

CONTROLLO DEGLI ATTUATORI MAGNETICI DEL SATELLITE ATMOCUBE CON IL PIC18F452

Lucchesi Davide

16 marzo 2010

Introduzione

AtmoCube è un satellite didattico di forma cubica della classe dei Cubesat per lo studio dell'atmosfera terrestre. Questo avverrà attraverso l'utilizzo della strumentazione scientifica di bordo consistente in un magnetometro e in un dosimetro che permetteranno di misurare, rispettivamente, il campo geomagnetico e la radiazione incidente sul sensore. Il satellite verrà equipaggiato anche di un sistema GPS che consentirà di associare una posizione ad ogni misura, permettendo così la creazione di una mappa.

Al fine di assicurare la comunicazione con il satellite da terra è necessario che il velivolo determini il proprio assetto, utilizzando i sensori, e lo controlli, usando gli attuatori. Il sistema che stabilizza il satellite nel corso della missione e provvede al suo orientamento, nonostante la presenza di disturbi che si manifestano su di esso sotto forma di torsioni, prende il nome di ADCS (*Attitude Determination and Control System*).

Esistono molti modi per garantire l'assetto del satellite e renderlo parzialmente insensibile ai disturbi esterni. Questi possono essere raggruppati in tecniche di controllo passive o attive. La soluzione scelta per l'AtmoCube è una tecnica di controllo attiva che utilizza una torsione prodotta dai *magnetic torquer*. Tali dispositivi si basano sull'utilizzo di elettromagneti o di spire percorse da corrente al fine di generare un momento di dipolo magnetico. La torsione che si produce risulta proporzionale all'intensità del campo magnetico locale rendendo questi attuatori efficienti per orbite relativamente basse dove il campo è più intenso.

Progetto

Gli scopi del progetto sono lo studio e la realizzazione di un sistema di controllo di assetto, su di un singolo asse, per il satellite AtmoCube attraverso l'utilizzo del PIC18F452.

Il sistema di controllo magnetico di assetto utilizza dei segnali in uscita dal PIC18F452 per attivare un driver che fornisce corrente ad una bobina. Questa, alimentata, genera un momento di dipolo magnetico che ha il verso a seconda del verso della corrente fornita. Questa azione di pilotaggio della bobina sarà controllata da un segnale rilevato tramite i convertitori analogico-digitali (ADC) del PIC da un magnetometro posto nel centro della bobina. Questo strumento rileverà le componenti X e Y, del campo geomagnetico terrestre, che giacciono sul piano di appoggio della bobina permettendo così l'allineamento del satellite alle linee di campo. Lo schema riassuntivo del sistema è visibile in figura 1.

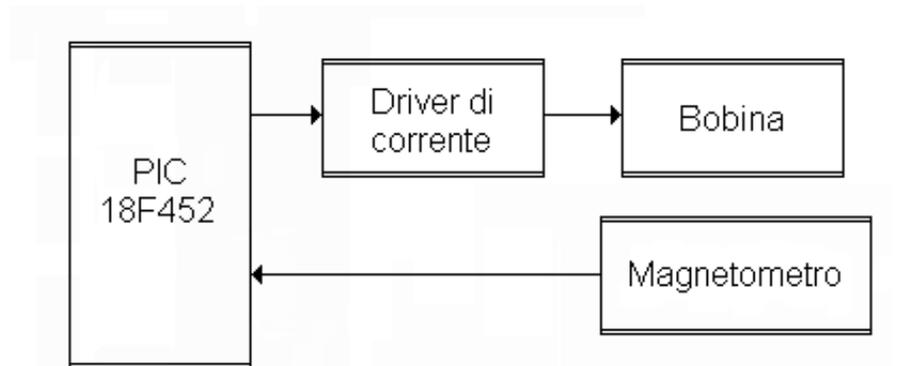


Figura 1: Schema a blocchi del sistema di controllo

Di seguito sono descritti in particolare i blocchi utilizzati nel sistema facendo particolare attenzione alle singole specifiche.

Bobina: è l'attuatore magnetico scelto per l'AtmoCube perchè rappresenta l'unico metodo pratico per esercitare una torsione esterna su un satellite, senza l'espulsione di propellente.

Le spire di torsione non sono altro che avvolgimenti di filo conduttore attorno ad un nucleo d'aria. Quando una bobina di N spire, ognuna di area A , viene percorsa da una corrente I produce un momento di dipolo magnetico di modulo pari a

$$|M| = I N A [Am^2]$$

supponendo che la bobina si trovi in aria, che possiede una permeabilità magnetica $\mu=1$. Tale momento, con verso dipendente da quello della corrente, interagendo con il campo magnetico locale, induce la bobina a porsi perpendicolarmente al campo, provocando la torsione.

Per l'AtmoCube si è deciso di costruire una bobina di forma quadrata con lato di lunghezza 85 mm che verrà fissata ad una faccia della struttura di supporto cubica del satellite. E' in fase di studio la possibilità di sostituirla con un circuito stampato con le tracce su multistrato.

Per il progetto è stata preparata una bobina sperimentale, con le dimensioni che rispecchiano quelle implementabili, alimentata da un driver che fornisce corrente in entrambi i versi. A priori non è possibile definire se la corrente gira in senso orario o antiorario fino a che non si conosce il verso con cui è avvolta la bobina.

Magnetometro: è uno strumento che permette la misura della direzione e dell'intensità del campo magnetico locale attorno al satellite. Quando il satellite dotato di *magnetic torquer* passa attraverso inversioni del campo magnetico durante orbita, viene utilizzato il magnetometro per determinare la polarità che dovrà essere imposta al momento dell'attuatore magnetico. Un'importante necessità tecnica è lo spegnimento delle bobine di assetto durante la misura dello strumento per non influenzare la stessa.

Il magnetometro scelto per AtmoCube è il sensore magnetico Honeywell HMC2003, illustrato in figura 2. Questo strumento è capace di rilevare, tramite tre sensori magnetici, verso e intensità del campo magnetico sugli assi X, Y e Z per un range da +2 a -2 Gauss con una sensibilità di $40 \mu\text{Gauss}$. La tensione in uscita per i tre assi varierà in un range da 0,5 a 4,5 V con un valore medio a campo nullo di 2,5 V. La tensione misurata permette di risalire facilmente al valore del campo essendo nota la corrispondenza 1V/gauss. Necessita di un'alimentazione continua da 6 a 15 V.

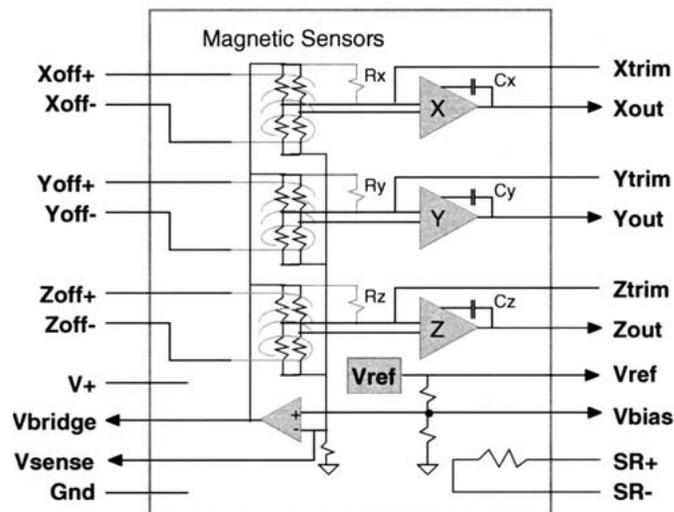


Figura 2: Magnetometro Honeywell HM2003

Le tensioni in uscita per gli assi X e Y saranno convertite dagli ADC integrati nel PIC al fine di calcolare il modulo del campo da loro rilevato. Come verrà

descritto in seguito, se questo modulo supera una certa soglia verrà attivato il comando della bobina, permettendo così un riassetto del satellite.

Driver di corrente: è un circuito che permette di fornire corrente al carico in entrambi i versi, data la necessità di cambiare verso quando avviene un cambio di polarità del campo durante l'orbita. Generalmente è definito ponte H (o *full bridge*) e, come è illustrato in figura 3 attraverso uno schematico realizzato con PSpice, è composto tutto da transistor npn.

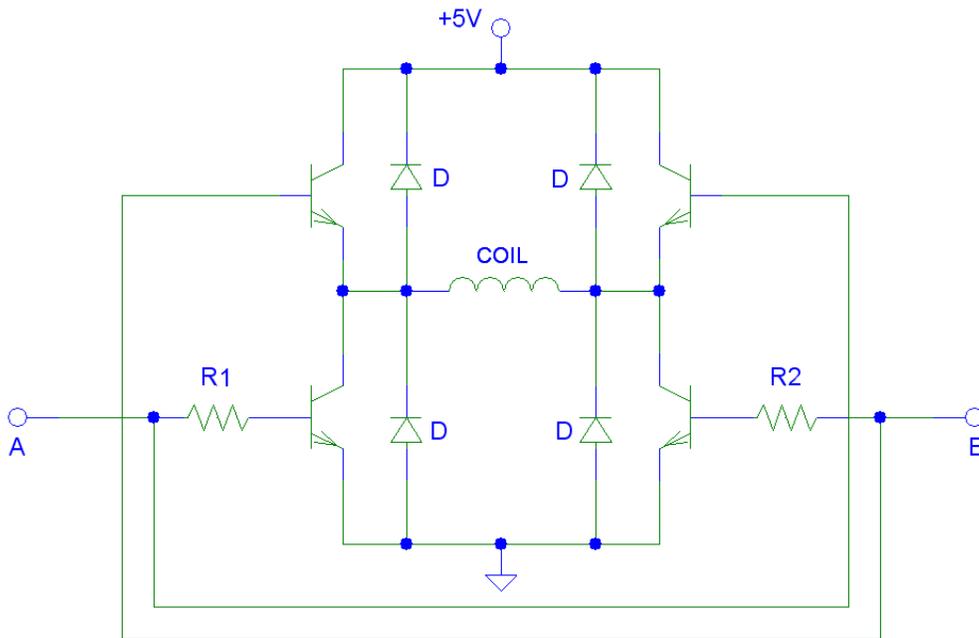


Figura 3: Driver di corrente

Attraverso le entrate A e B si possono comandare i transistor sui rami opposti del ponte, facendoli lavorare in funzionamento ON-OFF (saturazione-interdizione). Quando entrambi i comandi sono a 0 V i transistor inferiori, come quelli superiori, entrano in interdizione isolando il carico ad entrambi i capi. Quando i due comandi sono a tensioni diverse attivano i transistor che permettono alla corrente di scorrere in un verso o nell'altro.

La bobina costituisce il carico ed il PIC fornisce come segnali di uscita i comandi per il ponte.

PIC18F452: è un microcontrollore della Arizona Microchip in tecnologia CMOS che possiede una CPU RISC con architettura Harvard.

Il microcontrollore possiede una memoria RAM di 1536 byte, una memoria programmi di ben 16834 words una EEPROM interna di 256 byte. Può rag-

giungere una frequenza massima di lavoro di 40 MHz e presenta un oscillatore configurabile. Supporta interrupt hardware e software, il PWM, l'SSP, l'USART e molti timer interni. Possiede sette convertitori analogico-digitali da 10 bit. In figura 4 è presentata la piedinatura del microcontrollore integrato.

Il codice assembly del programma è stato realizzato e simulato con il software MPLab IDE, distribuito gratuitamente dalla Microchip, mentre la programmazione del PIC è stata realizzata mediante il PICSTART Plus.

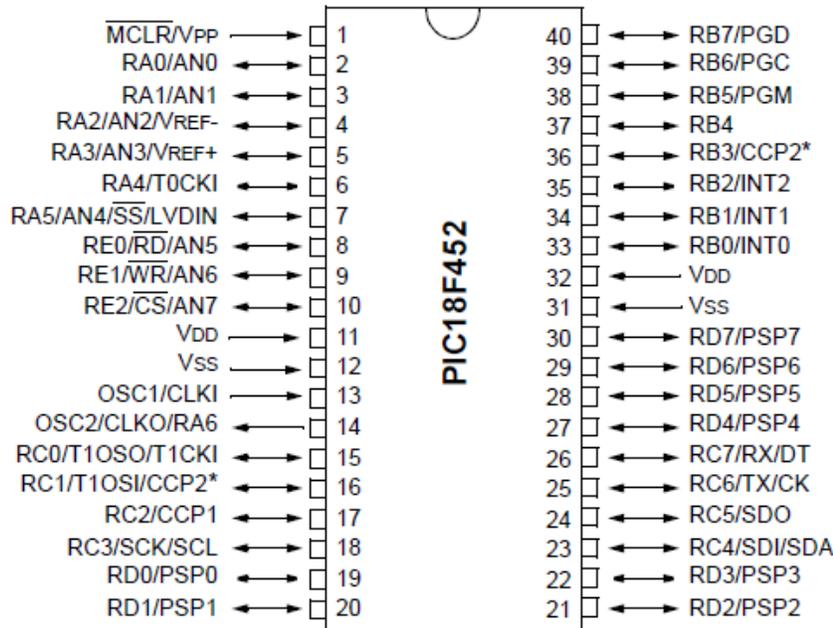


Figura 4: Piedinatura PIC

Come descritto in precedenza, il PIC avrà come segnali di ingresso, attraverso i convertitori ADC, le tensioni provenienti dal magnetometro. Come tensioni di riferimento per la conversione sono state utilizzate quelle di alimentazione del PIC, cioè 0 e 5 V, permettendo così, dati i 10 bit, una precisione di circa 5 mV.

Due sono i segnali di uscita dal PIC che piloteranno l'attivazione o lo spegnimento del driver di corrente della bobina.

Procedimento

Il sistema deve permettere il controllo dell'assetto del satellite in orbita, dirigendo il suo asse Z parallelo e concorde alle linee del campo magnetico terrestre. Questa specifica nasce dall'esigenza di puntare l'antenna del satellite, che si trova su una delle facce del piano XY, verso la stazione di terra. Il controllo di assetto però non può sempre restare attivo in quanto impiega il magnetometro

come segnale di retroazione, che deve essere utilizzato per le misure del campo geomagnetico.

Come descritto in precedenza, attivando la bobina perpendicolare all'asse Z del satellite si genera una torsione proporzionale al campo magnetico locale che porta il satellite nel tempo ad allinearsi. In questo caso il campo rilevato sugli assi X e Y del magnetometro è nullo. La logica di controllo implementata è del tipo ON-OFF, cioè accensione e spegnimento, e si avvale di un test sul modulo del vettore del campo rilevato sul piano XY.

Le istruzioni che compongono il programma caricato sul PIC possono essere raggruppate in due cicli. Quando il controllo viene attivato si entra nel primo ciclo che si occupa di verificare se il modulo rientra all'interno di una porzione circolare del piano XY di raggio ε e centrato nell'origine. Se ciò non avviene viene attivata la bobina, che richiama il dipolo verso l'asse Z, e si resta in questo ciclo fino a che non si soddisfa la condizione.

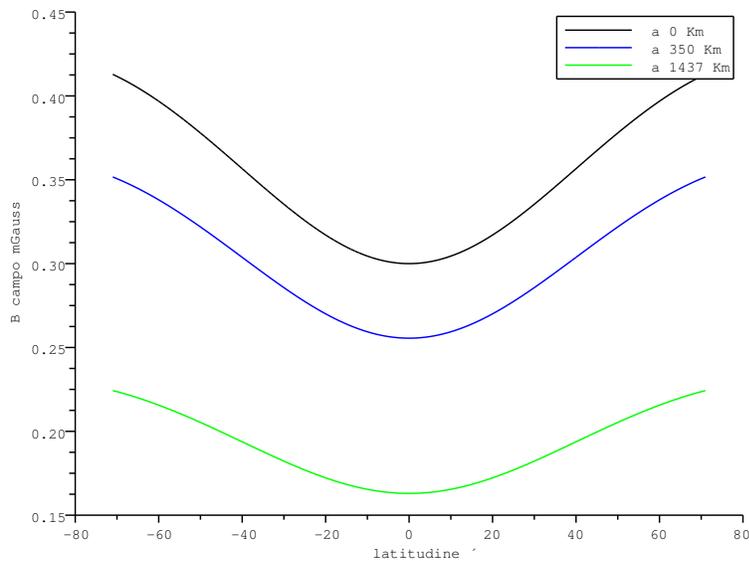


Figura 5: Simulazione del campo magnetico terrestre a tre differenti altitudini. La simulazione mostra l'andamento del campo magnetico terrestre da 71°N a 71°S di latitudine a tre differenti altitudini: sulla superficie terrestre, a 350 Km e a 1437 Km (queste ultime due rispettivamente perigeo e apogeo dell'orbita del satellite).

Il valore di ε è definito dalle specifiche del sistema [1]. Infatti l'angolo solido utile di ricezione dell'antenna è di circa 30° che impone un discostamento massimo dell'asse Z da quello delle linee del campo geomagnetico di circa 15°. Per

ricavare l'intensità del campo geomagnetico è stata utilizzata la seguente formula che deriva da una semplificazione del modello del campo magnetico terrestre di Tsyganenko [2]

$$B(R, \lambda) = \frac{B_o}{R^3} (1 + \sin^2 \lambda)^{\frac{1}{2}}$$

dove λ è la latitudine magnetica, R la distanza radiale misurata in raggi terrestri (R_E) e B_o è il campo magnetico calcolato sulla superficie terrestre sopra l'equatore [$B_o = B(R = R_E, \lambda = 0) = 0,30 \text{ Gauss}$].

Attraverso il programma SciLab è stata realizzata una simulazione, visibile in figura 5, per osservare l'andamento semplificato del campo magnetico terrestre.

Attraverso la simulazione è stato possibile trovare il valore minimo del campo che potrà essere rilevato dal satellite che è pari a $163,45 \text{ mGauss}$. Semplicemente è stato trovato il valore di ε con

$$\varepsilon = B(R = 1,23 R_E) \tan(15^\circ) = 43,79 \text{ mGauss}$$

che permette di effettuare il controllo confrontando il modulo del vettore campo magnetico sul piano XY con questo valore.

Usciti dal primo ciclo del programma si ricade nel secondo dove il controllo subisce una leggera differenza. Infatti non si osserva il valore del modulo attuale bensì la differenza con quello dell'acquisizione precedente. Se il modulo sta crescendo o rimane costante (il dipolo diverge dall'asse Z) viene attivata la bobina per richiamarlo. Viceversa se il modulo sta decrescendo (il dipolo converge all'asse Z) non viene attivato il comando per evitare le oscillazioni che si verrebbero a creare attorno all'asse. Naturalmente se il modulo resta costante e si presenta pari a 0 allora non si attiva la bobina perché è stato raggiunto l'allineamento.

In figura 6 è illustrato il diagramma di flusso (flow-chart) del programma. Il codice realizzato per il PIC18F452 è stato realizzato e testato con il software MPLab IDE.

Da notare che, anche supponendo di mantenere costantemente la bobina attiva durante tutta l'orbita, non si raggiungerebbe comunque l'allineamento tra l'asse Z e il campo. Infatti l'asse Z del satellite, in questo caso, comincerebbe ad avere un moto oscillatorio armonico attorno all'asse di puntamento del campo (dimostrato tramite opportune simulazioni Scicos) con frequenza pari a [3]

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{INAB}{I_K}}$$

dove I_K è il momento d'inerzia del satellite.

Il circuito elettrico completo realizzato, con i blocchi descritti in precedenza, è visibile in figura 7. Sono stati utilizzati due buffer per le tensioni provenienti dal magnetometro assieme a delle resistenze in cascata che determinano il tempo di acquisizione minimo dei convertitori analogico-digitali.

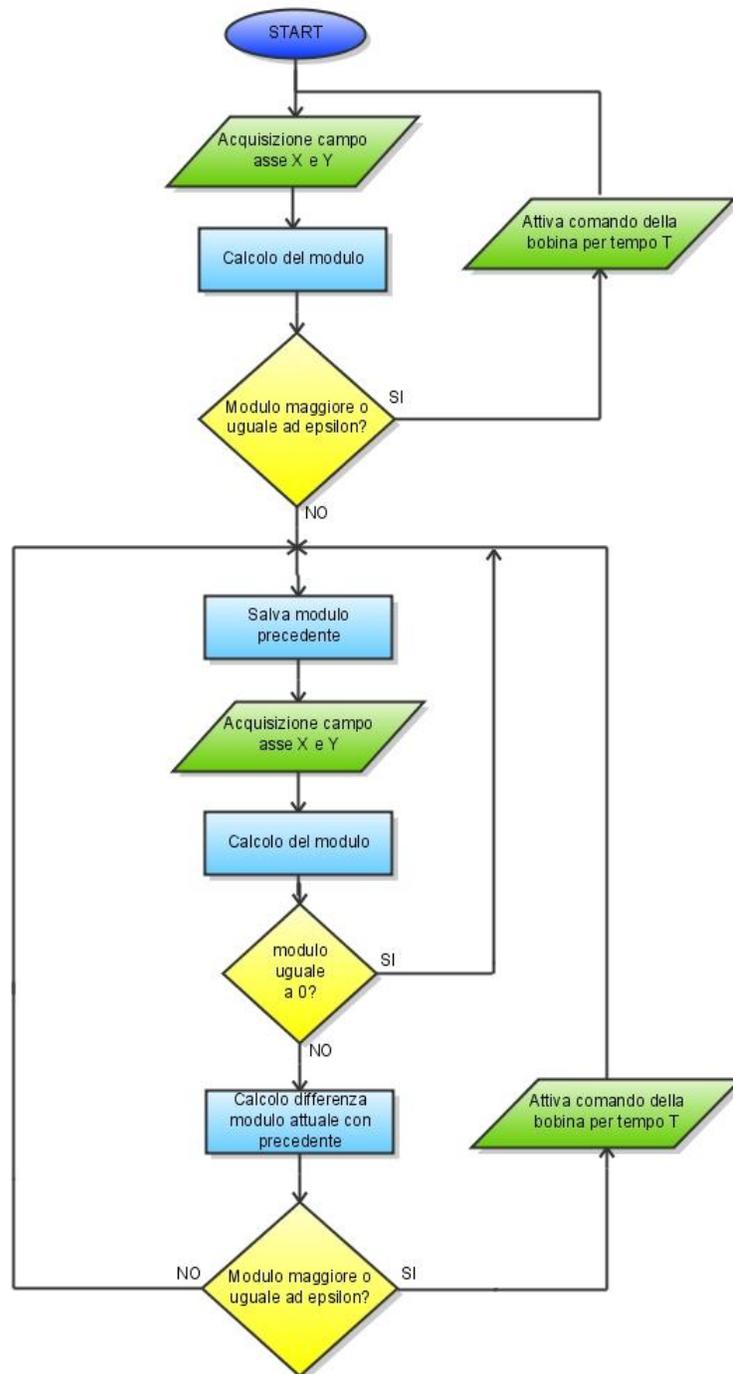


Figura 6: Flow-Chart del programma

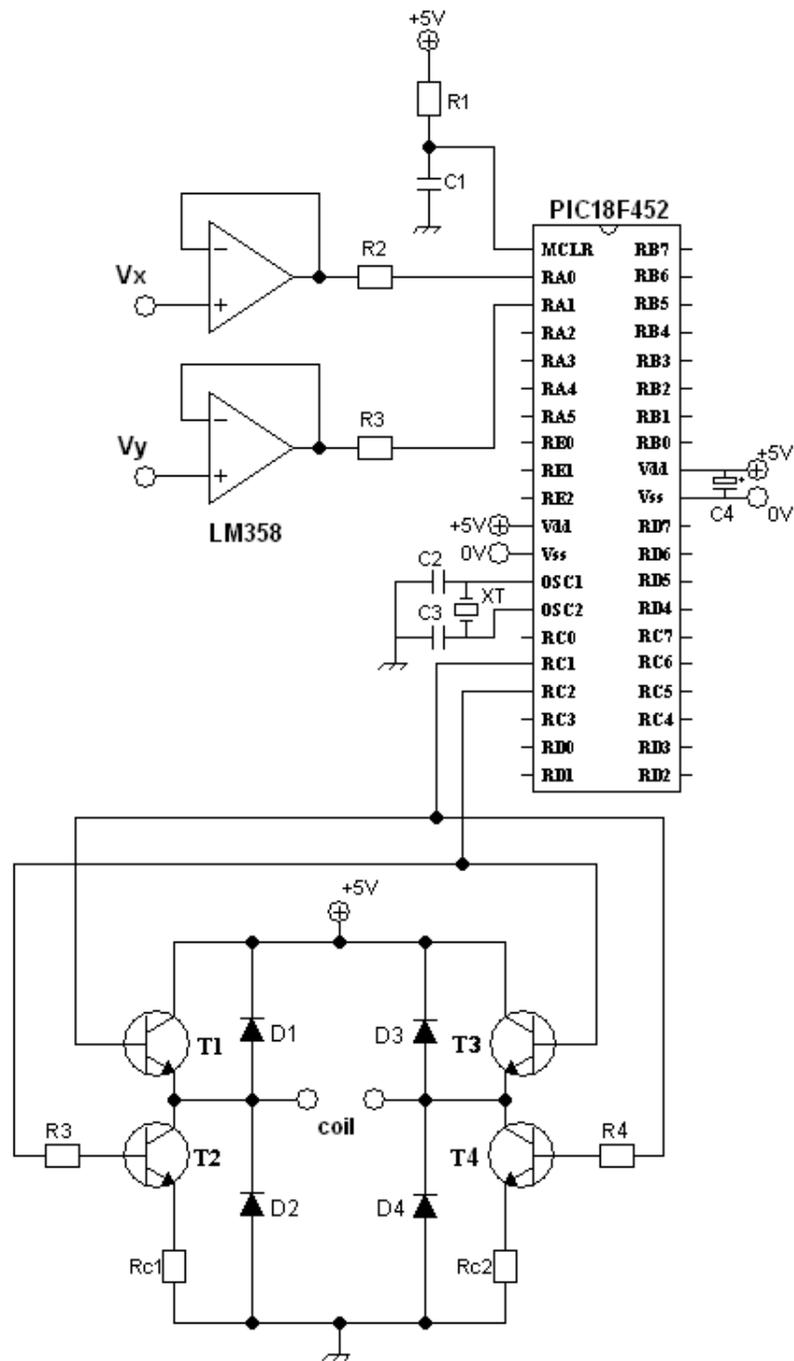


Figura 7: Circuito elettrico completo

Futuro del progetto

Sono state effettuate delle simulazioni attraverso l'utilizzo del software Scicos del possibile comportamento del controllo creato. In figura 8 è visibile un esempio. Questa simulazione è stata effettuata per visualizzare tutte e due le componenti del controllo implementate, infatti fino a che l'angolo fra l'asse Z del satellite e quello del campo è maggiore di 15° la bobina è sempre attiva. Appena raggiunge i 15° la bobina si disattiva ma, data l'accelerazione angolare acquisita, supera l'asse Z. Il controllo da questo punto ostacola il movimento di divergenza dall'asse ma non quello di convergenza. La simulazione è stata effettuata in condizioni non perturbate ed è ancora in fase di studio.

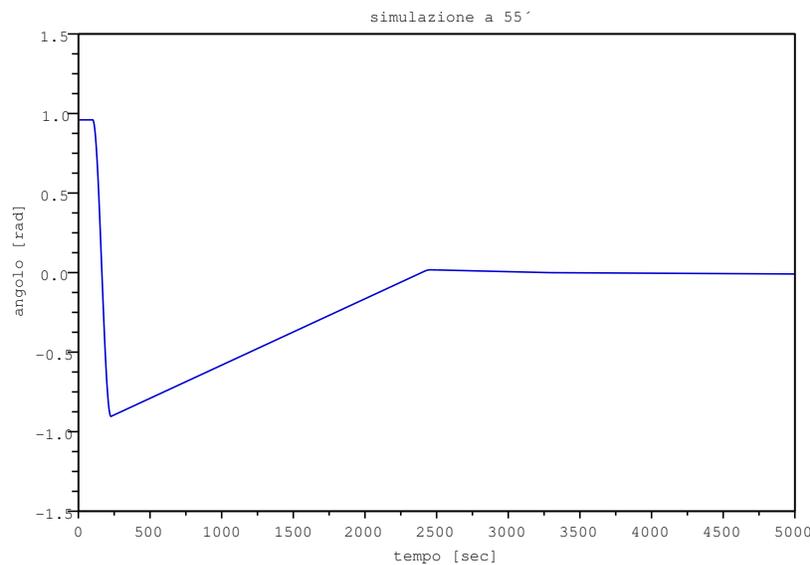


Figura 8: Simulazione del moto

Parallelamente al progetto è stata studiata la possibilità di sostituire alla bobina un circuito stampato che permetterebbe di ridurre lo spazio occupato e il peso dell'attuatore. Le specifiche fino ad ora considerate sono larghezza e profondità della pista e distanza fra due piste adiacenti. I dati considerati sono

$$l_{pista} = 0,1 \text{ mm} \quad p_{pista} = 75 \mu\text{m} \quad d_{piste} = 0,1 \text{ mm}$$

e a priori si conosce il valore dell'innalzamento della temperatura quando una corrente gli scorrerà all'interno, pari a circa 30°C . Queste dimensioni basse delle larghezze e distanze nascono dall'esigenza di avere molte spire stampate su una stessa faccia. Questo però ha portato a dimenticare il valore della resistenza elettrica dello stampato pari a

$$R_{stamp} = \rho_{Cu} \frac{l}{S} = 1,68 \cdot 10^{-8} \frac{156 \cdot 0,34}{10^{-4} \cdot 75 \cdot 10^{-6}} = 118,8 \Omega$$

troppo elevata se si intende far scorrere una corrente di 0,5 A con una tensione di alimentazione di 6 V. Da notare che nel calcolo della resistenza si è semplificato il calcolo considerando che tutte le spire possano avere la stessa dimensione, cosa irrealizzabile fisicamente dato lo spazio limitato sulla basetta.

Lo studio, che è ancora in corso, si è spostato quindi ad un adattamento delle dimensioni a discapito del momento di dipolo magnetico. I risultati, calcolati tramite il software Scicos, sono visibili in figura 9 e rappresentano la corrente massima fornita per la larghezza di pista che cresce, da 0,1 mm a 0,7 mm.

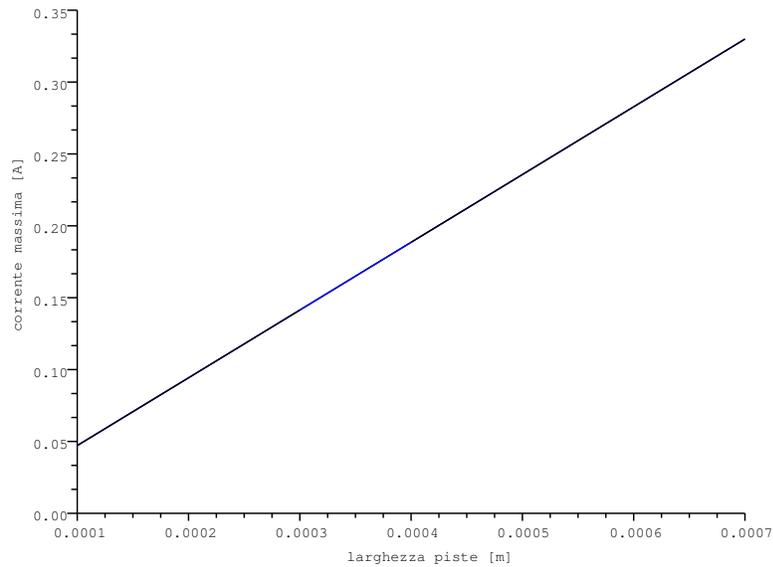


Figura 9: Corrente massima al variare della larghezza della pista

Riferimenti bibliografici

- [1] A. Cuttin, "Progetto di sistema del satellite AtmoCube, architettura di comunicazione e architettura di sistema", Tesi di Laurea, Università degli studi di Trieste, a.a. 2005/06;
- [2] J. R. Wertz ,W. J. Larson, "Space Mission Analysis and Design", Microcosm press, 2003;
- [3] N. Giorgi, "Studio dell'analisi termica e dell'assetto per il satellite didattico AtmoCube", Tesi di Laurea, Università degli studi di Trieste, a.a. 2008/09.