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

Tesi di Laurea Magistrale

# Satellite modulare: gestione dei pannelli solari e carica delle batterie



**Relatori:** prof. Dante Del Corso prof. Leonardo Reyneri

> **Candidato:** Lidia Icardi

aprile 2008

## Sommario

Il progetto ARaMiS nasce nel dicembre del 2006, sulla base dell'esperienza maturata con il progetto PiCPoT. PiCPoT è il primo nanosatellite universitario del Politecnico di Torino, ha la forma di un piccolo cubo ed è composto da schede sviluppate ad hoc per la missione da svolgere. Proprio in quest'ultima peculiarità risiede uno dei punti deboli di PiCPoT: la scarsa riusabilità del progetto e le varie difficoltà riscontrate durante la fase di integrazione.

La caratteristica chiave del progetto ARaMiS è la modularità, grazie alla quale si mira ad eliminare i difetti sopra esposti. Il progetto non è orientato alla missione da svolgere, ma alla definizione di alcuni moduli standard, tra loro compatibili e cooperanti. Ogni modulo ricopre dei ruoli specifici ed è completamente indipendente, ma può essere connesso ad altri moduli dello stesso tipo o di tipo diverso per aumentare le prestazioni complessive del sistema. Quando lo standard e i moduli saranno pronti, essi potranno essere utilizzati in molteplici missioni, anche con payload molto diversi. L'utilizzo di componenti COTS (Commercial Off-The-Shelf) e l'ammortamento dei costi di progettazione sulle varie missioni che il sistema ARaMiS potrà affrontare, donano al progetto caratteristiche fortemente low-cost, rendendolo accessibile anche ad enti e organizzazioni che precedentemente non avevano possibilità di accesso allo spazio.

Il progetto ARaMiS prevede lo sviluppo di nano e pico satelliti, orbitanti in LEO (Low Earth Orbit), ossia ad una distanza da terra compresa tra i 500 e gli 800 km. I moduli hanno dimensioni standard, alcuni formano le facce esterne e altri sono montati all'interno. La comunicazione tra i vari moduli è garantita da un bus seriale. I moduli di cui è composto il progetto ARaMiS sono:

Power Supply: montato sull'esterno del satellite. Ciascun modulo può generare energia utilizzando dei pannelli solari al GaAs aventi un'efficienza del 26% ed immagazzinarla nella batteria a ioni di litio. Attualmente la massima potenza generabile stimata, per modulo, è di 6,4 W. I moduli Power Supply sono inoltre in grado di scambiare tra loro l'energia generata dai pannelli solari, per caricare anche batterie presenti sui moduli momentaneamente in ombra. I pannelli solari sono collocati all'esterno del modulo e rivolti verso lo spazio, mentre sulla faccia interna di ogni modulo trovano spazio la batteria, il circuito stampato e, per realizzare il controllo d'assetto, un piccolo motore elettrico e un magnetorquer, cioè un solenoide che alimentato genera un campo magnetico. Un micro-controllore supervisiona tutti i processi, anche in base ai comandi ricevuti dall'OBC (On Board Computer) tramite bus seriale. Ulteriore compito del micro-controllore è quello di misurare e memorizzare alcuni parametri del modulo e inviarli all'OBC. Poiché un satellite sarà composto da più moduli Power Supply, è automaticamente garantita una forte ridondanza.

- **Tx-Rx:** il modulo consente la comunicazione con la stazione terrestre, sia in trasmissione che in ricezione. Entrambe le direzioni sono servite da due canali aventi frequenza diversa: l'uno opera a 437 MHz, l'altro a 2,4 GHz. Un microcontrollore a bordo di questa scheda si occupa del trattamento dei dati secondo il protocollo previsto e li invia/riceve sul bus seriale del satellite.
- **On Board Computer:** questo modulo contiene un processore in grado di coordinare il funzionamento dell'intero satellite. In questo modulo vengono effettuati i calcoli relativi all'assetto e interpretati i comandi ricevuti da Terra. Tramite bus seriale l'OBC comunica con gli altri moduli e trasmette i dati alla TxRx.

In questa tesi si è sviluppato il modulo Power Supply. Il lavoro è cominciato documentandosi sui satelliti universitari esistenti e analizzando il progetto PiCPoT. In questa fase sono anche stati analizzati i vincoli ambientali ai quali il modulo è sottoposto: vuoto, vibrazioni e temperatura sono solo alcuni dei problemi affrontati nel progetto. Le radiazioni, prodotte dal Sole o provenienti dallo spazio profondo, possono interagire con i semiconduttori drogati, creando effetti noti come SEU (Single Event Up-set) e SEL (Single Event Latch-Up), che possono portare alla perdita di dati o alla distruzione dei dispositivi. Per mitigare questi effetti sono stati progettati e testati appositi circuiti di protezione da Latch-Up.

Succesivamente sono state analizzate varie architetture possibili per la condivisione dell'energia tra i moduli Power Supply. In questa fase sono state studiate numerose ipotesi, di cui le principali sono:

- *ipotesi 1:* ogni modulo funziona autonomamente, senza scambiare energia con gli altri;
- *ipotesi 2:* ogni modulo può scambiare energia con i moduli adiacenti, tramite collegamenti dedicati;
- *ipotesi 3:* ogni modulo può scambiare energia con tutti gli altri moduli presenti, grazie a uno o più bus di potenza.

Per ogni ipotesi sono stati esaminati i pro e i contro e infine è stata selezionata l'architettura che costituisce il miglior compromesso tra complessità e benefici. Essa prevede che ogni modulo possa scambiare energia con tutti gli altri, grazie a due tipi di bus di potenza, uno posto a valle dei pannelli solari e l'altro a valle delle batterie.

Dopo questa analisi iniziale si è proceduto con uno studio approfondito delle caratteristiche delle celle solari e delle batterie utilizzate, per essere in grado di sfruttare questi componenti con la massima efficienza possibile. In particolare la carica delle batterie costituisce un punto delicato e di grande importanza: essa si divide in varie fasi e presenta specifiche piuttosto stringenti, che devono essere rispettate per evitare di ridurre il tempo di vita utile delle batterie e, di conseguenza, dell'intero satellite.

A questo punto è iniziata la progettazione e realizzazione di un primo prototipo di Power Supply basato sull'architettura di base. Il prototipo è dotato di uno switching boost isteretico, atto a far funzionare i pannelli solari nel punto di massima efficienza e in grado di elevarne la tensione al fine di caricare due celle di batterie al litio poste in serie. Il punto di lavoro dei pannelli solari è impostato da un circuito analogico o dal micro-controllore di bordo. La carica della batteria è supervisionata dal micro-controllore, un MSP430 della Texas Instrument, dotato di un ADC integrato attraverso il quale è possibile acquisire sette diversi parametri del prototipo. Il prototipo è stato collaudato e risulta funzionante.

In seguito sono state esaminate le criticità del sistema, emerse sia dal collaudo del primo prototipo sia da un'analisi approfondita effettuata durante le riunioni del gruppo che si occupa del progetto. In particolare, è risultato che la carica della batteria, per i motivi esposti in precedenza, non può essere affidata alla sola supervisione del micro-controllore; si è quindi deciso di esplorare lo spazio di progetto in due direzioni: utilizzare un dispositivo commerciale oppure progettare un circuito ad hoc in risposta alle esigenze del sistema.

Questa analisi è stata seguita dalla progettazione e realizzazione di un secondo prototipo, volto a testare entrambi i metodi sopra illustrati nonché lo scambio di energia tra più schede identiche. A questo scopo, si è scelto di progettare una scheda contenente il solo regolatore switching, convenientemente modificato rispetto al primo prototipo, più i componenti strettamente necessari al suo funzionamento. Il prototipo è in fase di collaudo.

Il seguente elaborato è organizzato come segue:

- capitolo 1 descrive il progetto ARaMiS e l'ambiente spaziale in cui opera;
- **capitolo 2** vengono analizzati pregi e difetti delle possibili architetture per il modulo Power Supply.
- **capitolo 3** descrive le specifiche dei prototipi di Power Supply sviluppati;
- **capitolo 4** descrive il progetto dei prototipi di Power Supply, in particolare il secondo;

capitolo 5 riporta le misure svolte sul secondo prototipo realizzato;capitolo 6 riporta le conclusioni tratte dal lavoro.

# Indice

Sc	Sommario				
1	Intr	roduzione	1		
	1.1	Il progetto precedente (PiCPoT)	1		
	1.2	Il progetto AraMiS	4		
	1.3	Vincoli ambientali	5		
		1.3.1 Temperatura	5		
		1.3.2 Vuoto	6		
		1.3.3 Single-event effects SEE	6		
		1.3.4 Total dose $\ldots$	8		
<b>2</b>	Arc	hitetture di alimentazione modulare	9		
	2.1	Specifiche	10		
	2.2	Possibili soluzioni	12		
		2.2.1 Architettura base	12		
		2.2.2 Carica della propria batteria	16		
		2.2.3 Carica delle batterie adiacenti	16		
		2.2.4 Carica di batteria qualsiasi	19		
		2.2.5 Analisi dei guasti	20		
	2.3	Gestione del sistema di alimentazione	27		
3 Architettura prescelta		hitettura prescelta	29		
	3.1	Modello UML	31		
		3.1.1 I diagrammi dei casi d'uso	31		
		3.1.2 I corsi di azione base	32		
	3.2	Pannelli solari e batterie	35		
		3.2.1 Pannelli solari	35		
		3.2.2 Batterie	36		
	3.3	Specifiche	46		
		3.3.1 Singola mattonella	46		
		3.3.2 Tensioni e correnti	49		

		3.3.3	Telemetrie	51		
		3.3.4	Struttura generale	52		
	3.4	Critici	tà	52		
4	Pro	getto d	lel modulo Power Supply 6	<b>33</b>		
	4.1	Primo	prototipo	63		
	4.2	Second	lo prototipo	66		
		4.2.1	Alimentazione e tensioni di riferimento	66		
		4.2.2	Maximum Power Point Tracker (MPPT)	68		
		4.2.3	Battery Charger (BC)	80		
		4.2.4	Kill Switch	86		
	4.3	Realiz	zazione	88		
<b>5</b>	Col	laudo e	e misure 8	<b>39</b>		
	5.1	Alime	ntazione e tensioni di riferimento	89		
		5.1.1	Alimentazioni	89		
		5.1.2	Tensione di riferimento	90		
	5.2	Switch	ing isteretico	90		
		5.2.1	Tensione di ingresso	90		
		5.2.2	Carico di prova	91		
		5.2.3	Comparatore isteretico	91		
		5.2.4	Switching	92		
6	6 Conclusioni 102					
Α	Sch	ematic	i Prototipo 1 10	)4		
<u> </u>	2011			· •		
В	3 Schematici Prototipo 2 11			6		
Bi	3ibliografia 121					

# Elenco delle tabelle

2.1	Caratteristiche principali delle ipotesi di architettura	15
2.2	Effetti di un guasto permanente per l'ipotesi $A$	22
2.3	Effetti di un guasto temporaneo per l'ipotesi $A$	23
2.4	Effetti di un guasto permanente per l'ipotesi $B.1$	24
2.5	Effetti di un guasto permanente per l'ipotesi $C.1$	26
3.1	Specifiche di una cella LIC 18650–22 AC $\ldots$	42
3.2	Specifiche di tensione e corrente	51
4.1	Specifiche nominali e ridotte dello ZSR330	67
4.2	Valori di resistenze per il controllo isteretico	72
4.3	Principali caratteristiche degli induttori selezionati	78
4.4	Principali caratteristiche di diodi selezionati	78
4.5	Principali caratteristiche degli N-MOS selezionati	78
4.6	Principali caratteristiche dei condensatori selezionati	78
4.7	Potenza dissipata dal boost: caso ottimo	78
4.8	Potenza dissipata dal boost: caso pessimo	79
5.1	Misure relative al controllo isteretico	92

# Elenco delle figure

Schema a blocchi del satellite universitario PiCPoT	3
Vista esterna di PiCPoT	3
Un esempio di satellite con architettura ARaMiS	5
Sezione trasversale di un inverter CMOS	7
Generazione dell'energia e sua distribuzione	12
Configurazione base della mattonella Power Supply	13
Connessione a diodo-OR	14
Schema di connessione per l'ipotesi $A$	15
Schema di connessione per l'ipotesi $B1$	16
Schema di connessione per l'ipotesi $B2$	18
Schema di connessione per l'ipotesi $C1$	19
Interuttori presenti nella configurazione $A$	21
Schema circuitale del deviatore SW1	25
Schema e nomi degli switch dell'ipotesi $C$	27
Possibili configurazioni delle sotto-reti e del SPB	30
Diagramma dei casi d'uso di Power Supply	33
Caratteristica I/V di una cella solare singola	36
Potenza erogata da una cella solare singola	37
Configurazione delle 6 celle solari	37
Caratteristica I/V di un pannello	38
Potenza erogata da un pannello	39
Caratteristica I/V di una cella in base alla temperatura	40
Potenza erogata da una cella in base alla temperatura	41
Fasi di carica di una batteria Li-ioni	43
Longevità di una batteria Li-ioni in funizone del rate di carica o scarica	44
Capacità e resistenza interna in funzione del numero di cicli	45
Percentuale di carica persa per auto-scarica in una batteria a ioni di	
litio	45
Batteria composta di 3 celle in serie	46
Mattonella: parte a monte del SPB	48
	Schema a blocchi del satellite universitario PiCPoT     Vista esterna di PiCPoT.     Un esempio di satellite con architettura ARaMiS     Sezione trasversale di un inverter CMOS     Generazione dell'energia e sua distribuzione     Configurazione base della mattonella Power Supply     Connessione a diodo-OR     Schema di connessione per l'ipotesi A     Schema di connessione per l'ipotesi B1     Schema di connessione per l'ipotesi B2     Schema di connessione per l'ipotesi C1     Interuttori presenti nella configurazione A     Schema e nomi degli switch dell'ipotesi C     Schema e nomi degli switch dell'ipotesi C     Schema di configurazioni delle sotto-reti e del SPB     Diagramma dei casi d'uso di Power Supply     Caratteristica I/V di una cella solare singola     Potenza erogata da una cella solare singola     Caratteristica I/V di un pannello     Caratteristica I/V di una cella in base alla temperatura     Potenza erogata da una cella in base alla temperatura     Fasi di carica di una batteria Li-ioni     Longevità di una batteria Li-ioni in funizone del rate di carica o scarica     Caratteristica I/V di una batteria Li-ioni in funizone del rate di carica o scarica     Caratteristica I/V di una batteria Li-ioni in funizone del rate di carica o scarica <tr< td=""></tr<>

3.16	Mattonella: parte a valle del SPB	49
3.17	Schema a blocchi della singola mattonella	50
3.18	Struttura generale	53
3.19	Caso 1	54
3.20	Caso 2	54
3.21	Caso 3	55
3.22	Caso 4	55
3.23	Caso 5	56
3.24	Metodo serie/parallelo	58
3.25	Metodo di equalizzazione resistiva	58
3.26	Metodo di equalizzazione tramite condensatore	59
3.27	Metodo di shunt della cella	60
3.28	Isolamento galvanico: soluzione 1	62
3.29	Isolamento galvanico: soluzione 2	62
3.30	Isolamento galvanico: soluzione 3	62
4.1	Schema a blocchi del primo prototipo <b>Power Supply</b>	65
4.2	Caratteristica di uscita di un convertitore switching	68
4.3	Punto di lavoro di un convertitore switching	69
4.4	Schema elettrico del comparatore isteretico e dei MOS driver	70
4.5	Transcaratteristica del comparatore isteretico non invertente	71
4.6	Schema elettrico switching boost	73
4.7	Andamento nel tempo della corrente dell'induttore	74
4.8	Circuito per la simulazione della caratteristica di una cella solare	80
4.9	Caratteristica I/V di una cella solare: confronto con la simulazione .	81
4.10	Potenza erogata da una cella solare: confronto con la simulazione	82
4.11	LTC4002	83
4.12	Circuito progettato per la carica della batteria	85
4.13	Posizione del kill switch rispetto alla scheda Power Supply	87
4.14	Disposizione dei bus per l'inserimento del Kill Switch	87
5.1	$r_{DS}$ and del IRF7821 in functione di $V_{CS}$	93
5.2	$r_{DS}$ m del IRF7821 in funzione di $V_{CS}$	93
5.3	Caratteristica di uscita	95
5.4	Efficienza in funzione della tensione di uscita	96
5.5	Efficienza in funzione del carico	97
5.6	Efficienza in funzione della potenza di uscita	98
5.7	Andamento di $M = \frac{V_0}{v}$ al variare del carico	99
5.8	Potenza di uscita in funzione del carico	100
5.9	Potenza di uscita in funzione della tensione di uscita	101

A.1	Regolatore lineare di tensione
A.2	Generatore della tensione di riferimento
A.3	Circuito anti Latch-Up
A.4	Switching isteretico, comparatore e i segnali che ne influenzano il
	comportamento $\ldots$
A.5	Schema elettrico del uC MSP430F2254
A.6	Integrato per la comunicazione seriale di debug $\ \ .$
A.7	Circuiti di condizionamento delle correnti e della temperatura di bat-
	teria
A.8	Circuito di condizionamento per la tensione di batteri a $\ .\ .\ .\ .\ .$ . 112
A.9	Circuiti di condizionamento della corrente e della temperatura del
	pannello solare
A.10	Circuito di condizionamento per la tensione del pannello solare $.114$
A.11	Visione gerarchica dello schema elettrico
D 1	Perclatore lineare di tensione 117
D.1 D.0	Comparatore della tensione di riferimente
Б.2 Д.9	Generatore della tensione di riferimento
Б.З D 4	Switching isteretico e comparatore
Б.4	visione gerarchica dello schema elettrico

# Capitolo 1 Introduzione

Nell'ultimo decennio si è assistito a un forte incremento della realizzazione di satelliti di piccole dimensioni, molti dei quali in ambito universitario. Il mondo universitario infatti ha partecipato attivamente alla progettazione e realizzazione di *nano-satelliti* (peso compreso tra il kilogrammo e i dieci kilogrammi) e *pico-satelliti* (peso inferiore al kilogrammo). Uno dei risultati di questa attività è la definizione di una piattaforma internazionale specifica, che definisce degli standard progettuali ben precisi e permette alle Università di realizzare il proprio satellite e mandarlo nello spazio a costi contenuti. Nasce così lo standard per picosatelliti denominato CUBESAT, [21], 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. Questo standard prevede la realizzazione di satelliti di forma 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).

Numerose università italiane e straniere si sono occupate della progettazione di un satellite, anche per il forte valore didattico dell'esperienza, che permette agli studenti di affrontare un problema progettuale serio e di sviluppare sia le proprie capacità ingegneristiche che l'abilità di lavorare in team.

Il lavoro descritto in questa tesi è un ampliamento e generalizzazione dei concetti di architettura modulare standard per piccoli satelliti.

### 1.1 Il progetto precedente (PiCPoT)

Prima di descrivere la nuova architettura (ARaMiS), è utile un riassunto delle caratteristiche principali di un piccolo satellite realizzato al Politecnico di Torino (progetto PiCPoT). Questa sigla significa "PIccolo Cubo del POlitecnico di Torino". Il satellite PiCPoT è stato progettato interamente da un gruppo di lavoro composto da studenti e docenti del Politecnico. Gli studenti progettisti erano laureandi di Ingegneria Aerospaziale, Energetica, Elettronica, Informatica e delle Telecomunicazioni, composti in un gruppo di lavoro omogeneo, (si veda [25], [22], [3] e [6]).

PiCPoT è un cubo con sei facce quadrate e ortogonali tra loro e dotato esternamente di cinque pannelli solari, tre fotocamere, due antenne, due kill switch e un connettore di test. In figura 1.2 si vede l'aspetto esteriore del satellite.

Gli obiettivi principali del progetto erano:

- dimostrare la possibilità di un progetto interdipartimentale nel Politecnico di Torino;
- verificare il comportamento di componenti *COTS* (Commercial Off-The-Shelf) in ambiente spaziale;
- acquisire dati relativi alle condizioni ambientali dell'orbita *LEO* (Low Earth Orbit) e *MEO* (Medium Earth Orbit).

La parte elettronica di PiCPoT è costituita dalle seguenti schede:

- Power Switch: genera le tensioni di alimentazione per tutti i sottosistemi del satellite, sceglie la batteria da utilizare e gestisce gli anti latch-up;
- **Power Supply**: mantiene cariche le batterie a bordo del satellite e monitora lo stato dei pannelli solari e delle batterie;
- **ProcA e ProcB**: sono i due processori di bordo ed eseguono le stesse operazioni. Acquisiscono i dati dai sensori per le telemetrie e gestiscono il payload. Possono in oltre sia inviare i dati a terra che riceverli;
- **Payload**: acquisisce le immagini da una delle tre telecamere a bordo, inoltre il processore presente sulla scheda permette la conversione dal formato PAL al formato JPEG così da trasmettere l'informazione in formato compresso;
- **TxRx**: trasmette i comandi al satellite e riceve da esso i dati. Le frequenze utilizzate sono 437 MHz per la trasmissione e 2,4 GHz per la ricezione.

Inoltre, era prevista la comunicazione con una stazione di terra, alla quale Pi-CPoT avrebbe inviato dati di telemetria (temperature, stato del satellite e carica delle batterie) e ogni ora una o più fotografie e dalla quale avrebbe ricevuto dei telecomandi. In figura 1.1 è visibile lo schema a blocchi generale del satellite [25].

Il satellite è stato lanciato il 26 luglio 2006 dalla base di lancio di Baykonour dal lanciatore ucraino DNEPR-II. Purtroppo non è stato possibile eseguire i test in orbita previsti a causa di problemi di natura idraulica al lanciatore.



Figura 1.1. Schema a blocchi del satellite universitario PiCPoT



Figura 1.2. Vista esterna di PiCPoT.

### 1.2 Il progetto AraMiS

Il progetto ARaMiS nasce come evoluzione del progetto PiCPoT. L'obiettivo è la definizione di un'architettura modulare standard a basso costo per satelliti di piccole dimensioni([23]). Bisogna infatti considerare che la progettazione e realizzazione di satelliti è in linea generale molto costosa e quindi non accessibile a tutti: lo sviluppo di un'architettura modulare, insieme all'utilizzo di componenti *COTS*, potrebbe contribuire in maniera notevole ad abbattere i costi fissi di progettazione e sviluppo, dal momento che questi sarebbero condivisi tra numerose missioni. Gli obiettivi principali del progetto sono:

- applicare il concetto di modularità e standardizzazione all'intero satellite, compresi i sottosistemi elettronici;
- utilizzare dispositivi *COTS*, e ottenere l'alta affidabilità con soluzioni sistemistiche;
- progettare, sviluppare e collaudare una serie di mattonelle (*tiles*) modulari, corrispondenti ai principali sottosistemi del satellite, utilizzabili in numero differente per le varie missioni;
- sviluppare metodologie di test a basso costo.

Le mattonelle modulari (fig. 1.3) sono almeno di due tipi:

- Power Supply: questo modulo è dedicato alla generazione e gestione dell'energia e al controllo di assetto. Tutti i moduli di questo tipo prevedono un'interfaccia con bus di potenza e bus dati, i quali possono collegare tra loro i vari moduli (sulla topologia dei collegamenti si discuterà più avanti). Inoltre essi contengono: pannelli solari, regolatore switching, batterie, sensori e attuatori di assetto con relativi driver, driver per attuatore di orbita, sensori di housekeeping, microcontrollore.
- **TxRx**: questo modulo è dedicato alla comunicazione con la stazione di terra. è composto da due canali (trasmissione e ricezione) e contiene: antenne, codificatore/decodificatore di canale, decodificatore di telecomando, interfaccia bus dati, controllo di assetto.

A queste sono associati altri moduli, quali il payload, variabile in base alla missione da svolgere, e l'OBC (On-Board Computer) che coordina il funzionamento dell'intero satellite.

Inoltre è necessario fare in modo che le mattonelle modulari siano sempre compatibili con un ragionevole sottosistema meccanico, e soprattutto che quest'ultimo sia in grado di sostenere adeguatamente il payload. Per finire, è prevista una stazione di terra, destinata a ricevere i dati e le telemetrie e inviare telecomandi.

### 1.3 Vincoli ambientali

Il progetto di un sistema elettronico è fortemente influenzato dall'ambiente nel quale esso opererà([16]). Questo discorso è applicato anche ai satelliti e l'ambiente in cui essi operano: lo spazio.

I satelliti ARaMiS operano in un'orbita LEO, posta a circa 600 km dalla Terra. Nei prossimi paragrafi verrano dettagliati gli effetti a cui sono sottoposti.

### 1.3.1 Temperatura

Il satellite sarà sottoposto a forti gradienti termici, dovuti alla differenza di temperatura tra la faccia esposta al sole e quella rivolta nella direzione opposta verso il deep-space, mitigati dalla conduzione termica della struttura del satellite.

Si consideri inoltre che l'irraggiamento solare, circa  $1300 \text{ W/m}^2$ , è molto più elevato che sulla Terra in quanto non attenuato dall'atmosfera.



Figura 1.3. Un esempio di satellite con architettura ARaMiS

### 1.3.2 Vuoto

In orbita LEO l'atmosfera è ancora presente, seppur in densità molto bassa. Questo comporta l'assenza del fenomeno della convezione, grazie al quale viene dissipata, in condizioni normali, gran parte del calore prodotto dai dispositivi elettronici. In queste condizioni il calore può essere dissipato solo grazie agli effetti di conduzione termica e irraggiamento.

E necessario prestare attenzione alla composizione interna di qualsiasi componente elettronico o elettromeccanico, in particolare alla presenza di liquidi o gas al loro interno, che possono determinare fenomeni di evaporazione o di esplosione. Per esempio le batterie al Litio contengono al loro interno una pressione di 0,3 bar, trascurabile sulla Terra, ma che nel vuoto crea un'elevata forza per unità di superficie che tende a far esplodere la batteria. I condensatori elettrolitici non possono essere utilizzati nel progetto, per il loro contenuto di soluzione elettrolitica. Volendo utilizzare dei motori è necessario informarsi sull'eventuale contenuto di oli lubrificanti.

#### **1.3.3** Single-event effects SEE

Quando le radiazioni ionizzanti presenti nello spazio attraversano dei semiconduttori esse generano una coppia elettrone-lacuna([1], [19] e [9]). Questo processo è noto come *ionizzazione diretta*. Le cariche così generate possono ricombinarsi o propagarsi attraverso i meccanismi di *drift* e *diffusion*. Poichè le funzioni dei dispositivi attivi sono governate dal controllo dell'iniezione di carica nelle giunzioni, la generazione incontrollata di carica risultante dalla ionizzazione può produrre diversi effetti sui dispositivi.

Tutti questi effetti sono noti come *single-event effects*. Tra i più critici vi sono il *single-event Latch-Up* (SEL) e il *single-event Up-Set*(SEU).

**Single Event Latch-up (SEL)** Analizzando la struttura di un dispositivo CMOS (si veda a tal proposito la figura 1.4) si nota come oltre ai due MOS che realizzano un tipico inverter siano presenti anche due transistori bipolari parassiti. La particolarità di questa struttura parassita è che corrisponde alla struttura di un componente elettronico: il Silicon Controlled Rectifier (SCR). L'SCR è un componente di potenza che ha un catodo, un anodo e un gate. Quando la corrente sul gate è sufficiente per portare in conduzione il transistor si innesca una reazione positiva che mantiene un percorso a bassa impedenza tra il nodo di alimentazione e il riferimento a potenziale nullo, causando un'elevata dissipazione di potenza, che può portare al danneggiamento del dispositivo.

Questo fenomeno si verifica quando si ha un'iniezione di carica nella base del transistore parassita, quindi finchè circola corrente, anche molto bassa. Questa



Figura 1.4. Sezione trasversale di un inverter CMOS

situazione perdura finchè l'alimentazione del dispositivo è presente ed nota come SEL.

Proprio per evitare il danneggiarsi dei dispositivi CMOS devono essere previsti dei circuiti *anti latch-up* a monte di essi. Il circuito anti latch-up è in grado di rivelarne la presenza e toglie alimentazione al dispositivo per permettere il diseccitamento dell'SCR parassita.

**Single Event Up-set (SEU)** Qualora le memorie siano colpite dalle radiazioni esse vanno incontro alla perdita di dati, poichè la radiazione è in grado di caricare una locazione di memoria precedentemente scarica, o addirittura alla perdita del firmware dei processori di bordo. I componenti COTS non sono protetti da questi fenomeni, perciò è necessario inserire ridondanza nelle informazioni e nei circuiti di elaborazione. I dati in memoria andranno quindi scritti con codice a protezione d'errore e i firmware replicati in diverse locazioni della memoria, in maniera tale da averne sempre una copia corretta disponibile.

### 1.3.4 Total dose

Gli effetti fin qui descritti hanno preso in esame fenomeni *istantanei*. È chiaro però che all'aumentare del tempo trascorso in orbita sempre più radiazioni avranno attraversato ed interagito con i dispositivi, i quali lentamente vanno incontro a un degradarsi delle prestazioni. Per esempio i transistori MOS aumentano gradualmente la loro tensione di soglia, questo comporterà un maggiore ritardo nella propagazione dei segnali e così via. Questi effetti sono dovuti alla *total dose* accumulata e si manifestano soltanto dopo alcuni anni trascorsi in orbita LEO.

La durata prevista delle missioni ARaMiS è inferiore a sei mesi, pertanto questi effetti possono essere trascurati nella selezione dei componenti.

## Capitolo 2

# Architetture di alimentazione modulare

In questo capitolo verrano analizzate le funzioni richieste alla mattonella Power Supply e il modo in cui possono essere fornite utilizzando un'architettura che presenti il miglior compromesso tra servizi e ridondanza offerti contro complessità e costo d'implementazione.

Presentiamo un glossario dei termini utilizzati di seguito:

- SPB: Solar Panel Bus. Le mattonelle Power Supply sono in grado di scambiare enrgia tra di loro al fine di ottimizzare i cicli di carica/scarica delle batterie. Ciò si realizza fisicamente grazie al SPB nel caso di sotto-reti di Power Supply.
- **SPI**: Solar Panel Interconnection. È simile al SPB e si differenzia da esso in quanto si applica solo nel caso di collegamento diretto tra due Power Supply. Si tratta quindi di un collegamento dedicato.
- mattonella Power Supply: si tratta della scheda fisica che andrà a comporre le facce esterne dei satelliti del progetto ARaMiS, per maggiori dettagli si veda 2.1. In essa trovano posizione circuiti aventi compiti anche molto diversi tra loro.
- MPP: il *Maximum Power Point* è il punto di lavoro, inteso sul piano I/V, nel quale un pannello solare eroga la massima potenza e lavora quindi con la massima efficienza raggiungibile.
- MPPT: Maximum Power Point Tracking. L'MPP varia nel tempo in funzione di fattori quali la temperatura e l'illuminazione del pannello solare. Eseguire un MPPT significa perciò riconoscere il MPP e spostare il punto di lavoro del pannello solare al fine di raggiungere il MPP.

- **OBC**: *On Board Computer*. È una delle schede del progetto **ARaMiS**. Si occupa principalmente di coordinare le varie operazioni e sarà necessario un solo **OBC** per satellite.
- **TX-RX**: È una delle schede del progetto ARaMiS. Si occupa di ricevere e inviare a terra i dati e i comandi. Disporrà di due canali di comunicazione a frequenze diverse, l'uno con portante a 437 MHz e l'altro a 2,4 GHz.
- **PDB**: *Power Distribution Bus.* La mattonella **Power Supply** è la fonte di alimentazione per tutte le schede, diverse da altre mattonelle **Power Supply**, presenti sul satellite. Il PDB è il supporto fisico attraverso il quale questo si può realizzare e nel quale tutte le **Power Supply** riversano la propria energia.
- **Power Supply**: con questo termine si indicano solo alcune funzionalità della mattonella **Power Supply**, precisamente tutte le funzionalità riguardanti la generazione, conservazione e condivisione dell'energia più i compiti di housekeeping.
- **SPC**: Solar Panel Controller. Anche detto più semplicemente caricabatteria, è un circuito che si occupa di adattare i livelli di tensione tra pannelli solari e batterie e adottare tecniche di MPPT.

### 2.1 Specifiche

La mattonella dovrà essere in grado di fornire le seguenti funzionalità:

**Recupero e immagazzinamento dell'energia** Tramite pannelli solari la mattonella dovrà essere in grado di ricavare energia dalla luce solare. Attraverso un circuito caricabatteria l'energia verrà immagazzinata nelle batterie presenti in ogni mattonella. È anche necessario ottimizzare l'estrazione di energia dal pannello solare adottando la tecnica del MPPT (Maximum Power Point Tracking).

**Condivisione dell'energia** Al fine di ottimizzare la vita delle batterie e di aumentare la ridondanza del sistema è opportuno che le mattonelle Power Supply abbiano la possibilità di condividere l'energia tra di loro. Questo può essere reso possibile tramite un bus di potenza che colleghi un caricabatterie ad una generica batteria di un'altra Power Supply oppure collegando un pannello solare a un caricabatterie di una mattonella esterna o ancora entrambe le soluzioni possono coesistere. Più avanti in questo capitolo si analizzeranno i pro e i contro di queste soluzioni. Housekeeping Il sottosistema Power Supply dovrà essere in grado di misurare alcuni importanti parametri presenti all'interno di esso e fornirli all'OBC (On Board Computer) qualora richiesti.

Di seguito, brevemente elencati, i parametri misurati:

- tensione, corrente e temperatura del pannello solare;
- tensione, corrente e temperatura della batteria;
- segnali provenienti da fotodiodi e magnetometri.

**Bus di comunicazione** La mattonella Power Supply ha la possibilità di scambiare dati con altre mattonelle e con l'OBC tramite un bus seriale di comunicazione. Questo canale di comunicazione dovrà necessariamente essere fortemente fault-tolerant e garantire una certa ridondanza. Al tempo stesso dovrà avere bassi consumi di potenza e comunicare con un bit-rate per ora stimato in 200kbps( [23]).

**Controllo di assetto** Sulla mattonella **Power Supply** trovano posto anche due diverse unità di controllo d'assetto, L'una basata su ruota d'inerzia, l'altra su controllo attivo del campo magnetico (*magnetorquer* [21]).

La prima soluzione adotta un piccolo motore elettrico al cui asse è collegata una certa massa, costituita da una ruota esterna o eventualmente dallo stesso rotore interno del motore. Imprimendo accelerazioni e decelerazioni alla ruota, per il principio della conservazione del momento d'inerzia, esse vengono trasferite come coppie agenti sull'intera struttura.

La seconda soluzione prevede di alimentare un solenoide, ricavato negli strati interni di un PCB, il quale genera un dipolo magnetico orientato lungo una ben determinata direzione. Quest'ultimo interagendo con il campo magnetico terrestre genera una coppia che pone in rotazione la struttura.

I due sistemi si integrano a vicenda. Notiamo che ogni mattonella Power Supply fornisce gli strumenti necessari al controllo di assetto di un asse, ma posizionate su cinque facce di un cubo, configurazione minima del satellite, garantiscono la stabilizzazione sui tre assi.

**Supporto meccanico** La mattonella Power Supply è anche una parte integrante del sotto-sistema meccanico. Su di esso vengono allocati diversi componenti tra cui il pannello solare, le batterie, la ruota d'inerzia, il solenoide per il controllo d'assetto e il PCB con i vari componenti elettronici. Questa mattonella verrà posizionata all'esterno del satellite e unendosi alle altre mattonelle esterne sarà in grado di fornire la funzione di supporto meccanico all'intero satellite, payload compreso. La dimensione geometrica della mattonella sarà standard e uguale per tutte le mattonelle esterne, un quadrato di  $165 \text{ mm}^2$  (la dimensione utile per quanto riguarda il PCB sarà di soli  $144 \text{ mm}^2$ , per via della struttura esterna). Inoltre verranno utilizzate delle viti per il fissaggio con passo non superiore a 15 mm. Ciò garantisce che il satellite risulti sigillato contro segnali elettromagnetici fino ad una frequenza di 2,4 GHz, frequenza utilizzata dalla mattonella TxRxper comunicare con la stazione terrestre.

### 2.2 Possibili soluzioni

### 2.2.1 Architettura base

Come sopra citato, uno dei compiti delle mattonelle Power Supply è rendere possibile lo scambio di energia tra di esse. Questo scambio può avere luogo in diversi punti della catena di carica della batteria. Osserviamo a tal proposito la figura 2.1. In essa le linee tratteggiate indicano possibili punti di inserzione di un eventuale bus di potenza, mentre con la sigla SPC (Solar Panel Controller) è indicato il caricabatterie.



Figura 2.1. Generazione dell'energia e sua distribuzione

La struttura è replicata in ogni mattonella **Power Supply** e se collegassimo ogni sezione con le sue rispettive controparti otteremmo un fortissimo aumento della ridondanza e della affidabilità al prezzo di elevata complessità. Scopo di questa sezione è analizzare pregi e difetti delle possibili implementazioni.

Per farlo, prendiamo inizialmente in considerazione la mattonella base, visibile in figura 2.2, che presenta elementi comuni a tutte le possibili soluzioni. Essa dispone di un certo numero di celle solari, poste sulla faccia rivolta verso l'esterno della mattonella. La loro efficienza è fortemente influenzata dalla loro illuminazione e dalla temperatura a cui lavorano, quindi la tensione alla quale è erogata la massima potenza cambia in base a questi parametri. Per compensare queste variazioni e



Figura 2.2. Configurazione base della mattonella Power Supply

prelevare sempre la massima potenza disponibile viene utilizzato un circuito caricabatteria che innalza la tensione e insegue il MPP. Di qui in poi ci si riferirà ad esso con la sigla SPC.

Il supervisiore di questo processo è un microcontrollore che segue la carica della batteria, provvede ai compiti di housekeeping, riceve comandi dall'esterno ed eventualmente dirotta la potenza in eccesso, generata dai pannelli solari, su appositi carichi di shunt.

La potenza conservata nelle batterie è resa disponibile al sistema tramite un bus di potenza, sezione 3 della figura 2.1, duplicato per aumentare l'affidabilità. Ognuno dei due bus, che da ora in avanti indicheremo come PDB (Power Distribution Bus), è accoppiato alla batteria tramite uno switch, controllato via software, e con un diodo connesso in serie garantisce che le batterie possano solo erogare corrente verso il carico. Viene bloccata una eventuale carica della batteria dal PDB. Questo diodo consente inoltre, in caso di malfunzionamento del software, di realizzare una connessione di tutte le mattonelle in diodo-OR grazie alla quale la potenza necessaria al satellite è assorbita dalla batteria più carica tra quelle disponibili. Si crea infatti la configurazione visibile in figura 2.3.



Figura 2.3. Connessione a diodo-OR

Infine è certamente necessaria la presenza del bus di comunicazione, anch'esso duplicato per ridondanza.

La tabella 2.1 introduce alle possibilità offerte dalle varie ipotesi, mettendo in risalto quale componente può utilizzare i servizi generati a bordo di una Power Supply. I dettagli delle varie ipotesi verranno analizzati nei paragrafi seguenti.

### 2.2.2 Carica della propria batteria

Nella figura 2.4 è visibile il tipo di connessione più semplice, che chiameremo **ipotesi A**. Le mattonelle sono completamente indipendenti l'una dall'altra e non sono previsti scambi di energia tra di esse.

Inotoci	SPC usufruenti	Batterie usufruenti
Ipotesi	del pannello solare	dell'SPC
A	propria	propria
<i>B</i> .1	propria	propria, adiacente dx e sx
B.2	propria, adiacente dx e sx	propria
<i>C</i> .1	propria	propria e appartenenti alla sotto-rete
C.2	propria e appartenenti alla sotto-rete	propria

Tabella 2.1. Caratteristiche principali delle ipotesi di architettura



Figura 2.4. Schema di connessione per l'ipotesi A

Gli interruttori sono normalmente chiusi: in tal modo, grazie ai diodi, viene sempre fornita potenza dalla batteria più carica tra tutte quelle disponibili.

In questa configurazione, ogni mattonella è isolata dalle altre, cioè ogni pannello solare può caricare soltanto la batteria appartenente alla propria mattonella.

- Vantaggi: la configurazione è semplice ed economica. Il codice di controllo delle singole mattonelle è breve e semplice.
- **Svantaggi**: poca flessibilità: in caso di guasto per una mattonella, non è più possibile utilizzare nessuno dei suoi componenti e la mattonella è interamente persa.

### 2.2.3 Carica delle batterie adiacenti

Variante 1



Figura 2.5. Schema di connessione per l'ipotesi B1

In questa configurazione, definita **ipotesi B.1** (figura 2.5), ogni batteria può ricevere energia dal caricatore della propria mattonella oppure da quello delle celle adiacenti (alla sua destra o sinistra). Si tratta di aggiungere, rispetto alla configurazione di base, per ogni mattonella quattro interruttori (più eventualmente altri quattro per aumentare la ridondanza) e i necessari connettori di interconnessione.

Il microcontrollore, oltre a svolgere le funzioni già descritte nel paragrafo 2.2.1, gestisce anche questi nuovi interruttori, per decidere da quale mattonella deve essere caricata ogni batteria.

In rosso nella figura è evidenziato il SPI (Solar Panel Interconnection), come possiamo osservare esso è composto da almeno due cavi per ogni mattonella Power Supply. Entrambi i cavi sono collegati all'uscita del caricabatteria e vanno a connettersi al polo positivo delle batteria di altre mattonelle.

- Vantaggi: in caso di guasto del caricabatteria, una mattonella può utilizzare quello di una delle Power Supply adiacenti. Questa nuova funzionalità non richiede un bus aggiuntivo né di potenza né di comunicazione. Inoltre lo scambio di informazioni, e quindi il traffico sul bus di comunicazione, non aumenta eccessivamente.
- **Svantaggi**: ogni mattonella puó comunicare solo con le due adiacenti, quindi la flessibilità, pur essendo maggiore che nell'ipotesi A, non è elevatissima. Inoltre, sono necessari componenti aggiuntivi (connettori, interruttori) e viene occupata un'area maggiore del PCB. Si ha anche un certo aumento di traffico sul bus di comunicazione.

#### Variante 2



Figura 2.6. Schema di connessione per l'ipotesi B2

Un' altra configurazione possibile è analoga alla precedente, con la differenza che è il pannello solare di una mattonella ad essere collegato ai caricatori delle celle adiacenti (**ipotesi B.2**).

- Vantaggi: paragonabili all'ipotesi precedente.
- Svantaggi: l'ipotesi B.2 porta con sè gli svantaggi della soluzione B.1. Bisogna però considerare che dovendo il caricabatterie mantenere il MPP in realtime avrà bisogno di dati aggiornati per quanto riguarda i valori di tensione, corrente e temperatura del pannello solare. Qualora sia un caricabatterie posto su un altra Power Supply ad occuparsi di fare ciò, esso avrà bisogno di questi dati e può saturare la capacità del bus di comunicazione. Inoltre poiché la tensione uscente dai pannelli solari è inferiore rispetto a quella in uscita dal caricabatterie, a parità di potenza trasferita, si rende necessario utilizzare cavi con sezione maggiore e questo significa un leggero incremento del peso del satellite. Complessivamente quindi gli svantaggi di questa soluzione sono molti e gravi.

### 2.2.4 Carica di batteria qualsiasi





Figura 2.7. Schema di connessione per l'ipotesi C1

Questa configurazione, che chiameremo **ipotesi C.1**, è la più flessibile: ogni mattonella è collegata a un bus di potenza chimato SPB (Solar Panel Bus) evidenziato in rosso nella figura 2.7) eventualmente ridondato per prevenire guasti. Non si tratta dei PDB, i bus che forniscono energia all'utente. Questo bus è 'dedicato', serve alle varie **Power Supply** per condividere l'energia. Ciò avviene tramite due connettori, uno per fornire energia, l'altro per acquisirla caricando le proprie batterie. In questo modo è possibile caricare qualsiasi batteria con qualsiasi caricabatteria. Rispetto alla configurazione di base delle mattonelle, si aggiunge un SPB (o due), due interruttori (eventualmente duplicati) e gli eventuali connettori di interconnessione. In caso di guasto del SPB, il tutto continua a funzionare come nell'ipotesi A.

Il SPB può anche essere assemblato in modo da creare dei sotto-insiemi di Power Supply interconnesse tra loro, ponendo però un limite al numero di mattonelle che condividono lo stesso SPB. Per esempio nel caso di satellite cubico avente faccia composta da quattro mattonelle, si avrà un massimo di 23 Power Supply (uno slot sarà certamente occupato dalla mattonella TX-RX per le comunicazioni a terra). In tal caso sarà molto più semplice per l'integratore assemblare e testare quattro SPB, ciascuno dei quali connesso a sei mattonelle, che non un unico SPB connesso a 23 Power Supply.

- Vantaggi: la configurazione è estremamente flessibile: nel caso di connessione completa e con le mattonelle rivolte in ognuna delle sei direzioni delle facce di un cubo è sempre disponibile energia per caricare le batterie presenti su una qualsiasi delle mattonella Power Supply presenti a bordo. Inoltre, in caso di guasto di un componente di una mattonella, è possibile utilizzare le parti ancora funzionanti all'interno di essa. La soluzione risulta più snella rispetto a quella dell'ipotesi *B*.
- Svantaggi: sono necessari alcuni componenti aggiuntivi: un bus di potenza (o due), due interruttori per ogni mattonella (o quattro per la ridondanza). Nel caso di un satellite composto da un gran numero di mattonelle Power Supply la cablatura del SPB potrebbe diventare un compito particolarmente gravoso. Dal momento che ogni mattonella deve comunicare con tutte le altre, il traffico sulla rete può aumentare notevolmente.

#### Variante 2

Un' altra configurazione possibile è analoga alla C.1, con la differenza che è il pannello solare di ogni mattonella, anzichè il caricabatteria, ad essere collegato al SPB(**ipotesi C.2**).

• Vantaggi: paragonabili all'ipotesi C.1.

• Svantaggi: sono gli svantaggi già descritti per l'ipotesi *B*.2 uniti agli svantaggi della soluzione *C*.1

### 2.2.5 Analisi dei guasti

Al fine di completare la valutazione su quale ipotesi presenta il miglior compromesso tra pregi e difetti è necessario procedere all'analisi dei guasti, considerare cioè cosa accade alla mattonella **Power Supply** quando uno degli switch, circuitalmente realizzati con transistori MOS, si cortocircuita (C.C.) o rimane interdetto e non risponde più ai comandi (C.A.). Ovviamente questi non sono gli unici inconvenienti ai quali può andare incontro la scheda, ma rappresentano fattori chiave attraverso i quali eleggere la miglior soluzione tra quelle esaminate finora.

Per ognuna delle ipotesi considerate, si avranno due tabelle dei guasti: la prima esaminerà i danni derivanti dalla rottura del componente (interruttore irrimediabilmente in C.A. o C.C.), la seconda invece si occuperà dei danni derivanti da errori di comando del controllore (interruttore erroneamente in C.A. o C.C., ma recuperabile) dovuti a SEU.

#### Ipotesi A

In figura 2.8 sono evidenziati i nomi di riferimento per gli switch di Power Supply in configurazione A. Nella tabella 2.2 sono presentati, con una breve descrizione, gli effetti di un guasto permanente sugli interruttori. In tabella 2.3 gli effetti di guasti temporanei.

	C.C.	C.A.
SW1	-la batteria non può compiere regolari cicli di carica/scarica -in caso di guasto del caricabatteria non è possibile isolarlo dalla batteria	-non è possibile caricare la batteria, tutta la mattonella diventa inutilizzabile
SW2	-il uC non è più in grado di isolare la <b>Power Supply</b> dal PDB	-il corrispettivo PDB non è più servito da questa mattonella, non si tratta di un guasto critico
SW3	-il uC non è più in grado di isolare la <b>Power Supply</b> dal PDB	-il corrispettivo PDB non è più servito da questa mattonella, non si tratta di un guasto critico

Tabella 2.2. Effetti di un guasto permanente per l'ipotesi A



Figura 2.8. Interuttori presenti nella configurazione  ${\cal A}$ 

	C.C.	C.A.
SW1	-la batteria non può compiere regolari cicli di carica/scarica -in caso di sovraccarico del caricabatteria non è possibile isolarlo dalla batteria	-non è possibile caricare la batteria, tutta la mattonella diventa inutilizzabile
SW2	-il uC non è più in grado di isolare la <b>Power Supply</b> dal PDB	-il corrispettivo PDB non è più servito da questa mattonella, non si tratta di un guasto critico
SW3	-il uC non è più in grado di isolare la Power Supply dal PDB	-il corrispettivo PDB non è più servito da questa mattonella, non si tratta di un guasto critico

Tabella 2.3. Effetti di un guasto temporaneo per l'ipotesi A

Gli effetti, sul sotto-sistema **Power Supply**, sono identici ma nella seconda tabella destinati a svanire senza lasciare traccia. Solo nel caso in cui lo SW1 abbia un problema di lunga durata si andrebbe incontro a effetti irreversibili, quali la perdita della batteria.

Tra i guasti permanenti i più critici vi sono quelli riguardanti lo SW1, a causa della mancanza di ridondanza di quel nodo, che causano la perdita immediata della batteria o una grave diminuzione della vita della stessa. A questo problema i satelliti ARaMiS potranno ovviare grazie alla loro intrinseca ridondanza modulare, co una diminuzione però delle prestazioni.

Volendo mettere in pratica l'ipotesi A sarebbe quindi necessario prestare particolare attenzione e cura nella realizzazione dello SW1 e prendere in considerazione l'ipotesi di duplicarlo.

#### Ipotesi B

Nella figura 2.5, a pagina 16, si può osservare come il polo positivo di ogni batteria sia collegato a un deviatore a tre posizioni. Poichè esso sarà realizzato con MOS, i quali possono assumere solo le posizioni di conduzione/interdizione, la figura 2.9 mostra lo schema circuitale per realizzare il deviatore. L'analisi dei guasti dovrà prendere in considerazione ognuno degli interruttori visibili nonché quelli già presenti in figura 2.8.

**Variante 1** La tabella 2.4 riporta l'analisi dei guasti permanenti. Si è deciso di omettere la tabella dei guasti temporanei in quanto è identica, ma con effetti transitori.

	C.C.	C.A.
SW1-SX	-si perde la possibilità di utilizzare il proprio caricabatteria -si rischia di sovraccaricare il caricabatterie adiacente e disturbarne il funzionamento	-si perde la possibilità di utilizzare il caricabatteria adiacente sinistra
SW1-B	-si è obbligati ad utilizzare il proprio caricabatterie,questo potrebbe comportare una cattiva gestione del ciclo di carica/scarica.	-si perde la possibilità di utilizzare il proprio caricabatteria.
SW1-DX	-si perde la possibilità di utilizzare il proprio caricabatteria -si rischia di sovraccaricare il caricabatterie adiacente e disturbarne il funzionamento	-si perde la possibilità di utilizzare il caricabatteria adiacente destro
SW2	-il uC non è più in grado di isolare la Power Supply dal PDB	-il corrispettivo PDB non è più servito da questa mattonella, non si tratta di un guasto critico
SW3	-il uC non è più in grado di isolare la Power Supply dal PDB	-il corrispettivo PDB non è più servito da questa mattonella, non si tratta di un guasto critico

Tabella 2.4. Effetti di un guasto permanente per l'ipotes<br/>iB.1



Figura 2.9. Schema circuitale del deviatore SW1

Osservando la tabella risulta chiaro come nessun guasto, singolamente, sia in grado di rendere inutilizzabili tutti i componenti di una Power Supply. Le prestazioni diminuiscono in alcuni casi, ma sono necessari un minimo di due guasti alla stessa mattonella per perdere la capacità di estrarne potenza.

Si nota inoltre come sia opportuno inserire in serie agli interruttori SW1-DX, SW1-SX e SW1-B dei diodi al fine di evitare di porre in parallelo le tensioni di uscita di due differenti caricabatterie.

**Variante 2** Come già evidenziato nella sezione 2.2.3 a pagina 17 questa soluzione ha dei difetti così gravi da sconsigliare la sua implementazione. Pertanto l'analisi dei guasti non è effettuata. La situazione comunque non è dissimile da quella precedente.

#### Ipotesi C

In questo caso nella tabelle ci riferiremo agli interruttori con i nomi mostrati in figura 2.10. Notiamo che lo SW2 è un deviatore, sarà quindi composto da due interrutori chiamati SW2-SPC e SW2-SPB: il primo collega batteria e caricabatteria, l'altro pone in contatto batteria e SPB.

**Variante 1** Anche in questo caso un singolo guasto non è sufficiente a rendere completamente fuori uso una mattonella **Power Supply** e i guasti temporanei assumono ancora meno importanza.

Tra i vari guasti particolare attenzione va alla condizione nella quale SW2-SPB

	C.C.	C.A.
SW1	-il caricabatteria rimane collegato al SPB e se è difettoso non è possibile isolarlo	-questa Power Supply perde la possibilità di inviare la propria potenza sul SPB, riuscirà solo più a caricare la propria batteria o a ricevere energia dal SPB
SW2-SPC	-non è possibile scollegare il proprio SPC	-è possibile caricare la batteria dal SPB -è possibile utilizzare il proprio caricabatteria commutando opportunamente SW1 e SW2-SPB.
SW2-SPB	-non è possibile isolare questa batteria del SPB	-l'energia del SPB non è piu disponibile
SW3	-il uC non è più in grado di isolare la <b>Power Suppl</b> y dal PDB	-il corrispettivo PDB non è più servito da questa mattonella, non si tratta di un guasto critico
SW4	-il uC non è più in grado di isolare la <b>Power Supply</b> dal PDB	-il corrispettivo PDB non è più servito da questa mattonella, non si tratta di un guasto critico

Tabella 2.5. Effetti di un guasto permanente per l'ipotes<br/>i ${\cal C}.1$


Figura 2.10. Schema e nomi degli switch dell'ipotesi C

è in cortocircuito. Questa condizione potrebbe limitare la possibilità di caricare una delle altre batterie connesse al SPB.

Supponiamo per esempio che si voglia caricare la batteria posta sulla mattonella num. 4 dal caricabatteria della mattonella num. 2: configurati correttamente i vari switch delle diverse **Power Supply**, nel caso di corto dello switch SW2-SPB della mattonella num.1, le batterie 1 e 2 andrebbero a porsi in parallelo, aumentando, nella migliore delle ipotesi, i tempi di carica.

Per tale motivo è consigliabile duplicare l'interruttore SW2-SPB, ossia porne due in serie.

Variante 2 Valgono le considerazioni già effettuate per l'ipotesi B.2.

# 2.3 Gestione del sistema di alimentazione

È necessario stabilire chi governa il processo di scambio dell'energia e il controllo dei cicli di scarica/carica delle batterie. Ci troviamo di fronte a due opzioni:

- controllo centralizzato;
- controllo distribuito.

Entrambi i metodi possono coesistere con tutte le ipotesi valutate sinora. Analiziamoli più in dettaglio. **Centralizzato** Un master monitora lo stato di ogni **Power Supply** e decide quali batterie devono essere utilizzate e quali devono essere ricaricate per mezzo di quale mattonella.

- Vantaggi: il traffico sulla rete non è eccessivo. L'algoritmo di gestione è piú semplice. Inoltre il controllore puó tempestivamente interrompere il traffico nella rete in caso di necessità.
- Svantaggi: è necessaria un'unità centrale di controllo. Quindi si deve aggiungere un componente al di fuori delle schede (componente aggiuntivo, maggiore spazio necessario, inoltre questo componente deve essere necessariamente ridondato) oppure implementare un algoritmo che di volta in volta 'elegga' un master tra i microcontrollori delle varie schede (algoritmo aggiuntivo, maggiore complicazione).

**Distribuito** Sono i microcontrollori stessi delle **Power Supply** a comunicare tra loro e 'accordarsi'.

- Vantaggi: la modularità in questo caso si può dire totale. Non sono necessari componenti aggiuntivi. Non esiste il rischio che il componente centrale cessi di funzionare, compromettendo tutta la struttura. Ogni mattonella è perfettamente autonoma.
- Svantaggi: l'algoritmo di gestione è complesso e richiede un maggiore scambio di informazioni. Il traffico sulla rete è più elevato e cresce notevolmente con il numero di celle.

# Capitolo 3 Architettura prescelta

Durante lo svolgimento della tesi si sono svolte alcune riunioni del gruppo che si occupa del progetto ARaMiS, nelle quali sono state presentate e discusse le ipotesi descritte nel capitolo 2. Dopo aver analizzato i pro e contro di ciascuna configurazione, si è stabilito di utilizzare una variante dell'ipotesi *C*, esposta a pagina 25, la quale presenta degli ottimi compromessi tra complessità e benefici. Si avranno dunque più *tiles* (mattonelle) collegate tra loro da due tipi di bus (SPB e PDB) che raccolgono e ridistribuiscono l'energia. In risposta a precise esigenze di gestione della potenza, presentatesi durante lo svolgimento del lavoro, si è inoltre deciso di modificare l'architettura di cui sopra smembrando il blocco descritto nel capitolo 2 come SPC (Solar Panel Controller) in due parti distinte, di cui una deputata al tracking del MPP (MPP Tracker) e l'altra alla gestione della carica delle batterie (Battery Charger). Il collegamento di ogni mattonella al SPB sarà posizionato a valle del MPPT e a monte del Battery Charger.

Riepiloghiamo le caratteristiche principali di questa configurazione iniziando dai componenti aggiuntivi rispetto alla configurazione base:

- 3 interruttori MOS;
- 1 diodo di protezione;
- 2 cavi di collegamento al SPB;
- 1 connettore.

Agli elementi sopraelencati va aggiunto il cavo che fisicamente costituisce il *Solar Panel Bus.* Quest'ultimo va però conteggiato come uno per ogni sotto-rete del satellite. Le sotto-reti saranno composte da un numero massimo variabile di elementi, fino ad un minimo di una scheda isolata. In figura 3.1 possiamo osservare diversi esempi di raggruppamenti.



Figura 3.1. Possibili configurazioni delle sotto-reti e del SPB

# 3.1 Modello UML

L'UML (Unified Model Language), [11], [7] e [17], è un linguaggio universale per rappresentare qualunque tipo di sistema, sia esso software, hardware o organizzativo. Il suo obiettivo è specificare e documentare le caratteristiche di un sistema.

Modellizzare il sistema Power Supply con l'aiuto degli strumenti forniti dall'UML consente di rendere la scrittura del codice più agevole ed efficiente oltre al fatto che in tal modo è più facile scrivere codice riutilizzabile in futuro, prevedere ed anticipare eventuali carenze del sistema. Nell'ambito di un progetto come ARaMiS, nel quale vari studenti si avvicendano nella stesura del software e diversi gruppi di persone sono impegnati nella realizzazione dei vari moduli, l'utilizzo dei diagrammi UML permette di fornire una chiara idea, a chiunque sia coinvolto nello sviluppo, di tutto l'insieme che costituisce il sistema.

Per fare ciò l'UML si avvale di strumenti grafici, per lo più diagrammi, attraverso i quali esplicare le funzioni strutturali e comportamentali del sistema. I principali diagrammi sono:

- diagramma delle classi: specifica le classi che fanno parte del progetto e le loro interazioni;
- diagramma dei casi d'uso: spiegati nel seguito;
- diagramma collaborazionale: mostra le interazioni che avvengono tra gli oggetti che partecipano a una situazione specifica, mettendo in primo piano le relazioni tra gli oggetti e la loro topologia. I diagrammi di collaborazione sono specialmente adatti a mostrare un particolare flusso o situazione di programma e sono uno dei migliori tipi di diagramma per dimostrare o spiegare rapidamente un processo nella logica del programma.

Nel seguito verrà illustrato il diagramma dei casi d'uso della Power Supply. Si consideri che non sono state trattate le funzioni riguardanti la telemetria, per le quali si veda [13]. Si è inoltre ipotizzata l'esistenza di altri casi d'uso. Si tratta di un diagramma ancora incompleto e soggetto a modifiche.

## 3.1.1 I diagrammi dei casi d'uso

Spesso il primo passo per modellizzare un sistema è definirne i casi d'uso. Questi diagrammi rappresentano i "modi" in cui il sistema può essere utilizzato, ossia, in altre parole, le funzionalità che il sistema mette a disposizione dei suoi utilizzatori.

L'utilizzatore del sistema è chiamato *attore*. I diagrammi descrivono l'interazione tra attore e sistema senza prendere in esame la struttura interna di quest'ultimo (modello *black box*). È importante comprendere che la figura di attore può essere ricoperta non solo da esseri umani, ma anche da altre applicazioni, sistemi o in casi più generale enti o organizzazioni.

In figura 3.2 è presentato il diagramma dei casi d'uso della mattonella Power Supply. In esso possiamo individuare due attori:

- Central Unit (CU): questo ruolo sarà ricoperto dal modulo On Board Computer. Esso provvederà infatti a interpretare e coordinare i comandi provenienti dalla stazione di terra e reindirizzarli ai moduli destinatari del messaggio. Condivide i casi d'uso del modulo Power Supply e ne possiede di specifici.
- **Integrator**: si tratta della figura incaricata di assemblare il satellite per la specifica missione. Alcuni parametri della **Power Supply** devono essere impostati in base alla missione.

## 3.1.2 I corsi di azione base

Al fine di rendere più chiara l'interpretazione dei diagrammi dei casi d'uso ognuno di essi è accompagnato dalla descrizione del proprio *corso d'azione base*. In questi testi attore e sistema dialogano ed il corso d'azione base termina quando sono state fornite tutte le risposte necessarie a soddisfare l'obiettivo dell'attore. il sistema, cioè il modulo **Power Supply**, viene denominato per brevità **PS**.

#### **GestionePan**

- $\mathbf{CU}$  dopo aver acquisito la telemetria di SPB richiede la telemetria del pannello solare.
- **PS** fornisce la telemetria del pannello solare.
- ${\bf CU}$  se il pannello risulta illuminato, domanda a PS se il pannello è connesso aSPB.
- **PS** fornisce la risposta.
- CU se il pannello non è connesso a SPB, ordina che venga connesso.

#### **GestioneBatSPB**

- $\mathbf{CU}$  dopo aver acquisito la telemetria di SPB richiede la telemetria della batteria.
- **PS** fornisce la telemetria della batteria.
- ${\bf CU}\,$ domanda a PS se la batteria è connessa a SPB.

3-Architettura prescelta



Figura 3.2. Diagramma dei casi d'uso di Power Supply

- **PS** fornisce la risposta.
- CU se la batteria è scarica e non è connessa a SPB, ordina che venga connessa. Se la batteria è carica ed è connessa a SPB, ordina che venga disconnessa.

#### <u>GestioneBatPDB</u>

- CU dopo aver acquisito la telemetria di *PDB* richiede la telemetria della batteria.
- **PS** fornisce la telemetria della batteria.
- $\mathbf{CU}$  domanda a PS se la batteria è connessa a PDB.
- **PS** fornisce la risposta.
- CU se la batteria è carica e non è connessa a PDB, ordina che venga connessa. Se la batteria è scarica ed è connessa a PDB, ordina che venga disconnessa.

#### **GestioneShunt**

- $\mathbf{CU}$  dopo aver acquisito la telemetria di SPB richiede la telemetria del pannello solare.
- **PS** fornisce la telemetria del pannello solare.
- CU domanda a PS se lo shunt è connesso a SPB.
- **PS** fornisce la risposta.
- CU agisce secondo 8 casi:
  - 1. la corrente su *SPB* non è eccessiva, il pannello solare non risulta illuminato, lo shunt è disconnesso: non fa nulla;
  - 2. la corrente su *SPB* non è eccessiva, il pannello solare non risulta illuminato, lo shunt è connesso: ordina che venga disconnesso;
  - 3. la corrente su *SPB* non è eccessiva, il pannello solare risulta illuminato, lo shunt è disconnesso: non fa nulla;
  - 4. la corrente su *SPB* non è eccessiva, il pannello solare risulta illuminato, lo shunt è connesso: ordina che venga disconnesso;
  - 5. la corrente su SPB è eccessiva, il pannello solare non risulta illuminato, lo shunt è disconnesso: ordina che venga connesso;
  - 6. la corrente su *SPB* è eccessiva, il pannello solare non risulta illuminato, lo shunt è connesso: non fa nulla;

- 7. la corrente su SPB è eccessiva, il pannello solare risulta illuminato, lo shunt è disconnesso: non fa nulla;
- 8. la corrente su SPB è eccessiva, il pannello solare risulta illuminato, lo shunt è connesso: ordina che venga disconnesso.

#### ConfigInd

**Integrator** configura l'indirizzo di **PS** per permettere la comunicazione con **CU**. Imposta il numero di sotto-reti in modo da assicurare la condivisione di energia.

#### ConfigMod

Integrator imposta i parametri utilizzati da PS.

# 3.2 Pannelli solari e batterie

Una volta effettuata la scelta della configurazione ottima, è stato necessario definire nei particolari la struttura sia della singola mattonella, sia dei bus di collegamento, al fine di giungere a un insieme di specifiche dettagliate. Tale obbiettivo ha inoltre richiesto un maggiore approfondimento nello studio di metodi efficienti di utilizzo dei pannelli solari e delle batterie.

## 3.2.1 Pannelli solari

Per i pannelli solari si è deciso di utilizzare moduli forniti dalla ditta CESI S.p.A. Si tratta di celle all' Arseniuro di Gallio a tripla giunzione, delle dimensioni di  $40 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$  e con un'efficienza del 26%. Le figure 3.3 e 3.4 rappresentano l'andamento della corrente e della potenza in funzione della tensione, in una singola cella. Questi grafici sono stati ricavati dall'interpolazione di dati ottenuti sperimentalmente durante la fase di caratterizzazione (si veda [?]). Si nota dai grafici come il *Maximum Power Point* (MPP), ovvero il punto di lavoro in cui il pannello eroga la massima potenza, si trova a 2,14 V: a questa tensione la corrente erogata è di circa 500 mAe la potenza di 1 W.

Considerati questi valori, si è deciso di utilizzare 6 celle connesse tra loro a formare un pannello, ottenendo così una potenza massima disponibile di 6,5 W. La configurazione sarà mista serie-parallelo (fig. 3.5): in questo modo si otterrà una tensione di circa 6,4 V e una corrente di 1 A, come si può vedere nei grafici in figura 3.6 e 3.7. Ogni mattonella sarà quindi dotata di un *pannello*, ciascun pannello sarà costituito da 6 *celle solari*.

Per ottenere dalle celle solari il massimo della potenza, sarà necessario un dispositivo di tracking del MPP, che faccia in modo di mantenere il punto di lavoro



Figura 3.3. Caratteristica I/V di una cella solare singola

corretto, tenendo conto anche del fatto che il MPP si sposta al variare della temperatura dei pannelli, di circa  $2 \text{ mV}/^{\circ}C$ , come si vede nei grafici 3.8 e 3.9. Tutto questo è compito del *Maximum Power Point Tracker* (MPPT), che verrà descritto più avanti.

## 3.2.2 Batterie

Considerate le esigenze del sistema di distribuzione, è necessario che ogni batteria sia composta da almeno due celle, così da alzare la tensione ed evitare che i bus di distribuzione dell'energia debbano sopportare una corrente troppo elevata. Si è scelto quindi di utilizzare due celle a ioni di litio connesse in serie tra loro. Questo tipo di batterie infatti è quello caratterizzato dalla più elevata densità di energia rispetto alle altre tecnologie, come detto in [?]. È stato selezionato il modello LIC 18650-22 AC prodotto dalla VARTA, di cui in tabella 3.1 sono descritte le principali caratteristiche. Un'ipotesi alternativa sarebbe quella di utilizzare, per ogni batteria, due blocchi, ciascuno composto da due celle in serie. Qesti due blocchi potrebbero



Figura 3.4. Potenza erogata da una cella solare singola



Figura 3.5. Configurazione delle 6 celle solari

essere connessi tra loro direttamente in parallelo oppure tramite interruttori, in modo da poterli utilizzare alternativamente. Questa ipotesi aggrava i problemi di peso e di gestione ma può offrire notevoli vantaggi per quanto riguarda il tempo di vita del satellite. In questo caso, sarebbe necessario determinare l'algoritmo di



Figura 3.6. Caratteristica I/V di un pannello



Figura 3.7. Potenza erogata da un pannello



Figura 3.8. Caratteristica  $\mathrm{I/V}$  di una cella in base alla temperatura



Figura 3.9. Potenza erogata da una cella in base alla temperatura

Tensione nominale	$3,7\mathrm{V}$
Corrente di scarica massima (C)	2,2 Ah
Peso	46 g
Temperatura operativa	$-20 \div 60 ^{\circ}\mathrm{C}$
Diametro	$18,4\mathrm{mm}$
Altezza	$65\mathrm{mm}$

utilizzo più adatto ai fini di sfruttare appieno tutte le celle disponibili.

Tabella 3.1. Specifiche di una cella LIC 18650-22 AC

**Metodo di carica** La carica di una batteria Li-ioni si divide in tre fasi (fig. 3.10) [20]

- Slow Charge: una fase di carica preliminare che utilizza una corrente di C/10;
- Fast charge: una fase di carica a corrente costante, compresa tra C/10 e C/2;
- Constant Voltage: l'ultima fase, a una tensione costante di 4,2 V.

La prima fase consiste in una carica lenta a corrente costante, e avviene solo se la batteria si trova a una tensione minore di 2,5 V. Al raggiungimento di questo valore, si passa alla fase di carica veloce, sempre a corrente costante, fase che termina quando la batteria raggiunge la tensione di 4,2 V. Per finire, la terza fase di carica, a tensione costante, dura finchè la corrente non scende a C/10: a questo punto la batteria viene considerata carica. Proseguire la carica della batteria oltre questo livello ne causa il surriscaldamento e la distruzione, perciò è necessario individuare con precisione il momento in cui la carica va terminata. L'intero processo dura circa tre ore.

Il circuito deputato alla carica delle batterie, che sia un integrato commerciale o progettato dal singolo utente, deve rispettare strettamente le specifiche di tensione sopra indicate: ogni cella deve essere caricata a 4,2 V con una tolleranza massima del 5%, poichè tensioni maggiori causano l'instabilità della cella, mentre tensioni minori ne riducono la capacità. Le specifiche riguardanti la corrente sono invece meno restrittive: una corrente inferiore a C/2 rende comunque possibile una corretta carica della batteria, che tuttavia richiederà più tempo.

**tempo di vita** Un parametro importante nell'analisi del funzionamento di una batteria è il tempo di vita, cioè il numero di cicli di carica/scarica che detta batteria è in grado di sopportare prima di diventare inservibile (si veda [4]). Il data sheet



Figura 3.10. Fasi di carica di una batteria Li-ioni

delle batterie VARTA utilizzate assicura come minimo 300 cicli di carica/scarica, a una corrente di C/2 e una temperatura di 25°C, conservando il 70% della capacità. Tuttavia non è chiaro se un ciclo parziale valga quanto uno completo ai fini della durata di tali batterie, cosa che sarà opportuno verificare in fase sperimentale.

Come mostrato in figura 3.11, il tempo di vita di una batteria a ioni di litio dipende innanzitutto dal *rate* di carica e scarica. Esso tuttavia è influenzato da numerosi altri fattori; al fine di massimizzarlo, è opportuno:

- limitare, durante la carica, il tempo in cui la batteria è sottoposta a una tensione di 4,2 V (terza fase, Constant Voltage), poichè una tensione così alta per tempi prolungati favorisce la corrosione;
- durante la seconda fase (Fast Charge), utilizzare una corrente non troppo elevata, compatibilmente con i campi di valori indicati in precedenza e con il tempo a disposizione. Infatti utilizzare una corrente di carica bassa allunga la durata di questa fase, ma riduce la durata della terza fase, a tensione costante. Questo effetto è positivo perchè, come spiegato nel punto precedente, è proprio durante la terza fase che la batteria subisce più danni.
- evitare che la batteria si scarichi completamente: poichè questo tipo di tecnologia non risente di effetti di memoria, conviene effettuare ricariche frequenti ancorchè parziali, di modo che la tensione di batteria non diminuisca eccessivamente. Quest' ultimo accorgimento risulta valido a patto che un ciclo parziale non equivalga a uno completo ai fini del tempo di vita, il che, come spiegato in precedenza, dovrà essere verificato sperimentalmente.

Inoltre, è importante ricordare che è possibile terminare il processo di carica prima che sia completato e riprenderlo successivamente, senza che questo danneggi in alcun modo la batteria.



Figura 3.11. Longevità di una batteria Li-ioni in funizone del rate di carica o scarica

Vediamo ora le principali cause di riduzione del tempo di vita nelle batterie a ioni di litio ([5]):

- diminuzione della capacità: la quantità di carica che una batteria può contenere decresce gradualmente a causa dell'uso e dell'invecchiamento. All'interno della cella si crea una zona inutilizzabile (detta *rock content*) che non è più possibile 'riempire' con nuova carica, e questa zona cresce gradualmente con il passare del tempo. Quando la capacità scende sotto il 70 – 80%, la batteria è da sostituire. Questo processo è causato dall'ossidazione e in genere si manifesta dopo 2-3 anni di normale utilizzo.
- aumento della resistenza interna: la resistenza interna di una batteria stabilisce la massima corrente che essa è in grado di fornire in breve tempo. Quando questa aumenta, a causa dell'invecchiamento, la batteria può non essere più in grado di fornire una corrente sufficiente, pur essendo abbastanza carica, e in questo caso deve essere sostituita. In figura 3.12 si vede la variazione di resistenza e capacità di una batteria a ioni di litio, in funzione del numero di cicli.
- auto-scarica: si tratta di una perdita di piccole quantità di carica, che va sprecata. Questo fenomeno è maggiore nelle prime 24 ore dopo la carica della



Capacity and Internal Resistance of a Lithium Ion Battery

Figura 3.12. Capacità e resistenza interna in funzione del numero di cicli

batteria (il 5% di carica viene perso in questo modo) e poi si attesta su livelli inferiori. Le cause sono l'invecchiamento, l'utilizzo e l'alta temperatura. In figura 3.13 si vede la percentuale di carica persa per effetti di auto-scarica, in funzione del tempo trascorso dall caricamento della batteria.



Figura 3.13. Percentuale di carica persa per auto-scarica in una batteria a ioni di litio

**problemi di** *unbalance* La carica e scarica di batterie composte da più celle non è banale e presenta alcuni problemi: infatti, se la capacità o la tensione iniziale di due celle sono diverse, anche di poco, può capitare che una delle due venga caricata o scaricata oltre i limiti concessi, e questo ovviamente la rovina e ne riduce il tempo di vita [8]. Per chiarire questo processo si può fare un esempio: immaginiamo una serie di tre celle (fig.3.14), la cui tensione, a carica completa, sia di 4,2V.



Figura 3.14. Batteria composta di 3 celle in serie

Il regolatore dovrà quindi essere impostato a un valore di 12,6 V, e terminerà il processo di carica solo al raggiungimento di questa tensione. Ipotizziamo che una delle tre celle raggiunga prima delle altre la tensione massima, mentre le altre due siano ancora a 4,1 V: la tensione totale è di 12,4 V, perciò il regolatore continuerà a funzionare, sovraccaricando la cella. Stesso ragionamento si può fare riguardo la fase di scarica. Bisogna dire inoltre che tale fenomeno è abbastanza frequente, perché è molto improbabile che tutte le celle utilizzate siano esattamente uguali. Si vedrà in seguito in che modo è possibile ovviare a questo problema.

# 3.3 Specifiche

# 3.3.1 Singola mattonella

Vediamo innanzitutto il dettaglio di una singola mattonella; in figura 3.15 è visibile lo schema della parte a monte del primo bus, composta da:

• pannelli solari (SP): 6 per ogni tile, forniscono una potenza media di 1,5 W. La configurazione consiste in un parallelo di due serie formate da tre pannelli ciascuna, e nel punto di massima potenza (circa 6 W) forniscono in totale, indicativamente, una tensione di 6,3 V e una corrente di 950 mA;

- Maximum Power Point Tracker (MPPT): dispositivo di tracking del Maximum Power Point, si tratta di un regolatore switching con controllo isteretico e uscita in corrente. Il controllo di questo dispositivo può essere autonomo, effettuato da un micro-controllore, o principalmente autonomo ma con possibilità di intervento da parte del micro-controllore;
- Solar Panel Bus (SPB): le correnti uscenti dagli MPPT sono inviate ai rispettivi caricabatteria oppure a questo bus, che è costituito da due fili (positivo e negativo). Le uscite dei vari MPPT sono in corrente, quindi la connessione è in parallelo. Il bus è duplicato ai fini della ridondanza (SPBa, SPBb) e ciascuno è dotato di un diodo zener (Za, Zb) per limitare la tensione, in caso di anomalo malfunzionamento.
- selettore del bus: gli interruttori SW1a e SW1b permettono di selezionare uno dei due SPB, mentre i diodi D1a e D1b fungono eventualmente da ulteriore protezione.
- collegamento diretto con Battery Charger: tramite l'interruttore SW5 e il diodo D5, è possibile collegare direttamente il dispositivo MPPT di una mattonella con il carica batterie della stessa, senza utilizzare i SPB. Questo consente di fare in modo che ogni mattonella possa caricare autonomamente le **proprie** batterie, senza passare attraverso alcun bus.
- carico di shunt: si tratta verosimilmente di un diodo zener (S1) più resistenza (R), e serve a dissipare l'energia in eccesso, come spiegato meglio in seguito. Lo zener è pilotato da interruttori (SW2a, SW2b). Come ulteriore protezione si possono aggiungere i diodi D2a e D2b.

In figura 3.16 si vede la parte di mattonella a valle del SPB. Essa comprende:

- selettore del bus: gli interruttori SW3a e SW3b permettono di selezionare come ingresso uno dei due SPB, mentre i diodi D3a e D3b fungono eventualmente da ulteriore protezione.
- Battery Charger (BC): si tratta di un integrato commerciale o di un circuito creato ad hoc che si occupi della carica delle batterie in modo corretto ed efficiente. Questo tipo di dispositivo può essere disattivato dall'unità di controllo.
- Batterie (BAT): ogni mattonella possiede una batteria (B), che può essere composta da più celle. Ogni cella è in Li-polimero, ha una tensione nominale di 3,7 V e una capacità di 2,2 Ah;



Figura 3.15. Mattonella: parte a monte del SPB

- selettore del bus: gli interruttori SW4a e SW4b permettono di selezionare uno dei due PDB, mentre i diodi D4a e D4b fungono eventualmente da ulteriore protezione.
- Power Distribution Bus (PDB): raccoglie l'energia delle batterie per distribuirla agli utilizzatori. Ha due fili ed è duplicato per ridondanza (*PDBa*, *PDBb*).



Figura 3.16. Mattonella: parte a valle del SPB

### 3.3.2 Tensioni e correnti

A questo punto è stata descritta nei particolari la struttura di una singola mattonella, che si può vedere, schematizzata, in figura 3.17.

Da quanto stabilito in questo capitolo, possiamo dedurre le specifiche di corrente e tensione nelle varie sezioni, con rifermiento alla figura 3.17:

• sezione A: ipotizzando di lavorare sul MPP e che il pannello si trovi in piena illuminazione (angolo, ecc??), si avrà una tensione massima di 6 V e una corrente massima di 950 mA. Il caso opposto è quello in cui il pannello si trova in ombra, e si hanno tensione e corrente nulle;



Figura 3.17. Schema a blocchi della singola mattonella

- sezione B: il circuito che si occupa del MPPT dovrà fornire una tensione superiore agli 8,4 V, necessaria alla carica delle batterie. Si ipotizza quindi di lavorare in questa sezione a 9 V, il che presuppone una corrente massima di 670 mA;
- sezione C: la tensione all'ingresso della batteria è di 8,4 V come indicato nel punto precedente. La corrente non può superare il valore di C/2 nè abbassarsi al di sotto di C/10, quindi si ha una corrente massima di 1,1 A e una minima di 220 mA (questo naturalmente a patto che il BC sia attivo. Se disattivato, la corrente sarà ovviamente nulla);
- sezione D: la tenisone nominale della batteria è di 7,4 V, la corrente massima che essa può fornire corrisponde alla capacità, 2,2*A*. Considerando una cella come scarica quando essa raggiunge la tensione di 2,5 V possiamo dire che la tensione minima della batteria è di 5 V.

Sezione	$V_{MAX}$	$V_{min}$	$I_{MAX}$	$I_{min}$
А	6 V	$0\mathrm{V}$	$950\mathrm{mA}$	0 A
В	9 V	$0\mathrm{V}$	$670\mathrm{mA}$	0 A
С	$8,4\mathrm{V}$	$8,4\mathrm{V}$	1,1 A	$220\mathrm{mA}$
D	$7,4\mathrm{V}$	$5\mathrm{V}$	$2,2\mathrm{A}$	0 A

In tabella 3.2 è riassunto schematicamente quanto sopra descritto.

 Tabella 3.2.
 Specifiche di tensione e corrente

# 3.3.3 Telemetrie

In figura 3.15 e in figura 3.16 sono anche indicati i vari punti dove verranno effettuate le misure necessarie per l'housekeeping della mattonella. In particolare si andrà a misurare, per ciascuna mattonella:

- $T_{sp}$ : temperatura dei pannelli solari;
- $I_{sp}$ : corrente di uscita dei pannelli solari;
- $V_{sp}$ : tensione dei pannelli solari;
- $I_{mp}$ : corrente di uscita del MPPT;
- $V_{mp}$ : tensione di uscita del MPPT;

- *I*<sub>spo</sub>: corrente di ingresso del Battery Charger;
- $V_{spo}$ : tensione di ingresso del Battery Charger;
- $T_b$ : temperatura della batteria;
- $I_b$ : corrente della batteria;
- $V_b$ : tensione della batteria;

Inoltre verranno effettuate misure singole di tensione sul SPB e una sul PDB.

## 3.3.4 Struttura generale

In figura 3.18 si vede in generale l'architettura del sistema: ogni mattonella è posta in collegamento con le altre tramite il SPB e il PDB, l'utente potrà decidere a seconda delle necessità il numero di tile da utilizzare.

Vediamo ora una casistica che illustra schematicamente alcune delle possibilità offerte dal sistema fin qui descritto:

- ogni pannello carica la batteria appartenente alla propria mattonella; la corrente in eccesso viene dissipata sullo shunt di una mattonella in ombra (figura 3.19);
- 2. un pannello carica una batteria appartenente ad un'altra mattonella; la eventuale corrente in eccesso viene dissipata sullo shunt di una mattonella in ombra (figura 3.20);
- 3. un pannello carica sia la propria batteria che quella appartenente ad un'altra mattonella; l'eventuale corrente in eccesso viene dissipata sullo shunt di una mattonella in ombra (figura 3.21);
- 4. due pannelli appartenenti a due mattonelle diverse caricano la stessa batteria, appartenente a una delle mattonelle; l'eventuale corrente in eccesso viene dissipata sullo shunt di una mattonella in ombra (figura 3.22);
- 5. le batterie sono tutte cariche: in questo caso, l'energia erogata dai pannelli deve essere dissipata sullo shunt delle mattonelle in ombra, per non surriscaldare le celle solari (figura 3.23);

# 3.4 Criticità

Elenchiamo ora le principali criticità che emergono dallo studio dell'architettura sopra descritta:



Figura 3.18. Struttura generale



Figura 3.19. Caso 1



Figura 3.20. Caso 2



Figura 3.21. Caso 3



Figura 3.22. Caso 4



Figura 3.23. Caso 5

Energia in eccesso è necessario dissipare l' eventuale energia in eccesso proveniente dai pannelli solari, perchè altrimenti essa danneggerebbe i pannelli stessi, scaldandoli troppo, o le batterie, che possono essere caricate per un tempo limitato e con una corrente massima di C/2. Pertanto si prevede di inserire un carico di shunt (in figura 3.15 rappresentato da uno zener + resistenza) per ogni mattonella, ciascuno comandato da un interruttore. Ovviamente conviene utilizzare di volta in volta gli shunt situati sulle mattonelle non illuminate, per migliorare la dissipazione di energia. Inoltre, gli zener presenti su SPBa e SPBb ( $Za \in Zb$  in figura) faranno da ulteriore dispositivo di sicurezza in caso di emergenza, limitando la tensione sui bus.

**Battery Charger** si tratta di un dispositivo caricabatterie, che rispetti le specifiche elencate nella sezione 3.2.2. Tale dispositivo può essere:

- un circuito progettato ad hoc in risposta alle specifiche esigenze della situazione. I vantaggi di questa scelta sono la flessibilità del dispositivo e la precisa rispondenza alle specifiche; tuttavia questa soluzione richiede tempo e maggiore impegno per la simulazione, progettazione e collaudo.
- un dispositivo commerciale per la carica di batterie al litio. La scelta dovrà cadere su un integrato atto a caricare almeno due celle e che abbia la parte di potenza (regolatore Buck) esterna, in modo da poter applicare la protezione dal latch-up alla sola parte di controllo (ricordiamo che dispositivi di questo genere sono realizzati in tecnologia C-MOS). I vantaggi di questa soluzione sono un minore impiego di tempo per la progettazione e l'utilizzo di un dispositivo già collaudato e quindi sicuramente funzionante. Tuttavia si è inevitabilmente vincolati dalle caratteristiche del componente, che non possono essere modificate.

**Bilanciamento di celle in serie** come spiegato in precedenza, la carica e scarica di più celle a ioni di litio poste in serie porta con sè problemi di *unbalance*. Questa situazione può essere parzialmente corretta effettuando un *matching* sulle celle, ovvero misurando la reale capacità di ogni cella e accoppiando le due che presentano i valori di capacità più vicini. Questo riduce il problema ma non lo elimina, perchè con l'uso le capacità delle varie celle subiscono una deriva e quindi lo sbilanciamento può comunque presentarsi dopo un certo periodo di utilizzo.

Una scelta più sicura consiste nello sviluppare un sistema di bilanciamento. Vi sono diverse possibili realizzazioni di un tale circuito, ne presentiamo qui alcune [18]:

1. **serie/parallelo** Le celle sono caricate in parallelo, poi al termine della fase di carica, vengono poste in serie tramite switch (fig. 3.24).

- vantaggi: semplicità del circuito, carica completa di ogni cella;
- svantaggi: collegamenti complicati, utilizzo di numerosi switch, necessità di un caricatore per ogni cella.



Figura 3.24. Metodo serie/parallelo

- 2. equalizzazione resistiva Le celle sono caricate in serie, quando una di esse raggiunge il massimo della carica viene in parte scaricata tramite un resistore in parallelo. Al termine di varie ripetizioni di questo processo, tutte le celle risultano completamente cariche (fig. 3.25).
  - vantaggi: semplicità del circuito;
  - svantaggi: dissipazione di energia, processo lento.



Figura 3.25. Metodo di equalizzazione resistiva

- 3. equalizzazione tramite condensatori Le celle sono caricate in serie, ognuna di essa è continuamente messa in parallelo con una adiacente (inferiore o superiore) tramite un condensatore. Così le tensioni di tutte le celle sono equalizzate (fig.3.26).
  - vantaggi: niente perdite resistive, niente trasformatori;
  - svantaggi: uso di SPDT.



Figura 3.26. Metodo di equalizzazione tramite condensatore

- 4. **shunt della cella** Le celle sono caricate in serie. Quando una cella raggiunge la tensione finale, il corrispondente regolatore di shunt inizia la conduzione e previene il sovraccarico della cella (fig.3.27).
  - vantaggi: semplicità di carica di celle con capacità anche molto diverse;
  - svantaggi: circuito complicato, perdite di shunt.

Per implementare uno qualunque di questi circuiti di bilanciamento, è naturalmente necessario monitorare lo stato delle batterie: tensione, corrente di carica e scarica, stato di carica ecc. Esistono sul mercato integrati denominati *Gas gauge* che si occupano proprio di questo. Questi dispositivi sono in grado di comunicare a un microcontrollore una serie di valori utili per il monitoraggio delle batterie. Per contro, sono in genere piuttosto complicati e richiedono numerosi componenti esterni.

**serie del PDB** per porre in serie più batterie appartenenti a diverse mattonelle, al fine di innalzare la tensione disponibile, occorre separare le masse, ma questo prevede l'isolamento galvanico delle batterie da tutto il circuito a monte. Sono state individuate tre possibili soluzioni per realizzare l'isolamento galvanico:



Figura 3.27. Metodo di shunt della cella

- soluzione 1: interposizione di un isolatore a monte del Battery Charger, nel punto denominato SPO (Solar Panel Output), come mostrato in figura 3.28.
- soluzione 2: inserimento di un isolatore a valle della batteria, nel punto denominato PDI (Power Distribution Input), come descritto in figura 3.29.
- soluzione 3: utilizzo di un trasformatore al posto dell' induttore nello switching del Battery Charger, che da Buck diventa di tipo Forward (fig. 3.30).

Per quanto riguarda le soluzioni 1 e 2, che presuppongono l'uso di un isolatore, bisogna considerare alcuni problemi. Innanzitutto, nel caso della soluzione 2 le potenze in gioco sono piuttosto alte (fino a 21,84 W), il che rende necessario un dispositivo piuttosto ingombrante e complicato. Inoltre un convertitore DC/DC isolato è un regolatore switching con topologia Flyback, Forward o simili, che richiede l'utilizzo di un trasformatore. Dal momento che il dispositivo deve poter essere protetto dal latch-up, la parte di potenza dovrà necessariamente essere esterna ad esso. In più, per avere una tensione regolata all'uscita dell'isolatore, è necessario riportare dei feedback al dispositivo, cosa che viene fatta in genere tramite un terzo avvolgimento o un secondo trasformatore.

Un'alternativa può essere un integrato che non richieda alcun feedback, fornendo però una tensione di uscita non perfettamente regolata, cosa che, nel caso della soluzione 2, non dovrebbe creare problemi in quanto il PDB non è comunque regolato. La soluzione 2 sembrerebbe anche la più comoda,perchè rende possibile decidere anche all'ultimo di inserire l'isolatore senza che questo comporti modifiche al resto della mattonella. Per contro, una volta inseriti gli isolatori, i morsetti flottanti che si ottengono vanno collegati per forza in serie: infatti, mentre collegare in serie le uscite degli isolatori è sempre possibile, un eventuale collegamento in parallelo potrebbe risultare problematico se non vi fosse una limitazione di corrente all'interno di essi. D'altronde l'isolatore viene inserito proprio per poter mettere in serie le batterie, quindi se si desidera metterle in parallelo è sufficiente utilizzare la versione non isolata della mattonella.

La soluzione 3, pur non richiedendo l'utilizzo di un isolatore, presenta comunque il problema dei feedback (tensione e corrente della batteria) che il Battery Charger deve ricevere: questi si potrebbero riportare tramite optoisolatori, ma è necessario tenere conto del consumo di questi dispositivi e della necessità di amplificatori.



Figura 3.28. Isolamento galvanico: soluzione 1



Figura 3.29. Isolamento galvanico: soluzione 2



Figura 3.30. Isolamento galvanico: soluzione 3
# Capitolo 4 Progetto del modulo Power Supply

Fino a questo momento sono stati realizzati due prototipi di scheda Power Supply: il primo prototipo è basato sull'architettura di base ed è stato utilizzato per testare il funzionamento del MPPT, del micro-controllore di bordo e dei circuiti di telemetria [13]. Successivamente è stato realizzato un secondo prototipo, volto a collaudare i possibili metodi di carica delle batterie e lo scambio di energia tra le mattonelle. Per raggiungere questi obiettivi si è deciso di progettare separatamente i blocchi che compongono la mattonella, così da rendere più semplice sia la realizzazione che il collaudo; inoltre si è potuto tenere conto, nella progettazione del secondo prototipo, dei risultati derivanti dal collaudo del primo, e questo ha influenzato alcune scelte circuitali e permesso di evitare errori commessi in precedenza. In particolare il circuito di tracking del MPP, sebbene testato e funzionante nel primo prototipo, ha dovuto subire alcune modifiche poiché nel frattempo sono mutate le specifiche di tensione e corrente.

In questo capitolo si farà una descrizione in termini generali del primo prototipo, per poi soffermarsi sulla progettazione e realizzazione del secondo, evidenziando le modifiche apportate rispetto alla precedente realizzazione.

# 4.1 Primo prototipo

Nella figura 4.1 è visibile uno schema a blocchi generale della scheda:

- i blocchi con sfondo rosso rappresentano componenti esterni ad essa, i quali si interfacciano mediante dei connettori;
- i blocchi con contorno verde utilizzano solo componenti bipolari o comunque non con tecnologia C-MOS. Non sono quindi affetti dal fenomeno del latch-up;
- il contorno rosso sottolinea la presenza di dispositivi C-MOS e la necessità di proteggerli dal latch-up;

• la figura rappresenta con linee spesse le piste di alimentazioni percorse da correnti considerevoli e con linee sottili i segnali principali.

Gli schematici del circuito sono consultabili nell'appendice A. Esaminiamo ora i vari elementi che compongono la scheda:

**Convertitore switching con controllo isteretico** Lo scopo del convertitore switching è quello di estrarre potenza dai pannelli solari e, in questo primo prototipo, caricare direttamente la batteria. Inoltre esso deve assicurare che i pannelli solari lavorino sempre nel punto di massima potenza, quindi funge anche da MPPT. Il circuito ha subito alcune modifiche durante la progettazione del secondo prototipo, prevalentemente a causa delle mutate specifiche di potenza, per questo motivo il suo funzionamento verrà spiegato dettagliatamente più avanti, durante la trattazione del secondo prototipo.

**Regolatore lineare di tensione** La tensione di alimentazione, per tutti i dispositivi logici e analogici sulla scheda, è fornita da un regolatore lineare. Esso dovrà erogare 3,3 V e una corrente di almeno 50 mA. La tensione da regolare è quella di batteria, pertanto dovrà essere in grado di operare con una tensione d'ingresso compresa tra i 5 e gli 8,4 V.

**Riferimento di tensione** La tensione di riferimento è di 2,5 V ed è generata da un apposito integrato, che riceve come alimentazione la tensione di batteria oppure i 3,3 V del regolatore lineare.

**Micro-Controllore** I compiti di supervisione, comunicazione, controllo e telemetria saranno svolti da un  $\mu C$  low-power. La sua caratteristica principale deve essere un consumo bassisimo di potenza ed il software deve garantire un uso estensivo della capacità di stand-by. Per la gestione del protocollo il software segue le indicazioni del modello UML, paragrafo 3.1.

**Telemetrie** La mattonella **Power Supply** deve monitorare alcuni dei suoi segnali interni. Tra questi ricordiamo:

- relativi al pannello solare:
  - tensione;
  - corrente;
  - temperatura;
- relativi alla batteria:



Figura 4.1. Schema a blocchi del primo prototipo Power Supply

- tensione;
- corrente di carica;
- corrente di scarica;
- temperatura;

**Circuito anti Latch-Up** I dispositivi realizzati in tecnica CMOS sono soggetti al fenomeno del *latch-up*, come spiegato in 1.3.3. Un opportuno circuito anti latch-up dovrà essere inserito tra regolatore di tensione e dispositivo CMOS, al fine di interrompere l'alimentazione nel caso in cui l'evento si verficasse. Esaurito un lasso di tempo sufficientemente ampio l'alimentazione del circuito verrà ripristinata.

## 4.2 Secondo prototipo

La progettazione del secondo prototipo ha previsto, come primo passo, la realizzazione di una scheda contenente il solo convertitore switching, convenientemente modificato rispetto al primo prototipo, più i componenti strettamente necessari al suo funzionamento. Gli schematici del circuito sono consultabili nell'appendice B.

#### 4.2.1 Alimentazione e tensioni di riferimento

**Regolatore lineare di tensione ZSR330** I componenti a bordo della mattonella Power Supply sono alimentati da una tensione di 3,3 V. Si è scelto di utilizzare il componente ZSR330 di cui ricordiamo le principali caratteristiche:

- tecnologia bipolare;
- protezione termica e dai corto circuiti integrata;
- massima corrente di alimentazione  $600 \,\mu\text{A}$ ;
- package SOT223;
- drop-out minimo di 1,7 V.

Altre caratteristiche del componente sono indicate nella tabella 4.1, la quale riporta le stesse caratteristiche ma dopo un processo di *derating*. Si tratta di una riduzione intenzionale degli stress termici ed elettrici ai quali vengono sottoposti i componenti al fine di allungarne la vita utile. Per il calcolo del *derate* si sono utilizzati i dati forniti in [2].

Il circuito è completato dall'aggiunta di due capacità di by-pass, l'una all'ingresso del regolatore, l'altra all'uscita, entrambe del valore di  $1 \,\mu$ F. Calcoliamo ora la

Caratteristica	Nominale	Ridotta
Massima potenza dissipabile $@25$ °C	$2\mathrm{W}$	$1,5\mathrm{W}$
Corrente d'uscita	200 mA	160 mA
Massima tensione d'ingresso	$20\mathrm{V}$	18 V

Tabella 4.1. Specifiche nominali e ridotte dello ZSR330.

potenza dissipata nel caso peggiore. Consideriamo quindi una corrente di 50 mA ed un drop-out di:

$$V_{do} = V_{bat} - V_D - V_o = 8,5 \,\mathrm{V} - 0,2 \,\mathrm{V} - 3,3 \,\mathrm{V} = 5 \,\mathrm{V}$$

$$(4.1)$$

Dove si è considerata la caduta  $V_D$  sul diodo Schottky. Dal datasheet del componente risulta una resistenza termica di 50 °C/W, possiamo perciò stimare un aumento di temperatura di:

$$\Delta T = V_{do} \cdot I_{ZSR330} \cdot R_{th} = 5,75 \,\mathrm{V} \cdot 40 \,\mathrm{mA} \cdot 48 \,^{\circ}\mathrm{C/W} = 10 \,^{\circ}\mathrm{C} \tag{4.2}$$

La potenza massima dissipata sul dispositivo è di 200 mW. I dati precedenti, relativi all'innalzamento della temperatura di giunzione, si riferiscono al dispositivo operante in condizioni *terrestri*. Certamente in assenza di atmosfera, alla quale cedere calore, la  $R_{th}$  sarà maggiore di quanto dichiarato dal costruttore. Solo attraverso accurate analisi termiche del *package* e conducendo delle prove termiche nel vuoto si potrebbe stimare la  $R_{th}$  in assenza di atmosfera. Si ritiene comunque che il dispositivo operi in condizioni *safe*, poichè dissipa al più un decimo della potenza dissipabile.

**Riferimento di tensione** La tensione di riferimento è generata dal dispositivo AD680:

- tensione di alimentazione da 4,5 a 36 V;
- architettura interna *band gap*;
- taratura laser in fabbrica,  $V_o = 2.5 \text{ V} \pm 5 \text{ mV}$ ;
- coefficiente di temperatura di  $2 \,\mathrm{mV}/^{\circ}\mathrm{C}$ ;
- basso consumo:  $250 \,\mu\text{A}$ ;
- package 8 SOIC.

Non sono necessari componenti esterni se non due capacità di stabilizzazione del valore di  $0.1 \,\mu\text{F}$  all'ingresso e di 50 nF all'uscita.

## 4.2.2 Maximum Power Point Tracker (MPPT)

In questa sezione ci si occuperà del progetto del convertitore switching, che in questo secondo prototipo non carica più direttamente le batterie (vi sarà un apposito circuito per svolgere questo compito), ma funge solo da dispositivo di tracking del MPP. Elenchiamone le caratteristiche e funzionalità:

- A causa della ridotta dimensione dei pannelli è necessario ottimizzare il processo di estrazione dell'energia. Pertanto, dovendo alzare la tensione d'ingresso ed ottenere alta efficienza di conversione, la topologia a cui ricorrere sarà un *convertitore switching boost*;
- La tensione d'ingresso ha un range di  $0 \div 6$  V;
- La corrente d'ingresso ha un range di  $0 \div 0.95$  A;
- La caratteristica di uscita è quella indicata qualitativamente in figura 4.2: l'iperbole si sposta al variare della potenza entrante. Corrente e tensione di uscita sono dati dall'intersezione tra la caratteristica di uscita del boost e la caratteristica V/I del carico (per esempio, in caso di carico resistivo, una retta). Quindi i valori di tensione d'uscita e corrente d'uscita dipendono da due parametri, che definiscono il punto di lavoro dello switching: potenza di ingresso e carico. Questo concetto è illustrato graficamente in figura 4.3, prendendo come esempio alcuni carichi resistivi.



Figura 4.2. Caratteristica di uscita di un convertitore switching

La topologia scelta per il convertitore switching soddisfa i requisiti richiesti di trasferimento di energia, alta efficienza e innalzamento di tensione. Inoltre l'uscita



Figura 4.3. Punto di lavoro di un convertitore switching

del boost è ad alta impedenza, quindi assimilabile a un generatore di corrente. Il boost è dotato di un controllo di tipo isteretico, diverso dai controlli di tipo convenzionale, per esigenze di adattamento alle particolari caratteristiche dei pannelli solari.

**Comparatore isteretico** In figura 4.4 si può osservare lo schema elettrico del controllo isteretico.

Bisogna considerare che la tensione di ingresso dello switching non è fissa, ma assume valori variabili: proprio questa tensione viene utilizzata per il controllo, che per questo motivo si definisce di tipo *feedforward*. La tensione proveniente dai pannelli solari, opportunamente scalata tramite partitore, è inviata a un comparatore isteretico, che la confronta con un riferimento dato, in questo caso la tensione generata dal dispositivo AD680.

Il comparatore è di tipo isteretico non invertente. La finestra di isteresi è centrata sulla tensione alla quale i pannelli, illuminati, forniscono la massima potenza possibile (v. figura 3.7): questo avviene ad una tensione di 6,4 V. I limiti inferiore e superiore di tale finestra sono dati dalle tensioni alle quali la potenza erogata diminuisce del 5% (v. fig. 3.7). Nella figura 4.5 si osserva la transcaratteristica del comparatore: in ascissa si ha la tensione di ingresso dello switching, in ordinata una tensione di controllo che andrà a comandare i MOS driver. I valori utilizzati sono riportati di seguito:

- $V_L = 6.1 \, \mathrm{V}$
- $V_H = 6,6 \,\mathrm{V}$
- $V_{ref} = 6,35 \,\mathrm{V}$



Figura 4.4. Schema elettrico del comparatore isteretico e dei MOS driver



Figura 4.5. Transcaratteristica del comparatore isteretico non invertente

•  $V_{cc} = 3,3 \,\mathrm{V}$ 

Si riportano ora le equazioni per il dimensionamento del comparatore, sempre facendo riferimento alla figura 4.4:

$$R_{eq} = R_7 / / R_4 \tag{4.3}$$

$$V_H = \frac{V_{ref} \cdot (R_{eq} + R_6)}{R_6}$$
(4.4)

$$V_L = \frac{V_{ref} \cdot (R_{eq} + R_6) - V_{cc} R_{eq}}{R_6}$$
(4.5)

$$\frac{\Delta V_{in}}{V_{cc}} = \frac{R_{eq}}{R_6} \tag{4.6}$$

Dopo l'esecuzione dei calcoli e il dimensionamento delle resistenze, sono state eseguite numerose simulazioni del circuito tramite il CAD LTSpice e i valori sono stati modificati fino a trovare sperimentalmente quelli che più si avvicinano al risultato desiderato. I valori delle resistenze così ricavati sono esposti in tabella 4.2.

La tensione in uscita al comparatore isteretico comanda i MOS driver, due transistori bipolari il cui compito è attivare e disattivare il transistore N-MOS che è l' interruttore del boost. In particolare, se l'uscita del comparatore è bassa, la tensione sul gate del MOS sarà bassa anch'essa, e l'interruttore aperto, e viceversa. Il comparatore isteretico ha un' uscita di tipo *open-collector*.

Resistore	Valore
$R_4$	$24{,}9\mathrm{K}\Omega$
$R_7$	$40,2\mathrm{K}\Omega$
$R_6$	$350\mathrm{K}\Omega$
$R_1$	$3,3{ m K}\Omega$

Tabella 4.2. Valori di resistenze per il controllo isteretico

**Variazione del MPP** I valori di  $V_L$  e  $V_H$  utilizzati corrispondono alla situazione in cui l'angolo di illuminazione del pannello è di 90° (massima illuminazione). Al variare di quest'angolo, varia anche il MPP, è quindi necessario realizzare un sistema di *tracking* per fare in modo che il punto di lavoro del pannello solare sia in ogni caso in prossimità del MPP.

Il metodo utilizzato nel primo prototipo sfrutta la temperatura del pannello solare: infatti essa varia con il grado di illuminazione e, una volta conosciuto il rapporto tra variazione di temperatura e variazione in tensione del MPP, è possibile spostare opportunamente la tensione di riferimento del comparatore isteretico e così centrare la finestra di isteresi sul nuovo punto di massima potenza.

Durante la realizzazione del secondo prototipo, è stato deciso di inserire nella mattonella **Power Supply** un sensore di sole: si prevede quindi di progettare un nuovo sistema di MPPT, basato direttamente sull'illuminazione del pannello solare.

**Boost switching** Nella figura 4.6 si osserva lo schema elettrico del convertitore boost.

Grazie al controllo isteretico di cui sopra, il valore della tensione di ingresso rimane all'interno di un range determinato dalla finestra di isteresi del comparatore. Infatti, partendo da una situazione in cui lo switch sia chiuso, si ha una corrente all'interno dell'induttore che cresce linearmente, con la conseguenza di abbassare la tensione su  $C_{in}$ . Quando tale tensione diventa inferiore a  $V_L$ , l'uscita del comparatore isteretico commuta e lo switch si apre. A questo punto la corrente utilizzata dal circuito a valle non è piú prelevata dai pannelli solari ma viene fornita dall'induttore, cosa che permette a  $C_{in}$  di caricarsi. La sua tensione infatti si innalza fino a raggiungere il valore di  $V_H$ : a quel punto, lo switch si chiude e il ciclo ricomincia. Esaminando l'andamento nel tempo della corrente nell'induttore, e con riferimento alla figura 4.7, si possono definire:

- $T_1$ : periodo di tempo in cui l'N-MOS è chiuso e la corrente crescente;
- $T_2$ : periodo di tempo in cui l'N-MOS è aperto e la corrente decrescente;



Figura 4.6. Schema elettrico switching boost



Figura 4.7. Andamento nel tempo della corrente dell'induttore

- $T = T_1 + T_2;$
- $I_{pk}$ : corrente massima nell'induttore, raggiunta al termine di  $T_1$ ;
- $I_{in}$ : corrente di ingresso.

Questo nell'ipotesi di lavorare in una condizione di soglia tra CCM (Continuous Current Mode) e DCM (Discontinuous Current Mode).

Il primo passo per dimensionare correttamente il boost è determinare la corrente massima nell'induttore, che si ha quando  $V_{in} = V_L$ . È necessario prendere in considerazione il caso pessimo, cioè quello in cui, in corrispondenza del valore di  $V_L$ , i pannelli erogano la massima corrente. Inoltre bisogna tenere presente che, a causa del condensatore in ingresso  $C_{in}$ , la corrente di ingresso rappresenta il valor medio di quella che si trova sull'induttore: considerando la forma d'onda mostrata in figura 4.7, si ha che  $I_{pk} = 2I_{in}$ . La corrente massima così determinata è:

$$I_{pk\ MAX} = 2,04\,\mathrm{A}$$
 (4.7)

Tuttavia conviene effettuare un derating del valore, per sicurezza, e considerare:

$$I_{pk\ MAX} = 2.5 \,\mathrm{A}$$
 (4.8)

Da simulazioni e calcoli eseguiti nei lavori precedenti [6], è noto che  $T_2 > T_1$ , perciò come valore di partenza si impone

$$T_2 = \frac{T}{2} \tag{4.9}$$

inoltre si stima una frequenza di commutazione dello switch:

$$f_{sw} = 200 \,\mathrm{kHz} \Rightarrow T = 5 \,\mu\mathrm{s} \tag{4.10}$$

da cui si ricava

$$T_2 = 2.5 \,\mu \mathrm{s}$$
 (4.11)

A questo punto è possibile calcolare il valore massimo dell'induttore affinché le condizioni imposte vengano rispettate, tramite la formula

$$L_{MAX} = \frac{(V_{out} - V_{in}) \cdot T_2}{I_{pk}}$$
(4.12)

considerando che, per garantire che l'induttore si carichi e scarichi ai valori desiderati anche nel caso pessimo, è necessario utilizzare il valore minimo di  $(V_{out} - V_{in})$  e che come tensione di uscita si considera la tensione del probabile punto di lavoro, che è di 9 V. I valori utilizzati per i calcoli saranno quindi:

•  $V_{in MAX} = V_{H MAX} = 6,6 \text{ V};$ 

• 
$$V_{out} = 9 \,\mathrm{V}$$

Si ottiene così il valore massimo di induttanza:

$$L_{MAX} = 4,64\,\mu\text{H} \tag{4.13}$$

Viene naturalmente scelto un valore inferiore:  $L = 4 \,\mu\text{H}$ . A questo punto conviene ricalcolare il Duty Cycle tenendo conto del valore corretto di induttanza:

$$T_{1\ MAX} = \frac{I_{pk} \cdot L}{V_{in\ min}} = 1,63\,\mu s$$
 (4.14)

$$T_{1\ min} = \frac{I_{pk} \cdot L}{V_{in\ MAX}} = 1,07\,\mu\text{s}$$
(4.15)

$$T_{2 MAX} = \frac{I_{pk} \cdot L}{V_{out} - V_{in MAX}} = 4,31 \,\mu \text{s}$$
(4.16)

$$T_{2 min} = \frac{I_{pk} \cdot L}{V_{out} - V_{in min}} = 2,49 \,\mu \text{s}$$
(4.17)

Quindi il limite massimo di durata del periodo è

$$T_{MAX} = T_{1\ MAX} + T_{2\ MAX} = 5,94\,\mu\text{s} \tag{4.18}$$

il che porta la frequenza di switching ad un valore sicuramente superiore ai 168 kHz, mantre il limite minimo di durata del periodo è

$$T_{min} = T_{1\ min} + T_{2\ min} = 3,56\,\mu\text{s} \tag{4.19}$$

il che porta la frequenza di switching ad un valore sicuramente inferiore ai 280 kHz.

Per quanto riguarda l'induttore, resta da calcolare la corrente efficace che dovrà passarvi attraverso, quindi che esso dovrà essere in grado di sopportare. Si ha:

$$I_{L\ rms\ MAX}^2 = I_{DC}^2 - I_{AC\ rms}^2 = I_{in\ MAX}^2 - \frac{I_{in\ MAX}^2}{12} = 0,953\,\text{A}^2 \tag{4.20}$$

quindi

$$I_{L \ rms \ MAX} = 976 \,\mathrm{mA} \tag{4.21}$$

Passiamo ora al dimensionamento del diodo  $D_1$ : si ipotizza una  $V_{\gamma}$  di circa 0,3 V, dal momento che si pensa di utilizzare un diodo *schottky*. Quindi si ha:

$$\overline{I}_{D_1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{I_{pk} \cdot T_2}{T_1 + T_2} = 1,51 \,\mathrm{A}$$
(4.22)

essendo il diodo attivo soltanto durante il tempo  $T_2$ ;

$$V_{D_1} = V_{out} - V_{in} + V_{\gamma} = 3,19 \,\mathrm{V} \tag{4.23}$$

$$P_{D_1} = \overline{I}_{D_1} \cdot V_{\gamma} = 453 \,\mathrm{mW} \tag{4.24}$$

L'interruttore, costituito da un N-MOS, è attivo, cioè chiuso, durante il periodo di tempo  $T_1$ , perciò si ha:

$$\overline{I}_{MOS} = \frac{1}{2} \cdot \frac{I_{pk} \cdot T_1}{T_1 + T_2} = 572 \,\mathrm{mA} \tag{4.25}$$

$$\overline{V}_{MOS\ MAX} = V_{in} + V_{out} + V_{\gamma} = 16,34\,\mathrm{V} \tag{4.26}$$

Naturalmente, dove è possibile intervenire, conviene minimizzare il consumo di potenza, quindi in questo caso si impone:

$$P_{MOS} = \overline{I}_{mos}^2 \cdot r_{dson} = 10 \,\mathrm{mW} \tag{4.27}$$

ottenendo così un'indicazione sul limite massimo della  $r_{dson}$ :

$$r_{dson} = \frac{P_{MOS}}{\overline{I}_{mos}^2} = 30 \,\mathrm{m}\Omega \tag{4.28}$$

Restano da dimensionare  $C_{in} \in C_{out}$ : in questo caso i parametri da tenere in considerazione sono la corrente efficace e la tensione che i condensatori devono sopportare; i calcoli si eseguono sui valori reali e poi si effettua un derating per rendere il circuito più robusto.

$$I_{C_{in} \ rms \ MAX} = \frac{I_{pk}}{\sqrt{3}} = 588 \,\mathrm{mA}$$
 (4.29)

Derating:  $I_{C_{in} rms} = 1 \text{ A};$ 

$$V_{C_{in}\ MAX} = V_{in\ MAX} = 6,68\,\mathrm{V} \tag{4.30}$$

Derating:  $V_{C_{in} MAX} = 10 \text{ V};$ 

$$I_{C_{out}\ rms\ MAX}^2 = I_{D_1\ rms\ MAX}^2 - I_{out\ min}^2$$
(4.31)

$$I_{D_1 \ rms \ MAX}^2 = \frac{I_{pk}^2}{3} \cdot D_{MAX}$$
(4.32)

$$I_{D_1 \ rms \ MAX}^2 = 2,52 \,(\mathrm{A})^2 \tag{4.33}$$

$$I_{C_{out}\ rms\ MAX} = 1,02\,\mathrm{A}$$
 (4.34)

Derating:  $I_{C_{out} \ rms \ MAX} = 1.5 \text{ A};$ 

$$V_{C_{out}\ MAX} = 9\,\mathrm{V} \tag{4.35}$$

Derating:  $V_{C_{out} MAX} = 20 \text{ V}.$ 

E anche necessario imporre un ripple massimo in uscita, che in questo caso viene fissato a 100 mV; se ne ricava un'indicazione sulla massima resistenza equivalente serie di  $C_{out}$  (ESR):

$$\frac{V_{ripp}}{I_{pk}} = ESR = 40 \,\mathrm{m}\Omega \tag{4.36}$$

Derating:  $ESR = 20 \,\mathrm{m}\Omega$ .

**Scelta dei componenti** Una volta dimensionati i componenti, è necessario operare una scelta, considerando le caratteristiche e i costi di quelli presenti sul mercato. Chiaramente, l'obiettivo principale è ridurre al minimo i consumi di potenza, senza perdere in prestazioni. In questa fase sono stati selezionati più componenti che da data sheet risultassero rispondenti alle specifiche, al fine di testarli poi durante il collaudo. Nelle tabelle 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 sono indicate le caratteristiche principali dei componenti selezionati.

A questo punto è possibile calcolare, in base ai componenti scelti, i vari consumi di potenza e quindi l'efficienza teorica del convertitore. Nelle tabelle 4.7 e 4.8 sono visibili i risultati di suddetti calcoli, rispettivamente nel caso ottimo e nel caso pessimo, considerando  $P_{in} = 6.4$  W.

**Simulazione** Per simulare il circuito si è utilizzato il software LTSpice della Linear Technology, appositamente progettato per facilitare la simulazione di regolatori switching. Questo programma contiene al suo interno una libreria, basata su componenti realmente esistenti sul mercato, in grado di ricreare anche gli effetti dei parametri parassiti, permettendo di ottenere in simulazione risultati molto vicini a quelli reali.

Nome componente	Valore $[\mu H]$	Toll.	$I_{MAX}[A]$	$ESR[m\Omega]$
ELLCTV4R7N	4,7	30%	5,2	9,9

Tabella 4.3. Principali caratteristiche degli induttori selezionati

Nome componente	$I_F[\mathbf{A}]$	$I_R[\mathrm{mA}]$	$V_F[V]$	$V_{R MAX}[V]$	Tipo
CRS06CT - ND	1	0,06	0,32	20	Schottky
20Bq030PbF	2	0,1	0,4	30	Schottky
B320A	3	0,5	0,4	20	Schottky

Tabella 4.4.	Principali	caratteristiche	di	diodi	selezionati
--------------	------------	-----------------	----	-------	-------------

Nome componente	$I_D[\mathbf{A}]$	$V_{DS MAX}[V]$	$r_{dson MAX}[\Omega]$	$V_{th}[V]$
NTA4153N	0,915	20	0,275	0,76
<i>IRF</i> 7821	1,5	30	0,34	0,5 - 1,5
RTF015N03	$13,\!6$	30	0,009	1

Tabella 4.5. Principali caratteristiche degli N-MOS selezionati

Nome componente	Valore $[\mu F]$	$I_{rms\ MAX}[A]$	$V_{MAX}[V]$	$ESR[m\Omega]$
TPSE476 * 025 # 0080	47	1,436	25	80
TPSV686 * 025 # 0080	68	1,768	25	80
TPSD156 * 035 # 0100	15	1,225	35	100
TPSE336 * 035 # 0100	33	1,285	35	100

Tabella 4.6. Principali caratteristiche dei condensatori selezionati

Componente	$P_{diss}[\mathrm{mW}]$	$P_{diss}/P_{in}$
L	9,43	$0,\!147\%$
$D_1$	483	$7{,}5\%$
$C_{in}$	345	$5{,}3\%$
$C_{out}$	345	$5{,}3\%$
N-MOS	2,94	$0,\!045\%$
totale	1185	18,2%

Tabella 4.7. Potenza dissipata dal boost: caso ottimo

Componente	$P_{diss}[\mathrm{mW}]$	$P_{diss}/P_{in}$
L	9,43	$0,\!147\%$
$D_1$	604	9,4%
$C_{in}$	432	6,75%
$C_{out}$	432	6,75%
N-MOS	111	1,7%
totale	1588	24,7%

Tabella 4.8. Potenza dissipata dal boost: caso pessimo

Per riuscire ad effettuare simulazioni corrette, è stato necessario creare un circuito che, in LTSpice, imitasse il più fedelmente possibile la caratteristica di uscita del pannello solare, che si vede in figura 3.6. A questo scopo, si è utilizzato il circuito di figura 4.8, dove i valori dei componenti sono stati modificati fino ad ottenere, tramite successive simulazioni, una caratteristica che si avvicinasse il più possibile a quella reale di una cella solare.



Figura 4.8. Circuito per la simulazione della caratteristica di una cella solare

Le figure 4.9 e 4.10 mostrano il confronto tra il comportamento in uscita di una cella solare e quello ottenuto in simulazione.

A questo punto si è potuto simulare il circuito con diverse resistenze di carico e verificarne il funzionamento.

### 4.2.3 Battery Charger (BC)

Come spiegato nel capitolo 3, per la carica delle batterie la scelta può cadere su un dispositivo commerciale già pronto oppure su un circuito progettato *ad hoc*.



Figura 4.9. Caratteristica  $\mathrm{I/V}$ di una cella solare: confronto con la simulazione



Figura 4.10. Potenza erogata da una cella solare: confronto con la simulazione

Entrambe le scelte presentano pro e contro, che andiamo a esaminare in questa sezione:

Integrati per la carica delle batterie Sul mercato esistono numerosi integrati che si occupano di caricare una o più batterie in modo ottimale. A titolo di esempio si riportano le principali caratteristiche dell'integrato LTC4002 della Linear Technology, di cui in figura 4.11 si può vedere un'applicazione per la carica di due celle in serie. [12]



Figura 4.11. *LTC*4002

Come si vede dalla figura 4.11 la parte di potenza, uno switching con topologia Buck, è esterna all'integrato, il quale può così essere efficacemente protetto tramite un circuito anti latch-up. La corrente di carica viene monitorata grazie a una resistenza di sense tra i piedini BAT e SENSE; la stessa resistenza permette anche di programmare la corrente di carica con un'accuratezza di  $\pm 5\%$ . La tensione per la fase finale di carica è impostata all'interno del dispositivo con un'accuratezza di  $\pm 1\%$ . La carica inizia nel momento in cui la tensione di alimentazione dell'integrato diventa maggiore di quella rilevata sulla batteria di almeno 0,5 V. È possibile utilizzare un termistore esterno, montato sul piedino NTC, per monitorare la temperatura: se essa sale al di sopra del livello impostato, la carica si interrompe e riprende automaticamente quando i valori tornano accettabili. Quando la corrente di carica raggiunge un valore inferiore al 10% della corrente massima impostata, la carica si considera terminata: questo è indicato dalla tensione sul pin  $\overline{CHRG}$ , che si abbassa. A questo punto il dispositivo va in sleep mode. È anche possibile disattivare il dispositivo in qualsiasi momento, forzando a zero il pin COMP. Per ricominciare un ciclo di carica, è sufficiente rimuovere e poi riapplicare la tensione di ingresso oppure disattivare e poi riattivare il dispositivo tramite il piedino COMP. Un nuovo ciclo di carica inizia automaticamente quando la tensione rilevata sulla batteria scende al di sotto dei 4,05 V per cella.

Si elencano alcuni altri tipi di integrati presenti sul mercato, analoghi a quello sopra descritto in quanto a funzionalità e opzioni:

- MAX1737, Maxim; [14]
- MCP73841/2/3/4, Microchip; [15]
- bq2954, Texas Instrument. [24]

L'utilizzo di un dipositivo come questo porta con sè numerosi vantaggi: si riduce il tempo necessario per la progettazione e si ha a disposizione un integrato già collaudato e funzionante, in grado di svolgere anche molte funzioni di monitoraggio della batteria. Per contro, possono insorgere alcuni problemi:

- stabilità: la corrente di carica viene programmata tramite una resistenza. Tuttavia, a causa dell'architettura stessa della mattonella Power Supply, la corrente disponibile per la carica della batteria varia nel tempo. Nel caso in cui la corrente disponibile sia minore di quella impostata dalla resistenza, vi è il rischio che la maggior corrente assorbita rispetto a quella generata faccia ridurre la tensione sul bus fino ad ottenere il blocco del dispositivo. A questo punto, l'integrato smette di assorbire corrente, la tensione sul bus si alza nuovamente, il caricabatteria riprende a funzionare e il ciclo ricomincia, creando una situazione di instabilità;
- punto di lavoro del MPPT: come spiegato in precedenza (fig. 4.2), la caratteristica di uscita del convertitore switching boost è una sorta di iperbole, che si sposta in funzione della potenza in gioco. Per poter caricare la batteria, è necessario che la tensione d'ingresso del BC si mantenga al di sopra degli 8,45 V, quindi è indispensabile mantenere il convertitore in un preciso punto di lavoro. Tuttavia per fare questo sarebbe necessario un controllo sulla tensione di alimentazione del BC ( $V_{CC}$ ), ma questo non è previsto dal costruttore.

**Circuito appositamente progettato** In figura 4.12 è visibile un circuito che rispetta le specifiche di carica delle batterie a ioni di litio: si tratta sostanzialmente di un regolatore lineare di tensione dotato di alcuni controlli aggiuntivi.

Vediamo il funzionamento dei vari elementi:

•  $D_1$ : diodo zener che funge da riferimento di tensione  $(V_{ref})$ ;



Figura 4.12. Circuito progettato per la carica della batteria

- $U_1$ : comparatore: confronta la tensione di ingresso  $(V_{SPO})$ , opportunamente scalata tramite partitore, con la tensione di riferimento. Lo scopo è mantenere il valore di  $V_{SPO}$  costante a  $V_{BATT} + (0,5 \div 1)$  V, infatti il comparatore controlla un N-MOS  $(M_1)$  in zona lineare, che funziona come una resistenza variabile: se  $V_i > V_{ref}$ , la resistenza equivalente del MOS viene abbassata, quindi scorre più corrente e la tensione scende. Se  $V_{SPO} < V_{ref}$ , accade l'inverso;
- $U_3$ : sensore di corrente INA138: serve a monitorare la corrente di batteria, tramite la resistenza di sense  $R_5$ . In uscita presenta una tensione proporzionale alla corrente rilevata;
- $U_2$ : comparatore: confronta la tensione di uscita dell'INA138 con la tensione di riferimento e agisce su  $M_1$  per limitare la corrente di carica della batteria;
- $U_4$ : comparatore: confronta la tensione di batteria, opportunamente scalata tramite partitore, con la tensione di riferimento, allo scopo di limitare la tensione sulla batteria.

Questo circuito, rispetto a un integrato commerciale, ha il vantaggio della flessibilità, rendendo possibile attuare un controllo sulla tensione  $V_{SPO}$ , in modo da mantenere lo switching nel punto di lavoro desiderato, e in più non presenta problemi di stabilità. Vi sono tuttavia alcuni svantaggi:

- collaudo: il circuito deve essere simulato, realizzato e collaudato, cosa che richiede tempo e lavoro;
- fasi di carica: il circuito limita efficacemnte tensione e corrente, ma non tiene conto del fatto che la carica della batteria si divide in varie fasi. Sarebbe necessario poter attivare e disattivare opportunamente i comparatori  $U_1 \in U_4$ a seconda delle necessità del momento;
- accuratezza: è necessario verificare che la corrente e soprattutto la tensione siano limitate con sufficiente accuratezza, in base alle specifiche della batteria;
- terminazione della carica: manca, nel circuito, un controllo che interrompa il processo di carica una volta terminato (timer, sensore di temperatura).

#### 4.2.4 Kill Switch

La mattonella **Power Supply** dovrà essere dotata di un interruttore attraverso il quale togliere l'alimentazione a tutti i componenti.

Questa funzionalità è richiesta da tutte le agenzie di razzi vettori: per questioni di sicurezza si richiede che tutto il carico trasportato, tipicamente composto da



Figura 4.13. Posizione del kill switch rispetto alla scheda Power Supply

un satellite principale più altri cinque o sei satelliti più piccoli, sia completamente disattivato e non emetta alcun tipo di EMI.

La figura 4.13 mostra dove deve essere posizionato il *kill switch* rispetto ai componenti esterni e alla scheda Power Supply.

Esaminando il problema del kill switch nel contesto generale di più schede connesse tramite bus, come spiegato nel capitolo 3, una soluzione possibile è quella indicata in figura 4.14.



Figura 4.14. Disposizione dei bus per l'inserimento del Kill Switch

Per rendere più chiaro il concetto, in figura sono stati omessi alcuni elementi (diodi, interruttori) nonché la ridondanza dei bus. La soluzione illustrata prevede che ogni bus (sia SPB che PDB) sia costituito da tre fili: il positivo (in figura denominato A per il SPB e D per il PDB), il negativo, connesso a massa (in figura denominato B, in comune tra SPB e PDB) e un terzo filo (in figura denominato C, in comune tra SPB e PDB) normalmente connesso a B, ma che si può scollegare tramite kill switch, e in questo modo disconnette le masse di tutti i pannelli solari e le batterie della sotto-rete in questione. Grazie a questa soluzione circuitale, si ha un solo kill switch per ogni sotto-rete di mattonelle.

## 4.3 Realizzazione

Entrambi i prototipi sono stati realizzati su PCB monofaccia sviluppati senza l'ausilio di ditte esterne.Per ragioni inerenti alla tecnologia utilizzata, le dimensioni massime consentite per la scheda sono  $12 \text{ mm} \times 7,5 \text{ mm}$ , mentre la larghezza minima delle piste è di 0,3 mm. La selezione di componenti COTS (Commercial Off-The-Shelf) è avvenuta su internet, consultando i siti dei principali distributori di componenti elettronici. Al fine di minimizzare i costi si è utilizzato, per quanto possibile, componenti disponibili come *sample* gratuiti. In particolare si sono utilizzati sample della **Texas Instrument** e della **Maxim**.

La realizzazione degli schematici e dei circuiti stampati è stata portata a termine con l'ausilio della suite di programmi della Mentor Graphics <sup>TM</sup>. In particolare i programmi utilizzati sono:

- *Library Manager*, per la creazione dei componenti da utilizzare non disponibili in libreria e la gestione di componenti già esistenti;
- Design Capture, per la realizzazione degli schematici del progetto;
- Expedition PCB, per la disposizione dei componenti e per la loro connessione.

Il montaggio dei componenti sul prototipo e i tutti i relativi test sono stati svolti nel Laboratorio Hardware del dipartimento.

# Capitolo 5 Collaudo e misure

Verranno ora descritti i test effettuati sul secondo prototipo. Il susseguirsi dei paragrafi segue l'ordine temporale con il quale si è montato e testato il circuito. Prima del montaggio e delle misure sono state effettuate verifiche delle connessioni sul PCB.

Come già discusso nel capitolo 4, le misure si riferiscono alla condizione di massimo illuminamento del pannello. Nella realizzazione definitiva del MPPT, bisognerà prevedere una variazione del punto (V,I) di massima potenza legata all'illuminazione effettiva.

# 5.1 Alimentazione e tensioni di riferimento

Al fine di effettuare i test sotto riportati è stato necessario montare i seguenti componenti:

- $U_4$ : integrato ZSR330;
- $U_5, U_6$ : diodi B320A;
- $C_5$ ,  $C_7$ : condensatore di bypass da 1  $\mu$ F;
- $U_3$ : integrato AD680;
- $J_3$ ,  $J_5$ : jumper;
- $C_6$ ,  $C_8$ : condensatore di bypass da  $0.1 \,\mu\text{F} = 50 \,\text{nF}$ ;

## 5.1.1 Alimentazioni

Il principale componente da testare è lo ZSR330. Si è proceduto in tal modo:

- 1. Si è collegato al connettore del pannello solare,  $J_2$ , un generatore di tensione in grado di erogare una corrente di almeno 100 mA, applicando una tensione dvariabile tra 6 e 10 V.
- 2. Si è misurata la tensione di uscita del regolatore lineare ZSR330. Essa deve valere  $3.3 V \pm 0.1 V$  ed essere priva di disturbi ed oscillazioni.

Con un potenziometro si è simulato un carico variabile. È stato verificato che la tensione d'uscita rimane entro i limiti previsti fino a una corrente di 100 mA.

## 5.1.2 Tensione di riferimento

Vari circuiti del prototipo Power Supply utilizzano un tensione di riferimento di 2,5 V fornita dall'integrato AD680. I passi seguiti per il collaudo sono i seguenti:

- 1. Si è collegato connettore dpannello solare,  $J_2$ , un generatore di tensione in grado di erogare una corrente di almeno 100 mA, applicando una tensione di  $6 \div 10$  V.
- 2. Si è misurata la tensione di uscita del generatore integrato di tensione di riferimento AD680. Essa deve valere 2,5 V ed essere priva di disturbi ed oscillazioni.

La tensione generata è stabile a 2,5 V ed il consumo dell'integrato AD680 è di circa 1 mA. Si è inoltre verificato che l'integrato non funziona correttamente se alimentato direttamente dal regolatore lineare ZSR330 (jumper  $J_2$ ) in quanto la tensione di 3,3 V non è sufficiente.

## 5.2 Switching isteretico

## 5.2.1 Tensione di ingresso

Al fine di verificare il buon funzionamento dello switching è necessario fornire energia attraverso un generatore che simuli le caratteristiche del pannello solare.

Durante lo svolgimento di questa tesi non erano disponibili i pannelli solari previsti per il montaggio finale sulla mattonella Power Supply. Per il collaudo del primo prototipo sono stati utilizzati pannelli con prestazioni e costo nettamente inferiori, collegandone quattro unità in parallelo. I pannelli solari di prova sono stati posizionati su una struttura in cartone, avente la funzione di supporto per i pannelli stessi e per una ventola di raffreddamento. L'utilizzo di quest'ultima si è reso necessario per non provocare un eccessivo aumento della temperatura sulla superficie dei pannelli. Come fonte di luce si è utilizzato un illuminatore da studio da 1,25 kW (IFF Q1250), in grado di riprodurre lo spettro solare. Per il collaudo del secondo prototipo non è stato possibile utilizzare gli stessi pannelli di prova, in quanto la potenza in gioco è notevolmente maggiore e i suddetti pannelli non avrebbero permesso di verificare appieno il funzionamento e la robustezza dei componenti. Per questo motivo ci si è serviti di un generatore di tensione impostato sulla tensione alla quale si ha il MPP del pannello (6,4 V) e limitato in corrente a 1 A, la massima corrente erogata dal pannello. In questo modo la caratteristica di uscita del generatore risulta simile a quella del pannello solare.

## 5.2.2 Carico di prova

Al connettore batteria del prototipo,  $J_1$ , si è collegata una scheda millefori sulla quale si è provveduto a realizzare un serie di carichi resistivi, in grado di dissipare un'opportuna potenza, selezionabili tramite jumper. Le resistenze equivalenti così create assumono valori compresi tra  $10 \Omega e 100 \Omega$ . In parallelo al carico resistivo si è collegata una capacità complessiva di 16,5 mF, che modellizza, seppur in maniera rudimentale, la batteria.

## 5.2.3 Comparatore isteretico

Prima di procedere con il collaudo dello switching è opportuno assicurarsi del corretto funzionamento del comparatore isteretico e dei MOS driver, entrambi visibili in figura 4.4. A questo scopo, si è proceduto innanzitutto al montaggio dei componenti (alcuni valori si discostano leggermente da quelli progettati, a causa delle diverse disponibilità dei componenti in laboratorio):

- $U_2$ : comparatore LMV331;
- $R_3$ ,  $R_5$ : resistenze da 24,3 K $\Omega$ ;
- $R_5$ : resistore da 40,2 K $\Omega$ ;
- $R_6$ : resistore da 4,7 K $\Omega$ ;
- $R_1$ : resistore da 348 K $\Omega$ ;
- $R_7$ : resistore da 1  $\Omega$ ;
- $C_4$ : condensatore di bypass da  $0,022 \,\mu\text{F}$ ;
- $Q_1$ : transistor bipolare MMBT2222ALT1;
- $Q_2$ : transistor bipolare MMBT2907ALT1;

A questo punto sono stati effettuati i seguenti passi:

- 1. Si è collegato al connettore del pannello solare,  $J_2$ , un generatore di funzioni e si è applicata un sinusoide avente ampiezza di picco pari 1 V, offset di 6,5 V e frequenza compresa tra 100 Hz e 400 kHz.
- 2. Si è verificato che la tensione di uscita del comparatore LMV331 commuti quando la tensione sinusoidale in ingresso attraversa le soglie progettate. Ciò deve accadere a tutte le frequenze indicate al punto precedente.
- 3. Si è verificato che la tensione degli emettitori di  $Q_2$  e  $Q_3$  commuti in fase con la tensione d'uscita del comparatore. A livello basso, la tensione misurata è di a 0,2 V, a livello alto è di 2,8 V. Si è verificato che per questo nodo tempi di salita e discesa siano inferiori ad 1  $\mu$ S.

V <sub>in H</sub>	$6,\!68\mathrm{V}$
$\rm V_{in\ L}$	$6,04\mathrm{V}$
$V_{ctrl H}$	$2,8\mathrm{V}$
$V_{ctrl \ L}$	$0,2\mathrm{V}$
${ m T_{rise}}$	$170\mathrm{nS}$
$\mathrm{T}_{\mathrm{fall}}$	$90\mathrm{nS}$

Tabella 5.1. Misure relative al controllo isteretico

Si è verificato il corretto funzionamento per tutte le frequenze. In tabella 5.1 sono riassunte le caratteristiche misurate del controllo isteretico.

Successivamente è stato montato il MOS  $M_1$ , ovvero l'interruttore del boost. Si è scelto il transistor IRF7821, in quanto il più robusto tra quelli selezionati. È tuttavia insorto un problema: la tensione  $V_{ctrl \ H}$  in uscita dai transistori  $Q_1 \ e \ Q_2$  $(V_{GS})$  è di soli 2,8 V, cosa che provoca un notevole aumento della  $r_{DS \ on}$ , come si vede in figura 5.1 [10].

Questo a sua volta causa un consumo di potenza eccessivo (ricordiamo che  $P_{MOS} = \overline{I}_{mos}^2 \cdot r_{dson}$ ) e la distruzione del componente.

Per ovviare provvisoriamente a questo problema, si è provveduto ad alimentare i MOS driver con una tensione di 5 V, esterna alla scheda. Questo ha portato la tensione  $V_{GS}$  al valore di 4,48 V, ridimensionando il valore di  $r_{DS on}$ , come si vede in figura 5.2, e consentendo il funzionamento del dispositivo.

### 5.2.4 Switching

Per collaudare il circuito switching sono stati montati i seguenti componenti (alcuni valori si discostano leggermente da quelli progettati, a causa delle diverse disponibilità dei componenti in laboratorio):



Figura 5.1.  $r_{DS \ on}$  del IRF7821 in funzione di  $V_{GS}$ 



Figura 5.2.  $r_{DS\ on}$  del IRF7821 in funzione di  $V_{GS}$ 

- $L_1$ ,  $L_2$ : a causa della non disponibilità dell'induttore ELLCTV4R7N da 4  $\mu$ H, ne sono stati montati due dello stesso tipo, in parallelo, da 10  $\mu$ H ciascuno;
- $C_2$ ,  $C_1$ : condensatori da 10  $\mu$ F e 22  $\mu$ F;
- $C_3$ : condensatore da 11  $\mu$ F;

- $U_1$ : diodo B320A;
- $R_4$ : resistore da 390  $\Omega$ .

A questo punto sono stati eseguiti i seguenti passi:

- 1. Si è allestito un banco di misura per monitorare costantemente tensione e corrente del pannello solare e tensione e corrente sul carico. Questo perchè la topologia Boost del circuito rende critico il suo comportamento con carico resistivo che tende ad infinito. La tensione d'uscita del convertitore DC-DC in tal caso tende a crescere fino al danneggiamento dei componenti, tipicamente il condensatore di uscita  $C_1$ . Se questa condizione si dovesse verificare, è necessario interrompere immediatamente il collaudo e verificare tutti i componenti e le varie connessioni.
- 2. Si è collegato al connettore  $J_2$  il generatore di tensione e al connettore  $J_1$  il carico di prova.
- 3. Si sono Verificate le forme d'onda sui condensatori  $C_2 \in C_1$ , sul drain dell' N-MOS e sul carico.
- 4. Si sono misurati tensione e corrente del pannello solare e tensione e corrente sul carico. Si è Calcolata l'effecienza del convertitore.

Si sono svolte diverse prove utilizzando vari componenti, con vari abbinamenti fra essi, al fine di individuare una configurazione che fornisse le migliori prestazioni.

La frequenza di switch varia in base alle condizioni operative e alla capacità di  $C_2$ . Sono state osservate frequenze intorno ai 100 kHz, inferiori a quelle previste da progetto. Questo perché il valore dell'induttore utilizzato è di 5  $\mu$ H, mentre quello calcolato in fase di progetto è di 4  $\mu$ H. Dal momento che

$$T_1 = \frac{I_{pk} \cdot L}{V_{in}} \tag{5.1}$$

$$T_2 = \frac{I_{pk} \cdot L}{V_{out} - V_{in}} \tag{5.2}$$

al crescere del valore di L, aumenta il periodo e diminuisce la frequenza.

Il convertitore lavora in modo discontinuo, con un *Duty Cycle* del 30% circa. La caratteristica di uscita, visibile in figura 5.3, corrisponde all'incirca a un'iperbole, come previsto teoricamente in 4.2.2.

Ricordando la definizione di efficienza di un convertitore DC-DC:

$$\eta = \frac{P_o}{P_i}$$



Figura 5.3. Caratteristica di uscita

si è calcolata, considerando le misure presentate, una efficienza media dell' 85%. L'efficienza massima raggiunta è dell' 86,11%. Bisogna tuttavia considerare che alcune parti del circuito, come spiegato in precedenza, sono alimentate esternamente, quindi l'efficienza reale dello switching sarà leggermente minore. Si noti inoltre come essa varia al variare della tensione d'uscita, del carico e della potenza d'uscita del circuito (fig. 5.4, 5.8, 5.9).

Indicando con M il rapporto:

$$M = \frac{P_o}{P_i}$$

si è verificata la relazione:

$$M = \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot R \cdot D^2}{f_{sw} \cdot L}}}{2}$$

visibile in figura 5.8, nella quale è disegnata con una linea continua la relazione teorica dello switching progettato. Con i cerchi sono invece presentati i dati raccolti,



Figura 5.4. Efficienza in funzione della tensione di uscita

i quali seguono l'andamento teorico.

Il ripple misurato sulla tensione di uscita è di circa  $100\,\mathrm{mV},$  quindi conforme alle specifiche.

Infine, si è verificata la variazione della potenza di uscita in funzione del carico e della tensione di uscita, come si vede nei grafici in figura 5.8 e 5.9.



Figura 5.5. Efficienza in funzione del carico



Figura 5.6. Efficienza in funzione della potenza di uscita


Figura 5.7. Andamento di  $M = \frac{V_o}{V_i}$  al variare del carico



Figura 5.8. Potenza di uscita in funzione del carico



Figura 5.9. Potenza di uscita in funzione della tensione di uscita

## Capitolo 6 Conclusioni

Partendo dall'esperienza maturata con il progetto PiCPoT si è iniziato lo sviluppo di un nuovo progetto per satelliti modulari: ARaMiS. In particolare questo elaborato si concentra sull'architettura modulare e sull'unità Power Supply, dedicata alla generazione e gestione dell'energia.

Si sono analizzate le possibili architetture e i vantaggi offerti da ognuna di esse, con particolare riguardo alla condivisione degli elementi funzionali e conseguente aumento di ridondanza. È stata poi selezionata l'architettura che meglio rispondesse alle esigenze del sistema, fornendo una sufficiente flessibilità senza tuttavia risultare eccessivamente complessa.

In seguito, sono state definite con precisione le specifiche riguardanti il singolo modulo Power Supply, con un approfondito studio delle caratteristiche dei pannelli solari e delle batterie. In questa fase del lavoro, sono state individuate numerose problematiche inerenti la realizzazione dei vari moduli e la loro interconnessione, e sono state esaminate le varie soluzioni possibili.

Successivamente si è progettato e realizzato un primo prototipo di modulo Power Supply, in grado di generare l'energia e inviare ad altri moduli (in particolare OBC) i dati telemetrici occorrenti. Il prototipo è stato testato e risulta funzionante.

A questo punto, la variazione di alcune specifiche di progetto e la necessità di testare accuratamente alcune soluzioni alle problematiche emerse in precedenza nonché l'interazione tra più moduli **Power Supply**, ha reso necessaria la creazione di un secondo prototipo. Al momento, è stato realizzato e testato il nuovo convertitore switching, che risulta funzionante. I prossimi passi saranno:

- realizzare e collaudare i diversi circuiti previsti per la carica delle batterie e selezionare il più adeguato;
- realizzare diversi prototipi identici e funzionanti;
- connettere tra loro i vari prototipi e verificare che l'energia venga scambiata

correttamente (carica della batteria propria e di altre tile, dissipazione della potenza in eccesso, coretta distribuzione dell'energia dalle varie mattonelle ai carichi);

• sviluppare un software di controllo per le sotto-reti di mattonelle Power Supply.

Questo lavoro mi ha consentito di partecipare in prima persona alla realizzazione di un progetto complesso, nel quale ho affrontato problemi per me nuovi e che mi ha permesso di imparare molto, in particolare sull'elettronica in campo aerospazioa-le. Inoltre ho avuto la possibilità di partecipare al lavoro di un team numeroso e diversificato come quello di ARaMiS, osservandone la gestione e l'organizzazione e imparando a collaborare con i vari membri.

## Appendice A Schematici Prototipo 1

Di seguito sono riportati tutti gli schematici presenti nel progetto hardware del primo prototipo. Questi sono stati tratti dal file proto\_1.sch e sono stati realizzati utilizzando il programma Design Capture della Mentor Graphics.



Figura A.1. Regolatore lineare di tensione



Figura A.2. Generatore della tensione di riferimento



Figura A.3. Circuito anti Latch-Up



Figura A.4. Switching isteretico, comparatore e i segnali che ne influenzano il comportamento



Figura A.5. Schema elettrico del uC MSP430F2254



Figura A.6. Integrato per la comunicazione seriale di debug



Figura A.7. Circuiti di condizionamento delle correnti e della temperatura di batteria



Figura A.8. Circuito di condizionamento per la tensione di batteria



Figura A.9. Circuiti di condizionamento della corrente e della temperatura del pannello solare



Figura A.10. Circuito di condizionamento per la tensione del pannello solare



Figura A.11. Visione gerarchica dello schema elettrico

## Appendice B Schematici Prototipo 2

Di seguito sono riportati tutti gli schematici presenti nel progetto hardware del secondo prototipo. Questi sono stati tratti dal file proto\_2.sch e sono stati realizzati utilizzando il programma Design Capture della Mentor Graphics.



Figura B.1. Regolatore lineare di tensione



Figura B.2. Generatore della tensione di riferimento



Figura B.3. Switching isteretico e comparatore



Figura B.4. Visione gerarchica dello schema elettrico

## Bibliografia

- Takahiro Aoki, Ryota Kasai, and Masaaki Tomizawa. Numerical analysis of heavy ion particle-induced cmos latch-up, 1986.
- [2] Product assurance and safety department. Derating requirement applicable to electronic, electrical and electro-mechanical components for esa space systems. Technical report, ESA, April 1992.
- [3] Marco Borri. Progetto e realizzazione degli apparati di sviluppo, collaudo ed integrazione del satellite picpot. Master's thesis, Politecnico di Torino, 2007.
- [4] Isidor Buchmann. How to prolong lithium-based batteries. Technical report, BatteryUniversity, 2005.
- [5] Isidor Buchmann. The secrets of battery runtime. Technical report, BatteryUniversity, 2005.
- [6] Marco Ceroni. Progetto e realizzazione del satellite picpot: Gestione celle solari e batterie. Master's thesis, Politecnico di Torino, 2005.
- [7] Adriano Comai. Introduzione a uml, 2006.
- [8] Yossi Drori and Carlos Martinez. The Benefits of Cell Balancing, Application Note. Intersil, 2005.
- [9] E. Haseloff. Latch-up, esd and other phenomena. *Texas Instrument application report*, 2000.
- [10] International Rectifier. IRF7821 HEXFET Power MOSFET.
- [11] Kendal, Scott, and Lunn. Introduzione all'UML. McGraw-Hill collana Schaum's, Milano, 2000.
- [12] Linear Technology. LTC4002 Standalone Li-Ion Switch Mode Battery Charger, 2003.
- [13] Corrado Maddaleno. Satellite modulare: monitoraggio e telemetria per la gestione dell'energia. Master's thesis, Politecnico di Torino, 2008.
- [14] Maxim. LTC4002 Stand-Alone Switch-Mode Li-Ion Battery Charger Controller, 2007.
- [15] Microchip. Advanced Single or Dual Cell Lithium-Ion/Lithium-Polymer Charge Management Controllers, 2004.
- [16] NASA. Space radiation effects on electronic componets in low-earth orbit. Preferred reliability Practices no. PD-ED1258, 1996.

- [17] OMG. Sito ufficiale dell'uml, 2005.
- [18] Amir M. Rahimi. A lithium-ion battery charger for charging up to eight cells. Technical report, Illinois institute of Technology, 2005.
- [19] Reed, Kinnison, Pickel, Buchner, Marshall, and Kniffin abd LaBel. Single-event effects ground testing and on-orbit rate prediction methods: the past, present and future, 2003.
- [20] Application Report. Li-ion battery charger solution using the msp430. Technical report, Texas Instrument, December 2005.
- [21] Jake A. Schaffner. The electronic system design, analysis, integration and constriction of the cal poly state university cp1 cubesat. Technical report, Cal Poly State University, 2002.
- [22] Stefano Speretta. Collaudo ed integrazione del satellite universitario picpot. Master's thesis, Politecnico di Torino, 2006.
- [23] Stefano Speretta, Leonardo M. Reyneri, Claudio Sansoé, Maurizio Tranchero, Claudio Passerono, and Dante Del Corso. Modular architecture for satellites. In IAC-07-B4.7.09. Politecnico di Torino, 2007.
- [24] Texas Instruments. Lithium Ion Charge Management IC with Integrated Switching Controller, 1998.
- [25] Maurizio Tranchero. Progetto e realizzazione del satellite picpot: Processore di bordo. Master's thesis, Politecnico di Torino, 2005.