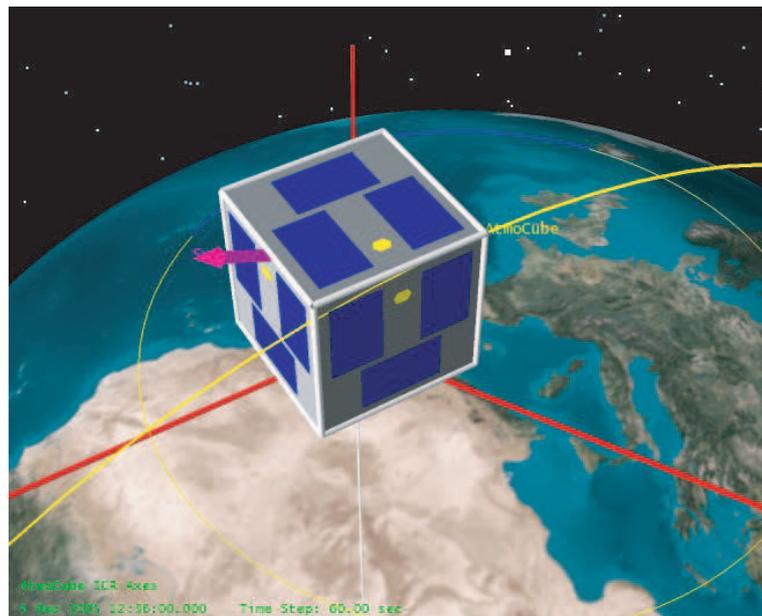




UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE  
*Facoltà di Ingegneria*  
C.d.L. Triennale in Ingegneria Elettronica Applicata

# Progetto Preliminare di un Sistema di Gestione Energetica per il Satellite AtmoCube



**Laureando:**  
*Marco De Din*

**Relatore:**  
*Chiar.mo Prof. Mario Fragiocomo*

**Correlatore:**  
*Chiar.mo Prof. Sergio Carrato*

ANNO ACCADEMICO 2004–2005



*“...Nulla è  
impossibile  
per colui che  
non deve farlo...”*

**Weiler**



# Indice

<b>1</b>	<b>Condizioni Orbitali</b>	<b>9</b>
1.1	La geometria orbitale del satellite AtmoCube . . . . .	9
1.2	Simulazione dell'Orbita . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Pannelli Solari</b>	<b>13</b>
2.1	Principi fisici di funzionamento . . . . .	13
2.2	Aspetti Tecnologici . . . . .	16
2.2.1	Materiali . . . . .	18
2.2.2	Finitura anti-riflesso . . . . .	19
2.2.3	Strutture . . . . .	20
2.3	Il problema del Punto di Massima Potenza . . . . .	22
2.3.1	Il metodo "Perturb & Observe" . . . . .	24
2.3.2	Il metodo della Conduttanza Incrementale . . . . .	25
2.3.3	Altri Metodi di Tracking . . . . .	26
<b>3</b>	<b>Interfacciamento dei pannelli solari</b>	<b>27</b>
3.1	Caratteristiche dei pannelli utilizzati . . . . .	27
3.2	Disposizione dei Pannelli Solari . . . . .	28
3.2.1	Collegamento elettrico dei pannelli . . . . .	30
3.3	Accumulatori di bordo . . . . .	32
3.4	Il convertitore MPPT . . . . .	32
3.5	Dimensionamento dei componenti . . . . .	33
3.5.1	Induttore . . . . .	35
3.5.2	Transistor e diodo Schottky . . . . .	37
3.5.3	Condensatori d'ingresso ed uscita . . . . .	37
3.5.4	Sonde di corrente . . . . .	39
3.6	Realizzazione del circuito . . . . .	39
3.6.1	Componenti utilizzati . . . . .	42
3.6.2	Costruzione e collaudo . . . . .	43
3.7	Realizzazione del software . . . . .	45
3.8	Bus di alimentazione a 5V e 3.3V . . . . .	47
<b>4</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>49</b>
<b>A</b>	<b>Schema elettrico del controllore MPPT</b>	<b>51</b>
<b>B</b>	<b>Schema elettrico interfaccia bus alimentazione</b>	<b>53</b>

**C Potenza disponibile dai pannelli solari**

**55**

**Bibliografia**

**63**

# Introduzione

Il progetto AtmoCube ha avuto origine dalla proposta di realizzare un picosatellite appartenente alla famiglia dei CubeSat, al cui sviluppo partecipano svariate università dislocate su scala internazionale. La nascita dei CubeSat è legata ad alcuni esperimenti condotti dall'università di Stanford verso la seconda metà degli anni '90 attraverso i quali è stata dimostrata la possibilità di mandare in orbita dei veivoli di dimensioni, peso e costo contenuti. Tra i vantaggi derivanti dall'utilizzo dei picosatelliti è possibile citare:

- Test di nuovi componenti e/o piccoli sistemi studiati per impieghi aerospaziali (l'uso di un piccolo satellite può risultare più vantaggioso rispetto ad eseguire dei test di laboratorio dove vengono simulate le condizioni operative spaziali, anche perchè possono esistere situazioni o combinazioni di parametri non facilmente riproducibili).
- Essendo i picosatelliti adatti ad operare a bassa quota (meno di 1000 km), è possibile utilizzarli per effettuare misure in alta atmosfera.
- La possibilità di fare ricerca in ambito universitario sugli ambienti spaziali e proporre nuove sfide di progetto per studenti di facoltà scientifiche.

L'aspetto della riduzione dei costi ha avuto un profondo impatto anche su organizzazioni medio-grandi, tra le quali la NASA: se la crescita tecnologica, da un lato, ha permesso di ridurre progressivamente l'ingombro dei componenti, dall'altro è sorto l'interrogativo e successivamente il desiderio di progettare missioni spaziali minimizzando i costi attraverso la realizzazione di veivoli sempre più piccoli.

AtmoCube (figura 1), nella fase di studio preliminare, è stato ideato allo scopo di effettuare alcune misure di *Space Weather*: l'andamento del campo magnetico terrestre, la quantità di radiazione ad alta energia e l'attrito indotto da particelle neutre residue presenti nell'alta atmosfera (*spacecraft drag*). In relazione a quest'ultima grandezza occorre specificare che, essendo l'intensità della forza di attrito in un fluido quale l'aria (seppur rarefatta) legata all'aerodinamica del corpo ivi immerso, diviene indispensabile che l'orientamento del satellite rispetto al verso del moto non cambi apprezzabilmente lungo l'intervallo di tempo in cui viene effettuata la misura. Il problema che sorge nella misura del drag è determinato dal modello utilizzato per la misura stessa: la stima del coefficiente di attrito è ottenuta indirettamente, mediante la valutazione entro un intervallo di tempo sufficientemente lungo della perdita di quota causata dall'attrito stesso; a causa della rotazione residua del satellite attorno ad uno dei suoi assi, l'aerodinamica muta nel tempo e la stima del drag diviene più complicata ed affetta da errore troppo elevato. Per i motivi appena menzionati, AtmoCube si limiterà alla misura del campo magnetico e delle radiazioni ad alta energia e, nel contempo, collezionerà una serie di dati derivanti da misure dei propri parametri (temperatura, energia disponibile, ...) che permetteranno di acquisire un maggiore know-how riguardo la progettazione di sistemi elettronici per impiego aerospaziale.

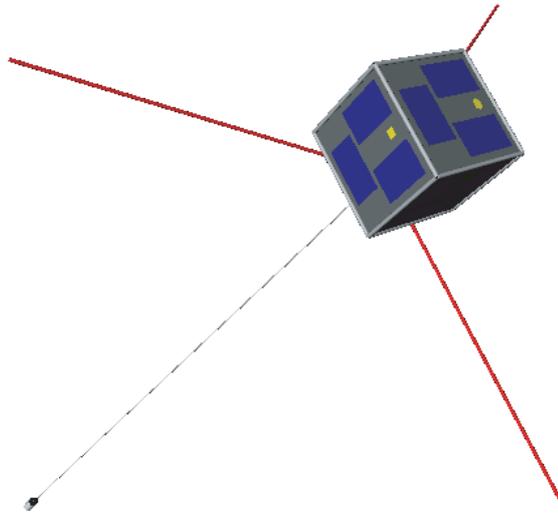


Figura 1: *Il satellite AtmoCube (modello semplificato preliminare).*

Questo lavoro mira ad eseguire uno studio preliminare sul sistema di alimentazione e gestione energetica con cui equipaggiare il satellite. Nella stragrande maggioranza dei satelliti l'energia è ottenuta convertendo la radiazione solare in potenza elettrica per mezzo di pannelli fotovoltaici; il successo od il fallimento di una missione dipendono, pertanto, dall'efficienza con cui tale energia può essere approvvigionata, e per tale motivo allo studio del sistema di alimentazione si deve affiancare una stima delle condizioni di illuminazione del satellite determinate dall'orbita che esso dovrà seguire nell'arco del suo tempo di vita. Tali stime sono già state in parte ricavate dal Dipartimento di Fisica dell'Università di Trieste e, nel primo capitolo della presente relazione, vengono integrate con dei risultati ottenuti da simulazioni al computer.

Nel secondo capitolo vengono analizzati i principi di funzionamento dei pannelli fotovoltaici, la loro costruzione ed i modelli con cui può essere descritto il loro comportamento. Alla fine del capitolo è esposto il problema del tracking del punto di massima potenza e sono descritti i principali metodi attraverso i quali è possibile massimizzare la potenza convertita dai pannelli.

Il terzo capitolo è concentrato sulla sintesi del sistema di interfacciamento dei pannelli solari con le batterie ed il bus di alimentazione; a tale scopo vengono fatte alcune considerazioni sul loro collegamento elettrico, sugli accumulatori di bordo e sulle tensioni che devono essere disponibili per alimentare i vari sottosistemi elettronici; infine è proposta una soluzione per il controllo dei pannelli (MPPT - Maximum Power Point Tracker), di cui è stata realizzata una versione sperimentale.

# Capitolo 1

## Condizioni Orbitali

In questo capitolo viene trattato il primo approccio al problema dell'approvvigionamento energetico; i parametri orbitali noti sono utilizzati per simulare l'orbita che il satellite deve seguire nell'arco di un anno, a partire dalla data di lancio fissata nello studio di missione; tale simulazione permette di ottenere, tra i vari risultati, anche l'andamento dell'illuminazione del satellite stesso inglobando gli effetti di oscuramento causati dal globo terrestre ed offrendo, in tal maniera, la possibilità di pervenire ad una stima della potenza generata dai pannelli solari in funzione del tempo.

### 1.1 La geometria orbitale del satellite AtmoCube

Lo scopo della missione ha imposto l'adozione di una geometria orbitale tale da permettere ad AtmoCube di ottenere una copertura totale del globo terrestre; le orbite di questo tipo sono dette *polarì* poiché i punti in comune tra più rivoluzioni successive attorno alla Terra si trovano in corrispondenza dei poli. L'orbita seguita da AtmoCube avrà la peculiarità di essere quasi sunsincrona, ossia l'angolo tra la giacitura del piano orbitale ed il vettore solare rimarrà approssimativamente costante nel tempo.

L'inclinazione dell'orbita, corrispondente all'angolo tra il piano orbitale ed il piano equatoriale terrestre, sarà circa pari a  $98.2^\circ$  ed è determinabile conoscendo la quota a cui si trova il satellite, imponendo il vincolo ulteriore di percorrere un'orbita sunsincrona. Un ulteriore parametro necessario a definire l'orbita e la sua evoluzione nel tempo è l'*ascensione retta del nodo ascendente* (RAAN - Right Ascension Ascending Node), definita, nel sistema di riferimento geocentrico, come l'angolo formato dal vettore congiungente il centro della Terra con il punto ideale corrispondente all'equinozio di primavera ed il vettore che viene definito dal punto di intersezione tra il piano equatoriale e la traiettoria orbitale del satellite durante la fase ascendente (da polo Sud a polo Nord).

Ai parametri appena indicati si aggiunge l'altezza a cui si troverà il satellite; in generale essi dipendono dal vettore utilizzato, dal luogo e dalla data di lancio; in particolare:

- La quota raggiunta dipende dal tipo di razzo vettore e dal punto in cui deve essere rilasciato il carico principale (si fa presente che è possibile contenere i costi di lancio per i picosatelli approfittando degli spazi vuoti presenti all'interno del vettore).
- L'inclinazione dell'orbita è influenzata dalle coordinate geografiche del luogo di lancio.
- Il RAAN dipende dalla data e dall'ora di lancio.

Allo stato attuale, il vettore che si intende utilizzare è un razzo Dnepr-1, un missile nucleare balistico che era a disposizione dell'Unione Sovietica durante la guerra fredda e che è stato riconvertito ad usi civili in seguito ad accordi USA-URSS sulla riduzione degli arsenali nucleari. Esso dovrebbe garantire un'orbita compresa tra i 500 ed i 650km con un'inclinazione di circa 98°, purchè il lancio venga eseguito da una stazione avente coordinate geografiche idonee; una possibilità è offerta dal cosmodrome di Baikonur in Kazakhstan che garantisce in media due date di lancio ogni anno. Si è scelto di effettuare una simulazione lungo l'arco temporale di un anno, allo scopo di individuare delle periodicità nell'andamento dell'illuminazione solare che permettano di evitare di dover effettuare nuovi budget di potenza ad ogni ridefinizione della missione.

## 1.2 Simulazione dell'Orbita

La simulazione orbitale, mirata all'ottenimento della distribuzione temporale della potenza ricavabile dai pannelli solari, è stata eseguita considerando le peggiori condizioni in cui Atmo-Cube potrebbe trovarsi; esse sono state stimate nello studio di missione svolto dal Dipartimento di Fisica. Esse corrispondono ad un RAAN di 74° in corrispondenza del quale si verifica la maggior carenza energetica a partire dal giorno 5 Dicembre 2005.

La simulazione è stata effettuata avvalendosi di un software appositamente ideato per applicazioni aerospaziali, balistica e tracking di bersagli mobili, chiamato Satellite ToolKit (STK) e prodotto da Analytical Graphics Co. Oltre ad essere usato dalle maggiori compagnie a livello mondiale (NASA, Boeing, ESA, ecc.), offre il vantaggio di possedere una versione dimostrativa completa, testabile per alcuni giorni; chiaramente, quest'ultima peculiarità è stata determinante poiché i costi di licenza per un tool di questo tipo non sono conciliabili con l'esigenza di realizzare una missione spaziale che abbia tra gli obiettivi principali il contenimento dei costi.

Il funzionamento del software è intuitivo e permette all'utente di divenire operativo in poche ore; tra le varie possibilità offerte da STK, merita particolare attenzione un'utility avanzata per il calcolo della potenza ricavabile dalla conversione fotovoltaica dell'energia solare; per il suo utilizzo si rende necessario dichiarare la disposizione dei pannelli solari rispetto alla geometria del satellite; ciò è ottenibile creando un modello grafico del satellite stesso, il quale viene realizzato vettorialmente attraverso dichiarazione di forme geometriche semplici.

La radiazione solare è standardizzata in unità  $AM$  (da *Athmospheric Mass*): ad esempio, nello spazio l'atmosfera è assente, quindi la sua massa è zero, pertanto l'intensità solare corrispondente è indicata con  $AM0$ ; sulla Terra, invece, essa varia da  $AM1$ , corrispondente ad una giornata di sole senza nubi, a superiori. L'indicatore  $AM0$  identifica una potenza per unità di superficie pari a circa  $1360W/m^2$ , pertanto è necessario conoscere l'area dei pannelli solari al fine di ricavare la potenza, ed è per tale motivo che essi devono essere inclusi, assieme alle dimensioni, nel file contenente il modello del satellite. La relazione che lega la potenza elettrica a quella incidente sui pannelli è la seguente:

$$P = P_{SUN} \cdot S \cdot \cos \theta \cdot \eta \quad (1.1)$$

Dove  $S$  è la superficie del pannello,  $\theta$  è l'angolo di incidenza dei raggi solari ed  $\eta$  è il rendimento di conversione del pannello stesso. La figura 1.1 rappresenta la situazione descritta dalla formula 1.1.

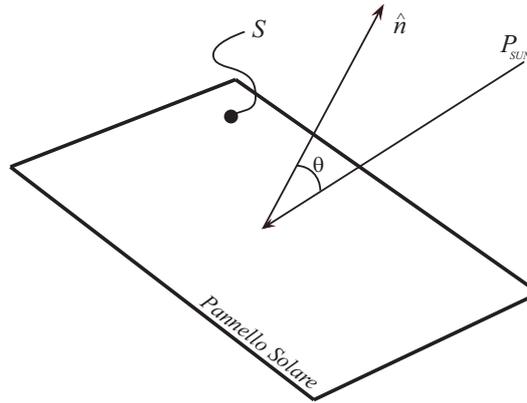


Figura 1.1: *Incidenza dei raggi solari su un pannello fotovoltaico.*

Dall'equazione 1.1 si comprende la necessità di stimare gli angoli di incidenza dei raggi solari rispetto alle varie facce del satellite, il quale possiede una forma cubica; per ricavare la maggior potenza possibile è consigliabile collocare pannelli solari su ogni faccia del cubo, tranne quella rivolta verso Terra, che è occupata dalle antenne e dal sistema di controllo di assetto. Pertanto, al fine di giungere alla stima della potenza generata dai pannelli, occorre determinare per ogni istante temporale quante e quali sono le facce illuminate e calcolare per ciascuna di esse l'angolo  $\theta$  formato dai raggi solari col vettore normale  $\hat{n}$ . Tale operazione può essere eseguita agevolmente una volta che il moto del satellite attorno alla Terra è stato calcolato attraverso un modello avente un desiderato grado di accuratezza.

La complessità dell'operazione appena descritta ha imposto di utilizzare il software di simulazione, e ciò ha permesso di integrare i calcoli effettuati nella tesi [1], pervenendo così ad una stima lungo un periodo più lungo. Ciò è stato necessario per l'ulteriore motivo che durante la stesura di [1] i pannelli non erano ancora stati fisicamente acquisiti ed esaminati, di conseguenza anche le ipotesi sulla loro disposizione ed il collegamento alle batterie si sono rivelate poco fattibili nella pratica.

I risultati della simulazione sono stati riportati in Appendice C, suddivisi per mesi: dall'esame dei grafici si può notare che esistono periodi in cui si alternano giorno e notte ed altri in cui almeno un lato del satellite è sempre illuminato; questi ultimi, benchè permettano di ricaricare gli accumulatori al 100% della loro capacità, potrebbero rappresentare un problema dal punto di vista dell'aumento di temperatura, poiché, oltre al riscaldamento totale, si avrebbe anche la diminuzione del rendimento di conversione dei pannelli fotovoltaici.

I grafici in Appendice C presentano un andamento fortemente discontinuo a causa dell'alternarsi di giorno e notte; per tale motivo si è ritenuto utile calcolare anche l'energia totale convertita, la quale è stata ricavata su base giornaliera; il risultato è visibile in figura 1.2 e permette di concludere che l'esposizione di AtmoCube ai raggi solari sarà caratterizzata da un certo grado di periodicità. Partendo dai dati contenuti nel grafico è possibile impostare i vincoli di consumo energetico, ovvero il budget di potenza, per i sistemi installati a bordo del satellite; tali dati permettono di procedere in svariati modi: ad esempio, è possibile considerare il caso peggiore, cioè assumere che l'energia disponibile ogni giorno sia di 45Wh (il minimo assoluto nel

grafico 1.2) e limitare i consumi a tale valore; in questo caso, tutta l'energia in eccesso verrebbe immagazzinata negli accumulatori di bordo e permetterebbe di assicurare una buona autonomia durante i periodi di eclisse. L'ammontare della potenza elettrica generata è influenzato, oltre che

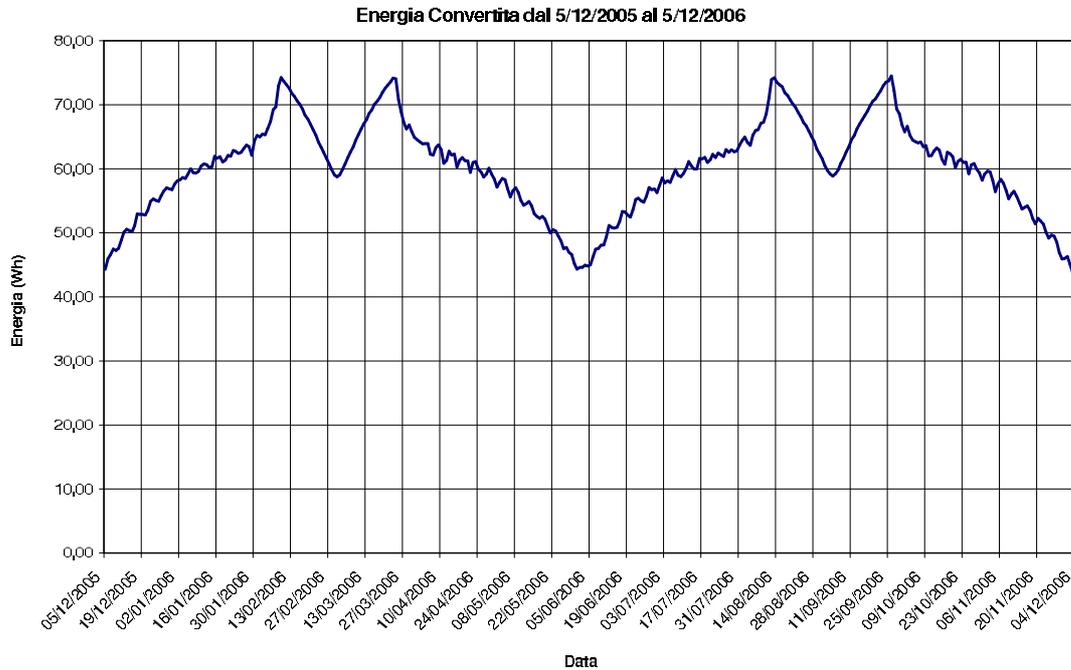


Figura 1.2: *Andamento dell'energia convertita dai pannelli solari nel corso di un anno (i dati in ordinata si riferiscono all'energia convertita in 24 ore).*

dall'andamento dell'esposizione ai raggi solari, anche dall'efficienza dei pannelli fotovoltaici: in AtmoCube sono impiegati dei componenti a tripla giunzione per uso spaziale, il cui rendimento di conversione è pari al 23%; tale valore, come si vedrà nei prossimi capitoli, deve essere preso con cautela poiché esso è riferito ad un preciso punto di lavoro sulla caratteristica tensione-corrente dei pannelli stessi.

Le conclusioni che si possono trarre dall'analisi orbitale eseguita nel presente capitolo riguardano la periodicità con cui il Sole può assicurare l'approvvigionamento energetico; è possibile, quindi, stilare un budget di potenza relativo ad un periodo di circa 6 mesi (coincidenti con l'intervallo di ripetizione della funzione in fig. 1.2).

Allo stato attuale, si è già in possesso di un budget indicativo (consultabile in [1]), tuttavia non si ritiene opportuno in questa tesi elaborarne uno ex-novo, poiché le specifiche accurate dei consumi non sono ancora state elaborate con sufficiente dettaglio. La via seguita in questo capitolo è stata quella di determinare l'effettiva energia messa a disposizione dal Sole, identificando un limite superiore oltre il quale non è opportuno spingersi.

La fase successiva, ovvero il progetto del sistema di alimentazione, ha come obiettivo l'ottenimento del massimo rendimento, così da rendere disponibile una quantità di energia il più possibile prossima a quella stimata nella fase di simulazione.

## Capitolo 2

# Pannelli Solari

In questo capitolo vengono descritte le caratteristiche dei pannelli solari utilizzati a bordo di AtmoCube e le problematiche derivanti dall'impiego di tali componenti nei sistemi di produzione di energia elettrica. Nella prima parte si dà una breve descrizione del principio di funzionamento, delle tecnologie costruttive e delle grandezze caratteristiche dei pannelli scelti; successivamente è affrontato il problema del *Maximum Power Point Tracking* e vengono descritti i metodi comunemente utilizzati per ottenerlo.

### 2.1 Principi fisici di funzionamento

Un fotodiodo ottimizzato per generare potenza elettrica prende il nome di *cella fotovoltaica*; tale denominazione non va confusa con l'altra comunemente utilizzata di *pannello fotovoltaico*: quest'ultimo è ottenuto, infatti, dal collegamento serie e/o parallelo di un certo numero di celle singole, poichè una sola di esse non è in grado di fornire ai suoi capi una differenza di potenziale utilizzabile nella pratica.

Le celle fotovoltaiche sfruttano l'effetto fotovoltaico scoperto dal fisico francese Alexandre Edmond Becquerel nel 1839, formalizzato da Albert Einstein nel 1905 nella più completa trattazione riguardante l'effetto fotoelettrico. Bequerel si rese conto che l'intensità della luce incidente su una soluzione elettrolitica ne influenzava la conduttanza; grazie alla teoria dei quanti si è in grado di spiegare tale effetto attraverso la cessione di energia da fotoni ad elettroni, con il conseguente aumento della "libertà di movimento" di questi ultimi.

Nei metalli a basso potenziale di estrazione, tale effetto si manifesta attraverso l'emissione di elettroni, fenomeno sfruttato, ad esempio, nei tubi fotomoltiplicatori; nei materiali semiconduttori lo stesso meccanismo provoca la generazione di coppie elettrone-lacuna. Condizione necessaria affinché si assista agli eventi appena menzionati è che l'energia di ciascun fotone, ovvero la frequenza dell'onda elettromagnetica incidente sul materiale ( $E = hf$ ), sia maggiore o uguale al potenziale di estrazione (o al gap tra banda di valenza e banda di conduzione per i semiconduttori).

In un diodo polarizzato inversamente (2.1) gli unici portatori che sono in grado di attraversare la giunzione sono quelli minoritari, i quali vengono accelerati dal campo elettrico nella zona di transizione. La loro concentrazione è tale che, al variare della tensione applicata, la densità di corrente rimane approssimativamente costante e di piccola entità.

A causa dell'enorme differenza di concentrazione tra portatori maggioritari e minoritari, questi ultimi risultano essere maggiormente influenzati dalla temperatura rispetto ai primi, e lo stesso vale per l'energia proveniente sottoforma elettromagnetica.

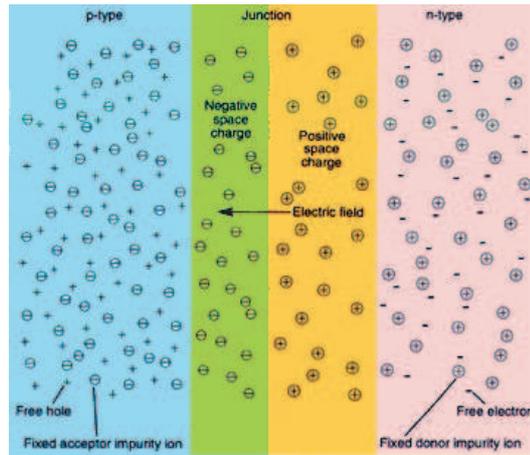


Figura 2.1: Portatori maggioritari e minoritari in una giunzione PN.

Quest'ultima affermazione permette di concludere che se un diodo fosse esposto a radiazione luminosa, si assisterebbe ad un incremento di portatori (minoritari) direttamente proporzionale all'intensità della radiazione incidente: essi verrebbero accelerati dal campo elettrico interno ed immessi nel circuito esterno. In queste condizioni l'intensità di corrente potrebbe assumere valori tali da poter essere trattata attraverso sistemi di elaborazione elettronica o addirittura usata per fornire potenza ad una carico; quest'ultimo caso corrisponde alle celle fotovoltaiche che, come già evidenziato, sono realizzate in parecchie unità sullo stesso substrato, e connesse in serie e parallelo per fornire tensioni e correnti adeguate per alimentare i più svariati sistemi che fanno uso di corrente elettrica.

Da queste considerazioni si conclude che il modello elettrico di una cella fotovoltaica può facilmente essere derivato da quello di un normale diodo; in questo caso, però, non può essere trascurata la resistenza serie, poiché la cella dovrà agire da generatore di potenza elettrica, inoltre dovrà essere incluso un generatore di corrente  $I_L$  che rappresenta l'effettiva corrente di portatori minoritari generata dalla luce incidente (*fotocorrente*).

La figura 2.2 illustra il modello derivato; in parallelo ad un diodo ideale è collocato il generatore

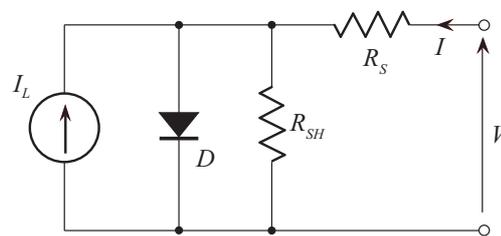


Figura 2.2: Circuito equivalente di una cella fotovoltaica.

di fotocorrente  $I_L$ , mentre  $R_S$  e  $R_{SH}$  giustificano la presenza di effetti ohmici serie e parallelo; di queste,  $R_{SH}$  è solitamente approssimata come un circuito aperto. In realtà, analogamente ad una qualsiasi giunzione P-N, esistono effetti capacitivi ed induttivi: nel presente contesto essi sono trascurati poiché, nella pratica, una cella fotovoltaica non sperimenta fenomeni di transitorio particolarmente veloci, quindi può essere considerata come un sistema di ordine 0.

La scrittura del 1° Principio di Kirchoff rispetto al nodo in cui confluiscono  $I_L$  e  $R_S$  (si trascura  $R_{SH}$ ) permette di ottenere la caratteristica tensione–corrente:

$$i = I_s \left[ e^{\frac{q[v-iR_S]}{kT}} - 1 \right] - I_L$$

Assumendo che la cella debba essere utilizzata per alimentare una carico, è possibile adottare la convenzione dei generatori (si inverte il verso della corrente  $i$ ) e pervenire alla relazione standard, in cui, per semplicità, si trascura il contributo della resistenza serie:

$$i(t) = I_L - I_s \left[ e^{\frac{qv(t)}{kT}} - 1 \right] \quad (2.1)$$

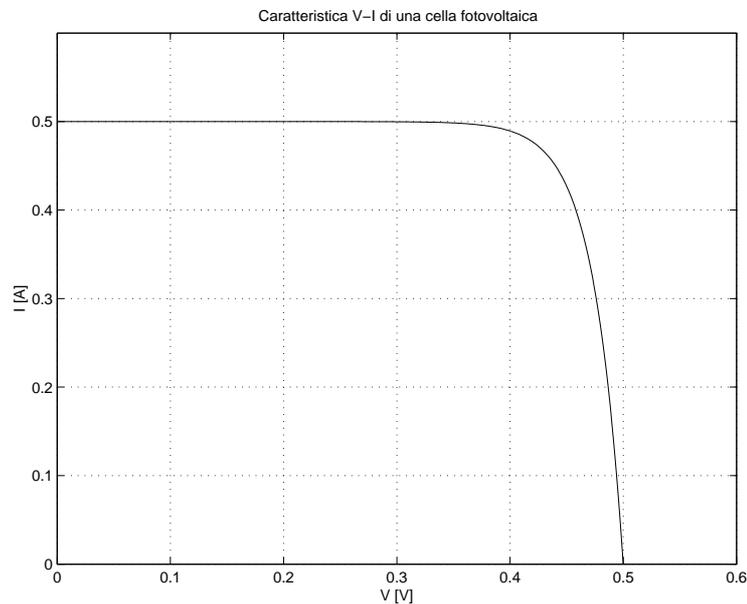


Figura 2.3: Caratteristica V-I di una cella fotovoltaica.

L'equazione 2.1 è rappresentata graficamente in figura 2.3 per valori positivi di  $v$  ed  $i$ . Le intercette con gli assi  $V$  e  $I$  sono dette rispettivamente *tensione di circuito aperto* ( $V_{oc}$ ) e *corrente di cortocircuito* ( $I_{sc}$ ); annullando il termine  $v$  nell'argomento dell'esponenziale dell'eq. 2.1 si conclude che  $I_{sc} = I_L$ , ossia la corrente di cortocircuito è proporzionale all'intensità della radiazione elettromagnetica incidente.

La conoscenza di  $V_{oc}$  ed  $I_{sc}$  consente di individuare in modo approssimato la caratteristica corrispondente ad una determinata cella, tuttavia per gli impieghi pratici esistono due ulteriori valori di tensione e corrente, più rappresentativi, indicati con  $V_{mp}$  e  $I_{mp}$ ; essi corrispondono rispettivamente all'ascissa ed all'ordinata del punto in cui la potenza prelevata dalla cella è massima; tale punto è detto di massima potenza (MPP – *Maximum Power Point*) e rappresenta, da un differente punto di vista, la condizione di adattamento d'impedenza tra cella solare e carico alimentato. E' opportuno osservare che il rendimento dei pannelli solari è usualmente riferito all'operazione nel MPP.

Se l'effetto della resistenze  $R_S$  e  $R_{SH}$  non può essere trascurato, la curva V-I viene leggermente modificata rispetto alla figura 2.3, ed in tal caso risulta maggiormente utile definire un indicatore che rappresenti la potenza che può essere fornita al carico rispetto alla caratteristica V-I ideale rappresentata nella figura 2.4:

$$FF = \frac{V_{MPP} I_{MPP}}{V_{oc} I_{sc}} = \frac{P_{MPP}}{P_{IDEALE}} \quad (2.2)$$

Il parametro appena definito può essere interpretato come un rendimento e prende il nome di *fattore di riempimento* (Fill factor); esso rappresenta quanto la caratteristica V-I reale si avvicina a quella considerata ideale (figura 2.4). Nella pratica,  $FF$  può assumere valori da 0.70 a 0.85, tuttavia esso non deve essere confuso con il rendimento complessivo della cella fotovoltaica che è, di fatto, molto minore.

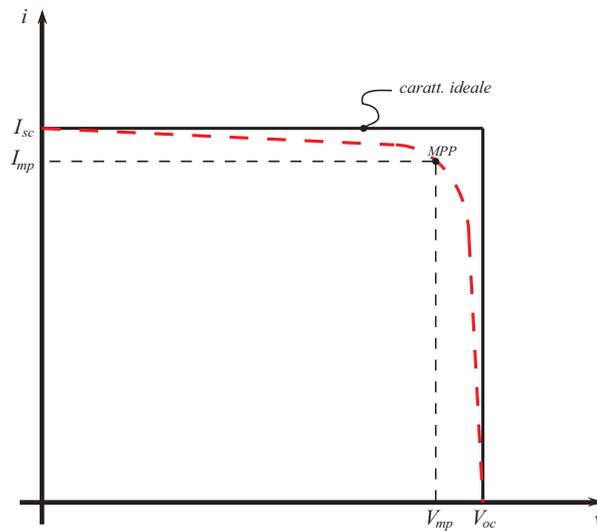


Figura 2.4: Definizione di  $FF$ .

## 2.2 Aspetti Tecnologici

Una cella solare, a differenza di un normale fotodiode, è ottimizzata per generare portatori di carica in un ampio spettro di radiazione; infatti, l'energia del Sole è fornita per il 46% nel campo del visibile ( $\lambda = 0,38 \div 0,78 \mu m$ ) e per il 47% nell'infrarosso ( $\lambda = 0,78 \div 10 \mu m$ ); se si effettua un calcolo della corrispondente larghezza di banda, assumendo la velocità di propagazione pari a  $c \approx 3 \cdot 10^8 m/s$ , si trova:

$$f_{min} = \frac{c}{10 \cdot 10^{-6}} \approx 30 \cdot 10^{12} Hz \quad f_{max} = \frac{c}{0,38 \cdot 10^{-6}} \approx 7,9 \cdot 10^{14} Hz$$

Per convertire il 92% dell'energia solare in elettrica, un ipotetico pannello solare dovrebbe possedere una larghezza di banda pari a  $7 \cdot 10^{12} Hz$ . Allo stato attuale, la tecnologia di produzione permette di costruire pannelli aventi una risposta come quella di figura 2.5, relativa ad esemplari a tripla giunzione. Tale figura rappresenta l'efficienza quantica del pannelli, ossia il rapporto tra il numero di coppie elettrone-lacuna generate ed il numero di fotoni incidenti; come si nota,

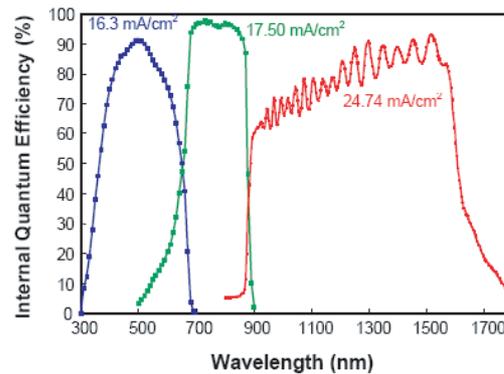


Figura 2.5: *Rendimento di un pannello a tripla giunzione.*

essa è mediamente pari all'80% in un intervallo che va approssimativamente da  $500\text{nm}$  a  $1.5\mu\text{m}$ . Se si esegue un calcolo approssimato dell'integrale dello spettro solare (figura 2.6) nella banda di copertura della cella, si conclude che è possibile estrarre l'86% dell'intensità di radiazione la quale, moltiplicata per il rendimento interno di conversione (80% circa), permette di giungere ad un'efficienza del 69%. Il valore calcolato sembra contraddire quelli forniti dai costruttori (al

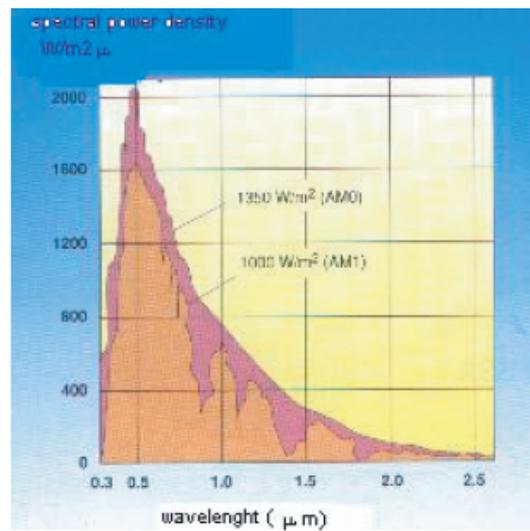


Figura 2.6: *Spettro solare.*

massimo pari al 30%), tuttavia il tasso di conversione dei fotoni non è l'unico fattore che limita il rendimento di una cella:

1. La tecnologia dominante per la costruzione di celle è quella planare, pertanto i fotoni devono attraversare uno o più strati di semiconduttore prima di raggiungere la giunzione ed i livelli inferiori; in questo tratto essi possono creare portatori che si ricombinano senza essere accelerati dal campo elettrico interno ed immessi nella maglia esterna al componente.
2. I fotoni la cui energia non è sufficiente a creare portatori di carica provocano l'agitazione

termica degli ioni del reticolo del materiale, contribuendo ad innalzare la temperatura di quest'ultimo e provocando un'aumento della dissipazione interna per effetto Joule

3. Possono verificarsi ricombinazioni superficiali nonché riflessione parziale della luce incidente sul pannello solare.

In riferimento al secondo punto dell'elenco soprastante, il riscaldamento deve essere tenuto in debita considerazione, poiché in un ambiente come quello spaziale l'unico modo con cui un satellite può cedere calore è costituito dall'irraggiamento. E' necessario, quindi, far sì che il calore accumulato dai pannelli venga ceduto ad un corpo avente una capacità termica più elevata, ossia lo chassis del satellite; in questo modo si ha anche un aumento della superficie irradiante (cfr. legge di Stefan–Boltzmann), dunque per la medesima quantità di calore irradiato dal satellite la corrispondente temperatura può essere ridotta.

Le tecnologie costruttive sono di vario tipo; attualmente il maggior problema risiede nell'ottenimento di un rapporto prezzo/prestazioni non troppo elevato, a causa della criticità del processo produttivo. In generale, i pannelli ottenuti su monocristalli di semiconduttore offrono migliori prestazioni e durata, ma la loro produzione è molto critica e non permette ancora di raggiungere costi tali da rendere preferibile l'installazione di impianti di produzione di energia fotovoltaica rispetto a quelli a combustibile fossile o nucleari.

Esistono delle alternative ai pannelli a monocristallo: esse sono basate sull'utilizzo di silicio policristallino o addirittura amorfo: pur non offrendo elevati rendimenti, a causa delle elevate perdite causate dalle discontinuità del reticolo (bordi dei vari grani), presentano costi di produzione minori e, laddove gli spazi a disposizione lo permettano, risulta più economico utilizzare un maggior numero di pannelli a bassa efficienza. Chiaramente, questo non è il caso dei sistemi aerospaziali, nei quali peso e dimensioni contribuiscono in buona percentuale alla definizione dei costi di missione; in queste situazioni la scelta ricade quasi sempre sull'uso di pannelli solari high-tech.

E' da notare, comunque, che la ricerca scientifica è tuttora attiva al fine di riuscire ad ottenere elevate performance anche dai pannelli policristallini ed amorfi: ciò è giustificato dal fatto che lo stato amorfo gode di maggiore capacità di assorbimento della radiazione luminosa e permette, di conseguenza, la realizzazione di pannelli molto più sottili (qualche  $\mu m$ ) attraverso tecniche come quella a film sottile, molto economica.

### 2.2.1 Materiali

Il primo materiale utilizzato per la fabbricazione delle celle fotovoltaiche è stato il silicio; il motivo è abbastanza evidente: esso è un semiconduttore noto, il cui comportamento è ormai prevedibile ed inoltre può essere ottenuto attraverso procedimenti e macchinari collaudati e diffusi. Dall'altro lato, esso permette di trasformare l'energia luminosa in elettrica in corrispondenza di radiazioni nel visibile e nell'infrarosso; al di fuori di tale banda viene causato il solo riscaldamento del substrato.

Come accennato, i migliori rendimenti si ottengono con silicio purissimo e monocristallino, entro il quale il movimento dei portatori di carica non è ostacolato da discontinuità; esistono tuttavia anche celle realizzate con silicio totalmente amorfo e policristallino: queste permettono di contenere molto i costi di produzione e vendita, a scapito del rendimento, rendendo vantaggiosa la scelta nei casi in cui la superficie a disposizione per l'installazione dei pannelli non costituisca

un vincolo progettuale.

Un materiale semiconduttore maggiormente idoneo rispetto al silicio è l'arseniuro di gallio, che offre svariati vantaggi:

- Possiede un gap energetico  $E_g = 1.47eV$ , ideale per realizzare celle a singola giunzione.
- Presenta un coefficiente di assorbimento della radiazione elettromagnetica elevato che permette di realizzare una cella di spessore di pochi  $\mu m$ ; per contro, il silicio richiede spessori di almeno  $100\mu m$  per assicurare un'efficienza di conversione sufficiente.
- Risente meno dell'influenza della temperatura, pertanto è preferibile laddove si preveda che le temperature dei pannelli subiscano ampie variazioni.
- Le leghe che esso può formare con altre sostanze quali alluminio, fosforo, antimonio o indio possiedono caratteristiche complementari rispetto all'arseniuro stesso, permettendo una maggiore flessibilità nel progetto.
- E' molto resistente alle radiazioni ad alta energia; tale peculiarità lo rende particolarmente indicato per applicazioni al di fuori dell'atmosfera terrestre.
- Le sue leghe possono essere facilmente manipolate in modo da variare la costante del reticolo, con l'effetto di poter fissare in fase di progetto il gap energetico  $E_g$  desiderato. Ciò consente di creare strutture multigiunzione con rendimenti molto prossimi a quelli teorici.

Il principale difetto dell'arseniuro di gallio è rappresentato dall'elevato costo (il gallio è più raro dell'oro); per tale motivo, tralasciando le applicazioni spaziali, le celle al GaAs sono usate solitamente in accoppiamento con dei concentratori.

Per quanto riguarda l'impiego di altri tipi di materiali, va notato che l'evoluzione tecnologica avvenuta negli ultimi anni ha permesso lo sviluppo delle tecniche per la creazione di dispositivi a film sottile. I principali vantaggi offerti sono il contenimento dei costi e la possibilità di produrre dispositivi con aree elevate, prerogative che la tecnologia dei semiconduttori non riesce ancora a soddisfare. Un ulteriore vantaggio risiede nella possibilità di creare le interconnessioni attraverso un particolare ossido conduttore, il quale, essendo trasparente alle radiazioni d'interesse, non limita il rendimento della cella solare.

### 2.2.2 Finitura anti-riflesso

Il silicio presenta un certo grado di lucidità che porta a riflettere fino al 30% della radiazione incidente. Per tale motivo è necessario rivestire il pannello fotovoltaico con sostanze che massimizzino la percentuale di fotoni che penetra nel materiale, in modo da aumentare la probabilità di generazione di portatori. Una possibile soluzione è rappresentata dal monossido di silicio (SiO) che permette, se depositato su due strati successivi, di ridurre la radiazione riflessa al 4%; un'altra possibilità è utilizzare un attacco chimico per creare un apposito pattern sulla superficie in modo che i raggi riflessi seguano percorsi tali da farli ritornare sul materiale, aumentando la probabilità che i fotoni vengano assorbiti.

### 2.2.3 Strutture

Esistono svariati modi di combinare i vari materiali al fine di ottenere rendimenti prossimi a quello ideale. Tra questi vi sono:

1. Celle **omogiunzione**.
2. Celle **eterogiunzione**.
3. Celle **PIN - NIP**.
4. Celle **multigiunzione**.

#### Celle a Omogiunzione

Il silicio cristallino costituisce l'esempio principale di questo tipo di celle. Un singolo wafer di materiale monocristallino viene drogato in modo differente, creando una giunzione PN; la profondità di giunzione è tale da massimizzare la quantità di fotoni assorbita nelle vicinanze della giunzione stessa, cosicché i portatori che vengono generati diffondono sotto l'effetto del campo elettrico interno dando luogo ad una corrente elettrica.

Vi sono svariati parametri che determinano l'efficienza di conversione totale:

- Profondità della giunzione PN rispetto alla superficie illuminata della cella.
- Concentrazione di drogante.
- Grado di purezza e regolarità del monocristallo.
- Sistema di collegamento elettrico delle varie celle che compongono un pannello.

Il problema delle interconnessioni costituisce un fattore limitante, poichè vi è la necessità di portare dei contatti anche sul lato illuminato della cella, riducendo così la quantità di luce assorbita. La soluzione consistente nel collocare tutti i collegamenti sul lato posteriore, però, costringe i portatori di carica a compiere percorsi più lunghi all'interno del semiconduttore, causando un aumento delle perdite per effetto joule e rendendo maggiormente stringenti i requisiti di regolarità del cristallo.

#### Celle a Eterogiunzione

Tale struttura è scelta spesso per produrre celle mediante deposizione di strati a film sottile di materiali che assorbono la luce solare molto meglio del silicio. I materiali che compongono lo strato superiore ed inferiore della giunzione hanno differenti ruoli: lo strato superiore è realizzato con un materiale avente un gap elevato, che lo rende quasi trasparente alla radiazione luminosa (per tale motivo è anche chiamato *window layer*), mentre lo strato inferiore possiede un gap ridotto che permette di assorbire quasi tutti i fotoni rimanenti. Le coppie di portatori che vengono generate si trovano abbastanza prossime alla giunzione, pertanto la ricombinazione interna è mantenuta ad un valore minimo.

Uno dei vantaggi delle eterogiunzioni a differenza delle omogiunzioni nasce dal fatto che esistono molti materiali aventi caratteristiche idonee all'impiego nelle celle fotovoltaiche, ma che purtroppo ammettono un solo tipo di drogaggio (P o N); la costruzione mediante eterogiunzione permette di aggiungere un ulteriore grado di libertà ed impiegare anche tali sostanze, ottenendo rendimenti più elevati.

### Celle P-I-N e N-I-P

Sono costituite da tre strati dei quali quello centrale è un semiconduttore intrinseco; quest'ultimo è sottoposto al campo elettrico generato dai due strati adiacenti drogati P ed N il quale permette di separare i portatori di carica che vengono generati dalla luce incidente. Il risultato consiste in una diminuzione della ricombinazione dei portatori, ovvero in un aumento dell'efficienza. Le celle P-I-N sono solitamente realizzate in silicio, con strato intermedio amorfo, mentre quelle N-I-P sono in CdTe. In queste ultime lo strato superiore è in solfuro di cadmio (P), quello intermedio è CdTe intrinseco, mentre quello inferiore è ZnTe (N).

### Celle Multigiunzione

Questa tipologia permette di ottenere un'elevata efficienza di conversione, in quanto è possibile coprire una porzione maggiore dello spettro solare.

Tipicamente una cella multigiunzione è realizzata ponendo in serie più giunzioni differenti, a partire da quella con il gap energetico maggiore (collocata in superficie) fino ad arrivare a quella col gap minore, in modo da "sintonizzare" ciascuna giunzione su una determinata porzione dello spettro (assorbimento selettivo), come visibile in figura 2.7.

La fabbricazione può avvenire in modo meccanico, ossia mettendo fisicamente a contatto due o più giunzioni, oppure per via monolitica, dove i vari strati possono essere depositati o fatti crescere sul substrato.

Attualmente la maggior parte della ricerca sulle celle multigiunzione è concentrata sull'impiego

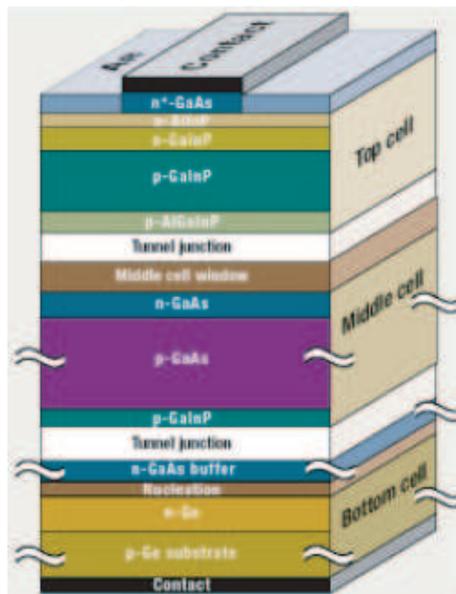


Figura 2.7: Struttura di una cella a tripla giunzione GaInP/GaAs/Ge, analoga a quelle impiegate nel progetto AtmoCube.

e l'ottimizzazione dell'arseniuro di gallio e, in minore misura, del silicio amorfo e del diseleniuro di indio.

## 2.3 Il problema del Punto di Massima Potenza

Si è visto che il modello equivalente di una cella fotovoltaica è spiccatamente non lineare; facendo riferimento al grafico di figura 2.3, è possibile affermare che una cella si comporta analogamente ad un generatore di corrente per tensioni inferiori a  $V_{mp}$ ; di conseguenza la potenza erogabile assume il massimo valore proprio in corrispondenza del MPP della cella.

La caratteristica V-I incontrata, qualora vengano collegate più celle in serie o parallelo, non cambia nella forma, ma subisce solo un riscaldamento lungo gli assi:

- Nel collegamento in serie la corrente è la stessa per tutte le celle, mentre la tensione diviene la somma delle singole tensioni.
- Nel collegamento in parallelo la corrente totale è data dalla somma delle correnti nelle varie celle, mentre la tensione è uguale a quella di una cella singola.

I normali pannelli fotovoltaici vengono realizzati sfruttando più combinazioni di collegamenti serie e parallelo di parecchie celle, al fine di generare una potenza elettrica pari ad almeno qualche Watt.

Se si calcola la potenza fornita da un pannello e la si deriva rispetto alla tensione (o alla corrente) si trova una funzione caratterizzata dalla presenza di un unico massimo, come visibile in figura 2.8. Se si desidera utilizzare un pannello fotovoltaico per il massimo rendimento dichia-

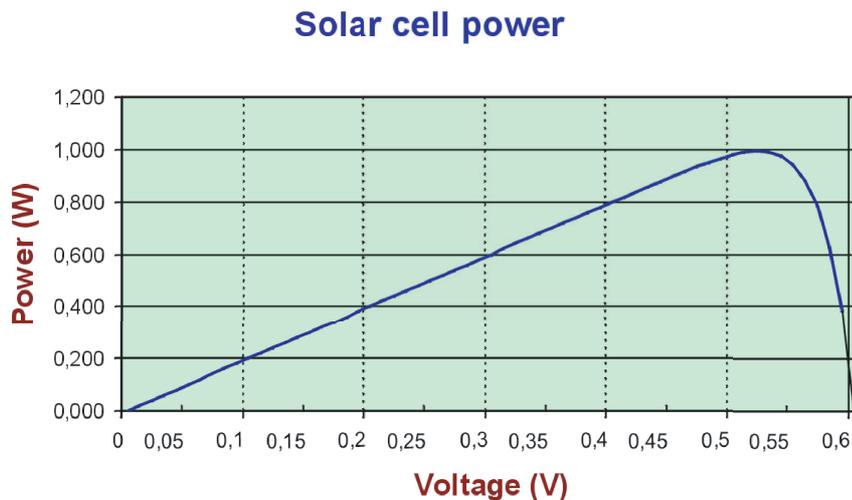


Figura 2.8: *Variazione della potenza erogata da una cella in funzione della tensione ai capi.*

rato dal costruttore è necessario che il punto di lavoro sulla caratteristica corrisponda al MPP; data la biunivocità della caratteristica V-I del pannello, è possibile fissare il punto di lavoro imponendo la corrente erogata oppure la tensione ai capi.

In generale, tutte le tecniche utilizzate per imporre il punto di lavoro utilizzano algoritmi di controllo detti MPPT (*Maximum Power Point Trackers*); di questi ne esistono di diversi tipi, ciascuno ottimizzato per lo specifico impiego.

Nelle applicazioni terrestri, ad esempio, non può essere trascurata l'influenza degli ostacoli che si interpongono tra Sole e pannelli (nubi, foglie, depositi di varia natura, ecc.); questi possono

provocare repentini cambiamenti tra luce ed ombra o ancora peggio rendere la superficie dei pannelli non uniformemente illuminata; in quest'ultimo caso può accadere che vi siano dei pannelli che si trovino polarizzati inversamente rispetto alla convenzione di segno dei generatori utilizzata per descrivere la caratteristica V-I: in tal caso il prodotto VI è negativo, indicando che essi agiscono da carico. Poiché quest'evento è molto dannoso per le celle, ciascuna di esse è solitamente equipaggiata con un diodo di bypass per la polarizzazione inversa. Eventualmente, per rendere la costruzione meno complessa, è possibile collegare tale diodo a protezione di piccoli gruppi di celle o di un intero pannello se quest'ultimo è di piccole dimensioni.

Il problema sopra menzionato è rappresentato nella figura 2.9, in cui due celle si trovano collegate in serie (il problema può presentarsi anche nel caso duale di configurazioni parallele): la prima cella è illuminata meno della seconda ( $I_{sc1} < I_{sc2}$ ) e, a seconda della corrente richiesta dal carico, può capitare che il punto di lavoro di questa si sposti nel secondo quadrante del piano V-I, ovvero la cella agisca da carico.

Il diodo di protezione, pur senza mutare radicalmente il comportamento della cella scarsamente illuminata, permette di minimizzare la potenza dissipata, la quale viene ad essere dipendente dalla tensione inversa a cui è sottoposto (per questo motivo conviene impiegare diodi a giunzione Schottky). Chiaramente, in queste condizioni, il calo di rendimento non è dovuto alla potenza dissipata dal diodo, bensì va inteso in riferimento alla condizione ideale in cui tutte le celle sono illuminate in modo uniforme. Se un pannello è collocato in ambienti dove l'illuminazione varia

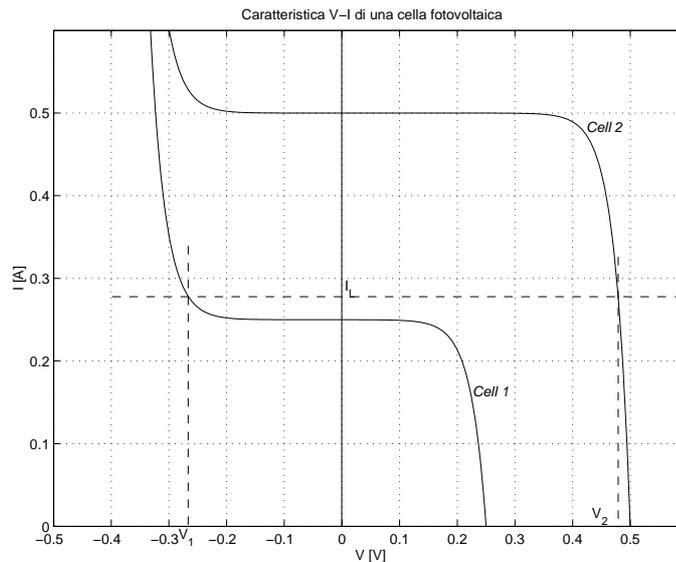


Figura 2.9: Caratteristiche V-I di due pannelli illuminati in modo differente.

spesso (si pensi, ad esempio, ai veicoli ad alimentazione solare) risultano maggiormente idonei gli MPPT basati sulla valutazione della *conduttanza incrementale*, risultando questi i più veloci ed adattabili al cambiamento delle condizioni esterne; per contro, essi sono solitamente più complessi rispetto ad altri algoritmi noti. Dal punto di vista storico, la prima soluzione proposta, da cui sono derivati altri metodi, è quella *Perturb & Observe* (P&O) attraverso la quale si varia la tensione ai capi del pannello in funzione delle variazioni nella potenza erogata: il cuore del sistema è un algoritmo di salita lungo il gradiente o *hill-climbing*, il quale risulta molto efficace poiché la potenza in funzione di  $V$  o  $I$  è massima in un solo punto (figura 2.8).

I successivi paragrafi illustrano i principali tipi di Maximum Power Point Tracker che, per la maggior parte, sono basati su algoritmi residenti nella memoria di un microprocessore; ciò è possibile, e soprattutto conveniente, poiché la presenza in commercio di microcontrollori a basso costo ne rende la realizzazione molto economica e facilmente riconfigurabile.

### 2.3.1 Il metodo “Perturb & Observe”

La derivata  $\frac{dP}{dV}$  possiede le proprietà elencate in tabella 2.3.1. La ricerca del punto di massi-

$dP/dV > 0$	$P$ aumenta
$dP/dV < 0$	$P$ diminuisce
$dP/dV = 0$	$P = P_{max}$

Tabella 2.3.1

mo, quindi, può essere eseguita variando a piccoli passi la tensione  $V$  e valutando l’incremento della potenza  $P$  fornita al carico fino a quando non viene raggiunto il MPP.

Si può notare che tale metodo può adattarsi a diversi tipi di pannelli solari, in quanto non necessita della conoscenza delle loro caratteristiche intime, ma è sufficiente la sola misura della potenza e della tensione ai capi dei pannelli. E’ bene notare che la medesima azione di controllo è ottenuta nei confronti di variazioni del carico, dell’intensità della radiazione incidente e della temperatura, ciascuna delle quali comporta l’alterazione nella posizione del MPP.

Affinché l’algoritmo possa operare correttamente, è necessario conoscere il valore della potenza erogata dai pannelli e della variabile da cui essa dipende, che può essere tensione o corrente; queste ultime, se si modella il MPPT come un trasformatore in corrente continua, possono essere misurate sia in corrispondenza dei pannelli che all’uscita del MPPT stesso, poiché il rapporto di trasformazione è noto.

In realtà, i convertitori DC-DC che normalmente vengono utilizzati negli MPPT non si comportano come trasformatori ideali, pertanto il rapporto di trasformazione non è ottenibile con calcoli aritmetici elementari; ciò è riscontrabile, ad esempio, in corrispondenza della zona di demarcazione tra funzionamento in modalità continua e discontinua, dove il rapporto tra tensione di uscita e tensione d’ingresso non è più il semplice duty-cycle dell’onda quadra con cui il convertitore è pilotato. Tale considerazione rende consigliabile la misura delle grandezze d’interesse in corrispondenza dell’ingresso del MPPT.

I convertitori DC-DC utilizzati sono solitamente di tipo switching, dato che l’obiettivo finale è quello di massimizzare l’efficienza di conversione dell’energia solare in elettrica; la figura 2.10 rappresenta il caso di un convertitore buck (abbassatore di tensione) per il quale le relazioni tra tensioni e correnti d’ingresso e d’uscita sono, nel caso ideale:

$$V_{out} = DV_{in} \quad (2.3)$$

$$I_{out} = \frac{1}{D}I_{in} \quad (2.4)$$

Si nota facilmente che il comportamento di un siffatto circuito è analogo a quello di un trasformatore ideale. Nel caso di figura, il controllore provvede a regolare la tensione d’uscita  $V_{out}$  al valore desiderato; tale regolazione è effettuata in modo che il duty-cycle dell’interruttore  $S$  sia tale che  $V_{in} = V_{mp}$ , ossia il pannello solare lavori nel MPP della caratteristica. Per eseguire l’algoritmo di salita lungo il gradiente è necessario misurare della corrente media fornita dal pannello, ad esempio valutando la caduta di tensione ai capi della resistenza  $R_{sh}$ , che deve essere

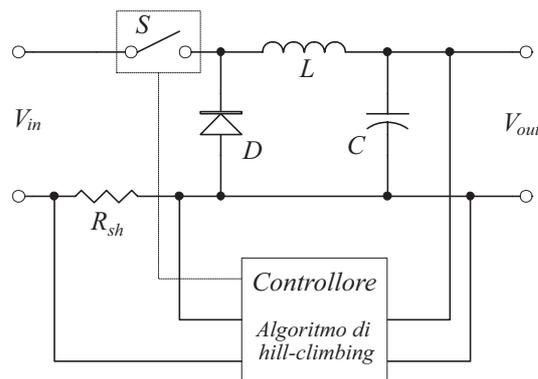


Figura 2.10: Convertitore buck controllato da algoritmo di Maximum Power Point Tracking.

di piccolo valore, al fine di massimizzare il rendimento.

Il metodo più semplice per implementare l'algoritmo è realizzarlo in software all'interno di un microcontrollore, il quale contiene alcuni canali A/D che rendono minimo il numero di componenti esterni.

Il problema principale dell'algoritmo P&O, che ha dato lo spunto alla ricerca di nuovi metodi di inseguimento, è che esso può addirittura compiere azioni di controllo errate quando l'illuminazione dei pannelli varia velocemente, in quanto non è intrinsecamente in grado di stabilire se la variazione temporale della potenza generata dipende dall'errato posizionamento del punto di lavoro o da un'effettiva variazione della luminosità, ossia della fotocorrente; ciò è causato dal fatto che l'azione di controllo è eseguita soltanto sulla base della potenza erogata, senza conoscere la reale posizione del MPP in una data condizione.

L'inconveniente, comunque, influenza solo i tempi di assestamento pertanto il controllo P&O è da ritenersi adeguato in situazioni dove non sono necessarie elevate velocità di risposta.

### 2.3.2 Il metodo della Conduttanza Incrementale

Tale metodo di controllo offre notevoli vantaggi rispetto al P&O, poichè può essere realizzato a partire dal medesimo hardware, variando soltanto l'algoritmo software. Esso permette di eseguire il tracking anche in presenza di veloci variazioni di carico e/o delle condizioni ambientali, pertanto è la scelta obbligata in tutti i sistemi di generazione fotovoltaica installati in veicoli mobili come ad esempio i *solar car experiments*.

In linea di principio, tale algoritmo mira a ricavare una stima della posizione del MPP attraverso il calcolo della derivata della potenza erogata rispetto ad una corrispondente variazione della tensione ai capi dei pannelli. Tale informazione è immensamente utile poichè permette di quantificare la vicinanza tra MPP e punto di lavoro in un dato istante; questo perché il valore della derivata della potenza rispetto alla tensione diminuisce avvicinandosi al MPP.

Operando alcuni calcoli attraverso incrementi infinitesimi, è possibile ricavare un semplice metodo per implementare l'algoritmo IncCond (*INC*remental *COND*uctance) utilizzando lo stesso hardware relativo al P&O; essendo  $P = VI$ , è possibile calcolare la derivata  $dP/dV$

applicando la regola di derivazione del prodotto, ottenendo:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV}$$

Manipolando l'equazione ricavata, e sapendo che nel MPP la variazione  $\Delta P/\Delta V$  è nulla si ottiene che:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (2.5)$$

Estendendo agli altri due casi riportati nella tabella 2.3.1 si conclude che:

$$\frac{dP}{dV} > 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \quad (2.6)$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \quad (2.7)$$

Le variazioni di tensione e corrente possono essere valutate rispetto ad un determinato intervallo temporale, dato che la moltiplicazione del primo membro delle relazioni soprastanti per  $dt/dt$  non comporta alterazioni nel risultato. Il nome dell'algoritmo deriva dall'equazione 2.5, poiché il termine  $dI/dV$  calcolato corrisponde all'incremento della conduttanza differenziale dei pannelli rispetto al valore precedente  $I/V$ .

Il miglioramento offerto da tale approccio consiste nell'ottenimento di una velocità di tracking molto maggiore rispetto al precedente metodo, a fronte di una complicazione software tutto sommato trascurabile. Alcuni risultati sperimentali sono visibili in [4].

### 2.3.3 Altri Metodi di Tracking

Esistono altri metodi per controllare il punto di massima potenza di un pannello fotovoltaico; ad esempio, vi sono soluzioni circuitali che utilizzano dei risultati ottenuti teoricamente ([12]), i quali stimano che la tensione  $V_{mp}$  sia pari al 75% della tensione a circuito aperto; tuttavia, per gli impieghi spaziali, non è possibile affidarsi a tale stima, in quanto le escursioni di temperatura sono molto più elevate rispetto alle installazioni terrestri.

Un'altra implementazione è ottenibile notando che la procedura di tracking può essere intesa come l'apprendimento di una rete neurale supervisionata (ad esempio tramite l'algoritmo di back-propagation); in questo caso, però, i dati devono essere elaborati in modo da identificare una funzione d'errore che deve essere minimizzata.

Infine, se si possiede una sufficiente quantità di dati sperimentali ottenuti da una caratterizzazione dei pannelli solari è possibile utilizzare un algoritmo che sulla base di tensione, corrente e temperatura misurate ricavi la posizione del MPP e modifichi di conseguenza il punto di lavoro (metodo di curve fitting).

## Capitolo 3

# Interfacciamento dei pannelli solari

In questo capitolo viene proposta una soluzione circuitale per l'interfacciamento con il bus di alimentazione dei pannelli solari installati a bordo di AtmoCube. Come visto nel precedente capitolo, essi necessitano di un controllo dedicato per assicurare il massimo rendimento (MPPT), e ciò rende necessario l'impiego di un convertitore comandato attraverso un opportuno algoritmo di tracking.

In sintesi, nella prima parte sono riportate le considerazioni sulla disposizione ottima dei pannelli, in seguito si elaborano le specifiche per il bus principale di alimentazione ed infine è proposto un semplice circuito MPPT realizzato sperimentalmente.

### 3.1 Caratteristiche dei pannelli utilizzati

I pannelli utilizzati a bordo di AtmoCube sono prodotti da Tecstar, un'azienda che è stata posta in fallimento ed i cui stabilimenti sono stati in parte assorbiti da Emcore, anch'essa operante nel settore dei pannelli fotovoltaici. E' stato possibile acquisire delle scorte di magazzino approfittando della situazione fallimentare ed ottenere prodotti adatti ad un impiego aerospaziale ad un prezzo abbastanza inferiore a quello di mercato.

La tecnologia costruttiva è basata su tripla giunzione di arseniuro di gallio, la quale permette di ottenere efficienze di conversione fino al 23%.

I principali dati dichiarati dal costruttore sono riportati in tabella 3.1.

$I_{sc}$	355mA
$V_{oc}$	2.415V
$I_{mp}$	344mA
$V_{mp}$	2.3V
Dimensioni	63.4 × 38.7 × 0.36 mm

Tabella 3.1

I dati di tabella 3.1 sono sufficienti per realizzare un controllo del punto di lavoro dei pannelli, sebbene per ottenere un modello più accurato sia necessaria una fase di caratterizzazione, poiché non è stato possibile reperire informazioni più approfondite sul prodotto.

Di norma, il test sui pannelli fotovoltaici deve essere eseguito in una camera climatica in cui sia possibile variare l'inclinazione dei pannelli stessi rispetto alla fonte di luce. Quest'ultima è costituita da una lampada solare, ossia un emettitore di luce caratterizzato dal possedere uno

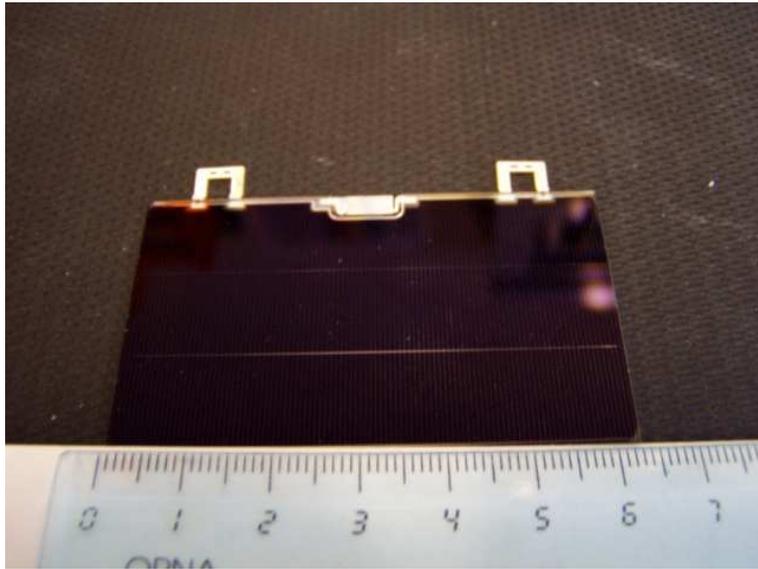


Figura 3.1: Uno dei 15 pannelli solari installati su *AtmoCube*.

spettro di emissione analogo al quello del Sole. E' inoltre necessario determinare l'intensità della radiazione proveniente dalla lampada, poiché i dati caratteristici dei pannelli sono forniti in unità  $AMx$  ( $AM0$  per lo spazio); ciò può essere ottenuto con un particolare strumento chiamato *piranometro*.

La fase di test allo stato attuale non può essere eseguita, poiché una lampada solare, oltre a risultare poco reperibile, è particolarmente costosa. D'altra parte, volendo approfittare della luce naturale del Sole, diverrebbe troppo complicato portare una camera climatica all'aperto, e comunque i risultati sarebbero affetti da errori tali da rendere inutile la stessa fase di caratterizzazione.

Per tali motivi l'adozione di un dispositivo MPPT è d'obbligo in quanto esso, attuando un controllo in anello chiuso, non necessita di un modello particolarmente accurato del sistema controllato.

### 3.2 Disposizione dei Pannelli Solari

Le simulazioni del capitolo 1 sono state eseguite assumendo di poter installare tre pannelli solari per ciascuna delle cinque facce libere del satellite. Dalle considerazioni effettuate nel paragrafo 2.3 si è compreso che collegando in serie dei pannelli solari sottoposti ad un differente livello di illuminazione si può perdere della potenza utile, poiché quelli meno illuminati potrebbero divenire dei carichi.

Un ulteriore fattore determinante è dato dall'assetto del satellite: il sistema di controllo prevede solo l'allineamento lungo il nadir, ossia l'asse che congiunge il baricentro del satellite con il centro della Terra; tale orientamento è ottenuto sfruttando il gradiente di gravità attraverso un boom provvisto di una massa di valore opportuno; esso è espulso dopo che le rotazioni del cubo sono state sufficientemente smorzate da un attuatore magnetico costituito da una bobina che allinea il proprio campo magnetico con quello terrestre (figura 3.2). Dato che tra la strumentazione di misura è presente anche un magnetometro, la bobina dovrà essere spenta

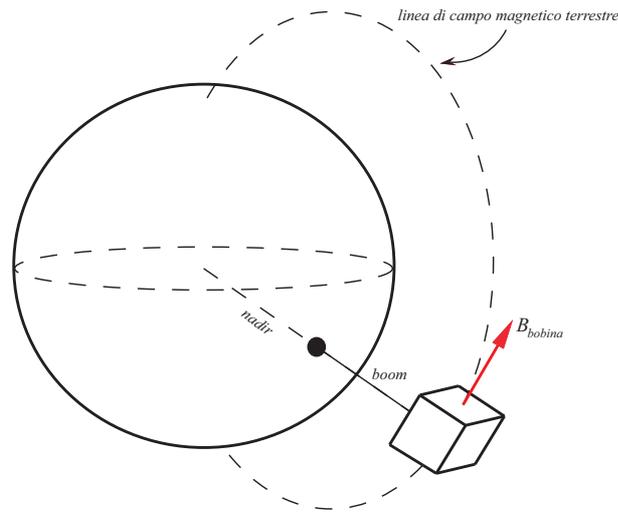


Figura 3.2: Assetto di AtmoCube.

per non introdurre errori e minimizzare i consumi, quindi è probabile che il satellite mantenga uno spin residuo attorno al nadir anche dopo la fuoriuscita del boom; ciò significa che le facce laterali illuminate dal Sole potrebbero cambiare nell'arco di secondi.

Si ritiene utile riportare in figura 3.3 la numerazione delle facce del cubo secondo gli assi del sistema di riferimento proprio del satellite utilizzato per le simulazioni in STK; a tale scopo l'ambiguità riguarda le sole facce laterali, poichè la faccia 5 è univocamente determinabile, essendo quella non rivolta verso Terra. Nel modello realizzato per la simulazione, si è identificato il numero di ogni faccia associandovi una figura geometrica; ciò si è reso necessario per riconoscere la posizione dei vari pannelli solari, poichè STK necessita che i poligoni corrispondenti possiedano un'orientazione specifica rispetto alla direzione degli assi del sistema di riferimento del satellite.

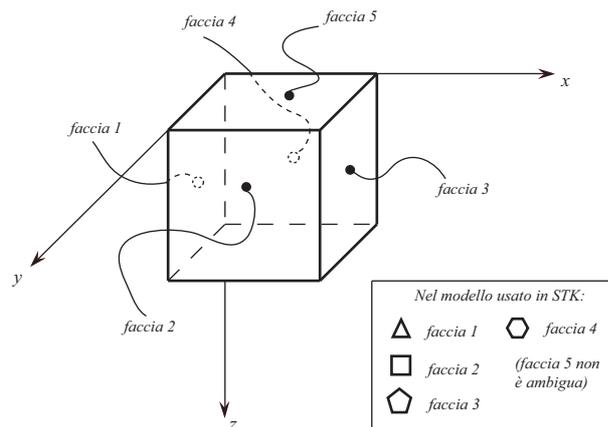


Figura 3.3: Numerazione delle facce laterali del cubo.

A causa dello spin residuo, se i raggi solari dovessero colpire la parte laterale del satellite, la potenza elettrica sarebbe fornita dalle facce 1-4 secondo l'andamento qualitativo di figura 3.4;

esso è facilmente intuibile, poiché la potenza convertita dipende dall'angolo di incidenza secondo la legge del coseno (formula 1.1, capitolo 1); d'altra parte per angoli di incidenza maggiori di  $60^\circ$  tale legge perde di validità e la potenza disponibile da una certa faccia tende a zero con derivata nulla; nello stesso tempo, però, la faccia adiacente inizia ad essere illuminata in modo crescente poiché il cubo sta ruotando.

Il risultato complessivo è che la corrente media erogata è pari circa a quella che sarebbe for-

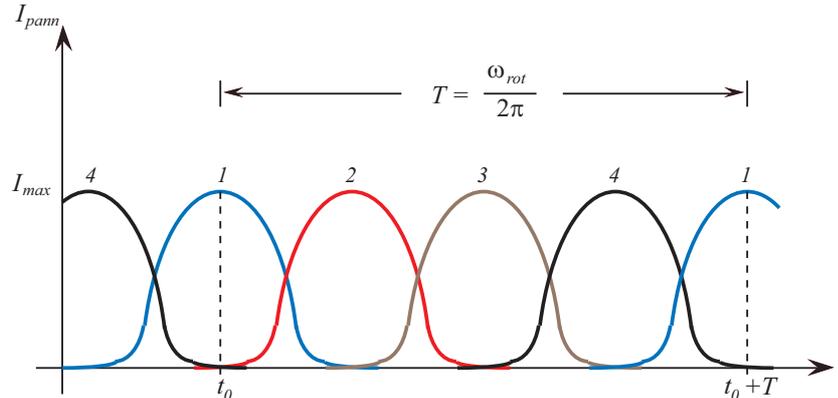


Figura 3.4: Andamento della potenza generata dai pannelli solari collocati sulle facce laterali di AtmoCube.

nita se il satellite non si trovasse in rotazione; ci si aspetta, in realtà, una leggera ondulazione residua dovuta alla commutazione tra una faccia e l'altra. Tale comportamento che, in linea di massima, non causa grosse complicazioni a livello di energia disponibile, offre la possibilità di mantenere la temperatura dei pannelli solari leggermente più bassa rispetto al caso in cui una sola faccia del satellite fosse continuamente illuminata, poiché definito  $T$  il periodo di rotazione attorno al nadir, ciascuna faccia si trova esposta ai raggi solari per  $T/4$  mentre per  $3T/4$  è al buio.

Nelle condizioni appena citate occorrerebbe utilizzare, a rigore, un modello che descriva il comportamento dinamico dei pannelli solari, tuttavia, anche nell'ipotesi di rotazione 50-60 giri al minuto, ossia circa 1 giro al secondo, ciascuna faccia verrebbe sottoposta ad un impulso di luce della durata di 0.25s, il quale presenta un contenuto spettrale tale da poter considerare valido il comportamento descritto dalla caratteristica V-I precedentemente esaminata (che è valida solo per la corrente continua).

### 3.2.1 Collegamento elettrico dei pannelli

Le considerazioni fatte sinora permettono di trarre le seguenti conclusioni intermedie:

- I tre pannelli disposti su ciascuna delle 5 facce disponibili possono essere collegati in serie tra loro dato che essi risulteranno illuminati uniformemente dal Sole.
- Non si può dire altrettanto per i pannelli collocati su facce differenti, poiché essi sperimentano gradi diversi di illuminazione.

Si conclude, quindi, che la corrente proveniente da ciascuna faccia deve essere gestita indipendentemente dalle altre, ossia occorre far confluire le varie correnti in un unico nodo sommatore, evitando però che esse circolino nei pannelli non illuminati dal Sole. In altre parole, occorre

permettere alle varie correnti di fluire in un solo verso, e ciò può essere ottenuto per mezzo di un semplice diodo connesso in serie ai pannelli di ciascuna faccia, secondo lo schema elettrico di figura 3.5; nella figura ciascun pannello è modellizzato, per semplicità, attraverso un generatore di corrente e si indica con  $I_i$  il contributo fornito dalla  $i$ -esima faccia del cubo. I diodi

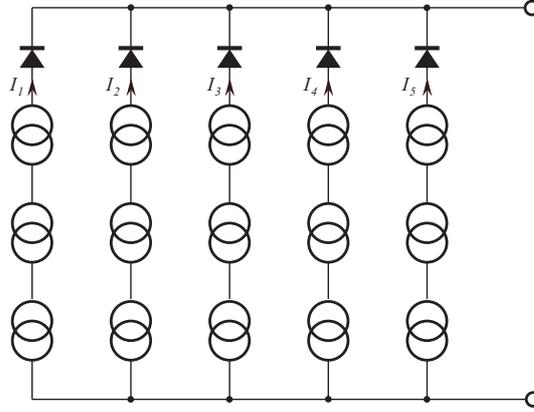


Figura 3.5: Collegamento dei pannelli solari.

hanno lo scopo di proteggere i pannelli dalle correnti inverse che li potrebbero danneggiare; al fine di minimizzare le perdite è necessario che la potenza dissipata su tali componenti non sia troppo elevata e quindi diviene consigliabile l'impiego di diodi Schottky i quali, grazie a cadute di tensione ridotte a 0.5V, dissipano al massimo:

$$P_D = \sqrt{3} \cdot (0.5 \cdot 0.344) \approx 300mW$$

Avendo tenuto conto che le facce illuminate possono essere al massimo tre contemporaneamente e che la potenza generata dai pannelli è ottenuta quando i raggi colpiscono le tre facce con gli angoli  $\theta = 45^\circ$  e  $\varphi = 35.3^\circ$  (cfr. [1], cap. 7).

Il collegamento proposto, tuttavia, non costituisce la miglior soluzione dal punto di vista del rendimento complessivo. Ciascuna faccia del satellite, in generale, è sottoposta ad un differente grado di illuminazione, pertanto i pannelli che in un certo istante forniscono energia sono caratterizzati da MPP differenti (si ricorda che la posizione del MPP dipende dall'intensità della radiazione incidente sul pannello); in questo caso, la tensione ai capi del parallelo di tutte le facce di AtmoCube sarà fissata dal convertitore MPPT in modo da massimizzare la potenza estratta, ma tale operazione porterà di fatto ad una perdita di energia, poiché nessuna delle facce opererà nel proprio punto di massima potenza, ma in un punto medio.

La condizione di funzionamento ideale, d'altra parte, sarebbe quella in cui ciascuna faccia del satellite è equipaggiata con un MPPT dedicato, ma tale soluzione progettuale deve essere scartata, poiché complica notevolmente il circuito e non è giustificata da dati numerici. Infatti non è possibile fornire una stima della potenza persa derivante dal collegamento in parallelo, poiché il modello dei pannelli a disposizione non è abbastanza accurato. D'altra parte, si può intuire che, da un punto di vista qualitativo, il punto di lavoro fissato dal MPPT sarà verosimilmente vicino al punto di massima potenza della faccia maggiormente illuminata, pertanto la potenza persa corrisponderà alle facce illuminate di meno.

### 3.3 Accumulatori di bordo

L'energia necessaria al funzionamento del satellite durante l'eclisse è fornita da accumulatori, i quali vengono ricaricati durante la fase "giornaliera" con l'energia in eccesso proveniente dai pannelli solari.

La tipologia di accumulatore è stata già scelta in fase di definizione della missione ed è ricaduta su una cella agli ioni di litio mod. MP144350 prodotta dalla Saft, avente le caratteristiche riportate in tabella 3.3: Sebbene sia possibile "correggere il tiro" e scegliere un altro modello, occorre

Tensione Nominale	3.6V
Capacità tipica	2.3Ah
Temperature d'impiego	0 ÷ 50° (carica) -40 ÷ 60°C (scarica)
Tensione Massima	4.1V ± 0.04V
Corrente Massima di carica	1C (2.3A)
Dimensioni	43 × 50 × 13.5 mm
Peso	70g

Tabella 3.3

notare che il presente è progettato e costruito per impieghi aerospaziali, ossia per operare nel vuoto ed in assenza di pressione atmosferica.

Un problema che potrebbe sorgere riguarda la necessità di caricare tale accumulatore anche a temperature inferiori a 0°C; il datasheet del prodotto lascia intendere che ciò possa essere possibile, poichè nel documento Saft consiglia di contattare i propri tecnici per definire le temperature d'impiego; allo stato attuale, però, non si è ricevuta alcuna risposta, quindi non si può, in linea di principio, assumere che tali accumulatori sopporteranno eventuali ricariche sottozero.

### 3.4 Il convertitore MPPT

Il tracking del punto di massima potenza di un pannello fotovoltaico è, nella sua essenza, un algoritmo con il quale controllare il convertitore vero e proprio che è posto tra il pannello ed il carico. Questo paragrafo si occupa di determinare qual'è il convertitore più idoneo per l'interfacciamento dei pannelli solari, in base ai requisiti relativi alle tensioni di alimentazione dei sistemi di bordo.

Il satellite AtmoCube incorpora vari sottosistemi le cui tensioni di funzionamento nominali sono pari a 3.3V, 5V e 12V. In realtà, spettrodosimetro e magnetometro sono in grado di funzionare con tensioni da 8V a 15-16V, pertanto la tensione di 12V non deve essere garantita con elevata accuratezza.

Dal punto di vista dei consumi istantanei, l'elemento predominante è costituito dal trasmettitore a radiofrequenza che mediamente dovrà fornire una potenza stimabile in 1-2W all'antenna trasmittente (attualmente il budget del RF-link e la progettazione delle antenne non sono ancora completi); la conoscenza della tensione di alimentazione del sottosistema caratterizzato dal maggior consumo permette di determinare la configurazione degli accumulatori e dei convertitori che massimizza il rendimento di conversione dell'energia solare in elettrica.

In base alle tensioni richieste, all'uscita del convertitore MPPT dovrà in ogni caso essere assicu-

rata una tensione di almeno 6V, che eventualmente potranno essere elevati a 12V per mezzo di un convertitore step-up.

Dal punto di vista del convertitore adibito al controllo del punto di lavoro dei pannelli solari sorgono alcuni problemi: assumendo che, per differenti condizioni di illuminazione, il campo di escursione della tensione  $V_{mpp}$  relativamente ad una faccia vada da 0 a 6.5V, la scelta della topologia deve cadere su un convertitore DC-DC di tipo *boost* (o più genericamente step-up); infatti esso è in grado di assicurare il trasferimento di potenza quando la tensione di uscita (almeno 6V per AtmoCube) è maggiore rispetto a quella d'ingresso.

In realtà, esiste un intervallo di valori della tensione d'ingresso per i quali il convertitore boost non potrebbe funzionare (da 6 a 6.5V, se la tensione di uscita è 6V) e dato che a tale intervallo corrisponde una piena illuminazione solare del satellite, si comprende tale situazione comporterebbe una notevole perdita di potenza, che potrebbe essere utilizzata per ricaricare gli accumulatori di bordo.

Se si suppone di collegare in serie due celle da 3.6V all'uscita del convertitore MPPT, queste imporranno una tensione che può andare da un minimo di 6V ad un massimo di 8V circa; anche in tal caso rimane il medesimo intervallo di tensioni di ingresso per le quali il convertitore non può funzionare.

La soluzione può essere quella di collegare 3 celle in serie, cosicché il MPPT sia in grado di lavorare in qualsiasi condizione di illuminazione (anche minima), ottenendo l'ulteriore vantaggio di poter alimentare direttamente dalla batteria i sottosistemi che sono in grado di funzionare nel range di tensione presente ai capi di quest'ultima (9-12V circa).

Dal punto di vista del pericolo di sovraccarico delle celle in fase di carica, si fa presente che il valore massimo stimato della corrente proveniente dai pannelli è di 600mA (ricavato in [1]), quindi è sufficiente prevedere un controllo di over e under-voltage per evitare la loro degradazione.

Un potenziale problema derivante dall'utilizzo di 3 celle anziché 2 è dato dall'ingombro, poiché affiancando 3 elementi del modello Saft MP144350 si ottiene approssimativamente un parallelepipedo di  $40 \times 40 \times 50$ mm. Dal punto di vista del peso, il budget stilato in [1] concede 300g agli accumulatori, pertanto ne potrebbero essere utilizzati addirittura 4 ( $70 \times 4 = 280g$ ).

Si riporta in figura 3.6 lo schema elettrico del convertitore boost: esso è gestito da un microcontrollore che misura i valori di tensione e corrente forniti dai pannelli solari e controlla la tensione ai capi delle batterie, sia per non danneggiarle che per regolare opportunamente il duty-cycle del convertitore. A queste funzioni conviene aggiungere una per la misura della corrente di carica/scarica degli accumulatori: tale dato non è necessario per il funzionamento dell'algoritmo di tracking, tuttavia è conveniente conoscerlo per inviarlo a Terra assieme agli altri dati di telemetria, in modo da acquisire dati reali da cui partire qualora venisse progettato un nuovo satellite.

### 3.5 Dimensionamento dei componenti

Si riportano inizialmente alcune considerazioni preliminari sul microcontrollore che gestisce il MPPT; esso è un Microchip PIC16F877 ed è stato scelto per i seguenti motivi:

- Sono disponibili l'ambiente di sviluppo ed i tools per il debug, nonché una scheda dimostrativa interfacciabile con circuiti esterni.

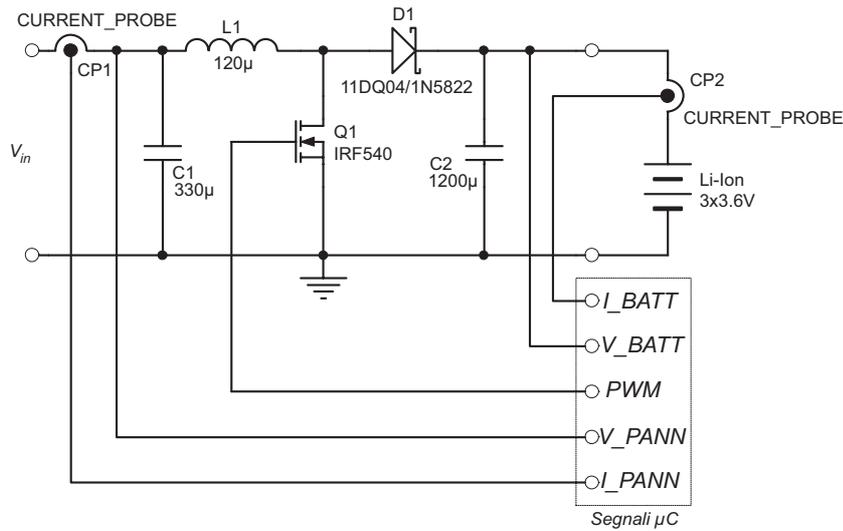


Figura 3.6: Schema elettrico del MPPT.

- La scheda di controllo per il ricetrasmittente è già stata realizzata in un precedente lavoro di tesi ed utilizza un microcontrollore 'F877, pertanto l'integrazione del software di gestione dell'alimentatore può essere eseguita senza la necessità di tradurre le varie routine.

Il PIC16F877 viene fatto lavorare a 20MHz ed il ciclo macchina risultante è pari a 200ns; esso è provvisto di periferiche adibite alla gestione di due uscite PWM che lo rendono facilmente interfacciabile al convertitore MPPT. Se si utilizza il clock derivato dall'oscillatore principale, è possibile ottenere segnali PWM a frequenze fino a 200kHz ed oltre, tuttavia al crescere della frequenza diminuisce anche la risoluzione in termini di duty-cycle (5.5bit a 208kHz); per tale motivo si è preferito utilizzare il valore di 156kHz, che permette di avere una risoluzione di 7bit, ossia 128 possibili valori: ad esempio, ipotizzando che gli accumulatori collegati all'uscita del MPPT impongano una tensione di 10V, e ricordando che per un convertitore boost  $V_{in} = V_{out}(1 - D)$ , si ottiene che un  $\Delta D$  pari a  $1/128$  permette di variare il punto di lavoro dei pannelli di:

$$\frac{\Delta V_{in}}{\Delta D} = \frac{V_{out}}{128} = \frac{10}{128} \approx 80mV$$

Va sottolineato che la periferica di controllo del segnale PWM, pur essendo facilmente gestibile, non è altrettanto performante dal punto di vista della velocità: la frequenza di 156kHz, cui occorre attenersi per poter variare il duty-cycle con step sufficientemente piccoli, vincola ad utilizzare un'induttanza di valore ed ingombro maggiori a parità di corrente erogata al carico; una frequenza di lavoro più elevata permette di utilizzare induttanze inferiori ed ottenere risultati analoghi o addirittura migliori dal punto di vista del ripple di corrente e dei tempi di risposta.

Come si vedrà in seguito, il microcontrollore può essere utilizzato anche per monitorare in qualsiasi istante le condizioni delle batterie e dei bus di alimentazione; tuttavia, per implementare tale funzionalità si rende necessario mantenerlo sempre in funzione, senza mai entrare in modalità a basso consumo; ciò potrebbe rappresentare un problema quando l'energia disponibile negli accumulatori è ai livelli minimi.

### 3.5.1 Induttore

Il valore massimo della corrente che proviene dai pannelli è 600mA ([1], cap. 7), di conseguenza i componenti dovranno essere dimensionati per sopportare correnti dell'ordine di 1A, ottenendo così un discreto margine progettuale che tiene conto della ridotta possibilità di dissipare potenza e di eventuali picchi di corrente che possono aver luogo in caso di fenomeni SEE (*Single Event Effects*) causati da particelle ad alta energia che potrebbero colpire il satellite. L'induttore (L1) è un componente che si oppone alle variazioni di corrente, pertanto la corrente che lo attraversa sarà tanto più costante quanto più l'induttanza e/o la frequenza di lavoro del convertitore sono elevate. Chiaramente, le considerazioni progettuali devono portare ad una soluzione di compromesso poiché elevati valori di induttanza permettono di ottenere ripple di corrente ridotti, ma rendono più lenta la risposta del convertitore ad eventuali variazioni repentine nel carico ed inoltre comportano un maggiore ingombro.

Il collegamento dell'induttore all'array di pannelli solari deve essere effettuato con cautela, poiché essi agiscono da generatore di tensione o di corrente a seconda del valore della tensione ai loro capi (cfr. figura 2.3), pertanto è conveniente collegare un condensatore (C1) a bassa perdita serie (low-ESR) in parallelo ai pannelli, cosicché l'induttore “veda” un generatore di tensione quasi ideale. In tal modo la forma d'onda della corrente che attraversa l'induttore, in condizioni di regime, è praticamente triangolare e deve essere tale che il valore massimo non sia superiore a 600mA, altrimenti neppure C1 riuscirà a fornire la corrente necessaria a L1 per caricarsi. Questo sta a significare che, attraverso tale convertitore, si riuscirà ad assicurare al carico una corrente massima pari a 600mA a cui va sottratta la metà del ripple di corrente in L1 (si faccia riferimento alle forme d'onda riportate in figura 3.7). In un convertitore DC-DC ideale di tipo boost il ripple di corrente nell'induttore è calcolabile per mezzo della relazione:

$$\Delta I_L = \frac{V_{in}DT_S}{L} \quad (3.1)$$

Dove  $T_S$  è il periodo della portante PWM ( $1/156kHz \approx 6.5\mu s$  in questo caso) e  $D$  è il duty cycle. Solitamente il ripple di corrente viene fissato dal progettista nella misura di un 20-30% del valore della corrente massima; nel caso di AtmoCube, occorre porre attenzione alla scelta del ripple, poiché se esso è troppo elevato si otterrà un funzionamento discontinuo del convertitore qualora l'assorbimento dei sistemi a valle divenga basso. Se però si considera che la corrente eccedente è utilizzata per ricaricare gli accumulatori e che il convertitore MPPT può essere anche disattivato dal microcontrollore, si può concludere che il carico, quando attivo, assorbirà sempre la medesima corrente, mentre il MPPT potrà essere disattivato se gli accumulatori sono pienamente carichi.

Assumendo, quindi, un ripple pari a 150mA la corrente media che scorrerà nell'induttore sarà circa 525mA. Tale valore è relativo alla migliore condizione di illuminazione da parte del Sole, tuttavia il meccanismo di tracking è in grado di adattarsi anche alle variazioni della corrente di cortocircuito che, comunque, potrebbe essere stimata misurando la corrente che scorre nella bobina quando il transistor Q1 è mantenuto attivo per un tempo sufficientemente lungo. Noto il valore del ripple, occorre calcolare L1 sulla base dei valori medi per il duty-cycle e  $V_{in}$ : nel MPP si avrà una tensione d'ingresso di circa 6.5V, mentre in uscita dal convertitore deve essere presente una tensione al massimo pari a  $4.1 \times 3 = 12.3V$ , quindi il duty cycle relativo al caso peggiore vale  $1 - V_{in}/V_{out} \approx 0.47$ ; in conclusione, l'induttanza deve essere pari a:

$$L1 = \frac{V_{in}DT_S}{\Delta I} \approx 132\mu H$$

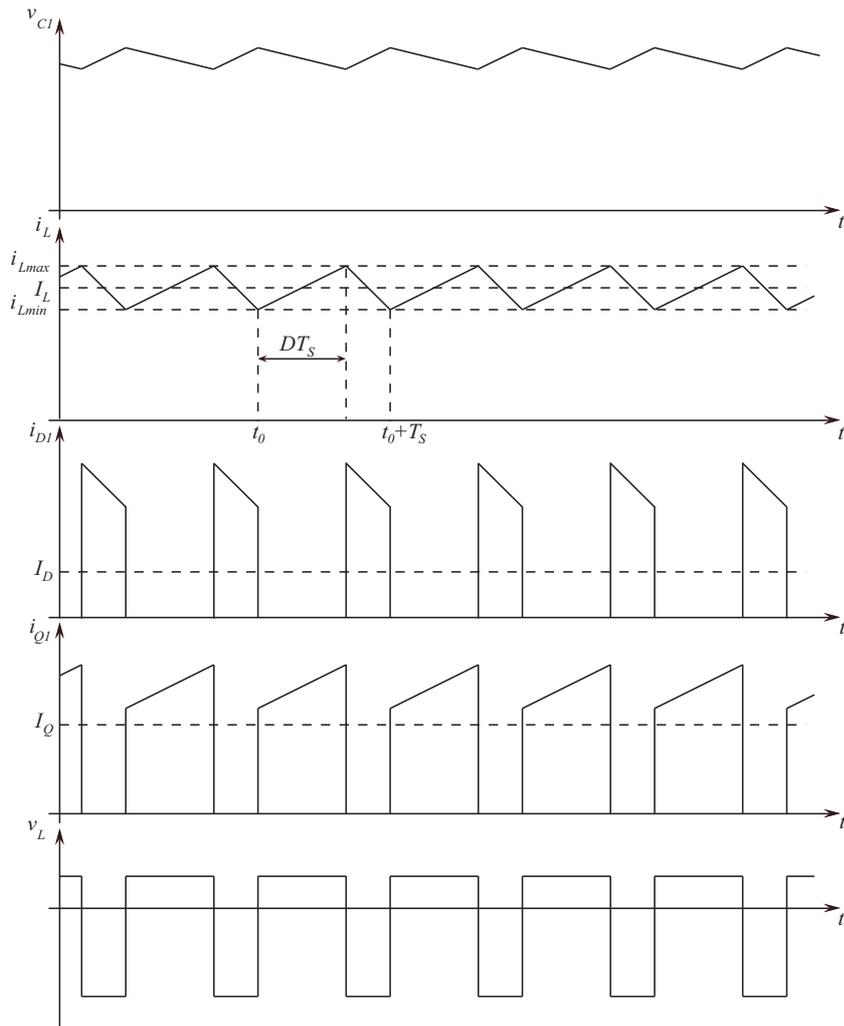


Figura 3.7: Correnti e tensioni in un convertitore boost.

Valore che può essere arrotondato ai 100 o 120 $\mu$ H disponibili in commercio; se si sceglie un induttore avvolto su un toroide è possibile confinare meglio il flusso magnetico e ridurre i disturbi causati da L1.

### 3.5.2 Transistor e diodo Schottky

I bassi valori delle correnti in gioco consentono di utilizzare componenti attivi di piccole dimensioni e basso costo. In particolare, il transistor MOSFET può essere un dispositivo da 1A con tensione massima tra drain e source pari circa alla massima tensione in uscita dal convertitore. Dal punto di vista delle prestazioni in commutazione, esso deve garantire tempi di ritardo, salita e discesa molto minori del periodo del segnale PWM con cui lo si pilota. Altro importante parametro è la resistenza del canale nello stato ON che deve essere la più piccola possibile, in modo da massimizzare il rendimento di conversione. Il pilotaggio può avvenire direttamente, attraverso un segnale compatibile TTL proveniente dal microcontrollore, oppure con l'interposizione di un driver.

La caduta di tensione sul diodo D1 concorre alla determinazione del rendimento complessivo del convertitore, pertanto conviene impiegare un componente a giunzione Schottky, che è caratterizzato da cadute dell'ordine di 0.5V o inferiori. Esso deve sopportare una corrente impulsiva che possiede un picco massimo di 600mA, mentre per la massima tensione inversa sussistono approssimativamente gli stessi limiti visti per il MOSFET. Le frequenze di lavoro, inoltre, impongono dei tempi di ripristino molto brevi che rendono i normali diodi al silicio non particolarmente performanti.

### 3.5.3 Condensatori d'ingresso ed uscita

I condensatori C1 e C2 per loro natura cercano di mantenere costante la tensione ai loro capi, cedendo o immagazzinando energia. Il loro valore va dimensionato in base alla frequenza di lavoro del convertitore MPPT e all'assorbimento del carico, nonché al valore del duty-cycle.

Il condensatore C2 ha il compito di ridurre il ripple della tensione in uscita dal convertitore MPPT; quest'ultimo è un convertitore boost, pertanto si conclude che C2 acquista energia una sola volta per ogni ciclo; esso è quindi uno dei componenti che limita il rendimento del circuito e che deve essere scelto abbastanza capiente da alimentare il carico negli istanti in cui la bobina si carica.

Dal punto di vista progettuale, occorre prendere in considerazione le peggiori condizioni di lavoro, cioè quando C2 è chiamato a fornire la massima corrente di uscita possibile. Nel presente convertitore le relazioni che legano tensioni e correnti d'ingresso ed uscita sono le seguenti:

$$V_{out} = \frac{1}{1-D} V_{in} \quad I_{out} = (1-D)I_{in} \quad (3.2)$$

Ad esempio, quando gli accumulatori sono scarichi la tensione in uscita del convertitore vale 9V; in questa condizione, assumendo che i pannelli si trovino nel MPP e riescano a fornire l'energia necessaria, il duty cycle è minimo e vale:

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} = 1 - \frac{6.5}{9} \approx 0.28$$

Pertanto, la corrente massima in uscita non può risultare maggiore di  $(1 - 0.28) \cdot I_{Lmedia} \approx 380mA$  e quindi il condensatore C2 deve fornire, durante il tempo necessario a L1 per caricarsi

( $t_{carica} = DT_s = 0.28 \cdot 6.5 \approx 1.8\mu s$ ), un'energia pari a:

$$E_{C2} = V_{out} I_{out} t_{carica} \approx 6\mu J$$

Per limitare lo stress delle celle al litio che, quando cariche, non possono superare i 4.1V per cella, conviene non esagerare con il valore del ripple di tensione ai capi di C2. Si decide di imporre un  $\Delta V_{out}$  pari a 0.1V, il quale comporta il seguente valore per la capacità:

$$E_{C2} = \frac{1}{2} C_2 \Delta V_{out}^2 \Rightarrow C_2 = \frac{2E_{C2}}{\Delta V_{out}^2} \approx 1200\mu F$$

Il valore calcolato è troppo elevato per un singolo condensatore poiché originerebbe dei problemi d'ingombro, pertanto è possibile:

- Utilizzare 4-5 condensatori da 330 $\mu$ F 16V posti in parallelo.
- Accettare un peggioramento del ripple ed impiegare un condensatore di capacità più piccola.

La soluzione di collegare più componenti piccoli in parallelo permette di contenere le dimensioni ed aggiungere ridondanza al sistema di alimentazione qualora uno dei condensatori dovesse venire danneggiato. Inoltre, tale capacità permette di soddisfare eventuali richieste transitorie di corrente da parte dei sistemi a valle, senza causare una perturbazione rilevante nel punto di lavoro del convertitore MPPT.

Il condensatore C1, il quale va collegato molto vicino all'induttanza L1, costituisce un percorso a bassa impedenza per la corrente che va a caricarla, ossia permette di far vedere a L1 un generatore di tensione quasi ideale. La presenza di tale componente risulta determinante poiché i pannelli solari hanno un comportamento non lineare che potrebbe influire negativamente sull'operazione del convertitore MPPT.

C1 deve essere in grado di immagazzinare una quantità di energia tale da permettere a L1 di caricarsi regolarmente al valore di picco, inoltre è conveniente sovradimensionarlo in modo da attenuare il ripple di tensione che potrebbe essere causato dalla rotazione del satellite (si veda par. 3.2). Ipotizzando che il convertitore operi a regime, ad ogni ciclo l'induttanza L1 accumulerà e cederà un'energia approssimativamente pari a:

$$E_L = \frac{1}{2} L_1 \Delta I^2 = \frac{1}{2} V_{in} DT_s$$

Dove  $\Delta I$  è stato sostituito con la sua espressione in eq.3.1; per il duty cycle si utilizza il valore con il quale è stato calcolato C2, pertanto l'energia che si ottiene è:

$$E_L = \frac{1}{2} \cdot 6.5 \cdot 0.28 \cdot 6.5 \cdot 10^{-6} \approx 6\mu J$$

Come ci si doveva aspettare, dovendo essere verificato il principio di conservazione dell'energia; quest'ultima deve essere fornita dal condensatore C1, il quale subisce un calo di tensione:

$$\Delta V = \sqrt{\frac{2E_L}{C_1}}$$

A questo punto, fissando il ripple  $\Delta V$  è possibile determinare il valore di capacità; in linea di massima, è ragionevole fissare il ripple a qualche centinaio di millivolt, in modo da limitare

il valore di  $C_1$ ; l'azione di controllo del MPPT non viene alterata, poiché il ripple di tensione causato dalla carica di  $L_1$  possiede uno spettro alle alte frequenze (l'armonica fondamentale si trova a 150kHz) che viene totalmente filtrato prima di entrare nel convertitore A/D presente nel microcontrollore.

Fissando per  $\Delta V$  il valore di 0.2V, si ottiene per  $C_1$ :

$$C_1 = \frac{2E_L}{\Delta V^2} = 300\mu F$$

Tale capacità può essere arrotondata allo standard commerciale di 330 $\mu$ F; anche in questo caso valgono le medesime considerazioni fatte per  $C_2$  (collegamento in parallelo di capacità più piccole), a parte per la tensione massima di lavoro che dal lato pannelli solari può essere scelta di 10V, contribuendo a diminuire l'ingombro dei componenti (disponibili anche in SMT).

### 3.5.4 Sonde di corrente

La misura della corrente proveniente dai pannelli e di quella assorbita o erogata dalle batterie può essere ottenuta inserendo due resistenze shunt di basso valore nei rami d'interesse e misurandone la caduta attraverso un amplificatore differenziale che, nella più semplice realizzazione pratica, corrisponde ad un amplificatore operazionale e 4 resistori. Va fatto presente che, se si volesse utilizzare un amplificatore differenziale sofisticato quale un 3-OP, la resistenza di shunt dovrebbe essere collocata sul ramo a potenziale minore rispetto al riferimento di massa, poiché in tal modo non si avrebbe sovrapposizione di una componente continua che quasi certamente porterebbe l'amplificatore a saturare.

In commercio esistono circuiti integrati appositamente realizzati per il current-sensing, i quali presentano il duplice vantaggio di poter essere inseriti in qualsiasi posizione e di possedere una bassissima resistenza di shunt, oltretutto già integrata e tarata al laser; essi richiedono un numero minimo di componenti esterni e, sebbene il loro costo ne renda improponibile l'impiego in prodotti di larga commercializzazione, il loro utilizzo aiuta senza alcun dubbio a semplificare la realizzazione pratica del convertitore MPPT.

## 3.6 Realizzazione del circuito

Al fine di verificare il funzionamento del convertitore MPPT proposto nei precedenti paragrafi, si è realizzata una versione sperimentale del circuito che, però, non può essere ancora considerata come un prototipo vero e proprio del sistema di alimentazione completo, poiché risulta sprovvista dei convertitori DC-DC che devono essere collegati a valle per provvedere le tensioni di alimentazione di 3.3 e 5V.

Nella presente realizzazione si sono collegati tre accumulatori Li-Ion standard (figura 3.8) all'uscita del convertitore, in modo da avere già a disposizione la tensione per GPS e spettroscopio, risparmiando così un convertitore. Tale soluzione, impiegata anche in apparecchi consumer con alimentazione a batteria, non è l'unica: esistono, ad esempio, circuiti integrati appositamente realizzati per controllare la carica di accumulatori NiCd, NiMh, Li e al piombo, i quali contengono alcune funzioni supplementari che potrebbero divenire utili per l'impiego in AtmoCube. In questa tesi si segnalano, in particolare, due componenti prodotti rispettivamente da Texas Instruments ed Intersil:

- BQ24702/3: permette di caricare svariati tipi di accumulatori attraverso un convertitore PWM di tipo buck operante a 300kHz (per avere elevato rendimento); oltre alle funzioni



Figura 3.8: *Celle al litio utilizzate per la realizzazione sperimentale.*

di rilevazione dello stato degli accumulatori, permette di rilevare l'assenza della tensione di alimentazione esterna e commutare automaticamente sulla batteria, assicurando che il carico sia alimentato in ogni momento. Inoltre è presente uno stadio DPM (Dynamic Power Management) che permette di regolare la corrente di carica in modo da rendere costante nel tempo l'assorbimento complessivo dalla rete. Quest'ultima caratteristica è desiderabile principalmente nei PC portatili, dove sono richieste dimensioni e costi sempre più ridotti anche per l'alimentatore esterno, vincoli che obbligano a limitare la corrente massima erogabile, la quale non è sufficiente ad alimentare il PC e, nel contempo, caricare il pacco batteria. Come ultima peculiarità, tale componente è facilmente interfacciabile ad un microcontrollore: quest'ultimo può abilitare il caricabatterie, impostarne la corrente di carica, la corrente massima assorbita dalla rete e la tensione di fine carica; dall'altro lato il BQ24702/3 è provvisto di uscite che indicano il valore della corrente di carica, lo stato della batteria e della tensione di rete.

- ISL6255: tale componente possiede funzioni identiche a quelle del BQ24702/3; l'unica differenza risiede nel fatto che al microcontrollore esterno viene fornita l'indicazione della corrente totale assorbita invece che quella di carica della batteria; tale differenza rende preferibile l'impiego del componente Texas, poiché la misura della corrente in uscita dal MPPT non è necessaria all'algoritmo di tracking, pertanto è preferibile conoscere la corrente nella batteria, da inviare come dato di telemetria.

L'adozione di un circuito caricabatterie dedicato impone di assicurare una tensione minima di uscita dal MPPT pari a 7V, a causa delle specifiche di utilizzo di entrambi gli integrati esaminati: l'algoritmo di tracking deve, pertanto, misurare anche la tensione di uscita in modo da attuare un controllo supplementare al fine di mantenerla superiore a tale valore, poiché in questo caso non vi è alcun dispositivo che impone tale tensione (nella soluzione sperimentale tale compito è assolto dalla batteria). Un possibile schema a blocchi della soluzione impiegante un circuito integrato supervisore di carica è riportata in figura 3.9. Come anticipato, il circuito sperimentale è differente da quello di figura 3.9, in quanto l'attenzione è focalizzata sull'implementazione dell'algoritmo di tracking, che è del tipo Perturb & Observe. In Appendice A è riportato lo schema elettrico complessivo, il quale include tutti gli elementi che contribuiscono al risultato finale indipendentemente dalla loro ubicazione fisica: tale precisazione è necessaria poiché, in realtà, la parte circuitale contenente il microcontrollore è contenuta nella scheda dimostrativa PICDEM2 Plus fornita da Microchip assieme ai tool di sviluppo presenti in dipartimento, mentre

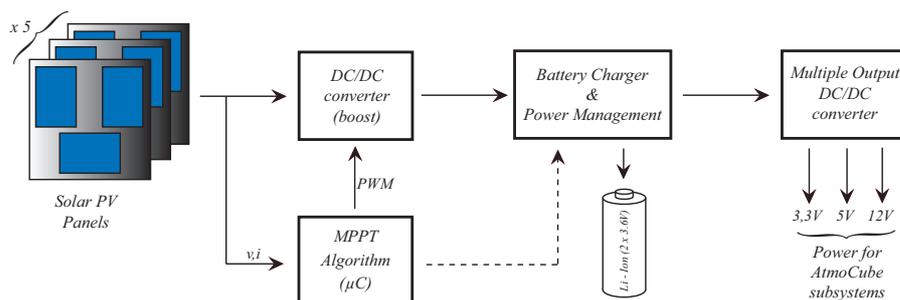


Figura 3.9: Schema a blocchi dello stadio di alimentazione con impiego di un controllore di carica.

la sola parte di potenza è stata realizzata su una scheda a parte. Il collegamento elettrico è stato reso possibile (e facilitato) dalla presenza di svariati connettori di interfacciamento della PICDEM2 con circuiti esterni (si veda la figura 3.10).

La costruzione della sezione di potenza è avvenuta utilizzando la tecnica *dead-bug*, così chiamata

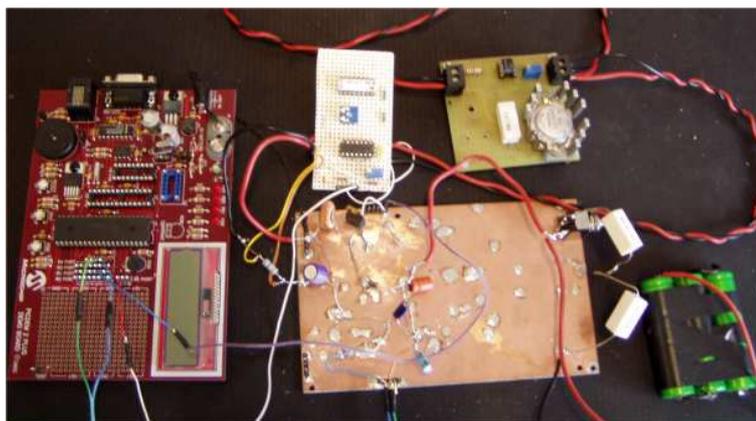


Figura 3.10: Versione sperimentale del convertitore MPPT; si noti la scheda PICDEM2 Plus sul lato sinistro.

perchè, per praticità di collegamento, i circuiti integrati sono montati in posizione capovolta, analoga a quella di una cimice passata a miglior vita. Sebbene l'aspetto esteriore a realizzazione ultimata possa portare a concludere che tale metodo sia fondamentalmente un "accrocchio di componenti", vi sono, in realtà, svariati vantaggi che portano il progettista a preferirne l'utilizzo, soprattutto per circuiti analogici e ad alta frequenza:

- La realizzazione fa uso di una basetta ramata utilizzata come piano di massa, pertanto tutti i percorsi di disaccoppiamento verso il riferimento comune possono essere mantenuti corti; inoltre, un piano uniforme costituisce il miglior collegamento a stella desiderabile: ciò permette di evitare gli inconvenienti più subdoli, quali ad esempio i loop di massa.
- E' molto facile saldare dei lamierini o altri pezzi di basetta al fine di schermare differenti parti del circuito.
- E' possibile quantificare con maggiore accuratezza l'impedenza caratteristica degli spezzoni

di filo di collegamento e le capacità parassite verso massa, poiché la posizione del piano di riferimento rispetto ai conduttori è nota.

- Le modifiche al circuito sono facilmente attuabili per chi ha dimestichezza con la saldatura a stagno–piombo.

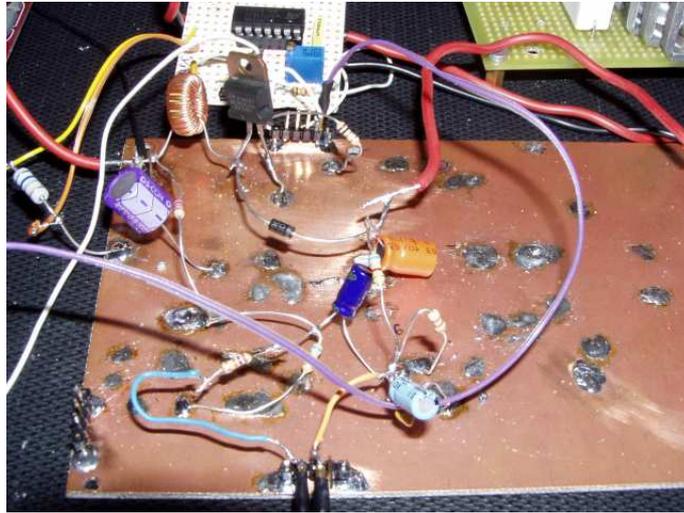


Figura 3.11: *Convertitore boost realizzato in dead-bug technique.*

Tutti questi vantaggi possono essere sfruttati a patto di mantenere i tratti di collegamento elettrico sufficientemente corti (per minimizzare le induttanze parassite) ed il più possibile vicini al piano di massa, inoltre deve essere posta attenzione al routing, in modo da evitare di incorrere in effetti di crosstalk o più genericamente disturbi indotti (una buona pratica è quella di dare alla realizzazione un’aspetto simile al layout finale della scheda da produrre).

### 3.6.1 Componenti utilizzati

I componenti montati sono stati in parte acquisiti come samples dai relativi produttori ed in parte acquistati presso i comuni negozi di elettronica; ne consegue che i risultati ottenuti possono essere migliorati utilizzando componenti più performanti.

In particolare, sono stati reperiti:

- Transistor MOSFET IRF540: componente di potenza, ampiamente sovradimensionato rispetto ai vincoli progettuali ( $V_{DS}=100V$ ,  $I_D=23A$ ) che, tuttavia, offre una resistenza Drain–Source molto bassa (inferiore a  $77m\Omega$ ).
- Diodo Schottky 11DQ04: è in grado di sopportare una corrente media di 1A, con una caduta di tensione pari a circa 0.5V.
- Induttore: è di tipo avvolto su nucleo toroidale, valore  $100\mu H$ .
- Sonda di corrente: è il circuito integrato Maxim MAX471; esso richiede solamente un resistore esterno per fissare la transresistenza totale dell’amplificatore, inoltre possiede anche un’uscita **SIGN** che indica il verso della corrente misurata (in tal modo è possibile valutare, ad esempio, sia la corrente di carica della batteria che quella di scarica).

Di questi, il MAX471 è stato consegnato tardivamente, pertanto la realizzazione sperimentale non ha potuto essere completata; la verifica dell'algoritmo di tracking è stata compiuta simulando le variazioni della corrente erogata dai pannelli attraverso un trimmer regolato manualmente. I restanti componenti hanno funzioni accessorie; ad esempio, le coppie R4–R5 e R12–R13 consentono di adattare la dinamica del convertitore A/D a quella dei segnali in ingresso (le tensioni dei pannelli e della batteria); esse includono un condensatore supplementare necessario a filtrare il ripple residuo, il quale potrebbe introdurre errori di misura. Chiaramente, tali resistenze devono possedere una tolleranza pari all'1% o inferiore, oltre ad un basso coefficiente di temperatura, poiché determinano il rapporto di conversione tra i valori analogici e quelli digitali e quindi il funzionamento del sistema di tracking.

Il condensatore C2, teoricamente pari a  $1200\mu\text{F}$  è stato sostituito con uno avente un valore inferiore, poiché il test è stato eseguito solo su carichi lineari e tempo-invarianti (resistori) e sugli accumulatori, quindi non vi era la necessità di soddisfare richieste di picchi di corrente.

### 3.6.2 Costruzione e collaudo

La costruzione del circuito è avvenuta per passi successivi: in primo luogo si è collegato il microcontrollore e si è realizzato un software per rendere operative le periferiche di conversione A/D e PWM; successivamente è stata montata la parte di potenza e collaudata pilotando il transistor MOSFET con un segnale proveniente da un generatore di funzioni ed infine si è collegato tutto assieme inserendo dei semplici loop di controllo software per testare la regolazione del duty-cycle al fine di fornire una tensione di uscita stabilizzata.

Affinché il sistema possa operare correttamente quando sarà collegato all'array di pannelli solari, si è ritenuto utile realizzare un secondo circuito che provvedesse a simulare la caratteristica tensione–corrente di un pannello; esso è fondamentalmente un generatore di corrente realizzato con un amplificatore operazionale, un transistor PNP di potenza e due resistori; un trimmer collegato a partitore di tensione permette di regolare la tensione sul piedino non invertente dell'amplificatore e variare di conseguenza la corrente di cortocircuito del pannello simulato. Lo schema del circuito è riportato in figura 3.12. L'andamento della caratteristica oltre il punto

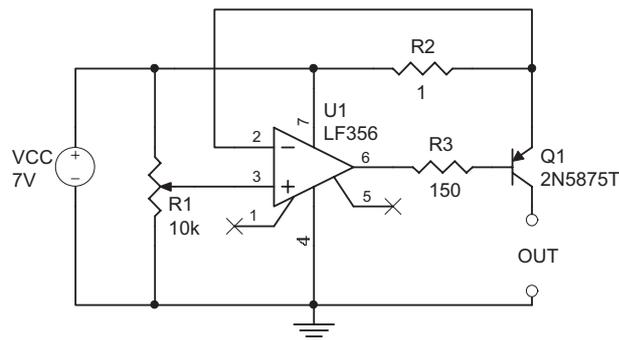


Figura 3.12: Schema elettrico del circuito emulatore di pannelli solari.

di massima potenza è ottenuto sfruttando la non linearità determinata dal valore finito della tensione di alimentazione: al fine di mantenere costante la corrente di uscita al crescere della tensione  $V_{OUT}$ , la tensione collettore–emettitore di Q1 deve diminuire (per l'azione dell'amplificatore operazionale); ciò può aver luogo solo fino a quando il transistor non giunge in saturazione;

quando la  $V_{CE}$  raggiunge il valore minimo (qualche decimo di Volt), anche la caduta di tensione su  $R2$  inizia a diminuire e quindi la corrente sul carico, con una velocità tanto maggiore quanto  $R2$  è piccola.

Una volta in possesso del circuito appena descritto, è stato possibile realizzare un software

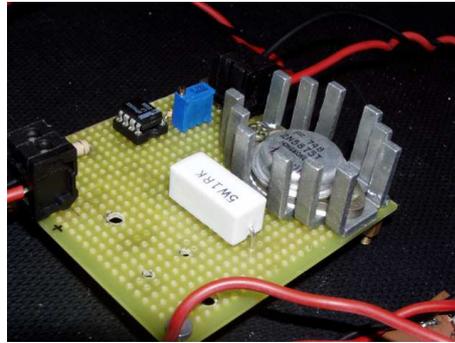


Figura 3.13: *Circuito emulatore di pannelli solari.*

di prova al fine di prendere dimestichezza nel controllo della parte di potenza attraverso il microcontrollore. In primo luogo è stato realizzato un alimentatore stabilizzato con uscita a 10V che utilizzava la retroazione negativa per mantenere fisso il valore della tensione in uscita. Si è constatato che per carichi con assorbimenti troppo elevati la tensione non poteva essere mantenuta a 10V poiché quella in ingresso diventava troppo piccola. Infatti, lavorando sulla zona piatta della caratteristica V-I dei pannelli, è sufficiente una variazione minima della corrente per provocare un brusco calo di tensione; il problema riscontrato aveva origine dal semplice fatto che i pannelli non erano in grado di erogare tutta la potenza richiesta, nemmeno operando nel punto di massima potenza.

Si è notato, inoltre, che pur collegando un carico idoneo il semplice sistema di controllo non risultava caratterizzato da un unico punto di equilibrio stabile: partendo da un duty-cycle vicino al 100% non veniva attuata l'azione di controllo necessaria a portare l'uscita a 10V, poiché la tensione d'ingresso subiva un abbassamento di cui il controllore non era a conoscenza, perché nella prima realizzazione era misurato il solo valore della tensione sul carico.

Per risolvere quest'ultimo problema è stato sufficiente abilitare un ulteriore canale del convertitore A/D ed inserire un secondo loop di reazione in modo da rilevare quando la tensione in ingresso fosse troppo bassa a causa di un eccessivo assorbimento da parte del convertitore DC-DC; l'azione di controllo che è stata inserita corrisponde alla diminuzione del duty-cycle in modo da ridurre il carico visto dai pannelli e riportare la tensione d'ingresso al valore nominale di 6.5V circa.

La fase finale della realizzazione ha avuto come scopo l'implementazione del controllo MPPT vero e proprio. Sfortunatamente, a causa di ritardi nella consegna, le sonde di corrente MAX471 non sono divenute disponibili, pertanto non si è potuto verificare l'algoritmo nelle condizioni reali d'impiego (ossia collegato ad un generatore avente una curva caratteristica non lineare, analoga a quella di un pannello fotovoltaico).

Approfitando del fatto che il MAX471 fornisce una tensione proporzionale alla corrente misurata, si è deciso di simulare manualmente le variazioni della corrente proveniente dai pannelli solari, applicando al piedino RA0 (AN0) del PIC16F877 una tensione variabile da 0 a 5V, ottenuta

regolando manualmente un trimmer resistivo. Il collaudo ha confermato la correttezza dell'algoritmo: un aumento della potenza fornita dal pannello causa la diminuzione del duty-cycle del convertitore DC-DC, ovvero l'innalzamento della tensione di lavoro dei pannelli solari, mentre una diminuzione della potenza causa l'effetto contrario. La forma d'onda in figura 3.14 mostra l'andamento dei segnali sui piedini di gate (CH1) e drain (CH2) del MOSFET di potenza.

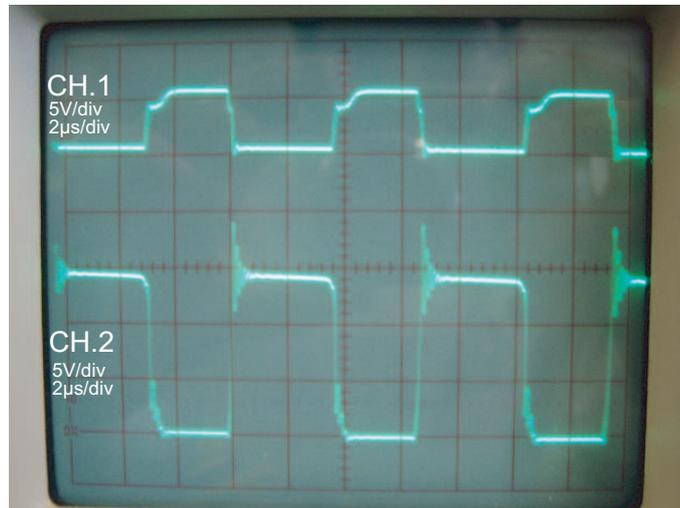


Figura 3.14: Andamento della commutazione nel MOSFET Q1 (IRF540).

### 3.7 Realizzazione del software

Il circuito integrato PIC16F877 contiene al suo interno una serie di periferiche che gli permettono di eseguire funzioni complesse con un minimo di componenti esterni; tra di esse vi sono quelle utilizzate nel progetto:

- **Convertitore A/D:** il PIC 'F877 contiene un convertitore analogico-digitale a 10 bit ed 8 canali, con la possibilità di fissare i limiti della tensione in ingresso ( $V_{REF+}$  e  $V_{REF-}$ ); ad esempio, se si è in possesso di un segnale di 1V picco-picco a bassissima frequenza il quale è affetto da un offset costante di 3V, è possibile impostare  $V_{REF-}$  a 2.5V e  $V_{REF+}$  a 3.5V, cosicché si può evitare di utilizzare un condensatore di disaccoppiamento ingombrante e costoso. Nel progetto è sfruttata la tensione di riferimento generata internamente dal  $\mu C$  ( $V_{REF+} = 5V$  e  $V_{REF-} = 0V$ ), inoltre i risultati delle conversioni vengono troncati nei due bit meno significativi, ottenendo un passo di quantizzazione pari a  $5/256 \approx 20mV$ , più che sufficiente per l'applicazione.
- **Modulo PWM:** utilizza il Timer2 e parte dell'hardware relativo alla periferica Capture/Compare; permette di ottenere un'onda rettangolare a duty-cycle variabile sui due piedini del microcontrollore RC1 e RC2. La comodità di utilizzo è determinata dalla facilità nell'impostazione del duty-cycle, ottenibile scrivendo due registri; inoltre, è possibile ricevere un segnale di interrupt dalla periferica ad intervalli di  $N$  cicli dell'onda rettangolare, dove  $N$  è configurabile dall'utente attraverso opportuni registri di controllo del Timer 2.

Le procedure per la configurazione delle periferiche sono adeguatamente spiegate nel materiale fornito da Microchip e nelle numerose application notes che la stessa azienda pubblica continuamente. In linea di massima, i documenti cui fare riferimento sono (in ordine di importanza):

1. **DS39582B:** datasheet dei microcontrollori PIC16F87xA. Contiene una descrizione sufficientemente dettagliata del funzionamento di tale sottofamiglia.
2. **DS33023A:** manuale di riferimento per la famiglia PIC16 (microcontrollori con bus dati a 8bit e bus istruzioni a 14bit); include spiegazioni approfondite ed esempi sull'architettura, le periferiche ed il set di istruzioni.
3. **DS33014J:** manuale d'uso dell'assembler per PIC (MPASM), del linker (MPLINK) e del gestore delle librerie (MPLIB). E' un riferimento indispensabile se si desidera scrivere software per dispositivi PIC16.

La versione software definitiva implementa l'algoritmo Perturb & Observe, secondo il diagramma di flusso riportato in figura 3.15 dove, per facilitare la comprensione del listato assembler, si sono utilizzati i nomi delle variabili presenti nel sorgente.

La valutazione della tensione e della corrente provenienti dai pannelli solari è effettuata ogni

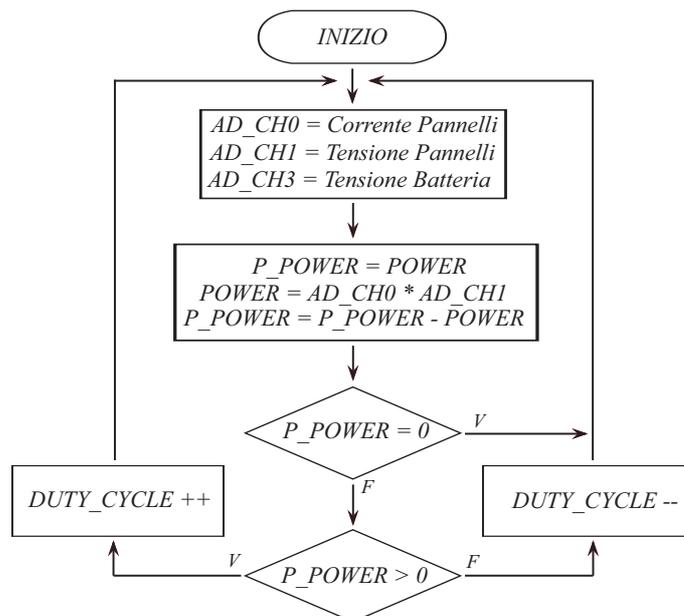


Figura 3.15: Diagramma di flusso dell'algoritmo P&O.

10ms circa, poiché le variazioni di intensità luminosa e/o temperatura non sono particolarmente rapide nell'ambiente spaziale. Tale tempo può essere ulteriormente incrementato, se necessario.

Terminata la fase di acquisizione e conversione, la quale richiede circa  $40\mu\text{s}$  per canale, i dati a 10 bit prelevati dai registri del convertitore A/D vengono copiati nelle locazioni  $AD\_CHx\_YY$ , dove  $x$  indica il numero del canale, mentre  $YY$  denota il byte più significativo (*HI*) o quello meno significativo (*LO*); successivamente si esegue un troncamento a 8 bit dei dati convertiti, al fine di rendere più agevoli i calcoli successivi. Infatti la moltiplicazione tra tensione e corrente

per il calcolo della potenza fornita dai pannelli solari produrrebbe un risultato lungo 20 bit, difficoltoso da gestire dato che il bus dati della famiglia PIC16 ha una larghezza di 8 bit.

Una volta calcolata la potenza, questa è disponibile nella variabile *POWER* da 16 bit; il passo successivo consiste nel calcolo dell'incremento della potenza stessa, sottraendo il valore attuale da quello misurato durante il ciclo precedente (contenuto nella variabile *P\_POWER*): a seconda del risultato, il duty-cycle del segnale PWM di pilotaggio del convertitore DC-DC viene variato per attuare l'inseguimento del MPP; ad esempio, ricordando che per un convertitore boost  $V_{in} = (1 - D)V_{out}$ , una diminuzione della potenza generata indica che la tensione corrispondente al MPP è stata superata, quindi è necessario diminuire la differenza di potenziale ai capi dei pannelli aumentando il valore di *D*.

Sebbene la fase di collaudo sia stata eseguita simulando manualmente le variazioni della corrente fornita dai pannelli fotovoltaici, il software è già pronto a gestire la misura reale proveniente dall'integrato MAX471; eventualmente, in fase di integrazione con le altre routine di gestione del satellite potrebbe divenire necessario modificare il sorgente in modo da ottimizzare il funzionamento complessivo.

Inoltre, se si desidera seguire la soluzione proposta (celle Li-Ion collegate direttamente all'uscita del convertitore DC-DC), è necessario realizzare una routine supplementare che segnali le condizioni di over e under-voltage ai capi della batteria, in modo da prendere le necessarie precauzioni per non pregiudicarne le prestazioni.

### 3.8 Bus di alimentazione a 5V e 3.3V

In questo breve paragrafo si riporta una possibile configurazione circuitale utilizzabile per ricavare le tensioni di 3.3V e 5V necessarie ad alimentare tutti i sottosistemi installati a bordo di AtmoCube.

Innanzitutto, si rende indispensabile che il bus di alimentazione possa essere abilitato e disabilitato così da poter fornire potenza selettivamente: ciò impone l'utilizzo di convertitori provvisti di piedino di ENABLE (o SHUTDOWN), a sua volta controllato dal microprocessore centrale; è conveniente che quest'ultimo possieda un regolatore di tensione dedicato, poiché deve essere sempre operativo: a tale scopo può essere sufficiente un convertitore lineare, poiché la corrente assorbita non è eccessiva (15mA con oscillatore a 20MHz).

Avendo proposto di collegare 3 celle al litio in serie, la tensione dei 12V è già disponibile, dunque è possibile lavorare in discesa attraverso dei convertitori step-down. Il rendimento di tali convertitori, oltre a variare con la corrente fornita al carico, dipende anche dal drop di tensione tra ingresso ed uscita: maggiore è la differenza tra le due tensioni, minore è il rendimento; ciò rende consigliabile collegare il convertitore per i 3.3V all'uscita di quello da 5V.

Tra i numerosissimi circuiti integrati che implementano funzioni di conversione DC/DC, si propone il modello Linear Technology LT1265, disponibile nelle versioni a 3.3 e 5V; esso integra il MOSFET di potenza ed è in grado di erogare correnti fino a 1.2A, inoltre possiede un loop interno di corrente che assicura una veloce risposta alle variazioni di carico e della tensione d'ingresso. Il rendimento medio è pari al 90%. La realizzazione pratica è facilitata dalle indicazioni fornite dal costruttore, il quale oltre a riportare nel datasheet le formule e le linee guida per l'utilizzo del proprio prodotto, consiglia anche degli specifici componenti che si adattano agli

impieghi più comuni.

Lo schema a blocchi complessivo del sistema di alimentazione è visibile in figura 3.16 e differisce da quello di figura 3.9 per l'assenza del circuito integrato di controllo della carica della batteria; quest'ultima è collegata all'uscita del MPPT ed alimenta direttamente i sistemi funzionanti con tensioni comprese tra 9 e 12V (magnetometro e spettrodosimetro).

Per quanto riguarda lo schema elettrico dei soli convertitori in discesa è possibile far riferimen-

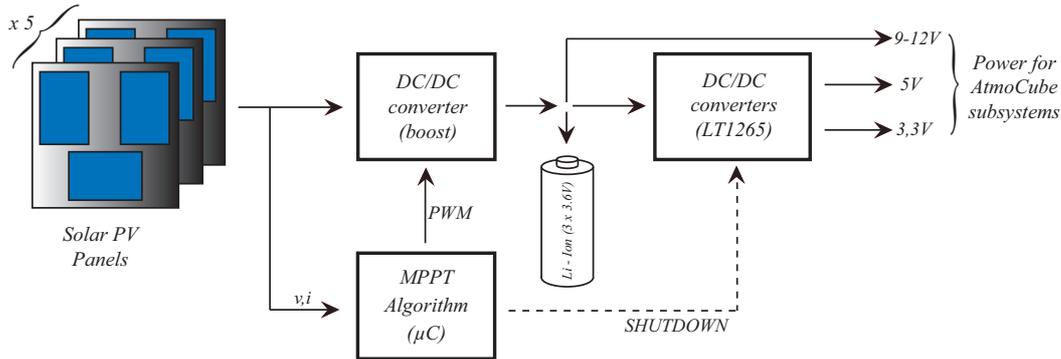


Figura 3.16: Schema a blocchi dello stadio di alimentazione con batteria collegata direttamente all'uscita del MPPT.

to all'appendice B; i valori dei componenti sono quelli consigliati dal costruttore per ottenere correnti d'uscita dell'ordine di 1A; eventualmente è possibile scalarli in proporzione al consumo complessivo dei sottosistemi collegati a valle, tuttavia a tale scopo è preferibile essere in possesso del budget di potenza definitivo. Allo stato attuale sussistono ancora delle incertezze sul consumo del trasmettitore a radiofrequenza, a loro volta determinate dalla necessità di definire il tipo di antenna installata (si ricorda che potrebbero essere necessarie due antenne, una per la trasmissione e la ricezione dati e l'altra per l'invio di un segnale di riconoscimento del satellite), pertanto un dimensionamento accurato necessita delle specifiche di sistema complessive, ancora in fase di elaborazione.

## Capitolo 4

# Conclusioni

La presente relazione ha avuto come oggetto lo studio preliminare di un sistema di alimentazione per il satellite AtmoCube. L'iter progettuale, sebbene incompleto, è stato strutturato secondo un preciso ordine. In primo luogo si sono analizzate le condizioni in cui il satellite è chiamato ad operare, allo scopo di stabilire sin dal principio la fattibilità della missione dal punto di vista dell'approvvigionamento energetico: ciò è stato ottenuto analizzando ed integrando i risultati cui è pervenuto il Dipartimento di Fisica durante lo studio di missione; è stata eseguita, in particolare, una simulazione della durata di un anno, attraverso la quale si è ottenuto l'andamento della potenza elettrica fornita dai pannelli fotovoltaici. Tali dati permettono di fissare un limite superiore all'energia disponibile, costituendo un valido ausilio per l'elaborazione di un budget di potenza più accurato di quello attuale.

Una volta in possesso di stime ragionevoli per la potenza disponibile, si è reso necessario uno studio dello stato dell'arte al fine di comprendere i metodi utilizzati per la realizzazione di sistemi di alimentazione che massimizzino il rendimento di conversione dell'energia solare in elettrica: è emersa la necessità di dotare i pannelli fotovoltaici di un circuito convertitore DC-DC controllato da un algoritmo di Maximum Power Point Tracking al fine di farli lavorare nel punto a massima potenza della loro caratteristica  $V-I$ . Tra i vari sistemi ad inseguimento analizzati si è scelto il metodo Perturb & Observe, dato che la velocità di risposta non costituisce un vincolo particolarmente stringente nell'ambiente spaziale.

L'ultima fase, tipicamente progettuale, si è concentrata sulla realizzazione del convertitore MPPT e dell'algoritmo di controllo; sono state compiute delle scelte basandosi sui dati relativi ai pannelli ed alle celle Li-Ion che hanno portato alla costruzione di un convertitore boost (elevatore) alla cui uscita sono direttamente collegate 3 celle da 3.6V in serie; in questo modo è stato possibile massimizzare il rendimento nelle condizioni di sola alimentazione a batteria, rendendo superfluo l'utilizzo di un secondo convertitore elevatore per la strumentazione funzionante a 12V.

Per quanto riguarda i punti ancora in sospeso si citano:

1. Ottimizzazione del software relativo all'algoritmo di tracking (P&O); non è stato possibile completarla a causa della consegna tardiva dei circuiti integrati per la misura della corrente proveniente dai pannelli.
2. Realizzazione e collaudo della sezione circuitale comprendente i due convertitori DC-DC per l'abbassamento della tensione a 3.3 e 5V.

3. Studio termico del satellite AtmoCube: in particolare si rende necessaria la stima della capacità termica complessiva al fine di determinare con maggiore accuratezza l'escursione della temperatura; va aggiunta, inoltre, la progettazione di un sistema di misura della temperatura dei pannelli solari, delle celle Li-Ion e delle altre parti sensibili.
4. Integrazione di tutti i circuiti facenti parte del sistema di alimentazione in un unico PCB e collaudo complessivo, eventualmente corredato da misure relative ai disturbi provocati dai convertitori (EMI).
5. Studio degli effetti delle radiazioni ad alta energia sui sistemi elettronici (SEE); individuazione dei componenti sensibili e utilizzo di prodotti *radiation hardened* o di sistemi per il ripristino dell'operatività a seguito di fenomeni di latchup.

Ai punti menzionati si aggiunge la fase finale di integrazione del software di controllo dell'alimentatore all'interno di quello centrale adibito alla gestione degli altri sottosistemi installati a bordo di AtmoCube.

## Appendice A

# Schema elettrico del controllore MPPT

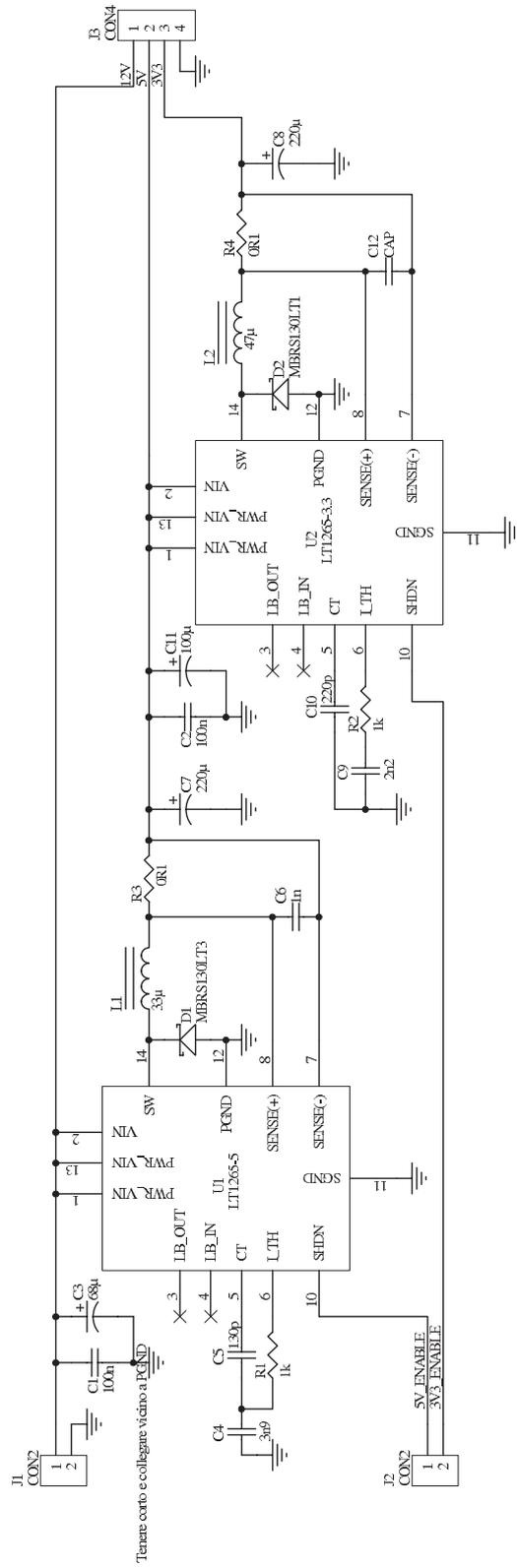
Si propone in appendice lo schema elettrico relativo alla realizzazione sperimentale del controllore MPPT; la parte circuitale relativa al microcontrollore è già disponibile nella scheda dimostrativa di Microchip PICDEM2 Plus, pertanto è stato montato il solo circuito di potenza con i sensori di corrente ed i partitori resistivi per lo scalaggio delle tensioni, in modo da riportarle entro la dinamica del convertitore A/D presente all'interno del PIC16F877.



## Appendice B

# Schema elettrico interfaccia bus alimentazione

Schema elettrico degli stadi convertitori di tensione a 3.3V e 5V. In parallelo ad essi può essere collegato un regolatore lineare per l'alimentazione continua del microcontrollore (non raffigurato).



## Appendice C

# Potenza disponibile dai pannelli solari

Si includono i grafici relativi alla simulazione eseguita con STK per stimare la potenza disponibile lungo l'arco di un anno della vita di AtmoCube (l'energia è riportata nella figura 1.2).

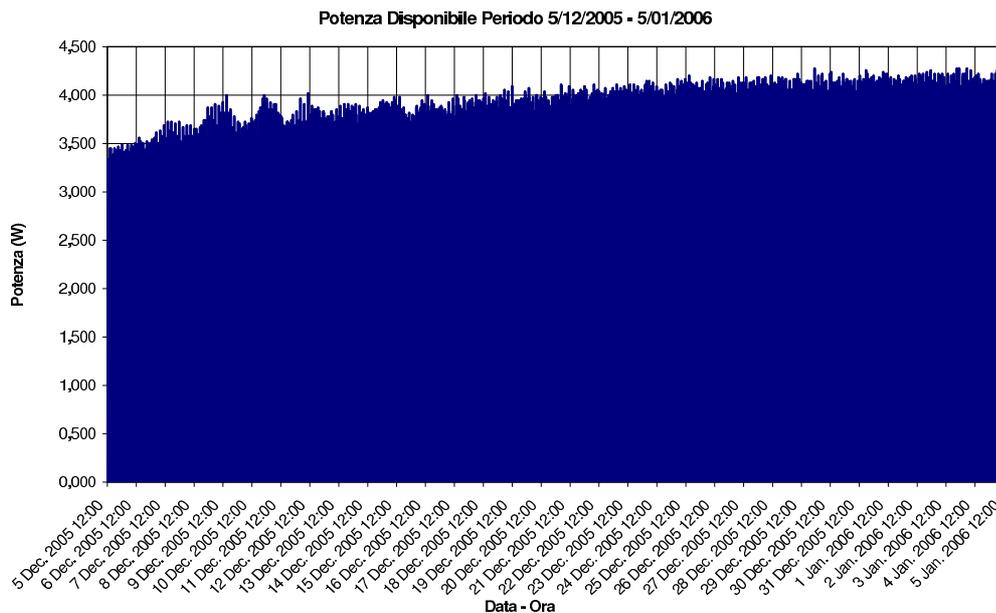


Figura C.1: *Dicembre 2005 – Gennaio 2006.*

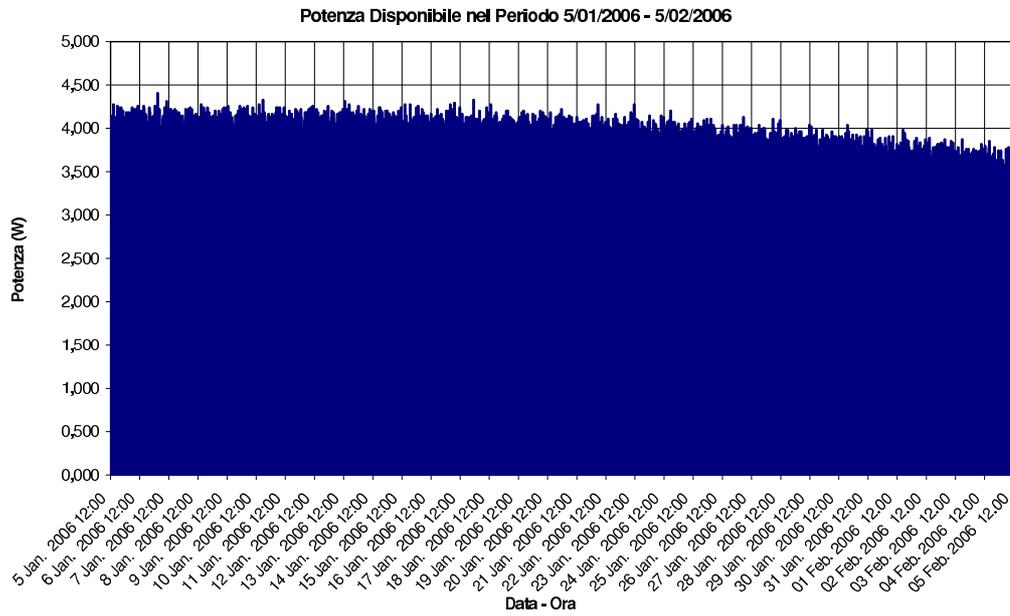


Figura C.2: Gennaio 2006 – Febbraio 2006.

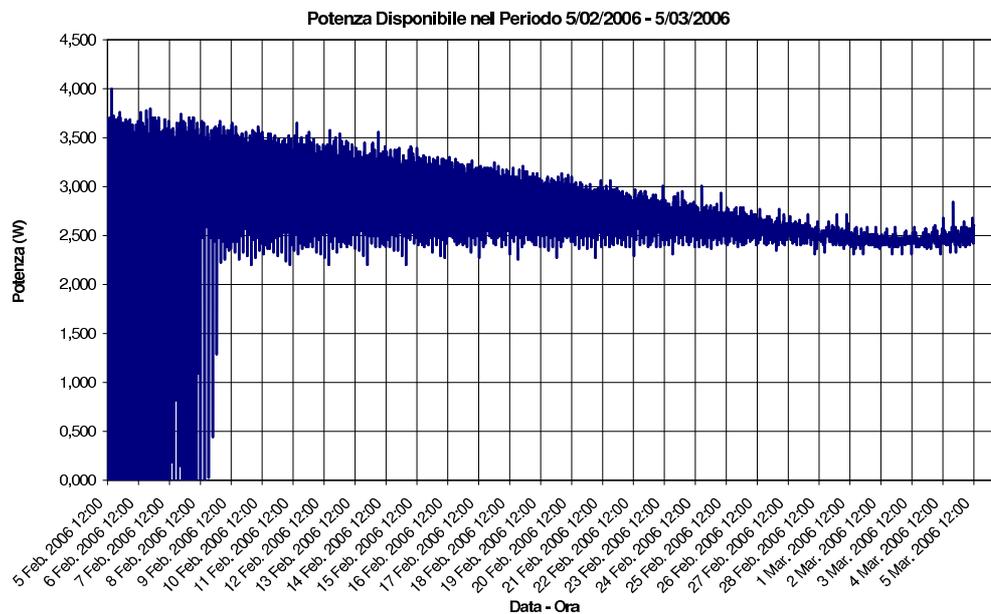


Figura C.3: Febbraio 2006 – Marzo 2006.

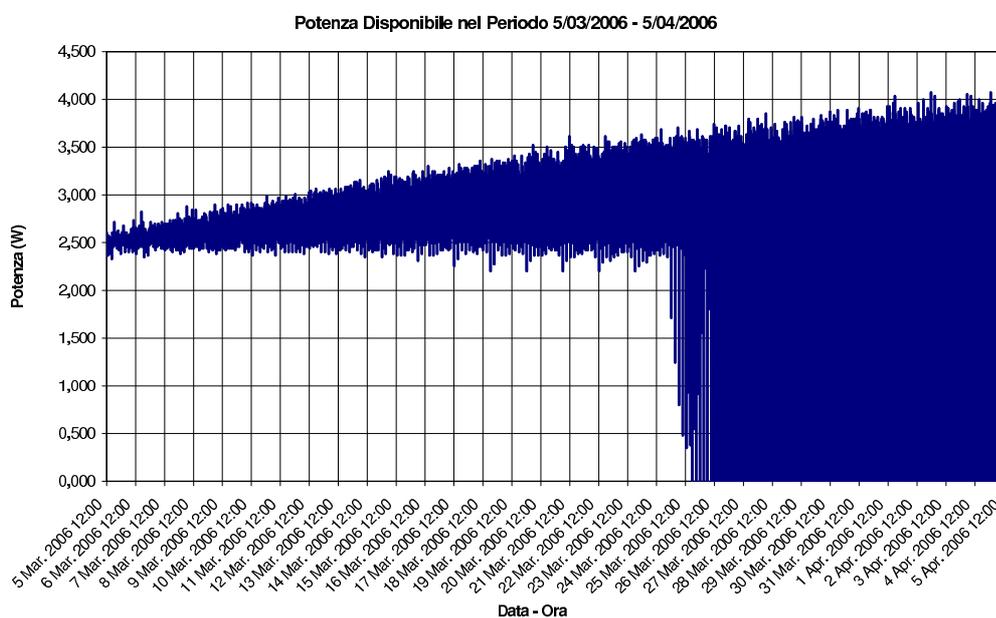


Figura C.4: *Marzo 2006 – Aprile 2006.*

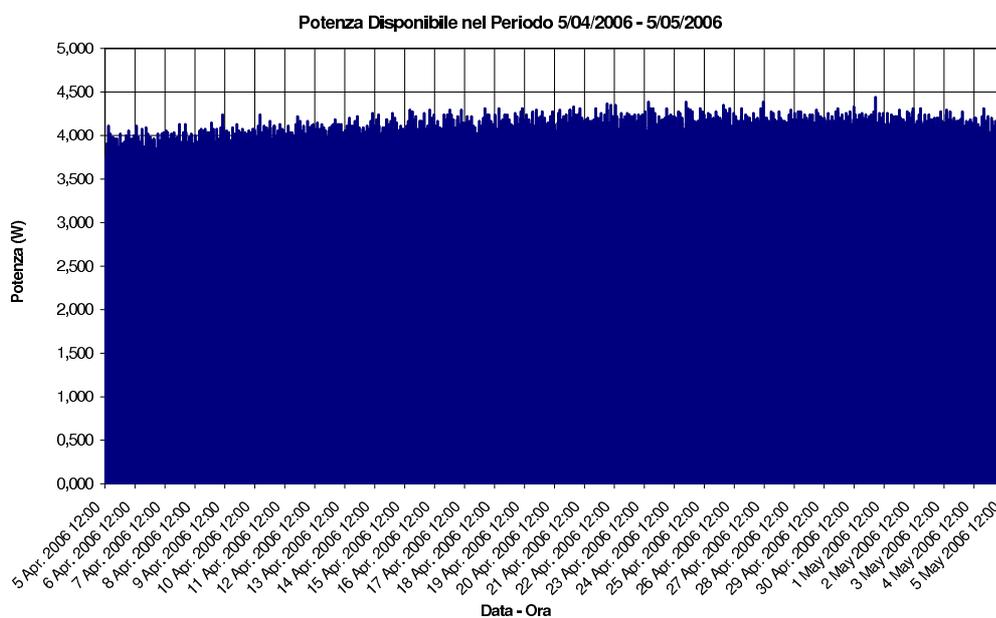


Figura C.5: *Aprile 2006 – Maggio 2006.*

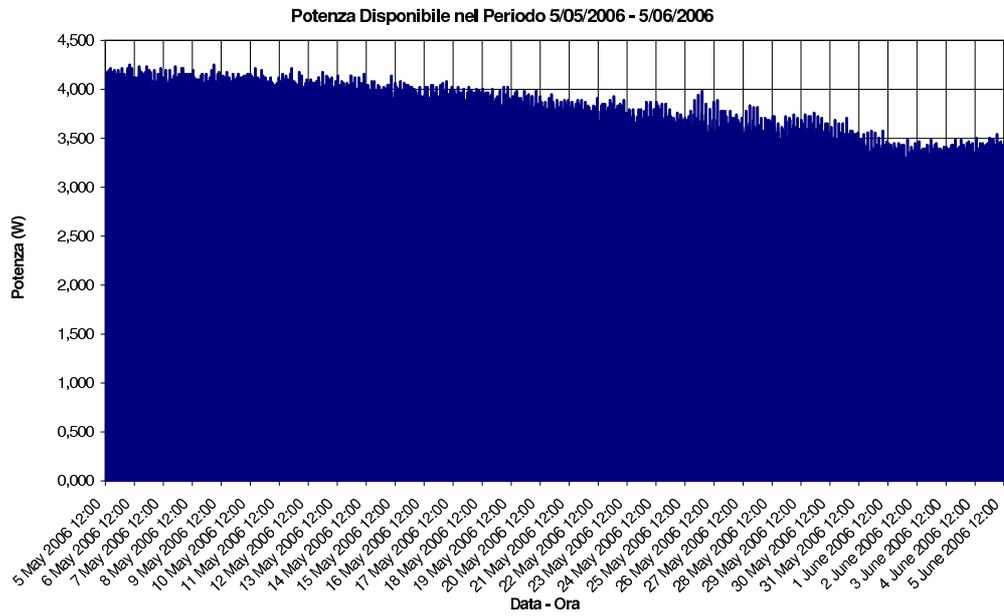


Figura C.6: Maggio 2006 – Giugno 2006.

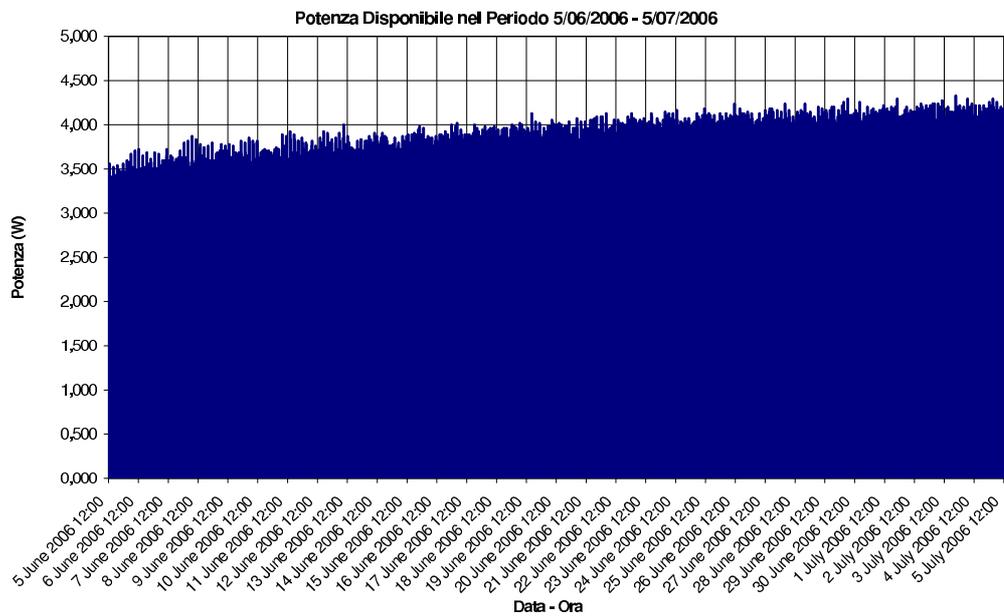


Figura C.7: Giugno 2006 – Luglio 2006.

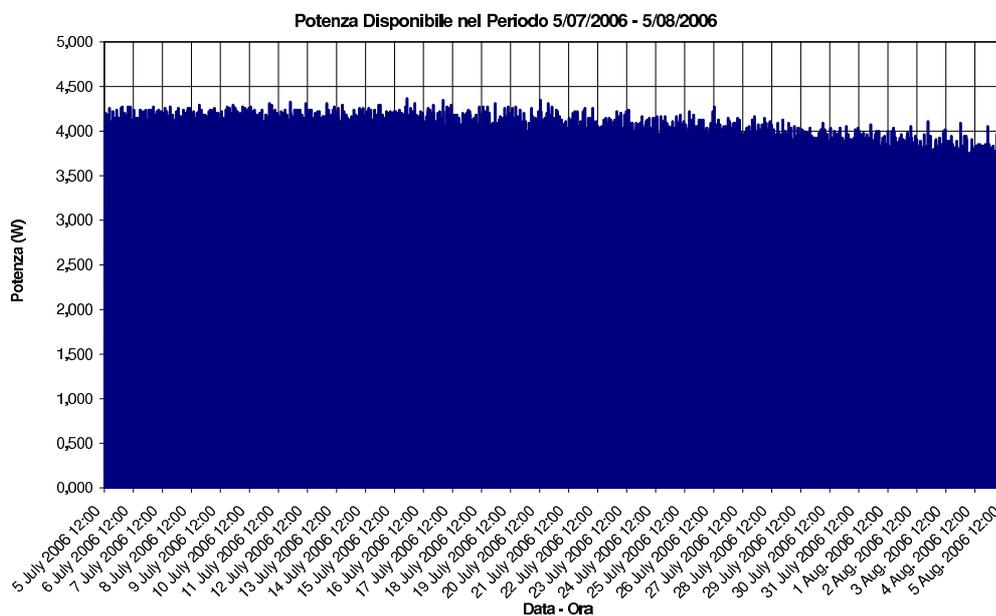


Figura C.8: *Luglio 2006 – Agosto 2006.*

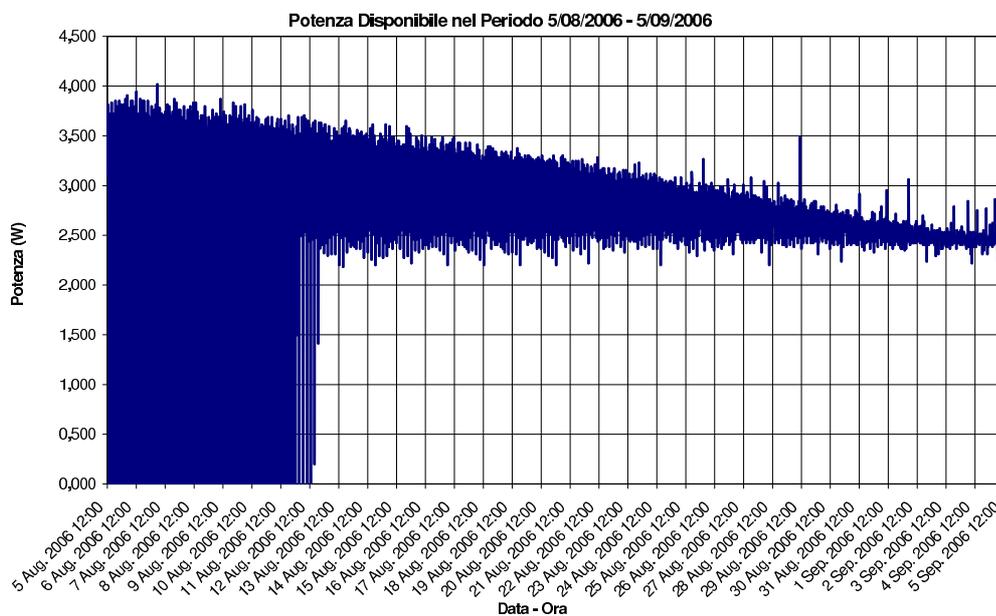


Figura C.9: *Agosto 2006 – Settembre 2006.*

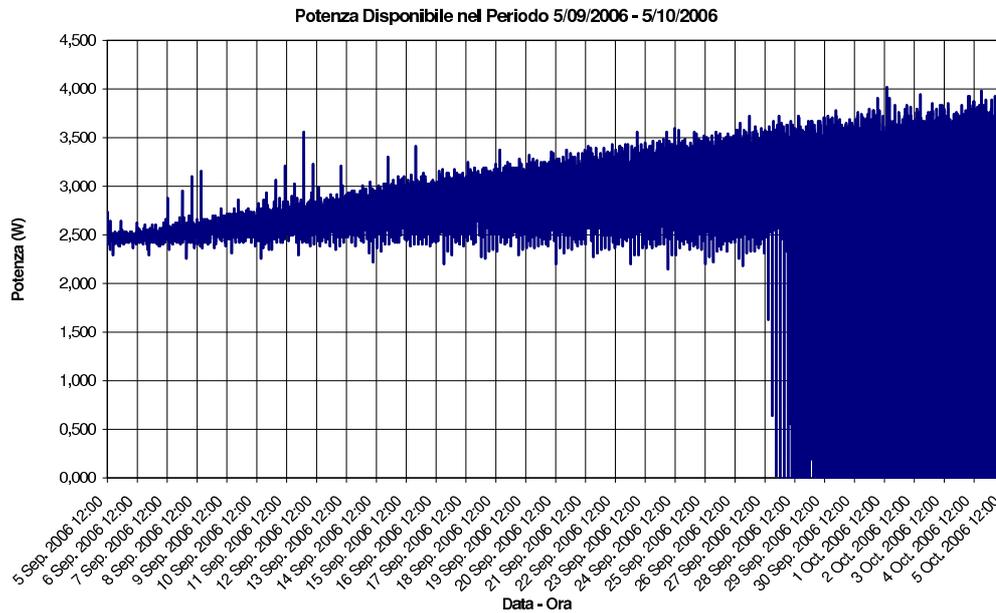


Figura C.10: *Settembre 2006 – Ottobre 2006.*

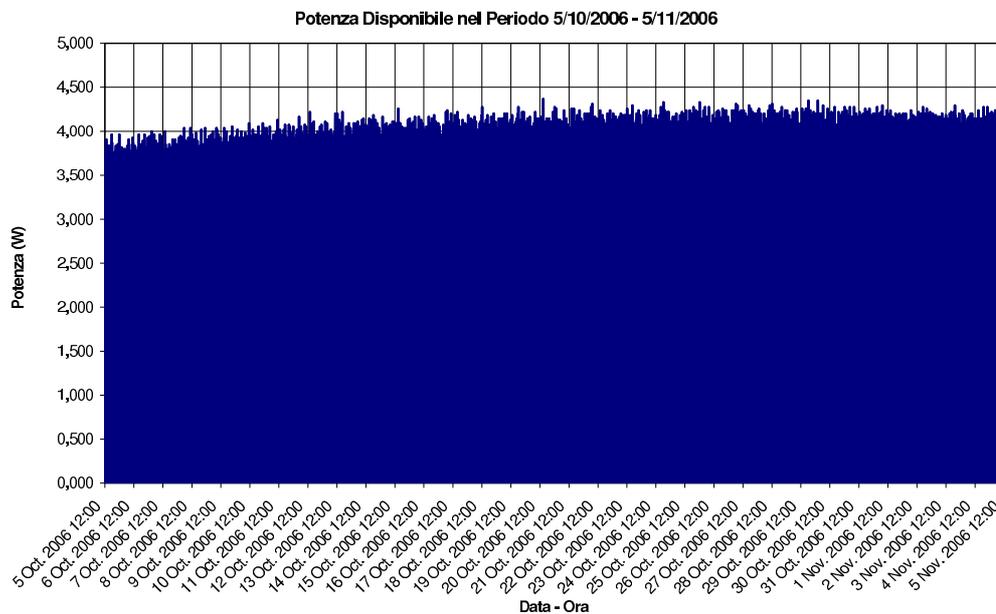


Figura C.11: *Ottobre 2006 – Novembre 2006.*

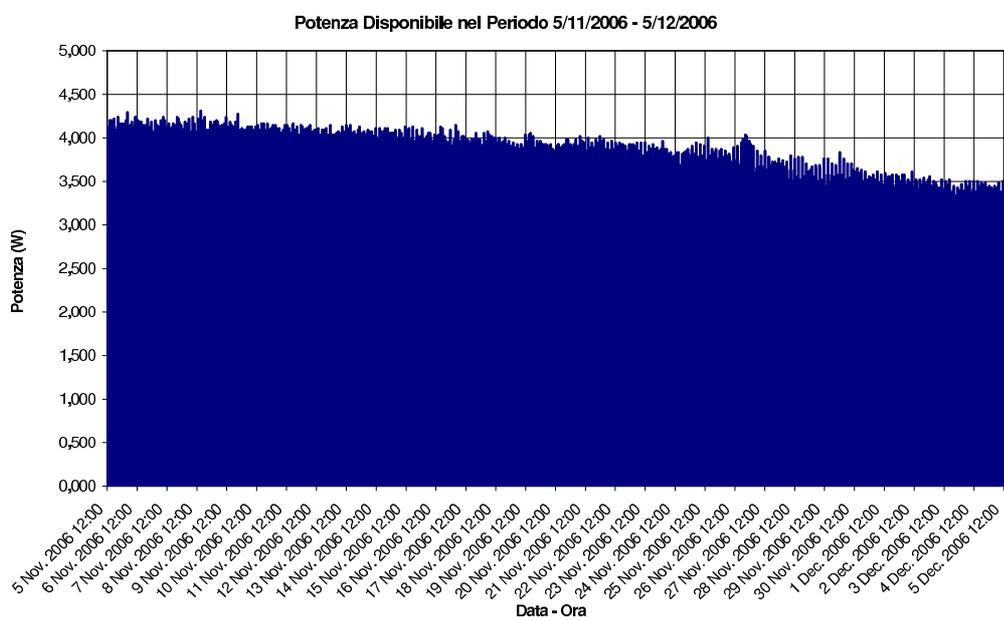


Figura C.12: *Novembre 2006 – Dicembre 2006.*



# Bibliografia

- [1] Orlando E. – AtmoCube: analisi di un satellite per lo studio dell’atmosfera terrestre – Tesi di Laurea in Fisica – A.A. 2003-2004 (12/2004).
- [2] Midya P., Krein P.T., Turnbull R.J., Reppa R., Kimball J. – Dynamic Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Applications – Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialists Conference – Vol. 2, pp. 1710–1716 (1996).
- [3] Lim Y.H., Hamill D.C. – Simple maximum power point tracker for photovoltaic arrays – Electronics Letters – Vol.36, No.11, pp. 997–999, 25th May 2000.
- [4] Hussein K.H., Muta I., Hoshino T., Osakada M. – Maximum Photovoltaic Power Tracking: an Algorithm for Rapidly Changing Atmospheric Conditions – IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib – Vol. 142, pp. 59–64 (1995).
- [5] Teulings W.J.A., Marpinard J.C., Capel A., O’Sullivan D. – A new maximum power point tracking system – Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialists Conference 1993 – pp. 833–838.
- [6] Gow J.A., Manning C.D. – Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulations studies – IEE Proc.-Electr. Power Appl. – Vol. 146, No.2, pp. 193–200 (March 1999).
- [7] Yuvarajan S., Xu S. – Photo-voltaic power converter with a simple maximum-power-point-tracker – Proceedings of the 2003 International Symposium on Circuits and Systems – Vol. 3, pp. 399–402.
- [8] Walker G. – Evaluating MPPT converter topologies using a Matlab PV model – Journal of Electrical & Electronics Engineering, Australia – Vol. 21, No. 1, pp. 49–56 (2001).
- [9] Heidt H., Puig-Suari J., Moore A.S., Nakasuka S., Twiggs R.J. – CubeSat: A new Generation of Picosatellite for Education and Industry Low-Cost Space Experimentation – 14<sup>th</sup> Annual/USU Conference on Small Satellites.
- [10] Tan B.L., Tseng K.J. – Intelligent and Reliable Power Supply System for Small Satellites – Telecommunications Energy Conference – pp.249–255 (2003).
- [11] Kester W. – Prototyping techniques help verify analog-circuit performance – Design Feature – EDN Magazine - February 1996.
- [12] Schoeman J.J., van Wyk J.D. – A simplified maximum power controller for terrestrial photovoltaic panel array – Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialists Conference – pp. 361-367 (1982).



# Ringraziamenti

Ritengo doveroso ringraziare il prof. Fragiaco per avermi seguito in questo periodo di sviluppo della mia tesina di laurea, e per la sua disponibilità a fornirmi consigli e conoscenze frutto di anni d'esperienza lavorativa nel proprio campo.

Ringrazio anche il prof. Carrato per avermi dato delucidazioni, consigli e dritte sugli obiettivi del progetto e per aver messo a disposizione i tool di sviluppo per il microcontrollore utilizzato.

Un ringraziamento va anche alla Dott.ssa Anna Gregorio che, pur non essendo direttamente coinvolta nello sviluppo della tesina, ha dato, alla pari dei suoi colleghi, la sua disponibilità e mi ha aiutato ad inquadrare meglio alcuni fattori determinanti per la stesura del capitolo 1.

Un ringraziamento particolare a Selena per avermi sopportato e confortato in questi mesi un po' più pesanti del solito. Come minimo ti devo una copia della tesi per dimostrarti che, se qualche volta ti ho dato buca, era per un buon motivo!

Ultimi, ma non meno importanti, tutti i miei amici, famigliari (mamma, papà, zii, nonni, cugini di primo, secondo e oltre grado) che mi dimostrano sempre molto affetto, anche (e soprattutto) nei momenti in cui per la testa ho solo le mie preoccupazioni e non penso, ahimè, che forse (anzi, sicuramente) ne hanno anche loro!