

**ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITA' DI BOLOGNA**

SECONDA FACOLTA' DI INGEGNERIA  
CON SEDE A CESENA

---

**CORSO DI LAUREA**  
**IN INGEGNERIA AEROSPAZIALE**

Classe 10

Sede di Forlì

ELABORATO FINALE DI LAUREA

In Fondamenti di Astronautica L

**PROGETTO PRELIMINARE E TEST DELL'ELETTRONICA DI CONTROLLO  
PER RUOTE DI MOMENTO/REAZIONE PER LA MISSIONE ALMASAT-EO**

**CANDIDATO**

Michele Taronna

**RELATORE**

Prof. Paolo Tortora

**CORRELATORI**

Ing. Alberto Corbelli

Ing. Fabio Antonini

Anno Accademico 2010/2011

Sessione III



# **INDICE**

<b>INDICE DELLE FIGURE</b> .....	<b>4</b>
<b>INDICE DELLE TABELLE</b> .....	<b>7</b>
<b>1. MISSIONE E RUOTA DI MOMENTO</b> .....	<b>9</b>
1.1 <b>LA MISSIONE ALMASat-EO</b> .....	9
1.1.1 <b>Scelta dell'orbita</b> .....	10
1.2 <b>ADCS E RUOTA DI MOMENTO</b> .....	11
1.2.1 <b>Ruota di momento</b> .....	14
1.2.2 <b>Ruota di reazione</b> .....	17
1.2.3 <b>Differenti tipologie di ruote di momento/reazione</b> .....	18
1.3 <b>DISTURBI</b> .....	19
1.3.1 <b>Attuatori</b> .....	20
1.3.2 <b>Sensori</b> .....	22
1.3.3 <b>Azionamenti</b> .....	23
1.3.4 <b>Materiali</b> .....	23
1.3.5 <b>Requisiti</b> .....	24
1.3.6 <b>Manovre</b> .....	26
1.4 <b>CONFIGURAZIONE FINALE</b> .....	27
1.5 <b>OBIETTIVI</b> .....	28
<b>2. ENCODER PER LETTURE DI VELOCITA'</b> .....	<b>31</b>
2.1 <b>IMPIEGO DI UN ENCODER</b> .....	31
2.1.1 <b>L'encoder nelle ruote di momento per il controllo d'assetto del micro satellite ALMASat-EO</b> .....	33

2.2	<i>L'ENCODER MAGNETICO E IL SUO FUNZIONAMENTO</i> .....	34
2.2.1	<i>Risultati</i> .....	35
2.2.2	<i>Realizzazione e componenti</i> .....	38
2.3	<i>L'ENCODER OTTICO E IL SUO FUNZIONAMENTO</i> .....	38
2.3.1	<i>Realizzazione e componenti</i> .....	39
2.3.2	<i>Risultati</i> .....	42
2.4	<i>CONFRONTO PRESTAZIONALE</i> .....	44
2.4.1	<i>Cenni sul set up per il test</i> .....	44
2.4.2	<i>Confronto prestazionale</i> .....	48
<b>3.</b>	<b><i>AZIONAMENTO ELETTRICO</i></b> .....	<b>51</b>
3.1	<i>IL MOTORE BRUSHLESS</i> .....	51
3.2	<i>AZIONAMENTO</i> .....	53
3.3	<i>CENNI SULLA COMPONENTISTICA DELL'AZIONAMENTO</i> .....	57
3.3.1	<i>Il microcontrollore</i> .....	57
3.3.2	<i>Il ponte half-bridge</i> .....	60
3.3.3	<i>La parzializzazione PWM</i> .....	60
3.3.4	<i>Lo stabilizzatore di tensione</i> .....	62
3.3.5	<i>Altri componenti</i> .....	62
3.4	<i>LE TECNICHE DI CONTROLLO DEL MOTORE BRUSHLESS</i> .....	64
3.4.1	<i>La tecnica di controllo trapezoidale</i> .....	64
<b>4.</b>	<b><i>AZIONAMENTO ELETTRICO</i></b> .....	<b>69</b>
4.1	<i>CENNI SUL FUNZIONAMENTO DEL SOFTWARE DI BORDO</i> .....	69
4.2	<i>I TEST EFFETTUATI</i> .....	70
4.2.1	<i>Determinazione della sequenza di chiusura dei mosfet</i> .....	71
4.2.2	<i>Analisi prestazionale del motore</i> .....	75

4.3	<i>IL CONTROLLORE PID</i> .....	77
4.4	<i>TEST PRESTAZIONALE</i> .....	80
<b>5.</b>	<b><i>SVILUPPI FUTURI</i></b> .....	<b>85</b>
5.1	<i>SVILUPPI FUTURI</i> .....	85
	<b><i>APPENDICE A</i></b>	
	<b><i>DATASHEET</i></b> .....	<b>93</b>
	<b><i>APPENDICE B</i></b>	
	<b><i>SCHEMATICI OrCAD</i></b> .....	<b>97</b>
	<b><i>BIBLIOGRAFIA</i></b> .....	<b>102</b>

# **INDICE DELLE FIGURE**

1.1 – ALMASat-1 .....	10
1.2 – Estratto del manuale tecnico del lanciatore VEGA .....	11
1.3 – Utilizzo delle ruote di momento .....	15
1.4 – Una <i>reaction wheel</i> utilizzata dalla NASA.....	18
1.5 – Sezione di un motore elettrico <i>brushless flat</i> .....	21
1.6 – Effetto della presenza della ruota di <i>pitch</i> sul momento angolare risultante..	27
2.1 – Encoder ottico .....	32
2.2 – Schema illustrativo del lavoro svolto.....	33
2.3 – Encoder magnetico realizzato .....	34
2.4– Schematico del circuito della scheda di lettura per encoder magnetico .....	35
2.5– Schema di montaggio del sensore magnetico .....	36
2.6– Scheda encoder magnetico.....	37
2.7– Scheda compatta encoder magnetico .....	37
2.8– Caratteristica <i>volt-rpm</i> con encoder magnetico .....	38
2.9– Funzionamento di un encoder ottico.....	39
2.10– Encoder ottico realizzato .....	39
2.11– Schematico del circuito della scheda di lettura per encoder ottico.....	40
2.12– Scheda encoder ottico .....	40
2.13– Scheda con diodo LED per encoder ottico .....	41
2.14– Andamento della risposta (volt) al variare della distanza.....	42
2.15– Particolare dei “pattini” realizzati per poter traslare la scheda.....	42
2.16– Caratteristica <i>volt-rpm</i> con encoder ottico.....	43
2.17– Ingombro interno e supporto motore (vista dall’alto).....	44
2.18– Ingombro interno e supporto motore (vista laterale) .....	45

2.19– Volume (vista in prospettiva) .....	46
2.20– Volume (lato ingresso della scheda) .....	46
2.21– Esploso del volume .....	47
2.22– Montaggio parziale .....	47
2.23– Montaggio completo (mancano motore e cavi di alimentazione).....	48
2.24– Velocità acquisite.....	49
3.1– Soluzione con magneti disposti sul rotore .....	52
3.2– Soluzione con magneti “annegati” nel rotore .....	52
3.3– Schema a blocchi azionamento .....	55
3.4– Azionamento realizzato .....	56
3.5– Azionamento realizzato (sono indicati i componenti principali).....	56
3.6– Microcontrollore ATMEGA 644 .....	59
3.7– Il ponte “ <i>half-bridge</i> ” .....	60
3.8– La parzializzazione PWM.....	61
3.9– Stabilizzatore di tensione LM 7805 .....	62
3.10– Andamento delle tensioni di fase.....	65
3.11– Sfasamento tra il campo magnetico statorico e quello rotorico.....	65
3.12– Stati logici dei sensori Hall nelle diverse posizioni del rotore .....	66
3.13– Stato logico “alto” dei tre sensori hall .....	67
4.1– Segnale costituente un’onda rettangolare, in evidenza il suo <i>duty cycle</i> .....	70
4.2– Tensioni di fase: convenzione adottata.....	71
4.3– Azionamento elementare realizzato (vista dall’alto) .....	72
4.4– Sequenza esatta di chiusura dei <i>mosfet</i> .....	74
4.5– Andamento dell’errore relativo percentuale ai diversi regimi di velocità .....	76
4.6– Analisi delle risposte a regime .....	77
4.7– Schema a blocchi del controllore PID .....	78
4.8– Comportamento della risposta al variare della costante proporzionale .....	80
4.9– Effetto dell’integrazione .....	81

4.10– Il contributo derivativo.....	81
4.11– Andamento della coppia in funzione del $K_p$ .....	82
4.12– Andamento della coppia in funzione del $K_i$ .....	83
4.13– Andamento della coppia in funzione del $K_d$ .....	84
4.14– LabView: interfaccia di lavoro.....	87
4.15– Esempio di schematico OrCAD .....	87
4.16– Area di lavoro del software SolidWorks .....	88



# **INDICE DELLE TABELLE**

2.1 – Caratteristiche magnetiche del sensore.....	36
2.2 – Caratteristiche elettriche del sensore .....	36
2.3 – Caratteristiche tecniche del sensore.....	36
3.1 – Andamento delle correnti in corrispondenza delle combinazioni di chiusura dei <i>mosfet</i> .....	64
3.2 – Stato logico dei sensori Hall in corrispondenza dei diversi settori.....	67
4.1 – Risposta dei sensori in corrispondenza delle diverse combinazioni di chiusura dei <i>mosfet</i> .....	73
4.2 – Risposte fornite dal motore in corrispondenza delle diverse velocità .....	75



# 1

## ***MISSIONE E RUOTA DI MOMENTO***

- 1.1 LA MISSIONE ALMASAT-EO*
- 1.2 ADCS E RUOTA DI MOMENTO*
- 1.3 DISTURBI*
- 1.4 CONFIGURAZIONE FINALE*
- 1.5 OBIETTIVI*

### ***1.1 La missione ALMASat-EO***

La missione ALMASat-EO è un progetto che nasce e prende forma all'interno del Laboratorio di Microsatelliti e Microsistemi spaziali della Seconda Facoltà di Ingegneria dell'Università di Bologna. Lo scopo del progetto è la realizzazione di una piattaforma satellitare *low-cost* per l'osservazione della Terra destinata ad applicazioni di controllo del clima, sorveglianza del territorio e più in generale ad eventi di particolare interesse. ALMASat-EO è l'evoluzione commerciale del progetto precedente denominato ALMASat-1. Il satellite conterrà al suo interno un payload ottico in grado di produrre immagini di una porzione del territorio sorvolato per una estensione di 150Km<sup>2</sup>. Le immagini ottenute verranno immagazzinate all'interno della memoria allo stato solido con cui il satellite è equipaggiato per essere successivamente inviate a terra ad ogni passaggio sulla zona in cui è collocata la stazione di ascolto, che per la missione inaugurale sarà AMGS, progettata e collocata all'interno del Laboratorio stesso. La necessità di cogliere istantanee del pianeta Terra tramite satellite richiede l'osservazione del territorio sottostante il satellite stesso sotto condizioni favorevoli di illuminazione, grazie alle quali è possibile ottenere immagini indicative e nitide della zona interessata. Sia l'hardware che il software che costituiscono il microsatellite in questione sono stati realizzati

sfruttando il know-how ampiamente disponibile sul mercato e sfruttando le conoscenze e l'esperienza acquisita nella realizzazione del satellite che ha dato via al progetto, ovvero ALMASat-1, tutto ciò per mantenere i costi totali alla portata delle piccole e medie imprese che vogliono investire nel campo spaziale, settore in crescente espansione. Il satellite infatti, per quanto detto rientra nella categoria di satelliti low cost.

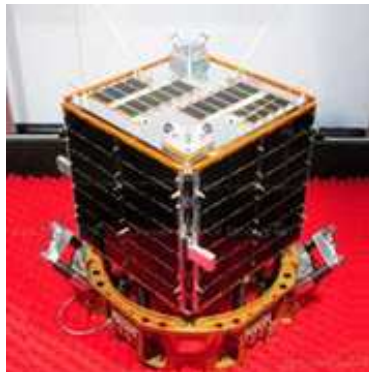


Fig. 1.1 - ALMASat-1 Fonte: [<http://www.ing2.unibo.it/>]

## ***1.1.1 Scelta dell'orbita***

Per questo tipo di missione risulta fondamentale che l'osservazione del territorio sottostante il satellite venga effettuata sotto condizioni favorevoli di illuminazione al fine di ottenere delle immagini di qualità ottimale. Per questo motivo si sono escluse le orbite equatoriali o comunque a bassa inclinazione, caratterizzate da prolungati periodi di eclissi durante i quali il satellite si trova nel cono d'ombra terrestre e conseguentemente nell'impossibilità di produrre immagini nel campo del visibile. Si è quindi optato per un'orbita elio-sincrona (*sun-synchronous*). Queste orbite presentano la proprietà di mantenere immutato l'angolo relativo tra la direzione di provenienza dei raggi solari e la traccia terra dell'orbita. Questo permette al satellite di incontrare sempre le stesse condizioni di illuminazione del territorio sorvolato. Ciò eliminerà la necessità di ricalibrare la strumentazione ottica in funzione del tempo di missione. Esistono due diversi tipi di orbita eliosincrona che differiscono per il valore

di un parametro, noto come “ascensione retta del nodo ascendente” (solitamente indicato con la lettera greca “ $\Omega$ ”) al variare della quale si ottengono diverse condizioni di illuminazione. Per  $\Omega=90^\circ$  si ottiene l'orbita *mezzogiorno-mezzanotte* mentre per  $\Omega=0^\circ$  si ha l'orbita *alba-tramonto*. In questo tipo di orbita il satellite viaggia lungo la linea del terminatore ossia la traccia a Terra e i raggi del Sole sono perpendicolari tra loro. In prossimità di tale orbita (10am-10pm) opererà ALMASat-EO ad una quota costantemente inferiore ai 1000Km che il che qualifica l'orbita stessa come bassa (LEO). E' possibile ricavare una descrizione più precisa dell'orbita tramite il manuale tecnico del vettore Vega scelto per il lancio, in cui si mostra che il lanciatore è in grado di immettere il satellite su un'orbita circolare con inclinazione pari a  $98^\circ$  ad una quota di 700 Km.

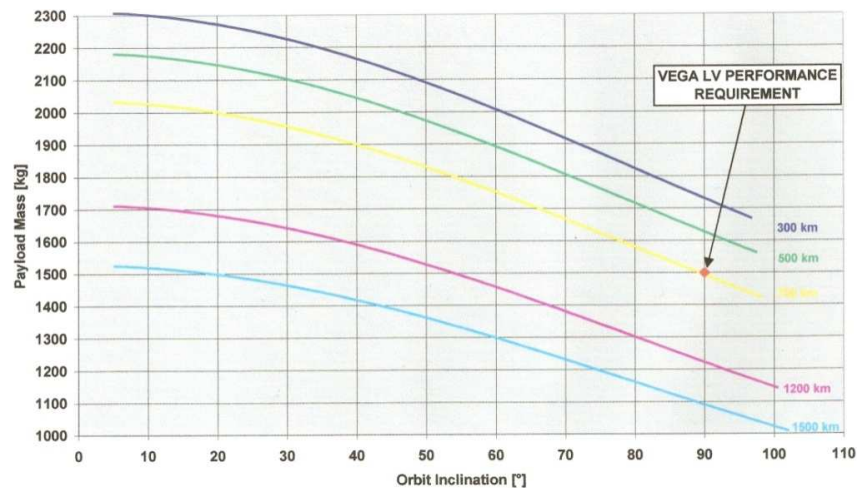


Fig. 1.2 - Estratto del manuale tecnico del lanciatore VEGA

## 1.2 ADCS e ruota di momento

Il sistema di determinazione e controllo d'assetto (ADCS) ha il compito sia di acquisire dati dall'ambiente esterno sulla posizione del satellite lungo l'orbita percorsa e il suo orientamento rispetto ad un sistema di riferimento prefissato, sia di agire per raggiungere e mantenere la condizione adeguata agli scopi della missione. Esso è strettamente collegato con gli altri sistemi di bordo, in particolare il sistema di propulsione, se presente, ed il sistema di navigazione. Si distinguono due principali filosofie di controllo d'assetto:

- Passivo: il satellite viene stabilizzato per mezzo delle coppie agenti dall'esterno, tipicamente il gradiente gravitazionale o il campo magnetico terrestre. Non consente un elevato grado di precisione.
- Attivo: il sistema agisce in maniera controllata manovrando gli attuatori a disposizione per ottenere e mantenere sempre l'assetto desiderato secondo opportuni algoritmi di controllo. Consente di raggiungere gli elevati livelli di precisione necessari per l'osservazione satellitare e per questo motivo è stato adottato nella missione di ALMASat-EO.

Generalmente, si distinguono all'interno del sottosistema tre componenti principali:

- Sensori
- Elettronica di elaborazione
- Attuatori

La parte di *sensing* dell'ADCS ha il compito di acquisire dall'esterno i dati necessari a ricostruire la posizione del satellite all'interno del sistema di riferimento fissato a partire dalla misura di grandezze interessanti o dall'osservazione di corpi celesti particolarmente rilevanti. In letteratura è possibile distinguere i sensori attualmente reperibili sul mercato secondo quanto segue:

- Sensori di Sole (*Sun sensors*): costituiti principalmente da obiettivi ottici dotati di filtro per l'esposizione alle radiazioni solari, sono in grado di determinare l'angolo di incidenza dei raggi (e quindi la direzione del Sole) rispetto ad un proprio asse di riferimento (generalmente, la verticale alla superficie di fissaggio). Rappresentano la tipologia più diffusa di sensori per la loro versatilità e facilità relativa di impiego.
- Sensori di Terra (*Earth sensors o Horizon sensors*): analogamente ai sensori di Sole, sfruttano l'albedo terrestre o il contrasto tra Terra e spazio

profondo all'orizzonte per ricostruire parte dell'assetto del satellite. Sono meno flessibili dal punto di vista dell'impiego in missione ma comunque affidabili.

- **Sensori di Stelle (Star sensors):** sempre basati sull'osservazione di corpi celesti, sfruttano la possibilità di comparare la visione del cielo antistante con un database di immagini referenziate per ricostruire l'inclinazione del satellite rispetto al loro asse di riferimento, nonché la rotazione attorno lo stesso.
- **Giroscopi (Gyros):** dotati al loro interno di una massa posta in rotazione, possono determinare gli scostamenti del loro asse di riferimento rispetto alla posizione nominale grazie all'accoppiamento giroscopico tra il momento angolare immagazzinato dalla massa e quello generato dalle coppie esterne di disturbo.
- **Magnetometri (Magnetometers):** semplici e relativamente compatti, sono in grado di determinare posizione e assetto del satellite tramite misure del campo magnetico terrestre all'interno del quale sono immersi, per quote dove quest'ultimo non risulta trascurabile.

Per quanto riguarda gli attuatori per sistemi a controllo d'assetto attivo, è possibile definire famiglie di appartenenza a seconda sia del tipo di energia impiegata per il controllo sia dell'efficacia di puntamento. Principalmente, le tipologie descritte in letteratura sono le seguenti:

- **Ruote di momento/reaione (Momentum/Reaction Wheels):** costituite da masse poste in rotazione per mezzo generalmente di motori elettrici, rispondono alle coppie di disturbo esterne accelerando o decelerando opportunamente, sfruttando il principio di conservazione del momento angolare.
- **Bobine magnetiche (Magnetic Coils):** attuatori caratterizzati dalla minore complessità tecnologica, sono costituiti da avvolgimenti metallici conduttivi

percorsi da corrente, in grado di interagire quindi con il campo magnetico terrestre in cui il satellite è immerso. Soffrono di ovvie limitazioni a causa proprio della necessità della presenza di un campo magnetico per il controllo.

- Propulsione a getto (thrusters): distinti dal tipo e dalle caratteristiche fisiche dell'elemento espulso e dalle dimensioni degli ugelli, permettono diversi tipi di spinta e di manovra sfruttando il principio di azione e reazione in assenza di gravità. Sono affetti da limitazioni dovute alla massima capacità e al peso dei serbatoi di propellente imbarcati.

Dopo questa breve presentazione sulle varie tecniche di determinazione e controllo d'assetto di un satellite, propedeutiche per la comprensione delle considerazioni fatte nei capitoli successivi, si esamina la prima tipologia di attuatori di cui si è parlato nel presente capitolo: le ruote di momento e di reazione, alle quali si riferisce il lavoro di progettazione dell'azionamento presentato in questo elaborato.

### ***1.2.1 Ruota di momento***

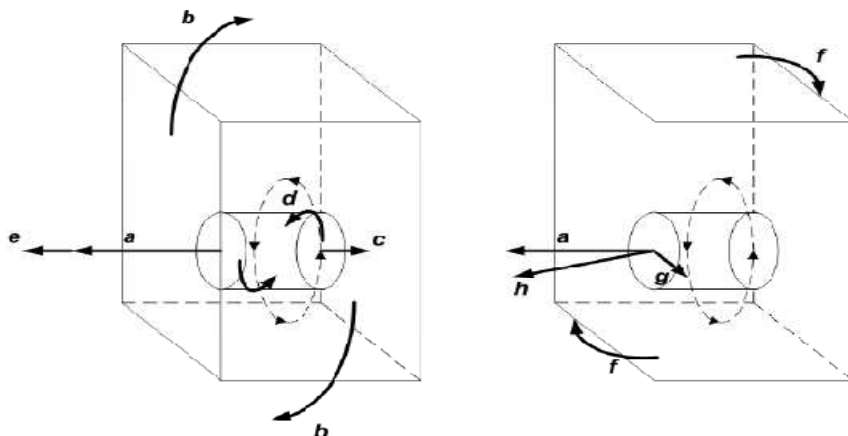
Una ruota di momento è un dispositivo meccanico munito al suo interno di un volano posto in rotazione generalmente da un motore elettrico a velocità angolare nominale  $\vec{\omega}$ . Per effetto di tale rotazione, detto  $I$  il momento di inerzia del volano, l'intero dispositivo è in grado di accumulare una quantità di momento angolare  $\vec{K}$  nella direzione dell'asse di rotazione definita dalla relazione:

$$\vec{K} = I\vec{\omega}$$

Grazie quindi a tale grandezza immagazzinata il sistema a bordo del quale è imbarcata la ruota di momento viene ad essere maggiormente resistente alle coppie di disturbo esterne, effetto che viene ad essere definito come rigidità giroscopica. Le coppie di disturbo intervengono infatti a conferire



al satellite una velocità di rotazione indesiderata fuori dall'asse di rotazione della ruota di momento, generando quindi una seconda componente di momento angolare che andrà a combinarsi vettorialmente con quella principale. La conoscenza delle coppie esterne di disturbo è quindi necessaria per il dimensionamento di una ruota di momento: qualora infatti il momento angolare immagazzinato dalla ruota sia di ordini di grandezza superiore rispetto a quello introdotto dai disturbi, questa seconda componente diventa trascurabile, mantenendo così praticamente invariato l'assetto del satellite. E' importante sottolineare inoltre che per effetto della combinazione vettoriale dei momenti angolari il satellite dotato di rigidità giroscopica e soggetto ad una coppia di disturbo risulterà perturbato nel piano perpendicolare a quello individuato dai vettori, come se fosse stato soggetto ad una coppia di disturbo ortogonale alla precedente in assenza della ruota di momento. Tale effetto prende il nome di effetto giroscopico. L'utilizzo della ruota di momento permette, oltre a fissare un asse inerziale del satellite, di controllarne l'assetto attorno ad esso. Tale controllo è possibile alterando opportunamente la velocità di rotazione della ruota, in maniera da contrastare le variazioni del momento angolare dovute all'azione delle coppie di disturbo qualora queste si trovassero ad agire esattamente in direzione concorde ad esso, sempre sfruttando il principio di conservazione del momento angolare.



**Fig. 1.3 - Utilizzo delle ruote di momento: a) momento angolare nominale, b) disturbo lungo *pitch*, c) momento angolare generato, d) accelerazione ruota, e) momento angolare equilibrante, f) disturbo lungo *roll*, g) momento angolare generato, h) momento angolare risultante**

E' noto infatti come una coppia agente dall'esterno sul sistema causi una variazione del momento angolare:

$$\frac{d\vec{K}}{dt} = M_{\text{est}}$$

Qualora, inoltre, tali coppie esterne si trovassero ad agire costantemente nella stessa direzione e verso, la ruota di momento potrebbe raggiungere velocità di rotazione eccessivamente alta, oltre le prestazioni del motore elettrico che movimentata il volano, o eccessivamente bassa, condizione per la quale il satellite verrebbe a perdere la rigidità giroscopica richiesta.

Allo scopo di ovviare a tale problema si ricorre ad una procedura denominata "desaturazione" al termine della quale la ruota torna ad operare alla velocità di regime, riacquisendo la capacità di assorbire i disturbi esterni. Tale procedura prevede che venga fornita al satellite, tramite attuatori come bobine magnetiche o micro thrusters, una coppia avente lo stesso verso di quello del momento angolare immagazzinato dalla ruota: così facendo la ruota di momento comincerà a ruotare in senso inverso contrastando in tal modo il "disturbo" e riportando il momento angolare ad un valore nominale. Proprio per le capacità di utilizzo fornite dalla ruota di momento, essa rientra nella categoria degli attuatori impiegati nelle missioni per le quali è richiesta una notevole precisione di puntamento di un determinato asse rispetto al sistema di riferimento inerziale, quali quelle di osservazione della Terra o di telecomunicazione, dove sono presenti dispositivi ottici o antenne che richiedano il puntamento costante a terra, o le cosiddette *Sun-pointing*, dove è richiesta una faccia del satellite sempre rivolta verso il Sole. Il controllo di assetto che si ottiene tramite l'impiego di una ruota di momento è spesso definito, salvo qualche eccezione, *stabilizzato a tre assi*, e viene realizzato anche grazie all'utilizzo di attuatori secondari per il puntamento fine e la desaturazione della ruota, quali bobine magnetiche e *thruster*.

### 1.2.2 Ruota di reazione

Una ruota di reazione può essere vista come una ruota di momento con velocità nominale nulla. Le ruote di reazione non sono infatti realizzate per conferire rigidità giroscopica al satellite ma per rispondere solamente alle coppie di disturbo agenti in direzione del proprio asse di rotazione, ferma restando l'architettura precedentemente descritta in maniera schematica.

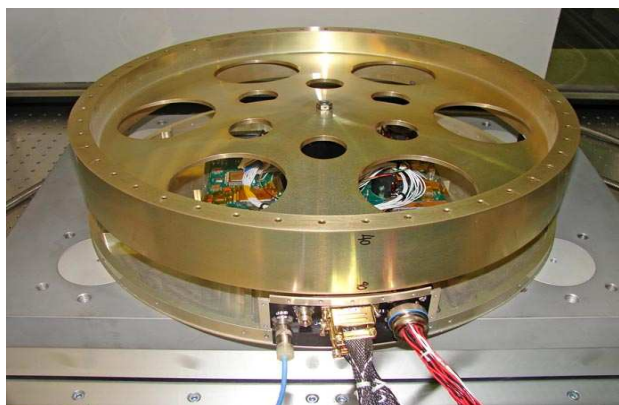
Data la possibilità di poter rispondere solo ai disturbi agenti secondo un'unica direzione, spesso vengono utilizzate più ruote di reazione contemporaneamente, orientate secondo gli assi corpo del satellite: tale disposizione permette di poter rispondere ad ogni genere di perturbazione proveniente dall'esterno semplicemente accendendo in direzione opportuna la ruota corrispondente. A differenza quindi delle ruote di momento, le cui velocità vengono controllate attorno ad una velocità nominale non nulla, è previsto che ogni ruota di reazione possa ruotare in entrambi i sensi, a seconda del verso del disturbo agente. Ad accomunare invece le due tipologie di ruote è invece la presenza, anche per le ruote di momento, di una velocità di desaturazione fissata: in tal caso infatti, l'accumulo di un eccessivo ammontare di momento angolare da parte della ruota si traduce immediatamente in un'eccessiva rigidità giroscopica del satellite attorno all'asse della ruota stessa e quindi alla perdita della controllabilità dell'assetto attorno ai rimanenti due assi. Anche per missioni quindi con tre o più ruote di momento risulta necessaria l'installazione a bordo di attuatori secondari per le manovre di desaturazione. Come già intravisto, si tende inoltre a considerare configurazioni con più di tre ruote di reazione, al fine di garantire la ridondanza degli attuatori, necessaria al preservamento della missione in caso di *failure* di una di esse: tali configurazioni prevedono in genere una disposizione *a piramide* delle ruote, garantendo alla quarta ruota la possibilità di poter intervenire con un contributo utile lungo ogni asse del sistema di riferimento corpo. In genere inoltre è possibile distinguere tra due tipi di ridondanza, a seconda dello stato di attivazione delle ruote di riserva: si parla di ridondanza *fredda* se la quarta ruota viene attivata solamente in occasione della *failure* all'interno del sistema. Si parla invece di ridondanza *calda* se la quarta ruota è messa in rotazione a velocità minima o superiore durante la fase di funzionamento ottimale e solamente manovrata alla

velocità richiesta in caso di *failure* insorta. La seconda soluzione, in particolare, sebbene porti ad una riduzione della vita operativa anche della ruota di riserva, è favorevole all'accensione a causa della diminuzione di correzioni necessarie per riportare il sistema vicino alla condizione nominale a seguito della *failure*.

### ***1.2.3 Differenti tipologie di ruote di momento/reazione***

I dispositivi ad immagazzinamento di momento angolare, altro modo per definire le ruote di momento o di reazione, si differenziano principalmente per il meccanismo di movimentazione del volano al loro interno. L'attuazione del moto di rotazione può avvenire principalmente in due metodi, con motori elettrici o con avvolgimenti magnetici:

- Attuazione tramite motore elettrico: in tale tipologia di ruota viene generalmente sfruttato lo spazio all'interno del volano come alloggiamento del motore elettrico, alimentato e comandato dall'elettronica dell'ADCS. E' necessario inoltre garantire il corretto allineamento assiale ed il fissaggio degli alberi rispettivamente di volano e motore, per cui si rende indispensabile l'introduzione di giunti con gioco sufficiente a garantire la corretta rotazione delle parti. Di semplice realizzazione e di immediato utilizzo, le ruote di momento a motore elettrico permettono bassi consumi e ridotti costi progettuali, a fronte però di coppie d'attrito più alte per l'elevato numero di elementi in rotazione.



**Fig. 1.4 - Una reaction wheel utilizzata dalla NASA. Fonte: [<http://www.nasa.gov>]**

- Attuazione tramite avvolgimenti magnetici: le ruote di momento/reazione movimentate per mezzo di avvolgimenti magnetici sono realizzate secondo la filosofia realizzativa utilizzata per i rotori dei motori elettrici. All'interno del volano è infatti collocata una serie continua di magneti permanenti i quali subiscono l'effetto della forza elettromotrice generata dagli avvolgimenti presenti attorno ad essi sul case esterno della ruota. Questo secondo tipo di ruota garantisce un drastico abbattimento degli attriti interni, a scapito di un notevole aumento sia della complessità tecnologica che dei consumi. Sono ritrovabili sul mercato, per il tipo di attuazione, principalmente ruote di momento ad avvolgimenti magnetici, date le scarse prestazioni di questo tipo di attuazione a velocità prossime allo zero. La scelta tra le diverse soluzioni tecnologiche è dettata principalmente dalla disponibilità di risorse in termini sia di *power budget* della missione sia dal grado di precisione richiesta. Generalmente, a bordo di piccoli e medi satelliti vengono preferite ruote a motore elettrico, in quanto è imperativo minimizzare peso, costo e consumi degli attuatori per l'ADCS; allo stesso modo si è scelta questa tipologia per la progettazione delle ruote di momento presentate all'interno di questo lavoro. Tutte le considerazioni di seguito riportate, nonché le soluzioni applicate hanno avuto come punto di partenza progettuale l'utilizzo di motori elettrici.

### ***1.3 Disturbi***

I principali disturbi agenti sul satellite lungo l'orbita sono prevalentemente di natura *ambientale* e si manifestano con l'azione delle seguenti coppie:

- Coppia da radiazione solare: è dovuta alla pressione esercitata dalla radiazione solare sulla faccia esposta al Sole. Agisce sempre in direzione ortogonale alla direzione di incidenza dei raggi solari e a qualsiasi quota. L'orbita *alba-tramonto*, è affetta massimamente dall'influenza della coppia di disturbo dovuta alla pressione solare, che per tutta il periodo orbitale incide sulla faccia esposta al Sole, causando un moto di rotazione, se non controllata, attorno all'asse di *roll*.

- Coppia da gradiente di gravità: è generata dall'azione differenziale della gravità terrestre sulle diverse parti del satellite, è particolarmente presente nelle orbite LEO. Agisce attorno ad uno qualsiasi degli assi del corpo in base alla matrice d'inerzia e con verso variabile.
- Coppia dovuta al campo magnetico: particolarmente intensa per le orbite LEO. E' dovuta all'interazione tra il dipolo residuo di bordo, generato dai componenti elettrici di bordo, ed il campo magnetico terrestre. La scelta dell'inclinazione dell'orbita non influenza la missione, a parità di quota media, dal punto di vista dei disturbi dovuti al campo magnetico terrestre, essendo quest'ultimo più o meno uniformemente presente attorno alla Terra.
- Coppia aerodinamica: si genera per l'attrito tra la superficie bagnata del satellite e l'atmosfera terrestre durante il moto. Per le orbite LEO è la più rilevante, in quanto nonostante la rarefazione, la presenza dell'atmosfera non è trascurabile. Il drag atmosferico agisce sempre in direzione opposta al vettore velocità e toglie energia all'orbita anticipando il rientro in atmosfera per via della conseguente riduzione continua del semiasse maggiore dell'orbita.

### ***1.3.1 Attuatori***

I motori elettrici utilizzabili per la movimentazione del volano si distinguono a seconda della tecnologia con cui viene ottenuta la generazione della coppia elettromotrice all'interno dell'attuatore. Spaziando brevemente tra le varie tipologie, possono essere individuate due grandi famiglie:

- Motori con spazzole (*brushed*): all'interno dei quali il rotore è dotato di avvolgimenti al pari dello statore e la commutazione è ottenuta mediante l'utilizzo di contatti striscianti (spazzole). I motori con spazzole presentano un buono spunto all'avvio, adatto alla realizzazione ad esempio di ruote di reazione, ma soffrono dell'usura delle spazzole, che ne compromette in maniera rilevante la vita operativa, rendendone impossibile l'impiego in missioni di lunga durata.

- Motori senza spazzole (*brushless*): a differenza dei precedenti il rotore è munito di magneti permanenti e la commutazione degli avvolgimenti è realizzata elettronicamente sullo statore, eliminando quindi ogni contatto tra le due parti. Sebbene presentino costanti di coppia più basse ed un minor spunto all'avvio, i motori *brushless* sono soggetti solamente all'usura dei cuscinetti al loro interno, permettendo così di raggiungere una vita operativa decisamente maggiore rispetto agli equivalenti con spazzole.

I motori *brushless* hanno inoltre la possibilità di essere alimentati, a seconda della tecnica realizzativa, in corrente continua o alternata, influenzando quindi in parte l'elettronica di controllo del sistema ADCS.



Fig. 1.5 - Sezione di un motore elettrico brushless *flat*. Fonte: [Maxon Motors]

Nel presente lavoro sono stati preferiti motori brushless proprio per la loro maggiore longevità, prevedendo una vita operativa per la missione in oggetto minima di tre anni con un funzionamento continuo degli attuatori, fattore che rende impossibile l'utilizzo in sicurezza di motori con spazzole.

## 1.3.2 Sensori

Come precedentemente illustrato, sia le ruote di momento che di reazione agiscono in risposta alle coppie di disturbo esterne annullando le conseguenti variazioni del momento angolare totale del satellite. Data l'elevata precisione di puntamento richiesta per certe particolari missioni, quali quelle ad esempio di osservazione della Terra, è necessario conoscere con buona precisione la velocità di rotazione del volano per mezzo di uno strumento di *sensing* adeguato.

I sensori sono spesso connessi direttamente senza l'interposizione di giunti all'albero motore, per evitare l'insorgere di movimenti vibrazionali che potrebbero influenzare la misura. I sensori più comunemente utilizzati sono ancora una volta i seguenti:

- Sensori ad effetto Hall: maggiormente diffusi nel campo dell'industria dei motori elettrici per la possibilità di utilizzo sia come strumento di *sensing* della velocità sia come strumento di controllo per la commutazione degli avvolgimenti (per motori *brushless*). Sono costituiti da tre magneti posti sullo statore del motore ed uno unico solidale all'albero motore, fornendo così in uscita un'onda quadra di tre impulsi al giro dalla cui frequenza è possibile ricostruire la velocità di rotazione. Possono fornire solamente misure di velocità.
- *Encoder/Resolver*: sono sensori dall'ingombro leggermente superiore in quanto contengono al loro interno diverse tipologie di trasduttori per convertire il dato di velocità in ingresso in un segnale (digitale) elaborabile dalla strumentazione di bordo. Si dividono a loro volta in:
  - Ottici, se viene utilizzato un disco forato interposto tra una sorgente luminosa e un light detector per la determinazione della velocità di rotazione;
  - Magneto-resistivi, se, analogamente a quanto avviene nei sensori ad effetto Hall, vengono sfruttata l'eccitazione di avvolgimenti in sequenza per la produzione del segnale in uscita.

Entrambe le soluzioni possono essere utilizzate sia per *sensing* di posizione che di velocità. Per brevità di trattazione sono state considerate in questo



caso solamente le tipologie di sensori comunemente utilizzate in ambito spaziale e di cui fosse già stata dimostrata l'affidabilità in missione.

### ***1.3.3 Azionamenti***

Data la necessità di alimentare in maniera autonoma ogni ruota di momento/ reazione e di provvedere, nel caso dei motori *brushless*, alla corretta commutazione della tensione sugli avvolgimenti, si rende necessario l'impiego di particolari dispositivi elettronici che governino tali funzioni e che prendono comunemente il nome di azionamenti. Tali strumenti saranno oggetto di studio di questo elaborato nei capitoli che seguono.

### ***1.3.4 Materiali***

La necessità di ridurre il peso dell'intera struttura del satellite e di conseguenza il costo di lancio, comporta la scelta adeguata dei materiali da utilizzare per la realizzazione delle singole componenti dei diversi sottosistemi. La selezione del materiale più corretto viene fatta tramite compromessi tra le caratteristiche meccaniche dello stesso ed il suo peso allo scopo di non sovradimensionare eccessivamente l'attuatore, con il rischio di mettere in orbita massa inutile. Nel caso delle ruote di momento/ reazione si distinguono in genere tre elementi principali su cui è possibile operare al fine di minimizzare il peso complessivo: motore, volano e case esterno. Il motore elettrico è realizzato quasi sempre in acciaio e alluminio al fine di conferire la massima robustezza alle condizioni di utilizzo estreme, con un peso complessivo che può variare da qualche decina di grammi al chilogrammo. Su richiesta del committente è però possibile negli ultimi anni l'impiego di materiali ceramici per le componenti di trasmissione del moto (alberi ed ingranaggi, se presenti riduttori), che vanno a diminuire, a parità di resistenza, il peso complessivo. Per quanto riguarda il volano ed il case è necessario considerare i requisiti dimensionali previsti per la ruota di momento/ reazione: dovendo essere dotato di notevole inerzia rispetto al resto delle componenti, sarebbe preferibile sviluppare il

volano in senso radiale, minimizzando quindi il materiale di costruzione. Si utilizzano quindi metalli pesanti e duttili come l'acciaio e altre leghe di pari peso specifico riducendo quindi le dimensioni dell'attuatore. Il contenitore del volano è invece realizzato in alluminio o leghe leggere, rimandando a rinforzi e nervature il compito di resistere alle sollecitazioni del lancio senza deformazioni, conservando quindi la condizione di coassialità degli elementi in movimento riducendo però il peso. Sono state di recente realizzate ruote di momento/azione in materiale plastico o composito, solamente però per missioni dove non è richiesto l'immagazzinamento di un elevato momento angolare, mantenendo quindi contenute le dimensioni dei volani.

### ***1.3.5 Requisiti***

I requisiti di per il sistema ADCS per una missione per l'osservazione della Terra vengono dettati principalmente dalle caratteristiche del payload ottico imbarcato e dal tipo di immagini che si desidera ottenere. Nel caso di ALMASat-EO la camera per l'acquisizione delle immagini, progettata sempre all'interno del Laboratorio di Microsatelliti della Seconda Facoltà di Ingegneria, ha la possibilità di poter fare osservazioni *multi-spettrali* (esplorando quindi diverse lunghezze d'onda oltre la radiazione visibile) e *multi-angolo* (utili ad esempio per la realizzazione di modelli 3D delle zone osservate). Per entrambe le applicazioni è richiesta, nonostante una modesta possibilità di correzione a terra via *software*, un'elevata precisione di puntamento del satellite, non essendo previsto alcun sistema di aggiustamento dell'assetto della camera all'interno del satellite. Per questioni di contenimento dei costi la camera verrà rigidamente fissata all'interno della struttura del satellite, con l'obiettivo diretto secondo ovviamente la verticale terrestre (direzione di *yaw* in assi corpo). La necessità di realizzare osservazioni di tipo *multi-angle* impone come requisito aggiuntivo la capacità di manovrare in maniera stabile l'asse di *yaw* del satellite in posizione *off-nadir*, fuori cioè dalla verticale locale, senza l'insorgenza di moti aggiuntivi oscillatori di nutazione. L'angolo desiderato di puntamento rispetto allo *nadir* deve essere raggiunto in un lasso di tempo ridotto, introducendo quindi anche la possibilità di operare l'inseguimento di un determinato *target* che si presenti durante l'orbita del

satellite. Tale capacità di manovra prende il nome di *agility* del sistema ed è un parametro importante nelle missioni di osservazione della Terra. Per la missione di ALMASat-EO sono imposti un angolo *off-nadir* fuori cioè dalla verticale locale, senza l'insorgenza di moti aggiuntivi oscillatori di nutazione. L'angolo desiderato di puntamento rispetto allo *nadir* deve essere raggiunto in un lasso di tempo ridotto, introducendo quindi anche la possibilità di operare l'inseguimento di un determinato *target* che si presenti durante l'orbita del satellite. Tale capacità di manovra prende il nome di *agility* sistema ed è un parametro importante nelle missioni di osservazione della Terra. Per la missione di ALMASat-EO sono imposti un angolo *off-nadir* di  $10^\circ$  possibilità di osservare *target* fuori dalla verticale di un angolo pari a  $15,55^\circ$ , pari ai  $10^\circ$  di manovra più la metà dell'angolo di visuale dell'obiettivo della camera. Il tempo invece per l'acquisizione di tale angolo a regime è invece richiesto non superiore ai 100s, comprensivi del tempo di assestamento del controllo.

Allo scopo di aumentare la flessibilità del sistema alle diverse missioni, si è deciso inoltre di progettare l'intero allestimento in maniera da poter essere utilizzato in differenti configurazioni:

- Una ruota di momento e due di reazione, configurazione molto robusta in assetto nominale, dove la maggior correzione è dovuta alla risposta alla coppia aerodinamica.
- Tre ruote di reazione, configurazione che permette una maggiore manovrabilità per l'assenza di un momento angolare di *bias*, utile quindi per compiere rotazioni *off-nadir* dell'asse di *yaw*.

La quarta ruota di riserva dovrà di conseguenza essere progettata con la possibilità di poter essere utilizzata sia come ruota di momento sia di reazione a seconda dell'attuatore da rimpiazzare. Per evitare la saturazione del controllo si dovrà inoltre trattare di ridondanza *fredda*, prevedendo quindi l'accensione della quarta ruota solo in caso di *failure*. La posizione relativa delle quattro ruote non è dipesa solamente dal volume a

disposizione all'interno del satellite, ma anche dalla distribuzione del momento angolare globalmente accumulato dalle ruote in condizione nominale e in condizione di *failure*, nel tentativo di massimizzare l'efficacia delle ruota ridondante al momento dell'accensione.

### **1.3.6 Manovre**

Per il dimensionamento degli attuatori è stato necessario prevedere quali manovre dovranno essere compiute per orientare il satellite al di fuori del proprio piano longitudinale. La manovra è vista, ai fini del controllo, come un disturbo rispetto alla condizione nominale imposto dall'interno del sistema a differenza delle coppie ambientali, per definizione provenienti dall'esterno. A sua volta, il controllo d'assetto agirà per conseguire tali manovre tramite un'opportuna azione delle ruote di reazione. In precedenza sono state valutate due possibilità distinte di utilizzo per il sistema a tre ruote di momento/reazione, a seconda del comportamento della ruota collocata lungo l'asse di *pitch*. Qualora infatti il sistema fosse portato a funzionare con un momento angolare di *bias* accumulato dalla ruota stessa (prima soluzione), l'azione delle ruote di reazione rimanenti dovrà essere più intensa per effetto dell'accoppiamento giroscopico. A differenza infatti della condizione a tre ruote di reazione, dove la manovra attorno ad un singolo asse può essere effettuata semplicemente controllando la velocità del rispettivo attuatore, in presenza di un momento angolare sulla ruota di *pitch* sarà necessario secondo una filosofia differente. Come mostrato infatti nelle figure successive, per manovrare attorno ad un asse dovrà essere attivata la ruota posta ortogonalmente sia al piano individuato dall'asse di *pitch* e dall'asse di manovra.

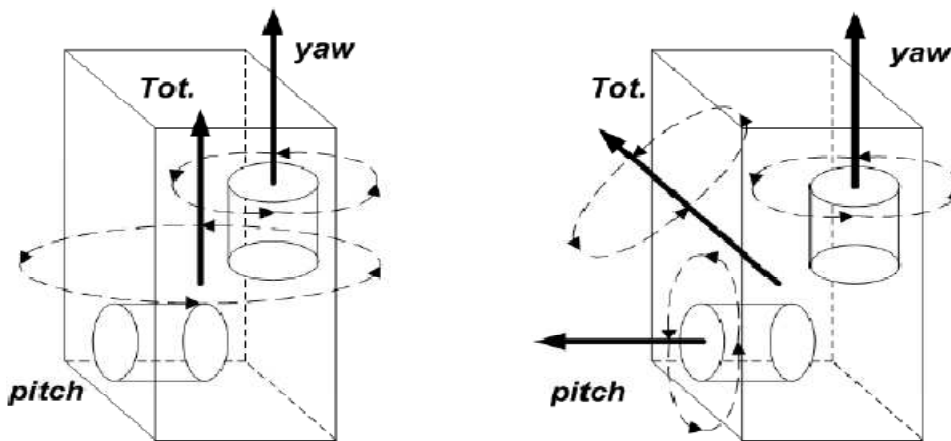


Fig. 1.6 - Effetto della presenza della ruota di *pitch* sul momento angolare risultante

Per semplicità di trattazione, vengono per ora trascurati gli effetti di nutazione dovuti alle coppie giroscopiche, per i quali sarà compito del sistema di controllo provvedere allo smorzamento agendo opportunamente sulla terza ruota non coinvolta in manovra o sulle bobine magnetiche. Tanto più intenso sarà il momento angolare accumulato dalla ruota di *pitch*, tanto più dovrà essere intensa l'azione della ruota di reazione controllata per effettuare la manovra. Altro parametro fondamentale è la massima accelerazione angolare ottenibile dal motore elettrico contenuto in tale ruota, la quale definisce la velocità con cui essa potrà raggiungere la quota di momento angolare sufficiente a reputare conclusa la manovra, definendo così l'*agility* del sistema. E' importante anche sottolineare come accelerazioni troppo elevate generino anche coppie giroscopiche elevate, che andranno ad impegnare maggiormente lo smorzatore di nutazione, in questo caso la terza ruota o le bobine, a seconda dell'architettura del controllo.

### ***1.4 Configurazione finale***

I criteri che hanno concorso alla selezione del tipo di disposizione delle ruote di momento/reazione sono stati principalmente tre, determinati dalle caratteristiche della missione e della famiglia di appartenenza di ALMASat-EO:

- Ingombro dimensionale, pari al volume interno massimo di due cassette della struttura del satellite.
- Potenza totale assorbita, da contenere in funzione del *power budget*, limitato dalla produzione di energia operata dai pannelli solari.
- Usura delle parti, in quanto si utilizzeranno componenti commerciali dalla vita operativa limitata per l'attuazione del moto.

### ***1.5 Obiettivi***

Alla luce di questi parametri è stato scelto di disporre le tre ruote di momento/reazione principali lungo i tre assi del sistema di riferimento corpo, in configurazione di ridondanza fredda. Questa soluzione conserva intatte le capacità di funzionamento della quarta ruota fino all'insorgere della *failure* aggirando inoltre il consumo di potenza necessario all'alimentazione della stessa. Lo scopo dell'elaborato consiste nella realizzazione di un azionamento progettato interamente in laboratorio, utilizzabile in sostituzione degli azionamenti commerciali reperibili sul mercato per l'attuazione dei motori *brushless*. Nel far ciò si è proceduto realizzando preliminarmente una prima *demo-board* per testare la risposta a terra dei motori elettrici selezionati in unione al volano per la ruota di momento/reazione per il microsatellite ALMASat-EO, operando come metodo di collegamento tra i comandi imposti tramite computer e gli attuatori veri e propri, una volta realizzati. L'evoluzione della *demo-board* costituisce, una volta ottimizzata, l'azionamento stesso che andrà ad integrarsi all'interno di ogni ruota, permettendone l'interfaccia con il sistema ADCS. In un secondo luogo verrà dunque ampliato il progetto della *demo-board* facendo interagire la scheda elettronica che comanda il motore con il sistema di lettura di velocità costituito da uno strumento noto come "encoder". Essenzialmente, la *demo-board* realizzata per il collaudo delle ruote di momento/reazione di ALMASat-EO si occupa di trasferire i comandi impartiti tramite computer dall'utente, opportunamente trasformati

in segnale analogico tramite una scheda di acquisizione dedicata, in una forma di segnale compatibile con l'attuazione del motore elettrico. La scelta di motori *brushless* in corrente continua permette il controllo della velocità tramite l'apposizione di una tensione di controllo ai capi dell'attuatore, operando senza la necessità di realizzare la commutazione degli avvolgimenti. A seguito dell'eccitazione del motore è parimenti necessario determinare, in risposta, la velocità di rotazione dell'albero stesso, in modo da poter provvedere al feedback necessario per la chiusura del ciclo di controllo. Nel caso specifico, è necessario acquisire il segnale in uscita dall'encoder connesso al motore e ritrasmetterlo alla scheda di acquisizione, affinché lo converta in dato numerico elaborabile al calcolatore. In un secondo tempo, con lo sviluppo della *demo-board* e la realizzazione dell'azionamento del motore, l'uscita dell'encoder comunica direttamente con il microcontrollore dell'azionamento. Trattandosi inoltre di controllo di ruote di reazione oltre che di momento, è necessario poter stabilire durante l'utilizzo il senso di rotazione dell'albero, verificandone l'aderenza al comando tramite la misura della relazione temporale tra i due canali in uscita dall'encoder, costruttivamente sfasati di  $90^\circ$  l'uno rispetto all'altro e quindi sufficienti ad indicare il comportamento effettivo del motore. Rimane scontata, infine, la necessità di alimentazione elettrica richiesta non solamente del motore e dell'encoder, ma anche dei componenti elettronici montati sulla *demo-board* che dovranno supplire a tutte le funzioni precedentemente elencate. La scelta effettuata di voler avvicinare le specifiche di utilizzo della *demo-board* a quelle reali a bordo del satellite richiede l'utilizzo di una sola rete di alimentazione a 12 volt, pari a quella generata dai pannelli solari durante la missione, con la trasformazione della tensione, qualora necessaria, solamente all'interno della scheda elettronica. Lo sviluppo dell'architettura della *demo-board* è quindi iniziato dalla determinazione dei componenti elettronici richiesti per le varie funzioni; data la volontà di voler realizzare uno strumento facilmente accessibile nelle sue parti e parimenti modificabile, sono stati utilizzati componenti in formato standard, non miniaturizzati né ancora qualificati ad uso spaziale. Successivamente si sono realizzate versioni evolute della suddetta *demo-board* riducendo le dimensioni della scheda elettronica grazie all'utilizzo di

componenti miniaturizzati e dotando la scheda di un circuito più complesso dovuto alla presenza di un microcontrollore che gestisce i segnali in ingresso e in uscita, funzioni peculiari di un azionamento per motori elettrici. Analogamente, per l'encoder si è seguita la stessa procedura, ovvero la realizzazione di una prima versione della scheda elettronica costituita da circuiti semplici con componenti montati su una scheda "millefori" e in seguito sviluppando versioni sempre più miniaturizzate e integrate con il sistema "azionamento".



# 2

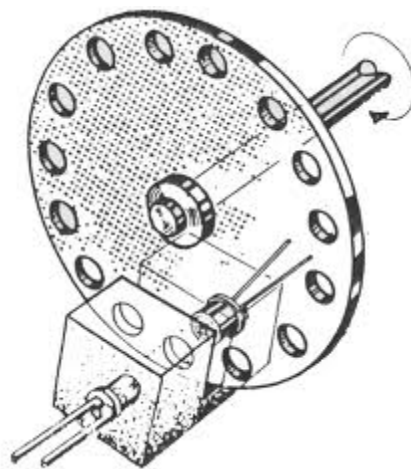
## ***ENCODER PER LETTURE DI VELOCITA'***

- 2.1 IMPIEGO DI UN ENCODER*
- 2.2 ENCODER MAGNETICO*
- 2.3 ENCODER OTTICO*
- 2.4 CONFRONTO PRESTAZIONALE*

### ***2.1 Impiego di un encoder***

In molte applicazioni è utile che le informazioni in uscita dal trasduttore siano in forma digitale. Anche se, ovviamente, è sempre possibile applicare un convertitore analogico-digitale all'uscita di un trasduttore analogico, esistono, tuttavia, dei trasduttori che non si limitano ad operare una trasduzione della variabile d'ingresso, ma ne eseguono anche una quantizzazione, dando quindi in uscita una grandezza digitale. Un dispositivo che possiede questa caratteristica è l'encoder, altrimenti noto come "trasduttore di posizione angolare", esso è un dispositivo elettromeccanico che converte la posizione angolare del suo asse rotante in segnali elettrici numerici digitali. Esistono due tipologie di encoder: quello assoluto e quello incrementale. Un encoder assoluto è costituito da un disco che ruota solidalmente con l'albero di cui si vuole misurare la posizione angolare; il disco è diviso in settori, ciascuno dei quali, con un opportuno alternarsi di zone conduttrici e zone isolanti, riproduce un diverso numero binario nell'ambito di un codice opportunamente scelto.

Questa informazione viene letta da un sistema di spazzole ( o da un sensore nel caso di tecnologia *brushless*) e trasferita sotto forma di segnali di tensione a due livelli significativi (0 e 1), su una serie di conduttori. Le zone conduttrici e isolanti possono essere sostituite da zone magnetiche e non magnetiche, a seconda del sistema con cui viene effettuata la lettura. Il codice più semplice che può essere utilizzato in un encoder è il binario proporzionale, tuttavia l'utilizzo di questo codice non è sempre conveniente in quanto è fonte di errori dovuti al fatto che nel passaggio da alcuni numeri ai successivi i numeri binari corrispondenti cambiano per più di una cifra. Un codice che spesso si impiega negli encoder è il codice *Gray* nel quale le codifiche di due numeri adiacenti differiscono per un solo simbolo e quindi si riduce la possibilità di errori. Per quanto riguarda gli encoder di tipo incrementale, essi segnalano unicamente gli incrementi (variazioni) rilevabili rispetto a un'altra posizione assunta come riferimento. Questi incrementi sono indipendenti dal verso di rotazione, il quale non può essere rilevato da questo tipo di trasduttori. E' costituito, nel caso di encoder ottico da un disco opaco, sul quale sono stati ricavati dei fori o, in alternativa, alcune zone particolarmente trasparenti attraverso le quali e' possibile il passaggio di un fascio luminoso. Oppure, nel caso di encoder magnetico, esso prevede la presenza di uno o più magneti solidali con l'albero, il cui passaggio è segnalato da un sensore magnetico.



**Fig. 2.1 – Encoder ottico**

### 2.1.1 L'encoder nelle ruote di momento per il controllo d'assetto del micro satellite ALMASat-EO

Nell'ambito della missione ALMASat-EO, essendo il controllo d'assetto del micro satellite affidato all'utilizzo ruote di momento/reaione come attuatori, si richiede che siano effettuate misurazioni quanto più accurate possibili della velocità di rotazione della massa inerziale, ossia del volano. A tal fine sono state realizzate due diverse tipologie di encoder: uno magnetico il cui principio di funzionamento è basato sull'effetto Hall, ed un encoder ottico che fa uso di un diodo led (fotoemettitore) e di un fotodiodo (fotorilevatore) opportunamente selezionati.

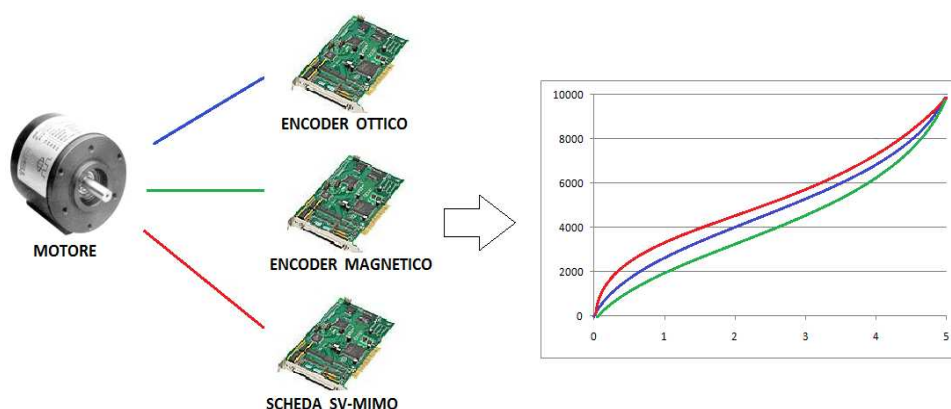


Fig. 2.2 – Schema illustrativo del lavoro svolto

Lo scopo è quello di cercare di ottenere valori di velocità che approssimino al meglio la curva della velocità effettiva dell'albero misurata tramite sensori Hall integrati nel motore. A tal proposito, a seguito della determinazione delle caratteristiche *volt-rpm* delle due tipologie di encoder si è effettuato uno studio con l'obiettivo di determinare le condizioni di funzionamento nelle quali si rende più conveniente l'utilizzo di un encoder ottico e quelle in cui invece è preferibile l'utilizzo di un encoder di tipo magnetico. Per la determinazione delle suddette caratteristiche *volt-rpm* si è analizzata la risposta fornita dai due encoder comandando il motore mediante azionamento commerciale SVT-MIMO ed in particolare fornendo a tale scheda tramite potenziometro un ingresso variabile tra 0 e 5 volt con una caratteristica incrementale di circa 2000 *rpm* per ogni volt.

## 2.2 L'encoder magnetico e il suo funzionamento

Il principio di funzionamento di un encoder magnetico di basa sul cosiddetto “effetto Hall”, che consiste nella realizzazione di una differenza di potenziale sulle facce opposte di un conduttore elettrico dovuta a un campo magnetico perpendicolare alla corrente elettrica che scorre in esso. Solitamente l'encoder magnetico prevede l'utilizzo di un disco che ruota solidalmente con l'albero di cui si vuole misurare la posizione angolare ed è costituito da settori magnetizzati alternati a settori non magnetizzati. E' presente, inoltre, un nucleo di forma toroidale sul quale sono disposti due avvolgimenti: uno di questi, che funge da primario, viene alimentato con una tensione sinusoidale cosicché ai capi dell'altro, che funge da secondario, si ha una tensione la cui ampiezza dipende dalla posizione che in quell'istante ha il disco rispetto al nucleo; infatti quando un settore magnetizzato è in prossimità del nucleo, il settore stesso esercita un campo magnetico tale da portare in saturazione il nucleo stesso. Nell'encoder magnetico relativo agli attuatori del micro satellite ALMASat-EO si è utilizzato come sorgente del campo una coppia di magneti fissati direttamente sull'albero rotante (eventualmente i magneti possono essere più di uno se si richiede un' accuratezza particolarmente elevata), mentre come rilevatore del campo magnetico si utilizza un sensore di posizione che è parte integrante di un circuito realizzato su PCB. Il sensore legge il passaggio del magnete e invia il segnale al circuito che ha il compito di stimare con l'accuratezza richiesta la velocità di rotazione dell'albero.

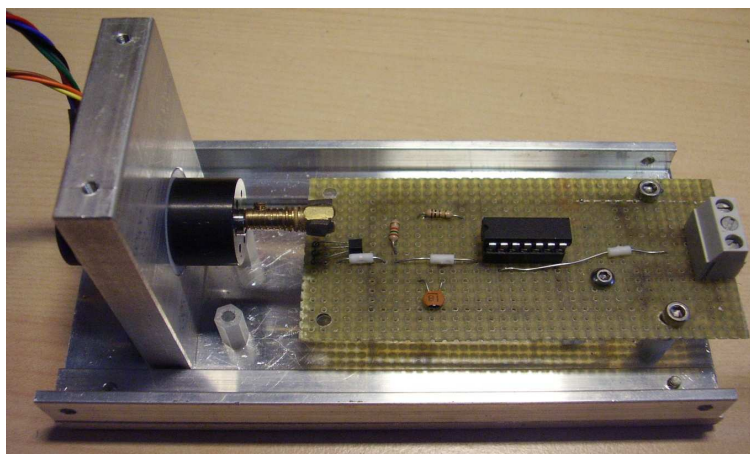


Fig. 2.3 – Encoder magnetico realizzato

### 2.2.1 Realizzazione e componenti

La scheda di acquisizione del segnale è stata realizzata secondo il progetto del seguente schematico realizzato mediante il software OrCAD Capture (vedi appendice B).

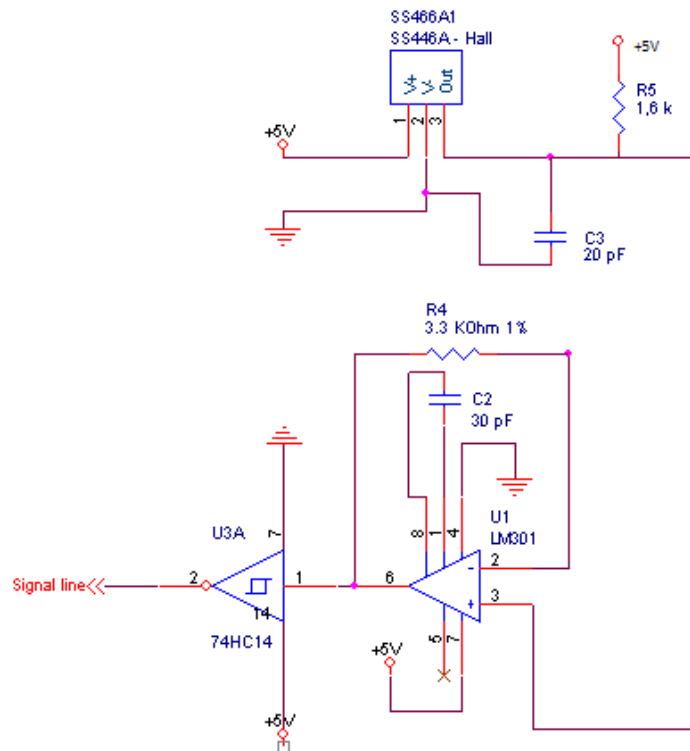


Fig. 2.4 – Schematico del circuito della scheda di lettura per encoder magnetico

I componenti che compaiono in tale circuito sono: un trigger di Schmitt 74HC14, un amplificatore operazionale LM301, due condensatori di capacità 20pF e 30pF, due resistenze con valore ohmico pari a 3.3 k $\Omega$  e 1.6 k $\Omega$ . Il segnale proviene da una sensore di posizione SS400 Series di cui si è adottata la versione SS466A tra le possibili varianti (vedi appendice A).

Le caratteristiche principali di tale sensore sono riportate nelle seguenti tabelle:

MAGNETIC CHARACTERISTICS /2\						
TEMPERATURE RANGE	-40°C	0°C	25°	85°C	125°C	150°C
OPERATE GAUSS MAXIMUM	200	185	180	180	180	185
OPERATING GAUSS MINIMUM	100	100	100	95	80	70
RELEASE GAUSS MAXIMUM	-100	-100	-100	-95	-80	-70
RELEASE GAUSS MINIMUM	-200	-185	-180	-180	-180	-185

**Tab. - 2.1 Caratteristiche magnetiche del sensore**

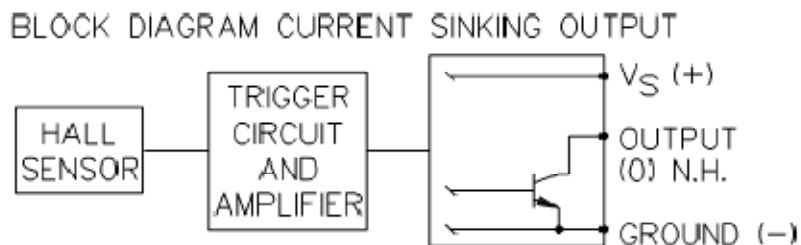
ELECTRICAL CHARACTERISTICS AT -40°C TO 150°C VCC=3.8V TO 24 VOLTS (UNLESS OTHERWISE NOTED)						
CHARACTERISTIC	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
SUPPLY VOLTAGE	VCC		3.8		24	V
SUPPLY CURRENT	ICC	B > 180 G, VCC=24, ISINK=20 MA -40 C < T < 150C			10	MA
OUTPUT SATURATION VOLTAGE	VOL	B > 180G, VCC=3.8V, ISINK=20 MA			.4	V
OUTPUT LEAKAGE CURRENT	I <sub>OFF</sub>	B < - 180G, VOUT=24V, VCC=24V			10.0	μA
RISE TIME	TR	VCC=12V, RL=1.6K, CL=20PF		.05	1.5	μ SEC
FALL TIME	TF	VCC=12V, RL=1.6K, CL=20PF		.15	1.5	μ SEC

**Tab. - 2.2 Caratteristiche elettriche del sensore**

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS /3\				
CHARACTERISTIC	SYMBOL	MIN	MAX	UNITS
POWER SUPPLY	VCC	-1	25	VOLTS
OUTPUT VOLTAGE (OFF)	VOUT		25	VOLTS
OUTPUT ON CURRENT	ISINK		50	MA
OPERATING TEMPERATURE	T	-50	160	°C
STORAGE TEMPERATURE	T <sub>S</sub>	-65	160	°C
MAGNETIC FLUX	NO LIMIT			

**Tab. - 2.3 Caratteristiche tecniche del sensore**

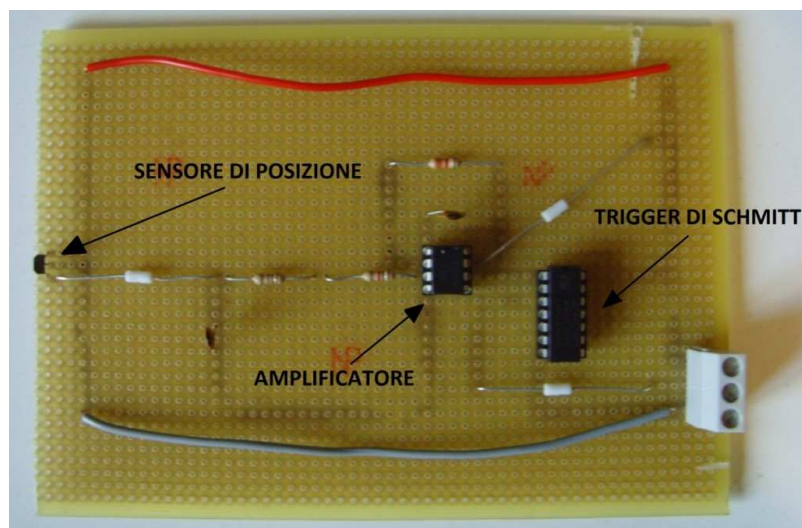
e prevede il seguente tipico schema costruttivo:



**Fig. 2.5 – Schema di montaggio del sensore magnetico**

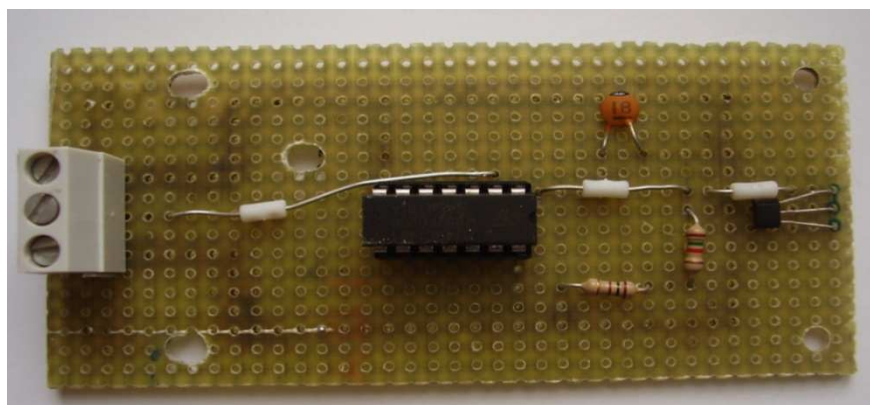
Il circuito è stato riportato inizialmente su una “mille-fori” in modo tale da poter effettuare primi test indicativi per verificare l’attendibilità dei valori ottenuti, confrontandoli con quelli dell’encoder integrato nella scheda di controllo SVT-MIMO del motore (a disposizione), per essere poi realizzato, in una versione finale e definitiva, mediante fresatura su una scheda elettronica in modo tale da ridurre l’ingombro ed avere una scheda più compatta da poter inserire nell’apposito vano disegnato utilizzando il software SolidWorks e realizzato ad hoc in laboratorio.

La prima versione di tale scheda si presentava nel modo seguente:



**Fig. 2.6 – Scheda encoder magnetico**

In seguito è stata realizzata una seconda scheda ottimizzata e resa più compatta come si può vedere in figura 2.7



**Fig. 2.7 – Scheda compatta encoder magnetico**

### 2.2.2 Risultati

I dati acquisiti dalla scheda, ed elaborati tramite un programma realizzato mediante software LabView mostrano come la caratteristica *volt-rpm* sia pressoché lineare.

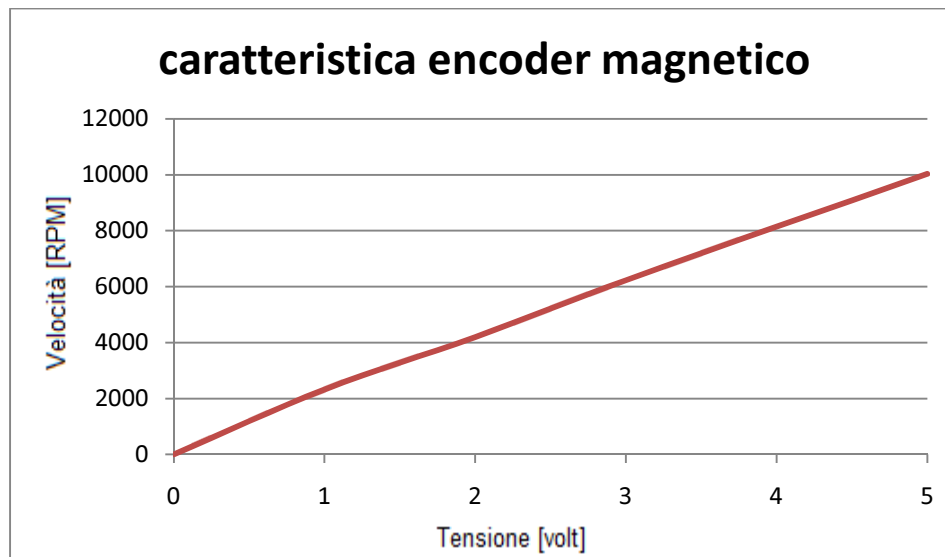


Fig. 2.8 – Caratteristica *volt-rpm* con encoder magnetico

### 2.3 L'encoder ottico e il suo funzionamento

Il principio di funzionamento di un encoder di tipo ottico prevede l'emissione di un raggio di luce (visibile oppure infrarossa) emessa da un diodo LED e rilevata da un sensore ottico (fotodiodo). Tale raggio luminoso viene schermato dal movimento di una superficie rotante, nella fattispecie un disco solidale con l'albero sul quale è calettato il volano della ruota di momento. Su tale disco sono praticati uno o più fori, in base alle finalità del sensore (*sensing* di posizione, velocità, ecc...). Il sensore ottico rilevando il raggio luminoso commuta la propria uscita, e tale variazione di tensione viene acquisita ed elaborata opportunamente in modo tale da fornire in uscita un valore corrispondente alla velocità di rotazione del disco rotante, e quindi la velocità di rotazione dell'albero. Per conoscere il senso di rotazione, l'encoder fornisce in uscita due segnali tra loro in quadratura dei



quali il primo è in anticipo rispetto al secondo se il moto è in una direzione, mentre è in ritardo se il movimento avviene nella direzione opposta.

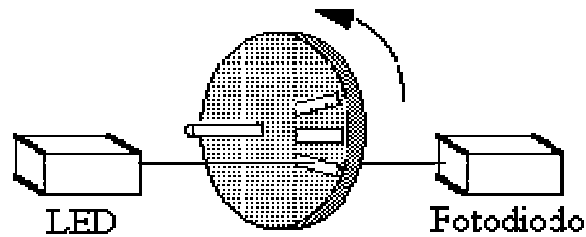


Fig. 2.9 – Funzionamento di un encoder ottico

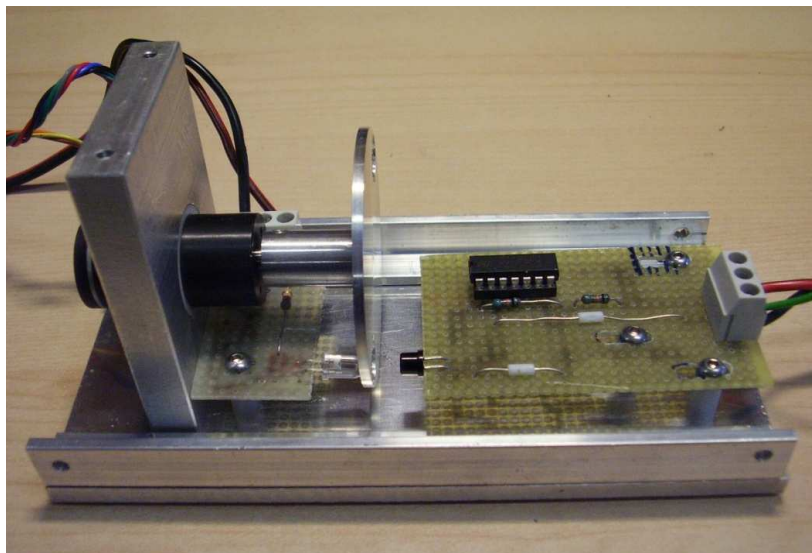


Fig. 2.10 – Encoder ottico realizzato

### ***2.3.1 Realizzazione e componenti***

La realizzazione della scheda di acquisizione del segnale si basa sullo schematico realizzato facendo uso del software OrCAD, adottando il metodo seguito per la realizzazione della scheda di acquisizione dell'encoder magnetico (vedi appendice B). Lo schematico in questione è rappresentato in figura 2.11

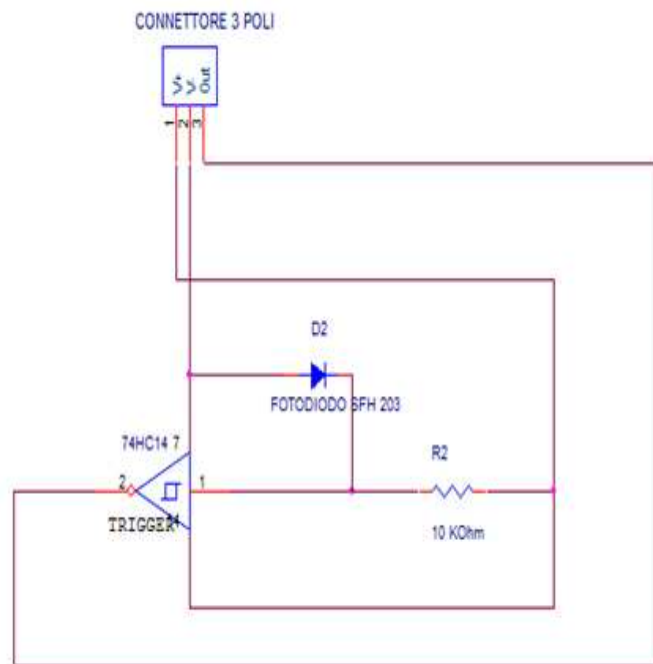


Fig. 2.11 – Schematico del circuito della scheda di lettura per encoder ottico

La scheda si presenta come in figura 2.12.

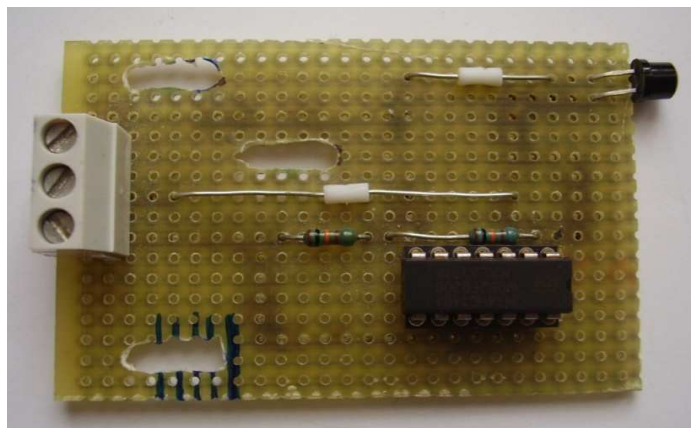


Fig. 2.12 – Scheda encoder ottico

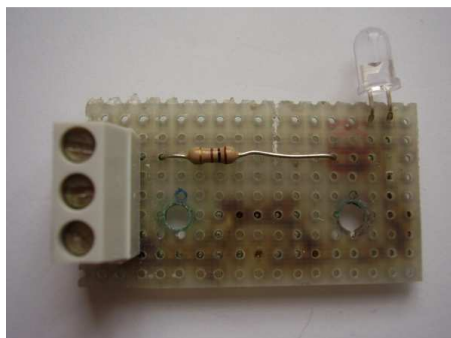
I componenti che compaiono in tale circuito sono: un trigger di Schmitt 74HC14, un sensore ottico, due condensatori di capacità 20pF e 30pF, due ponti  $0\Omega$  ed una resistenza con valore ohmico pari a 10.

Per quanto riguarda il sensore (fotodiodo) che compare nel circuito della scheda relativa all'encoder ottico si è effettuata una selezione più approfondita al fine di selezionare il sensore che meglio si prestasse all'impiego in un encoder.

Dopo un'attenta analisi i componenti presi al vaglio nella ricerca del fotodiodo sono stati i seguenti:

- SFH 203
- SFH 205
- APDS 9002
- BPW-21R
- SD 1420

Al termine della disamina dei *datasheet* relativi ai diversi sensori presi in considerazione alla luce della loro compatibilità per il suddetto impiego, la scelta è ricaduta sull' SFH 205 che rappresenta il miglior compromesso tra le caratteristiche dei vari fotodiodi esaminati, e risulta perfettamente compatibile in termini di voltaggio, corrente e tempi di risposta con gli altri componenti che figurano nel circuito. L'encoder ottico prevede, inoltre, una seconda scheda che utilizza un diodo LED che emette luce nell'infrarosso. Tale scheda prevede un circuito elementare in cui compare, oltre al diodo LED, una resistenza posta in serie allo stesso.



**Fig. 2.13 – Scheda con diodo LED per encoder ottico**

### 2.3.2 Risultati

La caratteristica tensione-distanza mostra come il fotodiode abbia un ottimo comportamento quando la distanza tra il fotodiode e il diodo LED non supera gli 11mm, al di sotto di tale distanza limite infatti si registra un valore di tensione (tra il pin d'uscita del segnale e la massa) che si attesta mediamente sui 5 volt dunque perfettamente compatibile con il dimensionamento degli altri componenti ed in linea con i valori indicati nel *datasheet* del fotodiode.

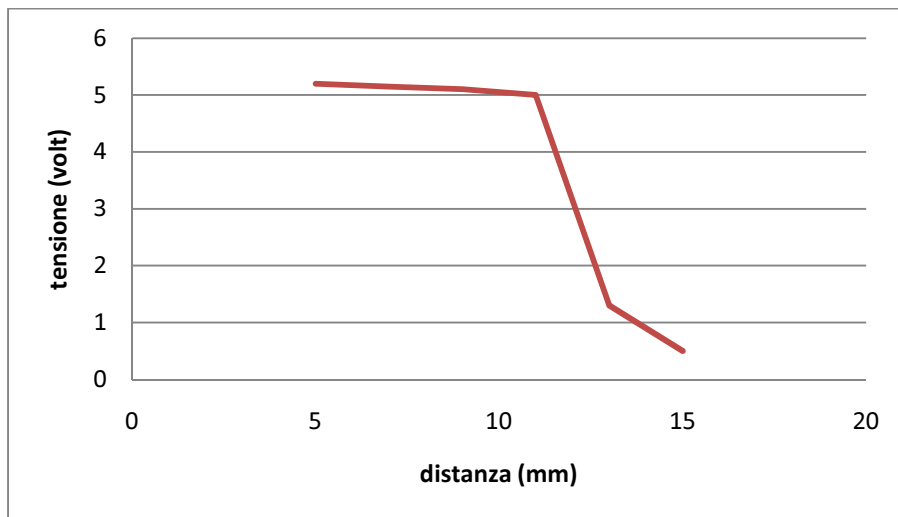


Fig. 2.14 – Andamento della risposta (volt) al variare della distanza

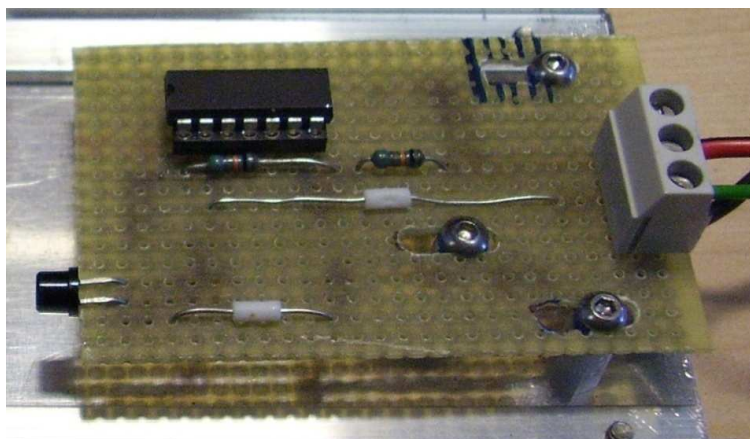


Fig. 2.15 – Particolare dei “pattini” realizzati per poter traslare la scheda

Superando tale valore limite il fotodiode registra una netta caduta di tensione e pertanto il funzionamento dell'encoder stesso può risultare instabile e quindi le misure di velocità non più attendibili. Come nell'analisi dei valori di velocità acquisiti mediante l'utilizzo dell'encoder di tipo magnetico, allo stesso modo si è proceduto nel caso dell'encoder ottico, elaborando i segnali acquisiti mediante il programma realizzato con il software LabView. Dallo studio dei valori di velocità ottenuti utilizzando un encoder di tipo ottico ne risulta una caratteristica il cui andamento è riportato in figura 2.16.

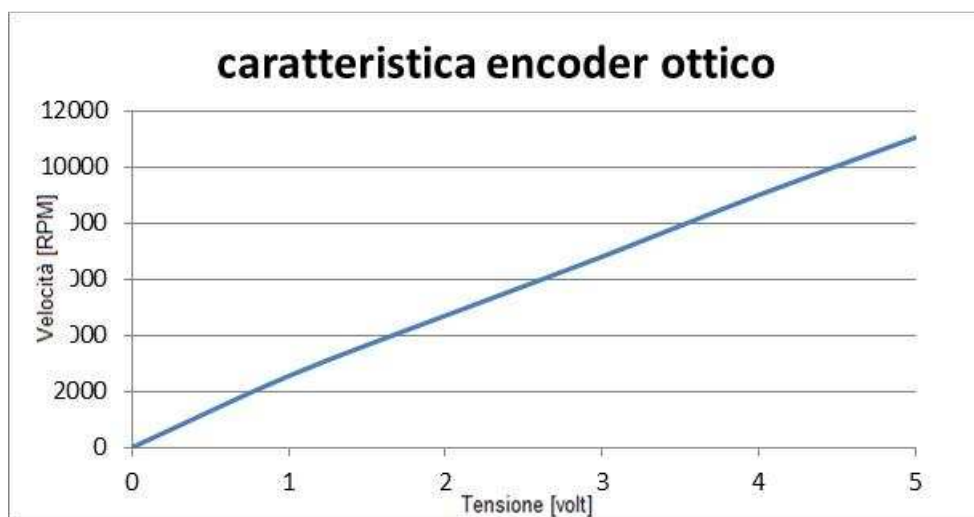


Fig. 2.16 – Caratteristica *volt-rpm* con encoder ottico

Tale caratteristica volt-rpm risulta pressoché lineare e approssima bene i valori di velocità effettivi dell'albero motore, soprattutto per valori in ingresso compresi tra 0 e 2 volt (come si vedrà nel seguito dal confronto di questi risultati con quelli relativi all'encoder magnetico), individuando le condizioni operative nel quale è preferibile l'impiego di un encoder di tipo ottico ed altre invece dove è preferibile l'utilizzo di un encoder di tipo magnetico.

Il volume pensato per ospitare la scheda dell'encoder (sia ottico che magnetico) e il rotore è composto da un involucro in plexiglass e alluminio

all'interno del quale è presente un vano, che rappresenta la sede nella quale verranno alloggiare le schede, e un supporto, anch'esso in alluminio, pensato per ospitare il motore dell'encoder.

## 2.4 Confronto prestazionale

### 2.4.1 Cenni sul setup per il test

La configurazione nel caso di utilizzo dell'encoder magnetico prevede che la sede dell'ingombro ospiti la scheda che fa uso del sensore magnetico di posizione "SS400 Series" (vedi appendice A) e che venga calettato sul rotore un inserto sul quale sono presenti due magneti dei quali il sensore registra il passaggio. E' dunque possibile determinare la velocità di rotazione del suddetto albero, una volta acquisito l'output della scheda, che viene poi elaborato con il programma realizzato con il software LabView. L'interfaccia tra la scheda dell'encoder e il programma di acquisizione è rappresentato da una piattaforma della National Instrument in grado di inviare i segnali acquisiti dalla scheda ad un pc mediante collegamento USB, e di trasmettere a sua volta un segnale di comando dal pc al motore.

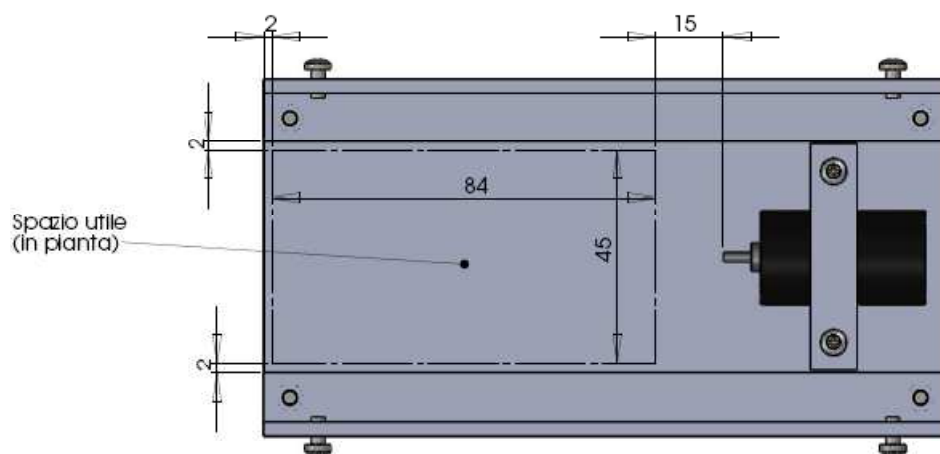


Fig. 2.17 – Ingombro interno e supporto motore (vista dall'alto)

La scheda realizzata presenta il sensore di posizione con la faccia rivolta verso l'alto in modo tale che i magneti siano allineati con esso; in seguito si è pensato di studiare il comportamento di tale sensore al variare della distanza dai suddetti magneti, variando la posizione della scheda verso l'alto, facendo uso di alcuni distanziali posizionati al di sotto di essa e fissati alla base dell'ingombro con alcuni dadi.

La configurazione nel caso di utilizzo dell'encoder ottico prevede invece che la sede dell'ingombro ospiti sia la scheda dell'encoder su cui è montato il sensore ottico SFH 205, sia la scheda che ospita il diodo LED a luce infrarossa. Inoltre l'utilizzo dell'encoder ottico prevede che venga montato sull'albero del rotore un disco in alluminio munito di due fori.

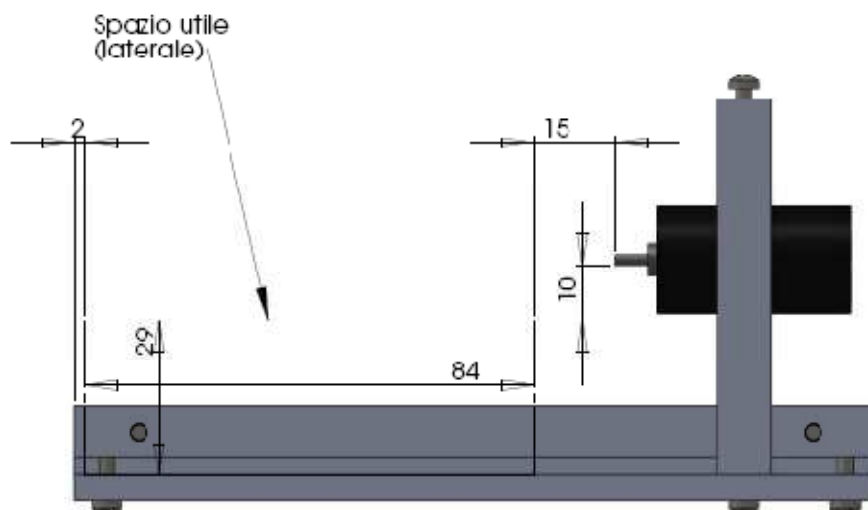


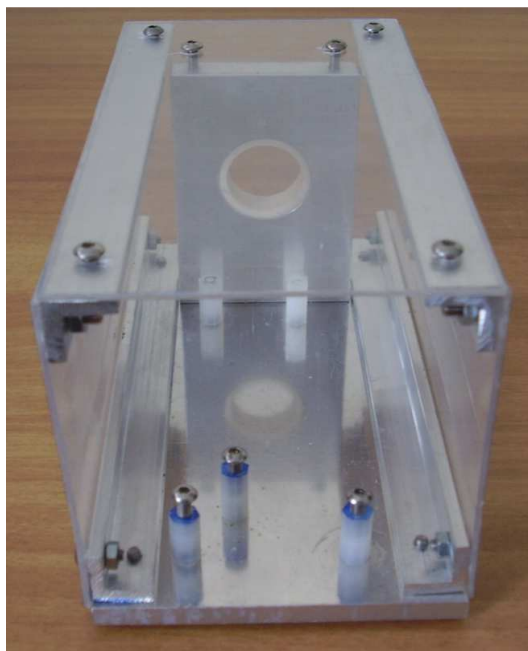
Fig. 2.18 – Ingombro interno e supporto motore (vista laterale)

Il sensore ottico rileva il raggio di luce infrarossa quando il foro è situato tra il sensore e il diodo LED e con lo stesso programma utilizzato nel caso dell'encoder magnetico (acquisendo il segnale mediante la piattaforma NI) si è in grado di determinare analogamente la velocità di rotazione dell'albero. Si è pensato di far variare la distanza relativa delle due schede, permettendo la traslazione orizzontale, al fine di studiare il comportamento del sensore ottico nei vari punti di funzionamento. La scheda principale

pertanto ha la possibilità di scorrere avanti e indietro grazie ad una sorta di pattino. Tale soluzione è stata resa possibile realizzando dei fori leggermente allungati in modo tale da permettere alle viti dei distanziali di scorrere all'interno di essi, e quindi permettono alla scheda di traslare orizzontalmente avvicinando o allontanando il sensore dal diodo led.



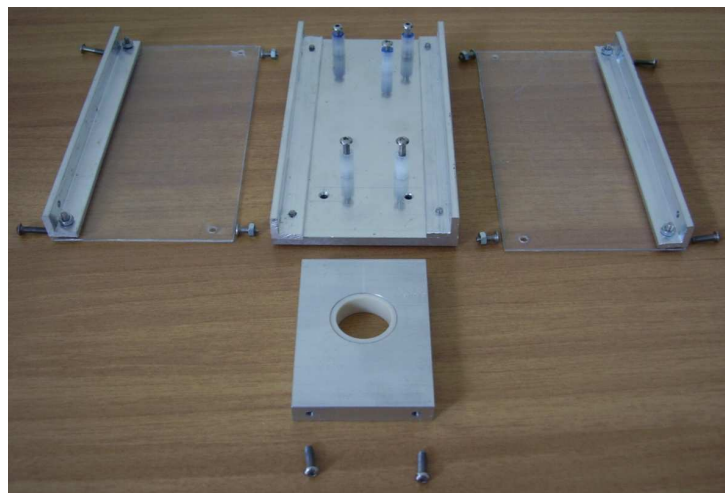
**Fig. 2.19 – Volume (vista in prospettiva)**



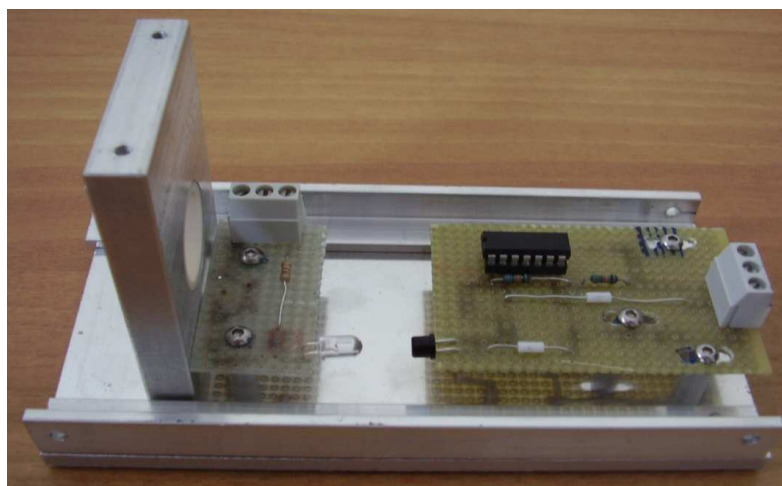
**Fig. 2.20 – Volume (lato ingresso della scheda)**



Per quanto riguarda le soluzioni pratiche si è deciso di fissare il supporto del motore con quattro viti: due di esse collegano direttamente il supporto alla superficie superiore dell'ingombro mentre le restanti due collegano il supporto alla piastra inferiore attraverso alcuni distanziali in plastica per evitare eventuali cortocircuiti nel caso in cui avvenisse un contatto tra una pista situata in prossimità di un foro della scheda e la piastra metallica dell'ingombro. Per praticità la sede che, come mostra la figura 2.22, ospita la scheda relativa al fotodiodo è anche la sede che nella versione "encoder magnetico" ospita la scheda elettronica che utilizza il sensore magnetico.



**Fig. 2.21 – Esploso del volume**



**Fig. 2.22 – Montaggio parziale**

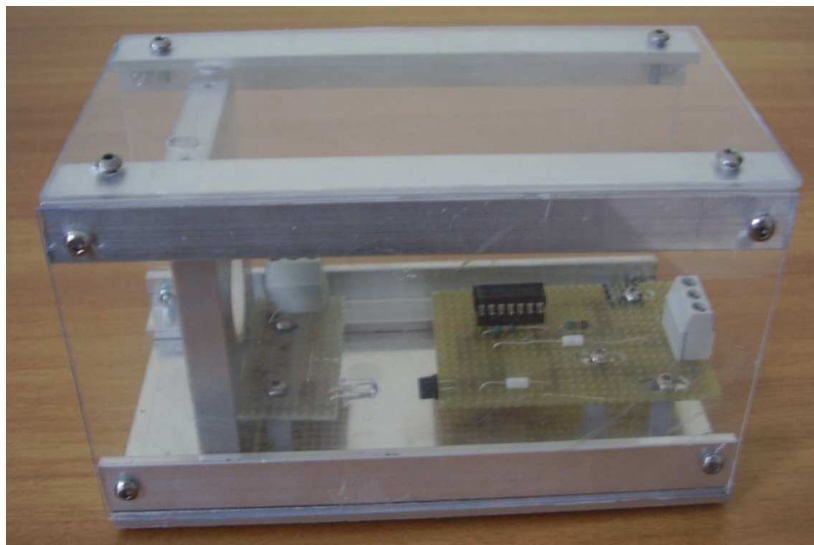
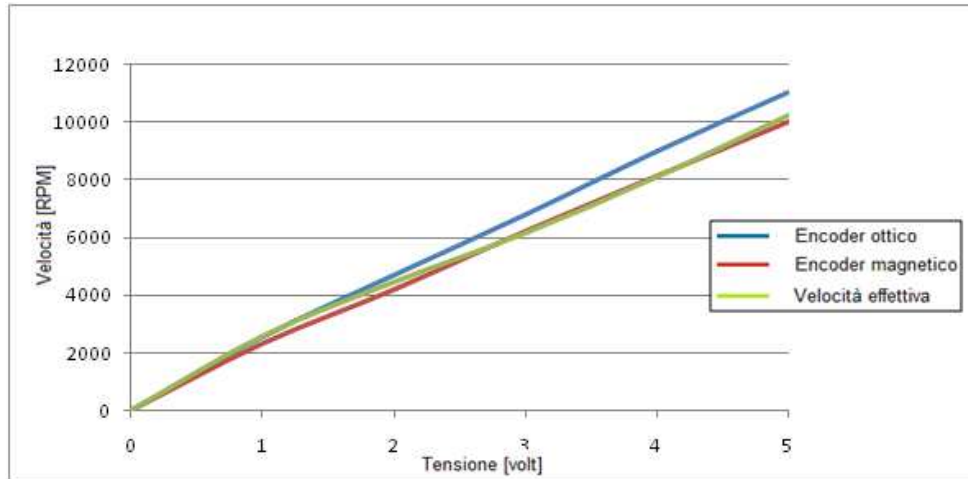


Fig. 2.23 – Montaggio completo (mancano motore e cavi di alimentazione)

### 2.4.2 Confronto prestazionale

Dall'analisi dei risultati forniti dalle schede dei suddetti encoder si evince che per valori di tensione compresi tra 0 e 2 volt il sistema di lettura che fa uso dell'encoder ottico e del relativo hardware approssima meglio la velocità di rotazione reale dell'albero, tuttavia superando tale soglia, ovvero per valori di tensione superiori a 2 volt si può osservare come la caratteristica relativa alla lettura dei valori di velocità diverga gradualmente fornendo valori di velocità non più attendibili, in particolare essa sovrastima la velocità (anche fino al 10% in corrispondenza del valore massimo di tensione). Al contrario la caratteristica *volt-rpm* relativa al sistema di acquisizione che fa uso dell'encoder magnetico (e del relativo circuito elettrico realizzato) approssima quasi perfettamente i reali valori di velocità dell'albero motore per valori di tensione maggiori di 2 V fino al valore massimo di 5 V, mentre sottostima la velocità effettiva del motore per tensioni inferiori a 2 V, pur con un errore relativo inferiore rispetto a quello registrato effettuando la lettura di velocità con l'encoder ottico.



**Fig. 2.24 – Velocità acquisite**

Alla luce di quanto visto, si può affermare che l'utilizzo di un sistema di lettura di velocità basato su encoder ottico è da preferire a quello magnetico nei casi in cui si vuole conoscere la velocità di rotazione del volano di una ruota di reazione che ha velocità operative sensibilmente inferiori a quelle di una ruota di momento. Viceversa, per quest'ultima è da preferirsi l'impiego di un sistema di lettura che faccia uso di un encoder magnetico, che come visto ben si presta per letture di velocità elevate. Questo aspetto risulta ancor più comprensibile se si considera che una ruota di momento opera perennemente, durante l'arco della sua vita operativa, ad una velocità nominale non nulla, al contrario di una ruota di reazione.



# 3

## **AZIONAMENTO ELETTRICO**

3.1 *IL MOTORE BRUSHLESS*

3.2 *AZIONAMENTO*

3.3 *CENNI SULLA COMPONENTISTICA*

3.4 *LE TECNICHE DI CONTROLLO*

### **3.1 Il motore brushless**

Un motore *brushless* è un motore elettrico sincrono, trifase in cui i magneti permanenti (costruiti sottoponendo un materiale che presenta alta isteresi magnetica, dopo la lavorazione, ad un campo magnetico di elevata intensità) contraddistinti da bassa inerzia rotorica sono disposti sul rotore. Gli avvolgimenti, al contrario, sono posizionati nello statore. Tale motore è il più diffuso nell'ambito dei dispositivi di controllo più accurati. A differenza di un motore a spazzole il motore *brushless* non ha bisogno di contatti elettrici striscianti sull'albero motore per funzionare (da qui il nome). La commutazione della corrente circolante negli avvolgimenti, infatti, non avviene per via meccanica (tramite il contatto meccanico delle spazzole con il collettore, che chiude il circuito elettrico tra l'alimentazione e l'avvolgimento di rotore), ma elettronicamente tramite un banco di transistor di potenza comandati da un microcontrollore che controlla la commutazione della corrente. Dato che il controllore deve conoscere la posizione del rotore rispetto allo statore, esso viene solitamente collegato ad uno o più sensori a effetto Hall, o ad un coppia *LED-fototransistor*. Nel rotore sono disposti in genere da 2 a 8 paia di poli, costituiti da magneti permanenti. Nei motori *brushless*, in cui il campo prodotto dai magneti permanenti rotorici è rotante, il campo prodotto dalle correnti circolanti nei tre avvolgimenti statorici è reso rotante dall'azione dell'inverter. La struttura

magnetica del rotore, isotropa con magneti disposti sulla superficie cilindrica del rotore (figura 3.1) è più comune di quella anisotropa con magneti annegati all'interno del rotore (figura 3.2).



Fig. - 3.1 Soluzione con magneti disposti sul rotore

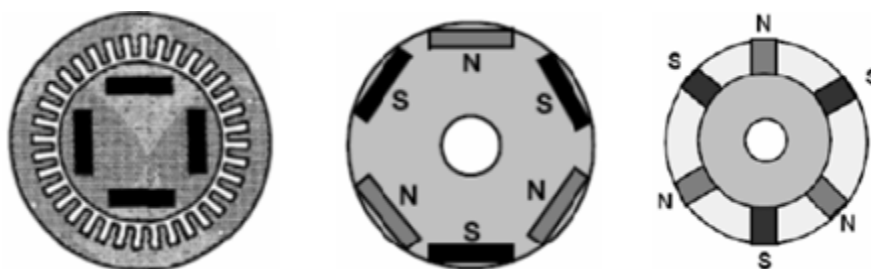


Fig. - 3.2 Soluzione con magneti "annegati" nel rotore

Il primo grosso vantaggio relativo all'impiego di questo tipo di motore, oltre all'ovvia riduzione della resistenza meccanica che incontra il rotore, riguarda la vita attesa dello stesso, dato che le spazzole sono il "punto debole" di un motore in corrente continua, di conseguenza si riduce notevolmente la necessità di manutenzione periodica. L'assenza di spazzole, oltre ad eliminare il problema della formazione di scintille ad elevati regimi di rotazione (aspetto fondamentale quando il motore opera in ambienti saturi di composti chimici volatili come i carburanti) elimina anche la principale fonte di rumore elettromagnetico presente negli altri motori in continua. L'ingombro è limitato rispetto alla potenza che possono erogare, e in termini di efficienza, i motori *brushless* sviluppano molto meno calore di un equivalente motore a spazzole, pertanto, si dice in gergo che "marciano freddi". Gli avvolgimenti sullo statore inoltre dissipano facilmente il calore

generato e permettono di costruire motori "lisci", senza alettature esterne proprio grazie al miglior raffreddamento degli avvolgimenti. In questo tipo di motori i magneti permanenti sono posizionati sul rotore e sono realizzati con speciali materiali che permettono di avere un'inerzia rotorica molto bassa, cosa che permette di avere un controllo estremamente preciso sia in velocità che in accelerazione. Ultimamente sono molto utilizzati in campo industriale e impiegati nelle macchine automatiche che necessitano di movimenti precisi e veloci con ingombri decisamente contenuti e grande versatilità offerta anche da apparecchiature di controllo programmabili molto sofisticate che danno un completo controllo e diagnostica del motore. Il maggior difetto dei motori senza spazzole è l'irregolarità di coppia ("ripple") dovuta alla brusca commutazione, infatti nei motori in corrente continua convenzionali una delle ragioni della suddivisione dell'avvolgimento in numerosi segmenti e dell'utilizzazione di un numero elevato di lame sul collettore è la riduzione della fluttuazione di coppia. Un'altra ragione che giustifica la suddivisione dell'avvolgimento nei motori convenzionali, ma che non sussiste nei motori *brushless*, è la limitazione dello scintillio alla commutazione per effetto dell'induttanza del segmento di avvolgimento che esce di conduzione. Nei motori senza spazzole, per ragioni economiche, una suddivisione molto fine dell'avvolgimento di statore (con conseguente moltiplicazione anche dei circuiti elettronici di comando) non è praticabile. Il principale inconveniente di questo tipo di motori risiede nel maggiore costo. Al contrario dei motori a spazzole, infatti, il controllo viene effettuato elettronicamente da un dispositivo elettronico detto "controller", per questo non è solitamente possibile utilizzare un potenziometro o un reostato (inefficiente ma estremamente economico).

### **3.2 Azionamento**

L'azionamento elettrico può essere considerato come un particolare sistema che converte l'energia elettrica che riceve in ingresso, in energia meccanica in uscita. Tale conversione avviene in genere mediante l'uso di elettronica di potenza e seguendo una particolare funzione, detta funzione di comando. In

tal modo è possibile far seguire ad un motore elettrico un comportamento desiderato per un determinato scopo. Gli azionamenti *brushless* sono particolarmente adatti ad essere utilizzati nei settori in cui è molto importante l'elevata dinamica, quali quelli dell'automazione industriale, della robotica, delle macchine utensili, dei veicoli a propulsione elettrica e ibrida e degli attuatori aerospaziali. Per tale motivo la struttura del rotore dei motori *brushless* è realizzata in modo tale da avere una inerzia molto bassa (talvolta alleggerita praticando dei fori) in modo da soddisfare richieste di accelerazioni dinamiche elevate. Nel caso in questione il suo compito è essenzialmente quello di portare in rotazione un albero ad una determinata velocità, imposta dalle condizioni di perturbazione rispetto all'assetto ottimale, indipendentemente, entro determinati limiti, dalla coppia resistente e quindi dalla coppia motrice erogata dal motore; questo compito deve poter essere svolto rispettando alcuni importanti requisiti: totale bidirezionalità dell'azionamento con zona morta praticamente nulla intorno allo zero di velocità, sia in condizioni statiche che dinamiche; il rapporto tra velocità massima e minima regolabile deve essere indicativamente maggiore di 10 con coppia nominale e, passando da vuoto a carico nominale, la velocità non deve diminuire più di 1/10 della velocità massima.

Possiamo individuare tre tipi principali di controllo dei motori *brushless*:

1. *Controllo a carico costante*, impiegato ove la variazione di velocità è più importante della precisione, tale soluzione richiede controllori a basso costo, funzionanti in genere ad anello aperto, con il carico direttamente accoppiato all'albero motore.
2. *Controllo a carico variabile*, largamente diffuso in campo automobilistico e aerospaziale. Richiede buone risposte dinamiche e dispositivi di retroazione di velocità, pertanto necessitano di algoritmi di controllo avanzati e controllori più complessi, con conseguente incremento del costo del sistema.
3. *Controllo di posizionamento*, soluzione che si adotta per la maggior parte delle applicazioni di automazione industriale e che richiedono frequentemente l'inversione della direzione di rotazione, sono importanti la risposta dinamica in velocità e coppia. Un ciclo tipico ha una fase di accelerazione, una a velocità costante, una di decelerazione e una di



posizionamento. Il carico sul motore può variare durante tutte queste fasi, con conseguente necessità di un controllore più complesso. Nella fattispecie siamo in presenza di un controllo a carico costante. Tutti questi sistemi funzionano principalmente in anello chiuso con uno o più anelli di controllo (di coppia, di velocità e di posizione) funzionanti simultaneamente. Il convertitore che alimenta i motori *brushless* è normalmente del tipo a due stadi con circuito intermedio. Lo schema a blocchi illustra in maniera più chiara i vari componenti e le funzioni dell' azionamento elettrico.

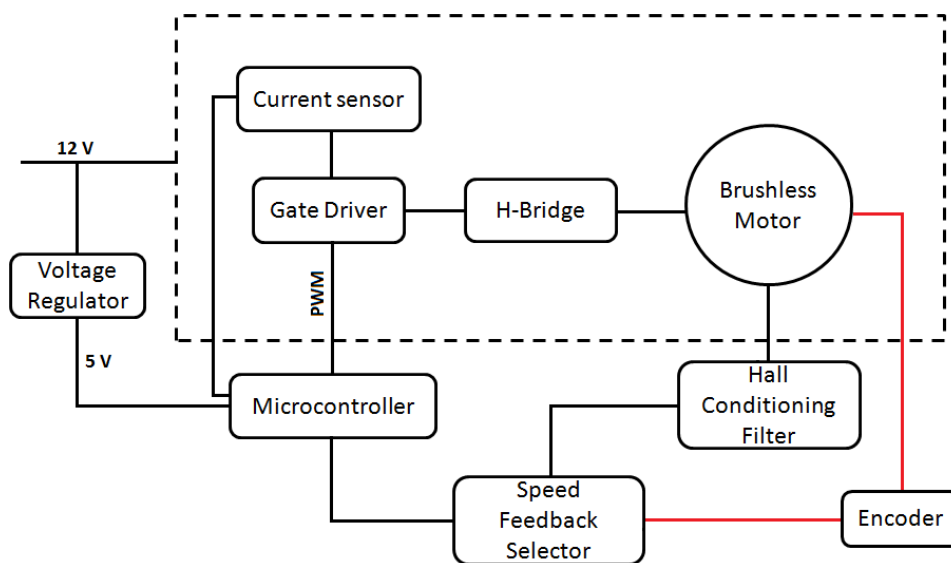
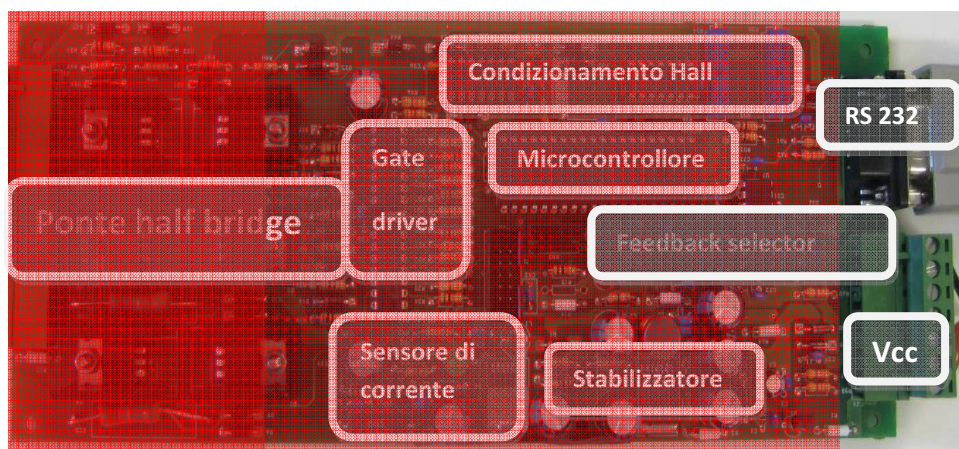
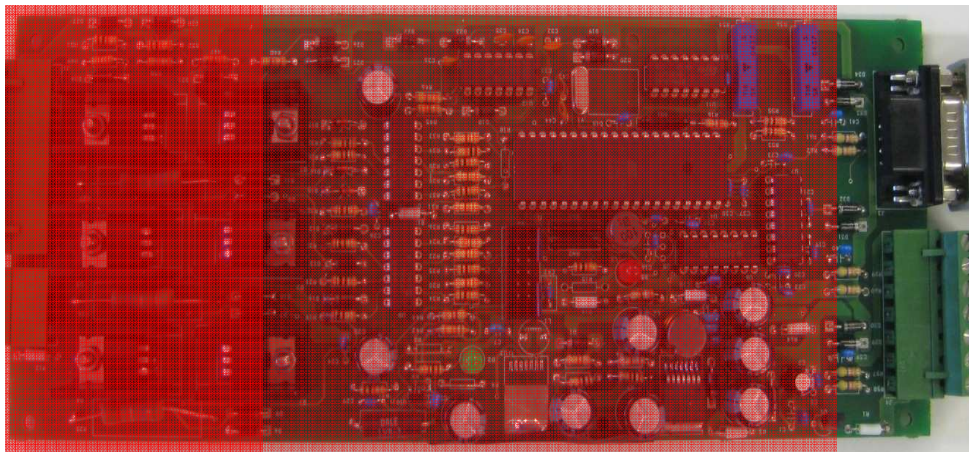


Fig. - 3.3 Schema a blocchi azionamento

La posizione e/o la velocità angolare che si desidera raggiungere viene inviata al microcontrollore che a sua volta confronta il movimento desiderato con una informazione che torna indietro dal motore, in particolare dall'encoder (ottico o magnetico) o dal sistema di sensori ad effetto hall della ruota di momento, la scelta tra i due possibili feedback è possibile grazie ad un “*feedback selector*” che invia poi il segnale retroazionato desiderato al microcontrollore. Se i due segnali, *set point* e segnale retroazionato, differiscono, il microcontrollore elabora una adeguata azione di controllo, tale da far seguire al motore elettrico il movimento desiderato. Al segnale di controllo generato e modulato opportunamente dal

microcontrollore mediante la tecnica PWM, corrisponde l'apertura o la chiusura di determinati *mosfet*, e in questo modo si ha la commutazione delle fasi necessaria al raggiungimento delle condizioni di posizione e velocità desiderate. Tra il microcontrollore ed il ponte *half-bridge* vi sono due *gate driver* che permettono la rapida commutazione delle fasi; in particolare si è utilizzato un *gate driver* relativo ai segnali destinati ai *mosfet* contrassegnati con la lettera "H" (*high*) ed un secondo *gate* relativo ai segnali destinati ai *mosfet* contrassegnati con la lettera "L" (*low*).



cipali)

Per quanto riguarda le misure che si effettuano sull'intero dispositivo, le misure sono di tipo elettrico, a monte del motore, o meccaniche, a valle del motore. Generalmente viene misurata la tensione di alimentazione del motore e la corrente assorbita dallo stesso come grandezze elettriche. Come grandezze meccaniche invece, la velocità di rotazione e la posizione dell'albero del motore. Le misure sono effettuate tramite un trasduttore che trasforma le misure meccaniche rilevate in grandezze elettriche compatibili con il micro controllore. La trasduzione può essere realizzata dai sensori ad effetto Hall integrati nella ruota di momento, oppure, nel caso in cui si voglia effettuare una misura più precisa, e con una miglior risoluzione, si ricorre all'utilizzo di un encoder ottico o magnetico che determina la velocità di rotazione del motore, analizzando, a seconda della tipologia, rispettivamente, l'alternanza degli impulsi luminosi "generati" in corrispondenza dei fori di un disco opaco rotante, solidale con l'albero motore, oppure, i rilevamenti dei passaggi di un magnete fissato su di un albero solidale con l'albero motore, effettuati da un sensore magnetico (vedi capitolo 2). Data la necessità di alimentare in maniera autonoma ogni ruota di momento/reazione e di provvedere, nel caso dei motori *brushless*, alla corretta commutazione della tensione sugli avvolgimenti, si rende necessario l'impiego di diversi azionamenti, ciascuno per ogni ruota di momento utilizzata. A seconda delle modalità di impiego, si distinguono in azionamenti a singolo quadrante (1-Q *device*), se il motore possiede un solo verso di rotazione, o a quattro quadranti (4-Q *device*) qualora fossero possibili entrambi i versi di rotazione nonché il frenaggio del motore in condizioni di emergenza.

### ***3.3 Cenni sulla componentistica dell'azionamento***

#### ***3.3.1 Il microcontrollore***

Il microcontrollore o *microcontroller* o MCU (*Micro Controller Unit*) è un dispositivo elettronico che integra in un solo chip tutti i circuiti necessari alla realizzazione di un sistema digitale programmabile completo di tipo *embedded* (o "*special purpose*") realizzato cioè per un compito specifici.

L'architettura del microcontrollore prevede un insieme di periferiche (fisse, ovvero comuni a tutti i modelli più una serie di possibili estensioni) tra le varie periferiche generiche ci sono:

- Unità di elaborazione (CPU);
- Porte: costituiscono le periferiche di base per la comunicazione da e verso l'esterno. Possono essere configurate come ingressi o uscite digitali, sono di tipo di I/O e/o GPIO.
- Memoria: permette di conservare dati anche in assenza di alimentazione e contiene anche il codice programma, può essere di tipo ROM, EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*: memoria non volatile, usata per memorizzare piccole quantità di dati che devono essere mantenuti quando viene tolta l'alimentazione), SRAM (*Static Random Access Memory*: tipo di RAM volatile che non necessita di *refresh* e che consentono di mantenere le informazioni per un tempo teoricamente infinito);
- ADC: *analog to digital converter*, in grado di convertire un segnale analogico con andamento continuo in una serie di valori discreti;
- Timer: sono sempre presenti e vengono utilizzati sia per generare ritardi finiti che per la misurazione di intervalli di tempo;
- PWM (*Power Width Modulation*): permette, utilizzando un timer di generare un segnale di comando PWM;
- JTAG: consente il *debug* del *firmware*, ovvero l'analisi e la rilevazione di eventuali errori nella sequenza di istruzioni;
- Moduli di comunicazione, interfacce analogiche o a tecnologia mista, interfacce di visualizzazione e controllo, comparatori analogici;
- UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*): ricevitore-trasmettitore asincrono universale usato per convertire flussi di bit di dati da un formato parallelo a un formato seriale asincrono o viceversa.).

Al termine di un'approfondita analisi condotta sui diversi microcontrollori presi in analisi, si è optato per l'ATMEGA 644, economico e facilmente reperibile sul mercato. L'ATMEGA 644 fa parte della famiglia dei microcontrollori AVR, è un microcontrollore a 8 bit su singolo chip basato su architettura, RISC (*Reduced Instruction Set Computer*). Tale soluzione

prevede un'architettura semplice e lineare che permette al microcontrollore di eseguire il set di istruzioni in tempi minori rispetto ad una classica architettura CISC, che presenta un set esteso di istruzioni con metodi di indirizzamento complessi.

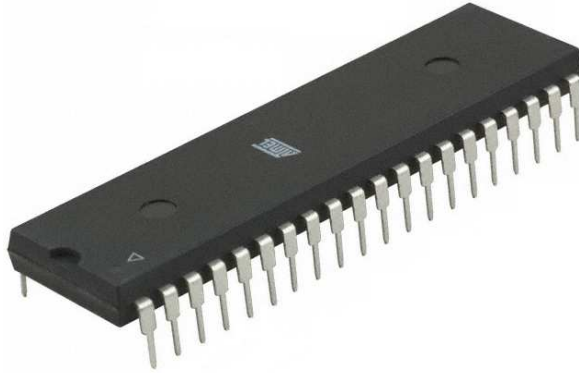


Fig. - 3.6 Microcontrollore ATMEGA 644

Il microcontrollore selezionato presenta le seguenti caratteristiche tecniche:

- 32 KBytes di memoria non volatile EEPROM
- 4Kbytes di memoria SRAM
- 32 linee di ingresso/uscita versatili del tipo “*general purpose*”
- *Real-time counter*
- 2 UART
- 6 Canali PWM
- Timer con oscillatore interno
- Periferica SPI
- 4 Porte

### 3.3.2 Il ponte *half-bridge*

Il “ponte H”, anche noto come “*half-bridge*” è un circuito elettrico costituito sostanzialmente da transistor che gestiscono il passaggio delle correnti relative alle fasi del motore e che ne comandano quindi lo stato. Oltre ai transistor, come mostrato in figura 3.7, sono utilizzati, in parallelo con ciascuno di essi, diodi di sicurezza che impediscono eventuali inversioni indesiderate di corrente sui rami, dunque il loro compito principale è quello di richiudere sull'alimentazione le correnti degli avvolgimenti quando i transistor vengono bruscamente interdetti, producendo così un effetto equivalente a una forza controelettromotrice e un comportamento analogo a quello di un motore a magneti permanenti con caratteristica meccanica lineare (coppia decrescente linearmente in funzione della velocità angolare): il motore senza spazzole, come il motore a collettore, presenta pertanto una velocità di rotazione a vuoto proporzionale alla tensione applicata.

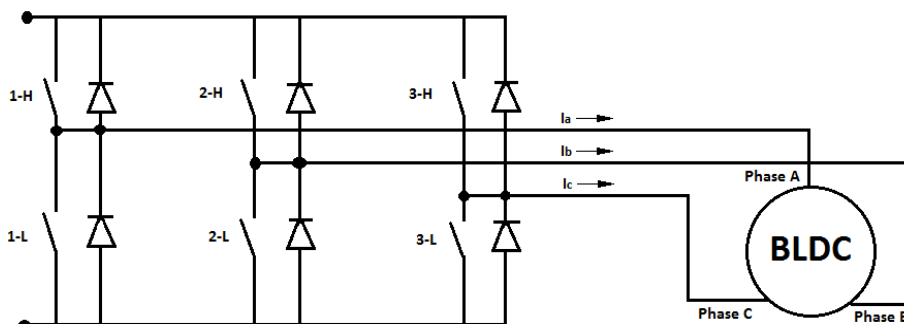


Fig. - 3.7 Il ponte “half-bridge”

### 3.3.3 La parzializzazione PWM

La parzializzazione o PWM (*Pulse Width Modulation*) è il tipo di amplificazione di potenza universalmente adottato per il controllo dei motori elettrici in corrente continua di tutti i tipi (con collettore, senza spazzole o passo passo). Il PWM consiste nella commutazione ad alta frequenza dei dispositivi elettronici di potenza (*transistor* bipolari o *mosfet*) che alimentano gli avvolgimenti del motore fra la piena conduzione e l'interdizione, in modo da ottenere un valor medio corrispondente alla

regolazione di tensione voluta, ma con bassa dissipazione di potenza. Le caratteristiche filtranti del circuito a valle, rendono trascurabili le corrispondenti fluttuazioni di corrente. La tecnica PWM si fonda sul concetto di modulazione: in generale la modulazione consiste nel modificare le caratteristiche di un segnale, detto “portante”, in funzione di un altro segnale, detto “modulante”; la forma d’onda che si ottiene in questo modo è detta segnale modulato. Scopo della modulazione è quello di trasformare un segnale in un altro di forma più appropriata per essere utilizzato per determinate finalità. Nella modulazione di larghezza ad impulsi (PWM) è la larghezza (durata) degli impulsi che varia in funzione dell’informazione, mantenendo costanti l’ampiezza e il periodo, tutto ciò offre il vantaggio di un più alto rendimento, potendo il trasmettitore lavorare a livelli di saturazione. Un metodo per ottenere la modulazione PWM è dimostrato in figura 3.8.

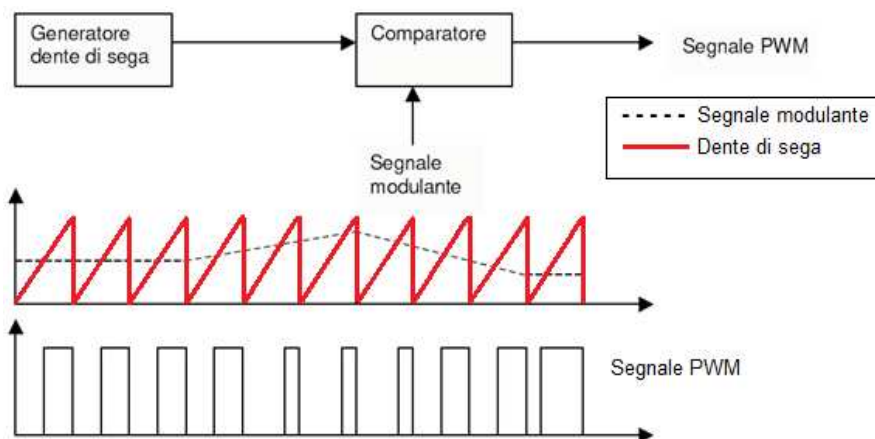


Fig. – 3.8 La parzializzazione PWM

Una forma d’onda a dente di sega è applicata al comparatore, il cui livello di soglia è funzione del segnale modulante e quindi lo sarà anche la durata degli impulsi all’uscita del comparatore; la demodulazione può essere ottenuta applicando il segnale PWM ad un filtro passa basso. Il passaggio da questo sistema analogico ad un sistema digitale è molto simile: in un microcontrollore la forma d’onda a dente di sega corrisponde al valore di un timer ed il comparatore corrisponde ad un registro che contiene il valore di “match”/ “compare”.



### 3.3.4 Lo stabilizzatore di tensione

Lo stabilizzatore di tensione permette di ottenere delle tensioni positive stabilizzate a valori fissi. Questo consente di fornire ai vari componenti del circuito la giusta tensione alimentando così carichi che richiedono una tensione di alimentazione diversa da quella nominale (in particolare più bassa). L'elemento scelto in questione è l'LM 7805. Questo integrato che ha dimensioni identiche a quelle di un normale transistor di media potenza presenta tre soli pin: il pin di entrata, indicato con "Input" o "Vin", riceve la tensione positiva da stabilizzare, che in questo caso è di 12 volt, prelevata dall'alimentazione (generalmente da un ponte raddrizzatore provvisto del suo condensatore elettrolitico di livellamento), il pin di regolazione indicato con "GND" perché connesso a massa, viene utilizzato per variare la tensione d'uscita al valore desiderato, nel caso in questione la tensione viene ridotta fino ad avere un valore pari a 5 volt, il pin di uscita, indicato con "Output" o "Vout", è quello da cui si preleva la tensione stabilizzata, ovvero 5 volt (tensione di cui è necessario disporre per poter alimentare una parte del carico del circuito come ad esempio il micro controllore).

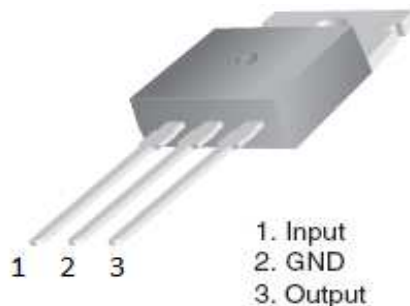


Fig. - 3.9 Stabilizzatore di tensione LM 7805

### 3.3.5 Altri componenti

Nel circuito dell'azionamento compaiono inoltre altri componenti quali: un sensore di corrente INA194 che misura la caduta di tensione su una resistenza di misura Dale LVR-3 percorsa dalla corrente inizialmente incognita, in modo tale da ricavare la corrente che attraversa la resistenza e che attraversa i *mosfet*. L'informazione sulla corrente misurata viene inviata



come feedback al microcontrollore che la gestisce attraverso la tecnica PWM. Vi è poi un filtro per sensori ad effetto Hall 74HC14 ed un selettore di feedback 74HC157 che ha il compito di selezionare l'ingresso desiderato a seconda che si voglia effettuare la misura di velocità utilizzando il sistema di sensori ad effetto hall integrati nel motore oppure l'encoder (ottico o magnetico) realizzato appositamente in laboratorio.

### ***3.4 Le tecniche di controllo del motore brushless***

Il controllo del motore *brushless* può essere effettuato attraverso la tecnica trapezoidale o la tecnica sinusoidale. Tali tecniche differiscono tra loro per la forma d'onda della corrente imposta dal convertitore e per la forma d'onda della forza controelettrica di fase. Quest'ultima dipende dalla disposizione degli avvolgimenti statorici e dalla disposizione/forma dei magneti rotorici. Un'ulteriore differenza legata alla tecnica di controllo si ha nell'elettronica di controllo e nel trasduttore di posizione rotorica: la tecnica trapezoidale impiega sensori ad effetto Hall, mentre la tecnica sinusoidale si avvale di *resolver* ad albero cavo. La tecnica di controllo sinusoidale è più complessa e costosa di quella trapezoidale ma comporta minore ondulazione di coppia e quindi una rotazione molto dolce alle basse velocità, migliore rendimento e maggiore risoluzione nei controlli di posizione.

Nella tecnica sinusoidale l'inverter, generalmente di tipo PWM sinusoidale a tensione impressa, alimenta contemporaneamente tutte e tre le fasi del motore imponendo a regime, con l'ausilio di tre anelli di corrente, una terna equilibrata di correnti, ad andamento sinusoidale, le cui fasi sono rigidamente vincolate alla posizione del rotore e pertanto il vettore rappresentativo del relativo campo magnetico rotante statorico risulta di ampiezza costante e sempre in quadratura rispetto a quello rotorico. L'inverter quindi, oltre a regolare l'ampiezza e la frequenza delle correnti come nella tecnica di controllo trapezoidale ha il compito aggiuntivo di realizzare forme d'onda sinusoidali. L'azionamento richiede quindi due sensori di corrente (la corrente nella terza fase è uguale all'inverso della loro somma) e un sensore di posizione ad alta risoluzione (*resolver* o *encoder* assoluto), in quanto per effettuare con continuità la funzione di

autosincronizzazione è necessaria una accurata misura della posizione. Tuttavia, a causa del maggior costo e della mancata necessità di avere dolcezza di coppia alle basse velocità, si è scelto di adottare la tecnica di controllo trapezoidale, che si presta meglio a questa tipologia d’impiego. Tale tecnica sarà analizzata in maniera approfondita nel paragrafo seguente.

### 3.4.1 La tecnica di controllo trapezoidale

La tecnica adottata per il controllo del motore è la cosiddetta “tecnica trapezoidale”, prima ad esser stata sviluppata, ma ancora largamente usata per la sua semplicità di applicazione dove sono tollerabili ondulazioni di una certa entità della coppia sviluppata, essa viene utilizzata in pratica solo per i *brushless* trapezoidali, la cui struttura elettromagnetica è tale da generare a regime una f.c.e.m. (forza controelettromotrice) di forma idealmente trapezoidale. Tale tecnica di controllo è caratterizzata dal fatto che l’inverter alimenta solo due fasi per volta del motore con correnti aventi a regime andamenti idealmente rettangolari (di ampiezza regolabile ed estensione pari a 120° elettrici) con valore nullo negli intervalli in cui la corrispondente f.c.e.m. di fase é variabile. La corrente di ciascuna fase assume nel tempo i seguenti stati successivi: positiva, nulla e negativa. La corrente viene controllata attraverso due dei tre terminali con il terzo elettricamente disconnesso dall'alimentazione. Nella tabella sottostante sono stati riportati i versi delle correnti degli avvolgimenti interessati relativamente alla corrispondente sequenza di *mosfet* chiusi.

Coils		HIGH SIDE			LOW SIDE		
		H1	H2	H3	L1	L2	L3
A(-)	C(+)	1	0	0	0	0	1
A(-)	B(+)	1	0	0	0	1	0
C(-)	B(+)	0	1	0	1	0	0
C(-)	A(+)	0	1	0	0	0	1
B(-)	A(+)	0	0	1	1	0	0
B(-)	C(+)	0	0	1	0	1	0

**Tab. - 3.1 Andamento delle correnti in corrispondenza delle combinazioni di chiusura dei *mosfet* “High” e “Low”, i simboli (+) e (-) indicano rispettivamente una corrente uscente o entrante nell’avvolgimento interessato.**

Pertanto nel motore *brushless* con controllo trapezoidale, dato che si ha sempre una fase con corrente positiva, una con corrente negativa ed una con corrente nulla, il vettore rappresentativo del campo magnetico statorico non si muove con continuità ma può assumere solo 6 posizioni spaziali. Lo stato delle fasi è rappresentato nella figura sottostante ove ad ognuno dei sei settori corrisponde un'ampiezza di  $60^\circ$  relativa alla posizione del rotore.

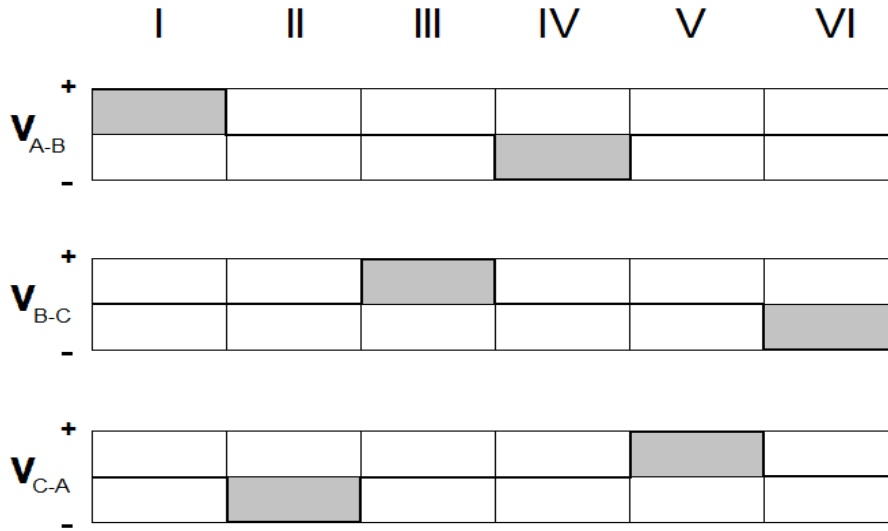


Fig. - 3.10 Andamento delle tensioni di fase

Ne consegue che il vettore rappresentativo del campo rotante statorico non può mantenersi ortogonale a quello rotorico, ma il relativo sfasamento assume valori variabili con continuità tra  $120^\circ$  e  $60^\circ$  elettrici seguiti da una variazione a gradino da  $60^\circ$  a  $120^\circ$ .

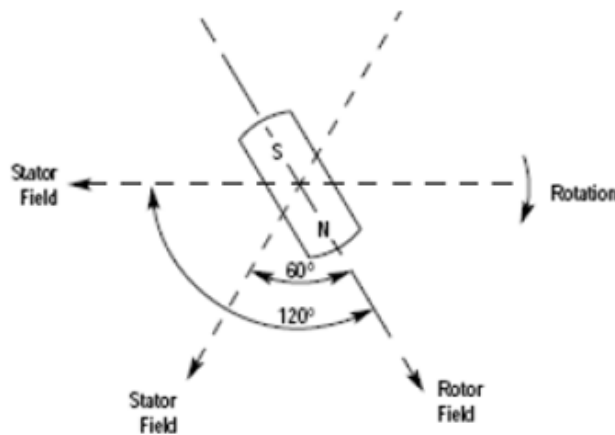


Fig. - 3.11 Sfasamento tra il campo magnetico statorico e quello rotorico

Pertanto per il controllo della commutazione delle fasi è sufficiente individuare il "sesto" di angolo giro elettrico in cui si trova il vettore rappresentativo del campo magnetico rotorico utilizzando sensori di posizione ad effetto Hall oppure un encoder incrementale (ottico o magnetico). Per i primi test si è scelto di adottare la soluzione con tre sonde ad effetto Hall disposte sulla parte stazionaria del motore, normalmente sulla calotta di chiusura situata in corrispondenza dall'estremità dell'albero non connessa alla macchina azionata. In tal modo ogni sonda Hall genera uno determinato stato logico (alto o basso) per ognuno dei sei settori analizzati. Gli stati logici di ciascun sensore per ogni settore è riportato nella seguente figura:

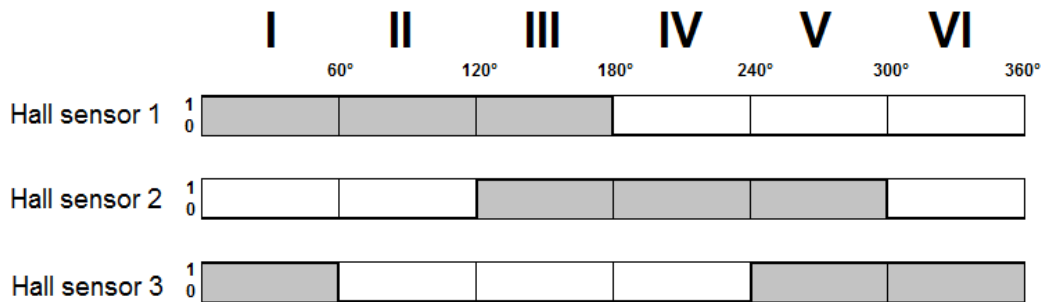


Fig. - 3.12 Stati logici dei sensori Hall nelle diverse posizioni del rotore

L'inserzione dei sensori di Hall nello statore è un processo complicato perché un loro non corretto allineamento rispetto ai magneti rotorici genererebbe un errore nella determinazione della posizione del rotore. Per semplificare il processo di montaggio sullo statore dei sensori di Hall, alcuni motori hanno sul rotore dei magneti aggiuntivi, replica in scala ridotta di quelli principali, che facilitano il corretto allineamento dei sensori di Hall, al fine di ottenere le migliori prestazioni. Ogni volta che un polo magnetico rotorico passa in prossimità di un sensore di Hall, questo dà in uscita un segnale digitale alto o basso, a seconda che si tratti di un polo Nord o di un polo Sud. Pertanto ciascuno dei tre fornisce in uscita un segnale digitale che cambia stato ad ogni rotazione (del rotore) di ampiezza pari a 180°.

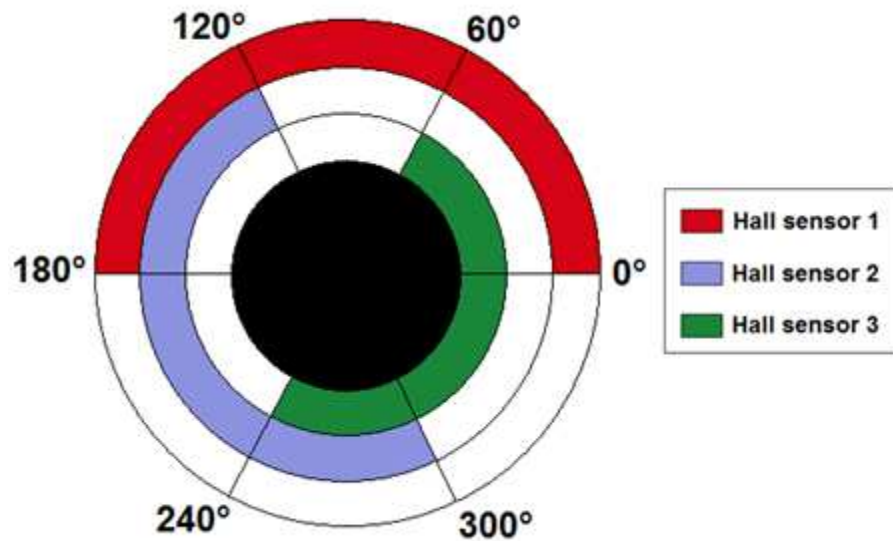


Fig. - 3.13 Stato logico “alto” dei tre sensori hall

In base alla combinazione dei segnali logici forniti dai tre sensori di Hall, può essere determinata l'esatta sequenza delle commutazioni, che si verificano in corrispondenza degli assi interpolari. Ad ogni rotazione di  $180^\circ$  del rotore, un sensore di Hall effettua una transizione della risposta: da basso a alto o da alto a basso. Tali sensori sono sfasati di  $120^\circ$  e quindi per ogni rotazione completa del rotore possiamo individuare, in funzione delle risposte dei sensori, sei settori (di ampiezza pari a  $60^\circ$ ), a cui corrispondono sei combinazioni di accensione e spegnimento dei 6 tasti del ponte H. La tabella 4.2 mostra i sei codici a tre bit, generati dalla sovrapposizione delle uscite dei tre sensori, corrispondenti a ciascuna fase di comando.

Settore	Binario	HS1	HS2	HS3
1	101	1	0	1
2	100	0	0	1
3	110	1	1	0
4	10	0	1	0
5	11	0	1	1
6	1	0	0	1

Tab. 3.2 – Stato logico dei sensori Hall in corrispondenza dei diversi settori

Gli ingressi dei sensori, come si è detto, sono tra loro sfasati di  $120^\circ$  e ogni sequenza ha due avvolgimenti connessi all'alimentazione e il terzo avvolgimento lasciato aperto. A titolo esplicativo, nel settore 1 corrispondente al codice binario 101 fornito dai sensori Hall, la fase B è connessa al polo positivo dell'alimentazione, la fase A è connessa al polo negativo, mentre la fase C è lasciata aperta. Per ottenere ciò i mosfet "L1" e "H2" dovrebbero essere chiusi e tutti gli altri dovrebbero restare aperti.

Il rotore ruoterà di  $60^\circ$  nella data direzione. Il ciclo elettrico si ripete ogni paio di poli rotorici; pertanto per una completa rotazione dell'albero, i 6 passi dovrebbero essere ripetuti tante volte quante sono le paia di poli rotorici. Essendo la f.c.e.m. proporzionale alla velocità angolare e la coppia alla corrente, il funzionamento del brushless trapezoidale è quindi assimilabile a quello di un motore a corrente continua con eccitazione separata.

# 4

## **TEST**

### *4.1 CENNI SUL FUNZIONAMENTO DEL SOFTWARE DI BORDO*

#### *4.2 LA ROUTINE DEI TEST*

#### *4.3 IL CONTROLLORE PID*

#### *4.4 ANALISI DELLE PRESTAZIONI DEL MOTORE*

#### *4.5 I SOFTWARE DI CONTROLLO*

### ***4.1 Cenni sul funzionamento del software di bordo***

L'algoritmo realizzato permette di controllare la velocità del motore tramite un algoritmo PID implementato su un microcontrollore, nello specifico il modello ATMEGA 644 della ATMEL. Il software si prefigge di determinare la velocità di rotazione del motore e di controllarla tramite l'attuazione PWM sulla quale è possibile agire per raggiungere la velocità di *set-point*. Nella versione realizzata è dunque possibile variare il valore del *set-point* e il valore delle costanti presenti nell'algoritmo di controllo PID (ovvero la costante proporzionale, integrativa e derivativa). Tramite tale algoritmo in forma discreta è possibile calcolare un valore che rappresenta la corrente che si dovrebbe fornire al motore per permettergli di raggiungere la velocità di *set-point* stabilita. Il microcontrollore gestisce quindi la potenza fornita tramite una modulazione d'impulso, ovvero la suddetta attuazione PWM. Un parametro che caratterizza il segnale ad onda quadra generato è il "duty cycle" definito come rapporto tra la durata del segnale "alto" e il periodo totale del segnale, e serve a esprimere per quanta porzione di periodo il segnale è a livello alto. Dunque si ha:

$$D = \frac{\tau}{T}$$

ove  $\tau$  è la porzione di periodo a livello alto, mentre  $T$  è il periodo totale del segnale. Il risultato del rapporto è sempre un numero compreso tra 0 e 1.

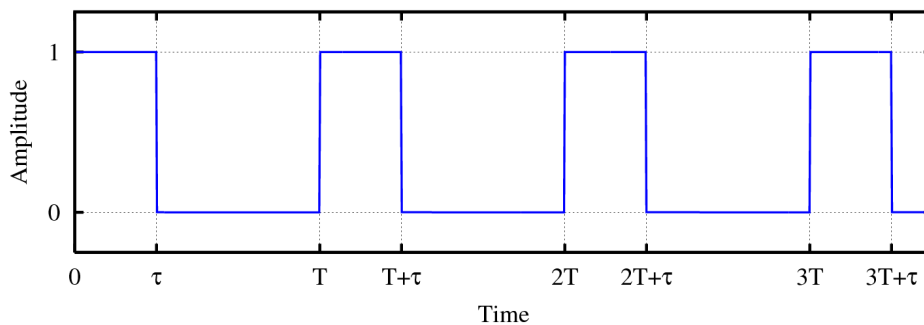


Fig. 4.1 - Segnale costituente un'onda rettangolare, in evidenza il suo duty cycle

Nel caso in cui si abbia un *dutycycle* pari a "0" o "1" si è in presenza di segnali continui. Nel caso in esame il segnale ad onda quadra ha un *dutycycle* variabile e il motore viene alimentato solo quando il valore logico di questo segnale è alto. Quindi quando il *dutycycle* è al 100% (valore logico sempre alto) il motore è alimentato al massimo mentre quando è allo 0% (valore logico sempre basso) il motore non è alimentato e continua a girare per inerzia finché non si arresta a causa dell'attrito. Tuttavia l'implementazione del codice C che costituisce il programma su cui si basa il funzionamento del microcontrollore non è oggetto di studio di questa trattazione. Gli obiettivi che invece ci si propone di raggiungere con il presente elaborato sono stati nell'ordine: la realizzazione dei diversi elementi costitutivi dell'hardware alla base controllo del motore della ruota di momento (ovvero l'azionamento elettrico e i due encoder per la lettura delle velocità) e in seguito mostrare una stima degli andamenti delle grandezze d'interesse in relazione ai dati acquisiti empiricamente al variare dei parametri del controllore, e dunque analizzare il comportamento dell'azionamento realizzato facendo variare le grandezze d'interesse relative al software, da un punto di vista esclusivamente qualitativo.

## 4.2 I test effettuati

La procedura seguita per verificare il corretto funzionamento dell'azionamento elettrico, ed il modo in cui il software pilota quest'ultimo,



ha previsto in primo luogo la determinazione dell'esatta sequenza di chiusura dei *mosfet* del ponte *half bridge*, utile per porre in rotazione l'albero nel verso desiderato, in secondo luogo si sono analizzate propriamente le prestazioni del motore, ovvero le risposte che lo stesso fornisce a seconda del comando posto in ingresso. Tale ingresso è rappresentato dai valori di velocità di *set point* che si auspicava di raggiungere in tempi relativamente ridotti e con una certa stabilità. In particolare le suddette prove sono state effettuate "a vuoto", ovvero in assenza di carico, e successivamente applicando al motore il suo carico nominale (volano). Tutte le prove sono state effettuate analizzando le prestazioni fornite dal motore non solo al variare delle velocità di comando in ingresso, ma anche variando le grandezze relative al controllore ovvero i tre parametri costitutivi del PID (Proporzionale-Integrativo-Derivativo).

#### 4.2.1 Determinazione della sequenza di chiusura dei mosfet

Per portare in rotazione un motore BLDC (Brushless DC motor), gli avvolgimenti statorici devono essere energizzati in una data sequenza; a tal fine è fondamentale conoscere gli istanti in corrispondenza dei quali si deve effettuare la commutazione delle correnti, istanti che dipendono dalla posizione del rotore individuata dai sensori *hall* e in particolare dalla combinazione delle uscite di tali sensori. La posizione desiderata viene raggiunta a partire dal comando imposto mediante la variazione delle tensioni di fase (dovute all'inversione delle correnti negli avvolgimenti). Per quanto riguarda i segni delle tensioni si è adottata la convenzione indicata nello schema seguente:

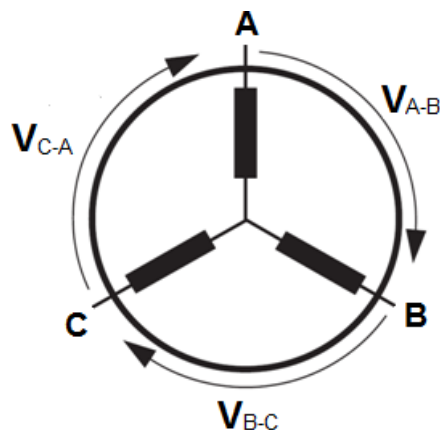


Fig. 4.2 - Tensioni di fase: convenzione adottata

Per determinare la sequenza di chiusura degli interruttori rappresentati dai sei *mosfet* del ponte *half-bridge*, necessaria a porre in rotazione l'albero nel verso desiderato, si sono analizzate le uscite dei tre sensori ad effetto *hall* in corrispondenza delle diverse posizioni dell'albero, ottenute imponendo diverse combinazioni di chiusura dei *mosfet*. Si è poi codificato un codice binario corrispondente a ciascuna delle sei posizioni angolari possibili per l'albero. Il microcontrollore dovrà quindi pilotare il motore seguendo la corretta sequenza di chiusura dei sei *mosfet*, ottenuta con questa prova sperimentale, basandosi sulla lettura del codice binario codificato in base ai segnali "alto-basso" dei tre sensori ad effetto *hall* integrati all'interno del motore. Dunque si è realizzato preliminarmente una *demo-board* costituita principalmente dal ponte *half-bridge* in cui la chiusura (o l'apertura) dei *transistor* viene effettuata manualmente attraverso pulsanti di tipo "NO" (*Normally Opened*) e dei relativi componenti. La *demo-board* è stata montata su un semplice supporto munito di mascherina in plexiglass e distanziali in gomma per garantire l'isolamento elettrico come mostrato in figura 4.2.

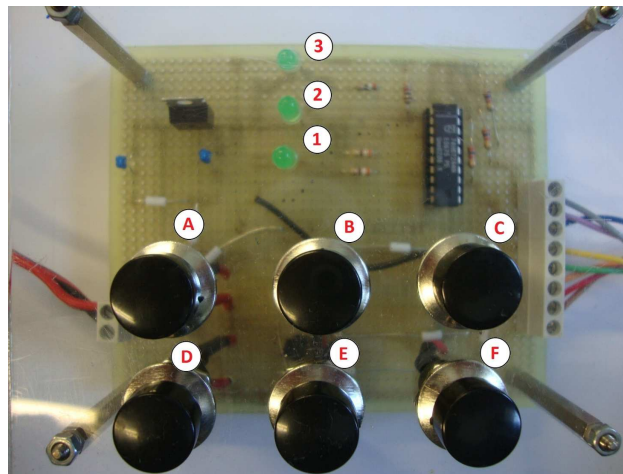


Fig. 4.3 – Azionamento elementare realizzato (vista dall'alto)

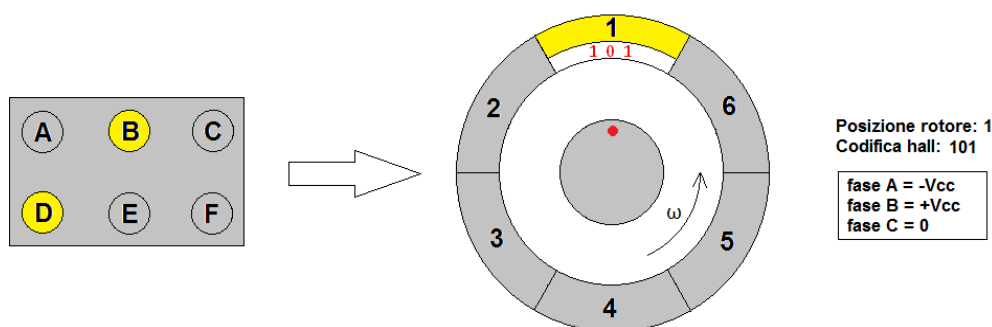
La finalità di tale esperimento è stata, dunque, l'acquisizione dei segnali relativi ai tre sensori, ciascuno collegato ad un diodo led, in modo tale da determinare la corretta sequenza di chiusura degli interruttori comandando manualmente l'azionamento elementare.

Di seguito si riportano i risultati ottenuti:

Mosfet chiusi	Hall sensor 1	Hall sensor 2	Hall sensor 3	Posizione rotore
A-D	-	-	-	ND
A-E	-	✓	-	4
A-F	-	✓	✓	5
B-D	✓	-	✓	1
B-E	-	-	-	ND
B-F	-	-	✓	6
C-D	✓	-	-	2
C-E	✓	✓	-	3
C-F	-	-	-	ND

Tabella 4.1: Risposta dei sensori in corrispondenza delle diverse combinazioni di chiusura dei mosfet. In corrispondenza delle sequenze A-D, B-E, C-F la scrittura “ND” indica che il settore non è definito in quanto si è in presenza di cortocircuito e quindi non si invia nessun comando al motore.

Dall’osservazione dei risultati riportati nella tabella 4.1 segue che volendo porre in rotazione l’albero (nel verso di rotazione indicato), l’esatta sequenza della combinazione di chiusura degli interruttori del circuito siffatto sarà: BD, CD, CE, AE, AF, BF e infine nuovamente BD per completare la rotazione: per comandare un motore *brushless* è indispensabile conoscere la posizione tramite la codifica dei sensori Hall. Nota la posizione è possibile energizzare di conseguenza gli avvolgimenti. Il controllo della posizione del motore e l’attuazione della corrispondente fase devono essere eseguire nel più breve tempo possibile. Di seguito si riporta l’esatta sequenza di chiusura dei *mosfet* per ciascuna posizione del rotore e i valori dei relativi parametri.



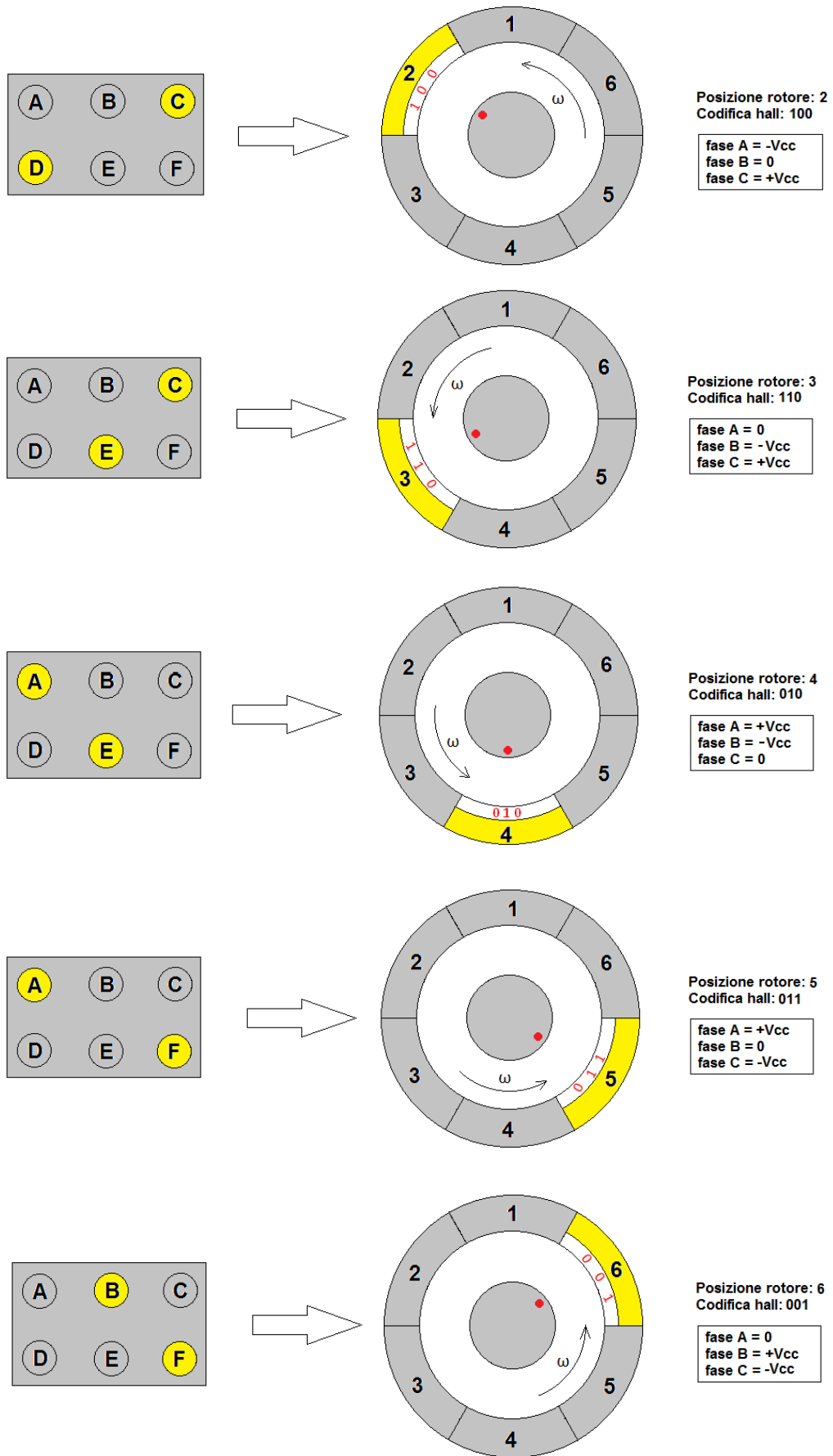


Fig. 4.4 – Sequenza esatta di chiusura dei mosfet

### 4.2.2 Analisi prestazionale del motore

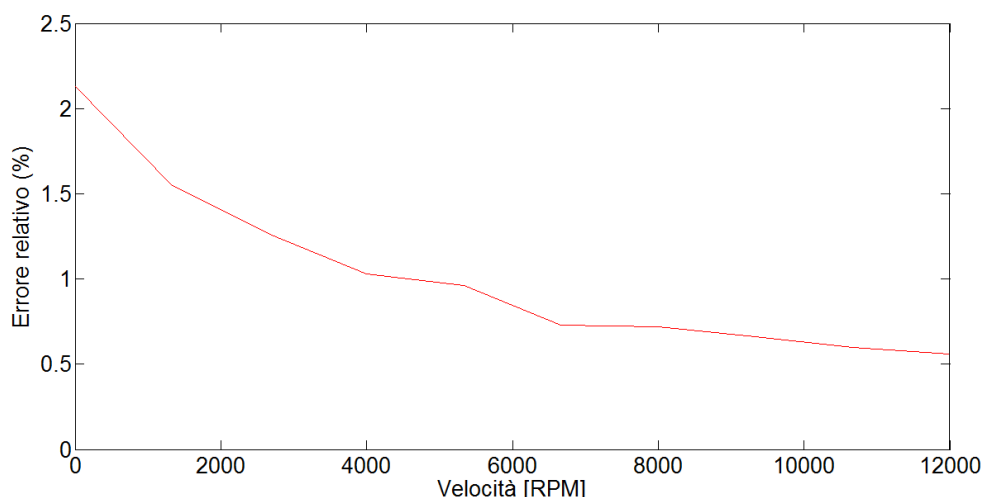
Prima di procedere con l'analisi qualitativa del comportamento del motore al variare dei parametri costitutivi del controllore PID implementato nel software, si è eseguita la verifica del funzionamento dell'hardware, ovvero il funzionamento dell'azionamento elettrico pilotato dal relativo software di comando. Si sono dunque analizzate le risposte fornite dal motore a seguito di un comando imposto in ingresso al software. Tale prova è stata effettuata verificando la capacità del motore di raggiungere e mantenere a regime la velocità imposta in ingresso con un errore relativo accettabile. Questo tipo di test è stato effettuato "a vuoto" ovvero non applicando al motore il suo carico nominale (volano), questo perché l'esperimento si proponeva di mostrare la "compatibilità" del software con l'hardware, o meglio la capacità dell'azionamento realizzato, di interpretare correttamente i comandi imposti. Si è quindi pilotato l'azionamento imponendo in ingresso valori di velocità variabili da 1000 *rpm* fino ad un massimo di 12000 *rpm* analizzando non i transitori, bensì il comportamento a regime individuando qualitativamente l'entità di un eventuale *offset* rispetto al valore desiderato e dunque l'errore relativo riscontrato. Si è proceduto quindi con l'acquisizione dei dati, campionando i dati con una frequenza di circa 100Hz, per circa 60 secondi. I risultati ottenuti sono riportati nella seguente tabella:

Comando	Risposta			
	Velocità media	Velocità massima	Velocità minima	Errore (%)
12000	11932	12180	11507	0.56
11000	10954	11154	10582	0.41
10000	9934	10005	9995	0.66
9000	8935	9165	8550	0.72
8000	7942	8149	7578	0.73
7000	6933	7160	6598	0.96
6000	5938	6275	5603	1.03
5000	4937	5385	4510	1.26
4000	3938	4169	3614	1.55
3000	2936	3200	2642	2.13

**Tabella 4.2** Risposte fornite dal motore in corrispondenza delle diverse velocità (*rpm*)

Dai risultati ottenuti si può osservare come l'errore relativo sia inversamente proporzionale alla velocità di rotazione del motore, il controllo riesce dunque a ridurre l'*offset* tra il valore della velocità (media) ottenuta e la velocità di riferimento imposta in ingresso man mano che si incrementa la quest'ultima. In particolare si riscontra un errore percentuale minimo in corrispondenza del valore di velocità pari ad 11000 *rpm*. Per valori di velocità inferiori ai 3000 *rpm* si ottiene una risposta con un *offset* elevato e con un errore relativo macroscopico, questo aspetto mostra i limiti del controllo del motore per bassi regimi di rotazione ove si riscontra inoltre il fenomeno del *ripple*. Tuttavia tale aspetto non risulta essere pregiudicante per l'azionamento realizzato nel caso di impiego dello stesso per ruote di momento che hanno velocità nominali di funzionamento solitamente superiori ai 3000 *rpm*. Al contrario ciò potrebbe costituire un limite notevole per un azionamento che controlla la velocità di una ruota di reazione che ha invece una velocità nominale nulla e che richiede un buon comportamento del sistema per basse velocità di rotazione in termini di coppia e precisione di controllo.

Di seguito si riporta l'andamento dell'errore relativo percentuale in funzione delle diverse velocità:



**Fig 4.5 – Andamento dell'errore relativo percentuale ai diversi regimi di velocità**

Per quanto riguarda invece il fenomeno del "*ripple*" (rumore di fondo) inteso come quantità di disturbo di tipo *random*, si osserva che il fenomeno presenta un'intensità maggiore nel *range* di velocità compreso tra gli

3000rpm e gli 6000rpm mentre per alti regimi di rotazione del motore il fenomeno è più contenuto.

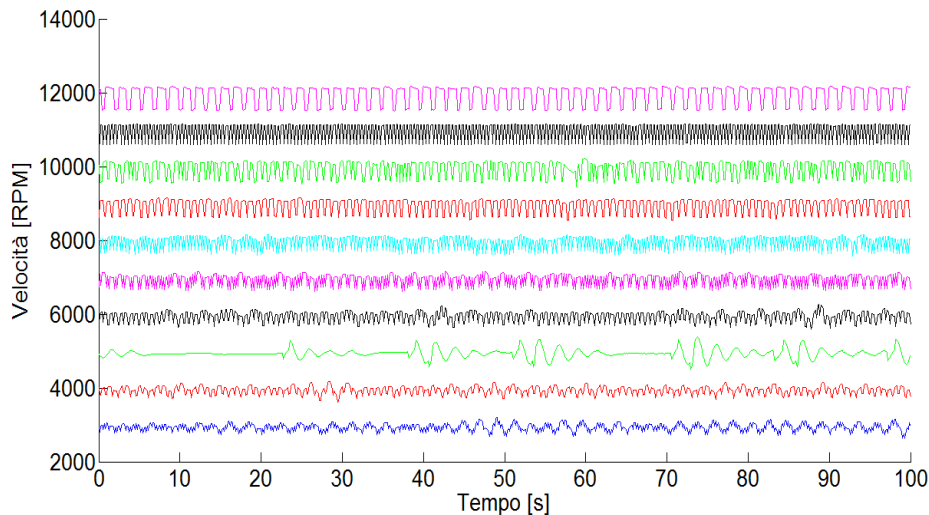


Fig 4.6 – Analisi delle risposte a regime

Significativo è invece il comportamento in corrispondenza della velocità 5000rpm ove la frequenza di *ripple* risulta vistosamente più bassa. Questo aspetto risulta particolarmente interessante perché potrebbe suggerire il valore di velocità nominale ottimale in base al quale si può fissare il regime di funzionamento per una ruota di momento che, a differenza di una ruota di reazione, ha una velocità nominale di funzionamento non nulla, restando perennemente in funzione.

### 4.3 Il controllore PID

Il metodo di controllo “Proporzionale-Integrale-Derivativo”, comunemente abbreviato come PID, è un sistema in retroazione negativa ampiamente impiegato nei sistemi di controllo. Grazie a un *input* che determina il valore attuale è in grado di reagire a un eventuale errore positivo o negativo tendendo verso il valore 0. La reazione all'errore può essere regolata, e ciò rende questo sistema molto versatile: il controllore acquisisce in ingresso un valore da un processo e lo confronta con un valore di riferimento, la differenza (il cosiddetto segnale di errore) viene quindi usata per

determinare il valore della variabile di uscita del controllore, che è la variabile manipolabile del processo.

Il PID regola l'uscita in base a:

- valore del segnale di errore (azione proporzionale);
- valori passati del segnale di errore (azione integrale);
- quanto velocemente il segnale di errore varia (azione derivativa).

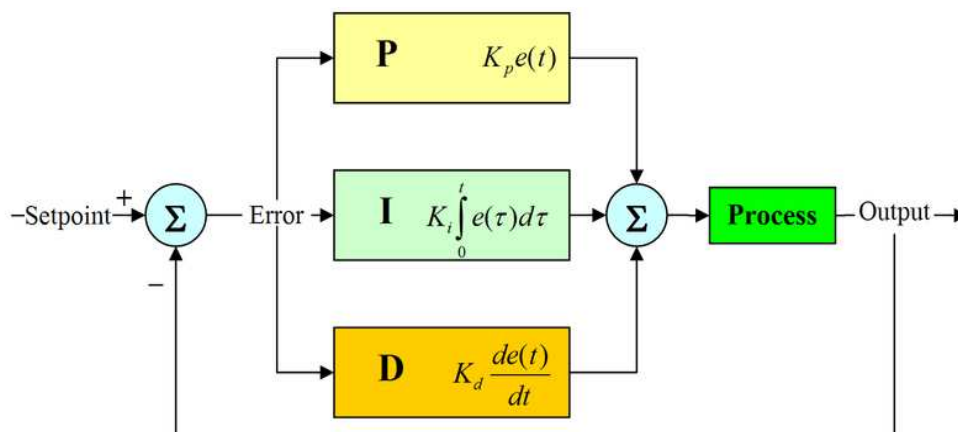


Fig 4.7 – Schema a blocchi del controllore PID

La taratura dei parametri avviene di solito attraverso semplici regole empiriche, come i metodi di Ziegler-Nichols, che risultano in controllori stabilizzanti di buone prestazioni per la maggior parte dei processi. Talvolta l'azione derivativa viene rimossa, ottenendo il comunissimo controllore PI.

Le tre azioni di un PID vengono calcolate separatamente e semplicemente sommate algebricamente in modo tale da avere un'uscita "u" definita come:

$$u = u_P + u_I + u_D$$

- Azione proporzionale: è ottenuta moltiplicando il segnale d'errore "e" con un'opportuna costante:  $u_P = K_P e$ . È possibile regolare un processo con un simile controllore, che risulta anche in grado di stabilizzare processi instabili. Tuttavia, non è possibile garantire che il segnale d'errore "e" converga a zero: questo perché un'azione di controllo "u" è possibile solo se "e" è diverso da zero.



- Azione integrale: è proporzionale all'integrale nel tempo del segnale di errore "e", moltiplicato per la costante  $K_I$ :

$$u_I = K_I \int e(t) dt$$

Questa definizione dell'azione integrale fa sì che il controllore abbia memoria dei valori passati del segnale d'errore; in particolare, il valore dell'azione integrale non è necessariamente nullo se è nullo il segnale d'errore. Questa proprietà dà al PID la capacità di portare il processo esattamente al punto di riferimento richiesto, dove la sola azione proporzionale risulterebbe nulla. L'azione integrale è anche l'elemento metastabile di un PID, perché un ingresso costante non convergerà a un determinato valore. Il fenomeno del *windup* è dovuto alla presenza dell'integratore.

- Azione derivativa: ha lo scopo di migliorare le prestazioni del controllore:

$$u_D = K_D \frac{de}{dt}$$

L'idea è compensare rapidamente le variazioni del segnale di errore: se si osserva che "e" sta aumentando, l'azione derivativa cerca di compensare questa deviazione in ragione della sua velocità di cambiamento, senza aspettare che l'errore diventi significativo (azione proporzionale) o che persista per un certo tempo (azione integrale). L'azione derivativa è spesso tralasciata nelle implementazioni dei PID perché li rende troppo sensibili: un PID con azione derivativa, per esempio, subirebbe una brusca variazione nel momento in cui il riferimento venisse cambiato quasi istantaneamente da un valore a un altro, risultando in una derivata di "e" tendente a infinito, o comunque molto elevata. Ciò sconsiglia l'applicazione dell'azione derivativa in tutti i casi in cui l'attuatore fisico non deve essere sottoposto a sforzi eccessivi. Se ben tarata e se il processo è abbastanza "tollerante" l'azione derivativa può dare un contributo determinante alle prestazioni del controllore.

#### 4.4 Test prestazionale al variare dei parametri del PID

L'azione di controllo si esplica dimensionando opportunamente le costanti del controllore PID, quindi " $K_p$ ", " $K_d$ " e " $K_i$ " in modo tale da ottenere un controllo ottimale del motore. Quello che ci si aspetta è che al crescere di  $K_p$  il valore asintotico dell'uscita sia sempre più vicino a quello richiesto e si osserva una contemporanea riduzione del "tempo di salita" (tempo occorrente perché l'uscita passi dal 10% al 90% del valore finale). Tuttavia l'uscita non arriverà mai esattamente al valore richiesto, a meno di non far tendere  $K_p$  all'infinito, sarà quindi presente un errore asintotico detto "*offset*". L'aumento del coefficiente proporzionale è inoltre accompagnato da un corrispondente aumento delle oscillazioni generate a seguito di rapidi transitori.

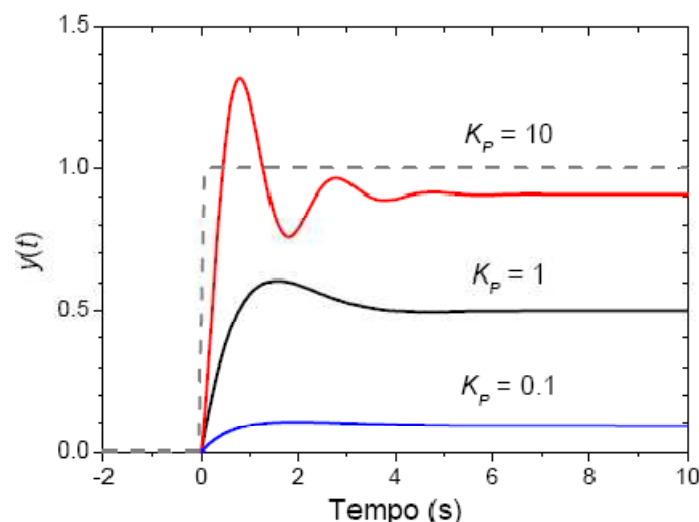


Fig 4.8 – Comportamento della risposta al variare della costante proporzionale

Per porre rimedio a questo problema è necessario aggiungere al termine proporzionale un termine aggiuntivo che elimini a priori la presenza dell'*offset*. In un controllore PID tale funzione è svolta dal contributo integrale. È evidente che in presenza di un *offset* costante il contributo integrale è destinato a crescere indefinitamente nel tempo e questo ci permette di attivare una efficace azione correttiva. Chiamando  $T_i$  la costante nota come "tempo di reset", l'effetto dell'integrazione è tanto più importante, quanto maggiore è  $T_i$ .

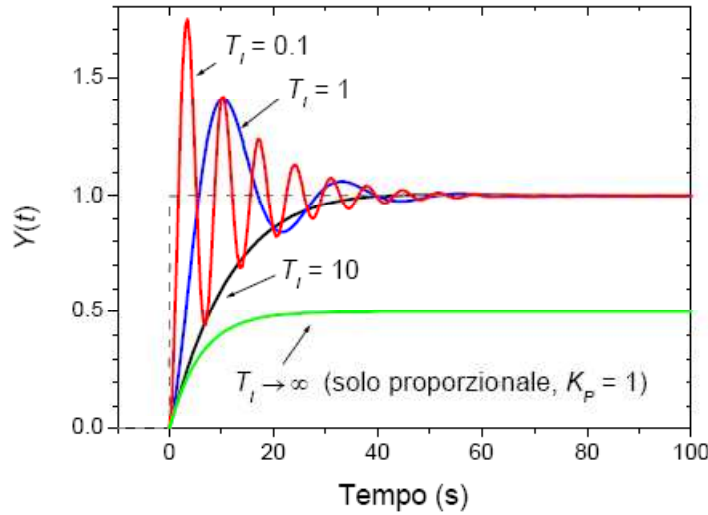


Fig 4.9 - Effetto dell'integrazione

Dunque l'*offset*, presente quando si opera solo con il controllore proporzionale, si attenua fino anche a ridursi introducendo il termine integrale. Riducendo  $T_i$  il sistema risponde più velocemente al transitorio, ma si osservano anche delle forti oscillazioni. Il contributo derivativo al controllo tiene conto delle rapide variazioni dell'errore e cerca, in qualche modo, di anticipare la futura azione correttiva tenendo conto delle variazioni dell'errore negli istanti precedenti. In pratica questo si concretizza in una riduzione delle oscillazioni. L'*offset* è lo stesso che si ha con il solo controllo proporzionale, ma come abbiamo visto precedentemente, questo effetto può essere eliminato utilizzando un opportuno contributo integrale.

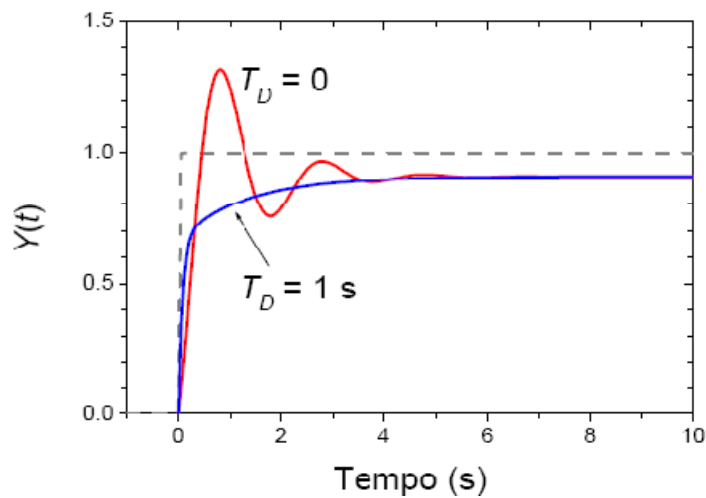


Fig 4.10 – Il contributo derivativo

Riassumendo, il contributo derivativo permette di ridurre le oscillazioni spurie del sistema, evitando che questo oscilli intorno al valore asintotico. D'altro canto, in presenza di un forte rumore esterno, il contributo derivativo tende ad amplificare l'effetto del rumore producendo una instabilità addizionale del sistema.

A seguito dell'acquisizione dei dati, si sono elaborate le diverse curve che rappresentano l'andamento della coppia di spunto erogata dal motore sottoposto a carico per i diversi *range* di velocità. La procedura seguita per questo test ha previsto in primo luogo l'acquisizione della velocità di rotazione del motore facendo variare nell'ordine la costante proporzionale, integrativa e infine quella derivativa (in particolare assegnando a ciascun parametro sette differenti valori) e successivamente la determinazione delle curve velocità-tempo, accelerazione-tempo, coppia-velocità per ciascun valore delle costanti del controllore. In particolare nel far variare un parametro per volta si sono fissati gli altri due ad un valore costante pari a 0.001 che assumiamo come valore di *default* dei parametri dell'algoritmo. Al termine dello studio eseguito si sono analizzate le prestazioni ottenute relativamente al variare del singolo parametro. Per quanto riguarda la costante  $K_p$  i risultati ottenuti facendo variare tale parametro sono riportati nel grafico sottostante.

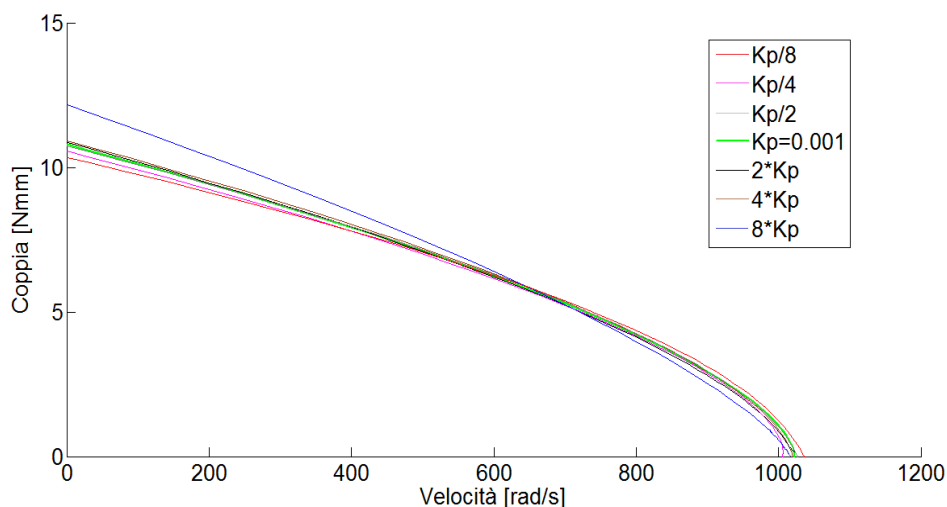


Fig 4.11 – Andamento della coppia in funzione del  $K_p$

Si osserva come incrementando il valore della costante proporzionale  $K_p$  si ottengono valori di coppia via via sempre più elevati, tale aspetto è più evidente a velocità medio-basse mentre per valori di velocità maggiori (da circa 600 rad/s in poi) tale “vantaggio” si annulla dando risultati pressoché identici per i sette diversi valori assegnati alla costante proporzionale. Tale aspetto risulta particolarmente vantaggioso nell’ambito dei sistemi di controllo per le ruote di reazione che hanno velocità angolare nominale nulla (agendo soltanto in presenza di disturbi) e quindi uno “spunto” migliore alla basse velocità permette di avere correzioni rapide ed efficaci laddove intervenisse un disturbo esterno. Il vantaggio risulta dunque evidente, osservando il grafico, poiché per un dato regime di rotazione del motore, lo stesso è in grado di erogare una coppia maggiore. Al contrario, nelle ruote di momento il regime di rotazione viene controllato attorno ad una velocità nominale non nulla, pertanto la possibilità di erogare una coppia elevata a basse velocità non rappresenta un vantaggio significativo essendo lontani dal suo *range* di velocità operative.

Dallo studio dei risultati ottenuti facendo variare il contributo integrativo del controllore, come ci si attendeva, le variazioni introdotte sulla coppia nel *range* di velocità considerato (0-1200 rad/s) sono praticamente inesistenti.

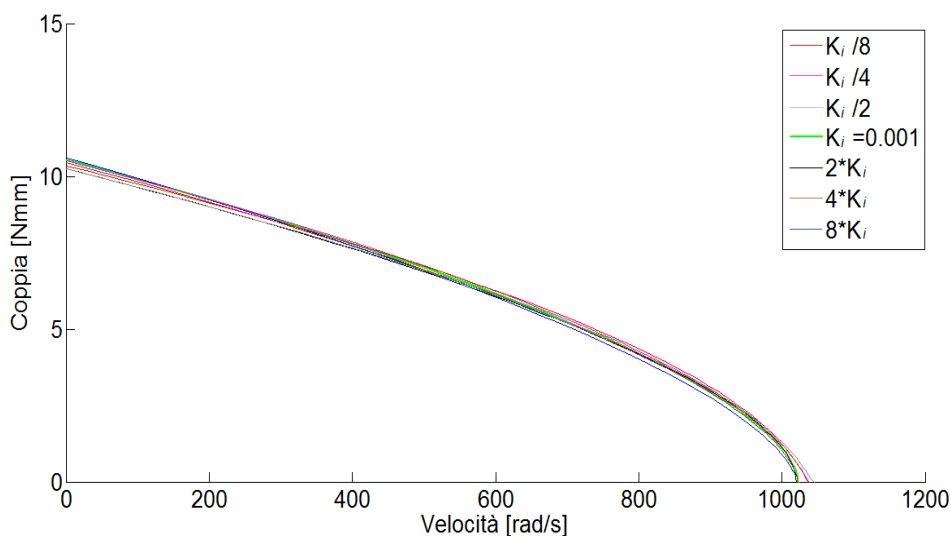
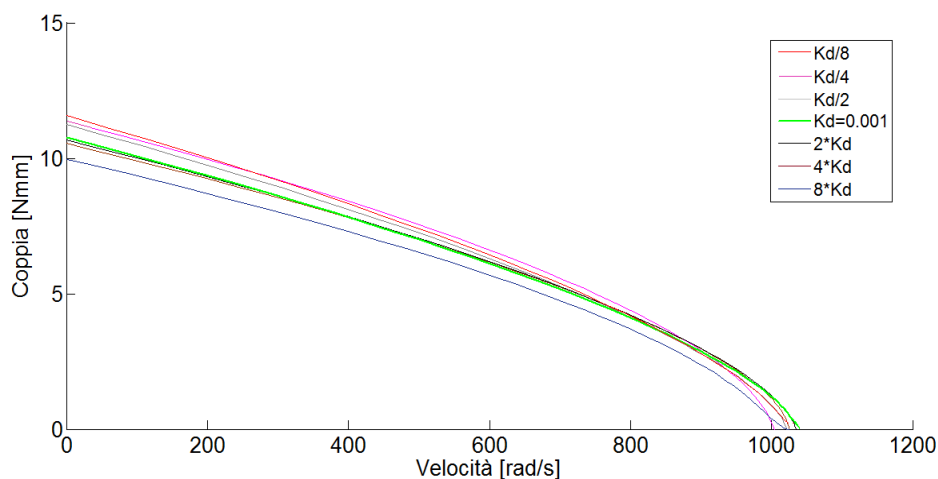


Fig 4.12 – Andamento della coppia in funzione del  $K_i$

Questo aspetto è perfettamente in sintonia con quanto ci si aspettasse dal momento che il contributo integrativo del controllore PID ha esclusivamente la funzione di annullare l'*offset* a regime. Tuttavia poiché l'obiettivo di questo studio è stato quello di analizzare l'andamento qualitativo della risposta in termini di coppia erogata e velocità, si è preso in considerazione un intervallo temporale utile al raggiungimento di un valore della risposta accettabile, con un offset qualitativamente molto basso. Questo intervallo (circa 60 secondi) risulta ovviamente estremamente limitato per lo studio del comportamento a regime del sistema che richiederebbe l'analisi dei dati acquisiti in un intervallo di tempo maggiore.

Per quanto riguarda invece i risultati ottenuti facendo variare il contributo derivativo del controllore PID si sono ottenuti risultati più interessanti con andamenti sensibilmente differenti come riportato nel grafico sottostante:



**Fig 4.13 – Andamento della coppia in funzione del  $K_d$**

Si osserva come al variare della costante  $K_d$ , in particolare incrementando il suo valore, le curve di coppia traslano verso il basso, tale aspetto è più evidente a velocità medio-basse così come accadeva al variare del contributo proporzionale ove però ad un incremento della costante  $K_p$  corrispondeva un incremento di coppia. Osservando l'andamento della coppia nel grafico ottenuto si desume che incrementando il valore della costante  $K_d$  la coppia erogata a parità di velocità risulta più bassa, tuttavia le oscillazioni attorno al *set-point* (se consideriamo l'*offset* annullato dal

contributo integrativo) risultano maggiormente smorzate o al meglio annullate nel caso ottimale. Si tratta quindi di effettuare un *trade off* nella scelta dei tre parametri, e tale compromesso sarà dettato dalla tipologia d'impiego che si andrà ad assolvere. Considerando la situazione in cui, per ipotesi, si ha il valore ottimale della costante integrativa in modo tale da non avere alcun *offset*, si può affermare intuitivamente che nell'ambito del controllo di una ruota di reazione risulta migliore avere un elevato contributo proporzionale mentre si richiede una scelta prudente della costante derivativa dal momento che, come risulta dallo studio effettuato, un eccessivo contributo derivativo "rallenta" il sistema incrementando il tempo di salita della risposta, pur smorzando le oscillazioni attorno al *set-point*. Per quanto riguarda invece il controllo di una ruota di momento un elevato valore del contributo proporzionale non apporta necessariamente un vantaggio dal momento che le velocità in corrispondenza delle quali l'incremento di coppia è apprezzabile non sono vicine alla velocità nominale della ruota di momento, ed occorre dunque effettuare una scelta di compromesso tra la costante proporzionale e quella derivativa.

In conclusione, il problema del progetto di un controllore PID si riduce alla scelta dei valori dei parametri  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  che portano al controllo ottimo. Tale scelta non è banale perché richiede la conoscenza dettagliata delle proprietà del processo che si vuole controllare. Esistono vari metodi per effettuare la scelta (*tuning*) dei valori dei coefficienti, tra questi il metodo di Cohen/Coon e il metodo di Ziegler. Tuttavia la scelta dei coefficienti del controllore PID non costituisce oggetto di studio del presente lavoro che si propone invece di mostrare qualitativamente il comportamento del sistema al variare dei suddetti parametri.

#### ***4.5 I software di controllo impiegati***

Durante la realizzazione del presente lavoro sono stati utilizzati diversi software: LabView (per la realizzazione del codice di acquisizione e comando di entrambi gli *encoder*, con il supporto di una scheda NI), OrCAD (per il disegno degli schematici circuitali delle schede elettroniche realizzate), SolidWorks (per la progettazione ed il disegno dell'ingombro

del supporto motore) e Matlab per l'analisi dei dati acquisiti dalla scheda NI relativi alle letture di velocità dell'encoder ottico e magnetico, e successivamente per la realizzazione degli andamenti di velocità, accelerazione e coppia dell'encoder comandato con l'azionamento.

Di seguito si è riportata una breve descrizione dei suddetti programmi:

- **LabVIEW** (abbreviazione di **LABoratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench**) è l'ambiente di sviluppo integrato per il linguaggio di programmazione visuale di National Instruments. Tale linguaggio grafico viene chiamato "*Linguaggio G*" o "Graphic Language". Un programma o sottoprogramma G, denominato VI (Virtual Instrument), non esiste sotto forma di testo, ma può essere salvato solo come un file binario, visualizzabile e compilabile solo da LabVIEW. La definizione di strutture dati ed algoritmi avviene con icone e altri oggetti grafici, ognuno dei quali incapsula funzioni diverse, uniti da linee di collegamento (*wire*), in modo da formare una sorta di diagramma di flusso. Tale linguaggio viene definito *dataflow* (flusso di dati) in quanto la sequenza di esecuzione è definita e rappresentata dal flusso dei dati stessi attraverso i fili monodirezionali che collegano i blocchi funzionali. Poiché i dati possono anche scorrere in parallelo attraverso blocchi e fili non consecutivi, il linguaggio realizza spontaneamente il *multithreading* senza bisogno di esplicita gestione da parte del programmatore. Nell'ambiente di sviluppo, i VI constano di tre componenti principali: il pannello frontale e il diagramma a blocchi. Il pannello frontale è l'interfaccia utente del VI. Si realizza con controlli e indicatori, che costituiscono i terminali interattivi d'ingresso e d'uscita, rispettivamente. Sono ben più numerosi e complessi dei *widget* normalmente forniti dal sistema operativo. I controlli sono matrici, manopole, potenziometri, pulsanti, quadranti e molti altri; simulano i dispositivi d'ingresso degli strumenti e forniscono dati allo schema a blocchi del VI. Gli indicatori sono grafici, tabelle, LED, termometri e molti altri; simulano i dispositivi d'uscita degli strumenti e visualizzano i dati che lo schema a blocchi acquisisce o genera. Lo schema a blocchi è il diagramma di flusso che rappresenta il codice sorgente in formato grafico. Gli oggetti del pannello frontale appaiono come *terminali* di ingresso o



uscita nello schema a blocchi. Gli oggetti dello schema a blocchi comprendono: terminali, funzioni, costanti, strutture, sub VI, fili di collegamento e commenti testuali.



Fig 4.14 – LabView: interfaccia di lavoro

- OrCAD è un software che permette di disegnare lo schema elettrico di una scheda utilizzando simboli (relativi ai vari componenti elettronici) che sono disponibili nelle librerie presenti nel programma, oppure altri simboli che l'utente può inserire. Solitamente la realizzazione di uno schematico OrCAD prevede una prima fase in cui vengono piazzati i componenti sul foglio ed una seconda fase in cui si realizzano i vari collegamenti.

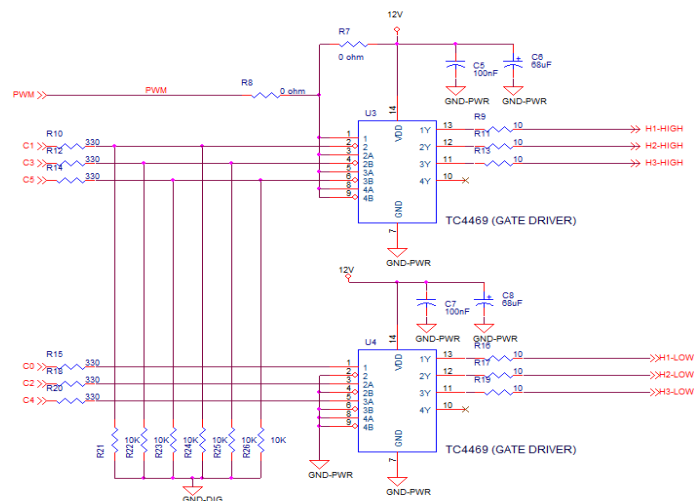


Fig 4.15 – Esempio di schematico OrCAD

• SolidWorks è un software di disegno e progettazione tridimensionale parametrica, prodotto e commercializzato dalla Dassault Systèmes SolidWorks Corporation. Solidworks nasce come software appositamente dedicato per l'ingegneria meccanica ed è quindi particolarmente utile per la progettazione di apparati meccanici, anche complessi. Il software prevede la creazione di disegni 2D e 3D di solidi e superfici, attraverso un sistema geometrico di tipo parametrico e completamente personalizzabile. Solidworks si rivela estremamente intuitivo, per cui il suo uso risulta non difficile anche agli utenti meno esperti o provenienti da altri sistemi CAD. Solidworks consente di portare disegni da 2 a 3 dimensioni e viceversa, con semplici operazioni, importando ed esportando file di AutoCAD (DWG, DXF). Il software è inoltre in grado di importare ed esportare geometrie in una grande varietà di formati tridimensionali, in particolare è in grado di importare (anche solo se come corpo grafico) file creati con altri programmi di progettazione meccanica. Il disegno parametrico consente di impostare numerosi tipi di relazioni (parallelismo, concentricità, perpendicolarità, linearità, uguaglianza, coassialità, simmetria e moltissimi altri). Lo strumento Equazioni consente inoltre di impostare relazioni tra le quote geometriche (ad esempio, allo scopo di mantenere il raggio di raccordo pari ad un quarto di un lato, oppure definendo un angolo come triplo di un altro ecc).

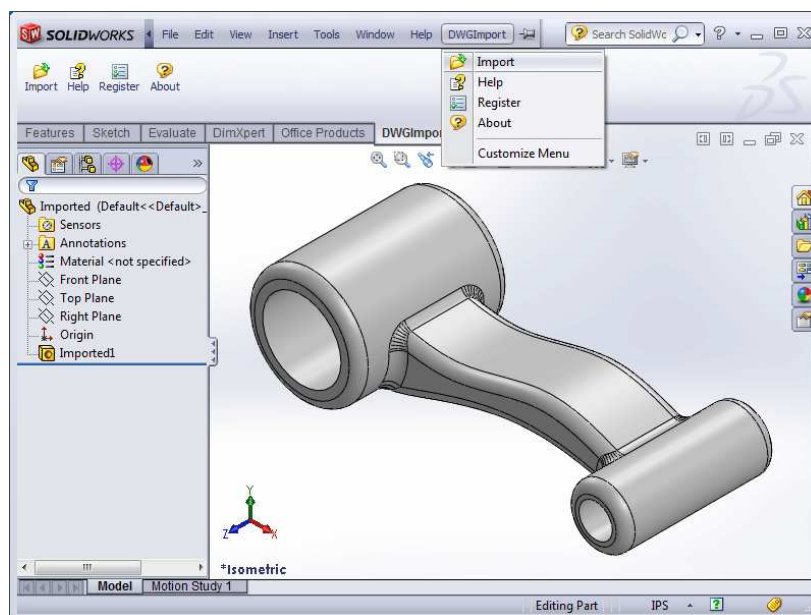


Fig 4.16 – Area di lavoro del software SolidWorks

- Matlab: (abbreviazione di *Matrix Laboratory*) è un ambiente per il calcolo numerico e l'analisi statistica che comprende anche l'omonimo linguaggio di programmazione creato dalla MathWorks. MATLAB consente di manipolare matrici, visualizzare funzioni e dati, implementare algoritmi, creare interfacce utente, e interfacciarsi con altri programmi. Nonostante sia specializzato nel calcolo numerico, un *toolbox* opzionale interfaccia MATLAB con il motore di calcolo simbolico di Maple. MATLAB è usato da milioni di persone nell'industria e nelle università per via dei suoi numerosi *tool* a supporto dei più disparati campi di studio applicati e funziona su diversi sistemi operativi, tra cui Windows, Mac OS, GNU/Linux e Unix. L'interfaccia principale di MATLAB è composta da diverse finestre che è possibile affiancare, spostare, ridurre a icona, ridimensionare e così via. Le finestre principali, più usate, sono quattro: *Command Window*, *Workspace*, *Current directory* e *Command history*. Si riportano in appendice A, i codici elaborati con tale software per lo studio effettuato nel presente lavoro.



# 5

## ***SVILUPPI FUTURI***

### ***5.1 Sviluppi futuri***

I possibili sviluppi futuri di questo lavoro prevedono il perfezionamento del meccanismo di acquisizione dei dati di velocità, in particolare per quanto concerne l'encoder ottico si è pensato di rendere più precisa la misurazione di velocità aumentando il numero di fori praticati sul disco compatibilmente con le caratteristiche di funzionamento del fotodiodo impiegato (in particolare quello che viene definito come “*rise and fall time of the photocurrent*” che nel sensore ottico in uso vale 20 ns), analogamente per l'encoder magnetico si può trovare una migliore condizione operativa che renda più precisa la misurazione modificando ad esempio disposizione e numero di magneti sull'albero o il posizionamento del sensore stesso che nella versione fin qui realizzata presenta la faccia principale rivolta verso l'alto in modo tale da leggere il passaggio dei due magneti fissati su un perno a sua volta calettato sull'albero motore.

Per quanto riguarda invece l'azionamento elettrico del motore *brushless* per una ruota di momento/reaazione, alla luce dei risultati ottenuti si potrà (eseguendo uno studio approfondito nell'ambito dei controlli automatici, e quindi studiando anche i transitori dei segnali di risposta ottenuti dal sistema a partire dai diversi ingressi imposti) determinare l'esatto valore numerico dei tre parametri costitutivi del controllore PID in relazione alla tipologia d'impiego che si dovrà affrontare (ruota di momento/reaazione). E' possibile inoltre, a partire dai risultati ottenuti con il presente lavoro e osservando il comportamento dinamico del motore comandato tramite l'azionamento realizzato in laboratorio, determinare il punto di lavoro fisso ottimale per la

ruota di momento/reaione utilizzata. Si può pensare inoltre, al fine di migliorare le prestazioni del motore *brushless* utilizzato e quindi del suo azionamento, di effettuare una ricerca approfondita sui vari microcontrollori disponibili sul mercato, al fine di sostituire l'MCU (*Micro Controller Unit*) ATMEGA 644 previsto dall'azionamento realizzato con il presente lavoro, con un altro microcontrollore (che sia compatibile con le caratteristiche elettriche del circuito realizzato) che permetta di ovviare ai problemi legati al degrado delle prestazioni che si è riscontrato analizzando il comportamento del motore a bassi regimi di rotazione quando pilotato tramite l'azionamento che utilizza il suddetto microcontrollore sopracitato.

# ***APPENDICE A***

## ***DATASHEET***

Sono di seguito riportati i datasheet relativi ai componenti commerciali selezionati per la realizzazione degli encoder, e dell'azionamento relativi alla ruota di momento per il controllo d'assetto del satellite ALMASat-EO. Nell'ordine sono mostrati:

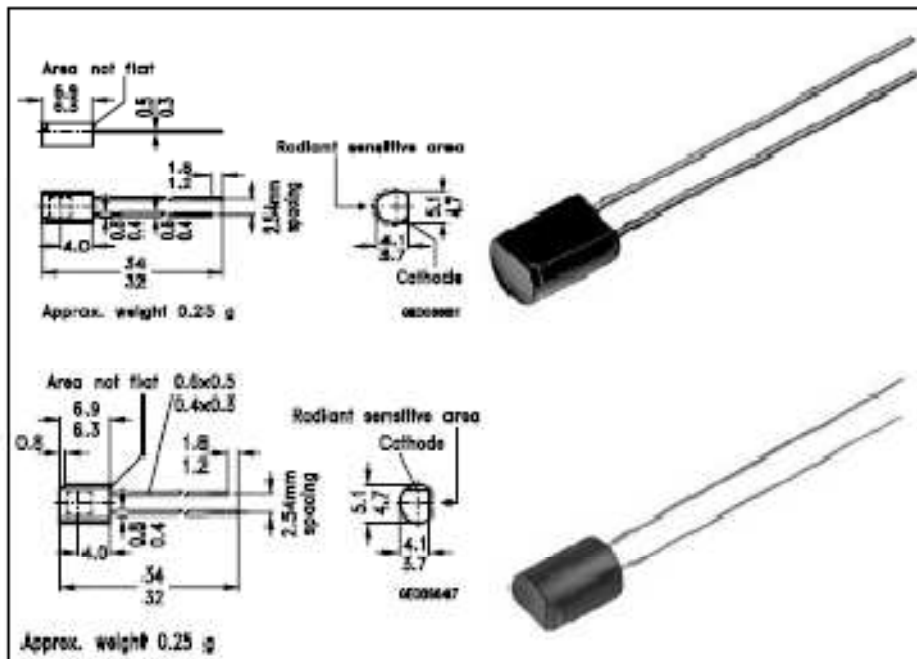
- Fotodiodo SFH 205
- Sensore di posizione ad effetto Hall SS466A

## SIEMENS

Silizium-PIN-Fotodiode mit Tageslichtsperrfilter  
 Silicon-PIN-Photodiode with Daylight Filter

SFH 205

SFH 206



Maße in mm, wenn nicht anders angegeben/Dimensions in mm, unless otherwise specified.

### Wesentliche Merkmale

- Speziell geeignet für Anwendungen bei 950 nm
- Kurze Schaltzeit (typ. 20 ns)
- 5 mm-Plastikbauform im LED-Gehäuse
- Auch gerollt lieferbar

### Anwendungen

- IR-Fernsteuerung von Fernseh- und Rundfunkgeräten, Videorecordern, Lichtdimmern, Gerätefernsteuerungen
- Lichtschranken für Gleich- und Wechslichtbetrieb

### Features

- Especially suitable for applications of 950 nm
- Short switching time (typ. 20 ns)
- 5 mm LED plastic package
- Also available on tape

### Applications

- IR-remote control of hi-fi and TV sets, video tape recorders, dimmers, remote control of various equipment
- Light reflecting switches for steady and varying intensity



# SS466A

## Solid State Sensors Digital Position Sensors

## SS400 Series



### FEATURES

- 3.8-30 VDC supply voltage
- Digital current sinking output
- 3 pin in-line PCB terminals
- Quad-Hall design virtually eliminates mechanical stress effects
- Temperature compensated magnetics
- Operate/release points can be customized
- Bipolar, unipolar, latching magnetics
- High output current capability  
–50 mA absolute maximum
- Operate/release points symmetrical around zero gauss (bipolar/latch)
- Operating temperature range of –40 to +150°C (–40 to +302°F)
- Package material: Plaskon 3300H
- Surface mount version available:  
SS400-S (with cut and formed leads)

SS400 Series position sensors have a thermally balanced integrated circuit over full temperature range. The negative compensation slope is optimized to match the negative temperature coefficient of lower cost magnets. Bipolar, latching and unipolar magnetics are available.

Band gap regulation provides extremely stable operation over 3.8 to 30 VDC supply voltage range. SS400 sensors are capable of continuous 20 mA sinking output, and may be cycled as high as 50 mA maximum.

### NOTICE

Interruption of power to a latching device may cause the output to change state when power is restored. If a magnetic field of sufficient strength is present, the sensor output will be in the condition dictated by the magnetic field.

### ORDER GUIDE

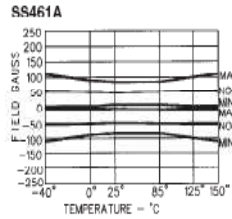
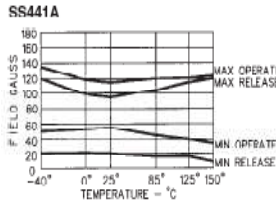
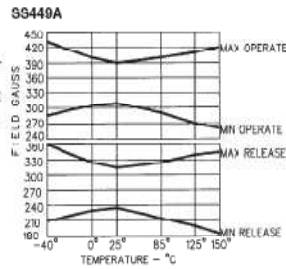
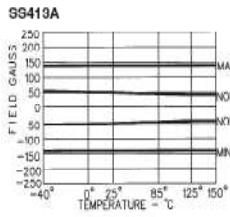
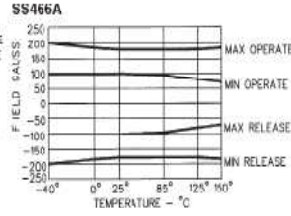
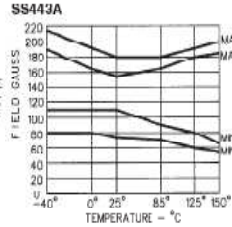
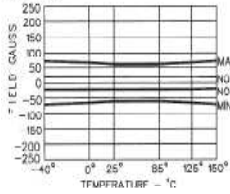
Catalog Listing	SS411A	SS413A	SS441A	SS443A	SS449A	SS461A	SS466A
Magnetic Type	Bipolar	Bipolar	Unipolar	Unipolar	Unipolar	Latching	Latching
Supply Voltage (VDC)	3.8 to 30	3.8 to 30	3.8 to 30	3.8 to 30	3.8 to 30	3.8 to 30	3.8 to 30
Supply Current (max.)	10 mA	10 mA	10 mA	10 mA	10 mA	10 mA	10 mA
Output Type	Sink	Sink	Sink	Sink	Sink	Sink	Sink
Output Voltage (max.)	.40 V	.40 V	.40 V	.40 V	.40 V	.40 V	.40 V
Output Current, max.*	20 mA	20 mA	20 mA	20 mA	20 mA	20 mA	20 mA
Output Leakage Current, max.	10 µA	10 µA	10 µA	10 µA	10 µA	10 µA	10 µA
Output Switching Time V <sub>cc</sub> = 12 V, R <sub>l</sub> = 1.6 K, C = 20 pF							
	Rise (10-90%) .05 µs typ. 1.5 µs max.	.05 µs typ. 1.5 µs max.	.05 µs typ. 1.5 µs max.	.05 µs typ. 1.5 µs max.	.05 µs typ. 1.5 µs max.	.05 µs typ. 1.5 µs max.	.05 µs typ. 1.5 µs max.
	Fall (90-10%) .15 µs typ. 1.5 µs max.	.15 µs typ. 1.5 µs max.	.15 µs typ. 1.5 µs max.	.15 µs typ. 1.5 µs max.	.15 µs typ. 1.5 µs max.	.15 µs typ. 1.5 µs max.	.15 µs typ. 1.5 µs max.
Magnetic Characteristics							
–40°C							
Max. Op.	G mT 70 7.0	G mT 140 14.0	G mT 135 13.5	G mT 215 21.5	G mT 435 43.5	G mT 110 11.0	G mT 200 20.0
Min. Rel.	–70 –7.0	–140 –14.0	20 2.0	80 8.0	210 21.0	–110 –11.0	–200 –20.0
Min. Dif.	15 1.5	20 2.0	15 1.5	25 2.5	30 3.0	50 5.0	200 20.0
0°C							
Max. Op.	65 6.5	140 14.0	117 11.7	190 19.0	400 40.0	90 9.0	185 18.5
Min. Rel.	–65 –6.5	–140 –14.0	20 2.0	80 8.0	230 23.0	–90 –9.0	–185 –18.5
Min. Dif.	15 1.5	20 2.0	18 1.8	25 2.5	30 3.0	50 5.0	200 20.0
26°C							
Max. Op.	60 6.0	140 14.0	116 11.6	180 18.0	300 30.0	85 8.5	180 18.0
Min. Rel.	–60 –6.0	–140 –14.0	20 2.0	75 7.5	235 23.5	–85 –8.5	–180 –18.0
Min. Dif.	15 1.5	20 2.0	20 2.0	25 2.5	30 3.0	50 5.0	200 20.0
85°C							
Max. Op.	60 6.0	140 14.0	120 12.0	180 18.0	400 40.0	85 8.5	180 18.0
Min. Rel.	–60 –6.0	–140 –14.0	15 1.5	70 7.0	215 21.5	–85 –8.5	–180 –18.0
Min. Dif.	12 1.2	20 2.0	15 1.5	15 1.5	30 3.0	50 5.0	190 19.0
125°C							
Max. Op.	65 6.5	140 14.0	123 12.3	190 19.0	410 41.0	100 10.0	180 18.0
Min. Rel.	–65 –6.5	–140 –14.0	15 1.5	60 6.0	200 20.0	–100 –10.0	–180 –18.0
Min. Dif.	12 1.2	20 2.0	8 0.8	10 1.0	30 3.0	50 5.0	160 16.0
150°C							
Max. Op.	70 7.0	140 14.0	125 12.5	200 20.0	420 42.0	110 11.0	185 18.5
Min. Rel.	–70 –7.0	–140 –14.0	10 1.0	55 5.5	185 18.5	–110 –11.0	–185 –18.5
Min. Dif.	10 1.0	20 2.0	5 0.5	5 0.5	30 3.0	50 5.0	140 14.0

\* Absolute maximum output current is 50 mA for all SS400 listings. G – Gauss. mT – milliTesla.  
Note: For SS400 on tape with straight or formed leads on 0.100" centers, contact the 800 number. One box contains 5,000 sensors.

# Solid State Sensors Digital Position Sensors

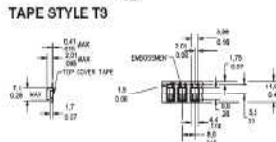
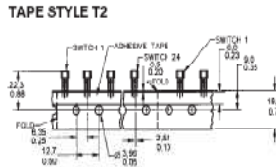
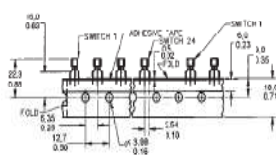
SS400 Series

## OPERATE AND RELEASE POINTS



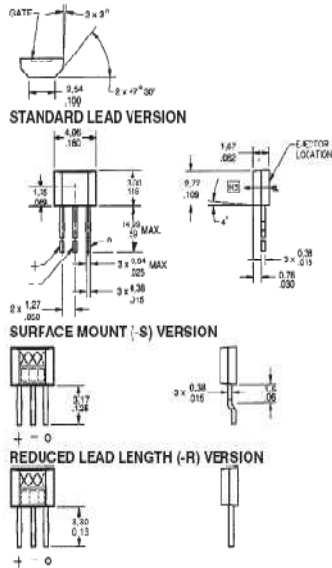
Digital

## MOUNTING DIMENSIONS (For reference only)



### TAPE STYLE SP & RP

Tape styles T2 and T3 are supplied in Ammpack (Fanfold) format, in cardboard boxes. Each box contains 5000 sensors.



# ***APPENDICE B***

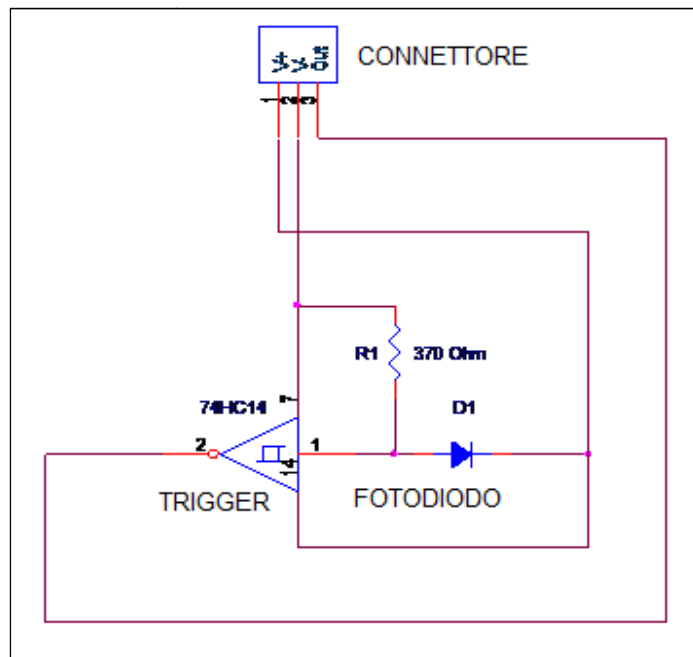
## ***SCHEMATICI OrCAD***

Si riportano di seguito gli schematici dei due encoder (ottico e magnetico) e quello relativo all'azionamento della ruota di momento per il controllo d'assetto del microsatellite.

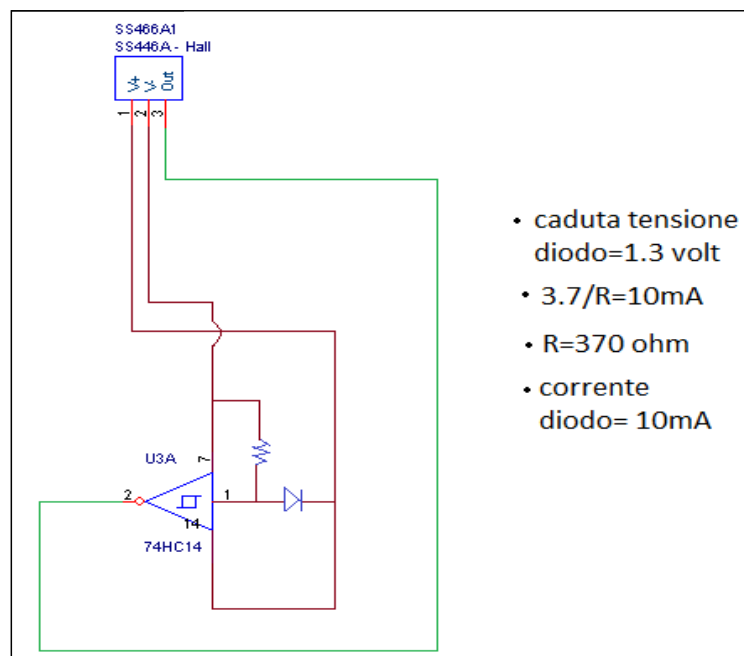
Nell'ordine sono mostrati:

- Schematico encoder magnetico
- Schematico encoder ottico
- Azionamento:
  - Alimentazione
  - Microcontrollore
  - *Gate-driver*
  - *Half-bridge*
  - Connettori
  - Sensori ad effetto *Hall*

### Schematico encoder magnetico

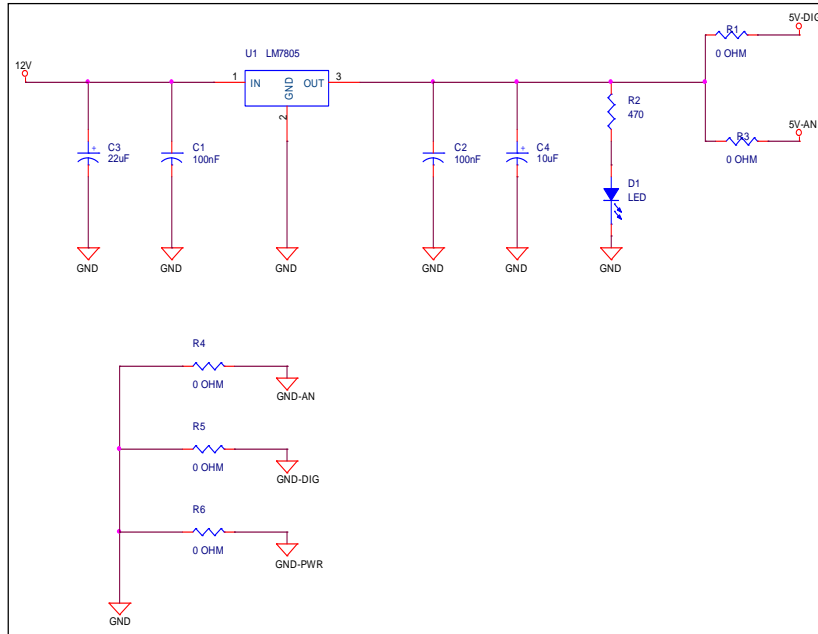


### Schematico encoder ottico

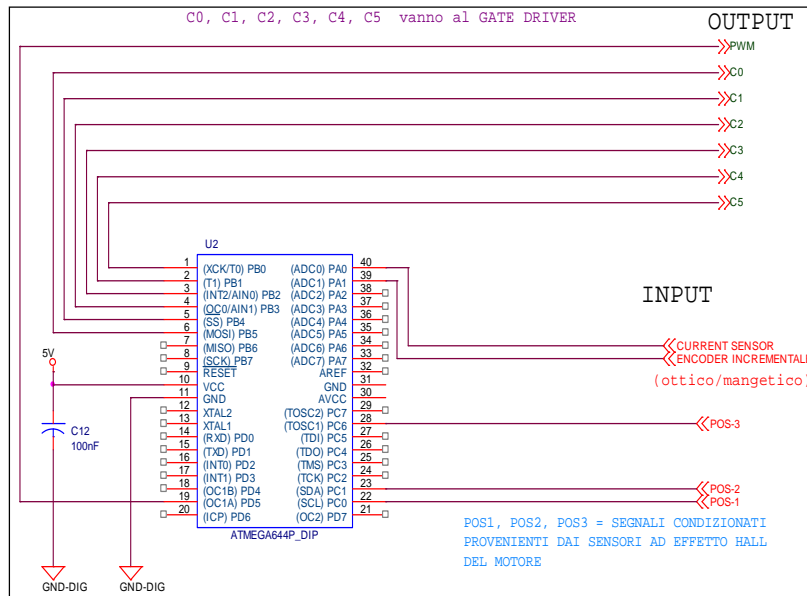


# AZIONAMENTO:

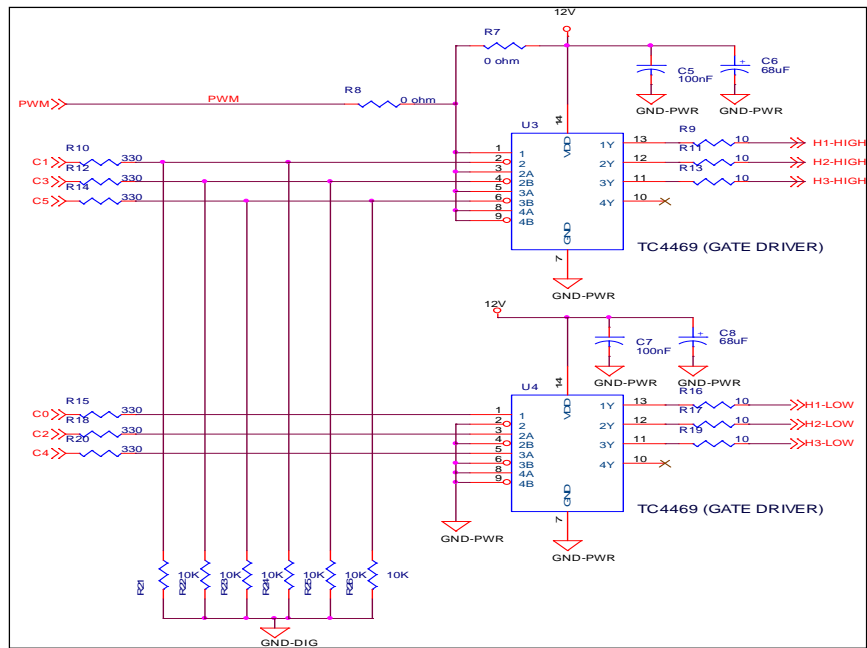
## Alimentazione



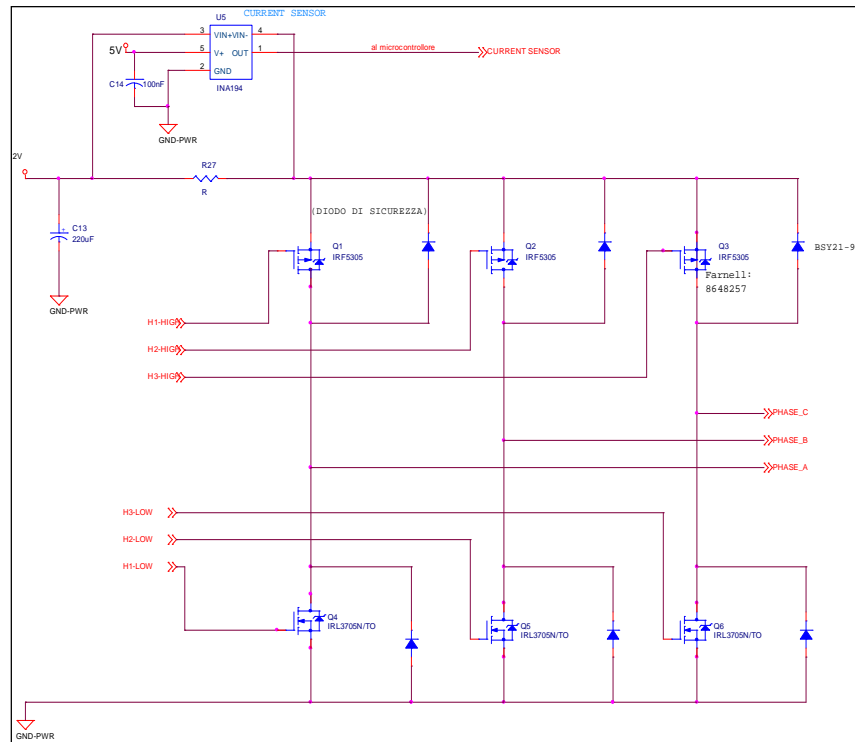
## Microcontrollore



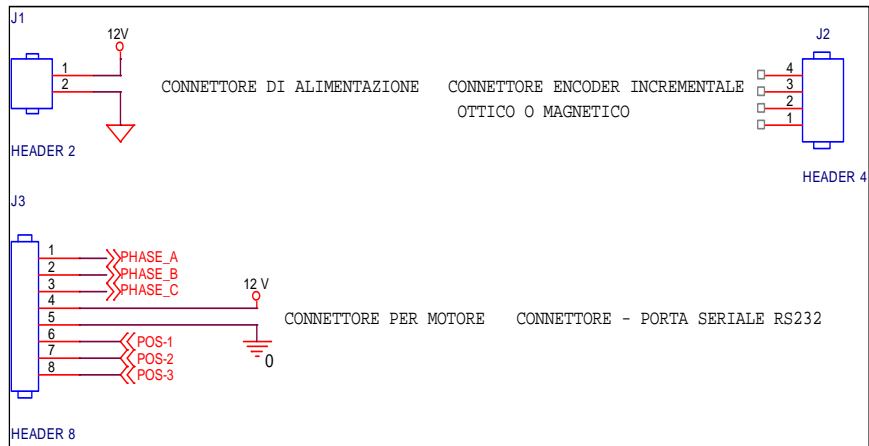
## Gate-driver



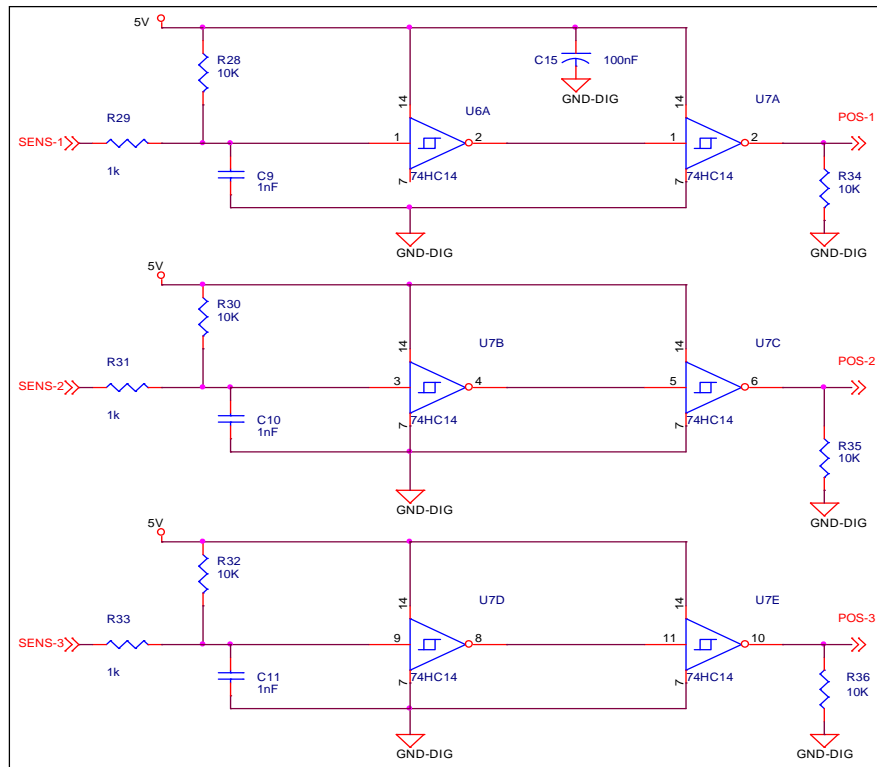
## Half-bridge



## Connettori



## Sensori ad effetto Hall



# **BIBLIOGRAFIA**

## **INTERNET:**

[I1] [http://en.wikipedia.org/wiki/Momentum\\_wheel](http://en.wikipedia.org/wiki/Momentum_wheel)

[I2] [http://it.wikipedia.org/wiki/Motore\\_brushless](http://it.wikipedia.org/wiki/Motore_brushless)

[I3] <http://www.microst.it/>

[I4] <http://www.distrelec.com/>

[I5] [http://it.wikipedia.org/wiki/Duty\\_cycle](http://it.wikipedia.org/wiki/Duty_cycle)

## **TESTI:**

[T1] G.Marro “Controlli Automatici”, Zanichelli, 2004

[T2] J.R. Wertz, “Space mission analysis and design”, Microcosm Press and Kluwer Academic Publishers, 1978

[T3] W.H.Yeadon, A.W.Yeadon, “Handbook of small electric motors”, McGraw-Hill, 2001

## **ARTICOLI SCIENTIFICI:**

[A1] L.Taponecco “Appunti di mecatronica”, Università di Pisa

[A2] L.Frosini “Il motore brushless”, Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Università di Pavia

[A3] V.Toss “Realizzazione di un controllo PID su micro PIC18F2520”, Laboratorio di strumentazione elettronica di misura, 2006

## **TESI:**

[T1] A. Corbelli, “Collaudo della momentum wheel per il controllo d'assetto del microsatellite ALMASat-1 ”, A.A 2004\2005

[T2] A. Corbelli, “Progetto preliminare di una ruota di momento \ reazione per una missione per l'osservazione della terra”, A.A. 2007\2008

## **MANUALI E DOCUMENTAZIONE TECNICA :**

[M1] VEGA User's manual, ESA

[M2] Servo tecnica, SVT-MIMO “scheda di controllo per motori Brushed, Brushless e Sensorless”