

POLITECNICO DI TORINO

Facoltà di Ingegneria dell'Informazione
Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica

Tesi di Laurea Magistrale

Collaudo ed Integrazione del satellite
universitario PiCPoT



Relatore:
Prof. Leonardo Reyneri

Candidato:
Stefano Speretta

Novembre 2006

Indice

Indice	v
Elenco delle figure	ix
Elenco delle tabelle	x
Sommario	x
1 Introduzione	1
1.1 Il progetto Cubesat	1
1.2 Il Progetto PicPoT	2
1.2.1 L'ambiente spaziale	4
1.2.2 I sottosistemi	5
1.2.3 Le schede	9
1.2.4 I numeri del progetto	16
2 Protocolli di comunicazione	19
2.1 Il protocollo AX-25	19
2.1.1 Introduzione	19
2.1.2 Definizione dei campi	19
2.1.3 Procedure di trasmissione	23
2.1.4 Implementazione software	24
2.2 Il protocollo APRS	26
2.2.1 Struttura del protocollo	27
2.3 Il protocollo Xmodem	27
2.3.1 Introduzione	27
2.3.2 Struttura del protocollo	29
2.4 Il protocollo per PowerSwitch	34
2.4.1 Specifiche di sistema	34
2.4.2 Protocollo di comunicazione	34
2.5 Il protocollo per Payload	36

2.6	Il protocollo per TxRx	36
3	Scheda PowerSupply	38
3.1	Introduzione	38
3.2	Interfacce	40
3.3	Sottosistemi	42
3.3.1	Gestione della Potenza Entrante e delle Celle Solari	42
3.3.2	Gestione della Carica delle Batterie	46
3.3.3	Gestione delle Misure	49
3.3.4	Gestione dell'acquisizione delle misure	50
3.3.5	Gestione dell'alimentazione dei sottosistemi	52
3.4	Collaudo	54
3.4.1	Introduzione	54
3.4.2	Strategia di collaudo	55
4	Scheda ProcB	77
4.1	Introduzione	77
4.2	Interfacce	78
4.3	Sottosistemi	81
4.3.1	Il processore	81
4.3.2	Acquisizione A/D	82
4.3.3	I sensori	82
4.3.4	Alimentatori switching	85
4.3.5	Circuito di protezione anti latch-up	85
4.3.6	Segnali di Test	85
4.3.7	Il motore elettrico	87
4.4	Software	90
4.4.1	Inizializzazione	91
4.4.2	Acquisizione data e ora	91
4.4.3	Acquisizione Telemetria	93
4.4.4	Controllo Carica Batterie	94
4.4.5	Creazione dei pacchetti di telemetria	95
4.4.6	Attesa ricezione telecomando	96
4.4.7	Esecuzione telecomando	97
4.4.8	Invio della Telemetria di Housekeeping	102
4.4.9	Richiesta di spegnimento	103
4.5	Collaudo	104
5	Stazione di Terra	105
5.1	Architettura della stazione di terra	105
5.1.1	Antenne	105

5.1.2	Controllo dei rotori	106
5.1.3	Gestione della stazione di terra	107
5.2	Il canale Tx/Rx a 437 MHz	108
5.3	Il canale Tx/Rx a 2440 MHz	109
5.4	Stazione di terra portatile	110
5.5	Software	111
5.5.1	Ricezione	112
5.5.2	Trasmissione	113
5.5.3	Portante	113
5.6	Collaudo	114
6	Conclusioni	118
A	Schemi Elettrici	119
B	Ambiente spaziale	122
B.1	Spettro solare e spettri standard	122
B.2	Energia solare	122
B.3	Albedo	123
C	Celle Solari	126
C.1	Modello matematico di pannello fotovoltaico	126
C.1.1	Generalità	126
C.1.2	Il modello di cella solare	126
C.2	Caratteristiche Pannelli Solari di PiCPoT	127
	Bibliografia	129

Elenco delle figure

1.1	<i>Prototipo di Cubesat ideato dalla CalPoly e dalla Stanford University</i>	2
1.2	<i>PiCPoT</i>	4
1.3	<i>Vista esterna di PiCPoT</i>	6
1.4	<i>Vista interna di PiCPoT</i>	7
1.5	<i>Vista interna di PiCPoT. Particolare del motore e dei magneti permanenti</i>	8
1.6	<i>Pacco schede assemblato</i>	9
1.7	<i>La scheda PowerSupply: TOP (a) e BOTTOM (b)</i>	11
1.8	<i>La scheda PowerSwitch: TOP (a) e BOTTOM (b)</i>	12
1.9	<i>La scheda ProcA TOP (a) e BOTTOM (b)</i>	13
1.10	<i>La scheda ProcB TOP (a) e BOTTOM (b)</i>	14
1.11	<i>La scheda Payload TOP (a) e BOTTOM (b)</i>	15
1.12	<i>La scheda TxRx TOP (a) e BOTTOM (b)</i>	16
2.1	<i>Pacchetto U o S</i>	20
2.2	<i>Pacchetto I</i>	20
2.3	<i>Definizioni di PID</i>	22
2.4	<i>Bit stuffing</i>	23
2.5	<i>CRC-hardware</i>	25
2.6	<i>Frame generico APRS</i>	27
2.7	<i>Pacchetto di telemetria di housekeeping</i>	27
2.8	<i>Pacchetto di telemetria estesa</i>	28
2.9	<i>Pacchetto di telemetria di Payload</i>	28
2.10	<i>Frame Xmodem</i>	29
2.11	<i>Protocollo Xmodem</i>	30
2.12	<i>Sequenza di trasmissione</i>	31
2.13	<i>Sequenza di ricezione</i>	32
2.14	<i>Pacchetto da PowerSwitch a ProcB</i>	34
2.15	<i>Pacchetto da ProcB a PowerSwitch</i>	35
3.1	<i>Schema a Blocchi Completo della Scheda PowerSupply</i>	41
3.2	<i>Escursioni termiche a centro faccia</i>	43

3.3	<i>Regolatore Switching con controllo isteretico</i>	44
3.4	<i>Tensione ai capi delle celle solari (con MPPT)</i>	45
3.5	<i>Tensione sulle celle solari, sulle batterie, sul Gate e Drain dell'NMos</i>	45
3.6	<i>Schema elettrico del blocco PMosSwitch con circuito di pilotaggio</i>	49
3.7	<i>Circuito di condizionamento per la tensione delle celle solari e batterie</i>	50
3.8	<i>Circuito di condizionamento per la corrente delle celle solari</i>	51
3.9	<i>Circuito di condizionamento per la corrente delle batterie</i>	51
3.10	<i>Circuito di condizionamento per la temperatura delle celle solari</i>	52
3.11	<i>Circuito di condizionamento per la temperatura delle batterie</i>	52
3.12	<i>Albero di multiplexer</i>	53
3.13	<i>Circuito di protezione anti latch-up</i>	54
3.14	<i>Collaudo dei Kill-Switch (a)</i>	56
3.15	<i>Collaudo dei Kill-Switch (b)</i>	57
3.16	<i>Collaudo dei Kill-Switch (c)</i>	57
3.17	<i>Collaudo dei Kill-Switch (d)</i>	58
3.18	<i>Collaudo reference di tensione (a)</i>	59
3.19	<i>Collaudo reference di tensione (b)</i>	59
3.20	<i>Collaudo reference di tensione (c)</i>	60
3.21	<i>Collaudo reference di tensione (d)</i>	60
3.22	<i>Collaudo reference di tensione (e)</i>	61
3.23	<i>Collaudo reference di tensione (f)</i>	61
3.24	<i>Collaudo reference di tensione (g)</i>	62
3.25	<i>Collaudo anti latch-up (a)</i>	63
3.26	<i>Collaudo anti latch-up (b)</i>	63
3.27	<i>Collaudo anti latch-up (c)</i>	64
3.28	<i>Collaudo alimentatori switching (a)</i>	66
3.29	<i>Collaudo alimentatori switching (b)</i>	67
3.30	<i>Collaudo alimentatori switching (c)</i>	67
3.31	<i>Collaudo segnale di Test (a)</i>	68
3.32	<i>Collaudo segnale di Test (b)</i>	69
3.33	<i>Collaudo dei multiplexer (a)</i>	71
3.34	<i>Collaudo dei multiplexer (b)</i>	71
3.35	<i>Collaudo dei multiplexer (c)</i>	72
3.36	<i>Collaudo dei multiplexer (d)</i>	72
3.37	<i>Caratteristica del sensore di temperatura celle solari</i>	73
3.38	<i>Caratteristica del sensore di temperatura batterie e scheda</i>	73
3.39	<i>Collaudo sistema selezione batterie (a)</i>	74
3.40	<i>Collaudo sistema selezione batterie (b)</i>	74
4.1	<i>Schema a blocchi</i>	80
4.2	<i>Diagramma a blocchi dell'A/D</i>	82

4.3	<i>Sensore di tensione</i>	83
4.4	<i>Sensore di corrente low-side</i>	84
4.5	<i>Caratteristica dell'NTC, normalizzata al valore di resistenza a 25 ° C</i>	84
4.6	<i>Circuito per la misura della temperatura</i>	85
4.7	<i>Circuito per la protezione dal latch-up</i>	86
4.8	<i>Selettore per il connettore di test</i>	86
4.9	<i>Sezione del motore elettrico</i>	87
4.10	<i>Il motore Maxon EC32 flat</i>	88
4.11	<i>Schema a blocchi del controllo</i>	89
4.12	<i>Il ponte ad H</i>	89
4.13	<i>Soluzione di pilotaggio HI-Side</i>	90
4.14	<i>Diagramma di flusso del software</i>	92
4.15	<i>Diagramma di flusso della fase di Inizializzazione</i>	93
4.16	<i>Diagramma di flusso della fase di creazione dei pacchetti di telemetria</i>	96
4.17	<i>Diagramma di flusso della fase di esecuzione telecomando</i>	98
4.18	<i>Diagramma di flusso della fase di scatto fotografia</i>	100
4.19	<i>Diagramma di flusso della fase di invio fotografia</i>	101
4.20	<i>Diagramma di flusso della fase di invio di un blocco</i>	102
4.21	<i>Diagramma di flusso della fase di controllo del motore</i>	103
5.1	<i>Schema a blocchi della stazione di terra</i>	106
5.2	<i>Le antenne ad elica (a) e a paraboloide (b)</i>	107
5.3	<i>Rotori, Controller e LabJack U12</i>	107
5.4	<i>Il TNC (a) e la radio Yaesu (b)</i>	108
5.5	<i>Chipcon CC2400</i>	109
5.6	<i>Power Amplifier KU 2325 A</i>	110
5.7	<i>LNA 2227 A</i>	110
5.8	<i>Diagramma di flusso della trasmissione</i>	111
5.9	<i>Diagramma di flusso della ricezione (a) e dell'interrupt del timer (b)</i>	114
5.10	<i>Diagramma di flusso della trasmissione</i>	115
5.11	<i>Il software per PC della stazione di terra</i>	116
A.1	<i>La scheda PowerSupply</i>	120
A.2	<i>La scheda ProcB</i>	121
B.1	<i>Spettri standard e spettro di corpo nero</i>	123
B.2	<i>La sorgente equivalente per il calcolo dell'albedo</i>	124
B.3	<i>La porzione di Terra vista dal satellite</i>	125
B.4	<i>Potenza radiante assorbita in funzione dell'angolo d'incidenza</i>	125
C.1	<i>Modello di cella solare</i>	127
C.2	<i>Caratteristica a 25 ° C: corrente / tensione (a) e potenza / tensione (b)</i>	128

C.3 *Caratteristica a 45 °C: corrente / tensione (a) e potenza / tensione (b)* 128

Elenco delle tabelle

2.1	<i>Controllo di flusso del protocollo</i>	23
2.2	<i>Controllo di flusso del protocollo</i>	29
2.3	<i>Contatori di Latch-up</i>	35
2.4	<i>Byte relativo allo stato degli interruttori</i>	35
3.1	<i>Collaudo reference di tensione</i>	56
3.2	<i>Collaudo reference di tensione</i>	62
3.3	<i>Collaudo anti latch-up</i>	64
3.4	<i>Collaudo alimentatori switching</i>	66
3.5	<i>Collaudo segnale di Test</i>	69
3.6	<i>Collaudo sistema selezione batterie</i>	75
3.7	<i>Collaudo sistema selezione batterie</i>	76
4.1	<i>Pacchetto di telemetria di Housekeeping</i>	79
4.2	<i>Indirizzo di test</i>	87
4.3	<i>Caratteristiche principali del motore</i>	89
4.4	<i>Soglie per la carica delle batterie</i>	95

Sommario

PiCPoT è il nome del primo nanosatellite progettato dal Politecnico di Torino. La sua realizzazione ha coinvolto numerosi professori, ricercatori e studenti di vari dipartimenti dell'ateneo durante il periodo Gennaio 2004 - Luglio 2006. Il lancio del satellite è avvenuto il 26 Luglio 2006 dalla base russa di Baikonur (KAZ) su un razzo vettore Dnepr-LV, di derivazione militare. L'orbita prevista sarebbe dovuta essere una LEO (Low Earth Orbit) con altitudine compresa tra i 600 e gli 800 km per garantire un deorbitamento autonomo a causa della resistenza aerodinamica dovuta agli strati alti dell'atmosfera. Il lancio purtroppo è fallito a causa di un problema idraulico sul razzo vettore.

Il satellite ha la forma di un cubo di lato 13 cm ricoperto su cinque facce da pannelli solari, fonte primaria di energia per il sistema. Sulla sesta faccia, invece, sono sistemate le due antenne di comunicazione con terra: una per la banda dei 437 MHz e l'altra per quella dei 2.4 GHz. All'interno sono presenti sei schede di controllo, tre telecamere con differenti distanze focali, sei pacchi batterie per immagazzinare energia da utilizzare nei periodi di eclissi ed una ruota di inerzia comandata da un motore che permette il controllo attivo dell'asse di spin del satellite.

Ogni scheda è caratterizzata da una struttura ridondante al fine di garantirne il funzionamento anche in presenza di guasti.

Le funzioni del satellite sono suddivise nelle varie schede come segue:

PowerSupply

Ha il compito di caricare le batterie utilizzando i pannelli solari mentre la selezione della batteria da caricare è affidata ai due processori di bordo. Si occupa anche del condizionamento dei segnali analogici provenienti dai sensori di bordo.

Powerswitch

PowerSwitch è la scheda che si occupa di generare le varie alimentazioni per i sottosistemi del satellite prendendo energia dalle batterie. Su questa scheda sono inoltre presenti due microcontrollori che si occupano di attivare i processori di bordo e contare gli eventi di latch-up.

ProcA e ProcB

Le due schede fungono da processori di bordo e sono sostanzialmente simili nelle funzioni svolte, ma differenti nelle soluzioni realizzative. Le principali operazioni che esse svolgono sono: l'acquisizione dei sensori di bordo, la creazione dei pacchetti di telemetria, la gestione della carica delle batterie ed il controllo della scheda Payload. La scheda ProcB si occupa inoltre del controllo del motore elettrico connesso alla ruota d'inerzia, unica cosa che differenzia le due schede.

Payload

Compito della scheda è la gestione delle fotografie che vengono scattate utilizzando le tre telecamere. Inoltre la scheda si occupa della compressione delle immagini in formato JPEG e della loro trasmissione ai processori di bordo che si occuperanno poi di inviarle a terra.

TxRx

La scheda TxRx ha il compito di far comunicare il satellite e la stazione di terra. Sono previsti due canali di comunicazione half-duplex su bande amatoriali: 437 MHz per la scheda ProcA e 2.4 GHz per la scheda ProcB.

Il lavoro di tesi è iniziato con lo studio dell'implementazione della scheda PowerSupply, realizzata precedentemente da un altro studente, per poi collaudarla. Terminata la fase di collaudo di tutte le schede del satellite si è iniziata la fase di integrazione, che ha richiesto circa un mese di lavoro.

Durante questa fase si è badato a risolvere tutti i problemi di comunicazione fra le schede e si sono dovute apportare alcune piccole modifiche al software dei processori. Dopo aver completato l'integrazione del satellite si è giunti alla fase finale di collaudo del sistema, realizzato questa volta utilizzando solamente la comunicazione radio con la stazione di terra. Per poter giungere a questa fase è stato poi necessario realizzare il software per una stazione di terra portatile, utilizzata durante le ultime fasi di collaudo a Torino e durante il collaudo finale svoltosi a Baikonur. Tale stazione di terra si interfaccia con un PC con ambiente Windows ed ha tutte le funzionalità della stazione fissa ma con potenza di trasmissione ridotta. Con poche modifiche il programma realizzato può anche essere utilizzato per gestire la stazione di terra presente sul tetto del Politecnico.

In questa fase sono stati effettuati molti test sul satellite, ultimo dei quali una prova sulla collina torinese per verificare il puntamento delle antenne, i sistemi di trasmissione / ricezione e tutte le funzionalità del satellite.

La struttura di questo documento è la seguente:

Capitolo 1 *descrive il progetto globale, la sua struttura ed i vincoli ambientali cui il satellite è sottoposto;*

Capitolo 3 *descrive tale scheda e la procedura di collaudo seguita;*

Capitolo 4 *descrive la scheda processore di bordo B ed il software realizzato;*

Capitolo 2 *descrive brevemente i protocolli di comunicazione utilizzati tra le varie schede e con la stazione di terra;*

Capitolo 5 *descrive la stazione di terra fissa posta sul tetto del Politecnico e la stazione di terra portatile, di cui è stato realizzato il software;*

Appendici *riportano gli schemi elettrici delle schede del satellite di cui si è parlato ed una breve descrizione dell'ambiente spaziale e del modello di cella solare, utili per una maggiore comprensione delle scelte che sono state fatte nel progetto.*

Capitolo 1

Introduzione

Negli ultimi anni, molti progetti di ricerca hanno puntato sulla sperimentazione e la ricerca in campo aerospaziale in particolare si sono moltiplicati i progetti relativi ai pico-nano-satelliti. Un pico-satellite è un satellite il cui peso è inferiore al kg mentre un nano-satellite invece ha un peso compreso tra 1 kg e 10 kg.

Lo scopo didattico del progetto è di far collaborare differenti dipartimenti in modo da affrontare un progetto che richiede di una serie di competenze ingegneristiche molto avanzate ed al contempo una grande capacità di collaborazione tra i vari soggetti interagenti.

Questi satelliti hanno la particolarità di essere dei sistemi mediamente complessi che permettono agli studenti che partecipano al loro sviluppo di affrontare un problema progettuale serio pur rimanendo un problema gestibile da tesisti.

Il punto di partenza del progetto PiCPoT è stato il concetto di Cubesat.

1.1 Il progetto Cubesat

Cubesat è uno standard per picosatelliti: una struttura cubica di 10 cm di lato e con una massa di 1 kg la cui struttura è definita in funzione dell'adattamento al lanciatore POD (Picosatellite Orbital Deployer). Lo standard è stato sviluppato nel 2001 dal Professor Robert Twiggs, docente alla Stanford University, USA, in collaborazione con lo Space Systems Development Laboratory (SSDL) della Stanford University e la California Polytechnic State University, USA, per permettere alle Università che intendono partecipare a questa sperimentazione di realizzare il proprio satellite e di mandarlo nello spazio a costi contenuti.

Cubesat significa satellite di forma cubica ed è nel contempo una filosofia progettuale. L'idea alla base di Cubesat è dunque quella di permettere agli studenti dei vari dipartimenti di Ingegneria di cooperare per la realizzazione di un progetto

che richiede nel contempo ottime conoscenze in campo ingegneristico e capacità di risolvere problemi di natura interdisciplinare.

L'idea di progettare un satellite è stata adottata da numerose università italiane e straniere, fra le quali citiamo l'Universitat Wurzburg,(D), la Norwegian University of Science and Technology (NO), l'Aalborg University (DK) e l'Università della Sapienza (IT). AAU-Cubesat, CanX-1, NCube, UWE-1 e UNISAT sono alcuni esempi di satelliti già in orbita realizzati rispettivamente dalle Università in Danimarca, Canada, Norvegia, Germania e Italia.

In seguito il Politecnico di Torino si è impegnato a partecipare alla progettazione ideando PiCPoT e collocandolo in un progetto più ampio, quello di una costellazione di satelliti universitari italiani, attualmente in via di definizione.



Figura 1.1. *Prototipo di Cubesat ideato dalla CalPoly e dalla Stanford University*

1.2 Il Progetto PicPoT

Il progetto PiCPoT, Piccolo Satellite del Politecnico di Torino, è nato nell'autunno 2003 con l'obiettivo di costruire nell'arco di un anno un nanosatellite universitario, con una massa minore di 10 kg, a scopo educativo e di ricerca.

PiCPoT è un progetto che coinvolge docenti, ricercatori, dottorandi e tesisti del

Dipartimento di Ingegneria Elettronica, del Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale e del Dipartimento di Fisica del Politecnico di Torino.

La progettazione del satellite è stata suddivisa per competenze tra vari dipartimenti:

- la struttura, il calcolo dell'orbita ed i problemi di natura organizzativa sono stati delegati al Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale;
- i computer di bordo, la gestione della potenza, l'acquisizione dei dati di telemetria e la comunicazione sono invece delegati al Dipartimento di Elettronica;
- i calcoli termici al Dipartimento di Fisica.

Il progetto del satellite si è basato sui seguenti requisiti:

- forma cubica con lato di 10 cm
- massa inferiore a 5 kg
- potenza non superiore a 1.5 W
- almeno 90 giorni di vita
- utilizzo di componenti COTS (Commercial Off The Shelf) nello spazio
- orbita LEO

Le funzioni principali del satellite sono:

- acquisire misure di temperatura ed illuminamento
- scattare fotografie
- trasmettere dati alla stazione di terra

La comunicazione terra-satellite avviene su 2 frequenze: 437MHz e 2.4GHz, frequenze amatoriali. L'utilizzo dei 2.4GHz è anch'esso una sperimentazione, dato che a tale frequenza vi sono grossi problemi a causa dell'effetto dell'attenuazione atmosferica.

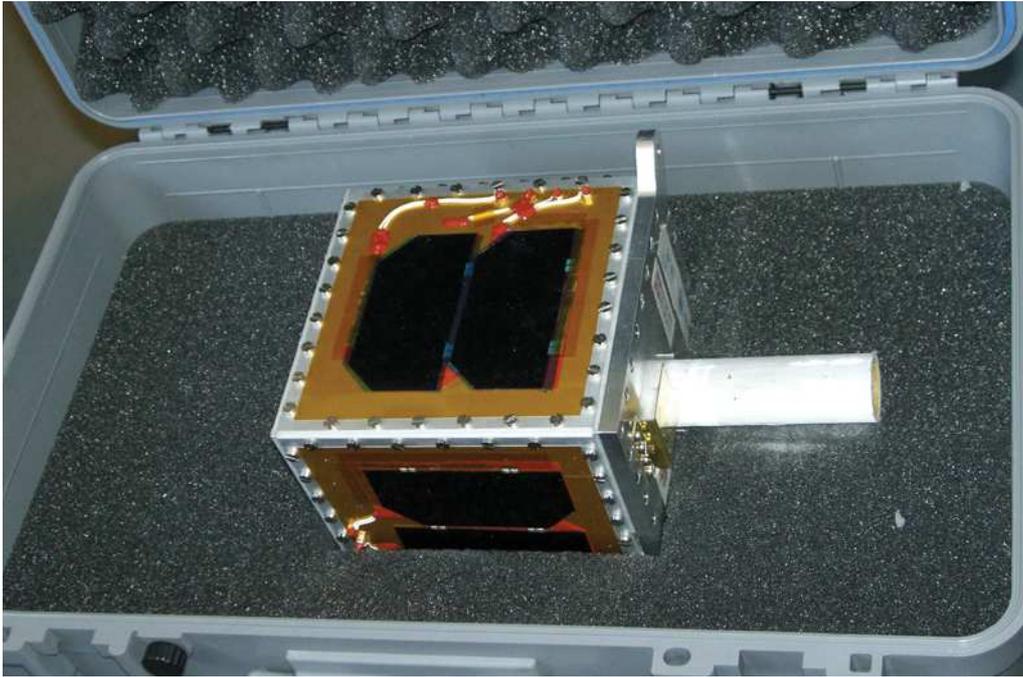


Figura 1.2. *PiCPoT*

1.2.1 L'ambiente spaziale

L'ambiente più ostile per il corretto funzionamento dei dispositivi elettronici è proprio lo spazio. I problemi legati a questo ambiente sono:

- Vuoto (ridotta dissipazione termica): sovradimensionamento e dissipatori volumici
- Vuoto (degassamento): eliminazione di componenti liquidi, pressurizzati e rotativi con spazzole
- Temperatura: analisi termica (dip. Energetica) e selezione componenti; monitoraggio temperature
- Radiazione (latch-up): componenti non C-MOS; layout meccanico di schermatura; circuiti anti-latch-up
- Radiazione (SEU): memorie ferro-elettriche e flash; ridondanza di programma; watch-dog timer
- Radiazione (total dose): non significativa.

Vediamo adesso più dettagliatamente come alcune di queste grandezze fisiche influenzano l'elettronica di un satellite.

1.2.2 I sottosistemi

Vista esterna

PICPOT è sostanzialmente un cubo di circa 13cm di lato, di cui cinque ricoperte da pannelli solari e dotato di due antenne (2.4GHz e 437MHz), tre fotocamere, due kill-switch ed un connettore di test. Le due figure seguenti ne mostrano la struttura esterna vista da due opposte direzioni. La faccia (F0) ospiterà i kill-switch, le fotocamere e le antenne, inoltre sarà utilizzata per l'aggancio al lanciatore.

Le tre fotocamere con asse ottico e direzione di vista parallela a X positivo sono all'interno del satellite, con la lente a filo di F0. Ciascuna telecamera ha una diversa lunghezza focale e risoluzione di 512 linee per 582 colonne:

- T1: lunghezza focale 3.6 mm, campo visivo totale sulla diagonale 68° , corrispondente a 750 km sulla terra e ad una risoluzione a terra di 800 m/pixel;
- T2: lunghezza focale 6 mm, campo visivo totale sulla diagonale 42° , corrispondente a 450 km sulla terra e ad una risoluzione a terra di 500 m/pixel
- T3: lunghezza focale 16 mm, campo visivo totale sulla diagonale 17° , corrispondente a 170 km sulla terra e ad una risoluzione a terra di 180 m/pixel

Ciascuna telecamera è indipendentemente avvitata alla faccia F0, tramite un attacco che ne garantisce la perpendicolarità a F0, ma non l'orientamento assiale. Questo dovrà essere misurato a terra dopo l'assemblaggio, al fine di orientare spazialmente le fotografie ricevute. Essendo l'asse ottico parallelo all'asse X, il centro del campo visivo delle telecamere non dipende dalla rotazione di PICPOT intorno al tale asse (il probabile asse di spin del satellite). Verranno utilizzate celle solari, in GaAs a 4,9V nominali, interconnesse e assemblate in cinque pannelli laminati e incorporanti un sensore di temperatura ciascuno.

Vista interna

PICPOT è alimentato da 6 gruppi di batterie ricaricabili (batterie secondarie), disposte fra i pannelli solari e le schede elettroniche.

Vengono qui indicati i differenti tipi di batterie utilizzate:

- B1, B2, B4, B5 : due celle Li-P in serie, per un totale di 7.2V nominali; capacità di 1,500mAh; modello Kokam. Le batterie saranno affiancate lungo la faccia più estesa e circondate da uno strato di gomma di protezione e termicamente conduttiva;

- B3, B6: sei celle Ni-Cd in serie, per un totale di 7.2V nominali; capacità di 1000mAh; modello SANYO High Capacity size AA. Le batterie saranno affiancate lungo la faccia più piccola, e circondate da uno strato di gomma di protezione e termicamente conduttiva;

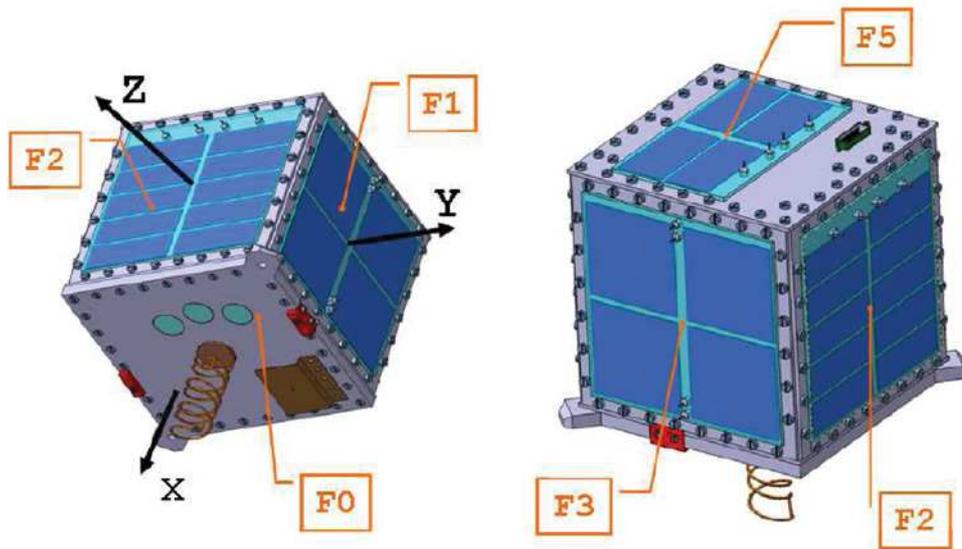


Figura 1.3. Vista esterna di PiCPoT

L'utilizzo di due kill-switch è dovuto alla perentoria richiesta del lanciatore. Essi verranno connessi in parallelo, per maggiore sicurezza. I kill-switch intercetteranno la massa comune delle batterie andando quindi a spegnere completamente il satellite, per evitare rischi di interferenza con l'elettronica del lanciatore.

PiCPoT non ha un controllo d'orbita. La sua orbita è determinata esclusivamente dalla sua posizione e velocità al momento del distacco dal lanciatore, e quindi non può essere controllato. L'orbita viene però tenuta sotto stretto controllo dal servizio americano NORAD che periodicamente rileva la posizione del satellite tramite radar e rende disponibili le effemeridi per i successivi tre giorni via Internet. Tali effemeridi verranno utilizzate per il puntamento delle antenne di terra.

L'assetto del satellite invece è impostato da un magnete permanente, posizionato all'interno del satellite, parallelo all'asse X (quindi ortogonale a F0 e F5), con il suo Sud magnetico prossimo a F0 (direzione positiva di X) e il Nord magnetico prossimo a F5 (direzione negativa di X). Questo dovrebbe favorire l'allineamento di F0 in direzione del Nord magnetico terrestre e quindi, dato l'orientamento delle linee di

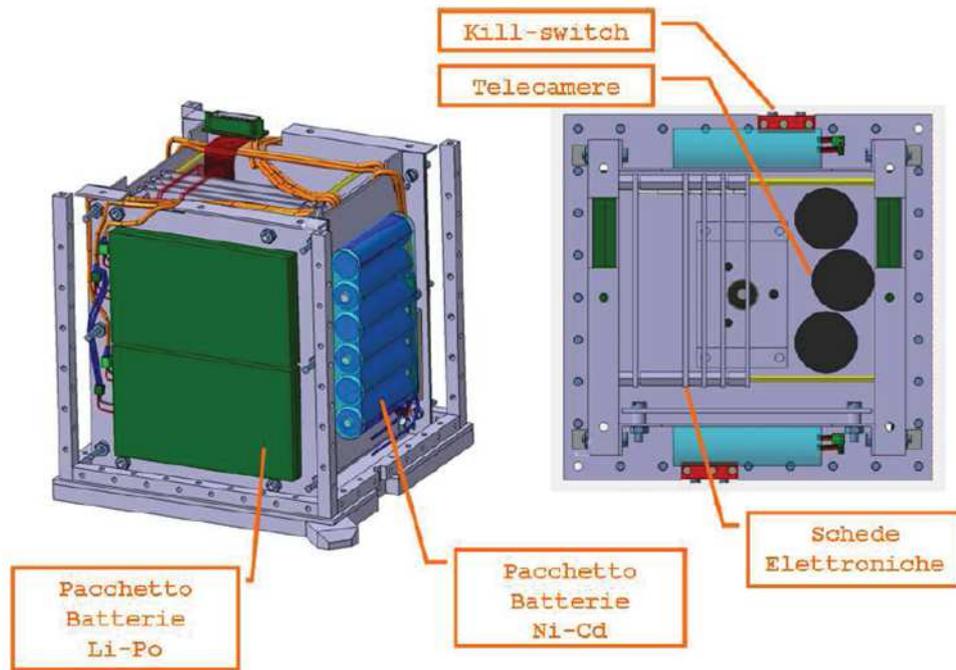


Figura 1.4. Vista interna di PiCPoT

flusso del campo magnetico terrestre, orientare F0 lievemente verso la superficie terrestre, favorendo l'inquadratura di quest'ultima da parte delle tre fotocamere. Il magnete permanente genera all'interno di PiCPoT un campo magnetico indesiderato, che influenza le misure dei magnetometri, che inizialmente erano inclusi nel progetto.

Ad ogni rivoluzione del satellite, il suo asse X viene ruotato di quasi 360° , causando un'oscillazione (nutazione), che verrà smorzata passivamente (non sono previsti smorzatori attivi), sia tramite smorzatori magnetici isteretici, sia tramite le correnti Eddy nelle superfici laterali del satellite. L'assetto sarà controllato attorno all'asse di spin da una ruota d'inerzia il cui asse sarà parallelo all'asse X. La direzione positiva di rotazione della ruota è quella dall'asse Y positivo verso l'asse Z positivo, che causerà quindi una rotazione inversa del satellite.

La ruota d'inerzia viene mossa da un motore brushless MAXON tipo ECflat32, da 9V, 6W nominali. Il motore ha tre avvolgimenti con connessione a stella e tre sensori di Hall. Il motore verrà controllato ad anello aperto, utilizzando i sensori di Hall, scheda ProcB, ed attivato in base ai telecomandi ricevuti da terra.

PiCPoT contiene al suo interno tre processori:

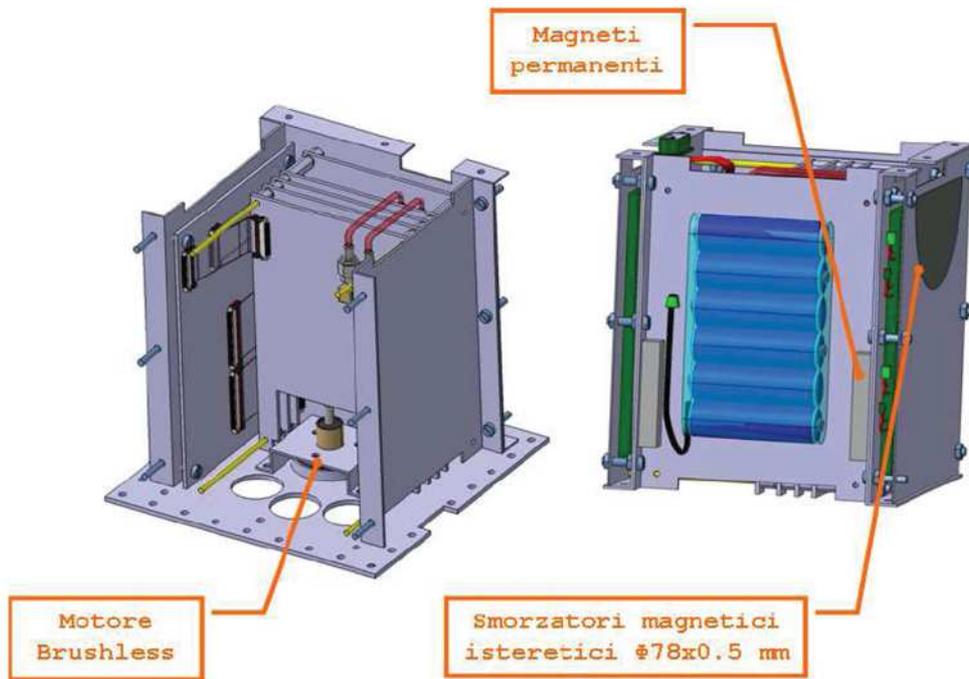


Figura 1.5. Vista interna di PiCPoT. Particolare del motore e dei magneti permanenti

- ProcA, per la gestione di bordo (housekeeping), associato al canale di comunicazione a 437MHz. Si utilizzerà un Chipcon 1010 con al suo interno il modulatore/demodulatore a 437MHz. Frequenza di clock 11 MHz; Tensione di alimentazione 3.3V.
- ProcB, per la gestione di bordo (housekeeping), associato al canale di comunicazione a 2.4GHz. Si utilizzerà un Texas Instrument MSP430 a basso consumo. Frequenza di clock 4 MHz; Tensione di alimentazione 3.3V.
- Payload, per la gestione del payload (telecamere T1, T2, T3). Si utilizzerà un Analog Devices BlackFIN, dotato d'interfacce dedicate per le telecamere. Frequenza di clock 100 MHz; Tensione di alimentazione 1.8V.

I due processori di housekeeping (ProcA e ProcB) sono indipendenti fra di loro, e duplicano le funzioni principali del satellite, per ottenere una ridondanza calda. I due processori condividono tutti i circuiti di condizionamento dei sensori, ma ciascuno dispone di un suo multiplexer analogico. I tre processori sono alimentati (e quindi avviati) periodicamente ed eseguono sempre lo stesso codice. Tramite un telecomando si possono eventualmente scaricare sui tre processori altrettanti programmi utente (uno per ciascun processore), ed eseguirli su richiesta di un altro

telecomando. Oltre ai sensori sono disponibili a bordo data e ora. Quest'ultima è tenuta sincronizzata con l'ora di Greenwich da ciascun telecomando, mentre un orologio a bordo mantiene il tempo fra successivi telecomandi. I sensori vengono campionati da ciascun processore ogni minuto e vengono trasmessi a terra come telemetria (TMH), automaticamente. I valori massimi, minimi, medi e la deviazione standard di ciascun sensore vengono salvati nel pacchetto di telemetria estesa per un massimo di 250 minuti (TMHE). Tramite un comando da terra è altresì possibile effettuare il reset tale vettore di telemetria

PiCPoT comunica a terra tramite due canali di comunicazione (per motivi di ridondanza), entrambi in banda amatoriale con protocollo APRS, rispettivamente:

- ProcA a 437.541 MHz per TC1, bit-rate di 9,600 bit/s; modulazione di frequenza 2-FSK con deviazione di 6kHz;
- ProcB a 2.440 GHz per TC2, bit-rate di 10,000 bit/s; modulazione di frequenza GFSK con deviazione di 125 kHz;

La trasmissione dei telecomandi avverrà con un protocollo ad-hoc, con unique world di 40 bit, preceduta da preambolo e seguita da telecomando di 12+27 bit (più eventualmente un programma eseguibile) codificato con un codice a parità dispari; il protocollo non verrà pubblicizzato, per evitare comandi indesiderati da parte di esterni.

1.2.3 Le schede

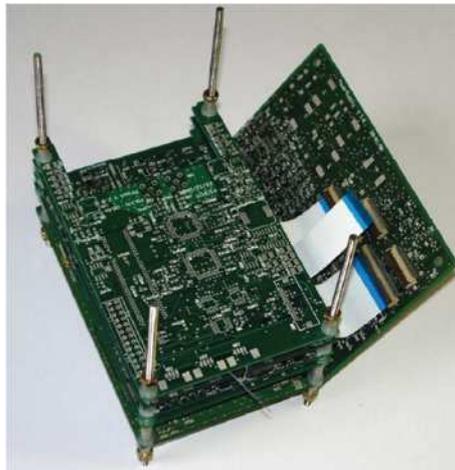


Figura 1.6. *Pacco schede assemblato*

Le schede elettroniche all'interno del satellite sono sei: PowerSupply, PowerSwitch, ProcA, ProcB, Payload e TxRx. Esse sono direttamente o indirettamente tutte in comunicazione tra di loro ad eccezione di ProcA e ProcB che non hanno nessun segnale in comune.

Adesso si procederà ad una breve descrizione delle singole schede.

PowerSupply

La scheda PowerSupply ha il duplice compito di mantenere cariche le batterie ricaricabili di PiCPoT e di monitorare lo stato elettrico e termico dei pannelli, dei caricabatterie e delle batterie stesse.

La scheda PowerSupply ospita:

- cinque caricabatterie che ricevono potenza da altrettanti pannelli solari (esterni al satellite);
- sensori di corrente media e tensione media erogata dai cinque pannelli; questi sono alimentati dalla scheda PowerSwitch, quando richiesto da ProcA o ProcB;
- sensori di corrente di carica/scarica e tensione delle sei batterie; questi sono alimentati dalla scheda PowerSwitch, quando richiesto da ProcA o ProcB;
- i circuiti di condizionamento per cinque sensori NTC (esterni al satellite) che rilevano la temperatura dei pannelli solari; questi sono alimentati quando richiesto da ProcA o ProcB;
- i circuiti di condizionamento per sei sensori NTC (posizionati sulle batterie) che rilevano la temperatura delle batterie; questi sono alimentati quando richiesto da PowerSwitch, ProcA o ProcB;
- il circuito di condizionamento per un sensore NTC che rileva la temperatura in vicinanza dei caricabatterie; questo è alimentati quando richiesto da ProcA o ProcB;
- due multiplexer (comandati da ciascun processore) per la lettura sequenziale delle temperature, delle tensioni e correnti sopra citate;
- due circuiti digitali (per ridondanza) e sei quadruple di interruttori PMOS per la selezione dell'unica batteria da caricare; questi sono sempre autoalimentati;
- due alimentatori (vedi sopra) non regolati per alimentare i cinque caricabatterie e i suddetti circuiti digitali, suddivisi in due gruppi, per ridondanza;

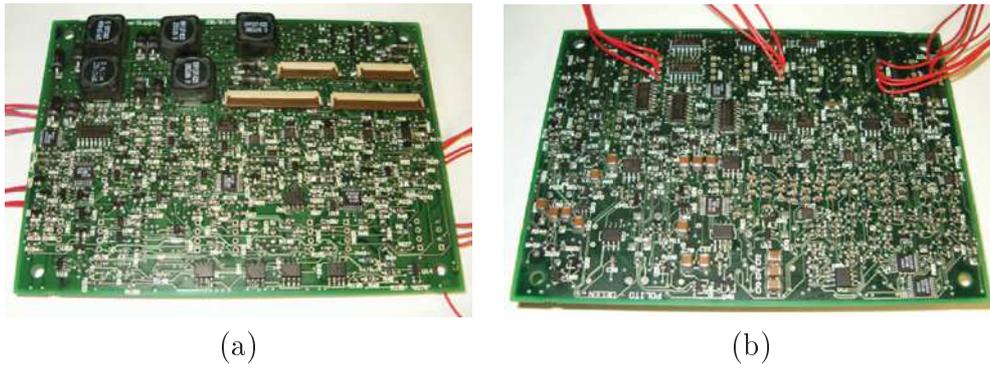


Figura 1.7. *La scheda PowerSupply: TOP (a) e BOTTOM (b)*

PowerSwitch

Il sottosistema PowerSwitch distribuisce l'energia a tutti i sottosistemi del satellite massimizzandone l'efficienza. Delle schede con microcontrollore è l'unica ad essere sempre alimentata in quanto si occupa della sincronizzazione del satellite attraverso due orologi O1 e O2 (master e slave) integrati nei rispettivi microcontrollori. Anche la PowerSwitch segue la filosofia della ridondanza, essendo suddivisa in due catene completamente indipendenti. Le due catene A e B hanno microcontrollori diversi: rispettivamente il pic16F877A della Microchip e l'MSP430 della Texas Instruments.

I due microcontrollori, pur essendo sempre alimentati, si attivano una volta ogni 60 secondi con uno sfasamento di 30 secondi l'uno dall'altro utilizzando un timer. Durante l'attivazione di uno, l'altro sta in low power mode per risparmiare energia. Il processore master (A) invia un segnale di sincronizzazione al processore slave (B) al trentesimo secondo. L'orario viene ricevuto dalla stazione di terra, tramite comunicazione con la rispettiva scheda processore quando si riceve un telecomando corretto.

Per i primi cinque secondi di attivazione il rispettivo controllore attiva il regolatore lineare che alimenta i circuiti di condizionamento dei sensori di temperatura per consentire alla rispettiva scheda processore di acquisire gli stessi sensori. Ogni catena gestisce tre delle sei batterie rispettivamente (B1, B2, B3) per A e (B4, B5, B6) per B.

Questa scheda svolge i seguenti compiti:

- definire quale batteria scaricare di volta in volta;
- generare le necessarie tensioni regolate per le altre schede, a partire dalle tensioni delle batterie, proteggendo, dove richiesto, da latch-up;

- attivare, tramite l'alimentazione, le altre schede, su base temporale (ad es. attivazione periodica dei processori e trasmettitori/ricevitori);
- mantenere una coppia di orologi di sistema (uno per ogni processore), sincronizzati fra loro, che periodicamente attivino i corrispondenti processori;
- conteggiare gli interventi di ciascun circuito di anti latch-up associato a ciascun alimentatore, inclusi quelli delle altre schede;
- condizionare e moltiplicare i sensori di tensione e corrente all'uscita degli alimentatori



Figura 1.8. *La scheda PowerSwitch: TOP (a) e BOTTOM (b)*

ProcA e ProcB

Le due schede processore (rispettivamente ProcA e ProcB) sono sostanzialmente simili. Si è scelto di duplicarle per motivi di ridondanza. Sono progettate da persone diverse, utilizzando parzialmente componenti di tipo diverso, pur mantenendo funzionalità sostanzialmente equivalenti, inoltre esse non comunicano mai tra di loro. La scheda ProcA utilizza un microcontrollore Chipcon CC1010 (core 8051 + modulatore/demodulatore a 437 MHz) ed una FPGA per svolgere le sue funzioni, mentre la scheda ProcB utilizza come processore un Texas Instruments MPS430 e come modulatore/demodulatore un Chipcon CC2400 che è nella scheda TxRX. Altra differenza riguarda il controllo motore, che nella versione definitiva delle schede è presente solo sulla scheda ProcB. Vi sono poi differenze per quanto riguarda la distribuzione dei segnali tra le schede, come ad esempio la presenza dei connettori per le telecamere nella scheda ProcA o i segnali di selezione del connettore di test che sono forniti alla PowerSupply solo da ProcB.

Per le schede processore non è necessario un watch-dog, in quanto esse vengono spente e riaccese ogni minuto: un eventuale problema transitorio causerebbe solamente la perdita di un ciclo di trasmissione, in quanto il sistema verrebbe comunque spento e riacceso dopo un minuto.

Le funzioni principali svolte sono:

- acquisire i sensori per formare la telemetria
- attuare la strategia di carica delle batterie
- ricevere i telecomandi
- eseguire i telecomandi ricevuti
- trasmettere le telemetrie alla stazione di terra
- comunicare con la scheda Payload
- comunicare con la scheda PowerSwitch
- attivazione ruota d'inerzia (solo ProcB)



(a)



(b)

Figura 1.9. La scheda ProcA TOP (a) e BOTTOM (b)

Payload

Compito di questa scheda è quello di scattare fotografie, su richiesta da terra, compimerle in formato JPEG, e inviarle ad una delle schede ProcA o ProcB, che a loro volta le invieranno a terra. La scheda Payload gestisce le tre telecamere, posizionate a fianco della scheda.

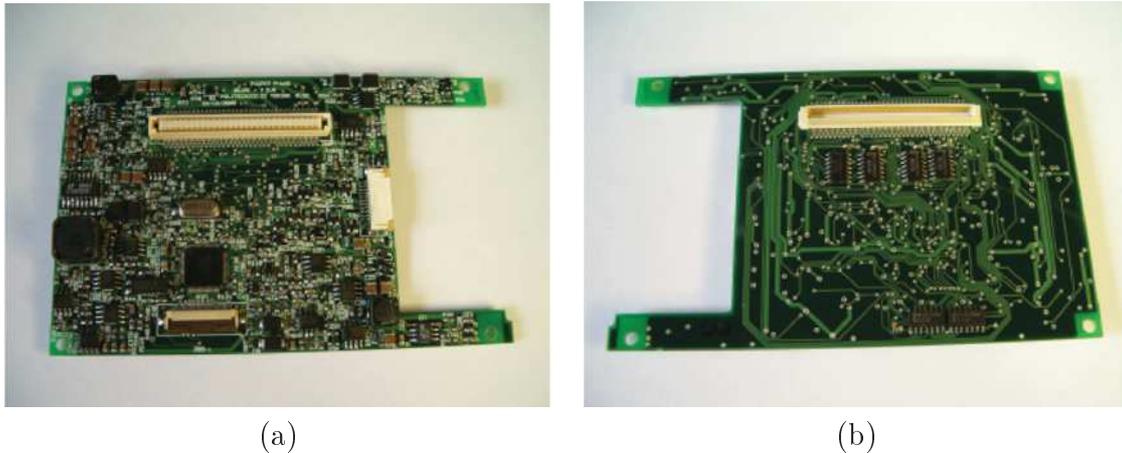


Figura 1.10. *La scheda ProcB TOP (a) e BOTTOM (b)*

Le telecamere vengono alimentate individualmente per il tempo strettamente necessario (massimo 3 secondi), attraverso interruttori posizionati sulla scheda stessa. Il segnale d'uscita delle tre telecamere (formato PAL) viene inviato ad un decoder digitale, che converte il segnale PAL in uno stream digitale a 8 bit di intensità più 4+4 bit di crominanza. Lo stream digitale viene acquisito direttamente dal processore (un BlackFIN della Analog Devices), tramite una sua porta dedicata, e trasferito via DMA alla memoria dati esterna al processore. Viene acquisito un solo fotogramma alla volta (funzione di fotocamera). L'immagine viene poi spezzata in 3x3 blocchi (numerati da 1, in alto a sinistra, 3, in alto a destra, fino a 9, in basso a destra) e poi ogni blocco viene compresso in formato JPEG via software e i 9 blocchi compressi memorizzati in una di 5 zone della memoria dati, come richiesto dal telecomando. Si reputa che il tempo di compressione totale sia inferiore a 15 secondi, e che la dimensione dell'immagine compressa sia al massimo 45 kb.

Il funzionamento della scheda Payload sarà il seguente, nell'ordine:

- su richiesta di una delle schede ProcA o ProcB la scheda Payload viene alimentata;
- il processore acquisisce, via interfaccia SPI, il comando dalle schede ProcA e ProcB e lo interpreta. Se è in grado di attuarlo, risponde, tramite la stessa SPI, con un segnale di conferma. Se sta già eseguendo un comando richiesto dall'altro processore, risponde negativamente;
- successivamente:
 - (a) alimenta una delle tre telecamere (T1, T2 o T3);

- (b) scatta una foto;
- (c) spegne la telecamera;
- (d) spezza l'immagine in blocchi e li comprime e memorizza nella memoria a;

oppure, a seconda del comando ricevuto, invia l'immagine compressa che è stata richiesta al processore corrispondente.

- appena eseguito il comando (ovvero alla ricezione della conferma, o al termine del trasferimento dell'immagine), la scheda ProcA o ProcB toglie l'alimentazione.

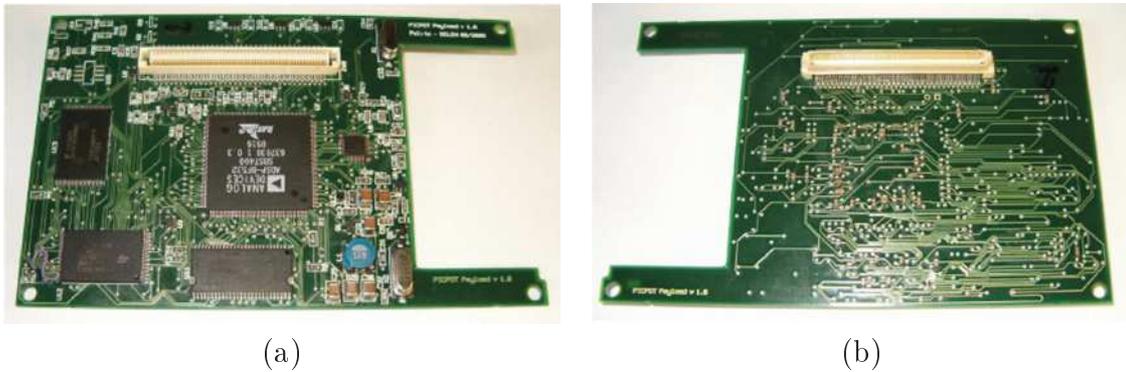


Figura 1.11. La scheda Payload TOP (a) e BOTTOM (b)

TxRx

La scheda TxRx ha il compito di far comunicare il satellite e la stazione di terra fra loro. Sono previsti due canali di comunicazione su due distinte bande amatoriali. Ogni canale è half-duplex (tramissione e ricezione mutuamente esclusive).

La scheda contiene:

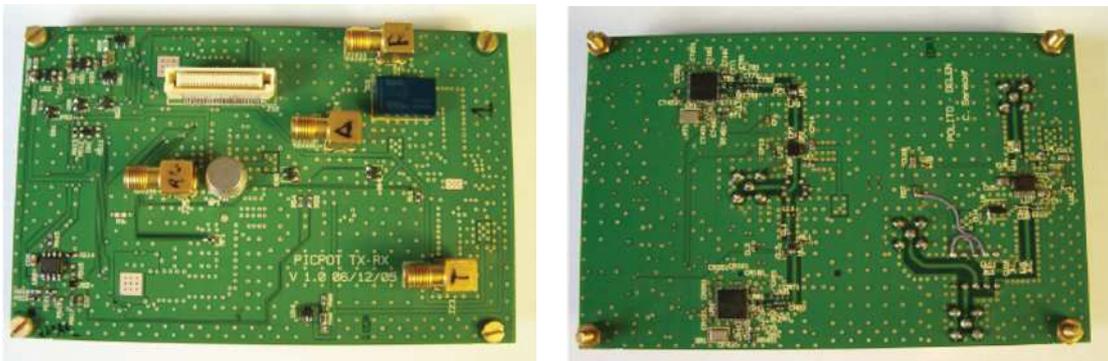
- un amplificatore di potenza sulla banda 437 MHz, che riceve il segnale già modulato in frequenza dalla scheda ProcA, e fornisce in antenna un segnale con una potenza pari a 30 dBm
- uno commutatore d'antenna a 437MHz, per connettere l'antenna all'amplificatore di potenza o al demodulatore presente sulla scheda ProcA;
- un modulatore a 2.4 GHz (Chipconn CC2400), che riceve attraverso una linea seriale i dati da inviare via radio dalla scheda ProcB;

- un amplificatore di potenza sulla banda 2.4GHz, che fornisce in antenna un segnale con potenza pari a 30 dBm
- un demodulatore a 2.4GHz (Chipcon CC2400), che demodula il segnale radio ed invia i dati decodificati alla scheda ProcB;
- un amplificatore a basso rumore a 2.4 GHz, che permette di avere in ricezione una sensibilità di -118 dBm;
- uno commutatore d'antenna a 2.4 GHz, per connettere l'antenna all'amplificatore di potenza (PA) o all'amplificatore a basso rumore (LNA);

Ad ogni attivazione la scheda ProcB programma i due transceiver CC2400 prima di ogni ricezione e trasmissione tramite l'interfaccia seriale SPI, non avendo la scheda TxRx un processore dedicato a questo compito. Tramite seriale vengono anche forniti i comandi per selezionare la modalità di ricezione e trasmissione.

Per quanto riguarda il canale a 437 MHz, invece avviene soltanto l'attivazione dell'amplificatore in quanto il resto è già integrato nella scheda ProcA.

La scheda TxRx è quella più critica per quanto riguarda la dissipazione di potenza per cui attorno ai componenti più critici è stata inserita una speciale gomma termicamente conduttiva.



(a)

(b)

Figura 1.12. La scheda TxRx TOP (a) e BOTTOM (b)

1.2.4 I numeri del progetto

Si riportano in questo paragrafo una serie di dati per dare un'idea di ciò che sta dietro alla realizzazione di un progetto complesso questo.

Caratteristiche del satellite:

- forma cubica
- dimensioni 130 mm (lato)
- peso 2.5 kg
- baricentro (x,y,z)=(36.54, 66.32, 64.81) mm
- momento d'inerzia (I_{xx}, I_{yy}, I_{zz})=(0.015, 0.022, 0.022) $kg\ m^2$
- temperatura di lavoro (-50 ° C a +150 ° C)
- potenza media 1,5W
- tempo per lo sviluppo dell'avionica (9 anni-uomo)
- 6,5 anni-uomo di studenti(72%)
- 1,5 anni-uomo di professori e PhD(17%)
- 1 anno-uomo di coordinamento(11%)

di cui indicativamente:

- 3 anni-uomo per il progetto
- 2 anni-uomo per la prototipazione e collaudo
- 2,5 anni-uomo per la messa a punto (riprogettazione)
- 1,5 anni-uomo per la realizzazione finale e collaudo

Componenti necessari:

- 1576 componenti COTS
- 6 circuiti stampati
- 40 connettori
- 6 processori low power
- 6 pacchi batterie
- 5 pannelli solari
- 2 antenne

- 30m cavi

Costi:

- 20000 € per i componenti di cui:
 - (a) 4000 € per il prototipo
 - (b) 14000 € per 4 satelliti
 - (c) 1000 € attrezzatura specifica
 - (d) 1000 € pezzatura minima
- 50000 \$ per il lancio
- 10000 € per la stazione di terra
- 6000 € di strumentazione
- 5000 € mano d'opera esterna (borse)

Capitolo 2

Protocolli di comunicazione

Nel seguente capitolo si farà spesso riferimento alla suddivisione standard dei protocolli di trasmissione in differenti livelli, secondo lo standard OSI[7].

2.1 Il protocollo AX-25

2.1.1 Introduzione

Questo protocollo è conforme alle raccomandazioni ISO 3309, 4335 (includendo DAD 1&2) e 6256 high-level data link control (HDLC) ed è stato creato per poter lavorare egualmente bene in ambienti radioamatoriali sia half che full duplex.

La maggior parte dei protocolli di link-layer a livello due danno per sottinteso che la comunicazione avvenga tra una apparecchiatura principale, detta DCE o Data Circuit-terminating Equipment, collegata a diverse altre più piccole, dette DTE o Data Terminating Equipment. Una tale assegnazione di funzioni non è auspicabile in un mezzo condiviso qual'è il tipico canale radioamatoriale.

AX.25 considera una nuova classe di apparecchiature (devices) i DXE, capaci di svolgere sia i compiti di un DCE che di un DTE in egual misura.

2.1.2 Definizione dei campi

Le trasmissioni a livello due in Packet Radio (d'ora in poi PR) sono costituite da piccoli "blocchi" detti (frames). Ogni frame è l'insieme di parti più piccole unite in sequenze logiche univoche, detti fields (campi). Ogni pacchetto è formato da più campi. Ogni campo, field, è composto da gruppi di otto bit, octets o bytes, e ha specifiche funzioni. Si illustrano i possibili pacchetti:

Si descriveranno adesso le funzioni di ciascun campo:

Flag	Address	Control	Info	FCS	Flag
01111110	112/224 Bits	8/16 Bits	N*8 Bits	16 Bits	01111110

Figura 2.1. *Pacchetto U o S*

Flag	Address	Control	PID	Info	FCS	Flag
01111110	112/224 Bits	8/16 Bits	8 Bits	N*8 Bits	16 Bits	01111110

Figura 2.2. *Pacchetto I*

Flag

Dato che il P.R. è un protocollo orientato al bit, l'unico modo per avvertire il corrispondente del termine di un pacchetto e della partenza di un altro, per evitare overrun e perdite di dati, è l'invio di un campo di delimitazione per l'inizio e la fine di ogni frame. Questo campo viene chiamato FLAG field, consiste di un bit a "0" seguito da sei bit a "1" e di nuovo da uno "0", ovvero dal byte: 01111110 (7E esadecimale).

Come si vedrà di seguito, vi sono dei meccanismi che eseguono il bit stuffing per evitare il ripetersi di questa sequenza all'interno di un frame: le uniche volte in cui questa sequenza è non solo permessa ma valida sono l'inizio e la fine di ogni pacchetto valido. Esiste la possibilità di utilizzare questo segnale come idle (mantenimento della portante modulata dal segnale), infatti il corrispondente ogni volta che termina di decodificare un byte così composto attende il prossimo come inizio valido del pacchetto a seguire. Se il prossimo byte sarà di nuovo un flag viene mantenuto lo stato iniziale di attesa della parte utile del pacchetto e questo ciclo può esser ripetuto.

Address Field

Il campo d'indirizzamento, Address, viene usato per conoscere origine e destinazione di ogni singolo frame.

Nella raccomandazione CCITT X.25, questo campo è lungo al massimo un byte. Quindi permette al massimo 256 utilizzatori per ogni canale PR livello 2. Ancora, siccome alcuni bit di questo campo hanno altri usi, questo farebbe cadere il numero di utilizzatori contemporanei al livello di 30 per ogni canale. Entrambe

le raccomandazioni HDLC e ADCCP permettono l'estensione del campo d'indirizzamento. Il protocollo amatoriale AX.25 prevede quindi, per comune decisione, l'estensione dell'ADDRESS field per permettere l'inserzione dei nostri nominativi, sia del destinatario (destination) che del mittente (source) in ogni pacchetto.

Control Field

Il campo di controllo viene usato per identificare il tipo di frame e altri attributi della connessione a livello 2 ed è lungo un byte. Permette il mantenimento del controllo degli eventi di link (collegamento-connessione) tra le stazioni. La costruzione del campo di controllo di AX.25 è ripresa dalla raccomandazione CCITT X.25 per operazioni bilanciate (LAPB), con in più l'aggiunta di un sottocampo di controllo ulteriore ripreso da ADCCP per permettere trasmissioni circolari e a stazioni non connesse.

Campo PID

Protocol Identifier field: campo identificatore di protocollo. È usato solo nei pacchetti d'informazione ed identifica che tipo di livello 3 è in uso, ammesso che ve ne sia uno. La sua decodifica ha questi valori 2.3: Dove:
y. indica un valore qualunque del bit.

Information Field

Questo è l'unico campo del pacchetto che contiene le informazioni utili.

Il resto dei campi introduce overhead, in quanto non trasporta informazioni degli utilizzatori ma "solo" dati di funzionamento del protocollo. Il campo d'informazione è valido solo per tre tipi di pacchetti: I frames, UI, frames e FRMR frames. Ovvero: Information frames; Unnumbered Information frames; FRaMe Rejected frames.

Il campo I può essere lungo sino a 256 bytes, comunque la sua lunghezza deve essere un multiplo pari di bytes, al minimo due bytes. Tutti i dati che vengono inseriti all'interno dell'I field vengono passati in modo "trasparente" dal mittente al destinatario lungo il link, salvo per l'inserzione di un eventuale bit a "0" necessaria per evitare che un FLAG compaia all'interno del campo dati (bit stuffing).

Frame Check Sequence

Il campo di controllo del pacchetto (FCS o CRC) è un numero su 16 bit e viene calcolato sia dal destinatario che dal mittente di ogni pacchetto. Il mittente lo calcola e lo inserisce nel pacchetto da spedire, il destinatario lo ricalcola (in base ai dati ricevuti) e lo controlla con quello speditogli nel frame. Ha compiti di verifica

HEX	M S B	L S B	Translation
**	yy01yyyy		AX.25 layer 3 implemented.
**	yy10yyyy		AX.25 layer 3 implemented.
0x01	00000001		ISO 8208/CCITT X.25 PLP
0x06	00000110		Compressed TCP/IP packet. Van Jacobson (RFC 1144)
0x07	00000111		Uncompressed TCP/IP packet. Van Jacobson (RFC 1144)
0x08	00001000		Segmentation fragment
0xC3	11000011		TEXNET datagram protocol
0xC4	11000100		Link Quality Protocol
0xCA	11001010		Appletalk
0xCB	11001011		Appletalk ARP
0xCC	11001100		ARPA Internet Protocol
0xCD	11001101		ARPA Address resolution
0xCE	11001110		FlexNet
0xCF	11001111		NET/ROM
0xF0	11110000		No layer 3 protocol implemented.
0xFF	11111111		Escape character. Next octet contains more Level 3 protocol information.
Escape character. Next octet contains more Level 3 protocol information.	00001000		

Figura 2.3. Definizioni di PID

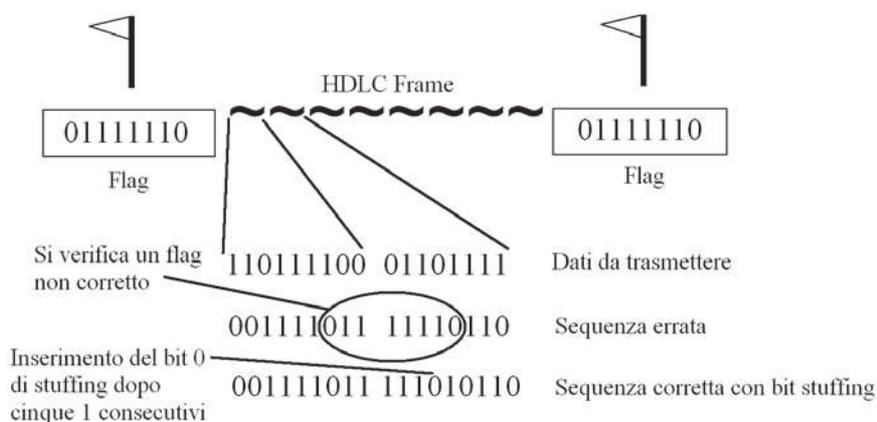
dell'integrità del pacchetto dopo la trasmissione attraverso il mezzo e viene calcolato secondo l'algoritmo suggerito nella raccomandazione ISO 3309 (HDLC).

Le proprietà del CRC - 16 sono riassunte nella tabella 2.1.

Si ricorda che è necessario trasmettere prima il byte meno significativo del FCS (in quanto contiene i coefficienti del termine più grande).

L'FCS viene calcolato su tutti i bits di Address, Control, Protocol, Information and Padding fields, tranne che sui flag di inizio e fine frame e sullo stesso FCS.

Tipo di errore	Percentuale di rivelarlo
1 bit error	100%
2 bit error	100%
Odd error	100%
Burst error < 16 bit	100%
Burst error su 17 bit	99,9969%
Altri burst error	99,9984%

Tabella 2.1. *Controllo di flusso del protocollo*Figura 2.4. *Bit stuffing*

2.1.3 Procedure di trasmissione

Si illustrano in questa sezione le principali regole richieste dal protocollo per trasmettere i frame correttamente.

Bit Stuffing

Dopo il calcolo del FCS, per assicurarsi che la sequenza di bits del campo di FLAG non compaia all'interno degli altri campi, prima che ogni singolo frame venga trasmesso, ne viene eseguita una scansione, con una finestra mobile di cinque bit lungo il pacchetto.

Se vengono trovati 5 bit consecutivi a "1" la sequenza viene interrotta e viene inserito uno "0" per evitare appunto il ripetersi del carattere FLAG.

Bit Order of Transmission

Il frame viene trasmesso da sinistra verso destra. Si ricorda che con l'eccezione dell'FCS (Frame Check Sequence), tutti gli altri campi di ogni pacchetto AX.25 vengono trasmessi partendo dal Least Significant Bit (LSB), bit meno significativo.

Frame Abort

Se un pacchetto deve essere terminato prematuramente, devono essere trasmessi almeno quindici bit consecutivi a "1", senza bit stuffing.

Invalid Frame

Ogni pacchetto più corto di 136 bits, o non incluso nei campi di FLAG (un byte con valore binari "011111"), o non composta da byte allineati (bytes incompleti, numero di bits non divisibile per 8 senza resto) o con una sequenza di sei o più "1" consecutivi, verrà considerato non valido.

2.1.4 Implementazione software

Nel campo delle trasmissioni digitali via radio i radioamatori fanno uso del TNC (Terminal Node Controller) che per l'appunto costituisce l'interfaccia tra PC e radioricetrasmittente (RTX), ma effettua in più la codifica e la decodifica dei messaggi in pacchetti.

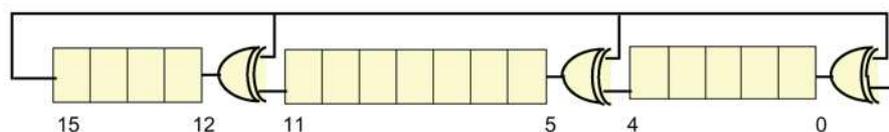
Il TNC al suo interno contiene poi anche un modem, che trasforma i segnali logici in segnali audio.

Ovviamente il PC per comunicare con il TNC (attraverso porta seriale tipo RS232) dovrà essere provvisto di un programma emulatore di terminale.

Il TNC è quindi sostanzialmente un modem intelligente; al suo interno si trova una CPU, una EPROM che contiene il programma di lavoro e delle memorie RAM. La CPU è in genere un processore tipo Z80. Il programma di gestione del TNC si occupa solamente della gestione degli errori di trasmissione; il PC si occupa di tutto il resto.

Nel nostro caso invece si è fatto uso di un microcontrollore quale l'MSP430 per gestire le trasmissioni che avverranno tramite il Chipcon CC2400.

Si analizza nel paragrafo seguente la funzione che effettua il calcolo del CRC. La funzione che effettua bit stuffing non è stato implementato via software in quanto è già implementata via hardware dal CC2400.

Figura 2.5. *CRC-hardware*

Calcolo del CRC

In figura 2.5 si riporta una possibile implementazione hardware dell'algoritmo del calcolo del CRC.

Risulta semplice quindi dedurre da questo schema una realizzazione che lavora sul bit ma è molto inefficiente per un calcolo software.

Via software invece di calcolare il CRC per ogni bit, una lookup table di 256 elementi può essere usata per effettuare l'equivalente di 8 operazioni alla volta. Essendo il polinomio da implementare $X^{16} + X^{12} + X^5 + X^0$ ovvero 0x8404 la lookup table che ne deriva è la seguente:

```

1 static unsigned short fcstab[256] = {
2
3 0x0000, 0x1189, 0x2312, 0x329b, 0x4624, 0x57ad, 0x6536, 0x74bf,
4 0x8c48, 0x9dc1, 0xaf5a, 0xbed3, 0xca6c, 0xdbe5, 0xe97e, 0xf8f7,
5 0x1081, 0x0108, 0x3393, 0x221a, 0x56a5, 0x472c, 0x75b7, 0x643e,
6 0x9cc9, 0x8d40, 0xbfdb, 0xae52, 0xdaed, 0xcb64, 0xf9ff, 0xe876,
7 0x2102, 0x308b, 0x0210, 0x1399, 0x6726, 0x76af, 0x4434, 0x55bd,
8 0xad4a, 0xbcc3, 0x8e58, 0x9fd1, 0xeb6e, 0xfae7, 0xc87c, 0xd9f5,
9 0x3183, 0x200a, 0x1291, 0x0318, 0x77a7, 0x662e, 0x54b5, 0x453c,
10 0xbdc b, 0xac42, 0x9ed9, 0x8f50, 0xfbef, 0xea66, 0xd8fd, 0xc974,
11 0x4204, 0x538d, 0x6116, 0x709f, 0x0420, 0x15a9, 0x2732, 0x36bb,
12 0xce4c, 0xdfc5, 0xed5e, 0xfcd7, 0x8868, 0x99e1, 0xab7a, 0xbaf3,
13 0x5285, 0x430c, 0x7197, 0x601e, 0x14a1, 0x0528, 0x37b3, 0x263a,
14 0xdced, 0xcf44, 0xfddf, 0xec56, 0x98e9, 0x8960, 0xbbfb, 0xaa72,
15 0x6306, 0x728f, 0x4014, 0x519d, 0x2522, 0x34ab, 0x0630, 0x17b9,
16 0xef4e, 0xfec7, 0xcc5c, 0xdd5, 0xa96a, 0xb8e3, 0x8a78, 0x9bf1,
17 0x7387, 0x620e, 0x5095, 0x411c, 0x35a3, 0x242a, 0x16b1, 0x0738,
18 0xffcf, 0xee46, 0xdcdd, 0xcd54, 0xb9eb, 0xa862, 0x9af9, 0x8b70,
19 0x8408, 0x9581, 0xa71a, 0xb693, 0xc22c, 0xd3a5, 0xe13e, 0xf0b7,
20 0x0840, 0x19c9, 0x2b52, 0x3adb, 0x4e64, 0x5fed, 0x6d76, 0x7cff,
21 0x9489, 0x8500, 0xb79b, 0xa612, 0xd2ad, 0xc324, 0xf1bf, 0xe036,
22 0x18c1, 0x0948, 0x3bd3, 0x2a5a, 0x5ee5, 0x4f6c, 0x7df7, 0x6c7e,
23 0xa50a, 0xb483, 0x8618, 0x9791, 0xe32e, 0xf2a7, 0xc03c, 0xd1b5,
24 0x2942, 0x38cb, 0x0a50, 0x1bd9, 0x6f66, 0x7eef, 0x4c74, 0x5dfd,

```

```

25 0xb58b, 0xa402, 0x9699, 0x8710, 0xf3af, 0xe226, 0xd0bd, 0xc134,
26 0x39c3, 0x284a, 0x1ad1, 0x0b58, 0x7fe7, 0x6e6e, 0x5cf5, 0x4d7c,
27 0xc60c, 0xd785, 0xe51e, 0xf497, 0x8028, 0x91a1, 0xa33a, 0xb2b3,
28 0x4a44, 0x5bcd, 0x6956, 0x78df, 0x0c60, 0x1de9, 0x2f72, 0x3efb,
29 0xd68d, 0xc704, 0xf59f, 0xe416, 0x90a9, 0x8120, 0xb3bb, 0xa232,
30 0x5ac5, 0x4b4c, 0x79d7, 0x685e, 0x1ce1, 0x0d68, 0x3ff3, 0x2e7a,
31 0xe70e, 0xf687, 0xc41c, 0xd595, 0xa12a, 0xb0a3, 0x8238, 0x93b1,
32 0x6b46, 0x7acf, 0x4854, 0x59dd, 0x2d62, 0x3ceb, 0x0e70, 0x1ff9,
33 0xf78f, 0xe606, 0xd49d, 0xc514, 0xb1ab, 0xa022, 0x92b9, 0x8330,
34 0x7bc7, 0x6a4e, 0x58d5, 0x495c, 0x3de3, 0x2c6a, 0x1ef1, 0x0f78
35   };

```

(questo è descritto in (Byte-wise CRC Calculations in IEEE Micro, June 1983, pp. 40-50).

A questo punto basta seguire questo semplice algoritmo per calcolare il CRC:

1. Inizializzare il CRC a FFFF
2. EX-OR del nuovo byte in ingresso con il byte meno significativo del CRC per ottenere l'indice della lookup table
3. Shiftare il CRC a destra di 8 bit
4. EX-OR del CRC con il byte ottenuto in precedenza dalla lookup table
5. Ripetere i passi dall 1 al 3 per tutti i byte

Che è rappresentato dalla seguente implementazione

$$CRC = Hi(CRCvalue)XORTable[NewByteXORLo(CRCvalue)] \quad (2.1)$$

La funzione che esegue tale algoritmo è:

```

1 unsigned short pppfcs(unsigned short fcs, unsigned char *cp,
2 int len)
3     { while (len--)
4         fcs = (fcs >> 8) ^ fcstab[(fcs ^ *cp++) & 0xff];
5 return (fcs); }

```

2.2 Il protocollo APRS

APRS è l'acronimo di Automatic Position Reporting System, che è stato introdotto da Bob Bruninga al TAPR/ARRL Digital Communication Conference del 1992.

Utilizzando i frame <UI> del protocollo AX-25 (X25 modificato per il traffico digitale radio), supporta lo scambio di messaggi tra due operatori e la distribuzione di bollettini e di annunci, diffondendo informazioni in modo molto veloce. È inoltre supportato da molte radio e TNC commerciali, il che ha permesso di ridurre decisamente i costi e i tempi di sviluppo per la stazione di terra.

2.2.1 Struttura del protocollo

In figura 2.6 è riportato un tipico pacchetto dati APRS, che viene incapsulato all'interno di un frame I del protocollo AX-25.

Generic APRS Information Field			
<i>Data Type ID</i>	<i>APRS Data</i>	<i>APRS Data Extension</i>	<i>Comment</i>
1	n	7	n

Figura 2.6. *Frame generico APRS*

Vengono di seguito riportati i pacchetti utilizzati per i diversi tipi di telemetria da PiCPoT (per ulteriori informazioni si rimanda a [8]).

INFORMATION FIELD per TMHA			
TCC	TCT	CONTROL	TMA (vedi app. A)
13 bit	27 bit	1 byte	68 Byte
5 byte		0x39	

Figura 2.7. *Pacchetto di telemetria di housekeeping*

2.3 Il protocollo Xmodem

2.3.1 Introduzione

Per la trasmissione di uno stream di dati di dimensione superiore a qualche decina di byte, come la trasmissione di un blocco di un'immagine compressa (mediamente

INFORMATION FIELD #1 per TMHEA (contiene i valori minimi e massimi)			
TCC+TCT	CONTROL	TMA (valori minimi)	TMA (valori massimi)
5 byte	1 byte 0x40	68 Byte	68 Byte

INFORMATION FIELD #2 per TMHEA (contiene i valori medi e le dev. standard)			
TCC+TCT	CONTROL	TMA (valori medi)	TMA (deviaz. standard)
5 byte	1 byte 0x41	68 Byte	68 Byte

Figura 2.8. *Pacchetto di telemetria estesa*

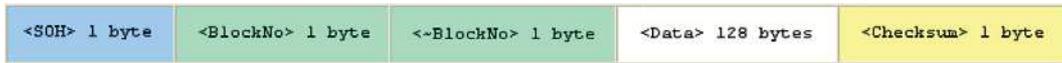
INFORMATION FIELD per payload (in trasmissione)						
TCC+TCT	SEGMENT NUMBER	SOH	BN	~BN	IMMAGINE	CHECKSUM
5 byte	1 byte	1 byte 0x1	1 byte	1 byte	128 byte	2 Byte

Figura 2.9. *Pacchetto di telemetria di Payload*

di dimensione di qualche Kbyte) si è utilizzato un protocollo seriale standard al fine di avere minimo controllo di errore sui dati. Il protocollo implementato è chiamato Xmodem ed era uno standard nelle comunicazioni interne delle telescriventi di venti anni fa. Tale protocollo è stato scelto principalmente per due motivi:

1. semplicità d'implementazione
2. molto utilizzato nei software per MS Windows che fungono da terminali RS-232, per l'acquisizione e la trasmissione diversi da file di testo.

Il protocollo XMODEM è stato sviluppato ed implementato per la prima volta da Ward Christensen nel 1977 ed è diventato uno dei più popolari protocolli per i trasferimenti di file fra le varie piattaforme hardware. Con il suo modo di funzionamento in half-duplex usa i blocchetti dati di soltanto 128 byte, richiede un acknowledge ACK/NACK per ogni singolo blocco trasmesso ed usa un semplice checksum per la convalida dei dati. L'estensione di CRC al protocollo originale XMODEM /CRC usa un CRC a 16 bit più robusto per convalidare il blocco dati, ma questo

Figura 2.10. *Frame Xmodem*

non sarà usato nella nostra applicazione. Questo processo continua fino alla ricezione di un EOT da parte del ricevitore e di un ACK da parte del trasmettitore.

2.3.2 Struttura del protocollo

Di seguito vengono definiti i byte utilizzati per il controllo di flusso dal protocollo:

Simbolo	Descrizione	Valore
SOT	Start of Header	0x01
EOT	End of Transmission	0x04
ACK	Acknowledge	0x06
NAK	Not Acknowledge	0x15
C	ASCII C	0x43

Tabella 2.2. *Controllo di flusso del protocollo*

I blocchi XMODEM hanno la seguente disposizione riportata in figura 2.10 dove:

- SOH individua l'inizio del Frame,
- BlockNo è il numero del Frame (con dimensione un byte). I numeri di Frame vanno da 1 a 255 e dopo il 255, il ciclo del numero di Frame si ripete,
- BlockNo è il complemento del campo precedente,
- Data è il campo dati lungo 128 byte. Se i dati sono più corti di 128 caratteri, il blocco di dati è riempito di caratteri di riempimento (Ctrl+Z per default).
- Checksum è il campo di controllo che consiste in una somma aritmetica senza riporto (modulo-256) di tutti i byte di dati.

Un trasferimento tipico di protocollo XMODEM è simile a quanto illustrato in figura 2.11:

Transmitter	Receiver	
	<- <NAK>	handshake
<SOH><1><254><Data 128 bytes><CHK>	->	response
	<- <ACK>	acknowledgment
<SOH><2><253><Data 128 bytes><CHK>	->	
	<- <ACK>	
<EOT>	->	end of transmission
	<- <ACK>	

Figura 2.11. Protocollo Xmodem

- Handshake: il ricevitore comincia sempre la comunicazione trasmettendo un carattere di handshake (in questo caso un carattere di NAK). Aspetta 10 secondi per la risposta e se non riceve un blocco ritrasmette un altro NAK. Il ricevitore tenta un massimo di 10 volte a stabilire la comunicazione dopo di che interrompe la trasmissione.
- Response: il trasmettitore trasmette i dati richiesti. I dati sono divisi in blocchi lunghi 128 caratteri. Il Time-out affinché ogni carattere sia ricevuto è 1 secondo. Il trasmettitore attende dopo il primo blocco fino ad 1 minuto per ricevere l' ACK dal ricevitore. Ciò dà il tempo al ricevitore per la preparazione della memoria.
- Acknowledgement: il ricevitore calcola il checksum e lo confronta col checksum ricevuto. Se i checksum sono gli stessi, trasmette l'acknowledgement positivo ACK. Se differiscono il ricevitore trasmette un NAK ed il trasmettitore ritrasmette il blocco corrente. Ciò continua fino a trasmettere tutti i dati.
- End of transmission: dopo che tutti i dati sono trasmessi, il trasmettitore informa il ricevitore trasmettendo un carattere EOT. L'uno o l'altro lato possono annullare in qualunque momento la trasmissione trasmettendo 3 caratteri CAN (Ctrl+X).

Seguono i diagrammi di flusso che descrivono le operazioni in trasmissione (figura 2.12) ed in ricezione (figura 2.13).

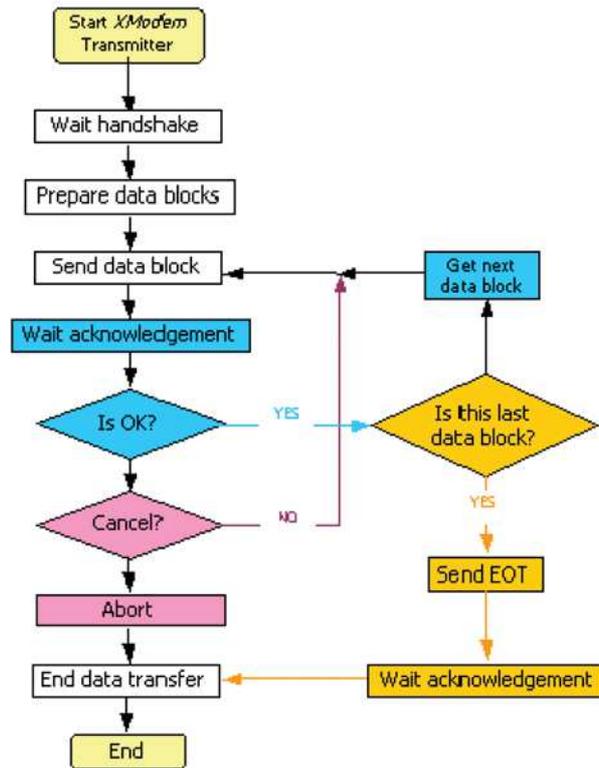


Figura 2.12. Sequenza di trasmissione

Sincronizzazione

Il ricevitore inizia trasmettendo un carattere "C" (si veda la tabella 2.2) al mittente per indicare che desidera usare il metodo di CRC di convalidazione del blocco. Dopo la trasmissione di tale carattere il ricevitore aspetta per 3 secondi o finchè il flag di buffer pieno è settato. Se il ricevitore raggiunge il time out trasmette ancora una "C" al trasmettitore e ripartono i 3 secondi di attesa. Questo processo continua fino a che il ricevitore non riceve un pacchetto completo da 133-byte.

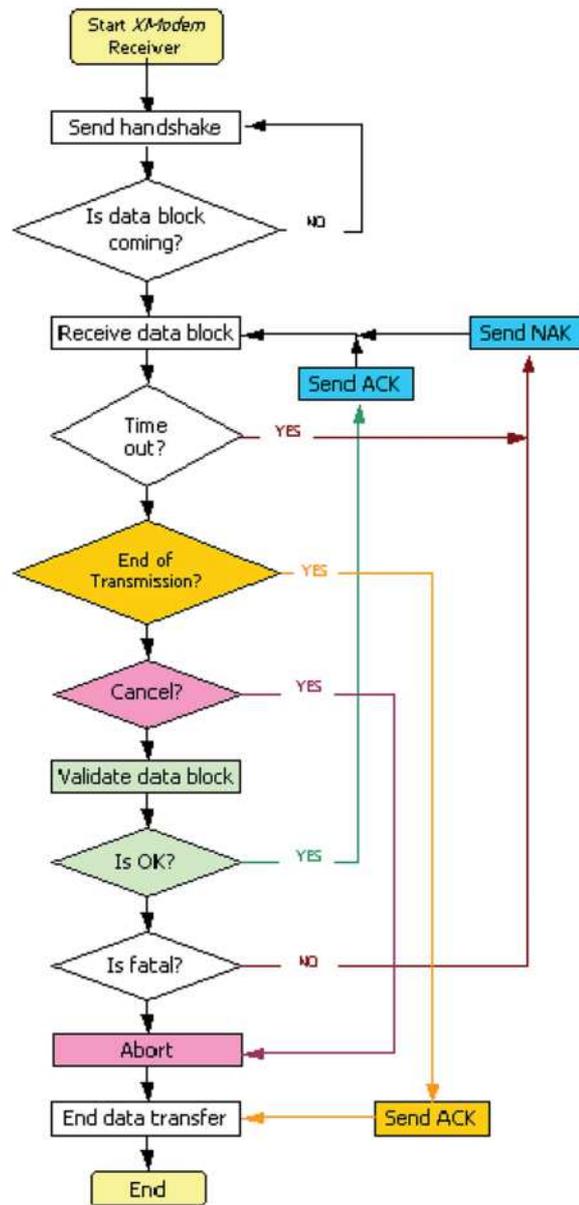


Figura 2.13. Sequenza di ricezione

Considerazioni sulla ricezione

Si ha un NACKs nelle seguenti circostanze

1. Errore di frame in qualche byte
2. Errore di OverRun in qualche byte
3. Pacchetto duplicato
4. Errore nel CRC
5. Time out de ricevitore (non riceve il pacchetto entro un secondo)

Per ogni NACK il trasmettitore ritrasmetterà l'ultimo pacchetto. Se avvengono i primi due errori ci possono essere errori gravi dovuti all'hardware, è possibile che il trasmettitore ed il ricevitore non abbiano lo stesso bitrate, start bits, stop bits.

Varianti

Esistono vari tipi di Xmodem e di seguito si illustrano le varianti principali rispetto all'Xmodem classico.

- l'XMODEM CRC migliora la verifica degli errori sostituendo il checksum di 1 byte con il controllo di errore di 2 byte (CRC16). Ciò offre un più alto livello di integrità di dati. Il ricevitore indica questo protocollo trasmettendo il carattere "C" come handshake. Il ricevitore prova fino a 3 volte ad iniziare il trasferimento dati dopo di che conclude che il trasmettitore non è in grado di comunicare.
- l'XMODEM 1k migliora la velocità di trasferimento dati aumentando il formato di blocco fino a 1024 byte. Ogni blocco comincia con un carattere di STX piuttosto che un SOH. Anche qui è usato un CRC16 per il controllo. A causa del formato più grande del blocco, a parità di dati il numero di volte che il trasmettitore deve aspettare un acknowledge è ridotto e la velocità della trasmissione è quindi aumentata. Con le linee rumorose il rendimento è ridotto significativamente, perché il blocco che deve essere ritrasmesso è più grande. Se il trasmettitore riceve 5 caratteri NAK in fila, dovrebbe fare diminuire il formato di blocco a 128 byte.
- l'XMODEM 1kGI è un flusso continuo di dati ed è caratterizzato dall'avere il carattere "G" come handshake. Il trasmettitore trasmette continuamente i blocchi senza attendere l'acknowledgement. Se il ricevitore incontra un blocco difettoso, abbandona l'intera sessione trasmettendo un NAK. In questo modo si ottiene un alto rendimento.

2.4 Il protocollo per PowerSwitch

La scheda PowerSwitch fa uso della periferica SPI per comunicare con la scheda ProcB che assume il ruolo di Master della comunicazione.

2.4.1 Specifiche di sistema

La scheda Power Switch deve:

- rendere disponibile al processore la data e l'ora corrente
- riconoscere un comando di aggiornamento dell'orologio da parte del processore
- comunicare il numero di eventi di latch up conteggiati
- temperature e tensioni delle batterie
- temperatura interna della scheda
- tensione del proprio BUS di potenza
- eventuali guasti degli'interruttori di selezione delle batterie

2.4.2 Protocollo di comunicazione

Essendo i dati da trasmettere molto pochi, è stato scritto un semplice protocollo di comunicazione, adottando la seguente convenzione:

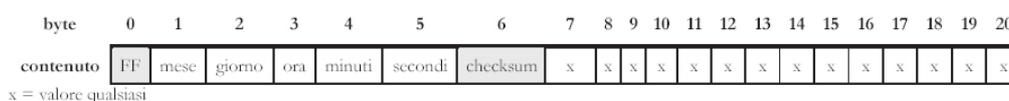
- Intestazione - 1 Byte
- Dati - 19 Byte
- Checksum - 1 Byte

Rispettando questa convenzione, il pacchetto trasmesso dalla PowerSwitch alla scheda processore è stato definito come segue:

indirizzo (# byte)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
contenuto	FF	mese	giorno	ora	minuti	secondi	5 contatori latch up		temperature 3 batterie			tensioni 3 batterie			tensione BUS	temp. scheda	stato switch	checksum			

Figura 2.14. *Pacchetto da PowerSwitch a ProcB*

Indirizzo	Conteggio Latch-up
6	Pic
7	Payload
8	Alim TxRx
9	ProcB
10	sempre 0

Tabella 2.3. *Contatori di Latch-up*Figura 2.15. *Pacchetto da ProcB a PowerSwitch*

Lo slot di 5 byte disponibile per i contatori di latch up è suddiviso nella maniera schematizzata nella tabella 2.3.

Il byte relativo allo stato degli interruttori, e quindi relativo ai guasti degli stessi, è costruito in questo modo:

Switch	bit 7	bit 6	bit 5	bit 4	bit 3	bit 2	bit 1	bit 0
B1 OK	1	1	-	-	-	-	-	-
B1 KO	0	0	-	-	-	-	-	-
B2 OK	-	-	-	1	1	-	-	-
B2 KO	-	-	-	0	0	-	-	-
B3 OK	-	-	-	-	-	-	1	1
B3 KO	-	-	-	-	-	-	0	0

Tabella 2.4. *Byte relativo allo stato degli interruttori*

Il checksum è ottenuto sommando tutti i byte del pacchetto dall'indirizzo 0 all'indirizzo 19. La scheda PowerSwitch contemporaneamente alla trasmissione del pacchetto suddetto attende dalla scheda processore il seguente pacchetto descritto in figura 2.15.

Nel caso in cui il checksum ricevuto non sia uguale a quello calcolato dalla PowerSwitch l'ora ricevuta viene ignorata.

2.5 Il protocollo per Payload

La scheda Payload comunica con la scheda procB attraverso un'interfaccia SPI. La codifica dei comandi inviati dalle schede procB è in parte simile a quella utilizzata dai telecomandi:

- $3+(a-1)+(t-1)*5$ (trigger(a,t)) scatto foto a(1..5) dalla telecamera t(1..3);
- $1862+(a-1)*9+(b-1)$ (sendBlock(a,b)): invio blocco b (1..9) della foto a (1..5);

La scheda Payload può solo ricevere i comandi elencati sopra, in quanto gli altri non sono applicabili, mentre il comando send (o resend) viene convertito dalle schede procB in una sequenza di 9 comandi accensione, comando sendBlock e spegnimento.

Le risposte dalla scheda Payload verso ProcB è codificata come segue:

1. (ackPayload): conferma ricezione ed esecuzione comando; viene inviato immediatamente dopo la corretta ricezione del comando, se questo è eseguibile;
2. (nackPayload1): impossibilitato a eseguire comando perché impegnato con precedente comando dallo stesso processore; viene inviato immediatamente dopo la corretta ricezione del comando, se questo non è eseguibile;
3. (nackPayload2): impossibilitato a eseguire comando perché impegnato con precedente comando dall'altro processore; viene inviato immediatamente dopo la corretta ricezione del comando, se questo non è eseguibile;
4. (endTrigger): viene inviato al termine della compressione della foto, per il comando trigger; questo causa la disattivazione dell'alimentazione;
5. (endPayload): viene inviato al termine del trasferimento immagine, per il comando resend; questo causa la disattivazione dell'alimentazione;

2.6 Il protocollo per TxRx

Sulla scheda TxRx non è presente alcun microprocessore ma vi sono solamente due transceiver Chipcon CC2400: il protocollo di comunicazione con questa scheda sarà perciò quello previsto dal produttore del dispositivo; si procederà ora ad una sua breve descrizione di tale dispositivo.

Si tratta di un transceiver a radio frequenza progettato per lavorare nella banda $2.4 \div 2.4835$ GHz: il suo maggior vantaggio è di richiedere pochissimi componenti esterni, tutti esclusivamente passivi, rendendo la realizzazione di un dispositivo ad alta frequenza estremamente rapida ed economica. Sono di seguito riportati i punti di forza che hanno motivato la scelta di questo dispositivo:

- bassa tensione di alimentazione (minimo 1.6 V),
- ridotti consumi (24 mA in RX e 19 mA in TX),
- ampia scelta di velocità di trasmissione (10, 250 e 1000 kbps),
- alta sensibilità in ricezione (-101 dBm),
- presenza di una FIFO interna per facilitare il trasferimento dati (32 byte),
- ridotto numero di componenti esterni necessari,
- interfaccia seriale SPI.

Il CC2400 richiede una serie di operazioni di configurazione prima del suo effettivo utilizzo:

1. impostazione della frequenza di ricezione / trasmissione (2.44 GHz),
2. deviazione di frequenza del modulatore (125 kHz),
3. il bitrate a cui lavorare (10k kbps),
4. il tipo di codifica (8b/10b),
5. il livello di potenza di uscita (0 dBm),
6. il numero di sync word da trasmettere (8),
7. il numero minimo di sync word da attendere in ricezione (4),
8. la modalità di operazione del dispositivo.

Una volta effettuate le operazioni di configurazione bisogna attendere che venga attivato l'oscillatore interno e che il PLL vada in aggancio di fase: ora il dispositivo è pronto ad operare ed è necessario fornirgli il comando di ricezione o trasmissione.

Nel caso sia stato fornito il comando di trasmissione il CC2400 si mette in attesa di ricevere i byte da trasmettere ed il comando di inizio trasmissione. Prima di disabilitare il dispositivo è necessario attendere la fine della trasmissione dei dati presenti nella FIFO e questa informazione è ottenibile leggendo in polling un registro interno del CC2400.

Quando si fornisce invece il comando di ricezione, il transceiver si pone in attesa di ricevere la sync word (è necessario di nuovo leggere in polling un registro interno per sapere quando essa viene ricevuta) e quindi, dopo aver abilitato la FIFO di ricezione, si possono leggere in seriale i dati. Non esiste alcun controllo sulla lunghezza del pacchetto ricevuto, quindi il microcontrollore deve conoscere la sua lunghezza ed interrompere la ricezione al momento opportuno.

Capitolo 3

Scheda PowerSupply

3.1 Introduzione

La scheda PowerSupply ha lo scopo di:

1. prelevare energia dai pannelli solari ed utilizzarla per ricaricare le batterie,
2. effettuare il condizionamento dei segnali analogici (tensione, corrente e temperatura delle celle solari e delle batterie) ed inviarli ai processori di bordo.

Le due funzioni non sono in alcun modo correlate tra di loro perciò il loro progetto (effettuato da M. Ceroni) ed il successivo collaudo sono avvenuti in maniera completamente indipendente.

La figura 3.1 mostra lo schema a blocchi della scheda PowerSupply: si possono così identificare i differenti sottosistemi:

- Gestione della potenza entrante e celle solari
- Gestione della carica delle batterie
- Gestione delle misure
- Gestione dell'alimentazione dei sottosistemi
- Riferimenti di tensione
- Test della scheda

Il sottosistema “gestione della potenza e delle celle solari” si occupa di trasferire l'energia proveniente dalle celle solari alle batterie per essere immagazzinata.

Vi sono cinque regolatori switching di tipo boost a controllo isteretico (nella figura: “caricabatterie”), uno per ciascuna cella. La ridondanza risulta fondamentale:

nel caso di guasto ad anche quattro dei cinque regolatori si ha il sistema comunque funzionante, sebbene con penalizzazione delle prestazioni.

Le uscite dei cinque regolatori sono connesse in OR tramite dei diodi, in modo che l'energia di tutti i pannelli confluisca in un unico nodo.

Il sottosistema “Gestione della carica delle batterie” connette il nodo comune all'uscita dei cinque regolatori alle sei batterie tramite interruttori, utilizzati per selezionare l'accumulatore da ricaricare.

Il blocco “PMosSwitch”, contiene gli interruttori con l'adeguata ridondanza interna per prevenire cortocircuiti o malfunzionamenti di una batteria; il blocco “ControlloPMos” contiene la logica che aziona gli interruttori. La strategia di carica delle batterie è implementata via software sui processori di bordo.

“Gestione delle misure” è responsabile del condizionamento dei segnali analogici da acquisire: tali valori devono essere ricondotti alla dinamica d'ingresso dei convertitori analogico-digitali ($0 \div 1.25$ V) utilizzati dai due processori di bordo. I valori analogici sono inviati ai processori tramite un albero di multiplexer, al fine di minimizzare il numero di connessioni tra la scheda PowerSupply ed i processori.

I segnali acquisiti sono:

- tensioni delle batterie e dei pannelli solari tramite opportuno partitore resistivo,
- correnti delle celle solari e delle batterie tramite resistenze di Sense,
- temperatura delle batterie e delle celle tramite NTC.

L'alimentazione a tutti i circuiti integrati è fornita dal sottosistema “gestione dell'alimentazione dei sottosistemi” è anche responsabile del controllo della corrente assorbita da essi allo scopo di controllare gli eventi di latch-up. Quando questo si scatena, tale sottosistema rileva un anomalo aumento della corrente assorbita e procede a togliere l'alimentazione ai circuiti integrati per un periodo, allo scadere del quale l'alimentazione è ripristinata.

Il sottosistema “riferimenti di tensione” si occupa di generare i due riferimenti di tensione utilizzati (1.25 V e 2.5 V).

Il sottosistema “test della scheda” gestisce i segnali di test che andranno inviati al connettore di test ed utilizzati per verificare il corretto funzionamento degli alimentatori switching e per ricaricare le batterie prima del lancio.

3.2 Interfacce

La scheda comunica con le seguenti schede:

- la scheda ProcA:
 1. segnale digitale di clock per la selezione delle batterie,
 2. segnale analogico contenente l'informazione della batteria in carica,
 3. uscita del multiplexer analogico,
 4. comandi di selezione e segnale di enable per l'albero di multiplexer,
 5. 6 tensioni batteria.
- la scheda ProcB:
 1. segnale digitale di clock per la selezione delle batterie,
 2. segnale analogico contenente l'informazione della batteria in carica,
 3. uscita del multiplexer analogico,
 4. comandi di selezione e segnale di enable per l'albero di multiplexer,
 5. comandi di selezione multiplexer di test.
- la scheda PowerSwitch:
 1. 6 temperature batteria per la strategia di scarica,
 2. alimentazione a 5V per i sensori,
 3. uscita multiplexer di test,
 4. collegamento di potenza delle batterie.

Non vi è nessun collegamento con scheda Payload e TxRx.

Alla scheda PowerSupply sono connessi:

- pannelli solari, per la generazione dell'energia elettrica
- NTC dei pannelli solari, per la misura della loro temperatura
- Batterie, per immagazzinare l'energia elettrica
- NTC delle batterie, per la misura della loro temperatura
- kill-switch, per mantenere il satellite spento quando si è collegati al lanciatore

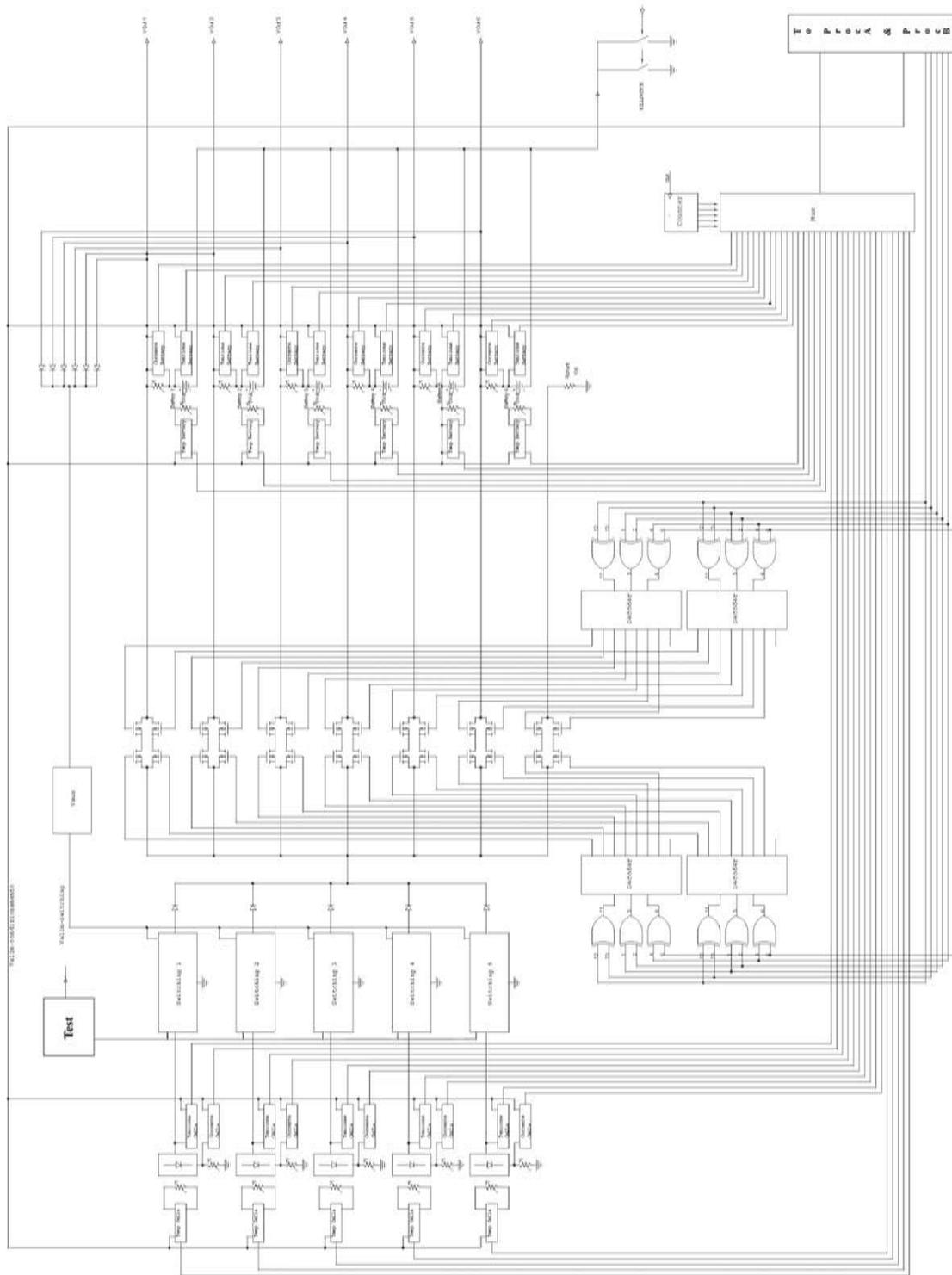


Figura 3.1. Schema a Blocchi Completo della Scheda PowerSupply

3.3 Sottosistemi

3.3.1 Gestione della Potenza Entrante e delle Celle Solari

Questo sottosistema si occupa di prelevare energia dalle celle solari e trasferirla alla batteria in carica nel modo più efficiente possibile. La potenza media stimata entrante nel satellite è circa 2 W, potenza che deve essere sufficiente al sostentamento di tutti i sistemi di bordo.

La struttura dei caricabatterie è intrinsecamente ridondante per il fatto che sono presenti cinque pannelli solari con i relativi cinque caricabatterie. In caso di guasto (cella solare, collegamento cella-scheda, caricabatteria), sono presenti altri quattro rami che compensano la perdita.

Quando ci si trova ad utilizzare un qualsiasi dispositivo come generatore di potenza elettrica e si è interessati a sfruttarlo al meglio, massimizzando la potenza generata. Per fare ciò al variare delle condizioni ambientali spesso è necessario utilizzare un dispositivo chiamato Maximum Power Point Tracker (MPPT), responsabile di far lavorare il generatore nelle migliori condizioni di carico possibili.

Normalmente, quando si utilizzano pannelli solari l'algoritmo MPPT adottato è il seguente:

1. si calcola istantaneamente il punto di lavoro (corrente erogata e tensione sul carico istantanei) e quindi la potenza istantanea assorbita dal carico;
2. si perturba leggermente il punto di lavoro e si verifica, dopo un altro set di misure, la potenza istantanea;
3. se la direzione della perturbazione dà un aumento di potenza sul carico, la successiva perturbazione sarà in quella direzione, altrimenti si inverte il verso della perturbazione.

Nel caso delle celle solari, il punto di massima potenza erogata varia al variare della temperatura e dell'illuminazione. Le analisi termiche hanno previsto l'oscillazione della temperatura delle facce esterne del satellite tra circa 10 °C e 55 °C (figura 3.2)

Dalle caratteristiche misurate (Appendice C.2), si nota come la forte variazione in tensione del massimo di potenza si ha soprattutto per variazioni di temperatura, piuttosto che per variazioni di illuminazione, perciò il rilevamento dei punti di massima potenza è stato fatto in funzione della temperatura della cella.

Si è scelto di non seguire il precedente algoritmo e di adottare un controllo basato sulla temperatura principalmente per due ragioni:

- eccessivo consumo della logica richiesta per implementare l'algoritmo

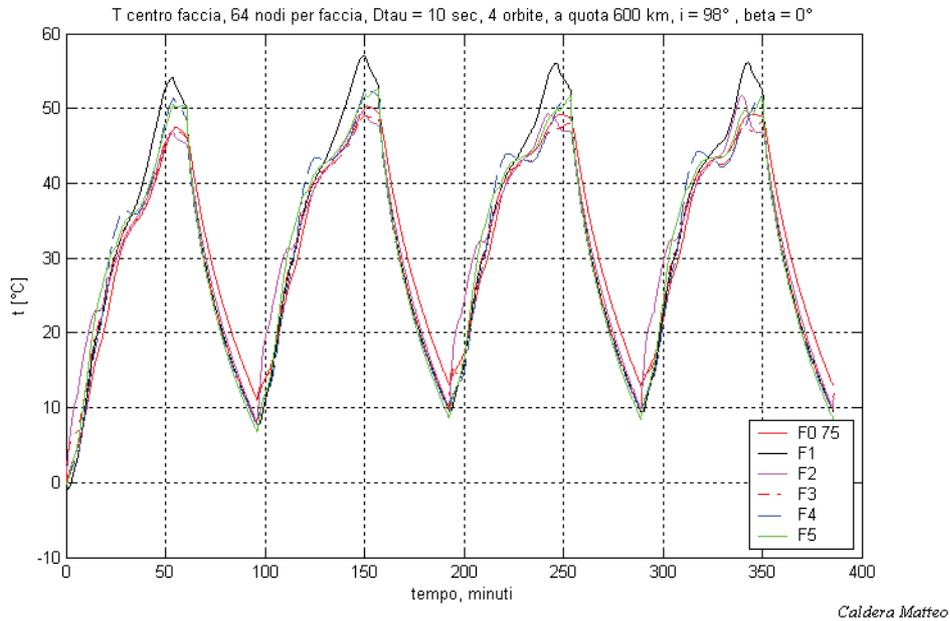


Figura 3.2. *Escursioni termiche a centro faccia*

- i circuiti integrati solitamente utilizzati per queste operazioni sono in tecnologia C-MOS

Il dispositivo viene quindi chiamato PMMPT (PseudoMPPT) poiché non tiene conto delle variazioni di illuminazione.

Per poter caricare le batterie è necessario un blocco che prelevi energia elettrica dalle celle e la trasferisca alle batterie, tenendo conto che le batterie sono ad un potenziale più alto delle celle. La topologia circuitale che soddisfa tali requisiti (trasferimento energia, alta efficienza, innalzamento della tensione) è quella di un convertitore switching boost.

La parte più complessa da progettare di questo convertitore è il controllore e per questo di solito si possono trovare molti circuiti integrati commerciali per questa funzione. Questi tuttavia sono realizzati solitamente in tecnologia C-MOS, molto sensibile quindi alle radiazioni ionizzanti. Si è quindi scelto di utilizzare un controllore di tipo isteretico, realizzato utilizzando componenti in tecnologia bipolare per ridurre questi problemi. Questo controllore presenta l'indubbio vantaggio della semplicità di progetto e realizzazione. Il suo funzionamento è il seguente: vi è un comparatore che confronta la tensione ai capi della cella solare con una tensione di riferimento e di conseguenza chiude o apre l'interruttore del regolatore switching.

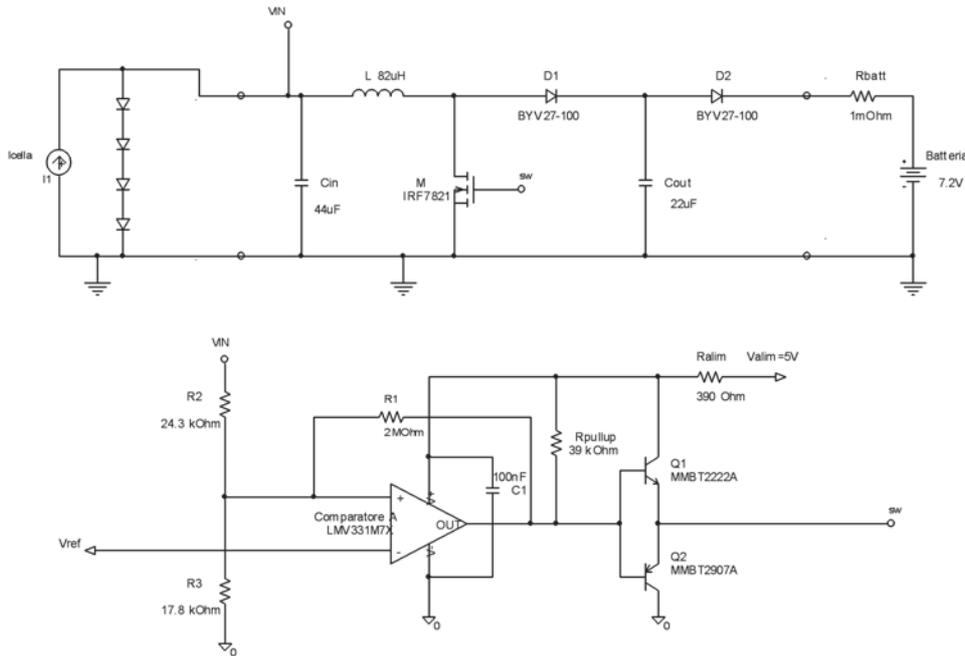


Figura 3.3. *Regolatore Switching con controllo isteretico*

Per capire il funzionamento del regolatore, occorre ricordare il modello equivalente di una cella solare (vedere Appendice C.1). Infatti la tensione di ingresso non è costante come in un normale regolatore switching, ma varia: le celle solari sono infatti essenzialmente dei generatori di corrente limitati in tensione dal diodo equivalente. Il controllore si occuperà perciò di mantenere la tensione di ingresso (tensione sulle celle solari) all'interno di due soglie (una minima ed una massima) calcolate in maniera da far lavorare la cella sempre intorno al punto di massima potenza. Tali soglie non sono fisse ma variano in funzione della temperatura della cella e sono state calcolate dopo aver misurato la caratteristica potenza / tensione delle celle solari al variare di tale parametro.

Le uscite dei caricabatterie sono collegate fra loro tramite diodi con catodo in comune, per evitare che il cortocircuito di uno dei caricabatterie possa bloccare gli altri.

Vengono riportati di seguito i valori dei componenti utilizzati nei regolatori switching:

$$C_{in} = 44 \text{ uF}$$

$$L = 82 \text{ uH}$$

NMos: IRF7821 (SO8)

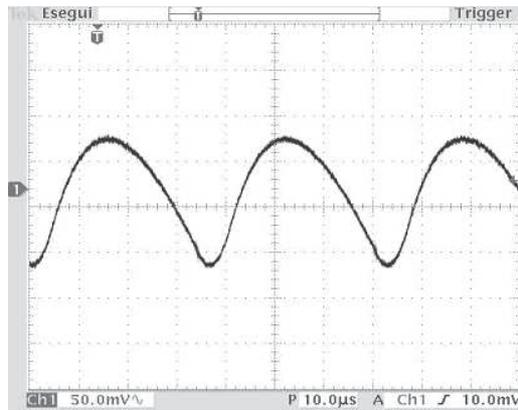


Figura 3.4. *Tensione ai capi delle celle solari (con MPPT)*

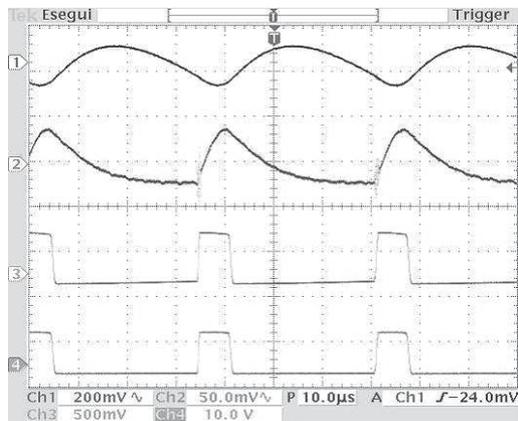


Figura 3.5. *Tensione sulle celle solari, sulle batterie, sul Gate e Drain dell'NMos*

D1, D2: BYV27-100

$C_{out} = 22 \text{ uF}$

Comparatore: LMV331 (SC70)

$R_{pullup} = 47 \text{ k}\Omega$

$R1 = 2 \text{ M}\Omega$

$R2 = 24.3 \text{ k}\Omega$

$R3 = 17.8 \text{ k}\Omega$

Npn: MMBT2222ALT1

Pnp: MMBT2907ALT1

3.3.2 Gestione della Carica delle Batterie

Questo sottosistema si occupa di attuare la strategia di carica ed è formato da 3 macroblocchi:

1. i blocchi PMosSwitch: contengono i PMos che svolgono la funzione di interruttori; sono 6, uno per ciascuna batteria. Essenzialmente fungono da un unico multiplexer verso una delle batterie.
2. i blocchi ControlloPMos: contengono la logica necessaria alla commutazione dei PMos; sono 4, ciascuno per una coppia ridondata di PMos.
3. contatori: fanno parte della logica per la commutazione, ricevono un segnale di CLK dai processori e inviano le uscite ai 4 blocchi ControlloPMos; sono 2, relativi ai due processori di bordo.

Tutta la logica del sottosistema deve rimanere sempre accesa, poiché in caso di spegnimento si perderebbe l'informazione della batteria in carica e si sprecherebbe energia non caricando alcuna batteria. Come per il sottosistema "Gestione della potenza entrante", l'unico modo per alimentare costantemente la logica è prelevare energia dalle batterie tramite un regolatore da 5V.

L'uscita comune dei 5 switching, viene inviata tramite un multiplexer composto da sei gruppi da 8 PMos su una sola batteria. Si utilizza una ottupla di PMos in serie-parallelo per ogni ramo per evitare che il cortocircuito di un PMos, o un guasto del circuito di pilotaggio, possa connettere due batterie in parallelo e per evitare la perdita di una batteria in caso di interruzione di un PMos. Il nodo in comune a tutti i catodi è un possibile punto critico per la ridondanza, in quanto non è duplicabile. E' stata utilizzata una pista di circuito stampato più grande rispetto alle altre per evitare il pericolo di interruzione ed essa è stata distanziata maggiormente dalle piste vicine per evitare corto-circuiti.

I sei gruppi da otto PMos sono pilotati da entrambi i processori di bordo tramite una strategia di controllo condiviso: ciascun processore agisce sul segnale di CLK di uno di due contatori a 4 bit, in modo che ogni impulso di clock faccia incrementare il valore conteggiato dal rispettivo contatore. Le uscite dei contatori vengono messe in EXOR fra loro, per ottenere un numero di 4 bit che indica quale batteria caricare. Un gruppo di quattro decodificatori seleziona uno dei gruppi di PMos e quindi la batteria da caricare. Si è scelto di utilizzare un contatore a 4 bit e di far in modo che l'LSB del contatore rappresenti il segnale di Enable del multiplexer. Tale soluzione ha il vantaggio di garantire un tempo morto, quando il segnale di Enable è attivo, tra una selezione e l'altra per garantire l'apertura di tutti gli interruttori.

La scelta di utilizzare contatori nella topologia è giustificata dalla necessità che l'informazione sulla batteria in carica rimanga memorizzata nella scheda PowerSupply, cioè fosse indipendente da entrambi i processori. In tal modo si hanno i seguenti vantaggi:

- la batteria da caricare rimane memorizzata sulla scheda PowerSupply anche quando i processori non sono alimentati;
- se uno dei processori o il corrispondente contatore si danneggia, l'altro processore rimane in grado di controllare la selezione della batteria.

Ciascun processore può leggere le uscite degli EXOR, cioè lo stato della batteria in carica e comandare di conseguenza il proprio contatore.

I PMos sono pilotati in logica inversa: i Gate del blocco PMosSwitch saranno tutti a '0' logico (rispetto al Source) affinché si carichi la corrispondente batteria; contemporaneamente tutti i Gate degli altri PMos saranno ad '1' logico (rispetto al Source), cioè i PMos saranno aperti. Occorre dunque un decoder con logica inversa, possibilmente open collector.

Siccome la logica non dovrebbe mai spegnersi, l'idea iniziale era di usare componenti a BJT, esenti dal latch-up, però il consumo ha spinto ad utilizzare componenti C-MOS con un circuito di protezione. In caso di latch-up, si perderà l'informazione della batteria in carica ed uno dei processore calcolerà nuovamente la batteria da caricare.

Per poter attuare la strategia di carica, i processori devono conoscere la batteria in carica. La soluzione più semplice per conoscere questa informazione prevede di collegare ogni bit dell'uscita dei quattro gruppi di EXOR con il corrispondente ingresso del processore tramite una resistenza. In questa maniera, anche in presenza di un errore (uno dei quattro gruppi fornisce un risultato differente dagli altri) si riesce ad ottenere l'informazione corretta, perché essa viene mediata su tutti i gruppi di EXOR. Precisamente:

- con quattro '0' o '1' il processore interpreterà il bit rispettivamente come '0' o '1',
- con tre '0' ed un '1', la tensione del nodo comune corrisponde a circa 1.25V che il processore interpreterà come '0',
- con tre '1' e un '0', la tensione corrisponde a circa 3.75V che il processore interpreterà come '1',
- con due '0' e due '1', la tensione corrisponde a circa 2.5V che il processore interpreterà a seconda dei margini di rumore.

La strategia di carica implementata in software dai processori di bordo è la seguente:

1. Ogni minuto uno dei due processori si attiva e verifica quale batteria è attualmente in fase di carica, leggendo lo stato degli EXOR (vedere in seguito).
2. Il processore attivo misura la tensione e la temperatura della batteria sotto carica.
3. Se la tensione della batteria è superiore ad una soglia predefinita (differente a seconda del tipo di batteria) o se la temperatura è superiore ad una soglia predefinita (differente a seconda del tipo di batteria), oppure il processo di carica è già durato più di 12 ore, il processore seleziona la successiva batteria, inviando un treno di impulsi al suo contatore (nell'ordine B1, B4, B2, B5, B3, B6, B1, ecc.).
 - (a) Se anche quest'ultima ha la tensione e/o la temperatura superiore alla soglia, viene selezionata la batteria successiva e così via.
 - (b) Se tutte le batterie sono cariche e/o calde, si aprono tutti gli interruttori in modo che la corrente del caricabatterie venga dissipata dagli diodi Zener posti a contatto del nodo comune dei caricabatterie.
4. Se invece la tensione di batteria è inferiore alla soglia e la temperatura è inferiore alla soglia e non sono ancora trascorse 12 ore dall'inizio della carica di quella batteria, il processore non compie nessuna azione e lascia che la batteria continui la sua carica.

Nel blocco “PMosSwitch” il numero elevato di PMos è necessario per la ridondanza del sistema:

- i due rami in parallelo (ramo di X1 e X2 in parallelo con il ramo di X3 e X4) prevengono la perdita della batteria: se si guastasse un PMos (o il suo controllo) per cui esso rimane aperto, il ramo in parallelo permette comunque la carica.
- la serie di due PMos (X1 e X2 oppure X3 e X4) è necessaria per prevenire il corto fra due batterie: se uno dei PMos (o il suo controllo) si guastasse in corto circuito, al momento di un cambio batteria ci sarebbe un cortocircuito.
- la presenza di due coppie di PMos contrapposti (X1_a e X1_b, X2_a e X2_b, ...), previene il cortocircuito fra due batterie, nel caso che uno dei diodi intrinseci (tra Drain e Source) dei PMos si guastasse in cortocircuito. Questa è una protezione necessaria, poiché occorre assolutamente evitare il corto fra due batterie, che porterebbe a danni irreparabili al satellite.

Lo schema elettrico è presentato in figura 3.6.

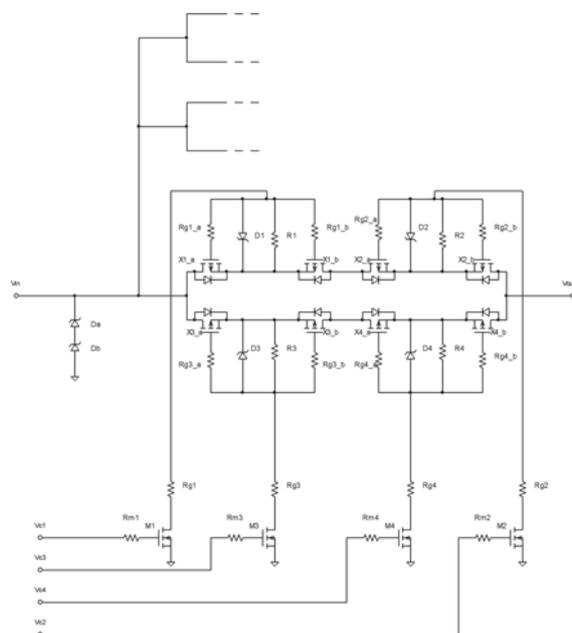


Figura 3.6. Schema elettrico del blocco PMosSwitch con circuito di pilotaggio

3.3.3 Gestione delle Misure

Questo sottosistema si occupa di ricavare le misure da inviare ai processori di bordo partendo dai sensori, utilizzando dei circuiti di condizionamento.

Le misure di interesse sono:

- 5 tensioni dei pannelli solari
- 5 correnti dei pannelli solari
- 5 temperature dei pannelli solari
- 6 tensioni delle batterie
- 6 correnti delle batterie
- 6 temperature delle batterie
- 1 temperatura della scheda

Scopo del circuito di condizionamento è adattare la dinamica dei sensori alla dinamica di ingresso dei convertitori ADC presenti sulle schede dei due processori (0 – 1.25 V).

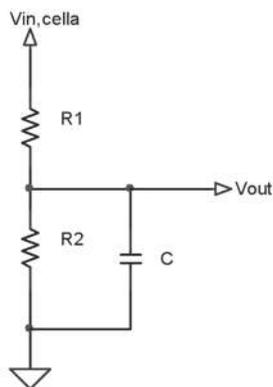


Figura 3.7. *Circuito di condizionamento per la tensione delle celle solari e batterie*

Vengono qui di seguito riportati i valori delle resistenze impiegate.

Condizionamento tensione celle solari:

$$R_1 = 187 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 565 \text{ k}\Omega$$

$$C = 330 \text{ nF}$$

Condizionamento tensione batterie:

$$R_1 = 604 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 100 \text{ k}\Omega$$

$$C = 330 \text{ nF}$$

I circuiti di condizionamento per le misure di tensione, corrente e temperatura sono rappresentati nelle figure 3.8, 3.9, 3.10 e 3.11.

3.3.4 Gestione dell'acquisizione delle misure

Un albero di multiplexer si è reso necessario per minimizzare il numero di componenti e il numero di interconnessioni con i processori di bordo. Per la struttura, si faccia riferimento alla figura 3.12.

Considerazioni:

- La struttura non è ridondante se non per la presenza dei due multiplexer in uscita, ciascuno destinato ad un processore e abilitato con il rispettivo enable.

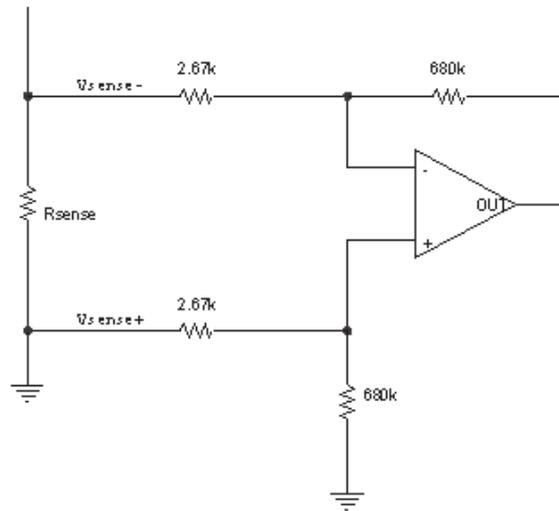


Figura 3.8. *Circuito di condizionamento per la corrente delle celle solari*

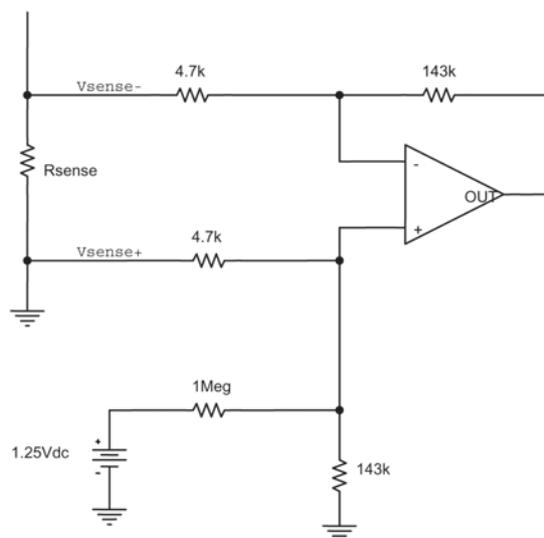


Figura 3.9. *Circuito di condizionamento per la corrente delle batterie*

- Affinché entrambi i processori potessero comandare i selettori dei multiplexer senza interferire, si è pensata una topologia ad EXOR: per ciascun bit della stringa di selezione vi è un EXOR che riceve in ingresso i segnali dai due processori.

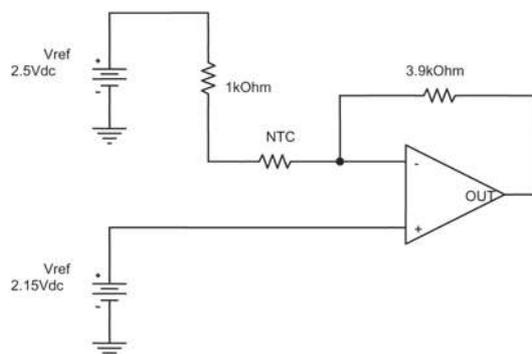


Figura 3.10. *Circuito di condizionamento per la temperatura delle celle solari*

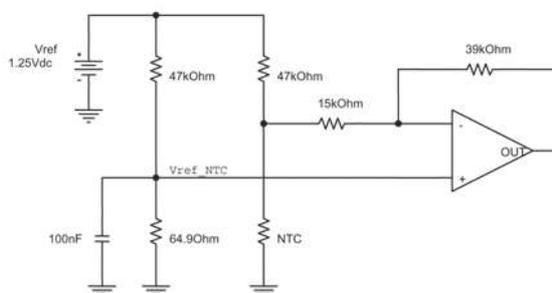


Figura 3.11. *Circuito di condizionamento per la temperatura delle batterie*

- Mentre un processore acquisisce l'altro dovrebbe mantenere i propri segnali di selezione a zero; se dovessero esserci dei problemi per cui essi non sono a zero l'ordine delle misure sarà falsato ma dalla stazione di terra in qualche modo ricostruibile.
- Per i primi due livelli di multiplexer, gli enable non sono necessari.
- Complessivamente si avranno quindi: sei segnali di selezione ed uno di enable.

3.3.5 Gestione dell'alimentazione dei sottosistemi

Questo sottosistema si occupa di alimentare gli altri sottosistemi della scheda Power-Supply; l'unico sottosistema che non è alimentato direttamente dalle batterie è quello di "gestione delle misure" in quanto viene utilizzato solamente durante l'acquisizione dei segnali da parte dei processori ed è di conseguenza alimentato solamente per 5 secondi ogni 30 dalla scheda PowerSwitch.

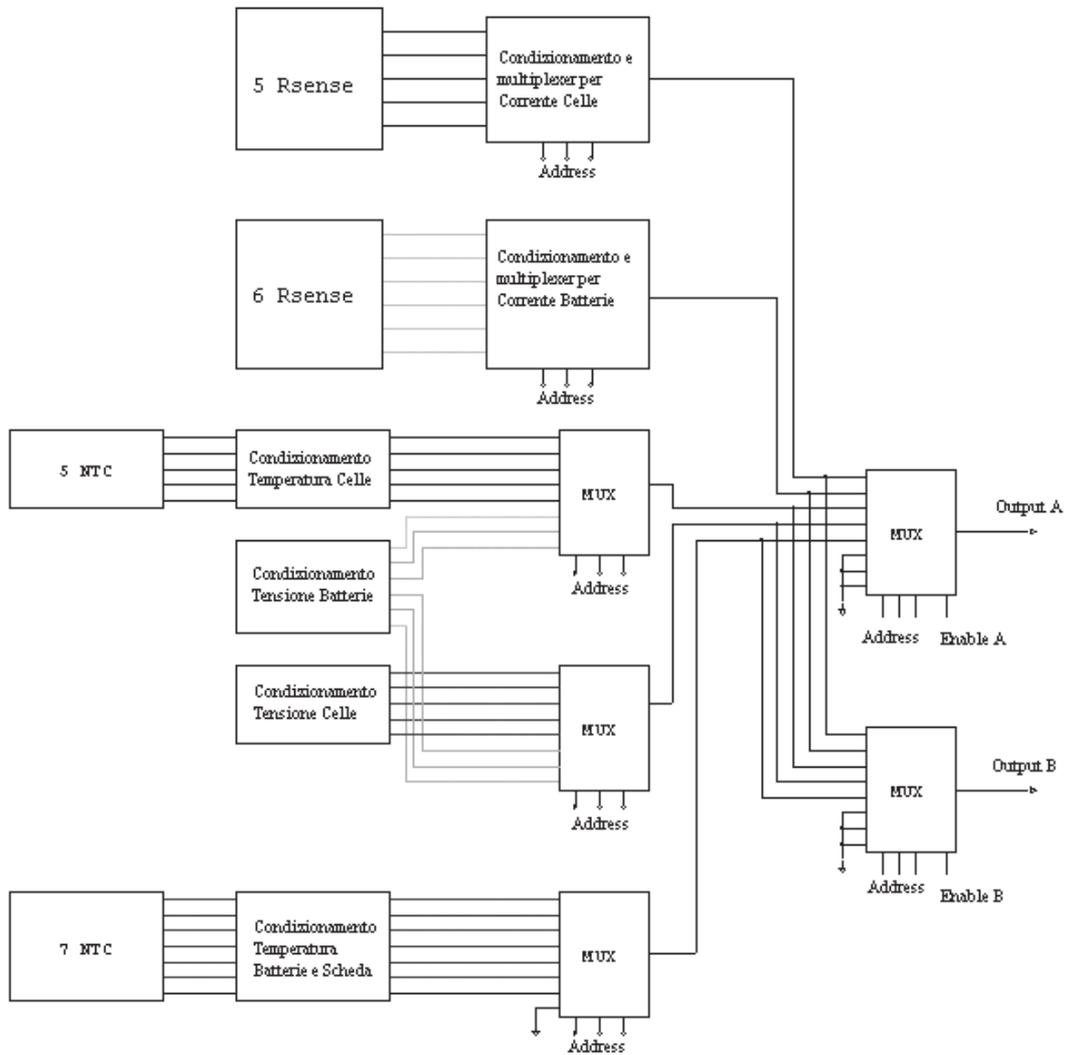


Figura 3.12. *Albero di multiplexer*

Le alimentazioni di tutti i circuiti integrati in tecnologia C-MOS, essendo soggetti al fenomeno del latch-up, sono protette da opportuni circuiti che verificano che l'assorbimento di corrente non superi una soglia massima. Al superamento di tale soglia il circuito provvede a togliere la tensione di alimentazione per circa 500 ms per poi tornare a fornirla nuovamente. L'intervallo di tempo in cui l'alimentazione non è presente serve a far estinguere tutti i fenomeni di latch-up che si sono scatenati e a scaricare tutte le capacità parassite. La velocità di intervento del dispositivo di protezione è fondamentale per ridurre al minimo il rischio di danneggiamento dei circuiti integrati.

Di seguito si riporta lo schema elettrico di uno dei due circuiti di protezione presenti sulla scheda.

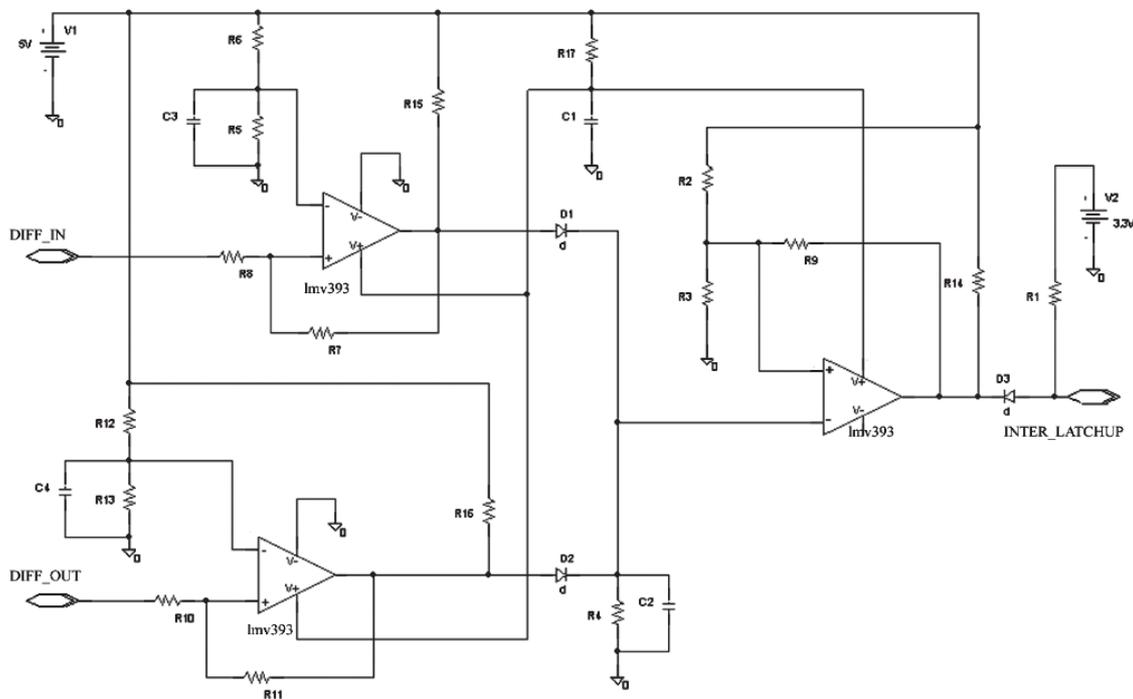


Figura 3.13. *Circuito di protezione anti latch-up*

3.4 Collaudo

3.4.1 Introduzione

La fase di collaudo della scheda PowerSupply ha richiesto parecchio tempo per essere completata, soprattutto per l'elevato numero di sottosistemi presenti sulla scheda.

Prima di iniziare il collaudo vero e proprio è stato poi necessario realizzare una serie di piccole schede utili a semplificare e rendere più veloce il lavoro.

La prima scheda realizzata era necessaria per simulare la presenza dei cinque pannelli solari in quanto essi sono stati disponibili soltanto quando il collaudo era ormai già concluso. La seconda scheda era invece necessaria per fornire l'alimentazione al sottosistema "gestione delle misure", non potendo essere utilizzata la scheda Power-Switch, anch'essa in fase di collaudo. Inoltre sulla scheda di adattamento realizzata sono anche presenti una serie di selettori per impostare l'indirizzo del multiplexer analogico (operazione che viene eseguita normalmente dai processori).

3.4.2 Strategia di collaudo

Di seguito viene riportata la procedura di collaudo che è stata utilizzata. La procedura è stata integrata da figure che rappresentano i componenti sulla scheda PowerSupply e rendono molto più facile la localizzazione dei componenti sulla scheda e quindi l'esecuzione di tutte le prove. Tale procedura è stata anche redatta in questa forma per permettere anche ad un'eventuale persona che non conosca a fondo la scheda di eseguire il collaudo.

Qualora una delle verifiche da effettuare sulla scheda evidenzia una non conformità con i risultati di progetto si potrà identificare in maniera estremamente rapida il malfunzionamento e porvi rimedio in tempi altrettanto brevi.

1. Collaudo dei Kill-Switch

- (a) Connettere il KillSwitch 1 alla scheda Power Supply
- (b) Verificare con il multimetro che i terminali 1-2 e 3-4 in figura 3.14 siano in cortocircuito
- (c) Verificare che quando il KillSwitch 1 è premuto, tra i terminali 1-2 e 3-4 di figura 3.15 ci sia un circuito aperto
- (d) Rimuovere il KillSwitch 1 e connettere il KillSwitch 2 alla scheda Power Supply
- (e) Verificare con il multimetro che i terminali 1-2 e 3-4 in figura 3.15 siano in cortocircuito
- (f) Verificare che quando il KillSwitch 2 è premuto, tra i terminali 1-2 e 3-4 di figura 3.15 ci sia un circuito aperto
- (g) Connettere il KillSwitch 1 alla scheda Power Supply
- (h) Connettere le 6 batterie ai rispettivi connettori della scheda Power Supply

- (i) Verificare che sulla net Alim1 ci sia la tensione delle batterie (6 – 8 V). La misura va effettuata tra il pin 2 di R243 e i pin 3-4 di J01F (vedi figura 3.16 per i punti di misura sul Top Layer)
- (j) Verificare che sulla net Alim2 ci sia la tensione delle batterie (6 – 8 V). La misura va effettuata tra il pin 2 di R241 e i pin 3-4 di J01F (vedi figura 3.17 per i punti di misura sul Top Layer)

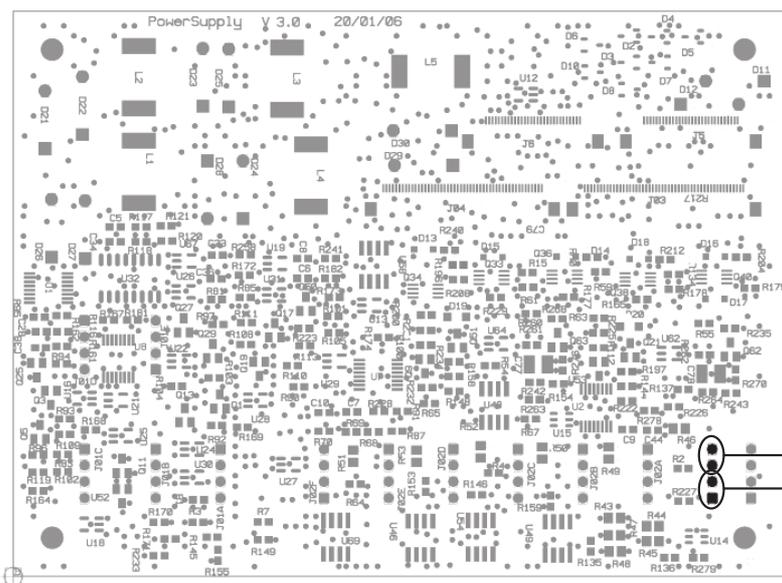


Figura 3.14. Collaudo dei Kill-Switch (a)

Kill-switch	Scheda 1	Scheda 2	Scheda 3
1	OK	OK	OK
2	OK	OK	OK

Tabella 3.1. Collaudo reference di tensione

2. Collaudo reference di tensione

- (a) Connettere scheda Adattatore di collaudo B per scheda Power Supply al connettore della scheda Connettori batterie Switch Supply; il cavo flexible della precedente scheda va collegato al connettore J03 della scheda Power Supply (vedi figura 3.18)

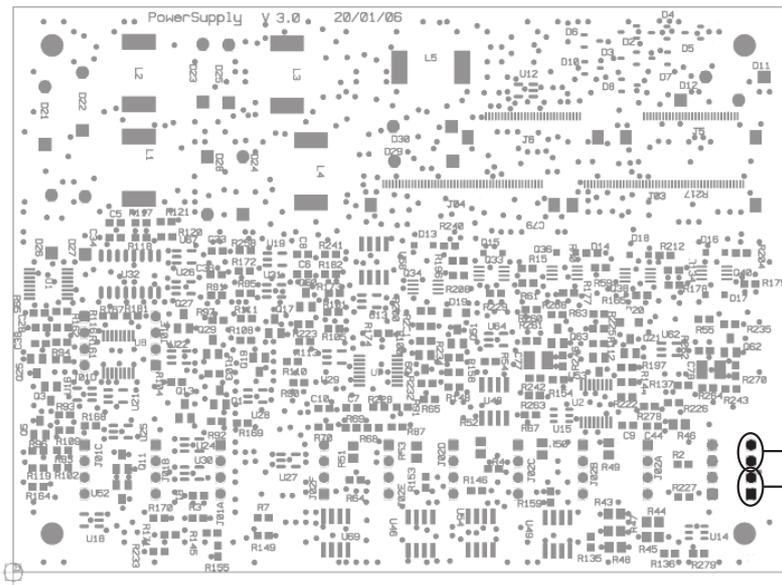


Figura 3.15. Collaudo dei Kill-Switch (b)

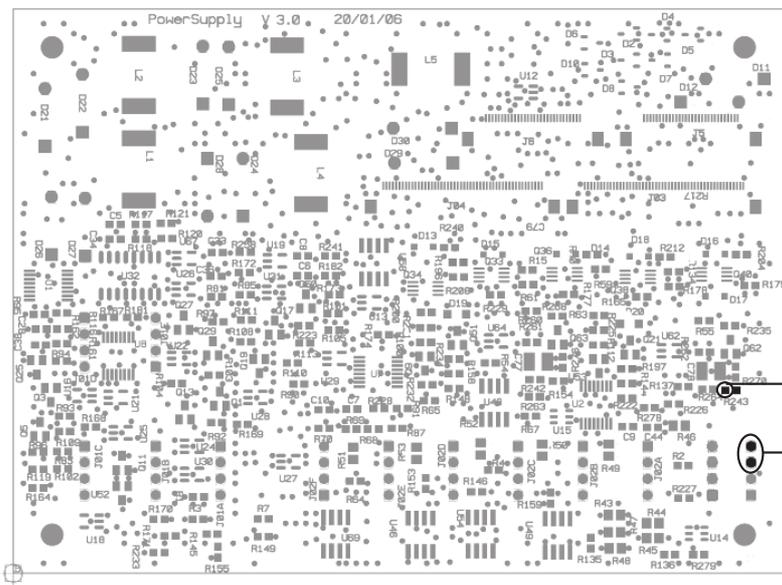


Figura 3.16. Collaudo dei Kill-Switch (c)

(b) Connettere le 6 batterie al rispettivo connettore della scheda Power Supply

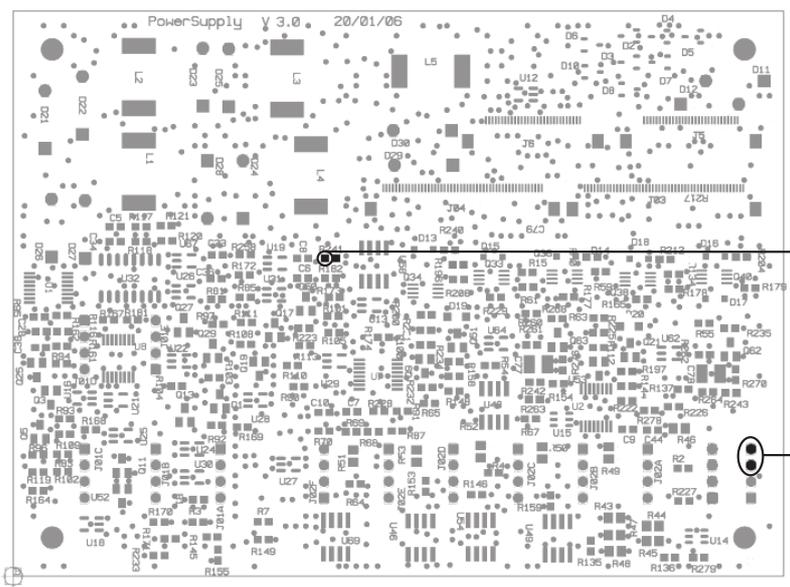


Figura 3.17. Collaudo dei Kill-Switch (d)

- (c) Verificare la tensione nei punti evidenziati di figura 3.19 (pin 6 e 2 di U14 su Top Layer), deve essere pari a 1.25 V
- (d) Verificare la tensione nei punti evidenziati di figura 3.20 (pin 6 e 2 di U15 su Top Layer), deve essere pari a 1.25 V
- (e) Verificare la tensione nei punti evidenziati di figura 3.21 (pin 2 e 3 di U53 su Top Layer), deve essere pari a 2.5 V
- (f) Verificare la tensione nei punti evidenziati di figura 3.22 (pin 2 e 3 di U52 su Top Layer), deve essere pari a 2.5 V
- (g) Verificare la tensione nei punti evidenziati di figura 3.23 (ai capi di R232 su Top Layer), deve essere pari a 1.25 V
- (h) Verificare la tensione nei punti evidenziati di figura 3.24 (ai capi di R233 su Top Layer), deve essere pari a 1.25 V

3. Collaudo circuiti Anti-LatchUp

- (a) Connettere scheda Adattatore di collaudo B per scheda Power Supply al connettore della scheda Connettori batterie Switch Supply; il cavo flexible della precedente scheda va collegato al connettore J03 della scheda Power Supply (vedi figura 3.25)

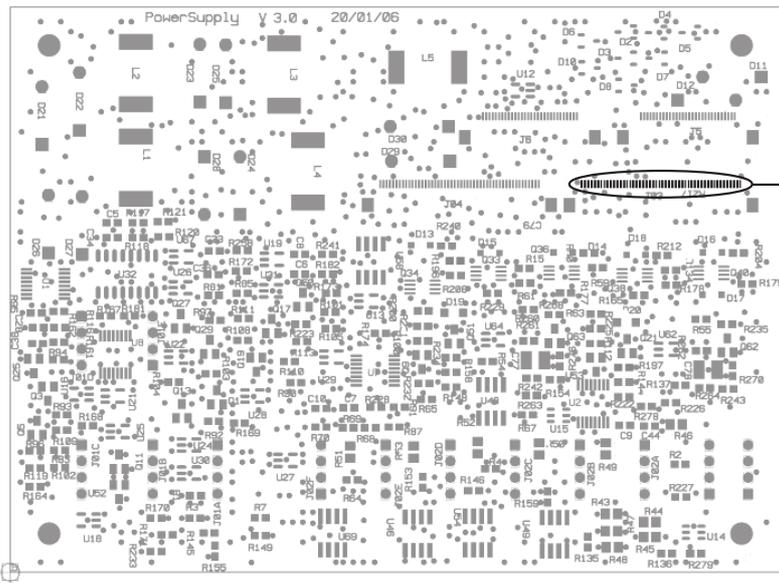


Figura 3.18. Collaudo reference di tensione (a)

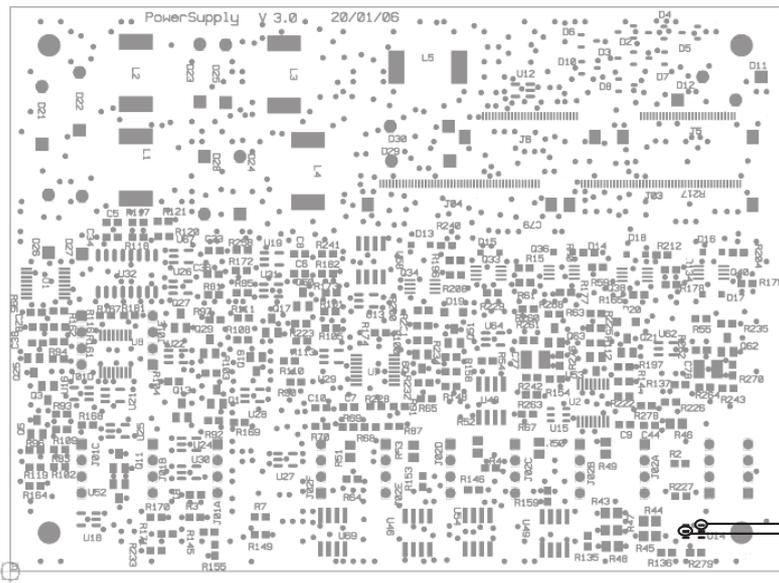


Figura 3.19. Collaudo reference di tensione (b)

- (b) Alimentare la scheda Adattatore di collaudo B per scheda Power Supply con una tensione di almeno 8 V e limitare la corrente a circa 200 mA

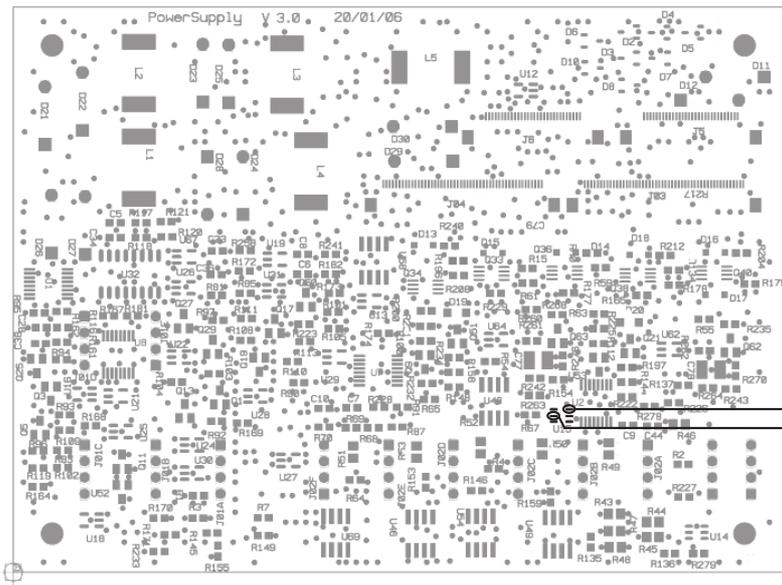


Figura 3.20. Collaudo reference di tensione (c)

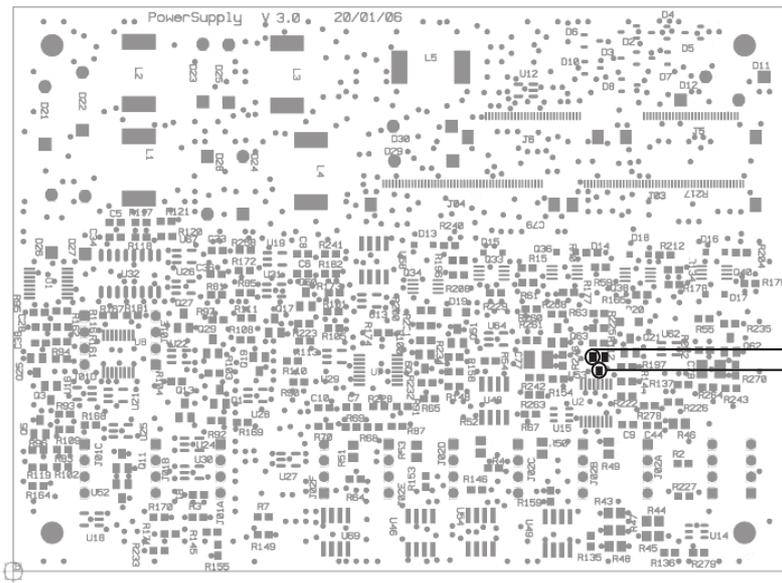


Figura 3.21. Collaudo reference di tensione (d)

- (c) Verificare che tra i terminali mostrati in figura 3.25 sia presente una tensione di 5.1 V (pin 1 e 3 di U53)

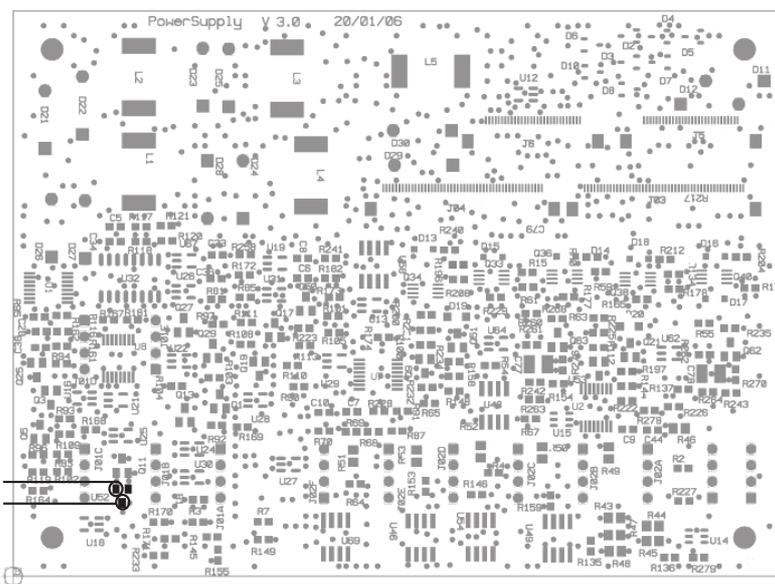


Figura 3.22. Collaudo reference di tensione (e)

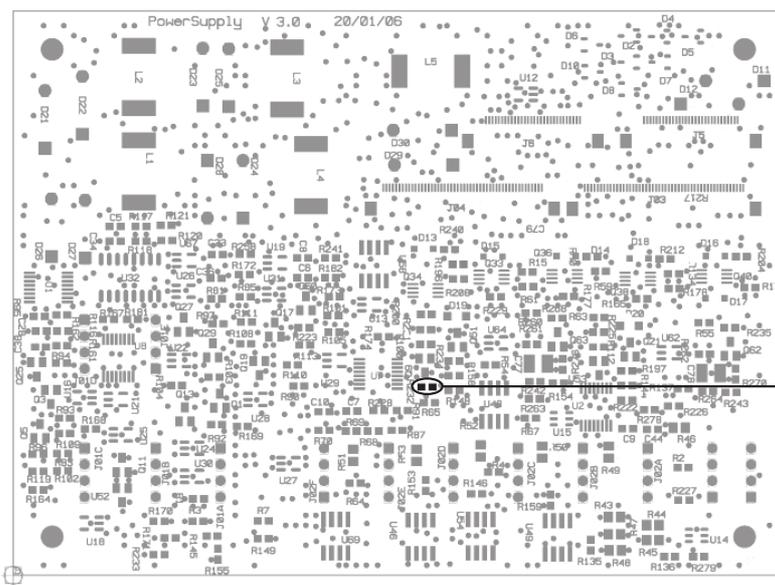


Figura 3.23. Collaudo reference di tensione (f)

- (d) Connettere in parallelo ai pin 1 e 3 di U53 una resistenza da 82 Ohm (vedi figura 3.26 per le connessioni) che dovrebbe far aumentare l'assorbimento

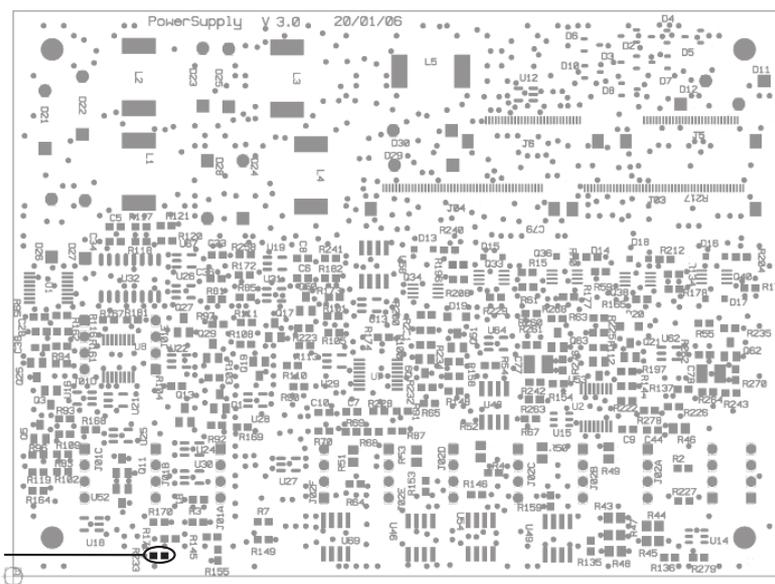


Figura 3.24. Collaudo reference di tensione (g)

Reference	Tensione nominale	Scheda 1	Scheda 2	Scheda 3
a	1.25 V	OK	OK	OK
b	1.25 V	OK	OK	OK
c	2.5 V	OK	OK	OK
d	2.5 V	OK	OK	OK
e	1.25 V	OK	OK	OK
f	1.25 V	OK	OK	OK

Tabella 3.2. Collaudo reference di tensione

di circa 60 mA

- (e) Verificare che la tensione tra i terminali prima indicati sia di qualche millivolt (il circuito Anti-LatchUp deve essere scattato) e quindi rimuovere la resistenza
- (f) Connettere in parallelo ai pin 1 e 2 di U52 una resistenza da 82 Ohm (vedi figura 3.27 per le connessioni) che dovrebbe far aumentare l'assorbimento di circa 60 mA
- (g) Verificare che la tensione tra i terminali prima indicati sia di qualche millivolt (il circuito Anti-LatchUp deve essere scattato) e quindi rimuovere la resistenza

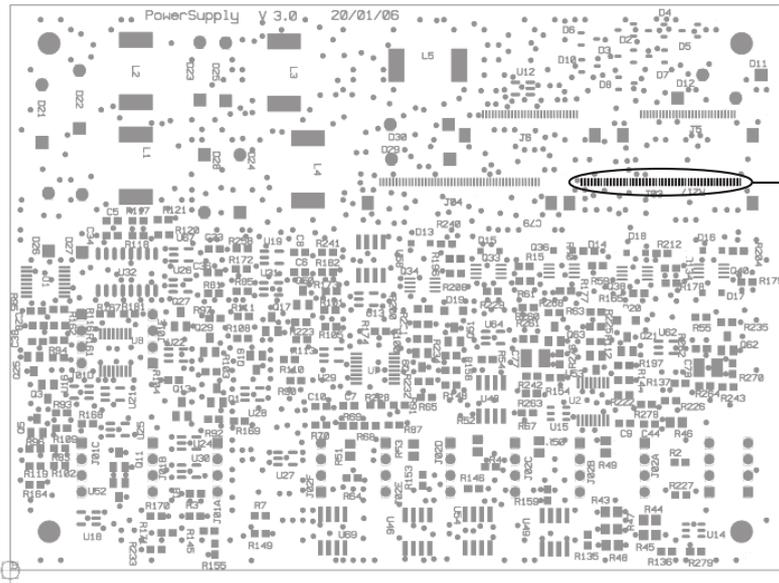


Figura 3.25. Collaudo anti latch-up (a)

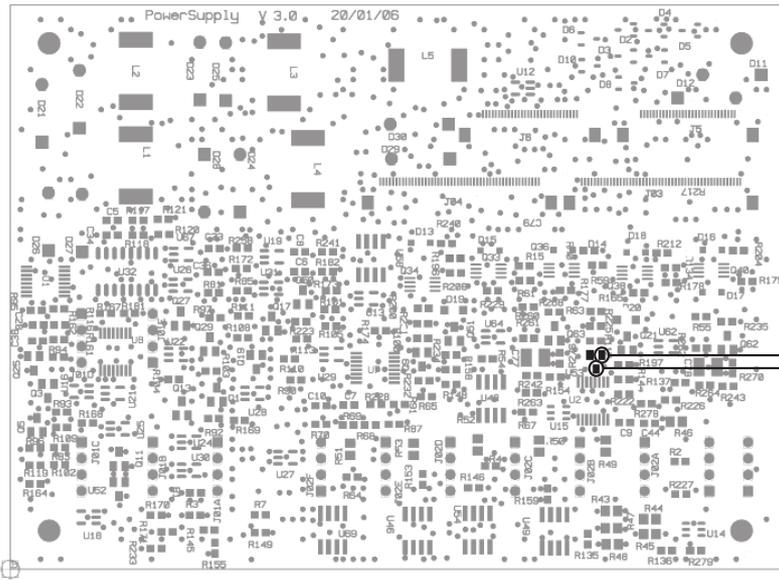


Figura 3.26. Collaudo anti latch-up (b)



Figura 3.27. Collaudo anti latch-up (c)

Anti latch-up	Scheda 1	Scheda 2	Scheda 3
A	OK	OK	OK
B	OK	OK	OK

Tabella 3.3. Collaudo anti latch-up

4. Collaudo alimentatori Switching

- (a) Connettere scheda Adattatore di collaudo A per scheda Power Supply al connettore della scheda Adattatore Power Supply; il cavo flexible della precedente scheda va collegato al connettore J5 della scheda Power Supply (vedi figura 3.28)
- (b) Connettere scheda Adattatore di collaudo B per scheda Power Supply al connettore della scheda Adattatore Power Supply; il cavo flexible della precedente scheda va collegato al connettore J6 della scheda Power Supply (vedi figura 3.29)
- (c) Collegare il connettore J01A della scheda Power Supply alla scheda di Alimentazione Pannelli Solari ed alimentare con $V_{al} = 10\text{ V}$ e limitare la corrente massima a circa 200 mA.
- (d) Collegare le 6 batterie al rispettivo connettore della scheda Power Supply

- (e) Verificare che la tensione di uscita dello switching 1 sia pari a 6 – 8 V (vedi figura 3.30 per i punti di misura)
- (f) Verificare che la tensione di ripple picco-picco sovrapposta alla continua del punto precedente sia inferiore a 500 mV
- (g) Disconnettere il connettore J01A dalla scheda di alimentazione e collegare il connettore J01B della scheda Power Supply alla scheda di alimentazione
- (h) Verificare che la tensione di uscita dello switching 2 sia pari a 6 – 8 V (vedi figura 3.30 per i punti di misura)
- (i) Disconnettere il connettore J01B dalla scheda di alimentazione e collegare il connettore J01C della scheda Power Supply alla scheda di alimentazione
- (j) Verificare che la tensione di uscita dello switching 3 sia pari a 6 – 8 V (vedi figura 3.30 per i punti di misura)
- (k) Disconnettere il connettore J01C dalla scheda di alimentazione e collegare il connettore J01D della scheda Power Supply alla scheda di alimentazione
- (l) Verificare che la tensione di uscita dello switching 4 sia pari a 6 – 8 V (vedi figura 3.30 per i punti di misura)
- (m) Disconnettere il connettore J01D dalla scheda di alimentazione e collegare il connettore J01E della scheda Power Supply alla scheda di alimentazione
- (n) Verificare che la tensione di uscita dello switching 5 sia pari a 6 – 8 V (vedi figura 3.30 per i punti di misura)
- (o) Connettere la scheda Connettori batterie Switch Supply al connettore J03 della scheda Power Supply
- (p) Verificare che tra i pin 1 e 2 del connettore J5 della scheda Connettori batterie Switch Supply vi sia una tensione pari a 6 – 8 V (tensione batteria 1)
- (q) Verificare che tra i pin 5 e 6 del connettore J5 della scheda Connettori batterie Switch Supply vi sia una tensione pari a 6 – 8 V (tensione batteria 2)
- (r) Verificare che tra i pin 9 e 10 del connettore J5 della scheda Connettori batterie Switch Supply vi sia una tensione pari a 6 – 8 V (tensione batteria 3)
- (s) Connettere la scheda Connettori batterie Switch Supply al connettore J04 della scheda Power Supply
- (t) Verificare che tra i pin 1 e 2 del connettore J5 della scheda Connettori batterie Switch Supply vi sia una tensione pari a 6 – 8 V (tensione batteria 4)

- (u) Verificare che tra i pin 5 e 6 del connettore J5 della scheda Connettori batterie Switch Supply vi sia una tensione pari a 6 – 8 V (tensione batteria 5)
- (v) Verificare che tra i pin 9 e 10 del connettore J5 della scheda Connettori batterie Switch Supply vi sia una tensione pari a 6 – 8 V (tensione batteria 6)

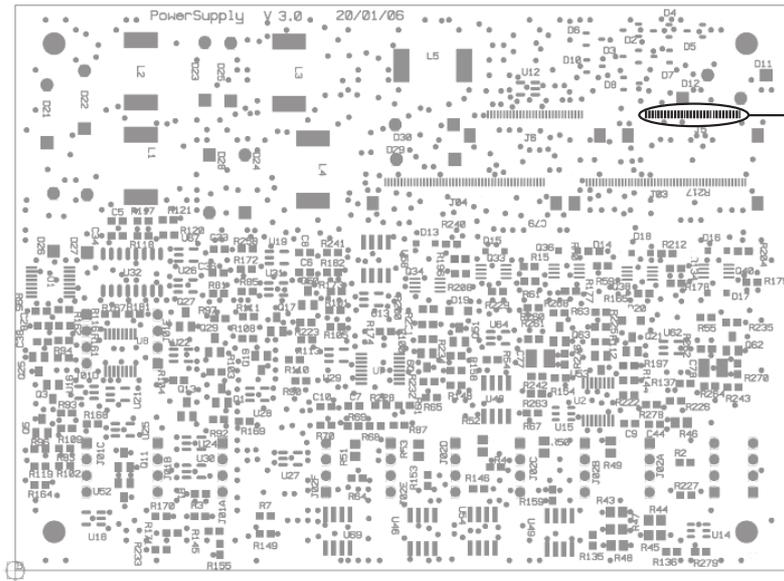


Figura 3.28. Collaudo alimentatori switching (a)

Indirizzo	Dato letto	Scheda 1	Scheda 2	Scheda 3
000	switching A	OK	OK	OK
001	switching B	OK	OK	OK
010	switching C	OK	OK	OK
011	switching D	OK	OK	OK
100	switching E	OK	OK	OK

Tabella 3.4. Collaudo alimentatori switching

5. Collaudo segnale di Test

- (a) Connettere scheda Adattatore di collaudo B per scheda Power Supply al connettore della scheda Adattatore Power Supply; il cavo flexibile della

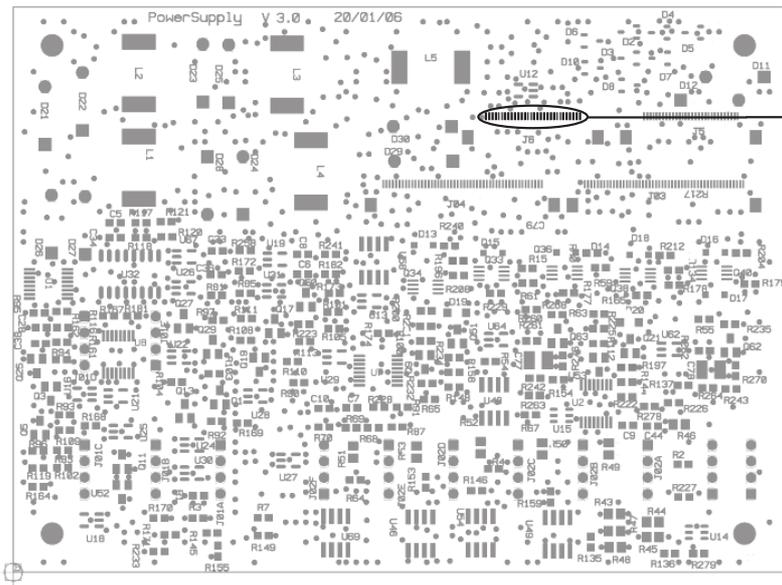


Figura 3.29. Collaudo alimentatori switching (b)

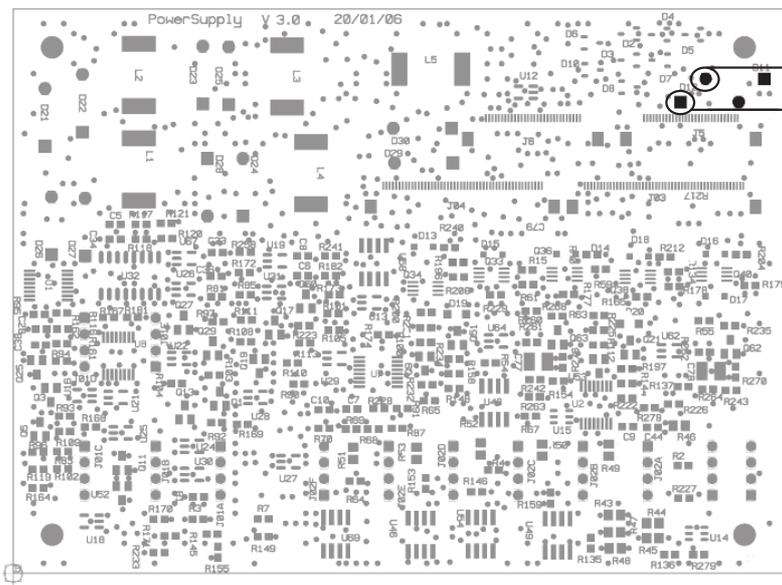


Figura 3.30. Collaudo alimentatori switching (c)

precedente scheda va collegato al connettore J6 della scheda Power Supply (vedi figura 3.31)

- (b) Connettere il connettore alimentazione Vsensors della scheda Adattatore di collaudo A per scheda Power Supply alla scheda Connettori batterie Switch Supply che va connessa al connettore J03 della scheda Power Supply (vedi figura 3.32)
- (c) Collegare i connettori dei pannelli solari della scheda Power Supply alla scheda di Alimentazione Pannelli Solari ed alimentare con $V_{al} = 10\text{ V}$ e limitare la corrente massima a circa 1.2 A
- (d) Collegare le 6 batterie al rispettivo connettore della scheda Power Supply
- (e) Selezionare sui DipSwitch per la selezione dell'indirizzo multiplexer di test della scheda Adattatore di collaudo B per scheda Power Supply i 5 alimentatori (indirizzi da 0 a 4) e verificare la presenza sul test-point TestOut della scheda Adattatore di collaudo B per scheda Power Supply della tensione di gate dei mos di potenza dei 5 switching

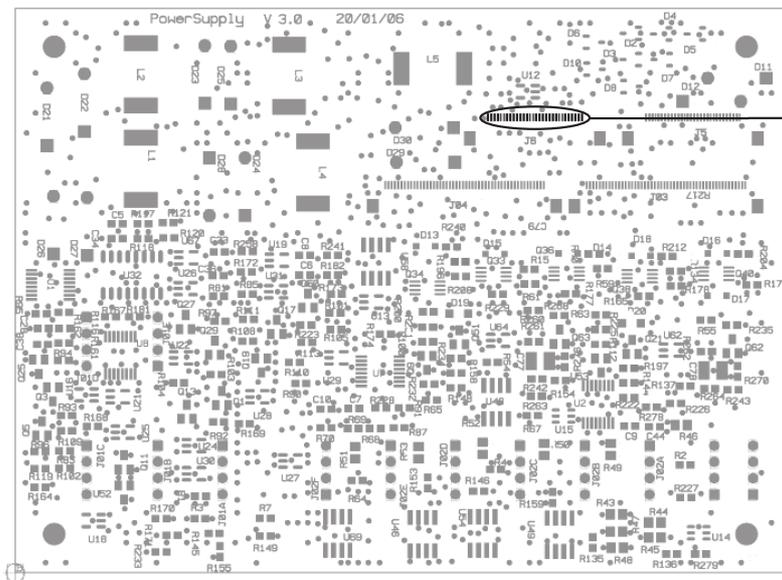


Figura 3.31. Collaudo segnale di Test (a)

6. Collaudo dei multiplexer

- (a) Connettere scheda Adattatore di collaudo A per scheda Power Supply al connettore della scheda Adattatore Power Supply; il cavo flexible della precedente scheda va collegato al connettore J5 della scheda Power Supply (vedi figura 3.33)

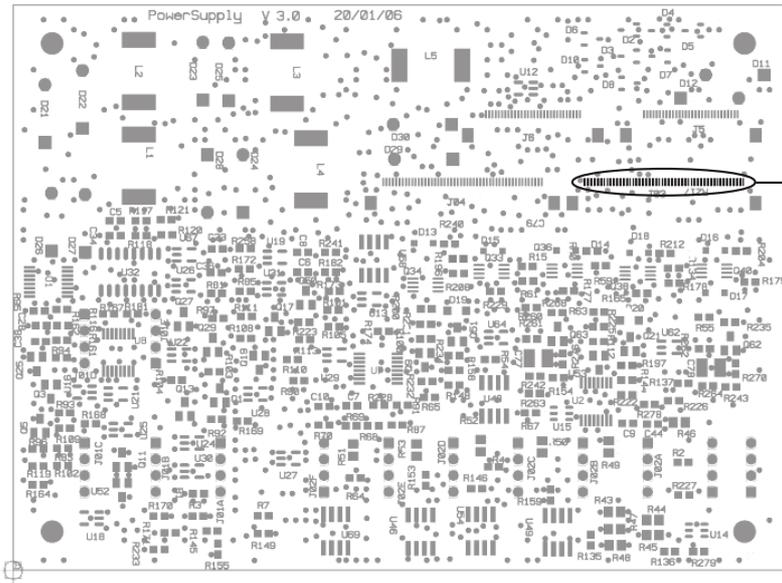


Figura 3.32. Collaudo segnale di Test (b)

Indirizzo	Dato letto	Scheda 1	Scheda 2	Scheda 3
000	Gate MOS switching A	OK	OK	OK
001	Gate MOS switching B	OK	OK	OK
010	Gate MOS switching C	OK	OK	OK
011	Gate MOS switching D	OK	OK	OK
100	Gate MOS switching E	OK	OK	OK

Tabella 3.5. Collaudo segnale di Test

- (b) Connettere il connettore alimentazione Vsensors della scheda Adattatore di collaudo A per scheda Power Supply alla scheda Connettori batterie Switch Supply che va connessa al connettore J03 della scheda Power Supply (vedi figura 3.34)
- (c) Connettere scheda Adattatore di collaudo B per scheda Power Supply al connettore della scheda Adattatore Power Supply; il cavo flexible della precedente scheda va collegato al connettore J6 della scheda Power Supply (vedi figura 3.35)
- (d) Connettere il connettore alimentazione Vsensors della scheda Adattatore di collaudo B per scheda Power Supply alla scheda Connettori batterie Switch Supply che va connessa al connettore J04 della scheda Power

Supply (vedi figura 3.36)

- (e) Abilitare il multiplexer tramite il jumper EnMux della scheda Adattatore di collaudo A per scheda Power Supply (il jumper deve essere chiuso)
- (f) Disabilitare il multiplexer tramite il jumper EnMux della scheda Adattatore di collaudo B per scheda Power Supply (il jumper deve essere aperto)
- (g) Selezionare utilizzando i DipSwitch sulla scheda Adattatore di collaudo B per scheda Power Supply l'indirizzo 0
- (h) Alimentare la scheda Adattatore di collaudo A per scheda Power Supply con una tensione superiore a 8 V e con una corrente di almeno 100 mA
- (i) Alimentare la scheda Adattatore di collaudo B per scheda Power Supply con una tensione superiore a 8 V e con una corrente di almeno 100 mA
- (j) Selezionare utilizzando i DipSwitch sulla scheda Adattatore di collaudo A per scheda Power Supply tutti gli indirizzi utilizzati e verificare la tensione letta sul segnale MuxOut (vedi tabella 3.6)
- (k) Disabilitare il multiplexer tramite il jumper EnMux della scheda Adattatore di collaudo A per scheda Power Supply (il jumper deve essere aperto)
- (l) Abilitare il multiplexer tramite il jumper EnMux della scheda Adattatore di collaudo B per scheda Power Supply (il jumper deve essere chiuso)
- (m) Selezionare utilizzando i DipSwitch sulla scheda Adattatore di collaudo B per scheda Power Supply tutti gli indirizzi utilizzati e verificare la tensione letta sul segnale MuxOut (vedi tabella 3.6)

7. Collaudo sistema selezione batterie

- (a) Connettere scheda Adattatore di collaudo A per scheda Power Supply al connettore della scheda Adattatore Power Supply; il cavo flexible della precedente scheda va collegato al connettore J5 della scheda Power Supply (vedi figura 3.39)
- (b) Connettere scheda Adattatore di collaudo B per scheda Power Supply al connettore della scheda Adattatore Power Supply; il cavo flexible della precedente scheda va collegato al connettore J6 della scheda Power Supply (vedi figura 3.40)
- (c) Collegare i connettori dei pannelli solari della scheda Power Supply alla scheda di Alimentazione Pannelli Solari ed alimentare con $V_{at} = 10\text{ V}$ e limitare la corrente massima a circa 1.2 A

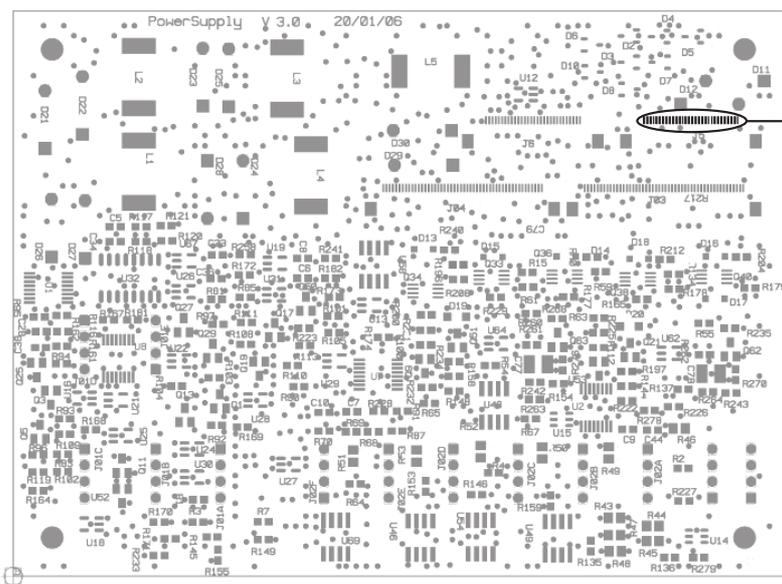


Figura 3.33. Collaudo dei multiplexer (a)

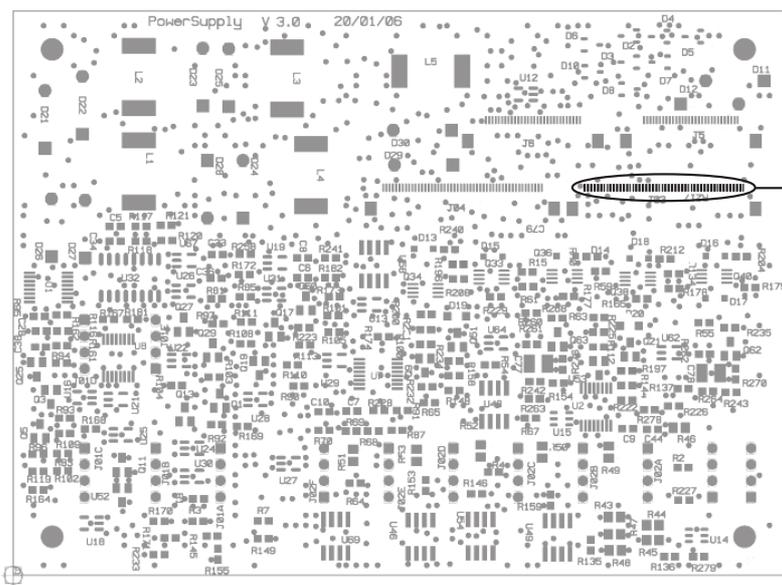


Figura 3.34. Collaudo dei multiplexer (b)

- (d) Selezionare la batteria 1 tramite il segnale CntClk della scheda Adattatore di collaudo A per scheda Power Supply (la verifica va effettuata

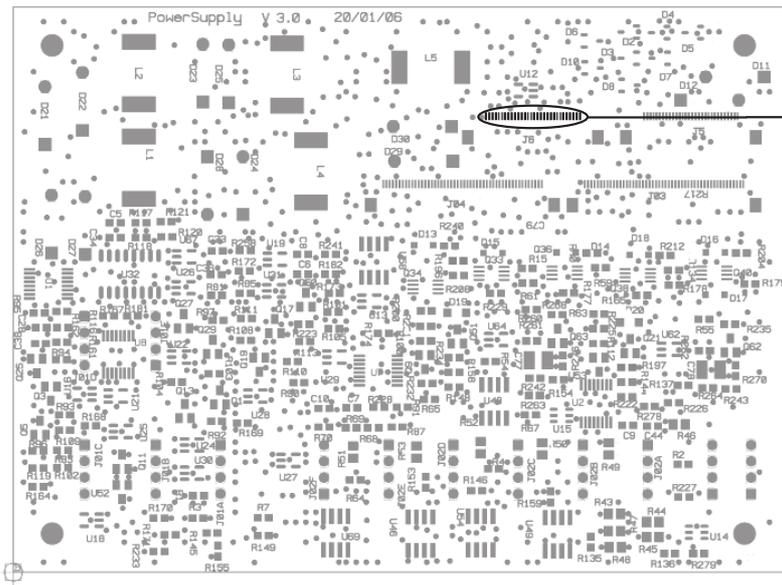


Figura 3.35. Collaudo dei multiplexer (c)

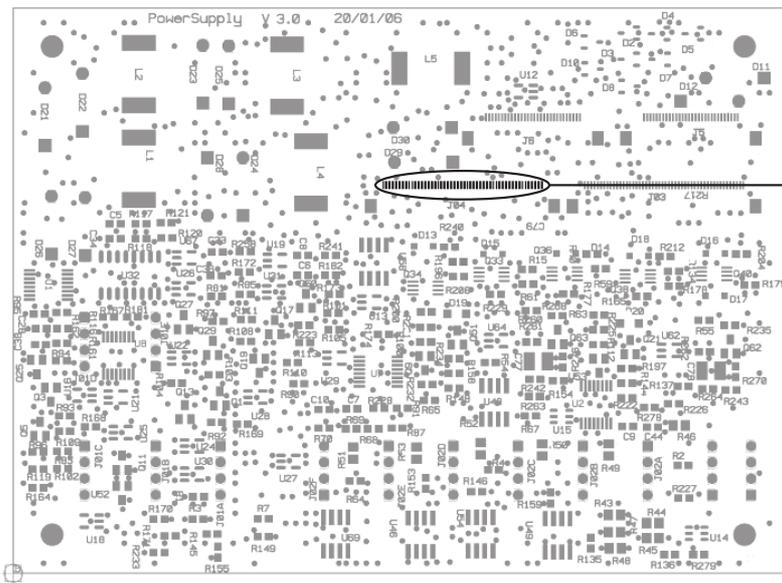


Figura 3.36. Collaudo dei multiplexer (d)

controllando il segnale XorCnt dai test-point della scheda adattatore)

(e) Selezionare tramite i DipSwitch della scheda Adattatore di collaudo A

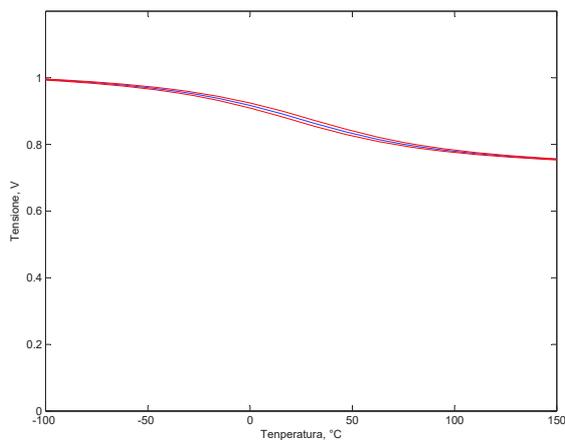


Figura 3.37. *Caratteristica del sensore di temperatura celle solari*

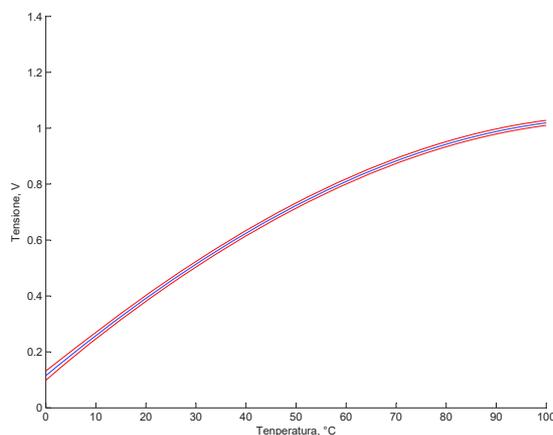


Figura 3.38. *Caratteristica del sensore di temperatura batterie e scheda*

per scheda Power Supply la corrente di carica delle batterie e misurarla tramite il test-point MuxOut (per gli indirizzi da impostare sul DipSwitch vedere la tabella 3.6); la corrente circolante attraverso le batterie non in carica deve essere prossima a 0 A

- (f) Ripetere le operazioni dei punti d ed e andando a selezionare le altre 5 batterie
- (g) Ripetere le operazioni dei punti da d ad f utilizzando la scheda Adattatore di collaudo B per scheda Power Supply

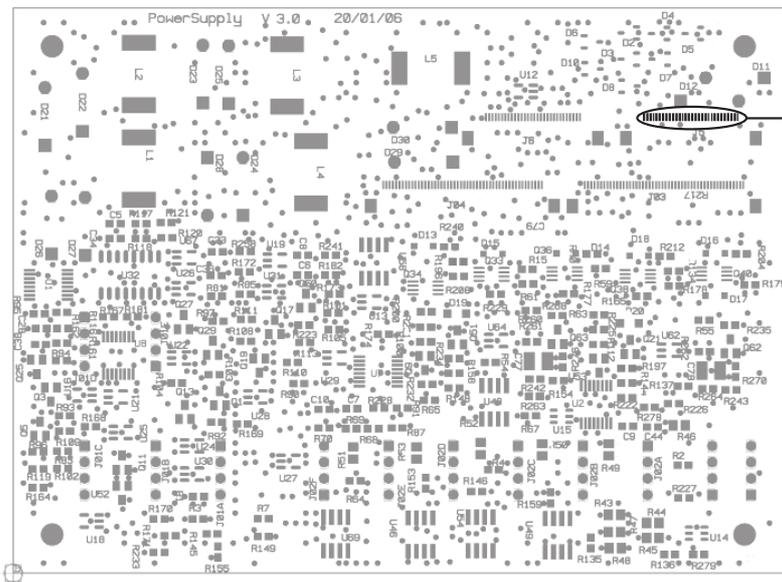


Figura 3.39. Collaudo sistema selezione batterie (a)

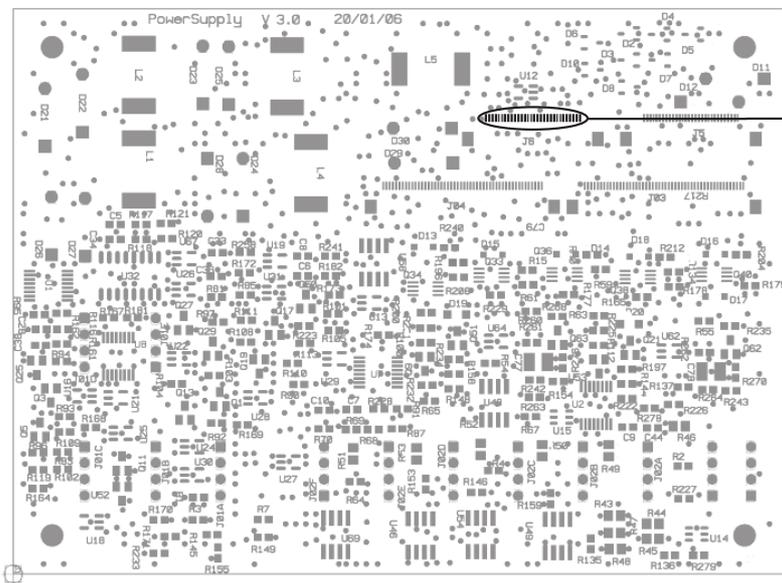


Figura 3.40. Collaudo sistema selezione batterie (b)

Indirizzo	Dato letto	Guadagno	Offset	Canale A			Canale B		
				1	2	3	1	2	3
000000	I_{cellaA}	2.6 V/A	0 V	OK	OK	OK	OK	OK	OK
000001	I_{cellaB}	2.6 V/A	0 V	OK	OK	OK	OK	OK	OK
000010	I_{cellaC}	2.6 V/A	0 V	OK	OK	OK	OK	OK	OK
000011	I_{cellaD}	2.6 V/A	0 V	OK	OK	OK	OK	OK	OK
000100	I_{cellaE}	2.6 V/A	0 V	OK	OK	OK	OK	OK	OK
001000	$I_{batteria1}$	0.33 V/A	0.13 V	OK	OK	OK	OK	OK	OK
001001	$I_{batteria2}$	0.33 V/A	0.13 V	OK	OK	OK	OK	OK	OK
001010	$I_{batteria3}$	0.33 V/A	0.13 V	OK	OK	OK	OK	OK	OK
001011	$I_{batteria4}$	0.33 V/A	0.13 V	OK	OK	OK	OK	OK	OK
001100	$I_{batteria5}$	0.33 V/A	0.13 V	OK	OK	OK	OK	OK	OK
001101	$I_{batteria6}$	0.33 V/A	0.13 V	OK	OK	OK	OK	OK	OK
010000	T_{cellaA}	Figura 3.37		OK	OK	OK	OK	OK	OK
010001	T_{cellaB}	Figura 3.37		OK	OK	OK	OK	OK	OK
010010	T_{cellaC}	Figura 3.37		OK	OK	OK	OK	OK	OK
010011	T_{cellaD}	Figura 3.37		OK	OK	OK	OK	OK	OK
010100	T_{cellaE}	Figura 3.37		OK	OK	OK	OK	OK	OK
010101	$V_{batteria1}$	0.142 V/V	0 V	OK	OK	OK	OK	OK	OK
010110	$V_{batteria2}$	0.142 V/V	0 V	OK	OK	OK	OK	OK	OK
010111	$V_{batteria3}$	0.142 V/V	0 V	OK	OK	OK	OK	OK	OK
011000	V_{cellaA}	0.248 V/V	0 V	OK	OK	OK	OK	OK	OK
011001	V_{cellaB}	0.248 V/V	0 V	OK	OK	OK	OK	OK	OK
011010	V_{cellaC}	0.248 V/V	0 V	OK	OK	OK	OK	OK	OK
011011	V_{cellaD}	0.248 V/V	0 V	OK	OK	OK	OK	OK	OK
011100	V_{cellaE}	0.248 V/V	0 V	OK	OK	OK	OK	OK	OK
011101	$V_{batteria4}$	0.142 V/V	0 V	OK	OK	OK	OK	OK	OK
011110	$V_{batteria5}$	0.142 V/V	0 V	OK	OK	OK	OK	OK	OK
011111	$V_{batteria6}$	0.142 V/V	0 V	OK	OK	OK	OK	OK	OK
100000	$T_{batteria1}$	Figura 3.38		OK	OK	OK	OK	OK	OK
100001	$T_{batteria2}$	Figura 3.38		OK	OK	OK	OK	OK	OK
100010	$T_{batteria3}$	Figura 3.38		OK	OK	OK	OK	OK	OK
100011	$T_{batteria4}$	Figura 3.38		OK	OK	OK	OK	OK	OK
100100	$T_{batteria5}$	Figura 3.38		OK	OK	OK	OK	OK	OK
100101	$T_{batteria6}$	Figura 3.38		OK	OK	OK	OK	OK	OK
100110	T_{scheda}	Figura 3.38		OK	OK	OK	OK	OK	OK

Tabella 3.6. Collaudo sistema selezione batterie

Batteria	CntClk ProcA			CntClk ProcB		
Scheda	1	2	3	1	2	3
1	OK	OK	OK	OK	OK	OK
2	OK	OK	OK	OK	OK	OK
3	OK	OK	OK	OK	OK	OK
4	OK	OK	OK	OK	OK	OK
5	OK	OK	OK	OK	OK	OK
6	OK	OK	OK	OK	OK	OK

Tabella 3.7. *Collaudo sistema selezione batterie*

Capitolo 4

Scheda ProcB

4.1 Introduzione

La scheda ProcB ha un ruolo centrale all'interno del sistema elettronico del satellite per quanto riguarda la gestione delle funzioni implementate sia sulla stessa scheda che nelle altre: essa è infatti uno dei due computer di bordo di cui il satellite è dotato. Inoltre si occupa della comunicazione con la stazione di terra. Ogni minuto viene attivata automaticamente dalla scheda PowerSwitch, che fornisce la tensione di alimentazione. Successivamente la scheda ProcB svolge le seguenti funzioni:

1. esegue l'acquisizione dei sensori entro 4 secondi dall'accensione;
2. attua la strategia di carica delle batterie;
3. assembla il vettore di telemetria di housekeeping TMH;
4. esegue il calcolo dei valori massimi, minimi, medi e della deviazione standard per ogni sensore ed assembla il pacchetto di telemetria estesa TMHE;
5. attiva il ricevitore sulla banda dei 2.4GHz;
6. attende in ricezione per massimo 5 secondi l'invio di un telecomando e se ricevuto lo decodifica;
7. se il telecomando viene ricevuto correttamente si esegue una delle seguenti operazioni:
 - SendTMH: invio della telemetria di housekeeping TMH;
 - SendTMHE: invio della telemetria estesa TMHE;
 - ResetTMHE: reset del vettore di telemetria estesa TMHE;

- Trigger(a,t): scatta la foto a(1,5) da telecamera t(1,3);
 - SendPhoto(a): invio a terra della foto a(1,5), ricevuta dalla scheda Payload;
 - ResendBlock(a,b): invio a terra del blocco b(1,9) della foto a(1,5);
 - Rotate(x): avviamento del motore connesso alla ruota di inerzia; il motore compie x giri;
8. quando richiesto, fornisce l'alimentazione ed i comandi da eseguire alla scheda Payload, ricevendo alla fine i dati inviati in risposta dalla scheda;
 9. attiva il trasmettitore a 2.4GHz per l'invio di un pacchetto dati a terra;
 10. invia la richiesta di spegnimento alla scheda PowerSwitch;

Lo schema a blocchi della scheda è riportato in figura 4.1.

Il vettore di telemetria di housekeeping TMH è costituito dal valore di tutti i sensori che la scheda ProcB acquisisce. Il vettore di telemetria estesa TMHE ha lo stesso formato del vettore di housekeeping, ma è ripetuto quattro volte con i valori minimi, massimi, medi e la deviazione standard. L'ordine dei sensori acquisiti è riportato in tabella 4.1.

4.2 Interfacce

Si illustreranno ora le interazioni tra la scheda ProcB e il resto del sistema:

- Scheda Payload:
 1. Alimentazione a 3.3 V per la scheda,
 2. Alimentazione a 12 V per le telecamere,
 3. Alimentazione a 12 V per le telecamere,
 4. segnale di selezione per l'area da cui effettuare il boot,
 5. porta seriale SPI per le comunicazioni tra i processori.
- Scheda PowerSupply:
 1. sensori analogici multiplexati,
 2. segnali per il connettore di test,
 3. segnale di clock per la selezione della batteria da caricare,

Tipologia	Parametro	Range
corrente media	pann solare P1-P2-P3-P4-P5	(0 : 490) mA
corrente	uscente batt B1-B2-B3-B4-B5-B6	(-580 : +3520) mA
temperatura	pann solare P1-P2-P3-P4-P5	(-50 : 150) °C
tensione	batterie B1-B2-B3-B4-B5-B6	(0 : 8,8) V
tensione media	pann solare P1-P2-P3-P4-P5	(0 : 6) V
temperatura	batterie B1-B2-B3-B4-B5-B6	(0 : 100) °C
temperatura	scheda power supply	(0 : 100) °C
tensione	Alim AL2(5V) TxRxB	(0 : 6) V
corrente	Alim AL2(5V) TxRxB	(0 : 1000) mA
tensione	Alim AL20 + AL21 (3,3V) Payload	(0 : 5) V
tensione	Alim AL17 + AL18 (12V) Payload	(0 : 15) V
tensione	Alim AL12 (5V) cond. sens.	(0 : 6,2) V
tensione	Alim (3,3) MSP	(0 : 6,2) V
tensione	Alim (5V) anti latch-up	(0 : 6,2) V
tensione	ValBattA	(0 : 9,2) V
mese	Mese dell'anno	1 – 12
giorno	Giorno del mese	1 – 31
ora	Ora del giorno	0 – 23
minuti	Minuti dell'ora	0 – 59
secondi	Secondi all'accensione del processore	0 – 59
contatore latch-up	PIC	0 – 255
contatore latch-up	Payload	0 – 255
contatore latch-up	Power Amplifier 2.4 GHz	0 – 255
contatore latch-up	ProcB	0 – 255
contatore latch-up	TxRx 2.4 GHz	0 – 255
temperatura	batterie B4-B5-B6	(0 : 100) °C
tensione	batterie B4-B5-B6	(0 : 8,8) V
temperatura	scheda power switch	(0 : 100) °C
tensione	ValBattB	(0 : 9,2) V
temperatura	procB	(0 : 100) °C
temperatura	TxRX 2,4GHz	(0 : 100) °C
temperatura	payload	(0 : 100) °C
corrente	Alim AL20 + AL21 (3,3V) Payload	(0 : 500) mA
corrente	Alim AL17 + AL18 (12V) Payload	(0 : 100) mA
corrente	Alim 3,3 procB	(0 : 30) mA
tensione	Alim (3,3) procB	(0 : 5) V
corrente	motore	(0 : 360) mA

Tabella 4.1. *Pacchetto di telemetria di Housekeeping*

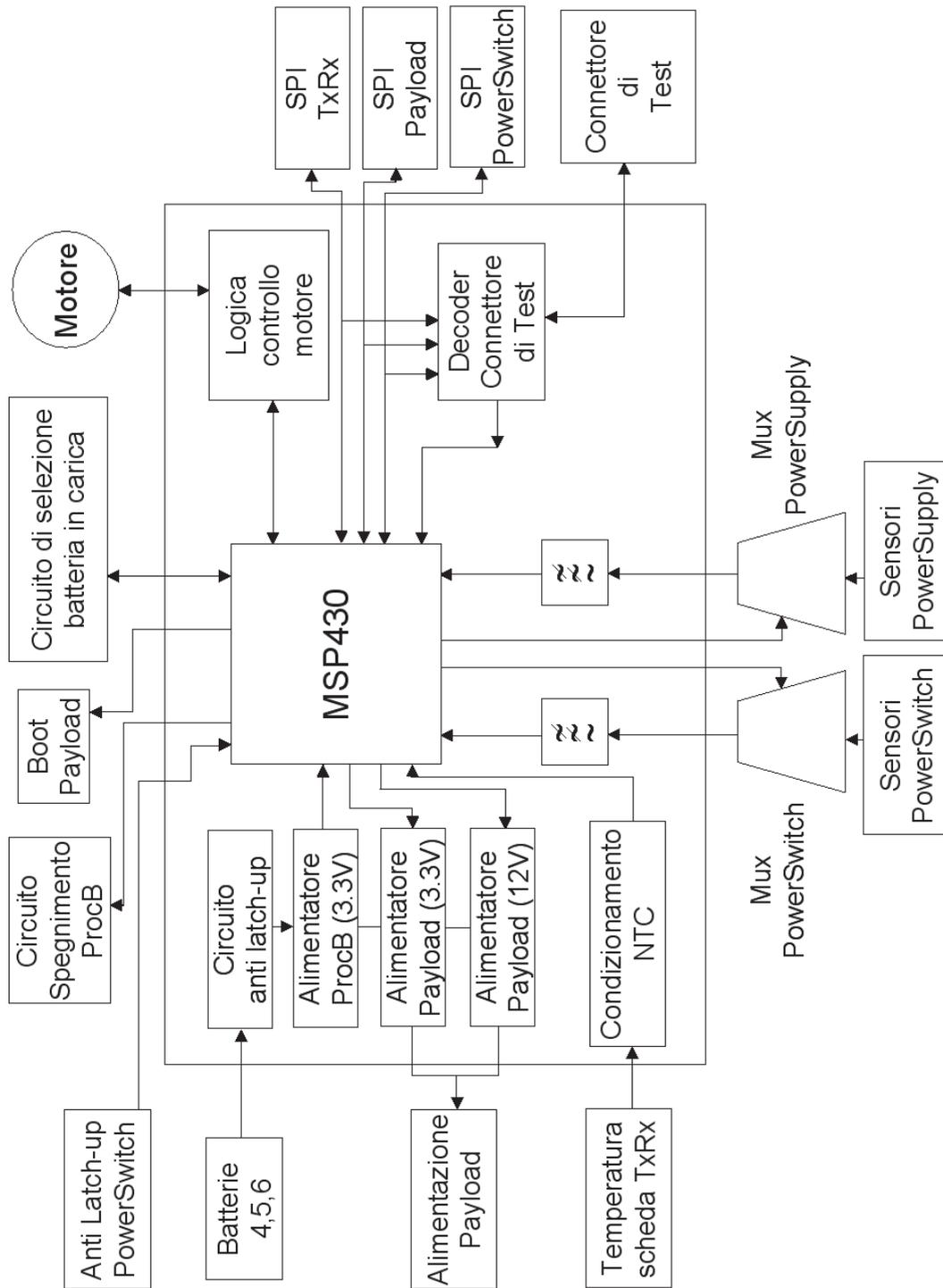


Figura 4.1. *Schema a blocchi*

4. segnale che indica la batteria attualmente in carica.
- Scheda PowerSwitch:
 1. alimentazione della scheda
 2. porta seriale SPI per le comunicazioni.
 - Scheda TxRX:
 1. porta seriale SPI per le comunicazioni,
 2. sensore di temperatura del trasmettitore, il cui circuito di condizionamento si trova sulla scheda ProcB.

Alla scheda ProcB è collegato il motore brushless che ha il compito di attivare la ruota d'inerzia. Per il suo controllo sono anche necessari tre sensori ad effetto Hall.

4.3 Sottosistemi

4.3.1 Il processore

Il processore utilizzato è un MSP430 della Texas Instruments, scelto anche per il suo bassissimo consumo. In particolare è stato scelto l'MSP430F149 per il numero di I/O e la memoria disponibile.

Le sue caratteristiche sono:

- tensione di alimentazione da 1,8 a 3,6 V.
- consumo in standby 1,6uA.
- 8 MHz di frequenza massima.
- 62 KB di memoria di cui 60 KB flash e 2KB RAM.
- 48 pin di I/O riconfigurabili singolarmente.
- watchdog a 16 bit
- 2 Timer, con 3 e 7 comparatori.
- 2 USART utilizzabili ciascuna come SPI o UART
- 8 canali per il convertitore a 12 bit

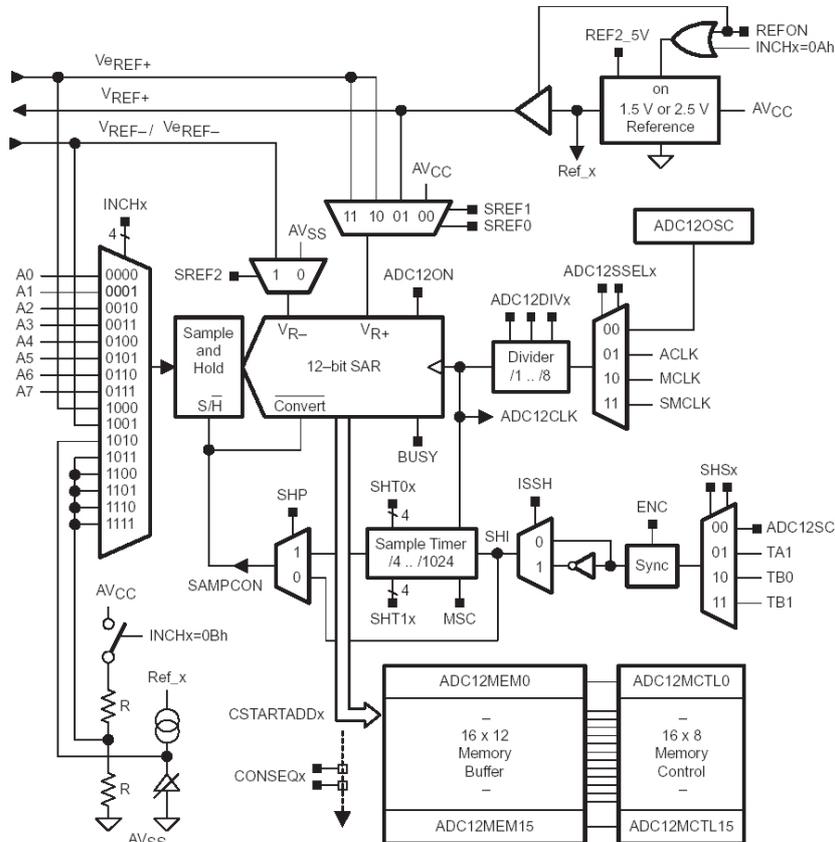


Figura 4.2. Diagramma a blocchi dell'A/D

4.3.2 Acquisizione A/D

Gli 8 canali esterni, più i 2 interni per il convertitore A/D, sono stati sufficienti, ed hanno permesso di non mettere un mux aggiuntivo. All'ingresso del mux interno, per i segnali provenienti dalle altre schede, ovvero i mux di PowerSupply e PowerSwitch, ed il sensore di temperatura di Payload è stato inserito un filtro RC per garantire un segnale più pulito. Infatti si possono avere dei disturbi dovuti ai regolatori switching (50KHz) e dalla componente a radiofrequenza (400MHz, 2,4GHz).

4.3.3 I sensori

La scheda ProcB ha il compito di acquisire i segnali analogici provenienti dalla scheda PowerSupply; in più, sulla scheda sono presenti alcuni sensori e di seguito si

riportano i circuiti di condizionamento.

Sensore di tensione

Tramite semplici partitori resistivi sono acquisite le varie tensioni di alimentazione presenti sulla scheda: l'alimentazione del processore e le due alimentazioni della scheda Payload (3.3 V e 12 V).

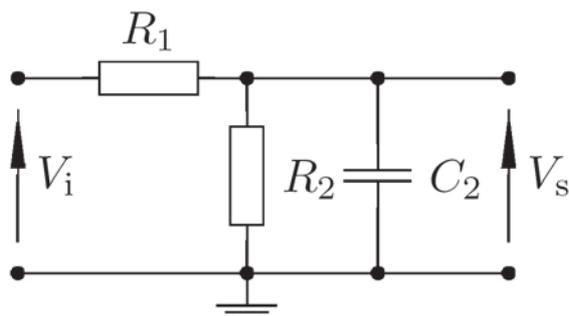


Figura 4.3. *Sensore di tensione*

Sensore di corrente

Per la misura delle correnti si misura la tensione ai capi di opportune resistenze di sense. Il circuito è riportato in figura 4.4.

Su questa scheda questo circuito è stato impiegato per misurare la corrente assorbita dal motore elettrico.

Sensore di temperatura

Per le misure di temperatura la forte limitazione sulla varie possibilità di scelta del sensore è il range di temperatura -40°C , $+150^{\circ}\text{C}$, a cui il satellite è sottoposto all'esterno. Aggiungendo a questo problemi di tipo logistico per il montaggio tra i pannelli solari del sensore, l'unica soluzione risultante è stata l'utilizzo degli NTC. Precisamente si è usato il TR0603J252K della RTI Electronics, le cui caratteristiche sono:

- spessore pari a 0,4 mm;
- resistenza variabile da $100\ \Omega$ a $42,5\ \text{k}\Omega$;

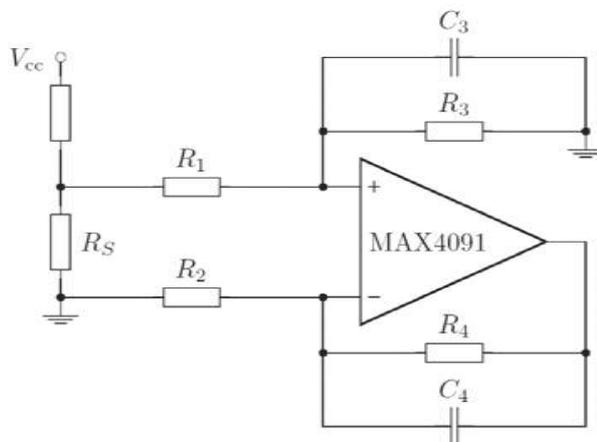
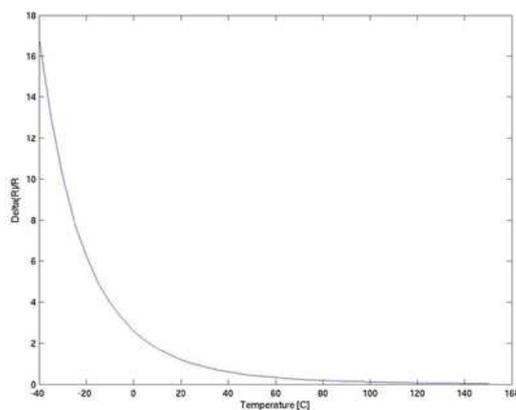
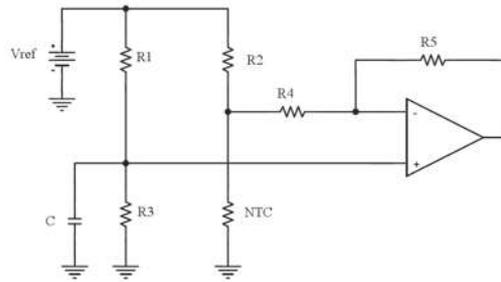


Figura 4.4. Sensore di corrente low-side

- range di funzionamento compreso tra -55°C e $+160^{\circ}\text{C}$;
- tolleranza costruttiva del sensore del 10% a 25°C .

L'NTC ha inoltre l'inconveniente di avere una caratteristica fortemente non lineare come si vede dalla figura 4.5. In realtà questo non crea troppi problemi in quanto la conversione resistenza temperatura si può fare comodamente a terra.

Figura 4.5. Caratteristica dell'NTC, normalizzata al valore di resistenza a 25°C

Figura 4.6. *Circuito per la misura della temperatura*

4.3.4 Alimentatori switching

Per le tensioni a 3,3V di ProcB e Payload si è utilizzato un convertitore switching step-down LTC1707 mentre per i 12V necessari alla scheda Payload è stato utilizzato uno step-up LT1572 entrambi della Linear Technology. Per ridurre i tempi di sviluppo si è scelto di usare componenti commerciali, anche se in tecnologia C-MOS. Tutta la scheda è però protetta da circuiti anti latch-up che garantiscono un buon margine di sicurezza.

4.3.5 Circuito di protezione anti latch-up

Per quanto riguarda i circuiti di protezione una schema funzionale è il seguente:

La strategia utilizzata per rilevare il latch-up consiste nel tenere sotto controllo la corrente assorbita dagli alimentatori. Il segnale che segnala un evento di latch-up giunge alla scheda PowerSwitch. Tale segnale è sotto interrupt, quindi non appena viene rilevato un latch-up, viene tolta tensione al BUS di potenza per il tempo necessario, evitando così danneggiamenti dell'elettronica. Ripristinando successivamente la tensione di alimentazione il sistema torna a funzionare regolarmente.

Come si vede in figura 4.7 vi sono due resistenze di Sense una a monte dell'alimentatore per rilevare un latch-up dello stesso e una a valle per ciò che viene alimentato. Ai capi di tali resistenze viene presa la tensione tramite amplificatori differenziali in tecnologia BJT e il valore che ne risulta viene comparato con due valori di soglia.

4.3.6 Segnali di Test

Nelle specifiche si richiede anche di rendere disponibili le comunicazioni SPI che avvengono tra la ProcB e le altre schede. Per fare ciò si è utilizzata una semplice rete logica che ricevendo in ingresso i bit di selezione abilita dei buffer.

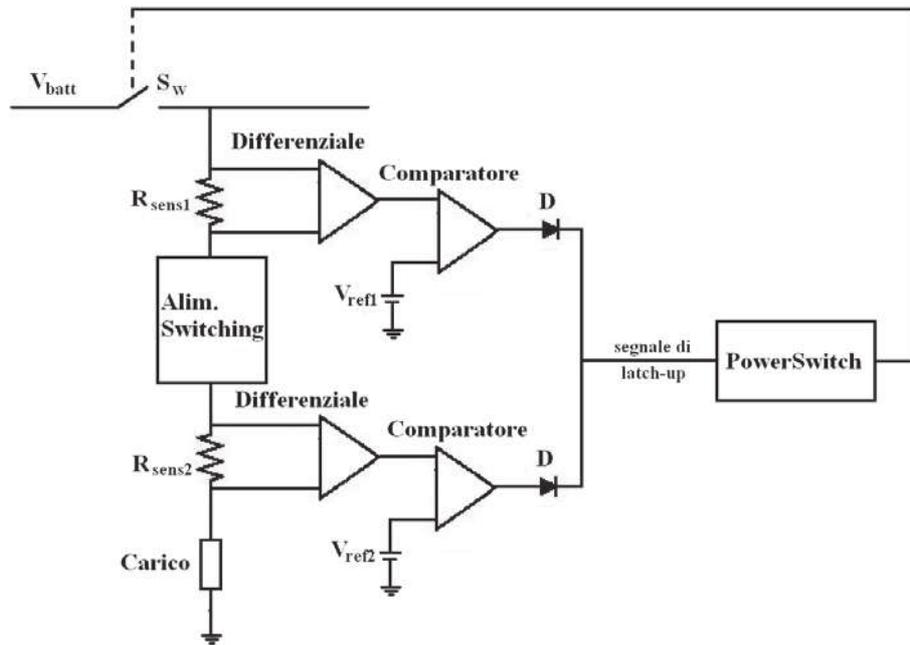


Figura 4.7. Circuito per la protezione dal latch-up

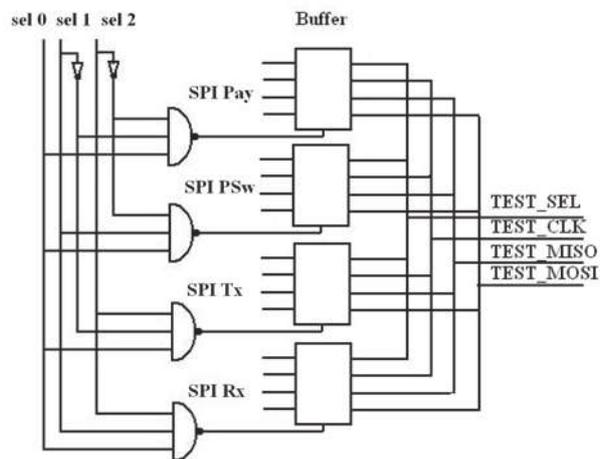


Figura 4.8. Selettore per il connettore di test

La seguente tabella mostra quali dispositivi sono collegati al connettore di Test in funzione dell'ingresso.

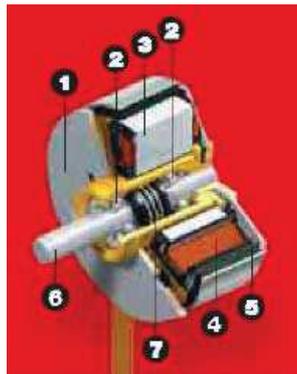
Selettore	SPI
0	HI-Z
1	Payload
2	HI-Z
3	PowerSwitch
4	HI-Z
5	Tx
6	HI-Z
7	RX

Tabella 4.2. *Indirizzo di test*

4.3.7 Il motore elettrico

Per poter scattare con successo fotografie dal satellite è necessario realizzare un dispositivo di stabilizzazione lungo l'asse di spin. L'unica soluzione possibile è costituita dall'utilizzo di un motore elettrico collegato ad una ruota di inerzia che tenda, per reazione, ad annullare tale rotazione. Tra i vari tipi di motore elettrico la scelta è ricaduta su uno di tipo BLDC (Brushless DC) che, non utilizzando le spazzole per la commutazione, ha il vantaggio di non presentare i problemi legati all'usura del sistema spazzole-collettore. Questo tipo di motore presenta però lo svantaggio di richiedere un controllore abbastanza complesso.

Non essendoci richieste particolari riguardo al profilo di velocità o coppia, il motore viene controllato ad anello aperto ed attivato in base ai telecomandi ricevuti da terra.

Figura 4.9. *Sezione del motore elettrico*

dove:

1. Flangia,
2. Cuscinetti a sfera,
3. Pacchetto laminato dello statore,
4. Avvolgimento,
5. Magnete permanente,
6. Albero,
7. Molle di pre-carico.

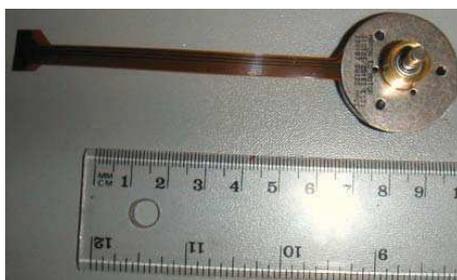


Figura 4.10. *Il motore Maxon EC32 flat*

Il rilevamento della posizione del rotore avviene mediante tre sensori Hall integrati nel motore e posizionati radialmente a 120° .

La massima temperatura del rotore non deve mai superare i 125°C perchè potrebbe portare alla smagnetizzazione dei magneti del rotore. Il motore, secondo le analisi termiche, dovrebbe lavorare in un range di temperatura di circa $0 - 45^\circ\text{C}$, abbondantemente entro i suoi limiti operativi.

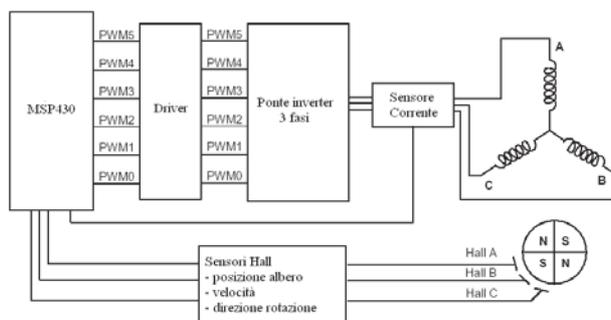
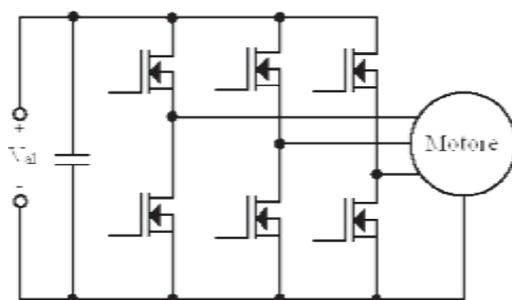
Si riportano nella tabella seguente le principali caratteristiche del motore:

Per far ruotare il motore è necessario un apposito controllore, schematizzato in figura 4.11.

Essendo presente un processore sulla scheda si è scelto di implementare in software tale controllore per ridurre l'ingombro sulla scheda. L'MSP430 genera 6 uscite in PWM che vanno a pilotare i sei MOSFETs; questi sono collegati in una configurazione detta "ponte ad H a tre fasi", come rappresentato in figura 4.12

I tre output dei sensori sono letti dal processore che tramite una look-up table seleziona quali transistor del ponte accendere. Per rendere più semplice la gestione

Dati del motore	Valore
Potenza assegnata	6 W
Tensione nominale	9 Volt
Velocità a vuoto	8600 rpm
Coppia di stallo	20 mNm
Corrente a vuoto	110 mA
Corrente continua massima a 5000 rpm	1.03 A
Momento d'inerzia del rotore	13.9 gcm^2
Temperatura ambiente	-40 ÷ +100 °C
Peso del motore	32 g
Temperatura massima dell'avvolgimento	125 °C

Tabella 4.3. *Caratteristiche principali del motore*Figura 4.11. *Schema a blocchi del controllo*Figura 4.12. *Il ponte ad H*

del controllore si è scelto di lavorare tramite interrupt. Per una descrizione più approfondita dell'algoritmo di controllo vedere la sezione 4.4.7.

Per il pilotaggio dei mos hi-side si è scelto di utilizzare la soluzione riportata in figura 4.13, mentre i Gate dei MOS lo-side sono stati collegati direttamente ai pin del processore.

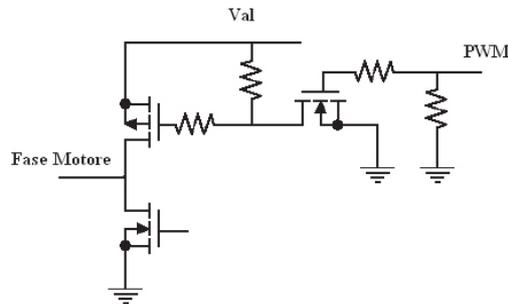


Figura 4.13. *Soluzione di pilotaggio HI-Side*

Per la misura di corrente si utilizza una resistenza di sense da ($180m\Omega$) e la tensione ai suoi capi viene amplificata di un fattore 10. Tale valore viene poi comparato con un riferimento tarato appunto a 360 mA (corrente massima 200 mA) e l'uscita del comparatore viene inviata ad un ingresso del processore con l'interrupt abilitato. Non appena si supera la soglia la routine di interrupt interviene togliendo alimentazione. Per maggior sicurezza in caso di guasti è stato inserito un fusibile che permette un passaggio al massimo di 500mA.

4.4 Software

Il software di un processore di bordo di un satellite è abbastanza complesso e per poterlo realizzare in tempi brevi è necessario organizzarlo per livelli:

1. un layer di basso livello responsabile della comunicazione con i dispositivi hardware,
2. un layer di alto livello che utilizzi le funzioni sopra citate per eseguire i compiti richiesti.

Le funzioni di basso livello realizzate sono responsabili di:

- Attivazione, disattivazione dei clock nei diversi moduli

- Uso dei timer
- Scrittura, lettura e cancellazione della memoria flash
- Conversione di un canale A/D
- Comunicazione SPI: scrittura e lettura dati
- Utilizzo degli I/O
- Utilizzo degli interrupt
- Utilizzo del PWM

A questo punto è possibile passare alla realizzazione del software vero e proprio, senza più concentrarsi su dettagli di tipo hardware. Nella figura 4.14 è riportato il diagramma di flusso del software realizzato.

La scheda ProcB viene infatti accesa ogni minuto dalla scheda PowerSwitch e ha a disposizione 55 secondi per completare tutte le operazioni. Allo scadere del tempo massimo la scheda viene comunque spenta per assicurare che anche in caso di problemi la scheda venga correttamente resettata e possa riprendere a funzionare correttamente il prossimo ciclo.

4.4.1 Inizializzazione

È necessario, prima di utilizzare il microcontrollore, impostare alcuni suoi registri interni per poter poi utilizzare tutti i dispositivi hardware integrati. In figura 4.15 sono riportate nell'ordine le operazioni da compiere durante la fase di inizializzazione.

4.4.2 Acquisizione data e ora

La scheda PowerSwitch, a differenza di ProcB, è sempre accesa e per questa ragione su di essa è ospitato un RTC (Real Time Clock). All'avvio ProcB non conosce l'ora corrente e quindi si deve servire di tale orologio per ottenere l'informazione. La comunicazione avviene tramite l'interfaccia SPI ed è gestita in hardware dal microcontrollore: il software si deve solamente occupare di copiare i dati presenti nel registro di ricezione nella posizione opportuna della RAM. In più la scheda PowerSwitch fornisce anche, oltre alla data, le seguenti misure già convertite in digitale:

1. gli 8 contatori di latch-up dei regolatori switching del satellite,
2. la temperatura della scheda PowerSwitch,

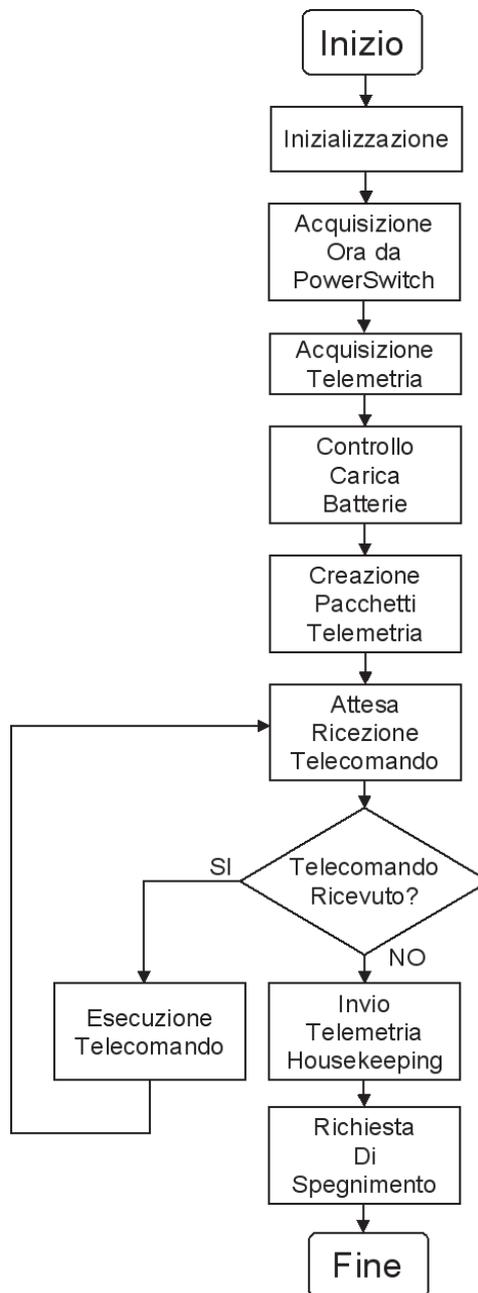


Figura 4.14. *Diagramma di flusso del software*

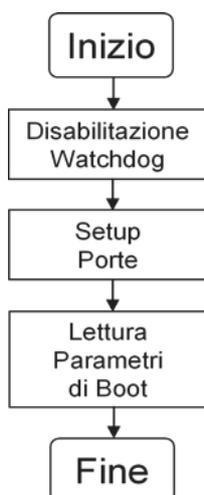


Figura 4.15. *Diagramma di flusso della fase di Inizializzazione*

3. le tensioni delle 6 batterie,
4. lo stato degli interruttori di PowerSwitch.

4.4.3 Acquisizione Telemetria

In questa fase il processore si occupa dell'acquisizione dei 52 segnali analogici componenti il pacchetto di telemetria.

Dalla scheda PowerSupply vengono acquisite le seguenti misure:

1. le 5 correnti medie dei pannelli solari,
2. le 5 tensioni medie dei pannelli solari,
3. le 5 temperature dei pannelli solari,
4. le 6 correnti uscenti delle batterie,
5. le 6 tensioni delle batterie,
6. le 6 temperature delle batterie,
7. la temperatura della scheda PowerSupply.

Dalla scheda PowerSwitch vengono acquisite le seguenti misure:

1. la corrente media del trasmettitore a 2.4 GHz,

2. la tensione del trasmettitore a 2.4 GHz,
3. la tensione di alimentazione dei sensori di PowerSupply,
4. la tensione di alimentazione degli anti latch-up di ProcB,
5. la tensione sul bus di alimentazione A,
6. la tensione sul bus di alimentazione B.

Dalla scheda ProcB vengono acquisite le seguenti misure:

1. la temperatura dell'amplificatore di potenza a 2.4 GHz,
2. la temperatura della scheda Payload,
3. la corrente assorbita dall'alimentazione a 3.3 V della scheda Payload,
4. la corrente assorbita dall'alimentazione a 12 V della scheda Payload,
5. la corrente assorbita dalla scheda ProcB,
6. la tensione di alimentazione della scheda ProcB,
7. la corrente assorbita dal motore elettrico.

Il convertitore interno all'MSP430 ha una risoluzione di 12 bit e la misura viene effettuata mediando 64 campioni acquisiti in sequenza. Il risultato della media viene poi troncato per ottenere un numero da 8 bit che viene inserito nel vettore di telemetria.

4.4.4 Controllo Carica Batterie

La strategia di carica delle batterie è gestita da questa scheda, in quanto per problemi si è dovuto escludere la scheda ProcA da questo compito. La strategia prevede la carica di una sola batteria per volta che viene scelta a rotazione tra tutte e sei le batterie. Alla prima accensione della scheda il processore inizia a caricare la batteria B4: tale batteria alimenta proprio questa scheda e questa scelta è motivata dalla necessità di garantire a ProcB l'alimentazione per poi poter caricare anche le altre batterie. Nel caso la batteria 4 fosse ritenuta carica, il processore proseguirebbe controllando lo stato di carica delle altre batterie in questo ordine:

B1->B5->B2->B6->B3->B4->B1->...

In questa maniera si cerca di garantire una pari carica alle batterie dei due processori. I criteri per giudicare una batteria carica sono 3:

1. la tensione della batteria supera una soglia (differente per ogni tipo di batteria),
2. la temperatura della batteria supera una soglia (differente per ogni tipo di batteria),
3. la carica è in corso da più di 12 ore.

Nel caso si verifichi una delle precedenti condizioni il processore procede a selezionare la batteria successiva. Per fare ciò viene inviata una sequenza di impulsi al segnale di CLK del contatore di selezione delle batterie finchè non si riconosca la batteria desiderata sull'uscita di tale contatore. Questa tecnica permette infatti di gestire il contatore di selezione anche da parte di ProcA.

Batteria	Tensione massima	Temperatura massima
B1, B2, B4,B5	8.8 V	55 ° C
B3, B6	8.4 V	55 ° C

Tabella 4.4. *Soglie per la carica delle batterie*

4.4.5 Creazione dei pacchetti di telemetria

Subito dopo l'acquisizione dei sensori è necessario creare in memoria il pacchetto di telemetria di housekeeping e, se necessario, con esso vengono aggiornati i pacchetti di telemetria estesa. La telemetria estesa è creata calcolando i massimi, minimi, la media e la deviazione standard su al massimo 254 vettori di telemetria di housekeeping; quando il numero massimo di vettori è stato raggiunto la telemetria estesa non viene più calcolata ed è necessario il telecomando di Reset Telemetria Estesa per cancellare i dati vecchi e iniziare nuovamente il calcolo. La telemetria estesa è costituita da due pacchetti: il primo contenente i massimi ed i minimi ed il secondo contenente la media e la deviazione standard. Massimi e minimi sono molto facili da calcolare: ad ogni accensione si verifica se il valore corrente di un sensore sia superiore o inferiore ai valori salvati in memoria e di conseguenza essi vengono aggiornato. La media e la deviazione standard vengono calcolate sommando tutte le misure acquisite (per la media) ed il loro quadrato (per la deviazione standard) e solo al momento di inviare il pacchetto a terra questi valori vengono divisi per il numero di misure totali o nel caso della deviazione standard ne viene fatta la radice quadrata.

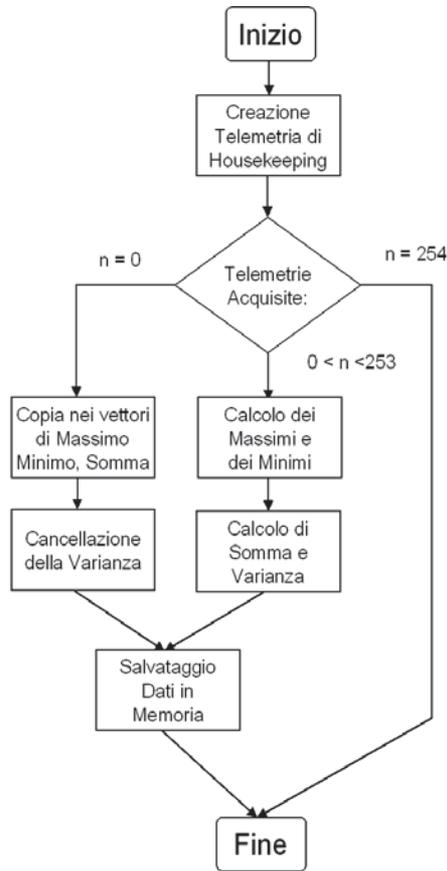


Figura 4.16. *Diagramma di flusso della fase di creazione dei pacchetti di telemetria*

4.4.6 Attesa ricezione telecomando

In questa fase il microcontrollore configura il transceiver RF (Chipcon CC2400) ed attende di ricevere un telecomando da terra per 5 secondi. La configurazione del transceiver viene effettuata ogni volta sia necessario utilizzarlo anche per ridurre il rischio di errori causato da un SEU: lasciando infatti il dispositivo configurato per molto tempo un eventuale SEU sul dispositivo potrebbe cambiare il valore di un bit, portando ad esempio ad un cambio di modulazione o di frequenza di trasmissione. Dopo la configurazione il transceiver si pone in attesa di ricevere la sync word da terra ed a quel punto inizia a salvare i byte ricevuti della FIFO interna; il microcontrollore si occupa solamente, qualora la sync word sia stata ricevuta, di trasferire i 10 byte nel telecomando in memoria.

4.4.7 Esecuzione telecomando

Nel caso in cui siano stati effettivamente ricevuti 10 byte via radio il microcontrollore si deve occupare di decodificare i dati per verificare che sia stato ricevuto un telecomando corretto ed in questo caso passare all'effettiva esecuzione. La prima cosa da verificare è la correttezza della unique word (per ulteriori informazioni si rimanda a [8]). A questo punto si effettua un controllo di parità sul campo di telecomando e solo a questo punto si va ad interpretare il telecomando, per verificare che sia effettivamente valido. Nel caso in cui sia corretto il telecomando viene eseguito, altrimenti viene inviato un pacchetto di telemetria di housekeeping con copia del telecomando ricevuto, per segnalare che non si è riusciti ad interpretare correttamente il telecomando.

Si riporta di seguito un elenco dei telecomandi implementati:

1. SendTMH: invio della telemetria di housekeeping TMH;
2. SendTMHE: invio della telemetria estesa TMHE;
3. ResetTMHE: reset del vettore di telemetria estesa TMHE;
4. Trigger(a,t): scatta la foto a(1,5) da telecamera t(1,3);
5. SendPhoto(a): invio a terra della foto a(1,5), ricevuta dalla scheda Payload;
6. ResendBlock(a,b): invio a terra del blocco b(1,9) della foto a(1,5);
7. Rotate(x): avviamento del motore connesso alla ruota di inerzia; il motore compie x giri;

Dopo aver eseguito un telecomando il sistema si mette nuovamente in attesa di ricevere un nuovo telecomando per rendere più veloci le operazioni di trasferimento delle fotografie. Si procederà ora a descrivere la fase di esecuzione per ognuno dei telecomandi.

SendTMH

Invio della telemetria di housekeeping. La prima operazione da eseguire consiste nel configurare il transceiver in trasmissione per poi inviare in seriale il pacchetto di telemetria.

SendTMHE

Invio della telemetria estesa. Prima di inviare i due pacchetti è necessario calcolare la media, dividendo la somma salvata in memoria per il numero delle telemetrie acquisite, e calcolare la deviazione standard estraendo la radice della varianza salvata in memoria. La telemetria estesa non viene cancellata dopo l'invio.

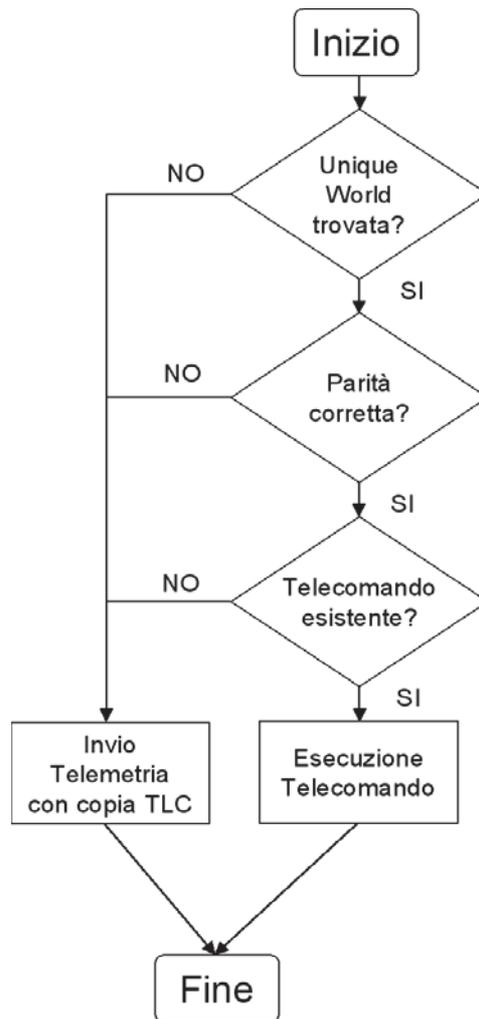


Figura 4.17. *Diagramma di flusso della fase di esecuzione telecomando*

ResetTMHE

Cancellazione dei vettori di telemetria estesa. Viene anche azzerato il contatore delle telemetrie salvate in modo che il calcolo della telemetria estesa inizi nuovamente.

Trigger

Il comando di trigger è utilizzato per scattare una fotografia utilizzando le telecamere di bordo e la scheda Payload. Questo telecomando prevede anche due parametri che

indicano quale delle tre telecamere usare e in quale delle cinque aree di memoria salvare la fotografia. L'esecuzione di questo comando si può ulteriormente dividere in alcune fasi, schematizzate in figura 4.18. Prima di tutto la scheda ProcB invia una prima conferma a terra del comando ricevuto (pacchetto di telemetria di house-keeping con copia del telecomando di scatto foto), quindi seleziona da quale area di memoria la scheda Payload deve eseguire il boot ed alimenta la scheda. A questo punto si invia il comando di scatto foto (con l'indicazione della telecamera e della posizione di memoria in cui salvare). La scheda Payload segnala che il comando è stato riconosciuto ed inizia l'acquisizione; ad acquisizione ultimata Payload invia una seconda conferma a ProcB, che quindi invia un secondo pacchetto di telemetria a terra. In questo modo da terra si è in grado di seguire passo passo le operazioni ed identificare eventuali errori.

SendPhoto

Con questo comando si richiede la trasmissione di una fotografia completa: siccome la scheda Payload è in grado di trasferire solamente un blocco di una foto, il micro-controllore esegue in sequenza la richiesta di tutti e 9 i blocchi costituenti una foto. Anche in questo caso si può scomporre questa fase in varie sottofasi, che verranno ora analizzate. Prima di tutto la scheda ProcB invia una prima conferma a terra del comando ricevuto e quindi imposta l'area di memoria per il boot e successivamente accende la scheda Payload. A questo punto si invia il comando alla scheda Payload che inizia ad inviare i segmenti della fotografia (128 byte alla volta che vengono inviati a terra alla conclusione di ogni segmento). Quando un blocco è completo la scheda Payload deve essere spenta e, se vi sono altri blocchi da inviare, il ciclo ricomincia dall'inizio. Nel caso in cui vi sia un problema nel trasferimento di un blocco dalla scheda Payload alla scheda ProcB la trasmissione si interrompe e viene inviato a terra un pacchetto di telemetria di housekeeping con copia del telecomando per segnalare un errore.

ResendBlock

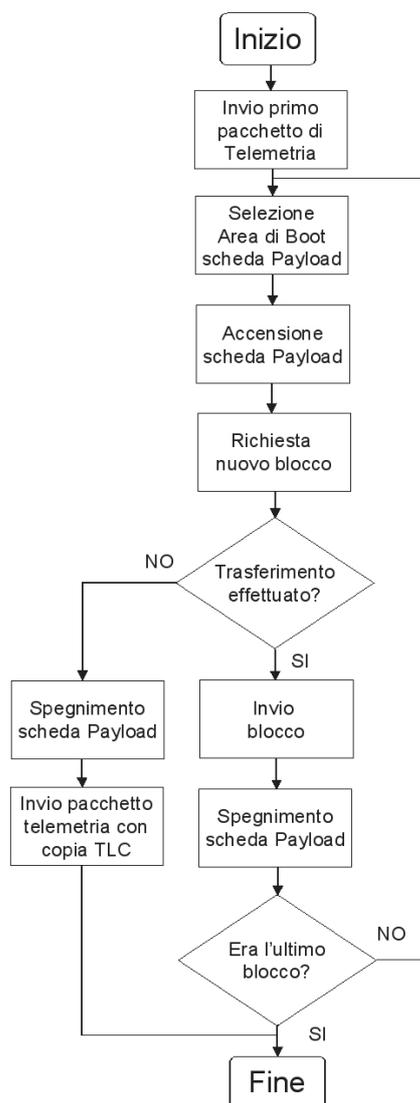
Questo telecomando è molto simile al precedente ed è utilizzato per inviare solamente un blocco di una fotografia. L'unica differenza tra i due è la mancanza di un ciclo che scandisce tutti i blocchi di una foto; si rimanda perciò al comando precedente per una spiegazione dettagliata del funzionamento o alla figura 4.20.

Rotate

Questo telecomando aziona il motore collegato alla ruota di inerzia, utilizzato per fornire una stabilizzazione attiva sull'asse di spin del satellite. Da terra è possibile

Figura 4.18. *Diagramma di flusso della fase di scatto fotografia*

avviare il motore, facendogli compiere un numero prefissato di giri nel verso desiderato. Per far ruotare il motore si utilizza una routine di interrupt. Per prima cosa è necessario disabilitare gli interrupt, per evitare che se ne scateni uno in un momento non voluto, inizializzare il timer della PWM ed il convertitore A/D. A questo punto si può alimentare la logica del motore ed eseguire una prima lettura dei sensori di Hall. Una volta nota la posizione del rotore si alimentano le fasi corrette e il motore inizia la rotazione; è necessario anche abilitare gli interrupt prima di mandare il microcontrollore in low power mode. La rotazione del primo settore fa variare l'uscita

Figura 4.19. *Diagramma di flusso della fase di invio fotografia*

dei sensori di Hall che scatenano un interrupt. Si deve ora disabilitare l'interrupt e verificare subito che non ci sia stato un malfunzionamento; se si è già raggiunto il numero di giri da fare basta spegnere la logica di controllo del motore e l'esecuzione del programma può riprendere. Nel caso in cui si debbano ancora compiere dei giri, vengono nuovamente letti i sensori di Hall, si impostano gli interrupt e si alimentano le fasi opportune per far compiere al motore un nuovo settore di rotazione. Tutte le

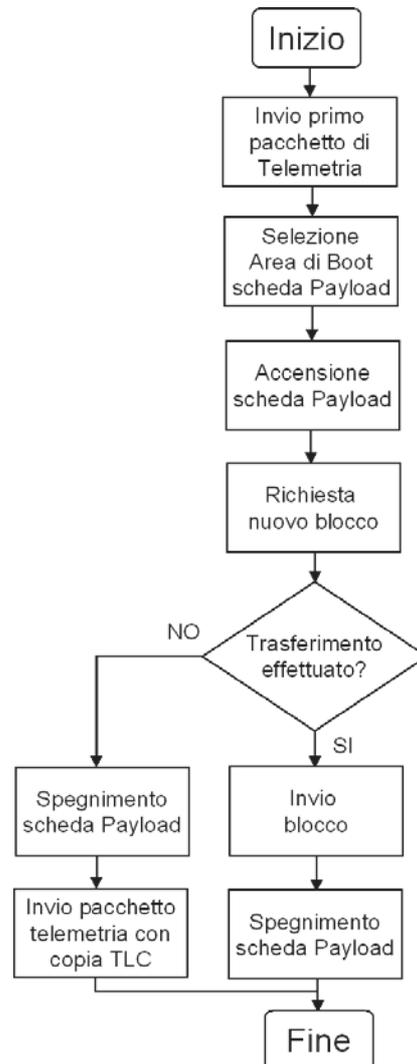


Figura 4.20. *Diagramma di flusso della fase di invio di un blocco*

fasi del controllo del motore sono schematizzate nella figura successiva.

4.4.8 Invio della Telemetria di Housekeeping

Nel caso in cui non sia stato ricevuto alcun telecomando il processore provvede ad inviare comunque un pacchetto di telemetria di housekeeping che viene utilizzato come beacon per identificare il satellite. Nel momento in cui si riceve tale pacchetto

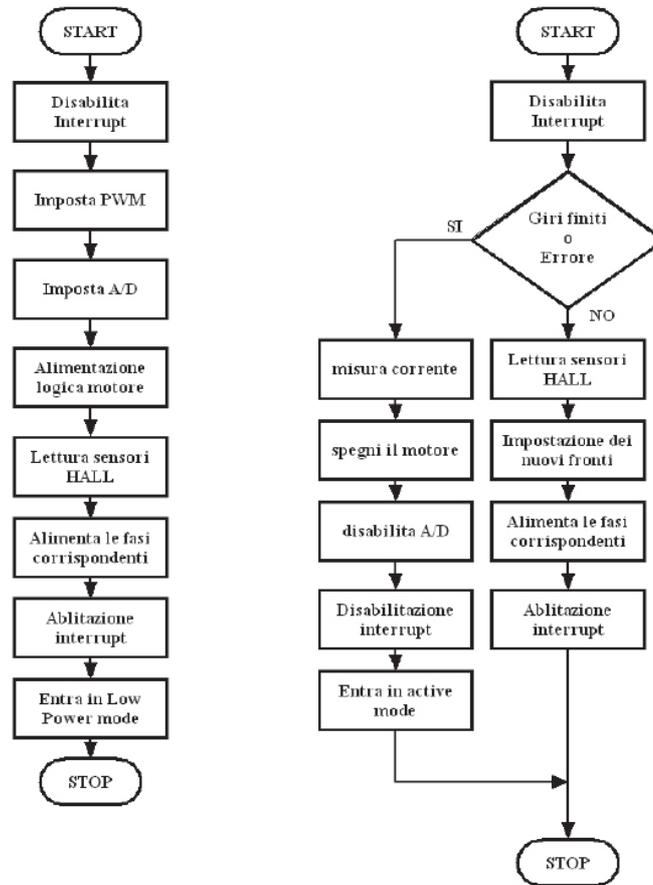


Figura 4.21. *Diagramma di flusso della fase di controllo del motore*

si ha la certezza che il satellite sia in visibilità e, dopo aver atteso 55 secondi, si può inviare un comando per iniziare la trasmissione.

4.4.9 Richiesta di spegnimento

Dopo aver ultimato tutte le operazioni, ProcB può far richiesta di spegnimento alla scheda PowerSwitch per ridurre il consumo di corrente. Il processore verrebbe comunque spento dopo 55 secondi ma, nella maggior parte dei casi, trascorsi 5 secondi il processore ha completato tutte le operazioni necessarie.

La richiesta di spegnimento consiste nel far compiere una transizione in discesa ad un segnale apposito. Per sicurezza questo segnale viene fatto oscillare tra il

livello logico alto e quello basso per essere sicuri che la scheda PowerSwitch veda effettivamente una transizione. Nel caso in cui il processore non venisse spento è stata poi aggiunta una routine che, trascorsi 60 secondi dall'accensione, provvede a fornire un reset al processore per ricominciare le operazioni.

4.5 Collaudo

Una volta realizzato il software ed eseguito un breve test delle funzioni si è proceduto ad un collaudo molto approfondito del sistema. Tale collaudo verrà descritto nel capitolo dedicato alla stazione di terra in quanto tutte le operazioni sono state effettuate via radio per verificare che il software della scheda e quello della stazione di terra comunicassero senza problemi.

Capitolo 5

Stazione di Terra

5.1 Architettura della stazione di terra

Un problema estremamente importante legato al progetto di un satellite riguarda la progettazione e l'uso di una adeguata stazione di terra. Tale aspetto del progetto PiCPot è tanto importante quanto lo sviluppo del satellite stesso infatti, dopo il lancio, il successo dell'intera missione sarà determinato dalla possibilità di ricevere e inviare dati a PicPot. Un progetto accurato ed affidabile della stazione di terra è quindi indispensabile per raggiungere tale obiettivo.

Un altro punto non meno importante riguarda la capacità della stazione di terra di puntare le antenne in direzione di PiCPoT, poiché esso sarà in visibilità solo per pochi minuti al giorno.

Lo schema a blocchi della stazione di terra è rappresentato in figura 5.1. L'architettura proposta può essere suddivisa in cinque parti principali:

- antenne;
- controllo dei rotori;
- gestione della stazione di terra;
- canale TX/RX a 437 MHz;
- canale TX/RX a 2400 MHz.

5.1.1 Antenne

Le antenne hanno il compito di trasmettere i dati provenienti dai canali a 437.485 MHz e a 2440 MHz e di ricevere i dati provenienti dal satellite, movimentate da due rotori.

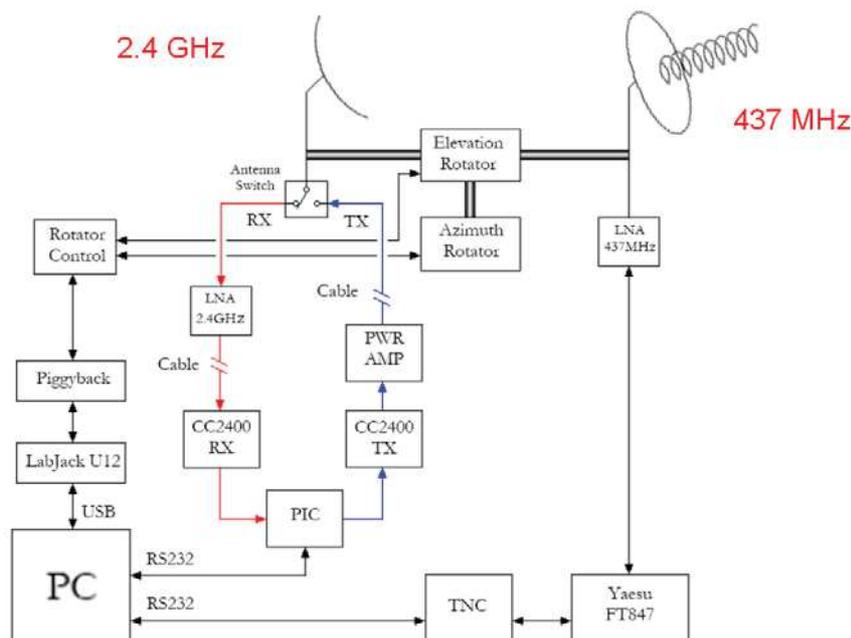


Figura 5.1. Schema a blocchi della stazione di terra

Per le trasmissioni a 437.485 MHz è stata scelta un'antenna ad elica con riflettore; la forza del vento contro il riflettore costituisce un punto critico ed esso è stato pertanto realizzato con una rete a maglie quadrate.

L'antenna ad elica è costituita da un cavo di rame di diametro 3.15 mm; l'elica ha un diametro di 25 cm ed un passo di 15 cm.

L'ingombro dell'elica è di 1 m in altezza ed il riflettore ha un diametro di 1 m. Il guadagno massimo offerto dall'antenna ad elica è di circa 14 dB.

Per le trasmissioni a 2444 MHz si è utilizzata un'antenna a paraboloide con diametro pari ad 80 cm e distanza focale di 25 cm. L'illuminatore usato è una antenna ad elica "Andrew" con polarizzazione circolare destrorsa e guadagno pari a 13 dB che permette di ottenere un guadagno complessivo dell'antenna di circa 23 dB.

5.1.2 Controllo dei rotori

Le antenne sono fissate su una struttura meccanica composta da due rotori, uno per la rotazione azimutale e l'altro per l'elevazione, per essere sempre orientate nell'esatta direzione del satellite.

Il rotore scelto è il modello Yaesu G-5500 che consente di raggiungere 450° di

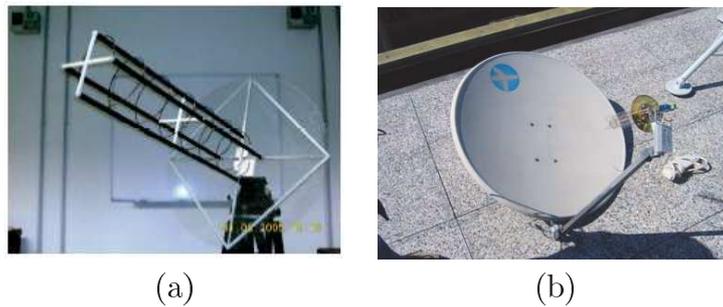


Figura 5.2. Le antenne ad elica (a) e a paraboloida (b)

rotazione azimutale e 180° in elevazione. L'orientamento delle antenne è controllato da un PC che segue l'orbita del satellite

Tale controllore permette di modificare l'orientamento delle antenne tramite 4 pulsanti e fornisce in uscita un segnale che permette di verificare l'effettivo orientamento delle antenne. Per permettere l'effettiva connessione con un PC si è utilizzato il LabJack U12, un dispositivo con interfaccia USB ed ingressi ed uscite analogiche e digitali, per leggere il segnale di posizione delle antenne ed agire sui comandi per muoverle.



Figura 5.3. Rotori, Controller e LabJack U12

5.1.3 Gestione della stazione di terra

La gestione della stazione di terra è affidata ad un PC, dotato di tre software per le diverse funzioni.

Il primo ha il compito di comandare i rotori quando il satellite si trova all'interno della finestra di visibilità. Il software che svolge questa funzione è Nova

for Windows©. Oltre a questo, esso provvede anche a variare la frequenza del trasmettitore a 437 MHz per compensare l'effetto Doppler.

Gli ultimi due sono utilizzati per gestire comunicazioni a 437 MHz e 2440 MHz.

5.2 Il canale Tx/Rx a 437 MHz

Il canale a 437.485MHz è costituito da una catena di dispositivi che permettono la trasmissione dei telecomandi e la ricezione delle telemetrie.

Poiché il progetto PiCPoT è stato concepito per lavorare su bande amatoriali al fine di rendere possibile la ricezione dei dati da parte di tutti i radioamatori, si è pensato di sfruttare un protocollo già esistente ed in particolare il più diffuso, l'AX.25 (Amateur X.25).

Questo canale è costituito dai seguenti dispositivi:

- un **TNC PK-96/100** prodotto dalla Timewave;
- una **radio FT-847** prodotta dalla Yaesu;
- un **LNA SP-7000** prodotto dalla UKW-Berichte.

I dati da trasmettere vengono inviati, tramite cavo seriale RS-232, dal PC al TNC che ha il compito di gestire il protocollo AX.25, calcolarne il CRC e modulare il segnale in AFSK (Audio Frequency Shift Keying) con bitrate pari a 9600 bps. L'uscita viene fornita alla radio Yaesu che ha il compito di trasmetterla, con una potenza massima di 50 W.



Figura 5.4. *Il TNC (a) e la radio Yaesu (b)*

In ricezione il segnale viene inviato all'LNA (amplificazione 20 dB) e quindi demodulato dalla radio ed inviato al TNC. Quest'ultimo converte il segnale in una sequenza di bit, quindi effettua un controllo sul CRC ed in caso di assenza di errori invia il flusso dati al PC.

5.3 Il canale Tx/Rx a 2440 MHz

Il canale a 2440MHz è stato realizzato per garantire la trasmissione e la ricezione di dati anche quando l'altro canale dovesse presentare dei problemi.

La prima differenza che può essere riscontrata rispetto al canale precedentemente descritto è rappresentata dalla presenza di due catene completamente distinte per la trasmissione e la ricezione.

I componenti che costituiscono il ramo di trasmissione sono:

- un **transceiver CC2400** prodotto dalla CHIPCON;
- un **amplificatore di potenza KU 2325A** prodotto dalla Kuhne.

I componenti costituenti il ramo di ricezione sono:

- un **LNA 2227A** prodotto dalla Kuhne;
- un secondo **transceiver CC2400** della CHIPCON.

Per collegare i due transceiver al PC è necessario utilizzare un microcontrollore che si occupi della loro configurazione e della conversione dal protocollo SPI, utilizzato dai transceiver, al protocollo RS-232 utilizzato per comunicare con il computer. In più è anche necessario controllare il commutatore d'antenna ed alimentare sia il Power Amplifier che l'LNA. Il microcontrollore che è stato utilizzato è un PIC18F452 della Microchip.

In fase di trasmissione il microcontrollore riceve i dati provenienti dal PC e li invia al transceiver attraverso un'interfaccia SPI. Il CC2400 si occupa di modulare in GFSK a 10 kbps. A questo punto il microcontrollore seleziona il ramo di trasmissione tramite il commutatore d'antenna ed abilita l'amplificatore di potenza (potenza di uscita massima 20 W).



Figura 5.5. *Chipcon CC2400*

In fase di ricezione, il segnale ricevuto dal blocco antenne viene filtrato ed amplificato dall'LNA e poi inviato all'ingresso del CC2400. Il transceiver ha quindi il

compito di demodulare il segnale e fornire i dati al microcontrollore che li dovrà inviare al PC. La banda del ricevitore è di 500 kHz, valore che permette di trascurare la deviazione di frequenza del trasmettitore del satellite dovuta all'effetto Doppler che risulta essere pari a ± 50 kHz. Tutto ciò costituisce una grande semplificazione in quanto sull'altro canale, a causa della banda molto stretta del ricevitore, è necessario compensare esternamente questo spostamento in frequenza.



Figura 5.6. Power Amplifier KU 2325 A

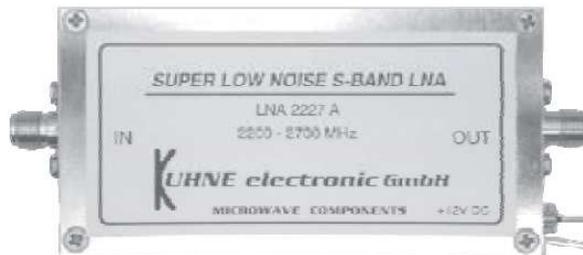


Figura 5.7. LNA 2227 A

5.4 Stazione di terra portatile

Oltre alla vera e propria stazione di terra era anche disponibile una stazione portatile che è stata utilizzata per i collaudi di PiCPoT durante l'integrazione sul lanciatore, effettuati a Baikonur (KAZ) nel luglio 2006. Tale stazione di terra è costituita principalmente da una scheda TxRx di PiCPoT modificata per permettere la comunicazione con un PC. Per semplicità non si è impiegato alcun LNA o Power Amplifier, considerato che la distanza tra la stazione e il satellite sarà al massimo di qualche

metro, e si è scelto anche di utilizzare un unico Chipcon CC2400. Per semplificare il sistema non è stato utilizzato alcun microcontrollore per gestire il canale a 2.44 GHz così tutte le operazioni sono gestite tramite la porta parallela di un computer. È stato necessario quindi realizzare un software in grado di emulare il protocollo SPI per comunicare direttamente con il transceiver e ricevere / trasmettere i dati. Questa parte è stata alquanto complessa in quanto Windows non permette una facile gestione di applicazioni real-time.



Figura 5.8. *Diagramma di flusso della trasmissione*

5.5 Software

Il software realizzato è necessario alla gestione della stazione di terra portatile anche se con poche modifiche si potrebbe adattarlo per l'utilizzo della stazione di terra presente sul tetto del Politecnico. Il principale problema affrontato è stato la gestione in real-time della comunicazione via SPI con il CC2400 tramite la porta parallela. L'uso della porta parallela è stato una scelta obbligata nel momento in cui si è scelto di non utilizzare un microcontrollore, come avviene nella stazione di terra fissa. Come prima cosa sono quindi state realizzate tutta una serie di funzioni di base utili a comunicare con il transceiver e riportate nel seguente elenco:

1. FASTSPI_SETREG(reg,value) utilizzata per impostare il valore di un registro interno del CC2400,
2. FASTSPI_STROBE(command) utilizzata per inviare un comando al transceiver,

3. FASTSPI_GETREG(reg) utilizzata per leggere il valore di un registro interno,
4. ReadFIFObyte() utilizzata per leggere un byte dalla FIFO interna e
5. WriteFIFO(val) utilizzata per scrivere un byte nella FIFO di trasmissione.

A questo punto è stato necessario creare l'interfaccia grafica del programma e per questo si è utilizzando il software di sviluppo CVI di National Instruments. Si tratta di un compilatore C con in aggiunta una serie di tool grafici per aiutare nella creazione di interfacce grafiche per Windows (in figura 5.11 si può vedere un'immagine dell'interfaccia grafica).

Le funzioni che è stato necessario implementare sono riportate qui di seguito:

1. Ricezione di un pacchetto di telemetria (housekeeping, estesa o Payload),
2. Trasmissione di un comando e
3. Generazione di una portante a 2.44GHz per il test del trasmettitore.

5.5.1 Ricezione

Questa è la funzione principale della stazione di terra ed è anche la più complessa da realizzare in quanto richiede un elevato tempo di CPU, dovendo gestire la trasmissione SPI completamente in polling. Sarebbe stato possibile gestire la comunicazione SPI anche con interrupt ma sarebbe stato necessario realizzare un timer esterno, utilizzato come fonte di interrupt, e realizzare un driver di periferica sotto Windows per la gestione di tale interrupt. Quando viene premuto il pulsante "RX" (quando la ricezione è in corso il nome del bottone è "Stop RX", come in figura 5.11) il computer provvede ad inizializzare il CC2400 e a creare un timer software con periodo di 1 ms (molto approssimativo sotto Windows) allo scadere del quale si verifica se sia stata o meno ricevuta la sync word. Quando questa venga ricevuta si lasciano trascorrere 16 ms (si lascia scattare 16 volte il timer sopra citato) e quindi si inizia a leggere un byte alla volta dal buffer del CC2400 con la funzione ReadFIFObyte(). Questa attesa è necessaria per assicurarsi che la FIFO interna del transceiver sia piena circa per metà, per evitare che una piccola differenza tra la frequenza di cifra del CC2400 e del computer causi lo svuotamento il riempimento completo del buffer e quindi la fine della ricezione. A questo punto i dati letti vengono salvati in un buffer in memoria e l'acquisizione continua fino alla fine del pacchetto, quando il computer riporta in ricezione il transceiver. Il rilevamento della fine del pacchetto è una cosa non semplice nel nostro caso in quanto i vari tipi di telemetria hanno dimensioni differenti: è quindi necessario decodificare il pacchetto quando esso è ancora in ricezione per poterne identificare il tipo e quindi arrestarsi alla sua fine.

Una volta completata la ricezione del pacchetto si può visualizzare sullo schermo ciò che si è ricevuto: la visualizzazione si fa solo alla fine in quanto richiede molte risorse e se fatta durante la ricezione causerebbe una perdita di dati. Solo nel caso in cui si riceva un pacchetto di telemetria di Payload il salvataggio delle immagini avviene solo alla fine del trasferimento di un blocco con l'unica eccezione del led "Ricezione immagini" che viene illuminato subito per indicare che il trasferimento è in corso e non comporta un utilizzo eccessivo di risorse tale da danneggiare il trasferimento.

In caso di ricezione di un pacchetto di telemetria di housekeeping o estesa il pacchetto viene interpretato ed i valori della telemetria vengono scritti nel box di testo "Dati ricevuti". I blocchi delle immagini ricevute vengono salvate su file solo alla fine della ricezione ed è poi necessario un programma che assembli i 9 blocchi in un'immagine unica.

Ogni volta che viene ricevuto un pacchetto (tranne come si è già detto per le telemetrie di Payload) si aggiorna il contatore dei pacchetti ricevuti; nel caso in cui vi sia il prologo, la parità e l'FCS corretti si aggiornano i rispettivi contatori e led. Alla ricezione di ogni pacchetto si segnala anche l'ora dell'arrivo per facilitare le operazioni di trasmissione col satellite. Il calcolo della statistica sui pacchetti è stato implementato per verificare (in fase di test) che la trasmissione col satellite non presenti dei problemi dopo lungo tempo.

5.5.2 Trasmissione

Quando viene premuto il pulsante TX la ricezione dei pacchetti viene bloccata (se in corso) e si trasmette un telecomando: il codice del telecomando viene letto dal box di testo "Telecomando" e viene inviato il numero di volte stabilito dal box di testo "Tentativi". La trasmissione risulta molto più semplice rispetto alla ricezione anche perchè il numero di byte da trasmettere è pari a 10 e così non ci si deve preoccupare del buffer del CC2400. Dopo aver configurato il transceiver in trasmissione basta inviare i dieci byte seguiti dal comando di trasmissione ed attendere la fine dell'operazione. A questo punto se la stazione di terra si trovava in ricezione prima della pressione del tasto il software la riporta automaticamente, altrimenti viene portata dello stato di Idle.

5.5.3 Portante

Questo comando è stato implementato esclusivamente per testare il trasmettitore: alla pressione del tasto verrà generata una portante a 2.44GHz e solo con una ulteriore pressione del pulsante il dispositivo ritorna nello stato precedente alla pressione (Ricezione o Idle).

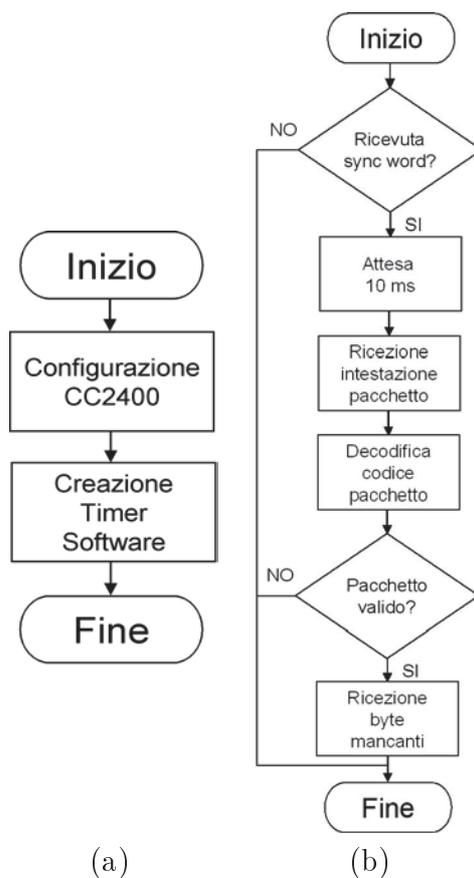


Figura 5.9. Diagramma di flusso della ricezione (a) e dell'interrupt del timer (b)

5.6 Collaudo

Una volta realizzato il software è stato necessario testare tutte le sue funzioni ottenendo così di testare anche le funzioni del satellite. La maggior parte dei collaudi sono stati effettuati con il satellite e la stazione di terra portatile vicini ma, nel periodo prima del lancio, sono stati effettuati anche collaudi da distanze più elevate utilizzando la stazione di terra fissa. Durante il primo collaudo il satellite è stato lasciato acceso per 3 giorni senza alcun intervento esterno (eventuali reset del sistema) solamente con il caricabatterie collegato. Si è verificato quanti pacchetti di telemetria fossero effettivamente stati inviati dal satellite e ricevuti dalla stazione di terra e per questo collaudo le funzioni di statistica implementate sono state utilissime. Nei 3 giorni trascorsi il satellite ha effettuato con precisione una trasmissione ogni minuto senza alcun problema ed ogni volta è stato possibile ricevere perfettamente il pacchetto trasmesso. Con questo test si è anche verificata la precisione del Real

Figura 5.10. *Diagramma di flusso della trasmissione*

Time Clock del satellite, andando a verificare che l'errore accumulato dall'orologio in 3 giorni fosse minore di 1 secondo (non è stata effettuata una misura più precisa in quanto questo dato non era di particolare interesse).

È stato poi effettuato un test per determinare la vita del satellite nel caso in cui vi fossero problemi ai circuiti di gestione dei pannelli e la carica delle batterie non avvenisse correttamente. Tale test ha dimostrato una vita del satellite compresa tra i 2 ed i 3 giorni, ritenuta sufficiente per stabilire una comunicazione con esso e poter verificarne le funzionalità.

Dopo aver verificato che il sistema continuasse effettivamente a funzionare per un lungo periodo si è poi passato a testare tutte le sue altre funzioni. Si è iniziato dal collaudo delle funzioni che calcolano le telemetrie, andando a verificare effettivamente che le telemetrie fossero rispondenti ai valori letti e che le telemetrie estese fossero calcolate ed inviate correttamente. È stato anche verificato se il numero di

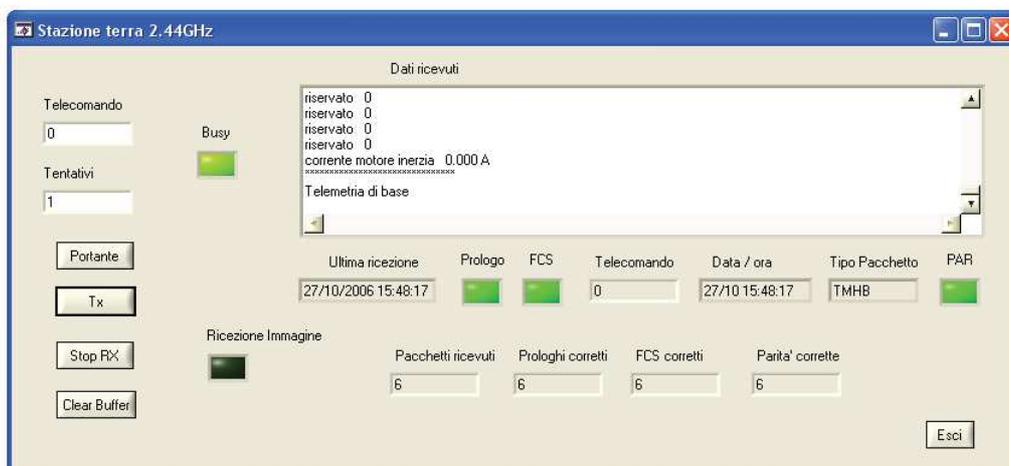


Figura 5.11. Il software per PC della stazione di terra

pacchetti di telemetria di housekeeping utilizzati per il calcolo della telemetria estesa fosse corretto e che il comando di reset telemetria cancellasse effettivamente i pacchetti salvati e facesse iniziare nuovamente l'acquisizione ed il calcolo dei nuovi valori. A questo punto si è passati al collaudo funzionale del motore elettrico, verificando che esso compiesse un numero di giri proporzionale a quello programmato. Chiaramente non si è potuto andare effettivamente a contare il numero di giri in quanto questi test sono stati effettuati con l'intero satellite assemblato, ma questo test era già stato effettuato durante il collaudo del software della scheda ProcB. Le ultime funzionalità verificate sono state quelle legate alla scheda Payload: come prima cosa è stato necessario provare ad effettuare lo scatto delle fotografie per poter poi trasferire via radio. Si è testato lo scatto di fotografie da ciascuna telecamera e si è cercato di salvare le fotografie in ogni posizione della memoria: per maggiore sicurezza è stata provata ogni combinazione possibile tra il numero della telecamera e la posizione in memoria della fotografia per poter escludere la presenza di errori nel software. Dopo aver verificato da terra (tramite la coppia di pacchetti di telemetria di housekeeping inviati dal satellite durante lo scatto foto) che lo scatto fosse stato effettivamente eseguito si è passati a provare il trasferimento delle fotografie. Questa parte del collaudo è stata quella che ha occupato la porzione maggiore di tempo in quanto il trasferimento di una fotografia completa richiede alcuni minuti (a seconda del soggetto fotografato) per via della divisione in blocchi della foto. Durante questa fase del collaudo sono state anche apportate alcune modifiche al software della scheda Payload, ProcB e della stazione di terra per ottimizzare il trasferimento dei

dati. Conclusa la fase di test in laboratorio sono stati effettuati alcuni test di comunicazione a distanze maggiori allo scopo di collaudare la stazione di terra fissa. La prima prova è stata realizzata sul tetto del Politecnico (distanza tra il satellite e l'antenna di circa 10 metri) ed ha dato esiti positivi: il satellite è stato infatti in grado di svolgere tutte le funzioni correttamente. Si è anche provato ad introdurre un'attenuazione nella catena di trasmissione per simulare una distanza di circa 2000 km (quella massima di funzionamento) ma il test è fallito per problemi ambientali: il segnale del satellite è stato ricevuto perfettamente ma il ricevitore del satellite non era in grado di ricevere i telecomandi perchè il segnale trasmesso (attenuato per simulare la maggiore distanza) era troppo debole in rapporto al rumore elettromagnetico di fondo presente in città. Questo problema sarà assolutamente presente durante la vita operativa del satellite, perciò non ha destato preoccupazione.

Sono stati condotti poi ulteriori test da distanze maggiori (dal colle della Madalena, sulla collina torinese) per verificare ulteriormente le funzionalità del satellite. Questi test hanno risentito in maniera più marcata del problema del rumore elettromagnetico di fondo in quanto nella zona del test sono presenti alcuni ripetitori del segnale radiotelevisivo. Nonostante tutto il satellite è stato in grado di comunicare con la stazione di terra sul tetto del Politecnico ed eseguire i comandi trasmessi: oltre al test completo delle funzioni del satellite è stata anche scattata e trasferita via radio con successo una foto della collina torinese.

Capitolo 6

Conclusioni

Il lavoro svolto durante la tesi si è concentrato sul collaudo e l'integrazione di un sistema complesso, quale sicuramente è un satellite. Le problematiche affrontate erano legate ad ambiti completamente differenti, da semplici problemi di natura elettrica a quelli di intercomunicazione tra schede, da problemi di modulazione a radio frequenza a quelli di compatibilità tra vari software. Tutto il lavoro svolto mi ha fornito una più approfondita capacità di analisi e valutazione dei sistemi complessi che sarà estremamente utile in futuro quando potrebbe essere necessario sviluppare da zero un progetto.

Durante questi mesi mi è stato possibile applicare in pratica tutta una serie di nozioni apprese e mi è stata data la possibilità di lavorare in un team formato da persone con competenze molto diversificate, costituito da studenti e professori del Politecnico di Torino.

Oltre ad aver avuto una grande valenza didattica, questa esperienza ha anche un elevato valore scientifico, testimoniato dalla partecipazione allo Student Space Science and Technology Symposium 2006 e all'ESA YES3 Workshop a Patrasso (GR), in cui è stata tenuta una presentazione del progetto PiCPoT di fronte a studenti e ricercatori provenienti da tutto il mondo.

Tutto il lavoro svolto non ha potuto essere collaudato effettivamente nello spazio, visti i problemi tecnici occorsi al razzo vettore il giorno del lancio, ma si è comunque molto fiduciosi delle possibilità di PiCPoT e si attende di poterlo finalmente portare nel suo ambiente: lo spazio.

Appendice A

Schemi Elettrici

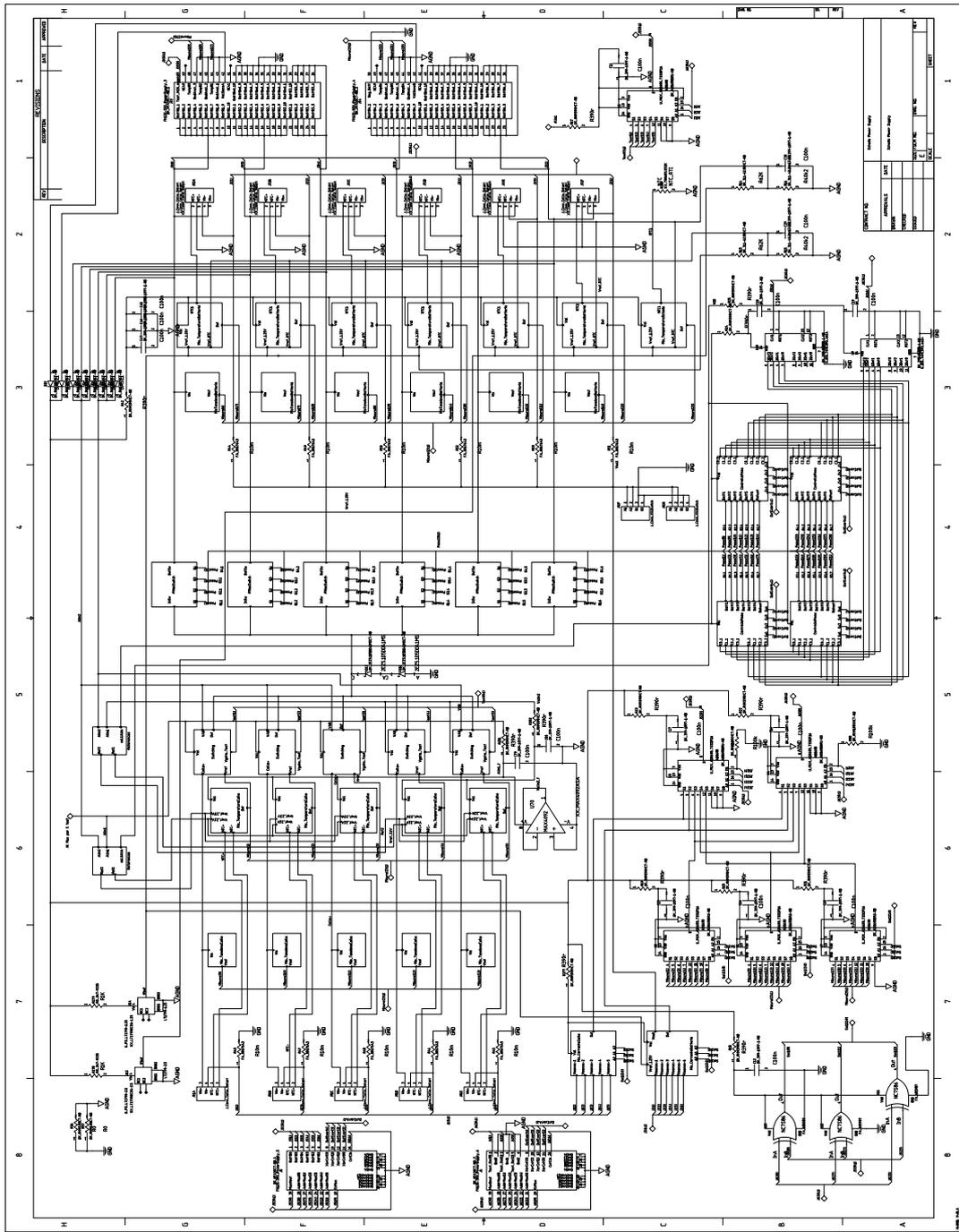


Figura A.1. La scheda PowerSupply

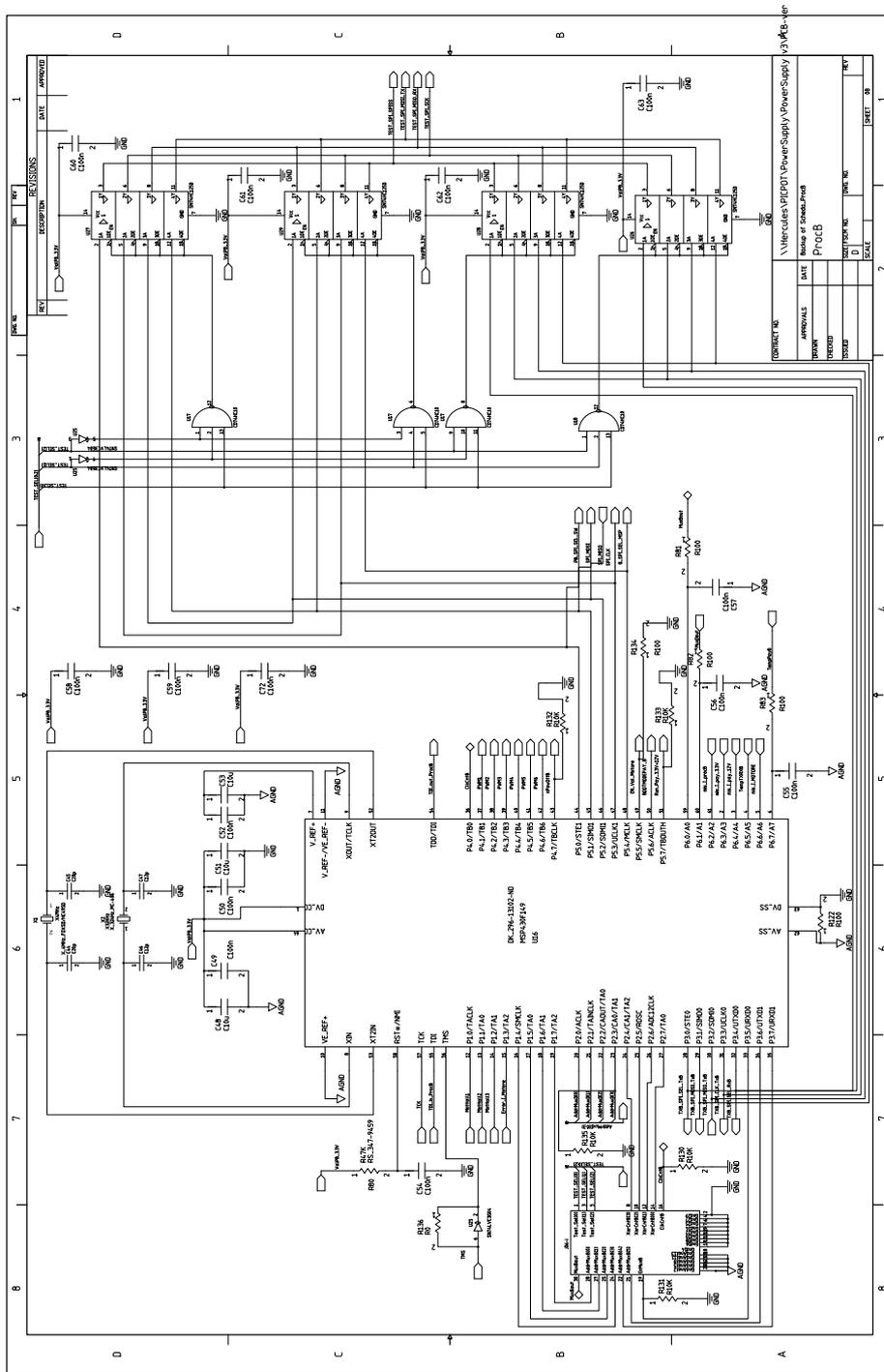


Figura A.2. La scheda ProcB

Appendice B

Ambiente spaziale

B.1 Spettro solare e spettri standard

Il Sole presenta una temperatura superficiale di 5900 K e con buona approssimazione le sue emissioni possono essere approssimate con quelle di un corpo nero a tale temperatura. Per svincolarsi dall'aleatorietà dell'attività solare e delle condizioni atmosferiche, oltre che dalla dipendenza dalla località, si sono definiti alcuni spettri standard identificati dalla sigla AM ("Air Mass") seguita da una misura della massa d'aria attraversata dalla radiazione solare, ovvero della lunghezza del cammino ottico e della densità dell'aria:

- AM0 per la radiazione extraterrestre, utilizzato nelle applicazioni spaziali;
- AM1 località equatoriale, a livello del mare, con il Sole sulla verticale;
- AM1.5 la radiazione solare attraversa una massa d'aria pari a 1.5 volte quella del caso precedente, ovvero il Sole ha una elevazione di 41.8° sopra l'orizzonte.

Per le applicazioni terrestri si adotta lo standard AM1.5: tutte le caratteristiche tecniche delle celle che si trovano in commercio sono riferite a questo spettro, riproducibile in laboratorio con una lampada allo xenon ad altissima pressione ed opportuni filtri.

La potenza per unità di superficie che investe la Terra fuori dall'atmosfera è detta costante solare q_s ed una sua misura media recente è 1353 W/m^2 [3].

B.2 Energia solare

Indicando con $D_S = 1,392 \times 10^6 \text{ km}$ il diametro del Sole, con $d_T = 1,469 \times 10^6 \text{ km}$ la distanza media tra Terra e Sole e considerando il Sole come una superficie nera alla

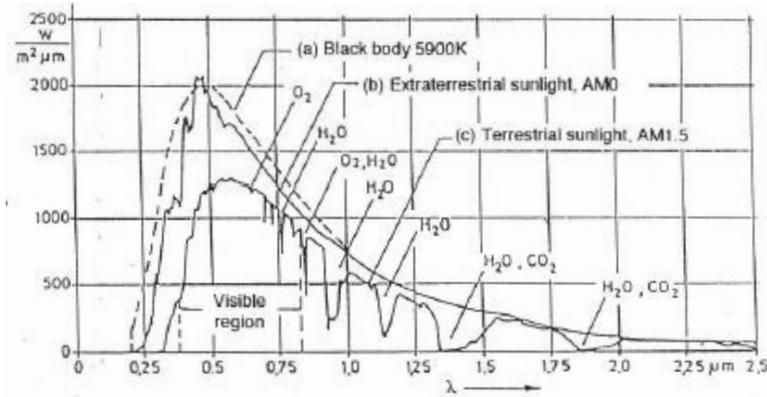


Figura B.1. *Spettri standard e spettro di corpo nero*

temperatura $T_S = 5900$ K, la potenza per unità di area irradiata dal Sole che giunge alla Terra si può calcolare nel modo seguente:

$$q_S = \frac{\pi D_S^2 \sigma T_S^4}{4\pi d_T^2}$$

dove il numeratore è la potenza complessivamente irradiata dal Sole, il denominatore l'area della sfera celeste sulla quale si trova la Terra e σ la costante di Boltzmann.

Viste le piccole dimensioni della Terra rispetto al Sole e la grande distanza che li separa i raggi che colpiscono il pianeta Terra si possono considerare paralleli.

B.3 Albedo

Tre processi atmosferici modificano la radiazione che attraversa l'atmosfera diretta verso la superficie terrestre. I gas monoatomici e gran parte di quelli biatomici, fra cui l'aria, se non sono dissociati o ionizzati, non assorbono energia raggiante, cioè sono trasparenti alle radiazioni termiche. L'atmosfera terrestre non è trasparente soprattutto per la presenza di ozono, vapor d'acqua, anidride carbonica, azoto molecolare oltre che di gas dissociati o ionizzati che assorbono ed emettono preferenzialmente alle loro lunghezze d'onda caratteristiche. Il fenomeno fisico di assorbimento ed emissione omnidirezionale della potenza radiante con spettro inalterato è chiamato scattering ed è il responsabile della luce diffusa dall'atmosfera. Una parte di potenza è indirizzata verso la Terra e la restante parte è riemessa verso lo spazio. Le bande mancanti di Fraunhofer nello spettro della radiazione solare che raggiunge la superficie terrestre sono principalmente causate dallo scattering atmosferico. Lo

scattering dipende dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente e dalla massa delle particelle presenti nell'atmosfera. Per l'atmosfera terrestre lo scattering avviene per basse lunghezze d'onda, prevalentemente nel campo del visibile, come si può vedere in figura B.1.

Infine si verifica anche il fenomeno della riflessione, dove la radiazione solare che colpisce la particella è indirizzata nuovamente verso lo spazio. La maggior parte della riflessione nell'atmosfera terrestre avviene nelle nubi dove la luce è intercettata da particelle di acqua e ghiaccio. La riflessione non è certamente il fenomeno dominante sulle terre emerse, infatti affinché si verifichi la riflessione speculare è necessario che la superficie del corpo presenti asperità piccole, inferiori ad $\frac{1}{4} \lambda$, e dimensioni trasversali maggiori di 4λ . Il risultato complessivo è il fenomeno fisico noto come albedo terrestre per cui circa il 34% dell'energia in arrivo dal Sole è diffusa dalla Terra nello spazio con distribuzione spettrale inalterata: risulta quindi chiaro che il pianeta Terra si comporta prevalentemente come una sorgente.

La forma della sorgente è una calotta sferica perché il satellite vede solamente una porzione di Terra e anche postulando un albedo medio di 0.34 su tutta la superficie l'emittenza non è uniforme perché il flusso di energia dal Sole è massimo in corrispondenza della congiungente Terra – Sole e diminuisce all'aumentare dell'angolo compreso fra la verticale locale e tale congiungente fino ad annullarsi (figura B.2). Ipotizzando che l'albedo sia ben approssimato da una sorgente perfettamente diffusiva, il calcolo dell'illuminamento sulle facce di PiCPoT passa per la soluzione del fattore di vista. Per una trattazione approfondita del fattore di vista si veda [4].

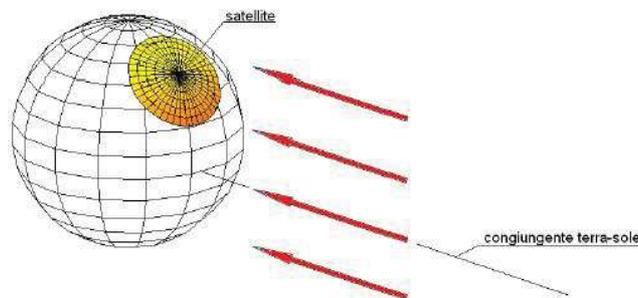


Figura B.2. *La sorgente equivalente per il calcolo dell'albedo*

Le dimensioni del satellite e la distanza dalla Terra sono tali da poter considerare l'illuminamento costante su una superficie piana del satellite e calcolare dell'illuminamento di una sorgente superficiale su un punto. In questo caso il doppio integrale di area del fattore di vista si semplifica in un integrale di area calcolato sulla calotta sferica. Anche con questa semplificazione però la soluzione rimane alquanto complessa: una faccia del satellite infatti vede per intero la sorgente albedo soltanto

quando è puntata verso il centro della Terra, ma un satellite a 700 km di quota vede la Terra entro un angolo di 130° . In questo caso il pianeta occupa una vasta area della sfera celeste ed il caso più comune prevede che una faccia del satellite veda solo una porzione della calotta sferica. È questo il motivo principale per il quale la soluzione del fattore di vista non è una strada percorribile. La figura B.3 dà un'idea dell'ingombro del pianeta Terra sulla sfera celeste. Il calcolo dell'irraggiamento sui pannelli solari non è un puro problema di illuminotecnica perché la quota di potenza radiante riflessa dalla ricopertura delle celle aumenta all'aumentare dell'angolo d'incidenza. La potenza assorbita dalla cella e convertita in potenza elettrica non segue quindi la legge del coseno dell'illuminotecnica ma diminuisce più rapidamente e si annulla prima (figura B.4). Sfruttando la proporzionalità fra potenza penetrante nel pannello solare e la corrente di cortocircuito è possibile rilevare sperimentalmente la curva di figura B.4 con un esperimento ad angolo d'incidenza variabile e misura della corrente su un pannello fotovoltaico laminato.

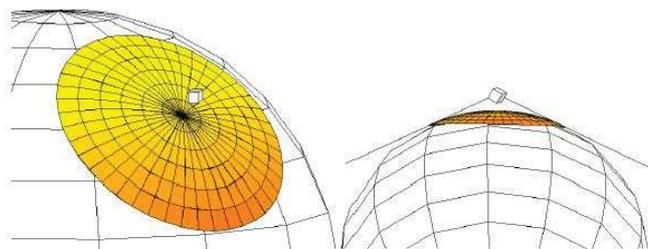


Figura B.3. *La porzione di Terra vista dal satellite*

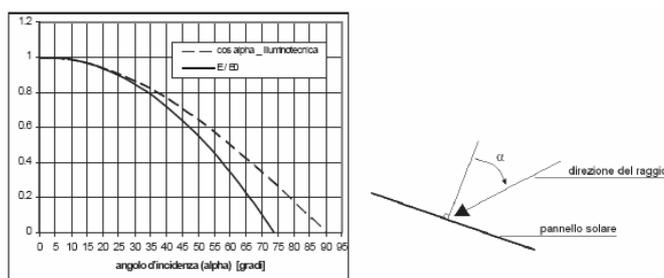


Figura B.4. *Potenza radiante assorbita in funzione dell'angolo d'incidenza*

Appendice C

Celle Solari

C.1 Modello matematico di pannello fotovoltaico

C.1.1 Generalità

Le celle solari sono diodi con superficie estesa in grado di convertire una parte dell'energia solare incidente sul semiconduttore in energia elettrica. Se l'energia del fotone, data dalla relazione:

$$W = hf$$

dove h è la costante di Planck e f la frequenza della radiazione incidente, è superiore all'energy gap del materiale, alcuni elettroni vengono strappati dalla banda di valenza per passare alla banda di conduzione, andando così a generare una corrente.

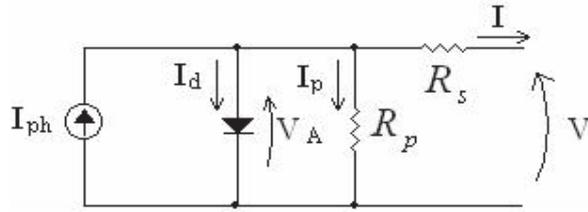
C.1.2 Il modello di cella solare

L'equazione:

$$I = I_S \left(e^{\frac{V_A}{V_T}} - 1 \right) - I_{ph}$$

rappresenta la corrente elettrica generata di una cella ideale, nella quale non vi sono correnti parassite e cadute di tensione, in cui I_S è la corrente di saturazione inversa del diodo, V_A è la tensione diretta del diodo e I_{ph} la corrente generata.

In una cella reale la resistenza di shunt (R_p) dovuta a difetti della giunzione, impurità o per piccoli cortocircuiti, non può mai essere infinita e non si può neppure trascurare la resistenza elettrica nel semiconduttore, nella griglia metallica e al contatto metallo – semiconduttore. Questa resistenza elettrica serie (R_s) raggiunge valori particolarmente elevati nelle celle multicristalline a causa della resistenza ai bordi dei grani.

Figura C.1. *Modello di cella solare*

Passando al modello di cella solare si è cambiata la convenzione di segno per la corrente rispetto alla convenzione classica adottata per la giunzione p – n e tipica degli utilizzatori, perché la cella solare è un generatore.

Sebbene esistano modelli più complessi, esso è sufficientemente accurato per la progettazione e la simulazione numerica del circuito.

C.2 Caratteristiche Pannelli Solari di PiCPoT

Nel seguito sono riportate le caratteristiche delle celle solari utilizzate su PiCPoT, fornite dalla ditta CESI S.p.a. di Milano.

Si riportano anche due ulteriori dati estremamente importanti per scelta dell'algoritmo di controllo dell'MPPT:

- variazione del punto di massima potenza al variare della temperatura:

$$\frac{\delta V}{\delta T} = -15.5 \frac{mV}{^{\circ}C}$$

,

- variazione del punto di massima potenza al variare dell'illuminamento:

$$\frac{\delta V}{\delta I} = -(1 \div 3) \frac{mV}{W}$$

,

Questi ultimi due parametri motivano la scelta di controllare in temperatura l'MPPT: la variazione del punto di massima potenza varia infatti maggiormente al variare della temperatura rispetto all'illuminamento solare.

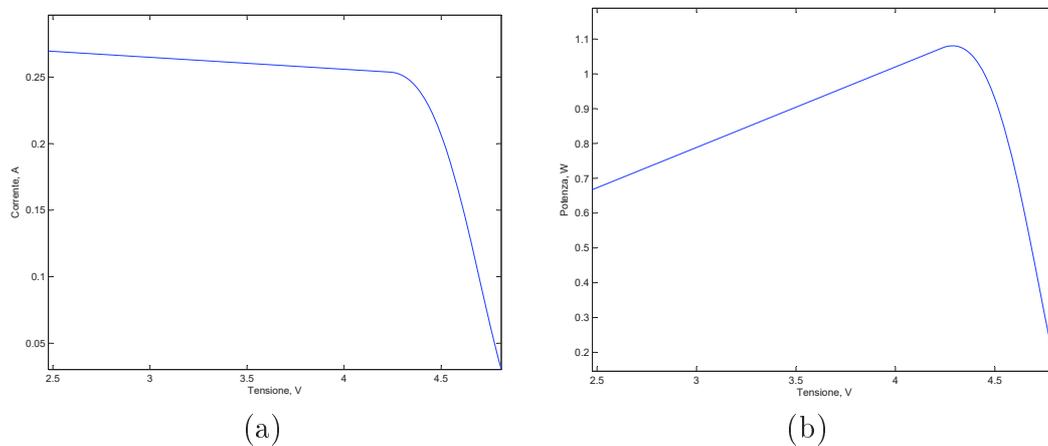


Figura C.2. *Caratteristica a 25 °C: corrente / tensione (a) e potenza / tensione (b)*

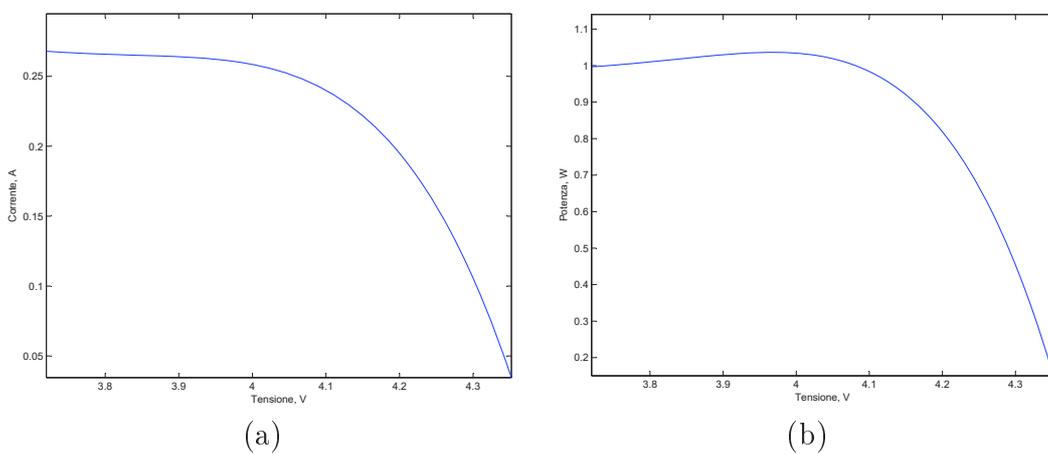


Figura C.3. *Caratteristica a 45 °C: corrente / tensione (a) e potenza / tensione (b)*

Bibliografia

- [1] Reyneri L., *PICPOT Satellite Universitario del Politecnico di Torino, Documento di specifiche dei sottosistemi elettronici, Versione 6.*
- [2] polimage.polito.it/picpot
- [3] AAU-CUBESAT, www.cubesat.auc.dk, Aalborg University, 2003.
- [4] Twiggs B., Puig-Suari J., *CUBESAT Design Specification Document*, Stanford University and Polytechnical Institute, www.cubesat.org.
- [5] <http://cubesat.calpoly.edu/>
- [6] Goetzberger A., Knobloch J., Voss B., *Crystalline Silicon Solar Cells*, John Wiley & Sons
- [7] OSI Standard 7498-1:1994
- [8] *La telemetria di PiCPoT*, polimage.polito.it/picpot
- [9] Ceroni M., *Progetto e Realizzazione del Satellite PiCPoT: Gestione Celle Solari e Batterie*, Tesi di Laurea
- [10] Diomante G., *Progetto e Realizzazione del Computer di bordo del satellite PiCPoT*, Tesi di Laurea
- [11] Tranchero M., *Progetto e Realizzazione del Satellite PiCPoT: Processore di Bordo*, Tesi di Laurea
- [12] TAPR, *APRS protocol speceecification version 1.0.1*, url: <http://www.tapr.org/pphlogger/dlcount.php?id=tapr&url=ftp://ftp.tapr.org/aprssi/aprssipec/spec/aprs101/APRS101.pdf>