45,2	12,5	AI
	SVTS A 03-S-A-04/06	10	6	4	-	22	45,2	12,5	AI
	SVTS A 03-S-A-00/30	30	30	-	-	22	53,2	12,5	AI
	SVTS A 03-S-A-00/36	36	36	-	-	22	61	12,5	AI

Ethernet option*

Model	Number of circuits			L	Weight (kg)
	Total	Signals	Ethernet		
	2A				
SVTS A 03-S-A-00/00-...-E1M	-	-	100BaseT	19	0,03
SVTS A 03-S-A-00/06-...-E1M	6	6	100BaseT	28	0,05
SVTS A 03-S-A-00/09-...-E1M	9	9	100BaseT	29,5	0,05
SVTS A 03-S-A-00/12-...-E1M	12	12	100BaseT	33,4	0,05
SVTS A 03-S-A-00/18-...-E1M	18	18	100BaseT	41,2	0,07
SVTS A 03-S-A-00/30-...-E1M	30	30	100BaseT	57	0,08
SVTS A 03-S-A-00/00-...-E1G	-	-	1000BaseT	28	0,05
SVTS A 03-S-A-00/03-...-E1G	3	3	1000BaseT	29,5	0,05
SVTS A 03-S-A-00/06-...-E1G	6	6	1000BaseT	33,4	0,05
SVTS A 03-S-A-00/12-...-E1G	12	12	1000BaseT	41,2	0,07
SVTS A 03-S-A-00/24-...-E1G	24	24	1000BaseT	57	0,08

*RJ 45 connectors included

All dimensions in millimeters, unless otherwise specified

Specifications subject to change.

Appendice D

Ordini e preventivi

STUDENTSUPSI

Offerta
N. 1250470858



Debrunner Acifer SA
via Moderna 15 Zona 2
CH-6512 Giubiasco

Telefono +41 58 235 08 10
Fax +41 58 235 08 02

SUPSI DTI IST e PS
Istituto di ingegneria meccanica e
tecnologia dei materiali
Via Cantonale 2c, Galleria 2
6928 Manno

Debrunner Acifer

klöckner & co multi metal distribution

Giubiasco, 04.07.2019

Offerta	04.07.2019	N. IVA	CHE-105.893.760 MWST
Vs n. tel.	+41 91 610 89 60	Ns contatto	Sasha Mezzapesa
Ns fax	+41 91 610 89 70	Ns n. tel.	0
Vs e-mail		Ns fax	058 235 08 02
Vs n. ordine		Ns e-mail	smezzapesa@d-a.ch
Vs cod. cliente	10012944	Condiz. pagam.	30 giorni netto
Riferimento		Spedizione	Posta Priority
Nome oggetto		Peso totale:	8.84 KG
Nota		Valido fino al	31-lug-19
		Termine di consegna	come accordato

Vi ringraziamo per la richiesta ricevuta e Vi offriamo:

Termine: 1-2 giorni dall'ordinazione, salvo imprevisti.

Fornitura: una partecipazione ai costi di trasporto, lo scarico e l'imballaggio verranno esposti separatamente.

Prezzi: validi per ordine completo e fornitura unica.

In fase d'offerta i quantitativi sono calcolati con il peso teorico. La fatturazione può avvenire con peso teorico oppure con peso effettivo.

Pos.	Ns n. art.	QT	UT
10	10007782 / 231.200.360	8.84	KG
	Barre quadre di alluminio, EN AW-6082 (AlMgSi1), estruse, T6 (F31) 50 X 50 MM	1	PZ
	Prezzo: Art.	Importo	VA
	Prezzo vendita netto	8.00	per
	Taglio		1 KG
			Valore CHF
			70.72
			10.00
		Prezzo netto	80.72

Lunghezza L= 1,300 mm
Tagl. Fisso

| Q.tà ordine in pezzi 1



Offerta
N. 1250470858

Debrunner Acifer

klöckner & co multi metal distribution

Totale	80.72
Categoria prezzo	Importo VA per UM Base Valore CHF
Suppl.ti ordine e posizione	19.60
Imballaggio	15.00
Porto/Peso	25.50
Importo fattura IVA escl.	140.82
IVA vendite	140.82 10.84
Importo finale	151.65

Attiriamo la vostra attenzione sul fatto che le "Condizioni aziendali generali" (CAG), del 01.01.2017, del Gruppo Debrunner Acifer e relative società sono parte integrante del contratto. Le CAG possono essere consultate al sito Internet www.d-a.ch, oppure richieste in forma cartacea presso Debrunner Acifer.

Ci farebbe piacere di poter ricevere una Vostra ordinazione.

Distinti saluti

Debrunner Acifer SA



SUPSI

Istituto di ingegneria meccanica e tecnologia dei materiali

Galleria 2, Via Cantonale 2c, CH-6928 Manno
T +41 (0)58 666 66 11, F +41 (0)58 666 66 20

memti@supsi.ch, www.supsi.ch/memti
N. IVA: CHE-108.955.570 IVA



Walter Amaro
T +41 (0)58 666 66 30
walter.amaro@supsi.ch

Manno, 05.07.2019

SUPSI, DTI, MEMTI, via Cantonale 2c, CH-6928 Manno

Debrunner Acifer SA
via Moderna 15 Zona 2
CH-6512 Giubiasco

Telefono: +41 58 235 08 10
Fax: +41 58 235 08 02
Ns. contatto: Saha Mezzapesa
Ns. e-mail: smezzapesa@d-a.ch

Ordine no. 190705

Riferimento interno / progetto: 30 FBME Walter Amaro

Gentili Signore Mezzapesa,

Con la presente, in riferimento al vostro preventivo N. 1250470858, abbiamo il piacere di passarvi il seguente ordine:

Qtà	Descrizione	Importo
1	Barre quadre di alluminio, EN AW-6082 (AlMgSi1), estruse, T6 (F31) 50x50 mm, Lunghezza L=1300 mm	70,72 CHF
	Taglio	10,00 CHF
	Suppl.ti ordine e posizione	19,60 CHF
	Imballaggio	15,00CHF
	Porto/Peso	25,50 CHF
	IVA	10,84CHF
	Totale	CHF 151,65 CHF

Condizioni:

- ✓ Modalità di pagamento: entro 30 giorni
- ✓ Spedizione: posta prioritaria
- ✓ Termine di consegna: 1-2 giorni dall'ordinazione, salvo imprevisti
- ✓ Fornitura: una partecipazione ai costi di trasporto, lo scarico e l'imballaggio verranno esposti separatamente.
- ✓ Prezzi: validi per orsine completa e fornitura unica

L'occasione ci è gradita per presentarvi i nostri più cordiali saluti.

Prof. Walter Amaro
Responsabile
CdL Ingegneria Meccanica

Prof. Andrea Graf
Responsabile
Formazione Base



VERZAHNUNGSELEMENTE | GEWINDETECHNIK | MASCHINEN-NORMTEILE

Lieferadresse
MEMTI
SUPSI DTI
via Cantonale 2c
6928 Manno

SUPSI-MEMTI
Galleria 2
via Cantonale 2c
6928 Manno

Auftragsbestätigung

409962

Feuerthalen, 05. Juli 2019

Seite 1 von 2

Kunden-Nr.	102134
Ihre Referenz	Frau Cinzia Dolci
Ihre Bestellung	Warenkorb 2019699972
Ihre Bestellart	Webshop / 05.07.2019
Versandart	DPD / Sulser

Auftrag	409962
Unser Kontakt	Ennio Le Donne 052 6474044 ennio.ledonne@maedler.ch

=====

Der neue Mädler-Katalog 42 mit einigen Neuheiten ist da. Bitte fordern Sie ihn bei Bedarf an.

=====

Bitte beachten Sie, dass nach erfolgter Bestellung über Getriebe-und Getriebemotoren diese nicht mehr storniert werden können. Informieren Sie sich bitte im Voraus über die aktuellen Lieferzeiten.

Bestellungen nicht lagerhaltiger Artikel können - falls im Mutterhaus an Lager - in der darauffolgenden Woche geliefert werden, sofern wir Ihre Bestellung bis am Donnerstag, 11:00 Uhr erhalten.

Artikel und Bezeichnung	Liefertermin	Menge	Einheit	Preis	Betrag CHF
607-2Z-SKF SKF-Rillenkugellager einreihig d = 7 mm D = 19 mm B = 6 mm mit beidseitigen Deckscheiben 607-2Z-SKF	09.07.2019	2	Stk	7.90	15.80
6000-2Z-SKF SKF-Rillenkugellager einreihig d= 10mm / D= 26mm / B= 8mm mit beidseitigen Deckscheiben 6000-2Z-SKF	09.07.2019	2	Stk	8.53	17.05
61762600 Sicherungsringe DIN 472 für Bohrungen 26mm	09.07.2019	2	Stk	0.64	1.30
61761900 Sicherungsringe DIN 472 für Bohrungen 19mm	09.07.2019	1	Stk	0.32	0.30
61741000 Sicherungsring DIN 471 für Wellen 10 mm	09.07.2019	1	Stk	0.18	0.20



VERZAHNUNGSELEMENTE | GEWINDETECHNIK | MASCHINEN-NORMTEILE

Auftragsbestätigung**409962**

Feuerthalen, 05. Juli 2019

Seite 2 von 2

SUPSI-MEMTI, Galleria 2, via Cantonale 2c, 6928 Manno

Artikel und Bezeichnung	Liefertermin	Menge	Einheit	Preis	Betrag CHF
61740700 Sicherungsring DIN 471 für Wellen 7 mm	09.07.2019	2	Stk	0.15	34.65
60271000 Ausgleichskupplung KA aus Alu, 1,46 Nm Bohrung 6 mm	09.07.2019	1	Stk	26.07	26.05
60271400 Ausgleichskupplung KA aus Alu, 2,44 Nm Bohrung 5 mm	09.07.2019	1	Stk	26.29	26.30

Warenwert 87.30	Porto	Verpackung	Nettobetrag 87.30	Montant TVA 7.7 %	Gesamtbetrag CHF 94.00
Lieferung	frei Haus bis 30 kg und 1,75 m Länge				
Zahlung	30 Tage rein netto				
Dokument	auch ohne Unterschrift gültig				

Wir danken für Ihren Auftrag, den wir auf Grund unserer allgemeinen Lieferbedingungen ausführen werden.

Mit freundlichen Grüßen
MÄDLER® Norm-Antrieb AG

SUPSI

Istituto di ingegneria meccanica e tecnologia dei materiali

Galleria 2, Via Cantonale 2c, CH-6928 Manno
T +41 (0)58 666 66 11, F +41 (0)58 666 66 20

memti@supsi.ch, www.supsi.ch/memti
N. IVA: CHE-108.955.570 IVA



Walter Amaro
T +41 (0)58 666 66 30
walter.amaro@supsi.ch

Manno, 04.07.2019

SUPSI, DTI, MEMTI, via Cantonale 2c, CH-6928 Manno

Mädler Switzerland

Mädler Norm-Antrieb AG
Güterstrasse 6
CH-8245 Feuerthalen
Tel.:+41 (0) 52-647 40 40
Fax:+41 (0) 52-647 40 41
E-Mail: info@maedler.ch
Sito internet: <http://www.maedler.ch>

Ordine no. 190704

Riferimento interno / progetto: 30 FBME Walter Amaro

Gentili Signore, Egregi Signori,

Con la presente abbiamo il piacere di passarvi il seguente ordine:

Qtà	Descrizione	Importo
2	Cuscinetto volvente a sfere SKF serie 60 diametro Ø7 mm, 607-2Z-SKF	15,80 CHF
2	Cuscinetto volvente a sfere SKF serie 60 diametro Ø10 mm, 6000-2Z-SKF	17,06 CHF
2	Circlip DIN 472 Ø26 mm, 61762600	1,28 CHF
1	Circlip DIN 472 Ø19 mm, 61761900	0,32 CHF
1	Circlip DIN 471 Ø10 mm, 61741000	0,18 CHF
2	Circlip DIN 471 Ø7 mm, 61740700	0,30 CHF
1	Giunto elastico Ø12.70 mm x 19.05 mm, 60271000	26,07 CHF
1	Giunto elastico Ø15.87 mm x 20.30 mm, 60271400	26,29 CHF
	IVA	8,18 CHF
	Totale	CHF 110,48

Condizioni:

- ✓ Modalità di pagamento: entro 30 giorni
- ✓ Spedizione in Svizzera gratuita
- ✓ Riserva di proprietà, i beni forniti rimangono di proprietà di Mädler Switzerland fino al completo pagamento dei crediti pendenti.
- ✓ Periodo di garanzia: 6 mesi dall'avviso di pronta spedizione.
- ✓ La merce consegnata deve essere controllata per quantità, tipo, qualità e condizioni entro 8 giorni.

L'occasione ci è gradita per presentarvi i nostri più cordiali saluti.

Prof. Walter Amaro
Responsabile
CdL Ingegneria Meccanica

Prof. Andrea Graf
Responsabile
Formazione Base

Servotechnica		OFFERTA/QUOTATION	OV2019_1069				
		De/Date	01/07/2019				
Servotechnica SpA Società unipersonale soggetta ad attività di direzione e coordinamento di AMIEG SpA	C.S. Ivr. € 468.000,00 R.I. MI 05979620150 REA MI 19027810 C.F. 05979620150 VAT Code IT 00807980568 	Vs. Rif / Yr Del / Of:					
SUPSI	Switzerland	Validità Offerta/Validity: Garanzia/Warranty:	30 days 12 months				
Alla C.A.: Sig. Martino Rinaldi		Ns. Rifer./Our Francesca Paissoni					
Cliente/Customer P.Iva/VAT 111111111	Condizioni di Pagamento/Payment Terms AVME AD AVVISO DI MERCE PRONTA	Valuta/Currency EUR	Agente/Agent VENDITE INTERNE				
Resa/Term of delivery NS MAG. CONVENZIONE ADDEBITO IN FATTURA	Mezzo di Spedizione/Shipping Terms VETTORE BRT SpA	Imballo/Packing COMPRESO	Banca d'Appoggio/Bank IBAN				
PRODOTTO PRODUCT A	DESCRIZIONE DESCRIPTION SVTS A 03-U-A-04/06-0250/0250-ST-000	<u>UDM</u> N	<u>DA QUANTITA' FROM QTY</u> 1	<u>A QUANTITA' TO QTY</u> 1	<u>PREZZO UNIT UNIT PRICE</u> EUR	<u>LEGAME VALUTARIO CURRENCY EXCH. RATE</u> 274,00	<u>CONSEGNA DELIVERY</u> 7 Working weeks

GENERAL TERMS AND CONDITIONS OF SALE: https://www.servotechnica.com/images/ConGenVendita_en.pdf

SUPSI

Istituto di ingegneria meccanica e tecnologia dei materiali

Galleria 2, Via Cantonale 2c, CH-6928 Manno
T +41 (0)58 666 66 11, F +41 (0)58 666 66 20

memti@supsi.ch, www.supsi.ch/memti
N. IVA: CHE-108.955.570 IVA



Walter Amaro
T +41 (0)58 666 66 30
walter.amaro@supsi.ch

Manno, 02.07.2019

SUPSI, DTI, MEMTI, via Cantonale 2c, CH-6928 Manno

Servotecnica SpA

Sede Legale:
Via U. Visconti di Modrone, 11-20122
Milano, Italia

Sede operativa: Via E. Majorana, 4-20834
Nova Milanese (MB), Italia

Tel: +39 0362 4921
E-mail: info@servotecnica.com
Sito Internet: www.servotecnica.com

Ordine no. 190702

Riferimento interno / progetto: 30 FBME Walter Amaro

Gentile Sg.ra Paissoni,

Con la presente, secondo vostro preventivo **OV2019_1069** del 1 luglio 2019, abbiamo il piacere di passarvi il seguente ordine:

Qtà	Descrizione	Importo
1	Slip Rings (collettore elettrico rotante) SVTS A 03-U-A-04/06-0250/0250-ST-000	274,00 €
	Totale	EUR 274,00

Condizioni:

- ✓ Modalità di pagamento: addebito in fattura
- ✓ Condizioni di pagamento: ad avviso di merce pronta
- ✓ Imballaggio compreso
- ✓ Validità di garanzia: 12 mesi
- ✓ Consegna entro 7 giorni lavorativi tramite BRT SpA

L'occasione ci è gradita per presentarvi i nostri più cordiali saluti.

Prof. Roberto Bucher
Responsabile
Laboratorio di sistemi meccatronici

Prof. Walter Amaro
Responsabile
CdL Ingegneria Meccanica

Prof. Andrea Graf
Responsabile
Formazione Base

servotecnica

ORDER NUMBER

OC19/-1934 date 04/07/2019



Sede operativa Via E. Majorana, 4 - 20034 Nova Milanese (MB), Italy
 Sede Legale Via U. Visconti di Modrone, 11 - 20122 Milano, Italy
 C.S. I.v. € 468.000,00
 R.I. MI 05879620150
 REA MI 1902780
 C.F. 05879620150
 VAT Code IT 00807880968
 +39 0362 4921 / info@servotecnica.com
 www.servotecnica.com

Società unipersonale
 soggetta ad attività
 di direzione e coordinamento
 di AMEG SpA

Vostro Ordine/Yr. Order
 190702
 del/date 02/07/2019

Sez. Commerciale/Contact Person
 FP - Francesca Paissoni

Cliente Partita Iva
 CS010E CHE-108955570

Resa/Term Of Delivery
 CARRIAGE PAID TO

Destinazione Merce/Ship to Address
 SUPSI - IST. INGEGNERIA MECCANICA E TECNOLOGIA DEI MATERIALI
 GALLERIA 2 , VIA CANTONALE 2C

6928 MANNO
 (ES)

Spedibile Ditta/Msrs
 SUPSI - IST. INGEGNERIA MECCANICA E TECNOLOGIA
 DEI MATERIALI

GALLERIA 2 , VIA CANTONALE 2C
 (ES)

6928 MANNO
 (ES)

Condizioni di Pagamento/Payment Terms		Sconto/Disc	Valuta/Currency	Banca/Ban c/o BANCO BPM SPA			
AD AVVISO DI MERCE PRONTA AVME			EURO				

POS	PRODOTTO PRODUCT	DESCRIZIONE DESCRIPTION	UDM UNIT	QUANTITA' QUANTITY	CONSEGNA DELIVERY	PREZZO UNITARIO UNIT PRICE	SCONTO CURRENC	VALUTA CURRENCY	CAMBIO EXCH.RATE	IMPORTO NETTO	IVA VAT
5	H1878	*VS . RIF . PROGETTO : 30 FBME Walter Amaro SVTS A 03-U-A-04/06-0250/0500-ST-000 SHIPPING COSTS	N N	1 1	28/08/2019 28/08/2019	274,00 36,31				0,000000 0,000000	274,00 36,31

TOTALE ORDINE:
 Total Order:

310,31

Servo**tecnica**

PROFORMA INVOICE FP19/---223 del 29/07/2019



Sede operativa Via E. Majorana, 4 - 20134 Nova Milanese (MB), Italy
 Sede Legale Via U. Visconti di Modrone, 11 - 20122 Milano, Italy
 +39 0362 4921 / info@servotecnica.com
 www.servotecnica.com

Servotecnica SpA
 Società unipersonale
 soggetta ad attività
 di direzione e coordinamento
 di AlMeG SpA

Codice Cliente/Customer's Code
 CS010E

Partita Iva/V.A.T. nbr
 CHE-108955570

Bolla di Consegna/Delivery note
 del/date
 02/07/2019

Luogo di Consegna merce/Goods Delivery Address
 SUPSI - IST. INGEGNERIA MECCANICA E TECNOLOGIA DEI MATERIALI
 GALLERIA 2 , VIA CANTONALE 2C
 6928 Manno (ES)

Sez. Commerciale/Your Contact
 Francesca Paissoni

Agente/Agen VENDITE INTERNE

Vostro Ordine/Your order Nbr
 190702

Sconto/Discount	Condizioni di Pagamento/Payment Terms AVME AD AVVISO DI MERCE PRONTA	del/date 02/07/2019	Nostra Conferma/Sales Order Nbr	del/date
Sconto/Discount	Mezzo di Spedizione/Shipping	DHL INT #112412232 EXPORT C/Rosa/Terms of Delivery	Carriage Paid To	

Pursuant to and by effect of art. 1523 of the Italian Civil Code and art. 11, paragraph 3, Decree no. 231 of 2002, Servotecnica - according to provisions of Art. 8 of the General Terms and Conditions of Sale - will retain the ownership of the Products mentioned in this Invoice until final and full payment of the price is made.

POS.	PRODOTTO PRODUCT CODE	DESCRIZIONE/DESCRIPTION	UDM UNIT	QUANTITA' QUANTITY	PREZZO UNITARIO UNIT PRICE	SCONTO DISCOUNT	VALUTA CURRENCY	CAMBIO EXCH. RATE	IMPORTO NETTO PRICE TOTAL	CUSTOM TARIFF	IVA VAT
5	H1878	*VS. RIF. PROGETTO: 30 FBME Walter Amaro .>> Ord. OC19/---1934 del 4/7/2019 Luogo di Consegnas: SUPSI - IST. INGEGNERIA MECCANICA E TECNOLOGIA D SVTS A 03-U-A-04/06-0250/0500-ST-000 SHIPPING COSTS	N	1	274,0000				274,00	85369010	81
			N	1	36,3100				36,31		81

Merci/Goods	Spese Trasporti/Shipping Costs 36,31	Spese Imballo/Packaging Costs	Spese Varie/Extra Costs	Sconto Cassa/Payment Discount	Omaggi/No-cost Items	Adeguamento/Exchange Rate
Codice IVA/Vat Code 81 NON IMP. ART. 8 LETT. A	% Aliquota IVA/VAT % Imponibile IVA/VAT Subtotal 310,31	Importo IVA/VAT Amount Impone non soggetto operazione non soggetta	Totali IVA/VAT Subtotal 310,31	Totali Importi IVA/VAT Subtotal 310,31	Totali Importi IVA/VAT Value 310,31	
Nr. Colli/Goods Packed	Peso Lordo/Gross	Peso Netto/Net Weight	Contatto/Contact			Aspetto dei Beni/Packaging Type
Scadenza Pagamenti/Payment due on 29/07/2019	Scadenza Pagamenti/Payment due on 310,31	Scadenza Pagamenti/Payment due on EURO				Totali Fatturati/Invoice Total Amount 310,31

Appendice E

Codici MATLAB

E.1 Simulazioni

```

1 %%
2 %
3 %
4 % Modellazione di un sistema RWIP (Reaction Wheel Inverted Pendulum) con controllo in posizione
5 % mediante controllore LQR (Linear Quadratic Regulator)
6 % Controllore LQR per un sistema linearizzato attorno al punto di equilibrio stabile
7 %
8 %
9 %
10 %
11 %
12 % Corso: Tesi di diploma
13 % SUPSI DTI Manno 26.06.2019
14 % Autori: Martino Rinaldi
15 % Versione: 1.2
16 %
17 %
18
19 %% Inizializzazione Workspace
20 clc, clear, close all;
21
22 %% Definizione delle variabili
23
24 % Momento di inerzia del pendolo [kg mm^2]
25 I_pendolo = 101.809901237;
26 % Momento di inerzia del pendolo [kg m^2]
27 I_pendolo = I_pendolo*(1e-3)^2;
28
29 % Momento di inerzia del volano [kg mm^2]
30 I_wheel = 83.087523272;
31 % Momento di inerzia del volano [kg m^2]
32 I_wheel = I_wheel*(1e-3)^2;
33
34 % Massa del pendolo [kg]
35 M_pendolo = 0.222250177;
36
37 % Massa del volano [kg]
38 M_wheel = 0.045900886;
39
40 % Lunghezza del pendolo [mm]
41 L_pendolo = 90;
42 % Lunghezza del pendolo [m]
43 L_pendolo = L_pendolo*1e-3;
44
45 % Distanza del centro di massa del pendolo dal punto di rotazione [mm]
46 L_c = 84.50703311;
47 % Distanza del centro di massa del pendolo dal punto di rotazione [m]
48 L_c = L_c * 1e-3;

```

```

49
50 % Accellerazione gravitazionale [m/s^2]
51 g = 9.81;
52
53 % Frequenza naturale di oscillazione del pendolo fisico
54 T_natural = 2*pi*sqrt((I_pendolo+I_wheel+M_wheel*L_pendolo^2)/((M_pendolo+M_wheel)*g*L_c));
55 W_natural = 1/T_natural;
56
57 Eq_point = 0;
58 Init_cond = [10/180*pi 0];
59
60 %% Generazione delle matrici di stato
61 N_stati = 2;
62 N_input = 1;
63 N_output = 1;
64
65 % Matrici di stato in posizone di equilibrio stabile
66 % x = [theta ,psi]
67 % u = [tau]
68 % y = [theta]
69 A = [0 1;
70 -(L_pendolo*g*M_wheel+L_c*g*M_pendolo)/(L_pendolo^2*M_wheel-I_wheel+I_pendolo) 0];
71 B = [0;
72 -1/(L_pendolo^2*M_wheel-I_wheel+I_pendolo)];
73 C = [1 0 ];
74 D = zeros(N_output,N_input);
75
76 sys = ss(A,B,C,D);
77 sysCTRB = ctrb(sys);
78 sysOBSV = obsv(sys);
79
80 if rank(sysCTRB) ~= N_stati
81 error('Error: File: RWIP_MatlabModel.m Line: 83 Column: 9 \r\n%', 'The dynamic sistem sys is not controllable.');
82 end
83
84 if rank(sysOBSV) ~= N_stati
85
86 error('Error: File: RWIP_MatlabModel.m Line: 83 Column: 9 \r\n%', 'The dynamic sistem sys is not observable.');
87 end
88
89 %% Costruzione del controllore continuo
90
91 % Matrice Q dei pesi degli stati
92 Q = diag([1e6,1e-3]);
93
94 % Matrice R dei pesi delle entrate
95 R = 7e7;
96
97 % LQR
98 [K_lqr,S,E] = lqr(sys.A,sys.B,Q,R);
99
100 %% Costruzione del controllore discreto
101
102 % Tempo di campionamento [s]
103 Ts = 10e-3;
104
105 % Sistema ed osservatore discreti
106 sys_d = c2d(sys,Ts);
107
108 % LQR
109 [K_dlqr,S_d,E_d] = dlqr(sys_d.A, sys_d.B, Q, R);
110
111 %% Ricerca poli del sistema e dell'osservatore
112
113 % Tempo di campionamento [s]
114 Ts = 10e-3;
115 % Poli del sistema
116 sysPoles = E;
117 sysPolesReal= real(sysPoles);
118 sysPolesImag= imag(sysPoles);
119
120 % Frequenza naturale del sistema
121 [minPole,PolePosition] = min(sysPolesReal);
122 sysOmega_n = sqrt(sysPolesImag(PolePosition)^2 + sysPolesReal(PolePosition)^2);
123

```

```
124 % Fattore moltiplicativo per il piazzamento dei pol dell'osservatore
125 obsFactor = 4;
126
127 % Frequenza naturale dell'osservatore
128 obsOmega_n =obsFactor*sysOmega_n;
129
130 % Smorzamento dell'osservatore
131 obsXi = sqrt(2)/2;
132
133 % Definizione dei poli dell'osservatore
134 obsPoleX = -obsOmega_n*obsXi;
135 obsPoleY = obsOmega_n*sqrt(1-obsXi^2)*i;
136 obsPoles = [-obsOmega_n-0*i];
137
138 obsPoles_d = exp(obsPoles*Ts);
139
140 %% Costruzione dell'osservatore ridotto
141
142 [n_y,n] = size(C);
143 T = zeros(n-n_y,n);
144 T(1,2) = 1;
145 %T(2,3) = 1;
146
147 % Osservatore ridotto
148 obs = redobs(sys,T,obsPoles);
149
150 % Osservatore discreto
151 obs_d =c2d(obs,Ts);
152
153 sys_ctr = ss(A-B*K_lqr,B,C,D);
154
155 %% Forma compatta
156
157 % ObsCtr = comp_form(sys_d,obs_d,K_dlqr);
```

```

1 %
2 %
3 % Modellazione di un sistema RWIP (Reaction Wheel Inverted Pendulum) con controllo in posizione
4 % mediante controllore LQR (Linear Quadratic Regulator)
5 % Controllore LQR per un sistema linearizzato attorno al punto di equilibrio instabile
6 %
7 %
8 % Corso: Tesi di diploma
9 % SUPSI DTI Manno 31.07.2019
10 % Autori: Martino Rinaldi
11 % Versione: 2.0
12 %
13 %
14
15 %% Inizializzazione Workspace
16 clc, clear, close all;
17
18 %% Definizione delle variabili
19 % Momento di inerzia del pendolo [kg mm^2]
20 I_pendolo = 101.809901237;
21 % Momento di inerzia del pendolo [kg m^2]
22 I_pendolo = I_pendolo*(1e-3)^2;
23
24 % Momento di inerzia del volano [kg mm^2]
25 I_wheel = 83.087523272;
26 % Momento di inerzia del volano [kg m^2]
27 I_wheel = I_wheel*(1e-3)^2;
28
29 % Massa del pendolo [kg]
30 M_pendolo = 0.222250177;
31
32 % Massa del volano [kg]
33 M_wheel = 0.045900886;
34
35 % Lunghezza del pendolo [mm]
36 L_pendolo = 90;
37 % Lunghezza del pendolo [m]
38 L_pendolo = L_pendolo*1e-3;
39
40 % Distanza del centro di massa del pendolo dal punto di rotazione [mm]
41 L_c = 84.50703311;
42 % Distanza del centro di massa del pendolo dal punto di rotazione [m]
43 L_c = L_c * 1e-3;
44
45 % Accelerazione gravitazionale [m/s^2]
46 g = 9.81;
47
48 % Frequenza naturale di oscillazione del pendolo fisico
49 T_natural = 2*pi*sqrt((I_pendolo+I_wheel+M_wheel*L_pendolo^2)/((M_pendolo+M_wheel)*g*L_c));
50 W_natural = 1/T_natural;
51
52 Eq_point = 0;
53 Init_cond = [5/180*pi 4.5];
54
55 %% Generazione delle matrici di stato
56 N_stati = 2;
57 N_input = 1;
58 N_output = 1;
59
60 % Matrici di stato in posizione di equilibrio stabile
61 % x = [theta, psi]
62 % u = [tau]
63 % y = [theta]
64 A = [0 1;
       (L_pendolo*g*M_wheel+L_c*g*M_pendolo)/(L_pendolo^2*M_wheel-I_wheel+I_pendolo) 0];
65 B = [0;
       -1/(L_pendolo^2*M_wheel-I_wheel+I_pendolo)];
66 C = [1 0];
67 D = zeros(N_output, N_input);
68
69 sys = ss(A,B,C,D);
70 sysCTRB = ctrb(sys);
71 sysOBSV = obsv(sys);
72
73
74

```

```

75 if rank(sysCTR) ~= N_stati
76   error('Error: File: RWIP_MatlabModel.m Line: 83 Column: 9 \n%', 'The dynamic sistem sys is not controllable.');
77 end
78
79 if rank(sysOBS) ~= N_stati
80
81   error('Error: File: RWIP_MatlabModel.m Line: 83 Column: 9 \n%', 'The dynamic sistem sys is not observable.');
82 end
83
84 %% Costruzione del controllore continuo
85 % Matrice Q dei pesi degli stati
86 Q = diag([1e3,1e-4]);
87
88 % Matrice R dei pesi delle entrate
89 R = 1e16;
90
91 % LQR
92 [K_lqr,S,E] = lqr(sys.A,sys.B,Q,R);
93
94 %% Costruzione del controllore discreto
95 % Tempo di campionamento [s]
96 Ts = 10e-3;
97
98 % Sistema ed osservatore discreti
99 sys_d = c2d(sys,Ts);
100
101 % LQR
102 [K_dlqr,S_d,E_d] = dlqr(sys_d.A, sys_d.B, Q, R);
103
104 %% Ricerca poli del sistema e dell'osservatore
105 % Tempo di campionamento [s]
106 Ts = 10e-3;
107 % Poli del sistema
108 sysPoles = E;
109 sysPolesReal= real(sysPoles);
110 sysPolesImag= imag(sysPoles);
111
112 % Frequenza naturale del sistema
113 [minPole,PolePosition] = min(sysPolesReal);
114 sysOmega_n = sqrt(sysPolesImag(PolePosition)^2 + sysPolesReal(PolePosition)^2);
115
116 % Fattore moltiplicativo per il piazzamento dei poli dell'osservatore
117 obsFactor = 4;
118
119 % Frequenza naturale dell'osservatore
120 obsOmega_n = obsFactor*sysOmega_n;
121
122 % Smorzamento dell'osservatore
123 obsXi = sqrt(2)/2;
124
125 % Definizione dei poli dell'osservatore
126 obsPoleX = -obsOmega_n*obsXi;
127 obsPoleY = obsOmega_n*sqrt(1-obsXi^2)*i;
128 obsPoles = [-obsOmega_n-0*i];
129
130 obsPoles_d = exp(obsPoles*Ts);
131
132 %% Costruzione dell'osservatore ridotto
133 [n_y,n] = size(C);
134 T = zeros(n-n_y,n);
135 T(1,2) = 1;
136 %T(2,3) = 1;
137
138 % Osservatore ridotto
139 obs = redobs(sys,T,obsPoles);
140
141 % Osservatore discreto
142 obs_d =c2d(obs,Ts);
143
144 sys_ctr = ss(A-B*K_lqr,B,C,D);
145
146 %% Forma compatta
147 ObsCtr = comp_form(sys_d,obs_d,K_dlqr);

```

```

1 %
2 %
3 % Modellazione di un sistema RWIP (Reaction Wheel Inverted Pendulum) con controllo in posizione
4 % mediante controllore LQR (linear Quadratic Regulator)
5 % Controllore LQR per un sistema linearizzato attorno al punto di equilibrio instabile
6 %
7 %
8 % Corso: Tesi di diploma
9 % SUPSI DTI Manno 31.07.2019
10 % Autori: Martino Rinaldi
11 % Versione: 2.0
12 %
13 %
14
15 %% Inizializzazione Workspace
16 clc, clear, close all;
17
18 %% Definizione delle variabili
19 % Momento di inerzia del pendolo [kg mm^2]
20 I_pendolo = 101.809901237;
21 % Momento di inerzia del pendolo [kg m^2]
22 I_pendolo = I_pendolo*(1e-3)^2;
23
24 % Momento di inerzia del volano [kg mm^2]
25 I_wheel = 83.087523272;
26 % Momento di inerzia del volano [kg m^2]
27 I_wheel = I_wheel*(1e-3)^2;
28
29 % Massa del pendolo [kg]
30 M_pendolo = 0.222250177;
31
32 % Massa del volano [kg]
33 M_wheel = 0.045900886;
34
35 % Lunghezza del pendolo [mm]
36 L_pendolo = 90;
37 % Lunghezza del pendolo [m]
38 L_pendolo = L_pendolo*1e-3;
39
40 % Distanza del centro di massa del pendolo dal punto di rotazione [mm]
41 L_c = 84.50703311;
42 % Distanza del centro di massa del pendolo dal punto di rotazione [m]
43 L_c = L_c * 1e-3;
44
45 % Accelerazione gravitazionale [m/s^2]
46 g = 9.81;
47
48 % Frequenza naturale di oscillazione del pendolo fisico
49 T_natural = 2*pi*sqrt((I_pendolo+I_wheel+M_wheel*L_pendolo^2)/((M_pendolo+M_wheel)*g*L_c));
50 W_natural = 1/T_natural;
51
52 Eq_point = 0;
53 Init_cond = [15/180*pi 0 0 0];
54
55 %% Generazione delle matrici di stato
56 N_stati = 2;
57 N_input = 1;
58 N_output = 1;
59
60 % Matrici di stato in posizione di equilibrio stabile
61 % x = [theta, psi]
62 % u = [tau]
63 % y = [theta]
64 A = [0 1;
       (L_pendolo*g*M_wheel+L_c*g*M_pendolo)/(L_pendolo^2*M_wheel-L_wheel+I_pendolo) 0];
65 B = [0;
       -1/(L_pendolo^2*M_wheel-L_wheel+I_pendolo)];
66 C = [1 0];
67 D = zeros(N_output,N_input);
68
69 A_4ord = [0 1 0 0;
            (L_pendolo*g*M_wheel+L_c*g*M_pendolo)/(L_pendolo^2*M_wheel-L_wheel+I_pendolo) 0 0 0;
            0 0 1;
            -(L_pendolo*g*M_wheel+L_c*g*M_pendolo)/(L_pendolo^2*M_wheel-L_wheel+I_pendolo) 0 0 0];
70
71
72
73
74

```

```

75
76 B_4ord = [0;
77     -1/(L_pendolo^2*M_wheel-I_wheel+I_pendolo);
78     0;
79     (L_pendolo^2*M_wheel+I_pendolo)/(I_wheel*L_pendolo^2*M_wheel-I_wheel^2+I_pendolo*I_wheel) ];
80
81 C_4ord = [1 0 0 0];
82
83 D_4ord = [0];
84
85 sys = ss(A,B,C,D);
86 sysCTRB = ctrb(sys);
87 sysOBSV = obsv(sys);
88
89 if rank(sysCTRB) ~= N_stati
90     error('Error: File: RWIP_MatlabModel.m Line: 83 Column: 9 \n%', 'The dynamic sistem sys is not controllable.');
91 end
92
93 if rank(sysOBSV) ~= N_stati
94
95     error('Error: File: RWIP_MatlabModel.m Line: 83 Column: 9 \n%', 'The dynamic sistem sys is not observable.');
96 end
97
98 %% Costruzione del controllore continuo
99 %% Matrice Q dei pesi degli stati
100 Q = diag([1e3,1e-4]);
101
102 %% Matrice R dei pesi delle entrate
103 R = 1e16;
104
105 %% LQR
106 [K_lqr,S,E] = lqr(sys.A,sys.B,Q,R);
107
108 %% Costruzione del controllore discreto
109 %% Tempo di campionamento [s]
110 Ts = 10e-3;
111
112 %% Sistema ed osservatore discreti
113 sys_d = c2d(sys,Ts);
114
115 %% LQR
116 [K_dlqr,S_d,E_d] = dlqr(sys_d.A, sys_d.B, Q, R);
117
118 %% Ricerca poli del sistema e dell'osservatore
119 %% Tempo di campionamento [s]
120 Ts = 10e-3;
121 %% Poli del sistema
122 sysPoles = E;
123 sysPolesReal= real(sysPoles);
124 sysPolesImag= imag(sysPoles);
125
126 %% Frequenza naturale del sistema
127 [minPole,PolePosition] = min(sysPolesReal);
128 sysOmega_n = sqrt(sysPolesImag(PolePosition)^2 + sysPolesReal(PolePosition)^2);
129
130 %% Fattore moltiplicativo per il piazzamento dei pol dell'osservatore
131 obsFactor = 4;
132
133 %% Frequenza naturale dell'osservatore
134 obsOmega_n = obsFactor*sysOmega_n;
135
136 %% Smorzamento dell'osservatore
137 obsXi = sqrt(2)/2;
138
139 %% Definizione dei poli dell'osservatore
140 obsPoleX = -obsOmega_n*obsXi;
141 obsPoleY = obsOmega_n*sqrt(1-obsXi^2)*i;
142 obsPoles = [-obsOmega_n-0*i];
143
144 obsPoles_d = exp(obsPoles*Ts);
145
146 %% Costruzione dell'osservatore ridotto
147 [n_y,n] = size(G);
148 T = zeros(n-n_y,n);
149 T(1,2) = 1;

```

```
150 %T(2,3) = 1;
151
152 % Osservatore ridotto
153 obs = redobs(sys,T,obsPoles);
154
155 % Osservatore discreto
156 obs_d = c2d(obs,Ts);
157
158 sys_ctrl = ss(A-B*K_lqr,B,C,D);
159
160 %% Forma compatta
161 % ObsCtr = comp_form(sys_d,obs_d,K_dlqr);
```

```

1 %%
2 %
3 %
4 % Modellazione di un sistema RWIP (Reaction Wheel Inverted Pendulum) con controllo in posizione
5 % mediante controllore LQR (Linear Quadratic Regulator) e swing-up del sistema
6 %
7 %
8 %
9 %
10 %
11 % Corso: Tesi di diploma
12 % SUPSI DTI Manno 15.07.2019
13 % Autori: Martino Rinaldi
14 % Versione: 1.0
15 %
16 %
17
18 %% Inizializzazione Workspace
19 clc, clear, close all;
20
21 %% Definizione delle variabili
22
23 % Momento di inerzia del pendolo [kg mm^2]
24 I_pendolo = 101.809901237;
25 % Momento di inerzia del pendolo [kg m^2]
26 I_pendolo = I_pendolo*(1e-3)^2;
27
28 % Momento di inerzia del volano [kg mm^2]
29 I_wheel = 83.087523272;
30 % Momento di inerzia del volano [kg m^2]
31 I_wheel = I_wheel*(1e-3)^2;
32
33 % Massa del pendolo [kg]
34 M_pendolo = 0.222250177;
35
36 % Massa del volano [kg]
37 M_wheel = 0.045900886;
38
39 % Lunghezza del pendolo [mm]
40 L_pendolo = 90;
41 % Lunghezza del pendolo [m]
42 L_pendolo = L_pendolo*1e-3;
43
44 % Distanza del centro di massa del pendolo dal punto di rotazione [mm]
45 L_c = 84.50703311;
46 % Distanza del centro di massa del pendolo dal punto di rotazione [m]
47 L_c = L_c * 1e-3;
48
49 % Accelerazione gravitazionale [m/s^2]
50 g = 9.81;
51
52 % Coefficienti di attrito
53 eta_1 = 0;
54 eta_2 = 0;
55
56 % Frequenza naturale di oscillazione del pendolo fisico
57 T_natural = 2*pi*sqrt((I_pendolo+I_wheel+M_wheel*L_pendolo^2)/((M_pendolo+M_wheel)*g*L_c));
58 W_natural = 1/T_natural;
59
60 %% Calcolo della velocità di rotazione del volano per effettuare o swing-up
61 U = (L_c*M_pendolo+L_pendolo*M_wheel)*g;
62 omega_min = sqrt(2*U/I_wheel);
63 rpm_min = 60/(2*pi)*omega_min;
64 omegaThreshold = 1.2999*omega_min;
65
66 %% Definizione del segnale di input per la coppia motore (tau)
67
68 % Definizione del tempo di simulazione [s]
69 T_simulation = 1.8;
70 T_start = 0.1;
71 Time = (0:1e-3:T_simulation)';
72
73 % Definizione del valore di coppia forniti [Nm]
74 Tau_up = 0.050;

```

```

75 Tau_stop = 0.112;
76
77 % Definizione del tempo di accellerazione [s]
78 deltaT_1 = l_wheel*omegaThreshold/Tau_up;
79 deltaT_2 = l_wheel*omegaThreshold/Tau_stop;
80
81 % Definizione del segnale di coppia
82 Tau = zeros(length(Time),1);
83 temp =((Time>T_start & Time<=(T_start+deltaT_1)));
84 Tau(temp) = Tau_up;
85 temp =((Time>(T_start+deltaT_1) & Time<=(T_start+deltaT_1+deltaT_2)));
86 Tau(temp) = -Tau_stop;
87
88 signal = timeseries(Tau,Time);
89
90 %% Definizione dei gain per lo stato Psi
91
92 GainPsi_1 = -(L_pendolo*M_wheel+L_c*M_pendolo)*g/(L_pendolo^2*M_wheel-l_wheel+l_pendolo);
93 GainPsi_2 = -1/(L_pendolo^2*M_wheel-l_wheel+l_pendolo);
94 GainPsi_3 = -eta_1/(L_pendolo^2*M_wheel-l_wheel+l_pendolo);
95 GainPsi_4 = eta_2/(L_pendolo^2*M_wheel-l_wheel+l_pendolo);
96
97 %% Definizione dei gain per lo stato Omega
98
99 GainOmega_1 = (l_wheel*L_pendolo*M_wheel+l_wheel*L_c*M_pendolo)*g/(l_wheel*L_pendolo^2*M_wheel-l_wheel^2+l_pendolo*l_wheel );
100 GainOmega_2 = (L_pendolo^2*M_wheel+l_pendolo)/(l_wheel*L_pendolo^2*M_wheel-l_wheel^2+l_pendolo*l_wheel);
101 GainOmega_3 = l_wheel*eta_1/(l_wheel*L_pendolo^2*M_wheel-l_wheel^2+l_pendolo*l_wheel);
102 GainOmega_4 = (-L_pendolo^2*M_wheel-l_pendolo)*eta_2/(l_wheel*L_pendolo^2*M_wheel-l_wheel^2+l_pendolo*l_wheel);
103
104 %% Generazione delle matrici di stato
105 N_stati = 2;
106 N_input = 1;
107 N_output = 1;
108
109 Eq_point = 0;
110 Init_cond = [180/180*pi 0];
111
112 SwitchPoint = 150/180*pi;
113 SwitchError = 5e-1;
114
115 % Matrici di stato in posizone di equilibrio stabile
116 % x = [theta ,psi]
117 % u = [tau]
118 % y = [theta]
119 A = [0 1;
120      (L_pendolo*g*M_wheel+L_c*g*M_pendolo)/(L_pendolo^2*M_wheel-l_wheel+l_pendolo) 0];
121 B = [0;
122      -1/(L_pendolo^2*M_wheel-l_wheel+l_pendolo)];
123 C = [1 0 ];
124 D = zeros(N_output,N_input);
125
126 sys = ss(A,B,C,D);
127 sysCTRB = ctrb(sys);
128 sysOBSV = obsv(sys);
129
130 if rank(sysCTRB) ~= N_stati
131     error('Error: File: RWIP_MatlabModel.m Line: 83 Column: 9 \n%', 'The dynamic sistem sys is not controllable.');
132 end
133
134 if rank(sysOBSV) ~= N_stati
135
136     error('Error: File: RWIP_MatlabModel.m Line: 83 Column: 9 \n%', 'The dynamic sistem sys is not observable.');
137 end
138
139 %% Costruzione del controllore continuo per la stabilizzazione durante la fase di swing up
140
141 % Matrice Q dei pesi degli stati
142 Q = diag([1e4,1e2]);
143
144 % Matrice R dei pesi delle entrate
145 R = 1e16;
146
147 % LQR
148 [K_lqr,S,E] = lqr(sys.A,sys.B,Q,R);

```

```

149
150 %% Costruzione del controllore discreto per la stabilizzazione durante la fase di swing up
151
152 % Tempo di campionamento [s]
153 Ts = 10e-3;
154
155 % Sistema ed osservatore discreti
156 sys_d = c2d(sys,Ts);
157
158 % LQR
159 [K_dlqr,S_d,E_d] = dlqr(sys_d.A, sys_d.B, Q, R);
160
161 %% Ricerca poli del sistema e dell'osservatore per la stabilizzazione durante la fase di swing up
162
163 % Poli del sistema
164 sysPoles = E;
165 sysPolesReal= real(sysPoles);
166 sysPolesImag= imag(sysPoles);
167
168 % Frequenza naturale del sistema
169 [minPole,PolePosition] = min(sysPolesReal);
170 sysOmega_n = sqrt(sysPolesImag(PolePosition)^2 + sysPolesReal(PolePosition)^2);
171
172 % Fattore moltiplicativo per il piazzamento dei pol dell'osservatore
173 obsFactor = 4;
174
175 % Frequenza naturale dell'osservatore
176 obsOmega_n =obsFactor*sysOmega_n;
177
178 % Smorzamento dell'osservatore
179 obsXi = sqrt(2)/2;
180
181 % Definizione dei poli dell'osservatore
182 obsPoleX = -obsOmega_n*obsXi;
183 obsPoleY = obsOmega_n*sqrt(1-obsXi^2)*1i;
184 obsPoles = [-obsOmega_n-0*1i];
185
186 obsPoles_d = exp(obsPoles*Ts);
187
188 %% Costruzione dell'osservatore ridotto per la stabilizzazione durante la fase di swing up
189
190 [n_y,n] = size(C);
191 T = zeros(n-n_y,n);
192 T(1,2) = 1;
193 %T(2,3) = 1;
194
195 % Osservatore ridotto
196 obs = redobs(sys,T,obsPoles);
197 % Osservatore discreto
198 obs_d =c2d(obs,Ts);
199
200 %% Costruzione del controllore continuo per la stabilizzazione in posizione instabile
201
202 % Matrice Q dei pesi degli stati
203 Q_up = diag([1e3,1e-4]);
204
205 % Matrice R dei pesi delle entrate
206 R_up = 1e16;
207
208 % LQR
209 [K_lqr_up,S_up,E_up] = lqr(sys.A,sys.B,Q_up,R_up);
210
211 %% Ricerca poli del sistema e dell'osservatore per la stabilizzazione in posizione instabile
212
213 % Poli del sistema
214 sysPoles = E_up;
215 sysPolesReal= real(sysPoles);
216 sysPolesImag= imag(sysPoles);
217
218 % Frequenza naturale del sistema
219 [minPole,PolePosition] = min(sysPolesReal);
220 sysOmega_n = sqrt(sysPolesImag(PolePosition)^2 + sysPolesReal(PolePosition)^2);
221
222 % Fattore moltiplicativo per il piazzamento dei pol dell'osservatore
223 obsFactor = 4;

```

```
224 % Frequenza naturale dell 'osservatore
225 obsOmega_n =obsFactor*sysOmega_n;
227
228 % Smorzamento dell 'osservatore
229 obsXi = sqrt(2)/2;
230
231 % Definizione dei poli dell 'osservatore
232 obsPoleX = -obsOmega_n*obsXi;
233 obsPoleY = obsOmega_n*sqrt(1-obsXi^2)*1i ;
234 obsPoles = [-obsOmega_n-0*1i];
235
236 obsPoles_d = exp(obsPoles*Ts);
237
238 %% Costruzione dell 'osservatore ridotto per la stabilizzazione in posizione instabile
239
240 [n_y,n] = size(C);
241 T = zeros(n-n_y,n);
242 T(1,2) = 1;
243 %T(2,3) = 1;
244
245 % Osservatore ridotto
246 obs_up = redobs(sys,T,obsPoles);
247 % Osservatore discreto
248 obs_d_up =c2d(obs_up,Ts);
```

```

1  %%%
2  %-
3  %-
4  % Modellizzazione di un sistema RWIP (Reaction Wheel Inverted Pendulum) con controllo in posizione
5  % mediante controllore LQR (Linear Quadratic Regulator)
6  %-
7  %-
8  %
9  %-
10 %
11 % Corso: Tesi di diploma
12 % SUPSI DTI Manno 17.07.2019
13 % Autori: Martino Rinaldi
14 % Versione: 1.0
15 %
16 %
17
18 %% Inizializzazione Workspace
19 clc, clear, close all;
20
21 %% Definizione delle variabili
22
23 % Momento di inerzia del pendolo [kg mm^2]
24 I_pendolo = 101.809901237;
25 % Momento di inerzia del pendolo [kg m^2]
26 I_pendolo = I_pendolo*(1e-3)^2;
27
28 % Momento di inerzia del volano [kg mm^2]
29 I_wheel = 83.087523272;
30 % Momento di inerzia del volano [kg m^2]
31 I_wheel = I_wheel*(1e-3)^2;
32
33 % Massa del pendolo [kg]
34 M_pendolo = 0.222250177;
35
36 % Massa del contrappeso [kg]
37 M_contrappeso = 0.336658066;
38
39 % Massa del volano [kg]
40 M_wheel = 0.045900886;
41
42 % Lunghezza del pendolo [mm]
43 L_pendolo = 90;
44 % Lunghezza del pendolo [m]
45 L_pendolo = L_pendolo*1e-3;
46
47 % Distanza del centro di massa del pendolo dal punto di rotazione [mm]
48 L_c = 84.50703311;
49 % Distanza del centro di massa del pendolo dal punto di rotazione [m]
50 L_c = L_c * 1e-3;
51
52 % Distanza del centro di massa del contrappeso dal punto di rotazione [mm]
53 L_cp = 77.793145502;
54 % Distanza del centro di massa del contrappeso dal punto di rotazione [m]
55 L_cp = L_cp * 1e-3;
56
57 % Accelerazione gravitazionale [m/s^2]
58 g = 9.81;
59
60 % Coefficienti di attrito
61 eta_1 = 0;
62 eta_2 = 0;
63
64 % Frequenza naturale di oscillazione del pendolo fisico
65 T_natural = 2*pi*sqrt((I_pendolo+I_wheel+M_wheel*L_pendolo^2)/((M_pendolo+M_wheel)*g*L_c));
66 W_natural = 1/T_natural;
67
68 %% Calcolo della velocità di rotazione del volano per effettuare o swing-up
69 U = (L_c*M_pendolo+L_pendolo*M_wheel)*g;
70 omega_min = sqrt(2*U/I_wheel);
71 rpm_min = 60/(2*pi)*omega_min;
72 omegaThreshold = 1.2999*omega_min;
73
74 %% Definizione del segnale di input per la coppia motore (tau)

```

```

75
76 % Definizione del tempo di simulazione [s]
77 T_simulation = 1.8;
78 T_start = 0.1;
79 Time = (0:1e-3:T_simulation)';
80
81 % Definizione del valore di coppia forniti [Nm]
82 Tau_up = 0.050;
83 Tau_stop = 0.112;
84
85 % Definizione del tempo di accelerazione [s]
86 deltaT_1 = l_wheel*omegaThreshold/Tau_up;
87 deltaT_2 = l_wheel*omegaThreshold/Tau_stop;
88
89 % Definizione del segnale di coppia
90 Tau = zeros(length(Time),1);
91 temp =((Time>T_start & Time<=(T_start+deltaT_1)));
92 Tau(temp) = Tau_up;
93 temp =((Time>(T_start+deltaT_1) & Time<=(T_start+deltaT_1+deltaT_2)));
94 Tau(temp) = -Tau_stop;
95
96 signal = timeseries(Tau,Time);
97
98 %% Definizione dei gain per lo stato Psi
99
100 GainPsi_1 = (l_pendolo*M_wheel-l_c*M_pendolo+l_cp*M_contrappeso)*g/(l_pendolo^2*M_wheel-l_wheel+l_pendolo);
101 GainPsi_2 = -1/(l_pendolo^2*M_wheel-l_wheel+l_pendolo);
102 GainPsi_3 = -eta_1/(l_pendolo^2*M_wheel-l_wheel+l_pendolo);
103 GainPsi_4 = eta_2/(l_pendolo^2*M_wheel-l_wheel+l_pendolo);
104
105 %% Definizione dei gain per lo stato Omega
106
107 GainOmega_1 = -(l_pendolo*M_wheel-l_c*M_pendolo+l_cp*M_contrappeso)*g/(l_pendolo^2*M_wheel-l_wheel+l_pendolo);
108 GainOmega_2 = (l_pendolo^2*M_wheel+l_pendolo)/(l_wheel*l_pendolo^2*M_wheel-l_wheel^2+l_pendolo*l_wheel);
109 GainOmega_3 = l_wheel*eta_1/(l_wheel*l_pendolo^2*M_wheel-l_wheel^2+l_pendolo*l_wheel);
110 GainOmega_4 = (-l_pendolo^2*M_wheel-l_pendolo)*eta_2/(l_wheel*l_pendolo^2*M_wheel-l_wheel^2+l_pendolo*l_wheel);

```

E.2 Controllo RT

```

1  %%
2  %
3  %
4  % Modellazione di un sistema RWIP (Reaction Wheel Inverted Pendulum) con controllo in posizione
5  % mediante controllore LQR (linear Quadratic Regulator)
6  % Controllore LQR per un sistema linearizzato attorno al punto di equilibrio stabile
7  %
8  %
9  %
10 %
11 %
12 % Corso: Tesi di diploma
13 % SUPSI DTI Manno 26.06.2019
14 % Autori: Martino Rinaldi
15 % Versione: 1.2
16 %
17 %
18
19 %% Inizializzazione Workspace
20 clc, clear, close all;
21
22 %% Definizione delle variabili
23
24 % Momento di inerzia del pendolo [kg mm^2]
25 I_pendolo = 101.809901237;
26 % Momento di inerzia del pendolo [kg m^2]
27 I_pendolo = I_pendolo*(1e-3)^2;
28
29 % Momento di inerzia del volano [kg mm^2]
30 I_wheel = 83.087523272;
31 % Momento di inerzia del volano [kg m^2]
32 I_wheel = I_wheel*(1e-3)^2;
33
34 % Massa del pendolo [kg]
35 M_pendolo = 0.222250177;
36
37 % Massa del volano [kg]
38 M_wheel = 0.045900886;
39
40 % Lunghezza del pendolo [mm]
41 L_pendolo = 90;
42 % Lunghezza del pendolo [m]
43 L_pendolo = L_pendolo*1e-3;
44
45 % Distanza del centro di massa del pendolo dal punto di rotazione [mm]
46 L_c = 84.50703311;
47 % Distanza del centro di massa del pendolo dal punto di rotazione [m]
48 L_c = L_c * 1e-3;
49
50 % Accelerazione gravitazionale [m/s^2]
51 g = 9.81;
52
53 % Frequenza naturale di oscillazione del pendolo fisico
54 T_natural = 2*pi*sqrt((I_pendolo+I_wheel+M_wheel*L_pendolo^2)/((M_pendolo+M_wheel)*g*L_c));
55 W_natural = 1/T_natural;
56
57 Eq_point = 0;
58 Init_cond = [105/180*pi 0];
59
60 %% Generazione delle matrici di stato
61 N_stati = 2;
62 N_input = 1;
63 N_output = 1;
64
65 % Matrici di stato in posizione di equilibrio stabile
66 % x = [theta, psi]
67 % u = [tau]
68 % y = [theta]
69 A = [0 1;
70      -(L_pendolo*g*M_wheel+L_c*g*M_pendolo)/(L_pendolo^2*M_wheel-L_wheel+L_pendolo) 0];
71 B = [0;

```

```

72      -1/(L_pendolo^2*M_wheel-l_wheel+l_pendolo)];
73 C = [1 0];
74 D = zeros(N_output,N_input);
75
76 sys = ss(A,B,C,D);
77 sysCTRB = ctrb(sys);
78 sysOBSV = obsv(sys);
79
80 if rank(sysCTRB) ~= N_stati
81     error('Error: File: RWIP_MatlabModel.m Line: 83 Column: 9 \r\n', 'The dynamic sistem sys is not controllable.');
82 end
83
84 if rank(sysOBSV) ~= N_stati
85
86     error('Error: File: RWIP_MatlabModel.m Line: 83 Column: 9 \r\n', 'The dynamic sistem sys is not observable.');
87 end
88
89 % Costruzione del controllore continuo
90
91 % Matrice Q dei pesi degli stati
92 Q = diag([8e16,1e-3]);
93
94 % Matrice R dei pesi delle entrate
95 R = 7e7;
96
97 % LQR
98 [K_lqr,S,E] = lqr(sys.A,sys.B,Q,R);
99
100 %% Costruzione del controllore discreto
101
102 % Tempo di campionamento [s]
103 Ts = 10e-3;
104
105 % Sistema ed osservatore discreti
106 sys_d = c2d(sys,Ts);
107
108 % LQR
109 [K_dlqr,S_d,E_d] = dlqr(sys_d.A, sys_d.B, Q, R);
110
111 %% Ricerca poli del sistema e dell'osservatore
112
113 % Tempo di campionamento [s]
114 Ts = 10e-3;
115 % Poli del sistema
116 sysPoles = E;
117 sysPolesReal= real(sysPoles);
118 sysPolesImag= imag(sysPoles);
119
120 % Frequenza naturale del sistema
121 [minPole,PolePosition] = min(sysPolesReal);
122 sysOmega_n = sqrt(sysPolesImag(PolePosition)^2 + sysPolesReal(PolePosition)^2);
123
124 % Fattore moltiplicativo per il piazzamento dei pol dell'osservatore
125 obsFactor = 4;
126
127 % Frequenza naturale dell'osservatore
128 obsOmega_n = obsFactor*sysOmega_n;
129
130 % Smorzamento dell'osservatore
131 obsXi = sqrt(2)/2;
132
133 % Definizione dei poli dell'osservatore
134 obsPoleX = -obsOmega_n*obsXi;
135 obsPoleY = obsOmega_n*sqrt(1-obsXi^2)*i;
136 obsPoles = [-obsOmega_n-0*i];
137
138 obsPoles_d = exp(obsPoles*Ts);
139
140 %% Costruzione dell'osservatore ridotto
141
142 [n_y,n] = size(C);
143 T = zeros(n-n_y,n);
144 T(1,2) = 1;
145 %T(2,3) = 1;
146

```

```
147 % Osservatore ridotto  
148 obs = redobs(sys,T,obsPoles);  
149  
150 % Osservatore discreto  
151 obs_d =c2d(obs,Ts);  
152  
153 sys_ctr = ss(A-B*K_lqr ,B,C,D);  
154  
155 %% Forma compatta  
156  
157 ObsCtr = comp_form(sys_d,obs_d,K_dlqr);
```

```

1 %
2 %
3 % Modellazione di un sistema RWIP (Reaction Wheel Inverted Pendulum) con controllo in posizione
4 % mediante controllore LQR (linear Quadratic Regulator)
5 % Controllore LQR per un sistema linearizzato attorno al punto di equilibrio instabile
6 %
7 %
8 % Corso: Tesi di diploma
9 % SUPSI DTI Manno 31.07.2019
10 % Autori: Martino Rinaldi
11 % Versione: 2.0
12 %
13 %
14
15 %% Inizializzazione Workspace
16 clc, clear, close all;
17
18 %% Definizione delle variabili
19 % Momento di inerzia del pendolo [kg mm^2]
20 I_pendolo = 101.809901237;
21 % Momento di inerzia del pendolo [kg m^2]
22 I_pendolo = I_pendolo*(1e-3)^2;
23
24 % Momento di inerzia del volano [kg mm^2]
25 I_wheel = 83.087523272;
26 % Momento di inerzia del volano [kg m^2]
27 I_wheel = I_wheel*(1e-3)^2;
28
29 % Massa del pendolo [kg]
30 M_pendolo = 0.222250177;
31
32 % Massa del volano [kg]
33 M_wheel = 0.045900886;
34
35 % Lunghezza del pendolo [mm]
36 L_pendolo = 90;
37 % Lunghezza del pendolo [m]
38 L_pendolo = L_pendolo*1e-3;
39
40 % Distanza del centro di massa del pendolo dal punto di rotazione [mm]
41 L_c = 84.50703311;
42 % Distanza del centro di massa del pendolo dal punto di rotazione [m]
43 L_c = L_c * 1e-3;
44
45 % Accelerazione gravitazionale [m/s^2]
46 g = 9.81;
47
48 % Frequenza naturale di oscillazione del pendolo fisico
49 T_natural = 2*pi*sqrt((I_pendolo+I_wheel+M_wheel*L_pendolo^2)/((M_pendolo+M_wheel)*g*L_c));
50 W_natural = 1/T_natural;
51
52 Eq_point = 0;
53 Init_cond = [5/180*pi 4.5];
54
55 %% Generazione delle matrici di stato
56 N_stati = 2;
57 N_input = 1;
58 N_output = 1;
59
60 % Matrici di stato in posizione di equilibrio stabile
61 % x = [theta, psi]
62 % u = [tau]
63 % y = [theta]
64 A = [0 1;
       (L_pendolo*g*M_wheel+L_c*g*M_pendolo)/(L_pendolo^2*M_wheel-L_wheel+L_pendolo) 0];
65 B = [0;
       -1/(L_pendolo^2*M_wheel-L_wheel+L_pendolo)];
66 C = [1 0];
67 D = zeros(N_output,N_input);
68
69 sys = ss(A,B,C,D);
70 sysCTRB = ctrb(sys);
71 sysOBSV = obsv(sys);
72
73
74

```

```

75 if rank(sysCTR) ~= N_stati
76   error('Error: File: RWIP_MatlabModel.m Line: 83 Column: 9 \n%', 'The dynamic sistem sys is not controllable.');
77 end
78
79 if rank(sysOBS) ~= N_stati
80
81   error('Error: File: RWIP_MatlabModel.m Line: 83 Column: 9 \n%', 'The dynamic sistem sys is not observable.');
82 end
83
84 %% Costruzione del controllore continuo
85 % Matrice Q dei pesi degli stati
86 Q = diag([5e16,1e0]);
87
88 % Matrice R dei pesi delle entrate
89 R = 5e14;
90
91 % LQR
92 [K_lqr,S,E] = lqr(sys.A,sys.B,Q,R);
93
94 %% Costruzione del controllore discreto
95 % Tempo di campionamento [s]
96 Ts = 10e-3;
97
98 % Sistema ed osservatore discreti
99 sys_d = c2d(sys,Ts);
100
101 % LQR
102 [K_dlqr,S_d,E_d] = dlqr(sys_d.A, sys_d.B, Q, R);
103
104 %% Ricerca poli del sistema e dell'osservatore
105 % Tempo di campionamento [s]
106 Ts = 10e-3;
107 % Poli del sistema
108 sysPoles = E;
109 sysPolesReal= real(sysPoles);
110 sysPolesImag= imag(sysPoles);
111
112 % Frequenza naturale del sistema
113 [minPole,PolePosition] = min(sysPolesReal);
114 sysOmega_n = sqrt(sysPolesImag(PolePosition)^2 + sysPolesReal(PolePosition)^2);
115
116 % Fattore moltiplicativo per il piazzamento dei poli dell'osservatore
117 obsFactor = 4;
118
119 % Frequenza naturale dell'osservatore
120 obsOmega_n = obsFactor*sysOmega_n;
121
122 % Smorzamento dell'osservatore
123 obsXi = sqrt(2)/2;
124
125 % Definizione dei poli dell'osservatore
126 obsPoleX = -obsOmega_n*obsXi;
127 obsPoleY = obsOmega_n*sqrt(1-obsXi^2)*i;
128 obsPoles = [-obsOmega_n-0*i];
129
130 obsPoles_d = exp(obsPoles*Ts);
131
132 %% Costruzione dell'osservatore ridotto
133 [n_y,n] = size(C);
134 T = zeros(n-n_y,n);
135 T(1,2) = 1;
136 %T(2,3) = 1;
137
138 % Osservatore ridotto
139 obs = redobs(sys,T,obsPoles);
140
141 % Osservatore discreto
142 obs_d =c2d(obs,Ts);
143
144 sys_ctr = ss(A-B*K_lqr,B,C,D);
145
146 %% Forma compatta
147 ObsCtr = comp_form(sys_d,obs_d,K_dlqr);

```


Bibliografia

- [1] Marco Martinello. Controllo di un penolo inverso con volano.
- [2] Enrique Fernández Cara and Enrique Zuazua Iriondo. Control theory: History, mathematical achievements and perspectives. *Boletín de la Sociedad Española de Matemática Aplicada*, 26, 79–140., 2003.
- [3] Irmgrad Flugge-Lotz. Discontinuous automatic control, princeton univ, 1952.
- [4] James K. Roberge. The mechanical seal.
- [5] Kent H Lundberg and Taylor W Barton. History of inverted-pendulum systems. In *IFAC Proceedings Volumes*, volume 42, pages 131–135. Elsevier, 2010.
- [6] Mohanarajah Gajamohan, Michael Muehlebach, Tobias Widmer, and Raffaello D’Andrea. The cubli: A reaction wheel based 3d inverted pendulum. *IMU*, 2(2), 2013.
- [7] Manuel Olivares and P Albertos. Linear control of the flywheel inverted pendulum. *ISA Transactions*, 53:1396–1403, 09 2014.
- [8] Jonathan Sowman, Dina Shona Laila, and Stefano Longo. Real-time approximate explicit nonlinear model predictive control for the swing-up of a reaction wheel pendulum. In *2015 54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, pages 4308–4313. IEEE, 2015.
- [9] Gonzalo Belascuen and Nahuel Aguilar. Design, modeling and control of a reaction wheel balanced inverted pendulum. In *2018 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)*, pages 1–9. IEEE, 06 2018.